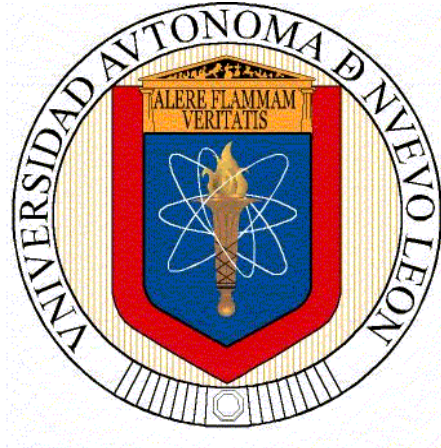


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**SISTEMA DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS Y ANÁLISIS DEL
CRECIMIENTO E INCREMENTO DE ESPECIES FORESTALES
EN GUERRERO, MÉXICO.**

POR:

JUAN MANUEL RÍOS CAMEY

Como requisito parcial para obtener el grado de
**DOCTORADO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO
DE RECURSOS NATURALES**

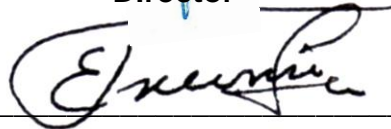
Marzo, 2021

**SISTEMA DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS Y ANÁLISIS DEL
CRECIMIENTO E INCREMENTO DE ESPECIES FORESTALES
EN GUERRERO, MÉXICO.**

Aprobación de tesis:



Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón
Director



Dr. Eduardo Javier Treviño Garza
Codirector



Dr. Javier Jiménez Pérez
Asesor



Dr. Eduardo Alanís Rodríguez
Asesor



Dr. Héctor M. de los Santos Posadas
Asesor

Marzo, 2021

Manifiesto que la presente investigación es original y fue desarrollada para obtener el grado de Doctorado en Ciencias con orientación en Manejo de Recursos Naturales, donde se utiliza información de otros autores se otorgan los créditos correspondientes.

Juan Manuel Ríos Camey

Marzo, 2021

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por aceptarme en su programa de Doctorado y brindarme una vez más la oportunidad de superarme académicamente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de apoyo para la culminación de este nuevo grado académico.

Al Dr. Oscar A. Aguirre Calderón por haber aceptado ser el Director de esta investigación, por su amistad, confianza y gran asesoramiento para la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Eduardo Javier Treviño Garza, por haber aceptado formar parte de esta investigación y por sus acertados comentarios para la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez, por sus valiosos consejos en la elaboración de esta tesis y aceptar en formar parte del comité de tesis.

Al Dr. Eduardo Alanís Flores por aceptar gustosamente en formar parte del trabajo de investigación, así como sus sugerencias para mejorarlo.

Al Dr. Héctor Manuel De Los Santos Posadas por no dudar en ser mi asesor externo y aportar su granito de arena para la culminación del trabajo.

A mis amigos y compañeros de FCF-UANL Geraldine Espinoza, Gabriel Graciano, Martin Villela, Israel López, Pablo Marroquín, Bernardo López, Beatriz Calleja, Deisy López, Ricardo Téllez, Irasema Collin, Juan Carlos Guzmán, Rigoberto Cubas, Rubén Ortiz y demás amigos que no vienen anotados pero que siempre me brindaron su amistad durante mi estancia en la Universidad.

Finalmente le agradezco a profesores, administrativos y alumnos de la Universidad Intercultural del Estado de Guerrero (UIEG) por brindarme su apoyo en la toma de datos de campo.

Dedicatoria

A Dios por librarme de diferentes obstáculos durante mi vida, a pesar de los momentos difíciles siempre está conmigo apoyándome en superar mis metas personales.

A mis padres Antonio Ríos Granados y Floriberta Camey López, por ser los mejores guías personales, siempre sus sabios consejos los llevo conmigo; gracias por ese cariño incondicional hacia mí.

A mis hermanos, quienes siempre me apoyaron económicamente y moralmente en alguna etapa de mi formación profesional, agradecido estaré siempre de ustedes.

A mis abuelos, quienes con sus sabios consejos y experiencia me han hecho mejor persona.

A primos y sobrinos, donde quiera que se encuentren siempre los llevaré conmigo.

A mi esposa Ariadna y mi hija Melany Samantha, quienes me motivan a ser mejor cada día.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN GENERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT	xiv
CAPITULO I	17
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL	17
1.2 JUSTIFICACIÓN	22
1.3 HIPÓTESIS	24
1.4 OBJETIVOS	25
1.4.1 GENERAL	25
1.4.2 ESPECÍFICOS	25
1.5 REFERENCIAS	26
CAPITULO 2. ECUACIONES ALOMÉTRICAS DE BIOMASA Y VOLUMEN EN BOSQUES DE PINO Y ENCINO, MONTAÑA DE GUERRERO, MÉXICO	29
RESUMEN	30
ABSTRACT	31
2.1 INTRODUCCIÓN	32
2.2 MATERIALES Y MÉTODOS	34
2.2.1 Localización del área de estudio	34
2.2.2 Obtención de muestras	35
2.2.3 Obtención de volumen	37
2.2.4 Obtención de peso verde	38
2.2.5 Obtención de biomasa por componente	39
2.2.6 Ajuste alométrico	41
2.2.7 Selección del mejor modelo en base a criterios estadísticos	42
2.2.8 Distribucion de biomasa por componente	44
2.2.9 Acumulación de biomasa y volumen del rodal	44
2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45

2.3.1	Parámetros descriptivos de la muestra	45
2.3.2	Biomasa aérea	47
2.3.3	Biomasa de fuste	51
2.3.4	Biomasa de hojas-ramas	54
2.3.5	Volumen de fuste completo	57
2.3.6	Relación biomasa aérea y volumen de fuste	59
2.3.7	Proporción de biomasa por componente	62
2.3.8	Volumen y biomasa a nivel bosque	63
2.4	CONCLUSIONES	65
2.5	REFERENCIAS	66
CAPITULO 3. INCREMENTOS EN BIOMASA Y PRODUCCIÓN DE OXIGENO DE <i>Pinus oocarpa</i> Schiede. y <i>Pinus teocote</i> Schltdl. et cham., GUERRERO MÉXICO.		
	RESUMEN	72
	ABSTRACT	73
3.1	INTRODUCCIÓN	74
3.2	MATERIALES Y MÉTODOS	76
3.2.1	Características del área de estudio	76
3.2.3	Determinación de carbono y oxígeno	78
3.2.4	Modelos de crecimiento e incrementos analizados	78
3.2.5	Método de ajuste y selección de modelos	81
3.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83
3.3.1	Características de la muestra	83
3.3.2	Función de crecimiento en biomasa	84
3.3.3	Estimación de incrementos anuales	87
3.3.4	Proyección del crecimiento acumulado	88
3.3.5	Producción de oxígeno	89
3.4	Conclusiones	93
3.5	Referencias	94

CAPITULO 4. CRECIMIENTO E INCREMENTO EN DIÁMETRO, ALTURA Y VOLUMEN para <i>Pinus oocarpa</i> Schiede., MONTAÑA DE GUERRERO-101	
RESUMEN -----	102
ABSTRACT -----	103
4.1 INTRODUCCIÓN-----	104
4.2 MATERIALES Y MÉTODOS -----	106
4.2.1 Delimitación del área de estudio-----	107
4.2.2 Derribo de árboles muestra -----	107
4.2.3 Colecta de rodajas -----	107
4.2.4 Proceso de secado-----	108
4.2.5 Agrupamiento y conteo de anillos-----	108
4.2.6 Determinación de variables dasométricas -----	110
4.2.7 Ajuste de modelos de crecimiento -----	112
4.2.8 Determinación del turno absoluto -----	115
4.2.9 Determinación del turno técnico -----	115
4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	116
4.3.1 Características dasométrica de los arboles muestreados -----	116
4.3.2 Ajuste de modelos de crecimiento -----	116
4.3.3 Análisis de residuales -----	121
4.3.4 Determinación de incrementos-----	123
4.4 CONCLUSIONES -----	131
4.5 REFERENCIAS-----	132
CAPITULO V. CONCLUSIONES GENERALES -----	136

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1. Fórmulas de cubicación más empleadas para obtener volumen real de un árbol (Romanh et al., 2010; Rivas, 2006) -----	36
Cuadro 2. Ecuaciones alométricas empleadas para la estimación de volumen y biomasa de árboles, arbustos y palmas (tomado de Loetsch et al., 1973; citado por Segura y Andrade, 2008) -----	41
Cuadro 3. Características dasométricas de los árboles analizados de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, <i>Pinus teocote</i> Schl. et Cham. y <i>Quercus elliptica</i> Neé, Montaña de Guerrero ----	44
Cuadro 4. Parámetros de ajuste en biomasa aérea (B) (kg) de 3 especies forestales, Montaña de Guerrero.-----	48
Cuadro 5. Parámetros estadísticos para biomasa de fuste (Bf) en kg de 3 especies forestales, Montaña de Guerrero.-----	51
Cuadro 6. Estadísticos de mejores modelos en Bf en dos especies de <i>Pinus</i> -----	52
Cuadro 7. Estadísticos de ajuste para biomasa de hojas-ramas (Bhr) en <i>P. teocote</i> y <i>P. oocarpa</i> , Montaña de Guerrero -----	54
Cuadro 8. Parámetros de ajuste de Bhr para dos especies de <i>Pinus</i> -----	55
Cuadro 9. Bondad paramétrica de ajuste para volumen fuste completo (m ³) en <i>P. teocote</i> y <i>P. oocarpa</i> , Montaña de Guerrero -----	57
Cuadro 10. Bondad de ajuste de modelos alométricos seleccionados para estimación de Volumen fuste completo (m ³) para dos especies de <i>Pinus</i> -----	58
Cuadro 11. Modelos de crecimiento e incremento en biomasa -----	77
Cuadro 12. Características dasométricas de <i>Pinus oocarpa</i> y <i>Pinus teocote</i> , Montaña de Guerrero.	80
Cuadro 13. Indicadores estadísticos en modelización de crecimiento B de <i>P. teocote</i> y <i>P. oocarpa</i> , Guerrero.	82
Cuadro 14. Aportación diaria y por persona de Oxígeno en <i>Pinus teocote</i> Schl. et Cham. y <i>Pinus oocarpa</i> Schiede de la región Montaña del Estado de Guerrero.	89
Cuadro 15. Ecuaciones de crecimiento empleadas para determinación de incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen de <i>Pinus oocarpa</i> , Guerrero	108

Cuadro 16. Parámetros descriptivos de análisis troncales de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, Montaña de Guerrero.	112
Cuadro 17. Bondad de ajuste de modelos de crecimientos para estimación de incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen de <i>Pinus oocarpa</i> , Montaña, Guerrero.	114
Cuadro 18. Estimadores de ecuaciones seleccionadas de incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen de <i>Pinus oocarpa</i> , Guerrero.	115
Cuadro 19. Ecuaciones de crecimiento seleccionadas para estimación de incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen de <i>Pinus oocarpa</i> , Montaña de Guerrero.	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio -----	11
Figura 2. Comparativo de estimación de volúmenes de fuste completo en <i>Quercus elliptica</i> , Paraje Montero, Malinaltepec, Guerrero. -----	16
Figura 3. Pesado de componentes en especies de <i>Pinus</i> , Montaña de Guerrero -----	16
Figura 4. Relación diámetro normal y Volumen fuste completo con límites de confianza al 95% de la media mediante el ajuste del modelo 3 (Spur) para <i>Pinus teocote</i> (a) y modelo 7(Schumacher-Hall) para <i>Pinus oocarpa</i> (b), región Montaña de Guerrero.-----	26
Figura 5. Relación diámetro normal y biomasa aérea con límites de confianza al 95% de la media con ajuste del modelo 7 (Schumacher-Hall) para <i>Pinus teocote</i> (a), <i>Pinus oocarpa</i> (b) y <i>Quercus elliptica</i> (c), región Montaña de Guerrero-----	29
Figura 6. Relación biomasa aérea y volumen de fuste completo (m ³) de 3 especies forestales, Montaña de Guerrero -----	30
Figura 7. Proporción de biomasa aérea (BA) y el volumen de fuste completo de <i>Pinus teocote</i> (a), <i>Pinus oocarpa</i> (b), y <i>Quercus elliptica</i> (c), Montaña de Guerrero -----	31
Figura 8. Localización geográfica del área de estudio -----	41
Figura 9. Comportamiento de observados y predichos de modelos de crecimiento para Biomasa fuste (Bf), Carbono (C), dióxido de carbono (CO ₂) y Oxígeno (O ₂) en bosques naturales de <i>Pinus tecote</i> (A) y <i>Pinus oocarpa</i> (B), Montaña, Guerrero -----	49
Figura 10. Secuencia del incremento en biomasa de fuste (Bf) en kg, carbono (C), dióxido de carbono (CO ₂) y Oxígeno (O ₂) en <i>Pinus teocote Schl. et Cham</i> (A) y <i>Pinus oocarpa</i> (B) en bosques naturales, Montaña, Guerrero. ICA= incremento corriente anual (kg año ⁻¹); IMA= incremento medio anual (kg año ⁻¹) -----	50
Figura 11. Incrementos en t ha ⁻¹ de biomasa área (B), carbono (C) y dióxido de carbono (CO ₂) en bosques naturales de <i>Pinus tecote</i> y <i>Pinus oocarpa</i> , Montaña, Guerrero. ICA= incremento corriente anual (kg año ⁻¹); IMA= incremento medio anual (t ha ⁻¹ año ⁻¹) -----	51
Figura 12. Crecimiento en t ha ⁻¹ de biomasa área (B), carbono (C) y dióxido de carbono (CO ₂) en bosques naturales de <i>Pinus tecote</i> y <i>Pinus oocarpa</i> , Montaña, Guerrero -----	51
Figura 13. Localización geográfica del área de estudio -----	52
Figura 14. Gráfica de observados y estimados para mejor modelo de determinación de incrementos en diámetro normal en <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, Iliatenco, Guerrero -----	73

Figura 15. Gráfico de residuales por categoría de edad para estimación de incrementos en diámetro de <i>Pinus oocarpa</i> , Montaña de Guerrero -----	74
Figura 16. Curvas de Incremento Corriente Anual e Incremento Medio Anual (a) e ICA max instantáneo (b) en diámetro normal para <i>Pinus oocarpa</i> , Montaña de Guerrero -----	75
Figura 17. Determinación de turnos técnicos en base al crecimiento e incremento en diámetro normal de <i>Pinus oocarpa</i> , montaña de Guerrero -----	76
Figura 18. Curvas anamórficas de los 3 mejores modelos de crecimiento seleccionados para estimar incrementos en Altura de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede. El Aserradero, Iliatenco, Guerrero-----	77
Figura 19. Gráfica de observados y estimados para determinación de incrementos en altura para <i>Pinus oocarpa</i> , Montaña de Guerrero -----	79
Figura 20. Comportamiento de residuales del modelo de Schumacher para estimación de incrementos en altura de <i>Pinus oocarpa</i> , Montaña de Guerrero -----	80
Figura 21. Curva del crecimiento biológico (a) e incrementos en altura (b) en <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, Montaña de Guerrero -----	81
Figura 22. Análisis de incremento instantáneo (ICA máximo) en altura de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, Montaña de Guerrero -----	81
Figura 23. Gráfica de observados y estimados para estimación de incrementos en área basal (m ²) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, Montaña de Guerrero -----	84
Figura 24. Comportamiento de Residuales para área basal (m ²) de <i>Pinus oocarpa</i> , Montaña de Guerrero -----	85
Figura 25. Curva del crecimiento biológico (a) e incrementos (b) en área basal en <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, El Aserradero, Iliatenco, Guerrero -----	85
Figura 26. Análisis de incremento instantáneo en área basal para <i>Pinus oocarpa</i> Schiede	86
Figura 27. Curvas anamórficas de 3 modelos de crecimiento seleccionados para estimar incrementos en volumen de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede. El Aserradero, Iliatenco, Guerrero ----	87
Figura 28. Gráfica de observados y estimados para determinación de incrementos en volumen de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, Iliatenco, Guerrero -----	89
Figura 29. Comportamiento de los residuales para estimación de incrementos en volumen (m ³), <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, Montaña de Guerrero. -----	90
Figura 30. Curva del crecimiento biológico del modelo ajustado para la variable área basal en <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, El Aserradero, Iliatenco, Guerrero -----	91
Figura 31. Incremento instantáneo (ICA max) en volumen para <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, Montaña de Guerrero. -----	91

RESUMEN GENERAL

Los bosques desempeñan una función importante como proveedores de bienes y servicios; generar estudios que acrecienten su manejo sostenible es de importancia ambiental y social para evitar la degradación y aprovechamiento desmedido. En ese contexto se encuentran diversos bosques del estado de Guerrero, particularmente en la región Montaña crecen de forma natural grandes extensiones donde la mayoría se encuentran sin manejo, principalmente bosques de pinos, bosques de encino y asociaciones de estos conservándose únicamente mediante la implementación de usos y costumbres de forma empírica desde el contexto social. El objetivo general de esta investigación es cuantificar el potencial maderable y de biomasa, así como el análisis de su crecimiento mediante de determinación de incrementos a través del tiempo, para contribuir al manejo sustentable de los recursos forestales de la región Montaña de Guerrero; para ello se optó por trabajar con 3 especies abundantes de la región: *Pinus oocarpa* Schiede, *Pinus teocote* Schl. et Cham. y *Quercus elliptica* Née. Los objetivos específicos del estudio fueron: 1) ajustar ecuaciones alométricas de volumen de fuste completo para *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*. b) Ajustar ecuaciones de biomasa área y de biomasa de fuste en *P. teocote*, *P. oocarpa* y *Q. elliptica*. 2) determinar ecuaciones de biomasa hojas-ramas en *P. teocote* y *P. oocarpa*. 3) estimar incrementos en biomasa, carbono y oxígeno de *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa* mediante modelos de crecimiento forestal 4) estimar el crecimiento e incremento en diámetro, altura, área basal y volumen de *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*. La metodología consistió en el levantamiento mediante inventario de 64 sitios circulares de 500 m² de las 3 especies evaluadas. Paralelamente a lo anterior, se realizó el derribo de 48 árboles y mediante la técnica de anillos se midieron los diferentes grupos de edades con sus características dasométricas. Los resultados finales podrían resumirse de la siguiente manera: a) se generaron 2 ecuaciones para estimación de volumen fuste completo (m³) de *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*; b) se generaron 8 ecuaciones alométricas de biomasa, de las cuales 6 fueron para biomasa aérea

y fustal en *Quercus elliptica*, *Pinus oocarpa* y *P. teocote*; así mismo se obtuvieron 2 ecuaciones estimación de biomasa hojas-ramas para *Pinus oocarpa* y *Pinus teocote* y finalmente c) se generaron 6 modelos de crecimiento e incremento: 2 para estimación de incrementos en biomasa, carbono y oxígeno en las especies de *Pinus* evaluadas y 4 para determinación de incrementos diámetro, altura, área basal y volumen para *Pinus oocarpa*, dando un total de 16 ecuaciones matemáticas que ayudarán directamente al manejo sustentable de los recursos forestales de la región Montaña del estado de Guerrero.

GENERAL ABSTRACT

Forests perform an important role as providers of goods and services; generating studies that increase its sustainable management is of environmental and social importance to avoid degradation and excessive use. In this context, there are various forests of the state of Guerrero, particularly in the Montaña region, large areas growing naturally where most of them are unmanaged, mainly pine forests, oak forests and associations of these, conserving only through the implementation of uses and customs empirically from the social context. The general objective of this research is to quantify the timber and biomass potential, as well as the analysis of its growth by determining increases over time, to contribute to the sustainable management of forest resources in the Montaña de Guerrero region. opted to work with 3 abundant species in the region: *Pinus oocarpa* Schiede, *Pinus teocote* Schl. et Cham. and *Quercus elliptica* Née. The specific objectives of the study were: 1) to adjust allometric equations of full stem volume for *Pinus teocote* and *Pinus oocarpa*. b) Adjust equations of area biomass and stem biomass in *P. teocote*, *P. oocarpa* and *Q. elliptica*. 2) determine leaf-branch biomass equations in *P. teocote* and *P. oocarpa*. 3) estimate increases in biomass, carbon and oxygen of *Pinus teocote* and *Pinus oocarpa* through forest growth models 4) estimate the growth and increase in diameter, height, basal area and volume of *Pinus teocote* and *Pinus oocarpa*. The methodology consisted in the survey by means of the inventory of 64 circular sites of 500 m² of the 3 species evaluated. In parallel to the above, the felling of 48 trees was carried out and the different age groups with their dasometric characteristics were measured using the ring technique. The final results could be summarized as follows: a) 2 equations were generated to estimate the entire stem volume (m³) of *Pinus teocote* and *Pinus oocarpa*; b) 8 allometric equations of biomass were generated, of which 6 were for area and stem biomass in *Quercus elliptica*, *Pinus oocarpa* and *P. teocote*; Likewise, 2 leaf-branch biomass estimation equations were obtained for *Pinus oocarpa* and *Pinus teocote* and finally c) 6 growth and increase

models were generated: 2 to estimate increases in biomass, carbon and oxygen in the evaluated *Pinus* species and 4 to determine diameter increases, basal area height and volume for *Pinus oocarpa*, giving a total of 16 mathematical equations that will directly help the sustainable management of forest resources in the Mountain region of the state of Guerrero.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

El estado de Guerrero está integrado por siete regiones bioculturales ancladas en una porción de la Sierra madre del Sur (INEGI, 2016). Dentro de las principales regiones con más actividad forestal se encuentra la región Costa Grande y Centro reportando casi el 80% de la actividad forestal en la entidad (áreas bajo manejo forestal); en contraparte a ello, se encuentra la región Montaña con únicamente el 2% de actividad forestal registrada legalmente (CONAFOR, 2009).

Particularmente la región Montaña del estado de Guerrero, se caracteriza por poseer más del 85 % de la población indígena del estado (Toscana y Villaseñor, 2013). En términos económicos y socio-demográficos, es de las zonas más pobres y marginadas de la entidad y del país, donde se encuentran algunos de los municipios más marginados a nivel nacional, bajos niveles de ingresos, alta migración y el menor nivel de desarrollo humano (Cervantes et al., 1996).

A pesar de sus características demográficas y socioeconómicas, y bajo nivel de manejo forestal sustentable, la región Montaña cuenta con gran riqueza forestal reflejada en abundantes bosques naturales puros y mezclados aportando múltiples bienes y servicios ambientales: producción de agua, captura de carbono, oxígeno, provisión de madera, alimentos, diversidad de flora y fauna (Heverastico et al., 2003). Particularmente los bosques de pino y encino son los más abundantes en esta región por su amplio hábitat de crecimiento, destacando *Pinus teocote* Schl. et Cham, *Pinus oorcapa* Schiede y *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014; INEGI 2016); donde también la diversidad de bosques de encino y especies de bosque mesófilo de montaña es notoria (Rzedowski, 1994).

Particularmente los ecosistemas forestales (principalmente bosque de pino-encino y selvas) cumplen un rol muy importante en el secuestro de carbono y

dióxido de carbono para la mitigación de los gases de efecto invernadero, puesto que tiene la capacidad de absorberlo a través de su biomasa (Rodríguez et al., 2016).

De los servicios ambientales que proveen los bosques, la captura de carbono y la producción de oxígeno son los más importantes, mismos que en la actualidad son remunerados económicamente a nivel mundial, los cuales solo se pueden cuantificar por medio del crecimiento (incremento) de los árboles (principalmente) y el manejo forestal; este último implica la aplicación del conocimiento del ciclo biológico de la vegetación con el fin de tratar de aumentar la masa forestal en menor tiempo y extraer de ella productos, sin poner en riesgo la diversidad del germoplasma (Ordoñez y Benjamín, 2008).

En las últimas décadas, casi un 45% de las emisiones de dióxido de carbono han permanecido en la atmósfera, el resto ha sido absorbido por los ecosistemas acuáticos y terrestres (Kannien, 2005); sin embargo, según el sitio web en línea CO₂ earth de monitoreo de gases de efecto invernadero en tiempo real, las partes por millón (ppm) de CO₂ han alcanzado cifra record pasando de 350 en 1950 a 414 ppm en diciembre de 2020 (Proxygen, 2020). Para el año 2100 se proyecta un aumento drástico en los niveles de CO₂, pudiendo poner en riesgo la estabilidad del habitat de muchas especies de flora y fauna (Gutierrez y Trejo, 2014).

En ese sentido, el manejo forestal sustentable juega un papel relevante en la conservación de las áreas forestales. Desde el punto de vista ambiental, económico y social, la realización del uso sostenido de los bosques permitirá el cuidado de los mismos, ingresos económicos y capacitación técnica para su manejo a fin de garantizar que el recurso siga vigente para futuras generaciones (Aguirre, 2015).

Ante tal escenario y contexto, se planteó la presente investigación: “Sistema de ecuaciones alométricas y análisis del crecimiento e incremento de especies forestales”, con el objetivo aportar información, técnicas y herramientas que

coadyuven al manejo forestal comunitario de los bosques de la región Montaña del estado de Guerrero. Esta mezcla de conocimientos podría lograr una sinergia importante en la investigación científica, puesto que los usos y conocimientos locales acumulados a través del tiempo y el que hacer de la investigación complementaran los conocimientos y técnicas para que los pobladores locales tengan herramientas y comprendan más del manejo de sus bosques y coadyuve a la mejora de estos de forma integral. Los productos de investigación serán una herramienta de vital importancia para mejorar el uso sostenido de estos bosques, que a la fecha no tienen registrado ningún estudio relacionado en estas áreas naturales de importancia social y cultural por la región en la que se encuentran ubicadas.

Para lograr lo anterior, se visitaron diferentes presidentes de bienes comunales de núcleos agrarios y en base a los permisos concedidos, se eligieron tres municipios de la región montaña: Malinaltepec, Ilitatenco y Copanatoyac, donde se seleccionaron 3 especies abundantes de dichas zonas: *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica*.

En cada objetivo planteado se realizaron muestreos de campo, inventarios dasométricos y derribos representativos de árboles de diferentes categorías diamétricas; finalmente se ajustaron diferentes ecuaciones alométricas de volumen y biomasa, así como diferentes modelos de crecimiento forestal a una base de datos obtenida de una muestra representativa de las dos especies de *Pinus* seleccionadas en este estudio.

Por otra parte, se realizó la técnica de análisis troncales para el conocimiento de la dinámica de incrementos en biomasa, carbono y oxígeno que salvaguardan los bosques naturales de esta región; con ello se podrán estimar los intervalos anuales de producción de oxígeno y las fluctuaciones de la captura de carbono, vital para programas de conservación para mitigación de gases de efecto invernadero y calentamiento global; finalmente se determinaron incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen que han tenido los bosques naturales de

Pinus oocarpa a través del tiempo. Con ello se facilitará la realización adecuada de podas, aclareos, permitirá la estimación de turnos técnicos de aprovechamiento y cortas finales.

La metodología empleada, resultados, discusión y las conclusiones de cada objetivo se desglosaron en capítulos para facilitar su mejor análisis e interpretación. A continuación, se describen de forma resumida:

Capítulo II. En este capítulo se desarrolló el tema que lleva por título: “Ecuaciones alométricas de biomasa y volumen en bosques de pino y encino, Montaña de Guerrero, México”. Tiene por objetivo particular el ajuste y selección de diferentes modelos de regresión que permita estimar el volumen maderable (m^3), así como la acumulación de biomasa aérea por componente (aérea, fuste y hojas-ramas) en dos especies de *Pinus* y una de encino de la región Montaña de Guerrero, mediante la incorporación de variables dasométricas de fácil medición como el diámetro normal (DN) y altura total (H).

Capítulo III. Este capítulo aborda el tema: “Incrementos en biomasa y producción de oxígeno de *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*, Montaña, Guerrero, México”. El objetivo de este trabajo fue la cuantificación eficiente de los incrementos de biomasa aérea, mismos que son importantes para conocer el ritmo fisiológico de la captura de carbono y producción oxígeno $día^{-1}$, $año^{-1}$ y ha^{-1} en base al análisis de sus incrementos y crecimiento, para comparar cuál especie captura más carbono y produce más oxígeno a fin de recomendarse para programas RED+ o programas de compensación ambiental.

Capítulo IV. Finalmente, para concluir el trabajo de esta tesis, se planteó y se desarrolló el tema: “Crecimiento e incremento en diámetro, altura y volumen en *Pinus oocarpa*, Montaña de Guerrero”. En este capítulo se enfocó el análisis del crecimiento de los anillos de *Pinus oocarpa* relacionado con sus variables dasométricas: diámetro, altura, área basal y volumen. Lo anterior conllevará a

determinar turnos técnicos, absolutos y tiempos óptimos para conocer los periodos en que la especie presenta la máxima competencia por espacios de crecimiento, así como también su máxima producción de madera; eso dará una mejor pauta para el manejo silvícola y ayudará a la programación de podas bajas o altas, aclareos iniciales (preaclareos) o intermedios y finalmente programar la cosecha maderable mediante el cruce de incrementos corrientes anuales (ICA) y medios anuales (IMA). En base a ello, se contribuirá a mejorar las técnicas silvícolas en los bosques de la Montaña de Guerrero.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Esta investigación contribuirá al desarrollo forestal en la región de la Montaña del estado de Guerrero donde se distribuyen naturalmente *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica*, especies de importancia económica y ecológica, generando herramientas útiles con miras a la implementación de planes de manejo, propiciando a futuro la sostenibilidad del bosque y contribuyendo al desarrollo forestal en esta región; estas herramientas facilitarían la elaboración de inventarios forestales para predecir la cantidad de madera comercial y leña que posee el bosque. Así mismo contar con una base estadística para verificar si existe una relación significativa entre diámetros, alturas y volúmenes y de acuerdo con su tendencia aplicar los modelos adecuados.

Dentro de los principales servicios ambientales que provee la región montaña del estado de Guerrero, se encuentran la provisión de agua en calidad y cantidad, así como la regulación climática; así mismo juega un rol importante en el ciclo global del carbono capturando dióxido de carbono y produciendo oxígeno vital para la vida. Las innumerables extensiones de bosques proveen materias primas como madera, alimento, medicina, resina, carbón, leña, entre otros, esenciales para el desarrollo de diversas comunidades.

Es importante resaltar que el ritmo fisiológico, componente genético y la densidad de la madera es diferente en cada especie aun entre el mismo género (Valencia y Vargas, 2001), si a eso se le suma factores externos como la competencia por espacio y nutrientes, las especies arbóreas no proporcionarían la misma calidad y cantidad de bienes y servicios ambientales como lo es la producción maderable y la captura de carbono.

Pompa y Sigala (2017) indican que hay una diferencia notable entre la captura de carbono y producción de oxígeno entre especies y entre diferentes tipos de bosques; por lo tanto, se hace relevante realizar estudios de esta índole, por lo que es necesario el ajuste de ecuaciones alométricas con alto grado de

confiabilidad estadística; el no hacer uso correcto de las herramientas debidas para su estimacion podría causar sobreestimaciones en las cantidades de biomasa, carbono o dióxido de carbono, mismas que se pueden minimizar con una metodología adecuada.

Por otra parte, el aprovechamiento forestal dentro de dicha región se lleva a cabo sin directrices técnicas, de forma ilícita, selectivamente o a través de un intermediario que se favorece de la desvalorización del bosque en pie conduciendo hacia su manejo ecológico, social y económicamente no sustentable, ocasionando que la calidad de los bosques disminuya y tales aprovechamientos sólo proporcionan beneficios económicos a corto plazo.

Generalmente los dueños o poseedores de las áreas boscosas de muchas comunidades inmersos en el contexto de la region montaña, desconocen la elaboración de planes de manejo que permitan la cuantificación del recurso forestal maderable para el manejo sustentable de las mismas; específicamente, no se sabe con precisión la cantidad de madera en metros cúbicos (m^3) que se tiene en el bosque, y aun más grave es el hecho de que muchas veces de forma empírica es difícil estimar con precisión esa variable forestal tan importante dentro del manejo forestal.

Sumado a lo anterior, resulta importante mencionar la falta de asesoría técnica, puesto que no existe evidencia de algún registro, documento, manual o informe técnico que plasme las existencias reales y volúmenes unitarios que se aprovechan en el bosque.

Por la problemática antes expuesta, se propuso generar un sistema de diferentes ecuaciones de regresión para determinar las existencias maderables ($m^3 ha^{-1}$), la cantidad de biomasa por componente ($t ha^{-1}$): fuste, hojas-ramas y aérea, así como evaluar el contenido de carbono de *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica*, para cuantificar de forma confiable los almacenes de carbono y proponer alternativas de mitigación que pueden ayudar a solventar eventos como el cambio climático, tema de preocupación actual a nivel mundial.

1.3 HIPÓTESIS

Las tres hipótesis generales planteadas en este estudio, se describen a continuación:

1. Existen diferencias entre los modelos alométricos ajustados para estimar la acumulación de biomasa por componente (fuste, hojas-ramas, aéreo) y volumen de fuste completo (m^3) en *Pinus teocote* Schl. et Cham, *Pinus oocarpa* Schiede y *Quercus elliptica* Née, región montaña, Guerrero.
2. El crecimiento e incremento en biomasa y producción de oxígeno será diferente entre *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*.
3. El crecimiento e incremento en diámetro, altura, área basal y volumen en *Pinus oocarpa* pueden ser determinados eficientemente a través de modelos de crecimiento forestal.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL

Generar un sistema de ecuaciones para estimar eficientemente las existencias reales de madera ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) y los almacenes de biomasa (t ha^{-1}), así como la caracterización del crecimiento e incremento de bosques naturales de *Pinus oocarpa*, *Pinus teocote* y *Quercus elliptica*, región Montaña del estado de Guerrero.

1.4.2 ESPECÍFICOS

- a) Ajustar 8 modelos alométricos (lineales y no lineales) de volumen fuste completo (m^3) para *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica*.
- b) Determinar los almacenes de biomasa por componente: biomasa de hojas-ramas (*Bhr*), biomasa de fuste (*Bf*) y biomasa aérea (*B*) en *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica* de bosques de Guerrero.
- c) Estimar la captura de carbono y la producción neta de oxígeno de *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa* en base a al turno técnico y sus incrementos anuales (ICA e IMA).
- d) Analizar el crecimiento e incremento en diámetro, altura, área basal y volumen de *Pinus oocarpa*.

1.5 REFERENCIAS

Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y bosques*, 21(SPE), 17-28.

Cervantes, V., Arriaga, V., & Carabias, J. (1996). La problemática socioambiental e institucional de la reforestación en la región de La Montaña, Guerrero, México. *Botanical Sciences*, (59), 67-8

Comision Nacional Forestal (CONAFOR). 2009. Programa estatal forestal de Guerrero. 98 pp. Disponible en <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/12/180Programa%20Estra%C3%A9gico%20Forestal%20del%20Estado%20de%20Guerrero.pdf>

Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85, 126-133.

Heverástico, C. C., Mata, L. L., & Terrazas, T. (2003). Estructura, composición florística y diversidad de especies leñosas de un bosque mesófilo de montaña de Guerrero, México. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 74(2), 209-230.

Ordoñez D. J. A. (2008). Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias*, 90(090).

Kannien M. (2000). Intensificación de la ganadería en Centroamérica: beneficios económicos y ambientales. Capítulo 3. Secuestro de Carbono en los Bosques: El papel de los bosques en el Ciclo Global de Carbono. Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura (FAO). Disponible en <http://www.fao.org/3/x6366s09.htm>

Guitérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 179-188.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2016. Conjunto de datos vectorial uso del suelo y vegetacion, escala 1: 250000 Serie II (Continuo Nacional). <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usodelsueloyvegtacion/vectorial/serieii.aspx>.

Masera, O. R., Ordóñez, M. J., & Dirzo, R. (1997). Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic change*, 35(3), 265-295.

Montes, C., & Sala, O. (2007). La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. *Revista Ecosistemas*, 16(3).

Ordóñez, J. A. B., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y bosques*, 7(1), 3-12.

Pompa G. M.; Sigala R. J.A. (2017). Variación de captura de carbono de especies forestales en México: Una revisión. *Madera y bosques*, 2017, vol. 23, no 2, p. 225-235.

Proxygen (2020). Monitoreo de dióxido de carbono en tiempo real. CO2earth. Disponilbe en <https://es.co2.earth/>

Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M., & Campos Saldaña, R. A. (2016). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(37), 77-94.

Rzedowski, J., & Huerta, L. (1994). *vegetación de México* (No. 582.16 R997r Ej. 1 002135). México: Limusa, Noriega Editores.

Toscana Aparicio, Alejandra, & Villaseñor Franco, Alma. (2018). Las tormentas Ingrid y Manuel en La Montaña de Guerrero, 2013. La atención de la emergencia. *Sociedad y ambiente*, (16), 59-89. Recuperado en 20 de enero de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200765762018000100059&lng=estlng=es

Valencia M., S., y Vargas H. J. (2001). Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula*. *Agrociencia*, 35(1), 109-120.

CAPITULO II

ECUACIONES ALOMÉTRICAS DE BIOMASA Y VOLUMEN EN BOSQUES DE PINO Y ENCINO, MONTAÑA DE GUERRERO, MÉXICO

ECUACIONES ALOMÉTRICAS DE BIOMASA Y VOLUMEN EN BOSQUES DE PINO Y ENCINO, MONTAÑA DE GUERRERO, MÉXICO

RESUMEN

La generación de ecuaciones alométricas de biomasa y volumen es importante para contribuir en el manejo sustentable de los bosques y combatir el cambio climático. El objetivo de este estudio fue ajustar modelos alométricos para estimar biomasa (kg) por componente (hojas ramas- fuste y aérea) y volumen (m^3) en bosques de *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica* en la region Montaña del estado de Guerrero. Se aplicó el método directo (en *pinus*) derribando una muestra de 24 árboles por especie e indirecto en *Quercus*. Se ajustaron ocho modelos de regresión empleando variables independientes de diámetro normal (cm) y altura total (m). El mejor modelo fue seleccionado conforme al mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), menor raíz del error medio cuadrático (REMC) y menor sesgo promedio (e). Los resultados indicaron que el modelo de Schumacher y de Spur fueron los que mejor se ajustaron en la estimacion de volumen ($R^2_{adj}>0.90$) en las 3 especies evaluadas. Asi mismo, los valores de R^2_{adj} por componente fueron: [hojas-ramas (>0.86), fuste (>0.92) y aérea (>0.94)] en las 3 especies evaluadas. Se estimó un total de 110, 176 y 92 t de $B\ ha^{-1}$, y 156, 228 y 170 $m^3\ ha^{-1}$ de V para *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica*, respectivamente. Se concluye que los modelos generados pueden usarse eficientemente para cuantificar el volumen y la biomasa en los bosques donde habitan las especies estudiadas.

Palabra clave: Modelos alométricos, volumen, Biomasa, *Pinus*, Guerrero, Región Montaña.

ABSTRACT

The generation of allometric equations of biomass and volume is important to contribute to the sustainable management of forests and combat climate change. The objective of this study was to adjust allometric models to estimate biomass (kg) by component (leaves-branches, bole and aerial) and volume (m³) in forests of *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* and *Quercus elliptica* in the Mountain region of the state of Guerrero. The direct method (in pinus) was applied, felling a sample of 24 trees per species and indirect in *Quercus*. Eight regression models were adjusted using independent variables of normal diameter (cm) and total height (m). The best model was selected according to the highest adjusted determination coefficient (R^2_{adj}), the lowest root mean square error (RMSE) and the lowest average residuals error (e). The results indicate that the Schumacher and Spur models were the ones that best adjusted in the estimation of volume ($R^2_{adj} > 0.90$) in the 3 species evaluated. In addition, the R^2_{adj} values per component were: [leaves-branches (> 0.86), bole (> 0.92) and aerial (> 0.94)] in the 3 species evaluated. A total of 110, 176 and 92 tons of $B \text{ ha}^{-1}$ was estimated, and 156, 228 and 170 m³ ha^{-1} of V for *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* and *Quercus elliptica*, respectively. It's concluded that the generated models can be used efficiently to quantify the volume and biomass in the forests where the studied species inhabit.

Keyword: Allometric models, volume, biomass, *Pinus*, Guerrero, Mountain Region

2.1 INTRODUCCIÓN

El manejo forestal sustentable es una actividad que asegura la producción de diversos bienes y servicios de los ecosistemas forestales de una manera perpetua, permitiendo la conservación de la biodiversidad y satisfaciendo las necesidades sociales (Aguirre, 2015); dentro de los principales beneficios que brindan los bosques se encuentra la producción de madera y la captura de carbono (Sandoval, 2004); la primera para satisfacer la demanda local de madera y la industria forestal, la segunda para contrarrestar y minimizar los efectos de cambio climático (Vargas, 2004).

De acuerdo con el Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013; citado por Montoya et al. (2018), la aceleración desmedida del cambio climático se debe principalmente a los factores antropogénicos, permitiendo un aumento de la temperatura de 0.05 °C en los últimos 15 años.

Es por ello que la obtención de información sobre biomasa y volumen de árboles es importante para determinar el papel que desempeñan los recursos forestales en el almacenamiento de carbono y contribuir en gran medida a la mitigación del cambio climático (Graciano et al., 2019).

Por una parte, la estimación del volumen es indispensable para el manejo forestal sustentable, por tanto, la actualización constante y uso de herramientas cuantitativas es fundamental en su óptimo aprovechamiento (Hernández et al., 2017). Así mismo, las funciones alométricas basadas en muestreos destructivos proporcionan estimaciones precisas de la biomasa individual y por unidad de superficie, mismas que representan un proceso clave para el manejo forestal sustentable (Soriano et al., 2015).

Las metodologías más precisas y recomendables para analizar la biomasa aérea y volumen de un árbol están basadas en muestreos destructivos, lo que conlleva a generar ecuaciones más precisas y confiables (Vásquez et al., 2017; Montoya

et al., 2018); derivadas de ellas se pueden aplicar relaciones de volumen/biomasa por medio de la densidad básica (Brown et al, 1997) o factores de expansión de biomasa (FEB), los cuales consisten en transformar el volumen fustal por árbol o por unidad de superficie en densidad de biomasa o carbono por árbol o por la misma unidad de superficie (Martínez et al., 2016).

Analizar con cuánto contribuyen los árboles a la mitigación de bióxido de carbono y la regulación del cambio climático tendrá un impacto a medida que esta especie se mantenga en el proceso natural del carbono y a la reducción de la excesiva concentración de bióxido de carbono (Montes de Oca et al., 2020). Así mismo, estimar de forma confiable el volumen maderable asegurará que la madera extraída sea de forma adecuada acorde a las existencias reales del bosque.

Es por ello que en este estudio, se estimó la biomasa por componente (aérea, fuste y hojas-ramas) y volumen de fuste completo mediante el derribo del arbolado (método directo), posteriormente se ajustaron ocho modelos de regresión para estimación de biomasa y volumen de forma precisa en tres especies de la región Montaña del estado de Guerrero: *Pinus teocote Schl.* et Cham. *Pinus oocarpa* Schiede. y *Quercus elliptica* Née., utilizando variables de fácil medición como el DAP o la altura total (H); información que será relevante para el correcto manejo sustentable de las especies estudiadas de la región Montaña del estado de Guerrero; dado que hasta la fecha los estudios en dicha región y en el estado han sido insuficientes (Navarro et al., 2020).

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 Localización del área de estudio

El área de estudio abarca 3 municipios de la region Montaña del estado de Guerrero, ubicándose entre los $98^{\circ} 33' 24''$ y $98^{\circ} 50' 1''$ LW y desde los $17^{\circ} 3' 45''$ y $17^{\circ} 32' 28''$ LN (Figura 1) a una altitud promedio de 2100 m (Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática [INEGI, 2016]), comprendiendo los municipios de Iliatenco, Malinaltepec y Copanatoyac de Álvarez, donde se desarrollan de manera natural *Pinus teocote* Schl. et Cham., *Pinus oocarpa* Schiede. y *Quercus elliptica* Née. formando bosques puros.

La zona de estudio presenta clima A(c) w_2 (2), es decir, templado semi-calido, con lluvias intensas en los meses de Julio-Agosto; la temperatura mínima y máxima va de -3° a 26° respectivamente. El tipo de suelo en su mayoría es Regosol, abundante en materia orgánica (INEGI, 2008; INEGI, 2014).

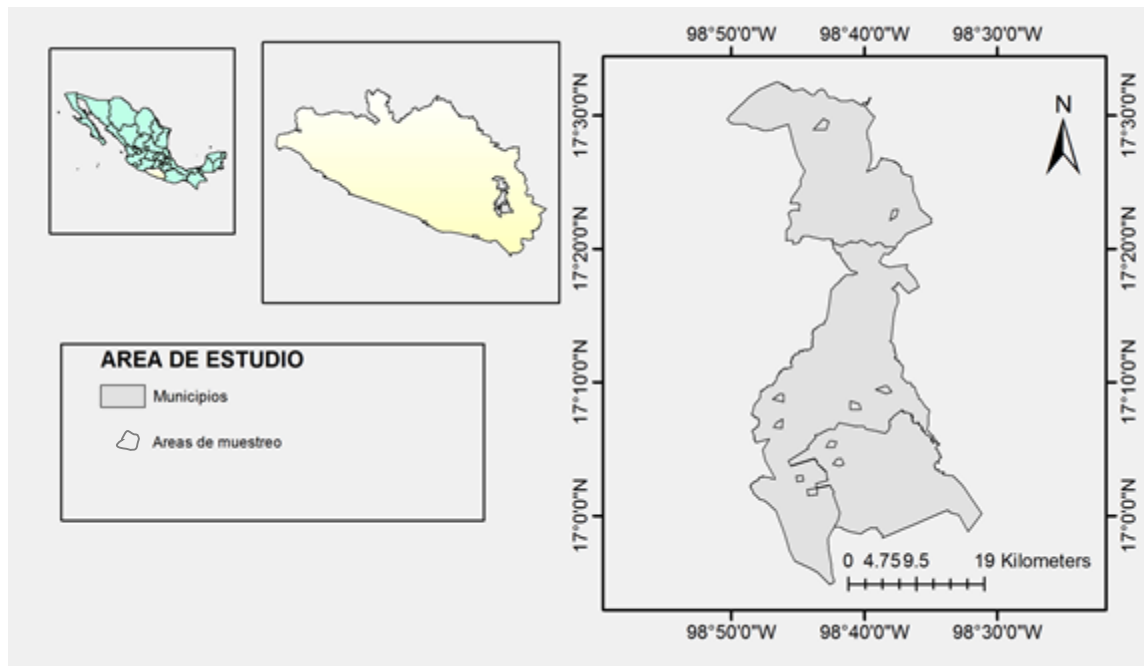


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio

Mediante el uso de la herramienta GPS babel y la herramienta XTOOLS del programa Arc Gis 10.4 se logró ubicar los sitios de muestreo un área total experimental de 50 ha para cada especie estudiada (150 ha en total), donde se distribuyeran áreas de bosques de pino- encino y bosques de pino donde abundan las 3 especies seleccionadas de amplia distribución dentro de la región Montaña del estado de Guerrero.

2.2.2 Obtención de muestras

De acuerdo con Picard et al. (2012), el número de árboles utilizados para el ajuste de modelos alométricos para volumen y biomasa depende en gran medida de la experiencia y costos del muestreo. Particularmente la biomasa de un árbol es más difícil de medir que el volumen de su fuste; es por ello que en la mayoría de las ocasiones los modelos de biomasa tienden a elaborarse a partir de menos observaciones que los modelos de volumen.

En ese sentido, algunos modelos de biomasa se elaboran solamente a partir de unas pocas mediciones de regresión, empleando entre 20 y 30 árboles (Mendez et al. 2011; Marronquin, 2018; Acosta, 2016). En base a la recomendación anterior el total de árboles derribados y analizados fue de 24 por cada especie de *Pinus*. Para el caso de la especie de encino, dado que se usaría un método indirecto para estimación de volumen y biomasa, se empleó una muestra de 90 árboles obtenidos mediante muestreo e inventario (Picard et al., 2012). De los datos restantes del inventario se eligieron 292 árboles que representan el 30 % de los árboles muestreados que sirvieron para la validación del modelo de regresión en biomasa.

Se seleccionaron 24 árboles de *Pinus oocarpa* y *Pinus teocote* sin deformidades, plagas ni enfermedades; en la selección de árboles se incluyeron diámetros normales (1.30 m de altura) que variaron de 4.9 a 59 cm. Para obtener la biomasa área y volumen maderable, se derribaron 2 árboles por cada categoría diamétrica (5-60 cm), excepto para las categorías de 25 y 30 cm, que fueron 3 árboles por ser las categorías intermedias más representativas de todo el bosque.

Antes del derribo, a cada árbol de *Pinus* se le midió el diámetro normal con cinta diamétrica, la altura de 1.30 m con un flexómetro y la altura total con el clinómetro electrónico Hagolf. Con la ayuda de una motosierra Still de 20" se seccionaron las trozas de 2 m de longitud hasta llegar a la punta, en el caso del tocón se realizó a 0.30 m. Para la colecta de ramas y follaje se colocó una lona en la superficie.

Para el cálculo del tamaño de muestra definitivo se empleó el volumen fuste completo sitio⁻¹ como variable estadística y se aplicó la ecuación empleada por Ancira y Treviño (2015); Calleja (2020):

$$n = \frac{t^2 S^2}{E^2}$$

Donde: n = Tamaño de muestra definitivo; t^2 = Valor de t de student ($p=0.05$, $n-1$ gl); S_y^2 = Nivel de confianza; E^2 = Error estándar porcentual al 5%.

Con la fórmula anterior se estimó un total de 64 sitios de muestreo de 500 m², divididos de la siguiente manera: *P. oocarpa* 24, *P. teocote* 22 y *Q. elliptica* 18 sitios, distribuidos en un área experimental de 50 ha en promedio de cada especie, donde se realizaron mediciones de altura total (H), altura de fuste limpio (HFL) en m, diámetro a altura de pecho (DAP) medido a 1.3 m mayor a 5 cm e individuos por hectárea (ind ha⁻¹).

Los árboles muestreados de *Pinus* y *Quercus elliptica* se ordenaron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel de forma ascendente acorde al diámetro normal (considerando la variable de mayor importancia de clasificación). Este mismo procedimiento se efectuó por sitio, por categoría diamétrica (CD) y en la concentración final de todos los árboles de todos los sitios; esto con el objetivo de depurar los datos atípicos de la base de datos mediante inspección gráfica, para comprobar el rango de categorías diamétricas encontradas en los sitios de muestreo y ver los posibles árboles que serían elegidos de forma representativa en el ajuste de los modelos de regresión para estimación de volumen y biomasa.

2.2.3 Obtención de volumen

Para el caso de *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*, se empleó el método directo, realizando la cubicación para fuste completo en base a sus componentes principales: tocón, trozas y punta (Cuadro 1).

Cuadro 1. Fórmulas de cubicación más empleadas para obtener volumen de un árbol (Romanh et al., 2010; Rivas, 2006).

Forma geométrica	Sección	Fórmula
Neiloide truncado	Tocón	$V = \left(\frac{L}{4}\right) \left[S_1 + S_2 + \sqrt[3]{S_1 S_2} (\sqrt[3]{S_1} + \sqrt[3]{S_2}) \right]$
Paraboloide	Trozas	$V = (S_1 + S_m + S_2) * (L/6)$
Cono	Punta	$V = \frac{S}{3} * L$

Donde: L = longitud (m); S= superficie de la sección (m²); V=volumen de la sección (m³).

Para obtener el volumen de fuste completo (m³) se sumó el volumen de cada sección de las trozas, el volumen del tocón y el volumen de puntas (Romahn y Ramírez, 2010).

$$V = VS + VT + VP$$

Donde:

V = Volumen de fuste completo (m³)

VS= Volumen de sección de trozas (m³)

VT= Volumen del tocón (m³)

VP= Volumen de puntas (m³)

Para el cálculo de volumen de fuste completo (m³) en *Quercus elliptica* se aplicó el método indirecto, mediante la aplicación de la ecuación alométrica de volumen rollo total árbol con corteza (Vrtacc) desarrollada por el Inventario Estatal del Estado de Guerrero a cargo de la UMAFOR 1203, región Costa Grande, que fue desarrollada por el Sistema Nacional de Información y Gestión forestal (SNIGF-

CONAFOR, 2014), la cual es específica para la especie y emplea el modelo potencial de Schumacher; dicha ecuación se describe a continuación:

$$V_{rtacc} = 0.00007 * D^{2.02075} * H^{0.72025} \text{ con un } R^2 = 0.98.$$

Donde:

V_{rtacc} = Volumen en rollo total árbol con corteza o de fuste completo en m^3 para *Quercus elliptica*

D = Diámetro normal (cm)

H = Altura total (m)

2.2.4 Obtención de peso verde

Los árboles derribados de *Pinus* fueron divididos en dos componentes: hojas-ramas (HR) y fuste (F). Cada componente se pesó en verde con una báscula colgante digital Tec Nova de hasta 500 kg con 0.1 kg de precisión en el lugar donde fue derribado el árbol. Los componentes más ligeros como ramas y hojas fueron colocados en costales y los más pesados como los troncos de las primeras secciones fueron sujetos con cuerdas para ser arrastrados y levantados con un sistema de poleas (Figura 2).



Figura 2. Seccionado y pesado de componentes de *Pinus*, Montaña de Guerrero.

Después de medir el peso verde de cada componente (*HR* y *F*), se obtuvieron muestras representativas por árbol (~5 %); posteriormente fueron etiquetadas y trasladadas a laboratorio para su secado correspondiente.

2.2.5 Obtención de biomasa por componente

En laboratorio, las muestras del 5% de *HR* y *F* se pesaron en verde y después se colocaron en una estufa de secado de la marca Torreli, a temperatura de 80 °C por 7 días hasta alcanzar peso anhidro constante (Figura 3).



Figura 3. Secado de muestras (a), pesado de muestra de fuste (b) y de hojas-ramas (c) de *Pinus* en laboratorio.

El peso seco por componente: biomasa de hojas-ramas (*BHR*) y biomasa de fuste (*BF*) se estimó en base a la relación peso seco/peso fresco; la siguiente ecuación modificada de Schlegel et al., (2000); Navar et al., (2001) describe dicha relación de los componentes en biomasa.

$$\frac{P_{sc} = P_{sm} * P_{vc}}{P_{vm}}$$

Donde:

P_{sc} = Peso seco de componente (*BHR* ó *BF*) en kg

P_{sm} = Peso seco de la muestra en Kg

P_{vf} = Peso verde de componente en Kg

P_{vc} = Peso verde de la muestra en Kg

Finalmente, la Biomasa área (B), se estimó mediante la adición de BHR y BF para las dos especies de *Pinus* evaluadas.

En el caso de *Quercus elliptica*, la biomasa aérea se estimó acorde a lo propuesto por Garcidueñas (1987) y Cruz (2007), que consiste en multiplicar la densidad básica de la madera por el volumen verde de la misma. En ese proceso se empleó el valor de densidad para *Quercus elliptica* obtenido por Sotomayor (2003) que oscila en $0,71 \text{ gr/cm}^3$, por lo que se empleó un valor conservador de 700 kg/m^3 ya transformado.

Conociendo la densidad básica y el volumen de fuste completo fue posible obtener la biomasa de fuste (BF), dando como resultado la siguiente ecuación:

$$BF = VV * DB$$

Donde:

BF = Biomasa de fuste (Kg) de *Q. elliptica*

VV = Volumen de fuste (m^3)

DB = Densidad básica (kg/m^3)

Dado que la biomasa de fuste (BF) limita la estimación de la biomasa aérea (B), se tuvo la necesidad de agregar la biomasa correspondiente a la fracción de biomasa de hojas (BHR).

Se utilizó la ecuación general para BHR generada por Návar (2009) para especies de *Quercus*, la cual se integra únicamente por el diámetro normal como variable independiente y es expresada de la siguiente manera:

$$BHR = 0.0202 * D^{2.648}$$

BHR= Biomasa de hojas-ramas (kg)

D= Diámetro normal (cm)

2.2.6 Ajuste alométrico

Es importante mencionar que el ajuste alométrico se realizó para estimación de las siguientes variables:

- a) Biomasa aérea para *Quercus elliptica*
- b) Biomasa de fuste para *Quercus elliptica*
- c) Biomasa aérea de *Pinus oocarpa*
- d) Biomasa de fuste de *Pinus oocarpa*
- e) Biomasa de hojas-ramas de *Pinus oocarpa*
- f) Biomasa aérea de *Pinus teocote*
- g) Biomasa de fuste de *Pinus teocote*
- h) Biomasa hojas-ramas de *Pinus teocote*
- i) Volumen fuste completo de *Pinus oocarpa*
- j) Volumen fuste completo de *Pinus teocote*

Para realizar este apartado se consideró lo recomendado por Segura y Andrade (2008) y Gayoso (2002), con la finalidad de obtener información acerca de los modelos de regresión que más se utilizan en el ajuste de volumen y biomasa por componente (hojas-ramas, fuste y aérea) para el género *Pinus* y *Quercus*. En el Cuadro 2 se pueden observar los modelos lineales y no lineales que se consideraron para el ajuste (Loetsch et al., 1973).

El ajuste se realizó acorde al método de máxima verosimilitud (MLE) el cual garantiza el máximo ajuste de una muestra de datos finita (Press et al., 2007); en el cual se emplearon procedimientos de regresión lineal y no lineal mediante la función PROC REG del programa estadístico SAS (Statistical Analysis System; SAS, 2008). En total fueron 8 modelos de regresión (7 lineales y 1 no lineal; (Cuadro 2)). Paralelamente a los procedimientos de regresión descritos

anteriormente, se emplearon procedimientos estadísticos descriptivos junto con medidas de tendencia central, tales como PROC UNIVARIATE Y PROC MEANS. Así mismo se emplearon procedimientos de correlación entre variables mediante la función PROC CORR.

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas empleadas para la estimación de volumen y biomasa por componente para *Pinus* y *Quercus elliptica* (tomado de Loetsch et al., 1973; citado por Segura y Andrade, 2008).

Núm.	Nombre del Modelo	Expresión matemática
1	Meyer modificado	$Y = b_0 + b_1 * D + b_2 * H$
2	Stoate	$Y = b_0 + b_1 D^2 + b_2 H + b_3 D^2 H$
3	Spur	$Y = b_0 + b_1 D^2 H$
4	Berkhout	$Y = b_0 + b_1 * D$
5	Kopezky	$Y = b_0 + b_1 * D^2$
6	Hohenald-Krenn	$Y = b_0 + b_1 * D + b_2 * D^2$
7	Schumacher-Hall	$Y = b_0 * D^{b_1} * H^{b_2}$
8	Husch	$\ln Y = b_0 + b_1 * \ln(D)$

Donde Y= volumen (m³), biomasa por componente o total (kg); b₀, b₁, b₂ y b₃= parámetros estadísticos; Exp=exponencial; Ln= logaritmo neperiano; D=niámetro normal (cm) y H= altura total; variables independientes (D², H², D³, H³, DH, entre otras).

2.2.7 Selección del mejor modelo en base a criterios estadísticos

Para la selección del modelo alométrico de volumen maderable y biomasa aérea se siguió lo recomendado por Acosta (2006) a través del siguiente procedimiento:

a) Se analizó gráficamente los valores de biomasa y volúmenes observados y predichos cada modelo alométrico, verificando la distribución de valores predichos, acorde a las categorías diamétricas lo más cercanas y reales a lo observado en campo; así mismo, fue determinante la detección de modelos alométricos que predijeron valores negativos para descartarlos inmediatamente para su uso.

b) De los modelos alométricos restantes que cumplían la condición del primer inciso, se analizaron los siguientes criterios: el valor mínimo de la Suma de Cuadrados (*SC*), menor sesgo promedio de residuales (*e*), Cuadrado Medio del error (*CME*) y Raíz del error medio cuadrático (*REMC*) y el valor máximo del coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}).

III) Para este nivel, los modelos alométricos resultantes tenían que ser los de mejores criterios estadísticos, por lo que el siguiente filtro de elección del mejor modelo sería el análisis de la normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk (1965), la prueba de autocorrelación de Durbin y Watson (1971) y finalmente la simplicidad del modelo determinado por el número de variables independientes que integran la ecuación.

c) Finalmente, se analizó la gráfica de diferencia de residuales para la verificación de homocedasticidad o heterocedasticidad en la distribución de los errores; después se aplicó la prueba de White de heterocedasticidad (White, 1980), la cual contrastó el siguiente supuesto:

Ho: los errores son homocedásticos

Ha: los errores son heterocedásticos

Por lo tanto, todos aquellos modelos alométricos que resultaron con valores de $P < 0.05$ en la prueba de "White", salieron de los límites establecidos presentando heterocedasticidad.

Para corregir ese problema se optó por la corrección de "pesos ponderados" en los residuales utilizando regresiones aparentemente no relacionadas acorde a la metodología SUR (Seemingly Unrelated Regression). El peso asociado a cada observación "peso" se debe incluir en el ajuste especificando en el programa la opción $\text{resid.Y} = \text{resid.Y}/\text{peso}$ (Davidson y Mackinnon, 1993; Cruz, 2007). El peso empleado para corrección de heterocedasticidad fueron las siguientes variables independientes:

“Peso”= $1/D$, $1/D^2$, raíz($1/D$), $1/D^2h$ o $1/D^3$.

Con esta opción los residuos (resid.Y) son multiplicados por el “peso” porque esta función afecta al residuo antes de que sea elevado al cuadrado para determinar la suma de cuadrados (Alvarez et al; 2007; Guzman et al., 2019).

2.2.8 Distribución de biomasa por componente

Se estimó la proporción de biomasa por componente (*BF*, *BHR* y *B*) en *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica* de la muestra de árboles analizados (24 árboles de las dos especies de *Pinus* y 90 para encino), dichas proporciones fueron expresadas en porcentajes relativos respecto a la biomasa aérea total la cual representó el 100%.

2.2.9 Acumulación de biomasa y volumen del rodal

Para determinar la cantidad de volumen fuste completo y Biomasa aérea sitio⁻¹ se sumó la cantidad presente en cada árbol en los sitios de muestreo. Finalmente, para estimar el *V* y *B ha*⁻¹ se empleó la siguiente fórmula:

$$V \text{ o } B \text{ ha}^{-1} = (V \text{ o } B \text{ sitio}^{-1} * 20)$$

$$V \text{ o } B \text{ ha}^{-1} * \text{Sup experimental} = V \text{ o } B \text{ total del bosque}$$

Donde:

V= Volumen maderable (m³)

B= Biomasa aérea en toneladas (t)

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Parámetros descriptivos de la muestra

De acuerdo con las características dasométricas generales y los estadísticos básicos de los 24 árboles derribados de *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y los 90 árboles de *Quercus elliptica* que fueron analizados, se encontró lo siguiente: para *Quercus elliptica* el diámetro normal (DN) osciló de 2.5 a 47 cm y la altura total (H) de 2 a 23 m; para *Pinus teocote* se obtuvo un rango de 5 a 53 cm de diámetro normal (cm) y 5.2 a 22 m de altura total (H); para *Pinus oocarpa* se reportó un DN entre 4.6 y 59.8 cm; la altura total (H) osciló entre 5 y 24 m (Cuadro 3).

Cuadro 3. Características dasométricas de los árboles analizados de *Pinus oocarpa*, *Pinus teocote* y *Quercus elliptica*, Montaña de Guerrero.

Especie	Variable	n	\bar{x}	S	CV	EE	Mín	Máx
<i>Quercus elliptica</i>	D	90	25.0	12.9	51.59	0.380	2.5	47
	H	90	14.0	5.1	36.08	0.675	2	23
	G	90	0.0619	0.1			0.0005	0.1735
	V	90	0.5	0.4	92.22	20.573	0.0009	1.6024
	BA	90	482.2	456.3	94.62	0.020	0.85	1662.5
	BF	90	322.8	297.7	92.22	0.029	0.62	1121.7
	BHR	90	159.4	159.7	100.15	0.060	0.2	540.8
<i>Pinus teocote</i>	D	24	23.89	14.40	60.3	0.158	5.5	52
	H	24	13.28	6.06	45.6	0.103	4	24.2
	G	24	0.06	0.0627	103.7	0.010	0.0024	0.2124
	V	24	0.50	0.6360	127.8	0.033	0.0072	2.1281
	BHR	24	101.22	136.17	134.5	0.486	0.9	512
	BF	24	250.18	323.14	129.2	0.749	2.1	1035
	BA	24	351.40	450.40	128.2	0.884	3	1547
<i>Pinus oocarpa</i>	D	27	27.3	15.96	58.6	3.07	5.8	59.8
	H	27	17.7	7.26	41.1	1.40	3	29
	G	27	0.0775	0.080	103.7	0.02	0.0026	0.2809
	V	27	0.8271	0.955	115.4	0.18	0.0069	3.3589
	BHR	27	148.50	198.74	133.8	38.25	0.93	736
	BF	27	339.01	402.68	118.8	77.50	3.50	1623
	BA	27	487.51	596.74	122.4	114.84	4.40	2359

Donde: n= número de árboles; S = desviación estándar; EE = error estándar; \bar{x} = valor promedio; CV = coeficiente de variación; Min = valor mínimo; Max = valor máximo; D = diámetro normal en cm; H = altura total en metros; V= volumen fuste completo en m³; BF = biomasa de fuste (kg); BHR=biomasa de hojas-ramas (kg); BA = biomasa aérea (kg).

Montoya et al., (2018) emplearon una muestra de 40 árboles para estimar volumen y biomasa en una plantación de *Pinus halepensis* en Coahuila, empleando diámetros normales entre 30 y 39 cm, así mismo Gutiérrez y Flores (2018) emplearon diámetros de 8.2 y 50.2 cm para *Pinus oocarpa* en bosques naturales del estado de Chiapas. Por su parte Domínguez et al. (2009), usaron diámetros entre 5 y 40 cm para estimación de factores de expansión de biomasa en *Pinus teocote* en bosques naturales del sur de Nuevo León. A su vez, Ruiz et al. (2014), emplearon árboles de encino (*Q. crassifolia* y *Q. laurina*) de 2.5 y 35 cm de diámetro para estimación de biomasa en bosques de Oaxaca. Los valores diamétricos mencionados anteriormente son similares a la muestra empleada para estimación de biomasa y volumen de las tres especies analizadas en este estudio. Esto podría indicar que en áreas naturales el intervalo diamétrico es más amplio para estimación de biomasa que en plantaciones forestales, lo cual tendría una ventaja notable en los valores estadísticos para la selección de modelos alométricos de biomasa.

Para *Quercus elliptica*, el volumen mínimo obtenido fue de 0.0007 m³, mientras que el máximo fue de 1.5240 m³. En *Pinus teocote* se encontró 0.0027 y 2.1281 m³ como min y máx. *Pinus oocarpa* representó 0.0069 min y 3.3538 m³ máx.

El peso seco en fuste (*BF*) en los árboles de mayores dimensiones fue registrado en *Pinus oocarpa* con más de 1620 kg, siendo aproximadamente el 54% de la biomasa hojas-ramas (*BHR*) que fue de 736 kg (Cuadro 3).

En relación con biomasa área (*B*), el valor máximo obtenido fue de 2359 kg ($\Phi = 59.8$ cm) en *Pinus oocarpa* y de 0.85 kg ($\Phi = 2.5$ cm) como mínimo en *Quercus elliptica*.

2.3.2 Biomasa aérea

El análisis de inspección gráfica logró identificar que los modelos de regresión de Meyer modificado, Stoate, Berkout y Kopezky (1, 2, 4 y 5) no se ajustaron adecuadamente para la estimación de biomasa aérea (B), puesto que predijeron valores negativos, los modelos 6 y 8 presentaron heterocedasticidad, y a pesar de realizarle la corrección de heterocedasticidad mediante la inclusión de $1/d^2h$, $1/d^2$ o $1/dh$ en los residuales no mejoró su distribución y la prueba de "White" arrojó valores de $p < 0.05$, tal como lo fue en el modelo 4 de Kopezky en *Pinus teocote* y el modelo 6 de Hohenald-Krenn en *Pinus oocarpa*. Específicamente para *Pinus teocote*, el modelo de Schumacher (7) fue el que mejor se adaptó a la nube de puntos de biomasa aérea, los valores obtenidos fueron: $R^2_{adj}=0.99$, $REMC=34.67$ y sesgo promedio (e) de 21.10 kg; el test de White indicó homocedasticidad en los residuales ($p=0.2927$). En *Quercus elliptica* casi todos los modelos convergieron adecuadamente al presentar homocedasticidad ($p=0.5867$); el modelo que presentó mejor ajuste fue el 7 de Schumacher-Hall, el cual se encuentra en los límites del intervalo de confianza al 99%, para fines prácticos se eligió como el mejor ya que tiene una excelente capacidad predictiva y los mejores criterios estadísticos estructurales: $R^2_{adj}=0.99$, $RCME= 18.77$ y el menor sesgo promedio (e) de 7.0; así mismo, no presentó problemas de autocorrelación de acuerdo a la prueba de Durbin-Watson ($DW=1.87$). Respecto a *Pinus oocarpa*, el mejor modelo alométrico que se ajustó para la estimación de biomasa aérea fue el 7 (Schumacher-Hall), en su versión potencial $Y=b_0 * D^{b_1} * H^{b_2}$; sin embargo, presentó problemas de heterocedasticidad ($p=0.008$); al intentar realizar la corrección ponderada ($1/d$, $1/d^2$ y $1/d^2h$) se logró que los residuos fueran homocedásticos ($p > 0.05$), pero al hacer eso el modelo perdió capacidad predictiva en la estimación de biomasa aérea [dos de los tres valores betas no fueron significativos ($p > 0.05$)] por lo tanto el modelo 7 fue descartado y fue elegido el modelo 3 (Spur) con los siguientes estadísticos: $R^2_{adj}=0.97$, $REMC=97.57$ y $e= 65.9$ indicando que presenta una buena distribución de residuales de

acuerdo con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (0.937), así mismo no presentó problema de heterocedasticidad ($p=0.4546$) (Cuadro 4).

Los valores de R^2_{adj} obtenidos en las 3 especies evaluadas (*Pinus teocote*, *P. oocarpa* y *Q. elliptica*) son similares a los obtenidos por Domínguez et al., (2009), para *P. pseudostrobus*, *P. teocote* y *Quercus spp*, del sur de Nuevo León con valores de R^2 de 0.92, 0.89 y 0.93 para las tres especies evaluadas; así mismo los valores de *REMC* fueron 25.51, 30.90 y 23.56 kg; estos errores son similares a los generados por los modelos seleccionados (22.10, 65.92 y 18.26 kg en *P. teocote*, *P. oocarpa* y *Q. elliptica*).

La biomasa aérea en las 3 especies pudo ser estimada eficientemente por el modelo de Schumacher-Hall (Chave et al., 2005; Vásquez et al., 2017; Cortés et al., 2018); este modelo ha sido empleado para estimar biomasa de otras especies, inclusive en arbustos y especies de zonas áridas y semiaridas (Villavicencio et al., 2020; Hernández et al, 2019).

Cuadro 4. Parámetros de ajuste en biomasa aérea (B) (kg) de 3 especies forestales, Montaña de Guerrero.

Parámetros estadísticos para <i>Pinus teocote</i>											
Ecuación	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2_{adj}	REMC	e	SW	DW	TW	Pr> F
1	-332.57	30.49671	-3.36295		0.85	169.9	108.82	0.90	1.66	0.0011	0.0001
2	16.03167	0.043571	-3.21461	0.02476	0.98	88.62	55.16	0.85	1.87	0.0226	0.0001
3*	3.38009	0.02418			0.99	38.03	26.71	0.94	1.7	0.0026	0.0001
4	-345.399	29.16512			0.86	166.1	313.63	0.9	1.84	0.0005	0.0001
5	-77.2972	0.557008			0.97	75.2	56.93	0.85	1.96	0.0591	0.0001
6	31.66246	-8.40347	0.666282		0.97	66.68	38.29	0.55	1.58	0.032	0.0001
7	0.045115	2.69915	-0.09197		0.98	61.08	35.71	0.86	1.92	0.0059	0.0001
8	-3.69965	2.965603			0.91	0.597	283.36	0.75	1.23	0.0002	0.0001
Parámetros estadísticos para <i>Pinus oocarpa</i>											
1	-321.126	42.6235	-19.9859		0.86	220.8	147.5	0.97	1.65	0.0142	0.0001
2	22.24554	0.0026	-0.8721	0.020753	0.97	98.99	66.7	0.85	1.87	0.0113	0.0001
3	11.20262	0.0207			0.97	95.1	66.9	0.94	1.7	0.005	0.0001
4	-457.343	34.671			0.85	228	164.2	0.9	1.84	0.001	0.0001
5	-74.0662	0.5690			0.95	131.9	81.2	0.85	1.96	0.0075	0.0001
6	18.42462	-5.8205	0.624454		0.95	132.8	68.2	0.55	1.58	0.0568	0.0001
7*	0.02134	1.9693	1.0299		0.97	97.57	65.9	0.86	1.92	0.0083	0.0001
8	-2.9235	2.6083			0.98	0.215	76.6	0.75	1.23	0.051	0.0001
Parámetros estadísticos para <i>Quercus elliptica</i>											
1	-207.52006	21.72769	-1.36686		0.89	92.495	68.4	0.97	1.65	0.0142	0.0001
2	-0.64634	0.000983	0.299823	0.023692	0.98	34.005	19.9	0.85	1.87	0.0001	0.0001
3	12.41192	0.02231			0.99	25.322	15.0	0.94	1.7	0.0101	0.0001
4	-215.2585	21.26913			0.89	92.040	69.2	0.90	1.84	0.0006	0.0001
5	-19.22625	0.42526			0.95	64.406	37.3	0.85	1.96	0.0001	0.0001
6	-4.75547	-1.44464	0.45268		0.95	64.644	37.0	0.55	1.58	0.0008	0.0001
7*	0.0316	1.7285	1.2302		0.99	18.778	7.1	0.86	1.92	0.051	0.0001
8	-2.9623	2.59339			0.97	0.285	52.6	0.75	1.23	0.0003	0.0001

Donde: R^2_{adj} = Coeficiente de determinación ajustado; REMC = raíz del error medio cuadrático; e= sesgo promedio de residuales; TW= test de White para heterocedasticidad; DW= prueba de autocorrelacion de Durbin y Watson; SW= prueba de normalidad de errores de Shapiro-Wilk; β_0 , β_1 , β_2 y β_3 = Parámetros de la regresión; $Pr>T$ = valor de la probabilidad de la distribución *t* de Student; *mejor modelo para biomasa aérea seleccionado.

Para *Pinus teocote*, la ecuación de biomasa área estimada quedó integrada de la siguiente forma: $B=0.045115 * D^{2.69915} * H^{0.09197}$ con $R^2_{adj}=0.98$, de la cual se deriva la línea de distribución de biomasa aérea (kg) que presenta una forma ligeramente lineal, con límites de confianza uniformes en el rango de diámetros estimados (5 a 60 cm). Para el caso de *Pinus oocarpa* la ecuación fue la siguiente: $B= 0.021342 * D^{1.9693} * H^{1.0299}$ $R^2_{adj}= 0.97$, la cual generó una curva cóncava estimando de forma confiable el volumen en casi todas las categorías diamétricas excepto para la categoría 35 cm, la cual sale de los límites de confianza al 95 %; finalmente para *Quercus elliptica* la ecuación generada fue $BA= 0.07018 * D^{2.22762} * H^{0.47717}$, $R^2_{adj}= 0.99$; de igual forma de forma cóncava en donde los valores de la categoría diamétrica de 35 cm salen de los límites de confianza, en las demás categorías predice de forma confiable (Figura 4).

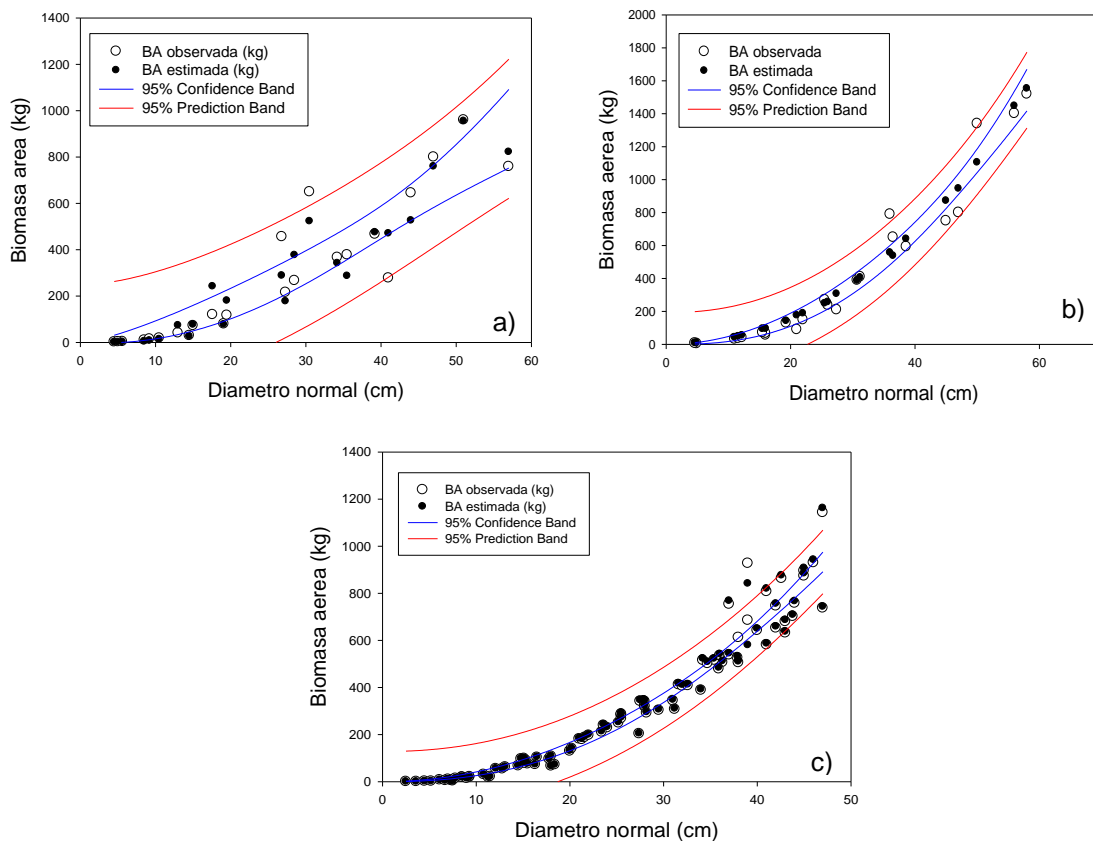


Figura 4. Relación diámetro normal y biomasa aérea con límites de confianza al 95% de la media para *Pinus teocote* (a), *Pinus oocarpa* (b) y *Quercus elliptica* (c), región Montaña de Guerrero.

2.3.3 Biomasa de fuste

Se trató de lograr que todos los modelos ajustados fueran homocedásticos para las tres especies evaluadas en biomasa de fuste; es importante aclarar que en algunos casos de forma normal se logró que el estadístico TW (test de White) fuera mayor al 95% de confiabilidad ($p=0.05$), en otros casos se logró mediante la corrección ponderada mediante la raíz cuadrática inversa de los siguientes “pesos”: $1/d$, $1/d^2$ y $1/d^2h$; donde esta última combinación de valores fue la que mayor impacto tuvo en los residuos.

Como se mencionó en el apartado anterior, algunos modelos alométricos también predijeron valores negativos (modelo 1, 4 y 5) para estimación de biomasa de fuste en *Pinus oocarpa*, *Pinus teocote* y *Quercus elliptica*, los cuales son lineales y no siguen el comportamiento de la distribución natural tanto de la biomasa de fuste como de la biomasa aérea.

Para *Pinus teocote*, el modelo de Schumacher-Hall (7) fue el que mejor se ajustó en biomasa de fuste, presentando valores de R^2_{adj} de 0.99, REMC de 53.29 y sesgo promedio de 28.8 kg. Respecto a *Pinus oocarpa*, el modelo alométrico que mejor ajustó para la estimación de biomasa de fuste fue el 3 (Spur), en su versión lineal, con los siguientes estadísticos: $R^2_{adj}=0.96$, $REMC= 79.55$ y $e= 52.5$, indicando que presenta una buena distribución de residuales de acuerdo con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (0.937), así mismo no presenta problemas de heterocedasticidad ($p=0.6754$; Cuadro 5).

En *Quercus elliptica* para todos los modelos de biomasa de fuste (B_f), la prueba de White resultó significativa al 4% ($p=0.0649$) indicando que los modelos ajustados son homocedásticos; los anterior se logró sin necesidad de realizar la corrección ponderada mediante la metodología SUR. La razón principal de este hecho fue el emplear en este estudio un modelo potencial de volumen de fuste completo para su conversión a biomasa de fuste por medio de la densidad básica, originando una línea recta de predicción dando como resultado un $R^2_{adj}=0.99$, $REMC= 0.079$ y sesgo promedio de 0.048, casi cercanos a cero.

Cuadro 5. Parámetros estadísticos para biomasa de fuste (*Bf*) en kg de 3 especies forestales, Montaña de Guerrero.

Parámetros estadísticos para <i>Pinus teocote</i>											
Ecuación	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2_{adj}	REMC	e	SW	DW	TW	Pr>F
1	-252.305	20.01004	1.839147		0.84	128.9	97.5	0.90	1.66	0.0253	0.0001
2	12.14652	0.024392	-2.40201	0.018146	0.96	67.27	33.9	0.85	1.87	0.0465	0.0001
3	2.840492	0.017185			0.97	52.67	30.8	0.94	1.7	0.0222	0.0001
4	-245.288	20.73826			0.84	126	96.6	0.9	1.84	0.0109	0.0001
5	-54.0343	0.395267			0.95	72.23	45.1	0.85	1.96	0.0488	0.0001
6	17.25729	-4.60922	0.405905		0.91	94.913	52.2	0.55	1.58	0.0073	0.0001
7*	0.025392	1.876052	1.028034		0.97	53.29	28.8	0.55	1.58	0.0075	0.0001
8	-4.23714	3.042679			0.89	77.53	242.5	0.86	1.92	0.0002	0.0001
Parámetros estadísticos para <i>Pinus oocarpa</i>											
1	-208.582	28.5872	-13.1073		0.86	150.5	99.1	0.97	1.65	0.0231	0.0001
2	-2.1662	0.267427	-0.91106	0.003778	0.94	94.09	52.9	0.85	1.87	0.0090	0.0001
3*	19.76274	0.0139			0.96	79.55	52.5	0.94	1.7	0.0352	0.0001
4	-297.918	23.372			0.85	154.8	110.3	0.9	1.84	0.0017	0.0001
5	-38.1849	0.382158			0.94	97.05	61.1	0.85	1.96	0.0012	0.0001
6	49.63693	-7.12468	0.489896		0.94	94.82	59.0	0.55	1.58	0.0078	0.0001
7	0.05714	2.4638	0.0421		0.92	108.5	61.1	0.86	1.92	0.0034	0.0001
8	-2.7727	2.4085			0.96	0.3051	68.3	0.75	1.23	0.0001	0.0001
Parámetros estadísticos para <i>Quercus elliptica</i>											
1	-180.314	25.10943	-8.85771		0.92	82.080	62.6	0.97	1.65	0.0001	0.0001
2	-0.0377	-0.31878	0.128891	0.016821	0.99	1.060	100.2	0.85	1.87	0.0001	0.0001
3	9.08494	0.023033			0.99	14.380	9.40	0.94	1.7	0.0001	0.0001
4	-230.461	22.13781			0.91	84.930	68.7	0.90	1.84	0.0001	0.0001
5	-28.424	0.445162			0.98	39.110	25.2	0.85	1.96	0.0001	0.0001
6	13.39979	-4.17535	0.52441		0.98	37.501	22.8	0.55	1.58	0.0001	0.0001
7*	0.048915	2.020591	0.721102		0.99	0.079	0.048	0.86	1.92	0.0001	0.0001
8	-2.71176	2.523512			0.99	0.171	32.16	0.75	1.23	0.0003	0.0001

Donde: R^2_{adj} = Coeficiente de determinación ajustado; REMC = raíz del error medio cuadrático; e= sesgo promedio de residuales; TW= test de White para heterocedasticidad; DW= prueba de autocorrelación de Durbin y Watson; SW= prueba de normalidad de errores de Shapiro-Wilk; β_0 , β_1 , β_2 y β_3 = Parámetros de la regresión; Pr>T= valor de la probabilidad de la distribución t de Student; *mejor modelo para biomasa de fuste seleccionado.

Las ecuaciones seleccionadas para estimación de biomasa de fuste quedaron explicadas acorde al Cuadro 6 y Figura 5.

Cuadro 6. Estadísticos de mejores modelos en *BF* en dos especies de *Pinus*

Ec	Sp	Expresión	Parámetros	Estimador	EE	Valor -T	Pr>F
7	<i>Pt</i>	$Y = b_0 * D^{b_1} * H^{b_2}$	b0	0.025392	0.0149	1.7	0.1032
			b1	1.876052	0.3155	5.95	<.0001
			b2	1.028034	0.3945	2.61	0.0165
3	<i>Po</i>	$Y = b_0 + D^2H$	b0	19.75988	19.8324	1.0	0.3286*
			b1	0.013857	0.000547	25.32	<.0001
7	<i>Qe</i>	$Y = b_0 * D^{b_1} * H^{b_2}$	b0	0.048915	0.000013	3843.34	<.0001
			b1	2.020591	0.000214	9450.65	<.0001
			b2	0.721102	0.000252	2860.46	<.0001

Donde: Ec= ecuación seleccionada; sp= especie; Y=biomasa de fuste; D=diámetro normal (cm); H=altura (m); b₀,b₁,b₂= parámetros estimadores; EE= error estándar de los estimadores; Pr>T= valor de la probabilidad de la distribución t de Student.*parámetro b₀ no significativo.

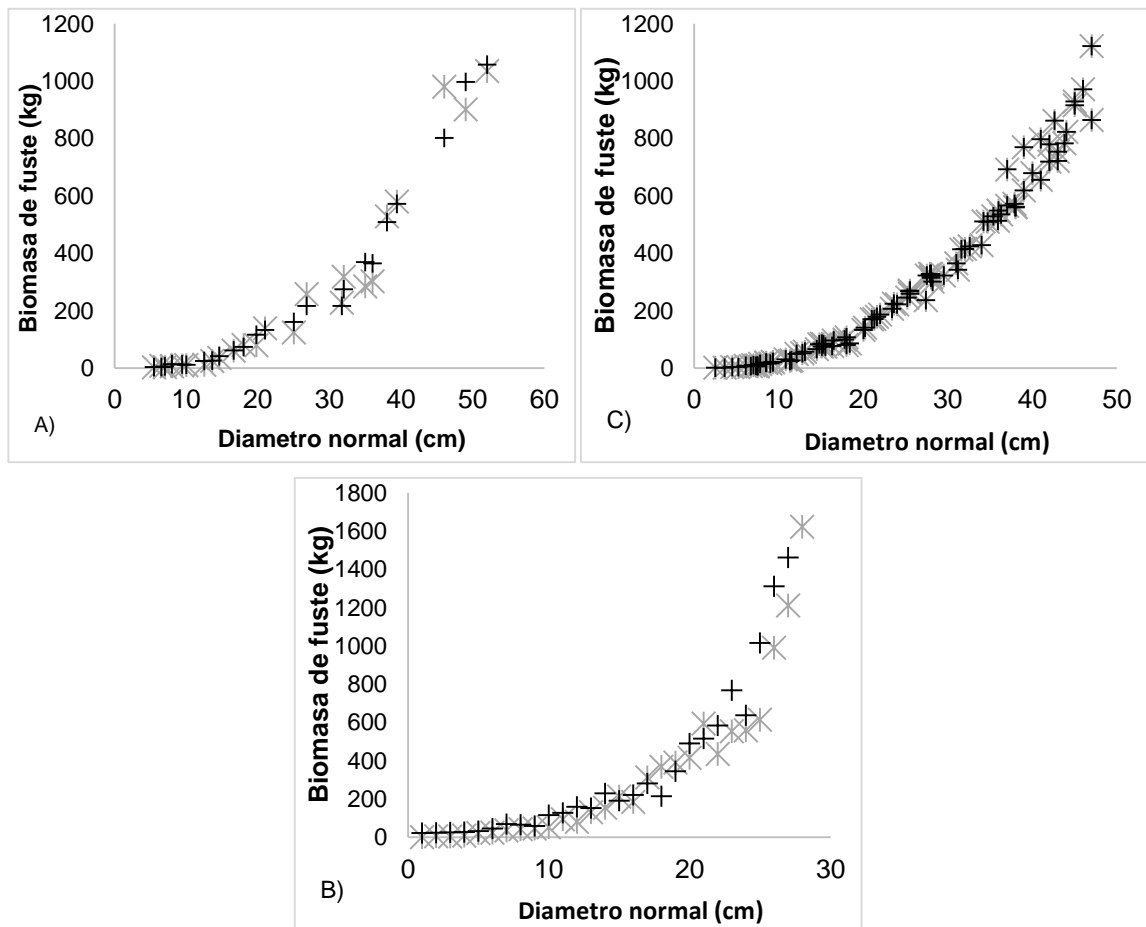


Figura 5. biomasa fustal en *P. teocote* (a), *P. oocarpa* (b) y *Q. elliptica* (c) de Guerrero.

2.3.4 Biomasa de hojas-ramas

Par esta variable, los modelos 1, 4, 5 y 6 (Meyer modificado, Berkhout, Kopezky y Hohenald-Krenn) estimaron valores negativos para *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*, por lo tanto, automáticamente se descartaron para su utilización. La biomasa de hojas-ramas en *Pinus teocote* no pudo ser estimada con el modelo el modelo 7 de Schumacher porque pesar de que presentó los estadísticos más satisfactorios para estimación de biomasa de hojas-ramas, dos de sus tres parámetros (b_0 y b_1) no fueron estadísticamente significativos con valores $P > 0.05$, es por ello que se optó por el modelo 3 de Spur, con el cual se obtuvieron valores de $R^2_{adj} = 0.90$, $REMC = 42.74$ y $e = 23.7$; los estadísticos de la prueba de normalidad de errores de Shapiro-Wilk fueron $SW = 0.94$, la prueba de Durbin y Watson (DW) arrojó un valor de 1.70 indicando que los residuos no están correlacionados, así mismo el valor de $TW = 0.2459$ indicando significancia homocedástica (Cuadro 7).

Referente a biomasa de hojas-ramas (Bhr) en *Pinus oocarpa*, el modelo de Schumacher (7) presentó la mejor bondad de ajuste para su estimación, sin embargo, el parámetro b_0 no fue significativo ($p = 0.2941$), pero aun así no se violaron los supuestos de regresión que indican que el intercepto puede no ser significativo pudiéndose quitar opcionalmente de la estructura del modelo y así el modelo puede funcionar de la mejor forma (Cuadro 7). El valor de R^2_{adj} encontrado fue de 0.95, $REMC$ de 7.79 y 27 de sesgo promedio (e).

Cuadro 7. Estadísticos de ajuste para biomasa de hojas-ramas (*Bhr*) en *P. teocote* y *P. oocarpa*, Montaña de Guerrero.

Parámetros estadísticos para <i>Pinus teocote</i>											
Ecuación	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2_{adj}	REMC	e	SW	DW	TW	Pr> F
1	-80.2789	10.48675	-5.20154		0.78	63.62	45.0	0.90	1.66	0.0012	0.0001
2	24.94831	0.086586	-4.18066	0.004525	0.90	41.88	25.6	0.85	1.87	0.0477	0.0001
3*	0.532929	0.006995			0.90	42.74	23.7	0.94	1.7	0.0026	0.0001
4	-100.122	8.427164			0.78	63.9	47.4	0.9	1.84	0.0001	0.0001
5	-23.2707	0.161745			0.89	44.48	29.0	0.85	1.96	0.0001	0.0001
6	37.855	-5.90397	0.265598		0.90	40.86	65.4	0.55	1.58	0.0142	0.0001
7	0.003593	3.543921	-0.69818		0.92	37.65	21.7	0.95	1.67	0.0417	0.0001
8	-4.77558	2.873457			0.93	0.4933	53.7	0.86	1.92	0.0004	0.0001
Parámetros estadísticos para <i>Pinus oocarpa</i>											
1	-112.537	14.0364	-6.87903		0.82	83.25	57.9	0.97	1.65	0.0009	0.0001
2	7.163799	-0.03042	-0.80377	0.008054	0.95	43.54	27	0.85	1.87	0.0209	0.0001
3	-8.55726	0.0068			0.95	42.33	27.7	0.94	1.7	0.0129	0.0001
4	-159.42	11.299			0.81	85.23	63.4	0.9	1.84	0.0002	0.0001
5	-35.8775	0.186805			0.92	55.06	36.8	0.85	1.96	0.0352	0.0001
6	33.42481	-5.62225	0.271825		0.93	51.45	29.2	0.55	1.58	0.0861	0.0001
7*	0.00271	2.0813	1.177306		0.95	47.79	27	0.97	1.92	0.0032	0.0001
8	-5.3589	2.9163			0.96	0.3936	29.2	0.86	1.92	0.0032	0.0001

Donde: R^2_{adj} = Coeficiente de determinación ajustado; REMC = raíz del error medio cuadrático; e= sesgo promedio de residuales; TW= test de White para heterocedasticidad; DW= prueba de autocorrelación de Durbin y Watson; SW= prueba de normalidad de errores de Shapiro-Wilk; β_0 , β_1 , β_2 y β_3 = Parámetros de la regresión; Pr>T= valor de la probabilidad de la distribución *t* de Student; *mejor modelo para biomasa de hojas-ramas seleccionado.

Las ecuaciones con mejores ajustes para estimación *Bhr* se pueden visualizar gráficamente en la Figura 6 y explicadas en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Parámetros de ajuste de *Bhr* para dos especies de *Pinus*

Ec	Sp	Expresión	Parámetros	Estimador	EE	Valor -T	Pr>F
7	Pt	$Y = b_0 + b_1 * D^2H$	b0	0.53293	10.9109	0.05	0.9615*
			b1	0.00699	0.00047	14.86	<.0001
			b0	0.00271	0.00252	1.07	0.2941*
7	Po	$Y = b_0 * D^{b_1} * H^{b_2}$	b1	2.0813	0.2741	7.59	<.0001
			b2	1.1773	0.4458	2.64	0.0143

Donde: Ec= ecuación seleccionada; sp= especie; Pt=*Pinus teocote*; Po= *Pinus oocarpa*; Y=biomasa de hojas-ramas; D=diámetro normal (cm); H=altura (m); b₀,b₁,b₂= parámetros estimadores; EE= error estándar de los estimadores; Pr>T= Valor de la probabilidad de la distribución *t* de Student; *valor b₀ no significativo.

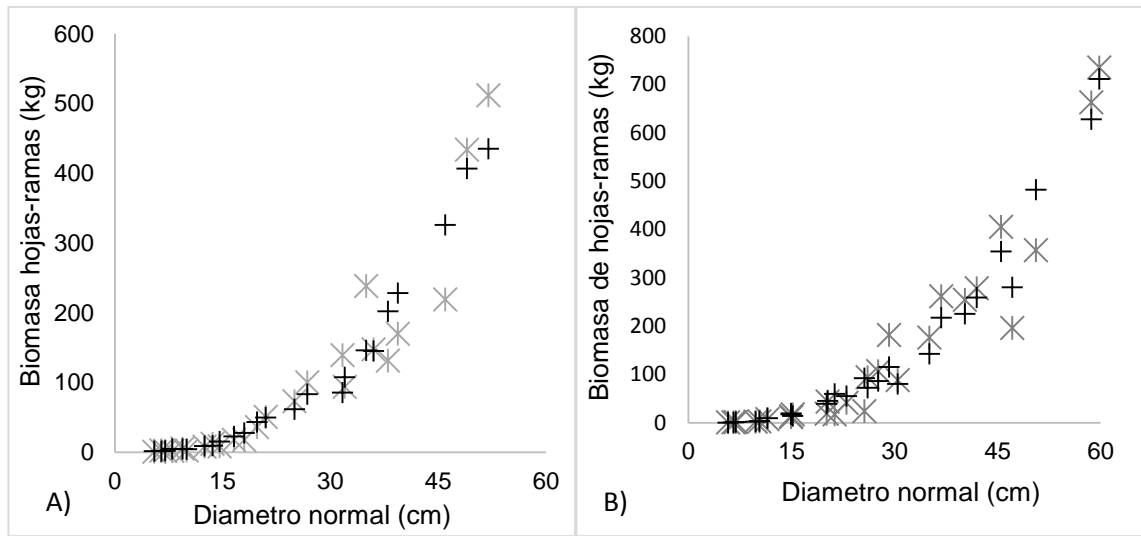


Figura 6. Relación diámetro y biomasa de hojas-ramas (*Bhr*) en *Pinus teocote* (a), *Pinus oocarpa* (b), región Montaña de Guerrero.

2.3.5 Volumen de fuste completo

Para *Pinus oocarpa*, debido a la dispersión de sus variables dependientes e independientes, los modelos 1, 2, 3, 4 y 5 (Meyer modificado, Stoate, Spur, Berkhout y Kopezky) predijeron valores negativos, excepto el modelo 7 el cual presentó los mejores criterios estadísticos; donde los residuales fueron homocedásticos ($TW=0.0956$) con valores de $R_{adj}=0.98$, $REMC=0.1223$ y $e=0.0796$.

Respecto a *Pinus teocote* los modelos 1, 4 y 5 (Meyer modificado, Berkout y Kopezky) estimaron valores negativos de volumen fuste completo (m^3) por lo tanto, automáticamente se descartaron para su utilización. De los modelos restantes el modelo 7 de Schumacher presentó los estadísticos más satisfactorios con valores de $R^2_{adj}=0.99$, $REMC=0.0382$ y $e=0.0246$; respecto al análisis de distribución de residuales la prueba de White indicó que sus valores son homocedásticos ($TW=0.6451$), la prueba de normalidad de errores de Shapiro-Wilk fue $SW=0.96$ y la prueba de Durbin y Watson (DW) fue de 1.67, indicando que no existe autocorrelación en los errores (Cuadro 9).

Cuadro 9. Bondad paramétrica de ajuste para volumen fuste completo (m³) en *P. teocote* y *P. oocarpa*, Montaña de Guerrero.

Parámetros estadísticos para <i>Pinus teocote</i>											
Ecuación	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2_{adj}	REMC	e	SW	DW	TW	Pr>F
1	-0.47868	0.041279	-0.00076		0.84	0.2478	0.1945	0.90	1.66	0.0023	0.0001
2	0.02008	0.000042	-0.00234	0.000033	0.99	0.040	0.0247	0.85	1.87	0.2085	0.0001
3	0.005287	0.000034			0.99	0.0387	0.0235	0.94	1.7	0.0193	0.0001
4	-0.48156	0.04098			0.85	0.2421	0.1949	0.9	1.84	0.0003	0.0001
5	-0.10665	0.000785			0.96	0.1134	0.0889	0.85	1.96	0.0081	0.0001
6	0.026862	-0.00803	0.000803		0.94	0.1486	0.0747	0.55	1.58	0.0064	0.0001
7*	0.000044	2.027792	0.885297		0.99	0.0397	0.0246	0.55	1.58	0.2906	0.0001
8	-8.73052	2.155282			0.86	0.6614	0.2808	0.86	1.92	0.0006	0.0001
Parámetros estadísticos para <i>Pinus oocarpa</i>											
1	-0.56063	0.0660	-0.02332		0.89	0.3022	0.2193	0.97	1.65	0.005	0.0001
2	-0.00272	0.000077	0.001269	0.000033	0.98	0.0957	0.1679	0.85	1.87	0.0054	0.0001
3	0.057381	0.00003			0.99	0.0651	0.1933	0.94	1.7	0.0064	0.0001
4	-0.71954	0.057			0.89	0.3078	0.2463	0.9	1.84	0.0006	0.0001
5	-0.08488	0.000924			0.98	0.1304	0.0909	0.85	1.96	0.0106	0.0001
6	0.075781	-0.01303	0.001121		0.98	0.1223	0.0796	0.55	1.58	0.0226	0.0001
7*	0.000091	1.785879	0.960787		0.99	0.0455	0.0336	0.86	1.92	0.3526	0.0001
8	-8.8889	2.4986			0.98	0.2411	0.1086	0.86	1.92	0.0398	0.0001

Donde: R^2_{adj} = Coeficiente de determinación ajustado; REMC = raíz del error medio cuadrático; e= sesgo promedio de residuales; TW= test de White para heterocedasticidad; DW= prueba de autocorrelación de Durbin y Watson; SW= prueba de normalidad de errores de Shapiro-Wilk; β_0 , β_1 , β_2 y β_3 = Parámetros de la regresión; Pr>T= valor de la probabilidad de la distribución t de Student; *mejor modelo para volumen de fuste completo seleccionado.

Las ecuaciones con mejores ajustes para estimación de V se pueden visualizar gráficamente en la Figura 7 y explicadas en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Bondad de ajuste de modelos alométricos seleccionados para estimación de Volumen fuste completo (m^3) para dos especies de *Pinus*

Ec	Sp	Expresión	Parámetros	Estimador	EE	Valor -T	Pr>F
7	Pt	$Y = b_0 * D^{b_1} * H^{b_2}$	b0	0.000044	8.426E-6	5.20	<.0001
			b1	2.027792	0.1075	18.86	<.0001
			b2	0.885297	0.1443	6.14	<.0001
6	Po	$Y = b_0 * D^{b_1} * H^{b_2}$	b0	0.000091	0.000015	5.92	<.0001
			b1	1.785879	0.0497	35.91	<.0001
			b2	0.960787	0.0830	11.57	<.0001

Donde: Ec= ecuación seleccionada; sp= especie; Y=Volumen fuste completo (m^3); D=diámetro normal (cm); H=altura (m); b_0, b_1, b_2 = parámetros estimadores; EE= error estándar de los estimadores; Pr>T= Valor de la probabilidad de la distribución t de Student,

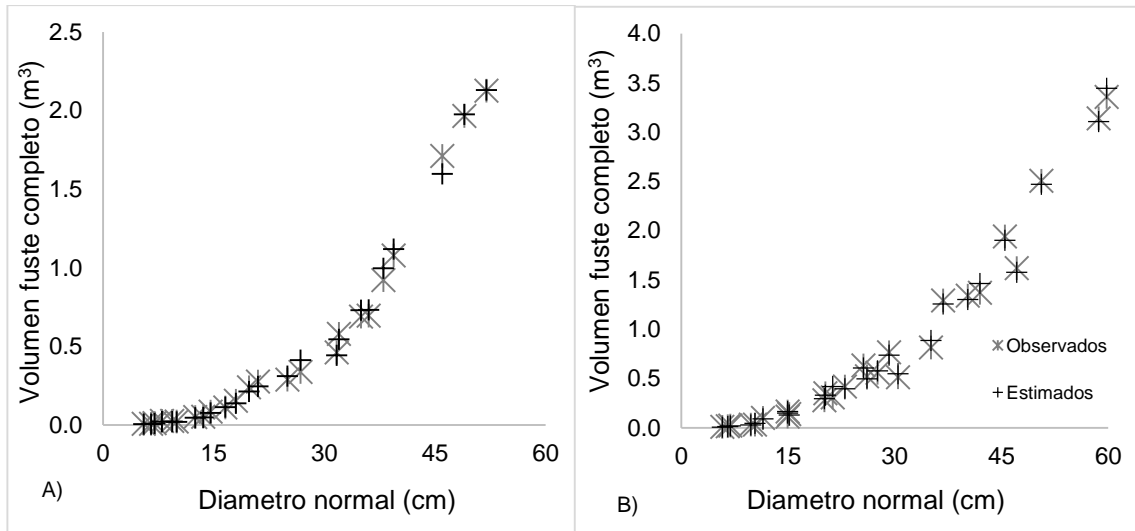


Figura 7. Relación diámetro normal y volumen de fuste completo (m^3) en *Pinus teocote* (A), *Pinus oocarpa* (B) región Montaña de Guerrero.

2.3.6 Relación biomasa aérea y volumen de fuste

Para el presente estudio, la aplicación del método directo de derribo para estimación de volumen y biomasa en las 2 especies de *Pinus* permitió establecer una relación promedio que existe entre el peso (kg) con respecto al volumen (m^3), resultando la densidad básica de la madera (g/m^3). Para *Pinus teocote* la

densidad básica promedio fue de 0.45 g/cm³ y en *Pinus oocarpa* el valor promedio fue de 0.50 g/cm³ (Figura 8); valores que se encuentran por debajo por lo reportado por Sotomayor (2003) para *Pinus teocote* con 0.51 gr/cm³ y 0.56 para *Pinus oocarpa* del estado de Chiapas (Gutiérrez et al., 2010); sin embargo superan a lo obtenido parte Silva-Arredondo et al. (2012), quienes reportaron una densidad básica promedio de 0.47 gr/cm³ para especies de *Pinus* del estado de Durango; así mismo en *Pinus ayacahuite* que promediaron 0.36 gr/cm³ y *Pinus patula* 0.46 gr/cm³ en el estado de Tlaxcala (Vázquez et al., 2014), con lo que se puede notar que a la densidad encontrada en este estudio está acorde al rango dentro de la clasificación de maderas mexicanas para especies de bosques de coníferas de Ordoñez et al. (2008), quien indica que el rango oscila entre 0.35 como min y 0.80 gr/cm³ como máximo, con un rango promedio de 0.51.

Los valores encontrados en esta investigación para la densidad básica de ambas especies de *Pinus*, podrían deberse a que se incluyeron árboles muy jóvenes (categorías diamétricas dese 5 cm) tal como lo explican Valencia et al. (1997), donde la madera joven de *Pinus gregii* presentó menor densidad respecto a árboles más longevos. Sin embargo, en *P. oocarpa* se ha observado que la densidad está más relacionada con la altitud, ya que se registran valores más altos de densidad en las zonas más altas y menores en zonas bajas (Tamarit y Fuentes-Salinas, 2003).

En la Figura 6 se puede observar la tendencia de los valores de densidad básica transformados a gr/cm³, en *Pinus teocote* se ve ligeramente una tendencia de incremento en el valor de la densidad básica conforme los diámetros normales aumentan, eso significaría que los árboles más longevos presentan densidad de la madera más alta (Lopez y Valencia, 1997; Gutiérrez et al., 2012; Gutiérrez et al., 2017). En *Pinus oocarpa* también se observa dicha tendencia, pero con una distribución un poco más variable. Con esta información es posible estimar mediante el método indirecto de densidad básica la biomasa aérea de un árbol,

multiplicando el volumen fuste completo (m³) por la densidad la madera determinada para las 2 especies estudiadas.

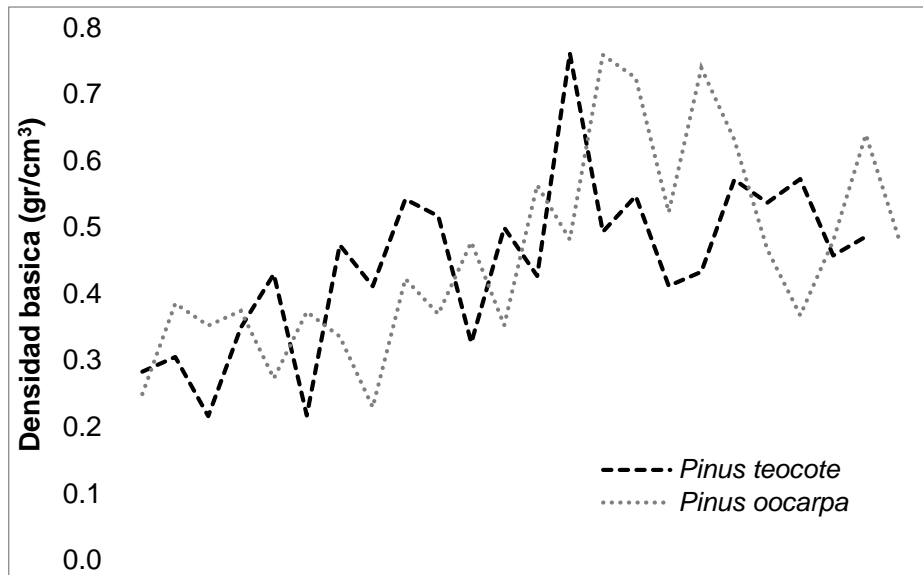


Figura 8. Relación biomasa aérea y volumen de fuste completo (m³) de 3 especies forestales, Montaña de Guerrero.

La estrecha conexión que se observa entre el volumen fuste completo y la biomasa aérea muestra un $R^2 > 0.94$, con lo que se comprueba que los modelos utilizados para estimar el volumen se ajusten de igual forma para estimar la biomasa aérea (Figura 9) mediante regresión lineal simple (Méndez et al. 2005; Aguilar, 2009).

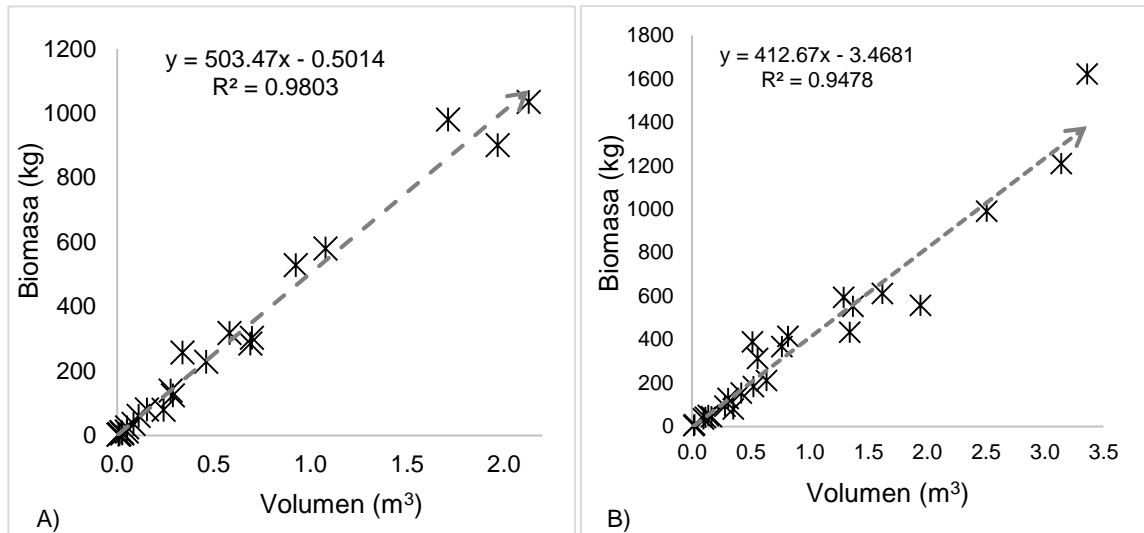


Figura 9. Proporción de biomasa y volumen de fuste completo de *Pinus teocote* (A), *Pinus oocarpa* (B), Montaña de Guerrero.

2.3.7 Proporción de biomasa por componente

La proporción de biomasa de hojas ramas (BHR) representó el 29.6, 24.6 y 30.9%, Para biomasa de fuste (BF) se encontró 70.4, 75.4 y 68 % para *Pinus teocote*, *P. oocarpa* y *Q. Elliptica*, respectivamente (Figura 11). Navarro et al., (2020) determinaron 67.4 % de biomasa en fuste y 34.2 % en hojas-ramas de *Pinus oocarpa* de la region costa grande de Guerrero. Jimenez et al. (2010), reportaron un promedio de 65.31% de biomasa en fuste en *P. hartwegii* Lindl; asi mismo, Pacheco (2011), reporta valores similares (63.25%). Sin embargo, esta distribución es baja en comparación con otros estudios, por ejemplo; Avendaño et al. (2007) encontraron que en *Abies religiosa* Kunt Schltdl. et Cham., el promedio de biomasa en fuste es de 81.27%, al igual que González (2008) determinó 87.6% de biomasa de fuste para árboles de 6 a 67.2 cm de diámetro normal en *P. maximinoi* H. E. Moore, reportándose la mayor concentración de la biomasa aérea en el fuste como ocurre en plantaciones y bosques naturales para ecosistemas de porte arbóreo (Red y Tome, 1998; Helmisaari et al. 2002).

Gómez et al. (2011), para *Quercus magnoliifolia* hallaron porcentajes de biomasa aérea de 62.5% para fuste, 37.4 % para hojas y ramas en el estado de Morelos; valores similares a los encontrados en esta investigación para *Q elliptica*; sin embargo, Navarro et al (2020)., reportaron 52.1 % en fuste y 47.9 en hojas-ramas en *Q. resinosa* del estado de Guerrero.

Gayoso et al. (2002) mencionan que la distribución proporcional de la biomasa, está asociada a las características de los árboles según las especies, el estado de desarrollo y el grado de intervenciones silvícolas.

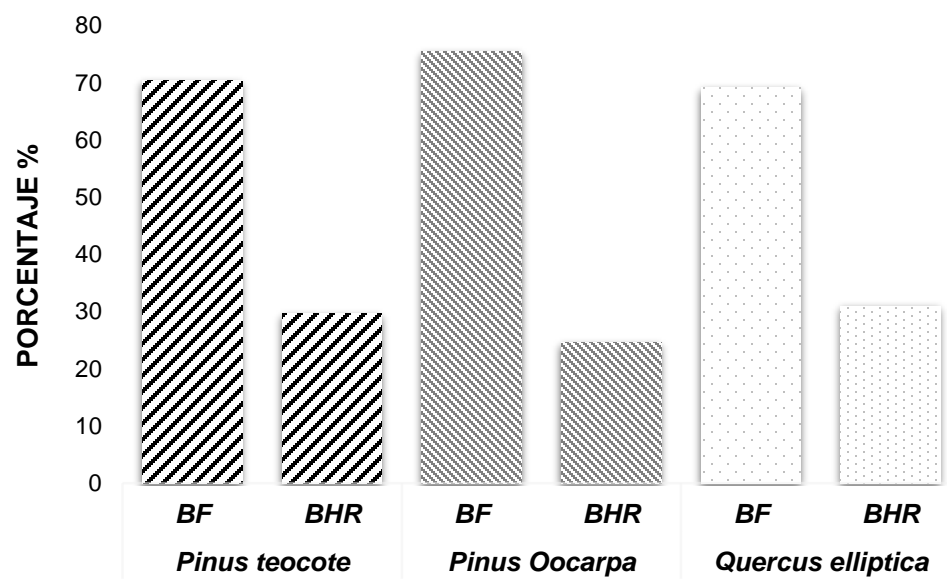


Figura 10. Biomasa por componente es 3 especies forestales, Montaña de Guerrero.

2.3.8 Volumen y biomasa a nivel rodal

Los mejores modelos obtenidos para estimar volumen y biomasa área se integraron a la información dasométrica del área experimental, estimando un total de biomasa aérea de 110.6, 174.5 y 97.26 ton ha⁻¹ para *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica*, respectivamente; lo anterior representa 91.1, 63.2 y 48.6 ton de C ha⁻¹. El volumen maderable quedó representado de la siguiente manera: 157.61 m³ ha⁻¹ en *Pinus teocote*, 228.2 m³ ha⁻¹ en *Pinus oocarpa* y 170.16 m³ ha⁻¹ en *Quercus elliptica*.

Con relación a la biomasa, estos resultados son similares a las 125 ton ha⁻¹ de biomasa reportados por Domínguez et al., (2009) en bosques mixtos de *Pinus teocote* en el sur de Nuevo León. Así mismo, están por arriba a lo reportado por Gutierrez y Flores (2018) quienes encontraron 105 ton ha⁻¹ en bosques naturales de *Pinus oocarpa* en el estado de Chiapas, y similares a lo encontrado por Rodriguez et al., (2016) con 156 ton ha⁻¹ de biomasa en especies de *Pinus oocarpa* del norte de Chiapas.

Los resultados de esta investigación son superiores a las 35.2 t ha⁻¹ de biomasa aérea (17.9 t ha⁻¹ de carbono) cuantificadas por Pacheco et al. (2007) para una plantación de *Pinus greggii* en Coahuila; también superan a lo obtenido por Vasquez et al. (2017), en bosques del sur de Oaxaca con 42.94 ton ha⁻¹ para *P. pseudostrobus* y 42.38 ton ha⁻¹ para *P. teocote*.

Los volúmenes maderables encontrados para *P. teocote* están por debajo por lo reportado por Graciano et al. (2019), en bosques mezclados de Durango con 207 m³ ha⁻¹, pero son similares a lo encontrado para *Pinus oocarpa* (228 m³ ha⁻¹) y muy por encima de los 115 m³ ha⁻¹ encontrados por Navar (2010). Sin embargo, plantaciones de Teca (*tectona grandis*) alcanzaron hasta 309 m³ ha⁻¹ en el estado de Campeche (Camacho et al., 2013).

2.4 CONCLUSIONES

Se generaron 10 modelos alométricos, de los cuales 6 servirán para estimar biomasa aérea y de fuste en las 3 especies evaluadas, 2 para estimar el volumen maderable y otros 2 para el cálculo de la biomasa de hojas-ramas en las dos especies de *Pinus* evaluadas. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre los 8 modelos alométricos ajustados de estimación de volumen maderable (m^3) y biomasa por componentes (kg); la mayor parte de la biomasa pudo ser explicada por el modelo (7) de Schumacher-Hall. Se pudo notar que el volumen presentó más heterocedasticidad que la biomasa, por lo tanto, se realizaron más correcciones mediante pesos ponderados para esta variable mediante la metodología SUR. De forma general se encontraron diferencias importantes en la acumulación de volumen y biomasa en los bosques estudiados estimando un volumen maderable de $157.61 m^3 ha^{-1}$ en *Pinus teocote*, $228.2 m^3 ha^{-1}$ en *Pinus oocarpa* y $170.16 m^3 ha^{-1}$ en *Quercus elliptica*. Respecto a la biomasa aérea se obtuvieron 110.6 , 174.5 y $97.26 ton ha^{-1}$ para *Pinus teocote*, *Pinus oocarpa* y *Quercus elliptica*, respectivamente. Lo anterior demuestra que *Pinus oocarpa* tiene un mayor potencial maderable y de acumulación de biomasa respecto a las otras dos especies estudiadas para futuras incorporaciones a áreas de manejo forestal y programas de captura de carbono en zonas forestales de la región Montaña de Guerrero.

2.5 REFERENCIAS

Acosta, M. M.; Vargas, H. J.; Velásquez, M. A. y Etchevers, B. J. D. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* pp p. 529-543.

Alvarez G. J. G., & Soal, R. R. (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).

Cailliez, F. (1980) Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Vol. 1 Estimación del volumen. Estudio (FAO) Montes 22/1. (FAO). Roma, Italia. p.92.

Carrillo, E. G. (2008). Casos prácticos para muestreo e inventarios forestales. División de Ciencias Forestales. México: DiCiFo. 98 pp.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.

Cortés-Sánchez, Bossuet G., Ángeles-Pérez, Gregorio, Santos-Posadas, Héctor M. De los, & Ramírez-Maldonado, Hugo. (2019). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México. *Madera y bosques*, 25(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521799>

Cruz-Cobos, F., H. M. De los Santos-Posadas y J.R. Valdez L. (2008). Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia*, 42(4), 473-485

Davidson, R., & MacKinnon, J. G. (1993). Estimation and inference in econometrics. OUP Catalogue.

Dávalos S: R, Rodríguez M.M, Martínez P. E. (2010). Almacenamiento de carbono, Agro ecosistemas cafetaleros de Veracruz. Capítulo 16, 11 pp.

Domínguez C. G., Aguirre C. O. A., Jiménez P. J., Rodríguez L. R., y Díaz B., J. A. (2009). Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(1), 59-64.

Durbin, J. & Watson, G.S. 1971 Testing for serial correlation in least squares regression. III. *Biometrika* 58:19

García C. 2010. Ecología Forestal: Estructura, Funcionamiento y Producción de las masas forestales. 37 pp. Recuperado el 23 de 02 de 2017 de www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/PublicacionesPDF/Fotosíntesis.pdf.

Guitérrez, E., y Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 179-188.

Gutiérrez V., B. N., y Flores M. A. (2018). Captura de carbono y modelos alométricos para estimar biomasa en rodales naturales de *Pinus oocarpa* Schl. et Cham. en Chiapas, México. *Foresta Veracruzana*, 20(2), 21-28.

Guzmán S., J. C., Aguirre C. O. A, González T. M. A., Treviño G. E. J., Jiménez P. J. Vargas L. B., y De Los Santos P. H. M. (2019). Relación altura-diámetro para *Abies religiosa* Kunth Schltld. & Cham. en el centro y sur de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(52), 99-120

IPCC (2010). Intergovernmental panel on climate change. Aspectos del cambio climaticom incluidos su potencial ambiental y sus consecuencias socioeconómicas. 14 pp.

INEGI. (2010). Datos geo estadísticos Nacional. Uso del suelo y vegetación. Recuperado el 12 de febrero de 2015 de <http://www.inegi.org.mx/>

Loetsch, F; Zohrer, F; Haller, KE. 1973. Forest inventory. Munich, DE, BLV Verlagsgesellschaft. 469 p.

Lopez O. L. (2012). Ecuaciones Alométricas y estimación de Incrementos en biomasa aérea en una Plantación de Pinus halepensis Mill. en Saltillo, Coahuila. Tesis de Maestria. Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), 45 pp.

Machado, C. E. G, A. Pereira y N. A. Ríos. (2003) Tabla de volumen para Buchenavia capitata, Vahl. Quebracho. 10: pp.76-82.

Méndez, G.J., Luckie, N.S.L., Capó, A.M.A. y Nájera, L.J.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*. 45(4):479-491.

Montoya J, J. C., Méndez G. J., Sosa D. L., Ruíz G. C.G., Zermeño G. A., Nájera L. J. A., y Velázquez R. A. S. (2018). Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para Pinus halepensis Mill., en Coahuila, México. *Madera y bosques*, 24(SPE).

Návar, J. J, González, N. y Graciano, J. 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia Chile, 12 pp

Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P. 2007. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 3rd edn. 1235 pp. 149

Rivas, D. (2006) sistemas de producción forestal fórmulas de v , ab , cm . montezumae LAMB, en el C.E.F. San Juan Tetla, Puebla. Boletín técnico No.9 I.N.I.F. pp.16-17.

Romahn de la V., C. F. y H. Ramírez M. (2010) curso dendrometría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. pag 354.

Ruiz (2014). A, F. Estructura, biomasa aérea y propiedades tecnológicas de dos encinos en bosques de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Tesis doctoral, Colegio de Posgraduados (COLPOS), Universidad Autónoma Chapingo 141 pp.

Schlegel, B, Gayoso, J. y Guerra, J. 2000. Manual de procedimientos, muestreo de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. 24 p.

Segura, M., & Andrade Castañeda, H. J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?

Shapiro, S., & Wilk, M. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611. doi:10.2307/2333709

Schlegel, B, Gayoso, J. y Guerra, J. (2000). Manual de procedimientos, muestreo de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. 24 p

White, Halbert. 1980. "A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity." *Econometrica*, 48:4, pp. 817-38.

CAPITULO III

**INCREMENTOS EN BIOMASA Y PRODUCCIÓN DE OXÍGENO DE
Pinus oocarpa Schiede y *Pinus teocote* Schldl. et Cham.,
GUERRERO, MÉXICO.**

**Incrementos en biomasa y producción de oxígeno de *Pinus oocarpa*
Schiede y *Pinus teocote* Schltl. et Cham., Guerrero, México.**

Resumen

La modelización del crecimiento en biomasa permite conocer las fluctuaciones de carbono, dióxido de carbono u oxígeno proyectando su acumulación a través del tiempo mediante la estimación de incrementos en diferentes etapas biológicas del bosque. El objetivo de este estudio fue estimar la producción de biomasa (*B*), carbono (*C*) y oxígeno (*O*₂) en áreas naturales de *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa* en Guerrero, México. Se realizaron análisis troncales y se ajustaron cinco modelos de crecimiento. El modelo de Weibull presentó los mejores ajustes para determinar incrementos en biomasa; la ecuación para estimar el crecimiento e incremento de biomasa en *P. oocarpa* fue: $Y=4918.60 \left[1-e^{-0.000026 \times X^{2.139107}}\right]$, R^2_{adj} de 0.89; para *P. teocote* el modelo generado es $Y=2144.11 \left[1-e^{-0.0000446 \times X^{2.6963}}\right]$, $R^2_{ajd}=0.75$. El análisis del crecimiento proyectado hasta el turno técnico (163 y 120 años) permitiría obtener incrementos de 3.04 t de *B* ha⁻¹ año⁻¹ y 1.42 t de *C* ha⁻¹ año⁻¹ en *P. teocote*. Para *P. oocarpa* los incrementos serían 4.25 (*B*) y 2.04 (*C*) t ha⁻¹ año⁻¹. Así mismo se determinó que se requieren 12 árboles de *Pinus oocarpa* para satisfacer la demanda diaria de oxígeno persona⁻¹ y 16.5 árboles de *Pinus teocote*. Se concluye que *Pinus oocarpa* capturó más carbono y oxígeno respecto a *Pinus teocote* en la región estudiada, recomendándose en programas de conservación para la mitigación de gases de efecto invernadero.

Palabras clave: Análisis troncales, captura de carbono, modelos de crecimiento, incremento corriente anual, incremento medio anual, turno técnico.

Abstract

The modeling of biomass growth allows knowing the fluctuations of carbon, carbon dioxide or oxygen projecting their accumulation over time by estimating increases in different biological stages of the forest. The objective of this study was to estimate biomass, carbon and oxygen production in natural areas of *Pinus teocote* and *Pinus oocarpa* in Guerrero, Mexico. Trunk analyzes were carried out on a sample of 48 trees of the two species evaluated, three growth models were adjusted and the increases in biomass were estimated by crossing the annual current increase (ICA), mean annual increase (IMA), maximum instantaneous growth (ICA max) and the technique turn. The Weibull model presented the best adjustments for determine increases in biomass; the equation for estimate the growth and increase of biomass in *P. oocarpa* was: $Y=4918.60 \left[1 - e^{-0.000026 * X^{2.139107}} \right]$, R^2_{adj} of 0.89; for *P. teocote* the model generate is $Y=2144.11 \left[1 - e^{-0.0000446 * X^{2.6963}} \right]$, $R^2_{adj}=0.75$. The analysis of the projected growth to technical turn (163 and 120 years) will allow to obtain increases of 3.04 t of B ha⁻¹ year⁻¹ and 1.42 t of C ha⁻¹ year⁻¹ in *P. teocote*. For *P. oocarpa* the increases value 4.25 (B) and 2.04 (C) t ha⁻¹ year⁻¹. In it was determined that 12 *P. oocarpa* trees are required to satisfy the daily oxygen demand person⁻¹ and 16.5 *P. teocote* trees. It is concluded that *Pinus oocarpa* captured more carbon and oxygen compared to *Pinus teocote* in the studied region, being recommended in conservation programs for the mitigation of greenhouse gases.

It is concluded that *P. oocarpa* captured more carbon in a wider time interval with respect to *P. teocote* in the studied region, being recommended in conservation programs for the mitigation of greenhouse gases.

Keywords: Trunk analysis, carbon capture, annual current increase, average annual increase, growth models, optimal turn

3.1 INTRODUCCIÓN

La modelización del crecimiento forestal es una herramienta vital para conocer la productividad de los ecosistemas, determinar incrementos, turnos silvícolas y aprovechamiento de una especie en función del tiempo y la calidad de sitio; con ello se obtienen datos prácticos sobre el crecimiento y es factible hacer estimaciones precisas (Aguirre, 2015).

En ese sentido, los incrementos en biomasa son importantes para cuantificar el proceso acumulación de materia pesable (kg o ton) a través del tiempo (marcados en sus anillos de crecimiento), y de esta forma convertir su biomasa a carbono y oxígeno equivalente en diferentes partes de las plantas y estratos de la vegetación, así mismo permiten comparar distintos tipos de especies o tipos de vegetación similares en diferentes sitios (Chávez, 2013).

Además, la cuantificación de la biomasa ligada al crecimiento de la vegetación en los ecosistemas es crítica para las estimaciones más analíticas de fijación de carbono y la toma de decisiones en el manejo de los recursos forestales, un tema actualmente relevante por sus implicaciones en relación al cambio climático (Benjamín y Masera, 2001).

Desde el punto de vista dinámico, las dimensiones del arbolado van cambiando a través del tiempo (Corral y Navar, 2005), particularmente los bosques crecen más rápido en etapas juveniles hasta estabilizarse de forma gradual en etapas maduras junto con otras funciones fisiológicas del arbolado (Orihuela-Belmonte *et al.*, 2013); este rápido crecimiento en etapas tempranas pueden ser el resultado de presencia de factores antropogénicos como incendios forestales o cambios de uso de suelo que implique sucesiones secundarias en el ecosistema (Aryal *et al.*, 2014). Es por ello que contar con información fidedigna sobre el crecimiento en biomasa y la capacidad de respuesta de los bosques para la captura de carbono y la producción de oxígeno es importante para proponer

formas de compensación a los propietarios de recursos forestales (Fonseca *et al.*, 2009).

En México, los estudios relacionados a ecuaciones de biomasa han sido poco estudiados; hasta el 2016 se tenían reportados 65 estudios donde la mayoría fueron para generar ecuaciones acumulativas de biomasa en función de diámetro o altura (Ríos *et al.*, 2016; Vásquez *et al.*, 2016). Para el año siguiente, Pompa y Sigala (2017) reportaron alrededor de 71 estudios relacionados a estimar la concentración de biomasa y carbono en México, donde la mayoría se centraron en plantaciones forestales jóvenes. Con relación a estudios de ajuste de modelos de crecimiento e incrementos en biomasa, se encontró el realizado por Méndez *et al.*, (2011). Particularmente para el estado de Guerrero, se registró un estudio en biomasa para *Quercus resinosa* en la región Costa Chica (Navarro *et al.*, 2020). Es por ello que resulta vital acrecentar los estudios de esta índole dentro del estado de Guerrero que hasta la fecha han sido insuficientes.

Por lo antes expuesto, el objetivo de esta investigación fue ajustar modelos de crecimiento para cuantificar los incrementos en biomasa y estimar el potencial de captura de carbono (CO_2) y producción de oxígeno equivalente en bosques de *Pinus teocote* Schltdl. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede de la región Montaña del estado de Guerrero. La hipótesis nula (H_0) planteada en la investigación es no encontrar diferencias significativas entre la captura de carbono y la producción de oxígeno en ambas especies estudiadas.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Características del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada entre los 17° 01' 45" y 17° 15' 30" LN y 98° 39' 24" LW (Figura 11) a una altitud promedio de 1800 y 2100 msnm (INEGI, 2014), comprendiendo los municipios de Iliatenco y Malinaltepec del estado de Guerrero, México; la vegetación predominante son bosques de pino-encino donde se desarrolla de manera natural *P. teocote* y *P. oocarpa* formando rodales puros.

La zona de estudio presenta clima A(c) w₂ (2), es decir, templado semi-cálido, con lluvias intensas en los meses de Julio-Agosto; la temperatura mínima y máxima va de -3° a 26° respectivamente. El tipo de suelo en su mayoría es Regosol, con abundante en materia orgánica (INEGI, 2008; INEGI, 2014).

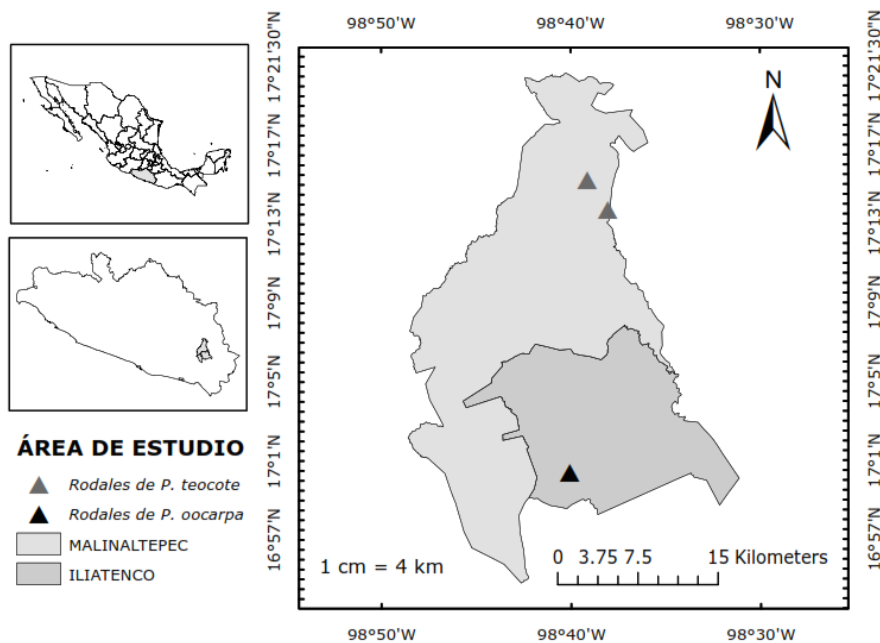


Figura 11. Localización geográfica del área de estudio

Conformación de base de datos

Se levantó información dasométrica de 20 sitios de muestreo de 500 m² distribuidos aleatoriamente en las áreas de bosque de las especies estudiadas (100 ha). En cada sitio se midió diámetro normal(DN) en centímetros, Altura total

(H) en metros e ind ha^{-1} , posteriormente dentro de los sitios de muestreo se eligieron 24 árboles más representativos diamétricamente de los rodales (5- 60 cm) representando todas las categorías de diámetro dentro de su hábitat de crecimiento (Díaz *et al.*, 2007; Marroquín *et al.*, 2018; Martínez *et al.*, 2019; Méndez *et al.*, 2011, Pacheco *et al.*, 2007).

Los árboles elegidos, se derribaron a ras de suelo y se seccionaron a diferentes alturas (0.30 m 1,30 m y posteriormente cada 2 m hasta llegar a puntas); las muestras hojas-ramas y rodajas se ingresaron a una estufa de secado marca FELISA FE-293 de tipo convencional, a una temperatura promedio de $85 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar peso anhidro, lo cual se logró a los 7 días, para lo cual se monitoreó el peso de las muestras cada 24 horas con una báscula Sartorius GE811 de alta precisión de hasta un gramo. Dicho procedimiento sirvió para obtener la proporción de biomasa de hojas-ramas (*Bhr*) respecto a biomasa de fuste.

Las muestras de rodajas se lijaron y se barnizaron para mejorar la visibilidad de los anillos de crecimiento. Para la biomasa fustal (*Bf*), se aplicó la técnica de análisis troncales midiendo los diámetros (cm) con una regla graduada Arly 3003 de 50 cm de longitud; para eso, los anillos de crecimiento se agruparon cada 5 y 10 años (*ds*) de cada rodaja a lo largo de todo el fuste obteniendo diferentes diámetros y alturas de las secciones de corte a 0, 0.30, 1.30 m y posteriormente trozas cada 2 m hasta llegar a puntas (Carrillo, 2008). El siguiente paso fue obtener el área basal y volumen de cada sección de edad (*Vs*) a una altura relativa (*Hi*) correspondiente, paralelamente al procedimiento anterior se determinó la densidad básica promedio (*Db*) mediante la relación peso seco/volumen verde (kg m^{-3}) de las muestras de rodajas (Méndez *et al.*, 2011). La biomasa del fuste (*Bf*) de cada sección a la edad *i* se calculó mediante el producto de $Vs \times Db$. Finalmente, la biomasa aérea (*B*) de cada sección *i* se obtuvo mediante la adición del porcentaje promedio (%) de *Bhr* correspondiente de cada especie previamente determinado.

3.2.3 Determinación de carbono y oxígeno

El Carbono (C) fijado en la biomasa de cada especie a la edad i , se obtuvo a través del producto de la biomasa área (B) por el porcentaje de carbono reportado por Yarena *et al.*, (2011) para *Pinus teocote* (47.48 %); para el caso de *Pinus oocarpa* se usó 48%, cifra conservadora en comparación a lo avalado por el IPCC (2010) como el 50 % de la biomasa del árbol.

Por otro lado, la producción de oxígeno está directamente ligada a la acumulación de carbono, derivado de la biomasa del árbol (Yolagimaz y Keles, 2009). En este sentido, Nowak *et al.* (2007), indican que el Oxígeno neto (O_2) producido durante la fotosíntesis - O_2 consumido durante la respiración se puede estimar con la proporción de pesos atómicos de la molécula de CO_2 con el peso del átomo de carbono (C) y oxígeno (O_2) que la compone. De este modo:

$$O = C * F$$

Donde:

O= producción neta de O_2 ($kg \text{ año}^{-1}$)

C= contenido de Carbono ($kg \text{ año}^{-1}$)

F= factor de conversión de dióxido de carbono (CO_2) a oxígeno tomando como base los pesos atómicos de las moléculas de carbono y oxígeno (32/12).

Modelos de crecimiento e incrementos analizados

Se ajustaron 5 modelos de crecimiento: Schumacher, Gompertz, Chapman-Richards, Weibully Logístico, usados ampliamente por su practicidad y ajustes satisfactorios en diversos estudios de crecimiento forestal (Kiviste *et al.*, 2002; Sit y Paulin, 1994); Fekeduleg *et al.*, 1999), los cuales se detallan en el Cuadro 11. Así mismo, con la fórmula integral del mejor modelo de crecimiento ajustado se derivó el incremento corriente anual (ICA), incremento medio anual (IMA), máximo valor del ICA (ICA_{max}) y curva de crecimiento en biomasa y carbono. Posteriormente, se estimó el turno técnico (punto óptimo de máxima velocidad de

captura de biomasa, determinado en a la edad del punto de intersección de ICA e IMA).

Cuadro 11. Modelos de crecimiento e incremento en biomasa.

Ecuación de crecimiento	Forma integral	Incremento corriente anual (ICA)	Incremento medio anual (IMA)	I
Schumacher (1939)	$Y=ae^{-b/X}+\varepsilon$	$\frac{b}{X^2} * ae^{-b/x}$	$\frac{1}{X} a e^{-b/X}$	(1)
Gompertz (1825)	$Y=ae^{-be^{cX}}+\varepsilon$	$ace^{-b*e^{cX}} e^{cX}$	$-ae^{-b*e^{cX}} e^{cX}$	(2)
Chapman-Richards (1959)	$Y=a[1-e^{-bX}]^f+\varepsilon$	$abc*e^{-bx}*(1-e^{-b*X})^{c-1}$	$acXe^{-bx}(1-e^{-b*X})^{c-1}$	(3)
Weibull (1951)	$Y=a[1-e^{-bX^c}]+\varepsilon$	$abc*X^{c-1}e^{-b*X^c}$	$abX^c e^{-b*X^c} \ln(X)$	(4)
Logistic (1984)	$Y=\frac{a}{1+e^{b-c*X}}+\varepsilon$	$\frac{ace^{b-c*X}}{(1+e^{b-c*X})^2}$	$\frac{-ae^{b-c*X}}{(1+e^{b-c*X})^2}$	(5)

Dónde: Y= Incremento de biomasa (kg); X=Edad en años; e= base exponencial neperiana; ln=logaritmo natural; a, b y c = Parámetros de regresión; I=identificador

Para obtener el crecimiento en toneladas por unidad de superficie (t ha⁻¹) se aplicó la siguiente ecuación:

$$B \text{ ha}^{-1} = Y*(N)$$

$$C \text{ ha}^{-1} = Y*(FC)(N)$$

Donde:

Y= modelo de crecimiento para estimar la B para cada especie transformados en toneladas (t).

N = número de árboles ha^{-1} promedio de sitios muestreados (210 ind ha^{-1} , 190 ind ha^{-1}).

FC = factor de conversión a carbono, 0.47, 0.48.

Así mismo, se verificó mediante el “test de White” la posible presencia de heterocedasticidad (White, 1980); la autocorrelación se comprobó con el test de Durbin-Watson (Durbin y Watson, 1972). En dado caso que el modelo de crecimiento presentara heterocedasticidad se aplicó la corrección de residuales mediante la ponderación de pesos empleando la inversa de las variables independientes ($1/x$, $1/x^2$, $1/x^3$) mediante la metodología SUR.

Posteriormente, con el modelo ajustado, se estimó el turno absoluto (punto óptimo de producción en biomasa (B), carbono (C) y la producción de oxígeno (O_2) e incremento corriente anual (ICA) y el incremento medio anual (IMA) para cada especie estudiada.

Finalmente, el crecimiento en toneladas (t) ha^{-1} en B y C se obtuvo en base a las formulas siguientes:

$$B \text{ ha}^{-1} = Y / 1000 * (N) * \bar{x}$$

$$C \text{ ha}^{-1} = Y / 1000 * (FC) (N) * \bar{x}$$

Donde:

Y = es el modelo de crecimiento para estimar la B para cada especie (kg)

N = es el número de árboles ha^{-1} promedio.

FC = factor de conversión a carbono, 0.47, 0.48;

\bar{x} = edad promedio del rodal

Con la derivación de las ecuaciones anteriores, se obtuvo el incremento corriente anual y medio anual de B , C y (ICA e IMA) en $t \text{ ha}^{-1}$.

3.2.5 Método de ajuste y selección de modelos

El ajuste de modelos de crecimiento se realizó con el método de máxima verosimilitud con información completa (FIML), mediante el procedimiento PROC MODEL, del programa estadístico Statistic Analysis System (SAS,2008). Se utilizó la función PROC MEANS para la estadística descriptiva, PROC AUTOREG para detección de autocorrelación acorde a la prueba de Durbin y Watson (1976) y la heterocedasticidad se verificó mediante la prueba de White (White, 1980) empleando la función FIT/WHITE del mismo programa. La corrección de residuales heterocedásticos se efectuaron mediante la ponderación de pesos de las variables independientes ($1/x$, $1/x^2$, $1/x^3$) acorde al método de ecuaciones aparentemente no relacionadas (SUR) que garantizará mejor ajuste mediante la minimización del error de los residuales (Cruz et al., 2008).

Para la selección del mejor modelo se tomó en cuenta el nivel de significancia del modelo ($p < 0.05$), con valores de menor raíz del error medio cuadrático (*REMC*), mayor coeficiente de determinación ajustado ($R^2 adj$), distribución de residuales e inspección grafica de observados y predichos. Como medida de precisión de la ecuación obtenida se usó el menor sesgo promedio por estimación observada (\bar{e}), (Prodan et al., 1997).

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \right] * \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \quad (7)$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{n-p}} \quad (8)$$

$$\bar{e} (m) = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)}{n} \quad (9)$$

Donde:

R^2_{adj} = coeficiente de determinación ajustado.

REMC = raíz del error medio cuadrático.

\bar{e} = Sesgo promedio de los residuales.

p = número de parámetros a estimar

n = número de observaciones.

Y_i =valores observados

\hat{Y}_i =los valores predichos.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Características de la muestra

De acuerdo con las características de los análisis troncales realizados a una muestra representativa de 24 árboles derribados de *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*, se encontró lo siguiente: para *Pinus teocote* se obtuvo un rango de 1 a 52 cm de D y 0.3 a 24.2 m de H; para *Pinus oocarpa* se reportó un D entre 1.5 y 59.8 cm, no obstante, la altura total (H) osciló entre 1.2 y 29 m (Cuadro 12).

Con relación a biomasa área (BA), el valor máximo obtenido fue de 2359 kg ($\Phi = 59$ cm) en *Pinus oocarpa* y de 0.7 kg ($\Phi = <5$ cm) como mínimo en *Pinus teocote*. El volumen mínimo representado fue de 0.0027 m³, mientras que el máximo fue de 3.358 m³ en *Pinus oocarpa*.

Cuadro 12. Características dasométricas de *Pinus oocarpa* y *Pinus teocote*, Montaña de Guerrero.

Especie	Variable	N	ns	\bar{x}	s	CV	EE	Min	Max
<i>Pinus teocote</i>	E	24	91	35.6	22.9	64.3	2.39	8	92
	D	24	91	19.9	14.18	71.3	1.48	3.5	52
	H	24	91	10.4	6.34	61.0	0.66	0.3	24.2
	G	24	91	0.044	0.052	118.2	0.01	0.0002	0.2124
	V	24	91	0.356	0.49	137.6	0.05	0.0027	2.128
	B	24	91	242.8	344.8	142.0	35.95	0.7	1547
<i>Pinus oocarpa</i>	E	24	108	32.43	24.17	52.2	2.1	4	104
	D	24	108	22.9	15.9	69.5	3.2	2.5	59.8
	H	24	108	14.4	8.3	42.3	1.5	1.2	29
	G	24	108	0.060	0.068	114.1	3.6	0.0002	0.2809
	V	24	108	0.639	0.8	103.4	0.1	0.0053	3.3589
	B	24	108	33 5.6	473.2	136.3	25.4	1.2	2359

Donde: D= diámetro normal en cm; H= altura total en m; G=área basal (m²); V= volumen fuste completo (m³); B= biomasa aérea en kg; N= número de árboles derribados; ns= numero de secciones de análisis troncales \bar{x} =promedio; s=desviación estándar; CV= coeficiente de variación en porcentaje; EE= error estándar porcentual; Min= valor mínimo; Max= valor máximo.

3.3.2 Función de crecimiento en biomasa

Los cinco modelos de crecimiento probados, presentaron problemas de heterocedasticidad (<0.0001) de acuerdo con el test de White (White,1980). Después de realizar la corrección ponderada de los residuales mediante la metodología SUR se logró que la mayoría fueron homocedásticos ($p>0.05$) logrando una distribución homogénea de los residuales (Cuadro 13). Así mismo, no tuvieron problemas de autocorrelación mediante la prueba de Durbin-Watson ($DW>1.5$).

Trujillo et al., (2018) indican que el alargamiento del punto inflexión entre el ICA e IMA (turno forestal) obedece a la estructura de cada modelo de crecimiento; sin embargo, al extenderse el turno forestal se favorece la generación de madera de duramen (mayor cantidad) y la captura de carbono; es por ello que resulta vital elegir rigurosamente el modelo de crecimiento e incremento en biomasa con mejores bondades estadísticas de ajuste.

En ese sentido, el modelo de crecimiento de Weibull presentó los mayores valores de $R^2adj=0.75$ y 0.89 para *P. teocote* y *P. oocarpa*, así mismo los valores más bajos de la *REMC* (152.9 y 141.8) y con un sesgo promedio (*e*) de 91.3,99 respectivamente, lo cual indica que presenta los mejores criterios estadísticos que el resto de los modelos de crecimiento evaluados. De igual forma, presentó la mejor convergencia en ICA e IMA en biomasa, generando los mejores gráficos para la estimación de incrementos; así mismo los parámetros de los modelos de crecimiento obtenidos son altamente significativos ($p<0.0001$).

Cuadro 13. Indicadores estadísticos en modelización de crecimiento *B* de *P. teocote* y *P. oocarpa*, Guerrero.

Ec	R^2_{adj}	REMC	E	DW	TH	Parámetro	Estimador	EE	Valor T	Pr>F
<i>Pinus oocarpa</i>										
1	0.87	166	128	1.18	0.003	<i>b0</i>	6051.964	652.7	9.27	<.0001
						<i>b1</i>	120.4705	7.536	15.99	<.0001
2	0.89	153.4	124	1.18	0.275	<i>b0</i>	5479.557	1929	2.84	0.005
						<i>b1</i>	1.734698	0.049	35.43	<.0001
						<i>b2</i>	0.017279	0.003	5.15	<.0001
3	0.89	153.2	113.6	1.9	0.045	<i>b0</i>	10347.51	526.5	6.23	<.0001
						<i>b1</i>	0.006739	0.0008	4.25	<.0001
						<i>b2</i>	2.363406	0.025	18.1	<.0001
4	0.89	152.9	91.3	1.68	0.325	<i>b0</i>	4918.6	0.054	63.19	<.0001
						<i>b1</i>	0.000026	0.603	-24.95	0.004
						<i>b2</i>	2.139107	2E-04	4.85	0.002
5	0.88	158.6	126.7	1.86	0.054	<i>b0</i>	2646.315	357.5	7.4	<.0001
						<i>b1</i>	4.114095	0.172	23.92	<.0001
						<i>b2</i>	0.051934	0.005	10.81	<.0001
<i>Pinus teocote</i>										
1	0.75	178.5	117	1.92	0.079	<i>b0</i>	4913.811	1090	4.51	<.0001
						<i>b1</i>	132.179	14.78	8.94	<.0001
2	0.73	180.2	125	1.78	0.215	<i>b0</i>	2178.036	990.7	2.20	0.031
						<i>b1</i>	1.989629	0.246	8.1	<.0001
						<i>b2</i>	0.027307	0.009	2.92	0.004
3	0.74	183.6	110	1.56	0.102	<i>b0</i>	4688.68	521.6	8.94	<.0001
						<i>b1</i>	0.0121	0.008	7.63	0.003
						<i>b2</i>	3.31959	0.12	16.92	<.0001
4	0.74	184.2	99	1.54	0.072	<i>b0</i>	2144.119	653.1	6.35	<.0001
						<i>b1</i>	4.46E-06	8E-04	8.74	<.0001
						<i>b2</i>	2.696376	0.013	4.23	<.0001
5	0.73	179.3	178	1.23	0.006	<i>b0</i>	1372.376	256.2	5.36	<.0001
						<i>b1</i>	4.7872	0.533	8.98	<.0001
						<i>b2</i>	0.071409	0.013	5.62	<.0001

Dónde: R^2_{adj} = coeficiente de determinación ajustado; REMC = raíz del error medio cuadrático; TH= test de heterocedasticidad ponderado; DW=prueba de Durbin-Watson; P>F= significancia del modelo; b_0, b_1, b_2 = parámetros estimadores; EE= error estándar de los estimadores; Pr>T= valor de la probabilidad de la distribución *t* de Student; e= sesgo promedio de residuales;

De acuerdo con los resultados, las ecuaciones para estimar el crecimiento e incremento de biomasa quedaron representadas de la siguiente manera: en *P. oocarpa* la ecuación de crecimiento fue $Y=4918.60(1-e^{-0.000026*X^{2.1339107}})$; para el caso de *P. teocote* el modelo generado fue $Y=2144.11(1-e^{-0.00000446*X^{2.6963}})$.

Los estadísticos obtenidos en *P. oocarpa* son superiores ($R^2_{adj}=0.83$; Cuadro 3) a los obtenidos por Méndez *et al.*, (2011) pero similares a los obtenidos para *P. teocote* ($R^2_{adj}=0.75$; Cuadro 3) quienes ajustaron modelos de crecimiento en biomasa para en plantaciones forestales de *P. halepensis* en Coahuila, reportando un R^2 de 0.74; y muy superiores a los obtenidos por Návar *et al.*, (2003) en la captura de carbono de plantaciones de coníferas en Durango de 6 y 20 años, quienes obtuvieron valores de $R^2 = 0.67$, esto se le puede atribuir directamente al rango diamétrico y de edad del arbolado de plantaciones forestales jóvenes (López *et al.*, 2016), respecto a bosques naturales (mayores dimensiones de muestra y edad) (Murillo *et al.*, 2017; Aguilar *et al.*, 2016).

En la Figura 12 se proyectan las curvas de crecimiento en *B* (kg) de observados y predichos con el mejor modelo de crecimiento. La acumulación de biomasa a través del tiempo fue mayor en *Pinus oocarpa*.

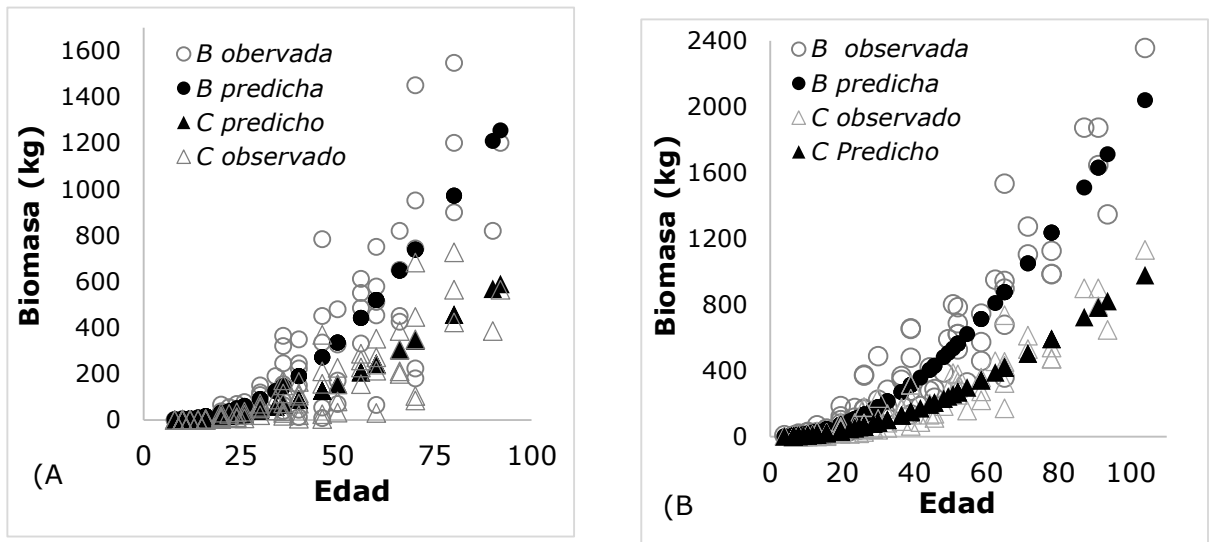


Figura 12. Comportamiento de observados y predichos de crecimiento en *B* y *C* de *Pinus tecote* (A) y *Pinus oocarpa* (B), Guerrero, México.

3.3.3 Estimación de incrementos anuales

En relación a los incrementos anuales (ICA e IMA) en la *B*, se observaron diferencias importantes entre especies (Figura 13 A). *Pinus oocarpa* mostró los mayores rendimientos (casi 1.5 veces más que *P. teocote* al momento de alcanzar el turno absoluto en biomasa (163 años).

El análisis de los resultados indica que *Pinus teocote* a los 120 años (turno absoluto) incrementó 14.5 kg árbol⁻¹ en *B*; mientras que en *Pinus oocarpa* los incrementos alcanzaron 22.4 kg a la edad de 163 años, encontrando una diferencia de ~8 kg entre el ICA de ambas especies.

De acuerdo con López *et al.*, (2018), los anillos de crecimiento en *Pinus oocarpa* presentan una longevidad más larga que otras especies de *Pinus*, por lo tanto, son útiles para análisis dendrocronológicos (Villanueva *et al.*, 2018), justificando periodos de vida más altos que otras especies de *Pinus* dentro de su hábitat de crecimiento, lo que podría reflejar más acumulación de biomasa en el tiempo, explicando los resultados en esta investigación.

Tomando como base el inventario dasométrico, el ICA *max* de *B* (4.96 t ha⁻¹ año⁻¹) y *C* (2.33 t ha⁻¹ año⁻¹) se alcanzó a los 84 años en *P. teocote*; para *P. oocarpa* los valores de ICA *max* en t ha⁻¹ año⁻¹ de incremento fueron: *B* (6.02), *C* (2.88) a los 108 años. El análisis del modelo de crecimiento proyectado en base al turno técnico (163 y 120 años) se obtendrían incrementos de 3.04 y 1.42 t ha⁻¹ año⁻¹ de *B* y *C* en *P. teocote* cuando ICA=IMA. Para *P. oocarpa* los incrementos serían 4.25 (*B*) y 2.04 (*C*) t ha⁻¹ año⁻¹ (Figura 13 B).

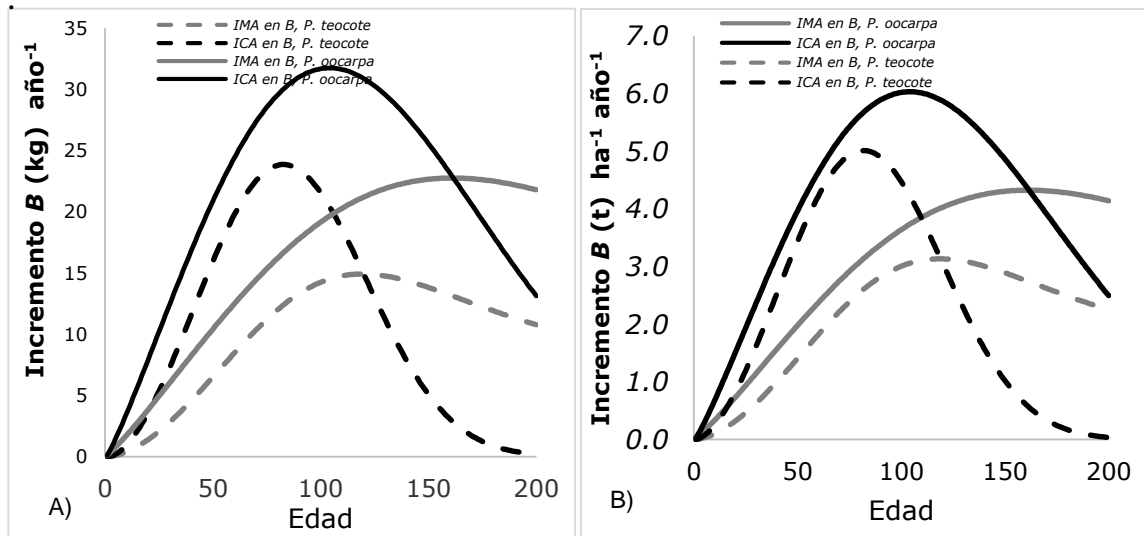


Figura 13. Secuencia del incremento en *B* en kg (A) y en t ha⁻¹ año⁻¹ (B) en *P. teocote* y *P. oocarpa* Montaña, Guerrero.

3.3.4 Proyección del crecimiento acumulado

Así mismo, la proyección del modelo de crecimiento indicó que la acumulación máxima de *B* y *C* en *P. teocote* podría alcanzar hasta 375.9, y 177.5 t ha⁻¹ en el punto de inflexión cuando ICA=IMA (turno técnico). A su vez, *P. oocarpa* lograría alcanzar hasta 700.5 (*B*) y 336.2 (*C*) t ha⁻¹; sin embargo, lo anterior solo sería válido si todos los árboles ha⁻¹ alcanzaran en conjunto el turno técnico. Si se toma como base una edad de referencia de 50 años, se podría inferir que *P. oocarpa* capturaría 99 t de *B* ha⁻¹ (47 t de *C* ha⁻¹) y *P. teocote* en promedio acumularía 70.3 t de *B* ha⁻¹ representando 33.1 t de *C* ha⁻¹ (Figura 14). Similarmente, Alberto y Elvis (2008) estimaron 39 t de *B* ha⁻¹ acumulados en bosques maduros de alta competencia en Honduras. Rodríguez et al., (2016) determinaron 172 y 190 t de *B* ha⁻¹ con edades de hasta 120 años en bosques de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. y *Pinus maximinoi* H.E. Moore. Por su parte, Husch (1999) encontró que bosques tropicales secundarios en sucesión de Veracruz, México acumularon entre 4 y 254 t de *B* ha⁻¹ (~125 t de *B* ha⁻¹ promedio) con edades de hasta 50 años. En plantaciones forestales jóvenes, Pacheco et al. (2007) encontró 37.5 t de *B* para *P. greggi*, en ese sentido, Méndez et al. (2011) reportaron 10.42 t de *B*

ha⁻¹ para plantaciones de 12 años de *Pinus devoniana* Lindl. y *Pinus pseudostrabus* Lindl. Sin embargo, López *et al.*, (2016) reportaron hasta 128 t ha⁻¹ de *B* en plantaciones forestales de 51 años de *Hevea Brasilensis* Müell. Arg., posibles diferencias atribuidas a la densidad (ind ha⁻¹) reflejado en la competencia (área de copa), a la conformación anatómica o la densidad básica de la madera de las especies (Valencia y Vargas, 2001). De acuerdo con Villar *et al.*, (2014) la cobertura vegetal y la tasa de asimilación neta son los factores que más influyen positivamente en el crecimiento de una planta, agregando que, aunque dos especies vegetales crecen en condiciones similares difieren notablemente en su capacidad de crecimiento debido a la abundancia de agua, nutrientes y lo más importante el componente genético.

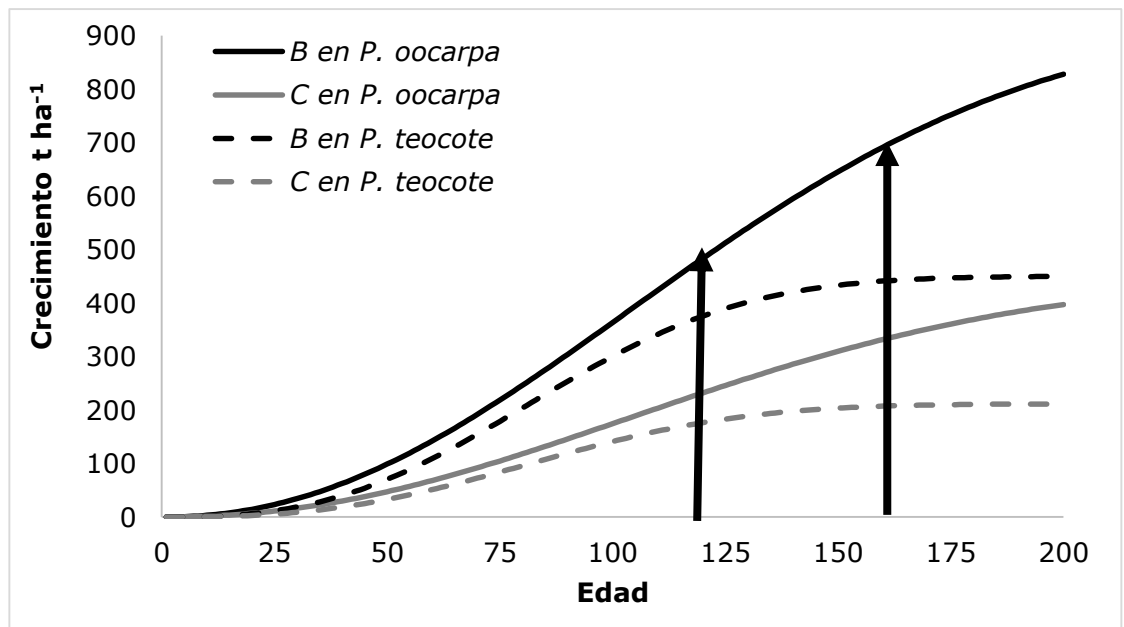


Figura 14. Proyección del crecimiento acumulado en t ha⁻¹ de *B* y *C* hasta el turno técnico en *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*, Montaña, Guerrero.

3.3.5 Producción de oxígeno

La estimación de la producción neta de oxígeno se derivó mediante el cálculo de los incrementos; en la Figura 17 (a,b,c,d) se puede observar que un árbol de

Pinus teocote a los 120 años (turno técnico de máxima producción) de forma individual puede alcanzar a producir hasta 18.2 kg de oxígeno año⁻¹, o 0.018 ton ha⁻¹ año⁻¹ de oxígeno; si a lo anterior se le multiplica el número de árboles promedio por hectera promedio (210 ind ha⁻¹) se proyecta una producción neta de oxígeno de hasta 3.83 ton ha⁻¹ año⁻¹ si todos los árboles en promedio ha⁻¹ de *Pinus teocote* pudieran alcanzar la edad de 120 años (cuando ICA=IMA) (Figura 15 A,B,C,D).

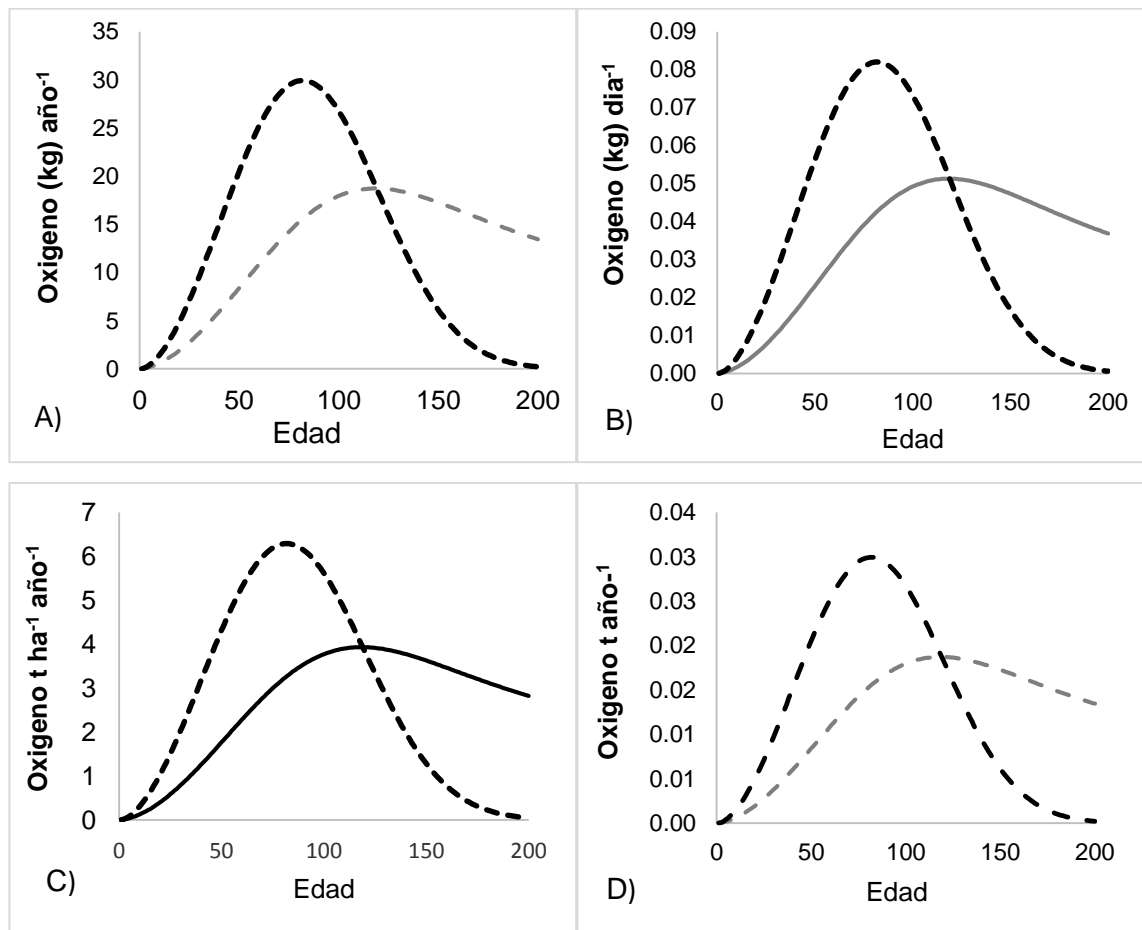


Figura 15. Estimación de producción neta de oxígeno año⁻¹(A), kg día⁻¹(B), ton ha⁻¹ año⁻¹ (C) y ton ha⁻¹(D) de *Pinus teocote*, Montaña de Guerrero.

En *Pinus oocarpa*, el turno técnico de máxima producción de biomasa (163 años), puede alcanzar de forma individual una producción neta de oxígeno de hasta

28.69 kg en árboles vigorosos que apenas van a reducir el ritmo de fijación de fotosíntesis reflejado en su biomasa y en la producción de oxígeno. Extrapolando los resultados obtenidos en dicha especie, se pueden producir hasta 0.028 ton de oxígeno año⁻¹; al momento de incluir el número de árboles promedio ha⁻¹ se puede alcanzar una producción neta de 5.45 ton ha⁻¹, lo que se lograría únicamente si todos los árboles ha⁻¹ tuvieran la edad máxima del turno técnico en biomasa (163 años) para esta especie (Figura 16 A,B,C,D).

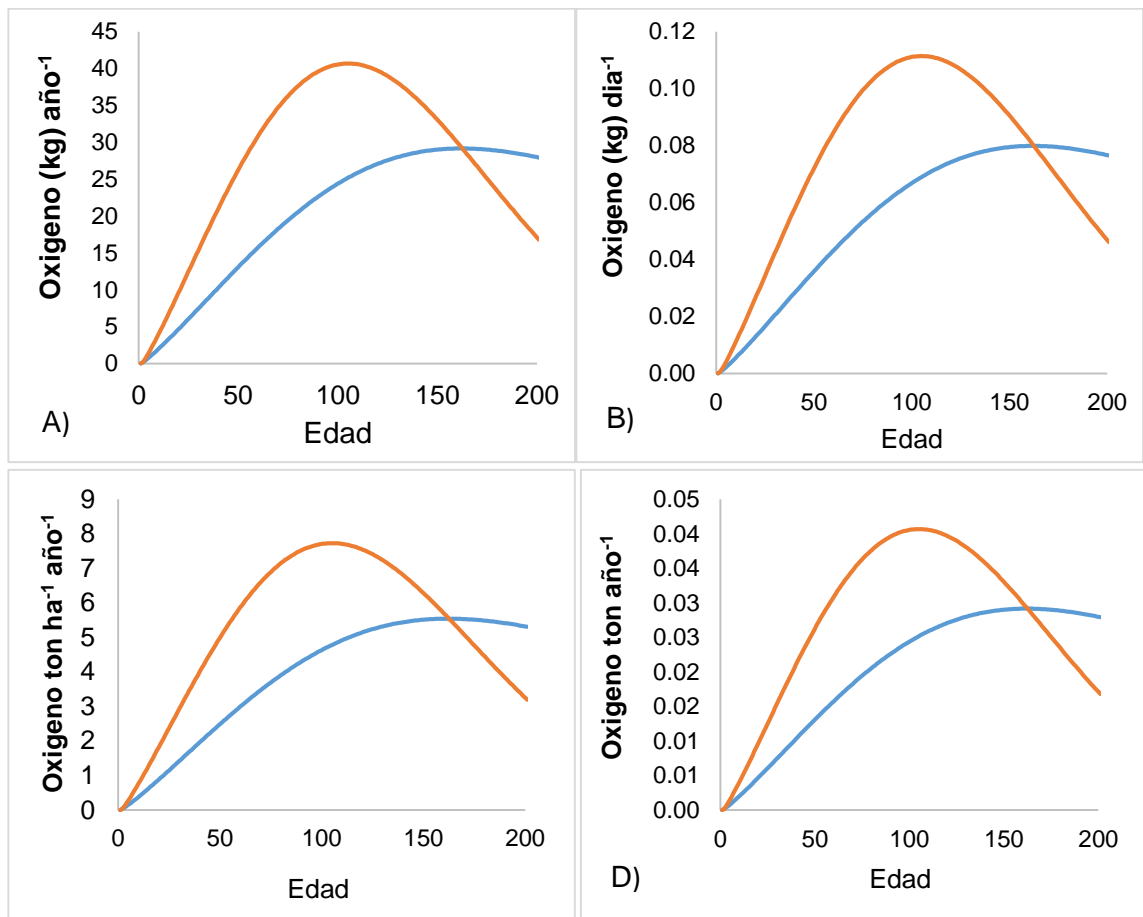


Figura 16. Estimación de producción neta de oxígeno año⁻¹(A), kg día⁻¹(B), ton ha⁻¹ año⁻¹ (C) y ton ha⁻¹(D) de *Pinus oocarpa*, Montaña de Guerrero.

El análisis de la producción diaria de oxígeno indicó que en promedio un árbol adulto de *Pinus teocote* podría llegar a producir hasta 0.005 kg día⁻¹ y un árbol adulto de *Pinus oocarpa* hasta 0.076 kg día⁻¹. De acuerdo Perry y LeVan (2003), una persona consume en promedio 0.84 kg de oxígeno por día. Según los resultados, se requerirían 16.8 árboles de *Pinus teocote* y 11.7 árboles de *Pinus oocarpa* para satisfacer la demanda diaria de oxígeno por persona (Cuadro 14).

Cuadro 14. Aportación diaria y por persona de Oxígeno en *Pinus teocote* Schl. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede de la región Montaña del Estado de Guerrero.

Especie	Turno	Producción de oxígeno año ⁻¹ (kg)	Producción de oxígeno día ⁻¹ (kg)	Número de personas abastecidas día ⁻¹	Arboles necesarios /persona/día
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede.	162	27.71 kg	0.076	0.0904	12
<i>Pinus teocote</i> Schl. et Cham.	120	18.24	0.050	0.0595	17

Finalmente, Canfield (2014) indica que la cantidad de oxígeno necesaria por persona es mayor a mayores altitudes respecto al nivel del mar (~40% más en altitudes mayores 3000 msnm) ocasionado por la diferencia de presión atmosférica, lo que requeriría más concentraciones de oxígeno en la atmosfera para abastecer la demanda diaria por persona.

3.4 CONCLUSIONES

El modelo de crecimiento de Weibull presentó los mejores estadísticos de ajuste para estimar el crecimiento e incremento de biomasa y carbono en bosques naturales de *P. teocote* y *P. oocarpa*. En base al punto de inflexión (cuando ICA=IMA) se comprobó que *P. oocarpa* acumula 1.5 veces más biomasa y carbono en un intervalo de tiempo más amplio respecto a *P. teocote*, estas diferencias de acumulación se dieron principalmente a la densidad de la madera, longevidad de las especies y características fisiológicas de crecimiento.

Respecto a la producción de oxígeno se pudo estimar la producción diaria y los requerimientos del número de árboles para satisfacer la demanda diaria de oxígeno por persona. En ese sentido *Pinus oocarpa* tuvo la capacidad de proveer más servicios ambientales que *Pinus teocote*, así mismo presentó los mayores incrementos de biomasa a través de su edad, por lo que se rechaza la hipótesis planteada.

3.5 REFERENCIAS

Aguilar G., P., W. Santiago J., D. Martínez S. y R. Ortiz B. 2016. Análisis del crecimiento e incremento y estimación de índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en Santiago Textitlán, Sola de Vega, Oaxaca. *Foresta Veracruzana* 18(2):21-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49748829003> (15 de octubre de 2020).

Alberto D., M. y J. Elvir A. 2008. Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 17(1): 67-78. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2591774> (29 de octubre de 2020).

Aguirre C., O. A. 2015. Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y bosques*, 21(SPE?): 17-28. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210423>

Aryal, D. R., H. De Jong B., S. Ochoa G., L. Esparza O. and J. Mendoza V. 2014. Carbon stocks and changes in tropical secondary forests of southern Mexico. *Agriculture, ecosystems & environment*, 195 (¿), 220-230. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.06.005>

Benjamín J., A. y O. Maser. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y bosques* 7(1): 3-12. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2001.711314>

Carrillo E., G. 2008. Casos prácticos para muestreo e inventarios forestales. México. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 98 p.

Corral, S. y J. J. Navar. 2005. Análisis del crecimiento e incremento de cinco pináceas de los bosques de Durango, México. *Madera y Bosques* 11 (1): 29-47. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2005.1111260>

Cruz-Cobos, F., H. M. De los Santos-Posadas y J.R. Valdez L. (2008). Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia*, 42(4), 473-485.

Díaz F., R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A. y J. Etchevers B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13 (1): 25-34. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>.

Fekedulegn D., M. P. Mac Siurtain, y J. Colbert. 1999. Parameter estimation of nonlinear growth models in forestry. *Silv Fenn*, 33(4), 327-336. [https://researchrepository.ucd.ie/bitstream/10197/4032/1/Fekedulegn et al. 1999.pdf](https://researchrepository.ucd.ie/bitstream/10197/4032/1/Fekedulegn%20et%20al.%201999.pdf) (08 de septiembre de 2020).

Fonseca G., W., F. Alice G., J. M. Rey B. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30(1): 36-47. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002009000100006>

Gompertz, B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on the mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 115, 513-585. Doi: <https://doi.org/10.1098/rstl.1825.0026>

Hernández R., J., X. García C., A. Hernández R., J.J. García M., H. J. Muñoz F., G.G. García E. y M. Samperio G. 2016. Turnos técnicos para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en Hidalgo, México. *Revista Forestal Baracoa* (Número Especial 35): 1-8. https://www.researchgate.net/publication/328290655_TURNOS_TECNICOS_PARA_BOSQUES_NATURALES_DE_Pinus_teocote_Slecht_Cham_EN_HIDALGO_MEXICO (9 de septiembre de 2020).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf. (7 de septiembre de 2020).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2008. Conjunto de datos vectoriales, escala 1: 1000000. Unidades climáticas. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/> (18 octubre de 2020)

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2014. Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1: 250000 Serie II (Continuo Nacional). http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx. (18 de octubre de 2020).

Kiviste, K., J. G. Álvarez G., A. Rojo A. y A. D. Ruiz G. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Monografía INIA: Forestal No. 4. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Madrid, España. 190 p.

López, R., L.Y., M. Domínguez, P. Martínez Z., J. Zavala C., A. Gómez G. y S. Posada C., (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y bosques* 22(3): 49-60. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231456>

López H., M. I., J. Cerano P., S. Valencia M., E. H. Cornejo O., J. Villanueva-Díaz, R. Cervantes-Martínez y G. Esquivel-Arriaga. 2018. Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* a variables climáticas en Chiapas, México., 66(4): 1580-1596. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32663>

Manzo, S. V., y Vargas H. J. (2001). Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula* *Agrociencia*, 35(1), 109-120. <https://www.agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/95/95>
(15 de octubre de 2020).

Marroquín M., P., J. Méndez G., J. Jiménez P., O. Aguirre C. y J. Yerena. 2018. Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(47): 94-110. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.172>

Martínez A., L., H. De los Santos P., A. Fierros G., R. Fierros M., R. Pérez M., A. Hernández R. y J. Hernández R. 2019. Factores de expansión y sistema de partición de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(51): 107-132.

DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.311>

Méndez G., J., S. L. Luckie N., M. A. Capó A. y J. A Nájera L. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45(4):479-491.

<https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/894/894>

(25 de septiembre de 2020).

Murillo B.,Y., M. Domínguez D., P Martínez Z., L. Lagunes y A. Aldrete. 2017. Índice de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* en el trópico húmedo de México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo* 49(1): 15-31.

<http://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/3100>

(14 de septiembre de 2020).

Návar, J. J., N. González, D. Maldonado D., J. Graciano y V.H. Dale 2003. Captura de Carbono en Plantaciones Forestales de Durango, México. XII congreso forestal mundial. Organización las Naciones para la Alimentación y la Agricultura (FAO). pp. 42-79. <http://www.fao.org/forestry/87747/es/>
(05 de noviembre de 2020).

Orihuela-Belmonte, D. E., H. J. De Jong, B., J. Mendoza-Vega, J. Van der Wal, F. Paz-Pellat, L. Soto-Pinto and A. Flamenco-Sandoval. 2013. Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type. *Agriculture, ecosystems & environment* 171, 72-84. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.03.012>

Pacheco E., F., A. Alderete, A. Gómez G., A. Fierros G., V. M. Cetina A. y H. Vaquera H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Fitotecnia Mexicana* 30 (3): 251–254. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/30-3/5a.pdf>
(4 de octubre de 2020).

Pompa G., M. y J. Sigala R. 2017. Variación de captura de carbono de especies forestales en México: Una revisión. *Madera y Bosques* 23(2): 225-235. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321512>

Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of experimental botany*. Vol. 10 (29): 290–300. <http://www.jstor.org/stable/23686557>
(15 de septiembre de 2020).

Ríos-Saucedo, J. C., E. Acuña C., J. Cancino C., R. Rubilar P., J. J. Navar. C. y R. Rosales S. 2016. Ecuaciones alométricas de uso común para estimar biomasa en rebrotes de especies dendroenergéticas de corta rotación: Una revisión. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 22(2): 193-202. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.05.022>

Rodríguez-Larramendi, L. A., F. Guevara H., L. Reyes M., J. Ovando C., J. Nahed T., M. Prado L. y R.A. Campos S., (2016). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(37), 77-94. Doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.53>

SAS Institute Inc. 2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide Second Edition. Raleigh, NC, EE. UU.: SAS Institute Inc. s/p. <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm> (1 de Octubre de 2020).

Schumacher, F. X. 1939. A new growth curve and its application to timber-yield studies. *Journal Forestry* 37:819–820.
Doi: <https://doi.org/10.1093/jof/37.9.z1>

Sit, V., y M. Poulin C. (1994). *Catalogue of curves for curve fitting*. Forest Science Research Branch, Ministry of Forests. Victoria, Columbia británica. 116 p. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.397.1367&rep=rep1&type=pdf> (15 de Agosto de 2020).

Trujillo U. E., P.S. Álvarez L., V.R. Valdovinos C., G. Benítez M., y L.O. Rodríguez G., (2018). Turnos forestales en plantaciones maderables de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, en Balancán, Tabasco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(48), 27-46.
DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.130>

Villar, R., J. Ruiz-Robledo, L. Quero J., H. Poorter, F. Valladares y T. Marañón. 2004. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ed. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid, España. pp. 191-227.

<https://www.researchgate.net/publication/46651576> Tasas de crecimiento en especies lenosas aspectos funcionales e implicaciones ecologicas
(4 de noviembre de 2020).

CAPITULO IV

CRECIMIENTO E INCREMENTO EN DIÁMETRO, ALTURA Y VOLUMEN para *Pinus oocarpa* Schiede, MONTAÑA DE GUERRERO

CRECIMIENTO E INCREMENTO EN DIÁMETRO, ALTURA Y VOLUMEN en *Pinus oocarpa* Schiede, MONTAÑA DE GUERRERO

RESUMEN

La estimación de incrementos en variables dasométricas es importante para determinar los tiempos óptimos de aplicación de aclareos, programar las podas y determinar turnos técnicos de cosecha maderable, así como la corta final. El objetivo de este estudio fue ajustar 4 modelos de crecimiento forestal para la predicción del crecimiento e incremento en diámetro, altura, área basal y volumen en *Pinus oocarpa*, Montaña de Guerrero. La metodología consistió en el derribo de árboles muestra representativos (3 por categoría diamétrica). Mediante la aplicación de la técnica de análisis troncales se midieron variables dasométricas en función de la edad; posteriormente se ajustaron 4 modelos de crecimiento: Schumacher, Chapman-Richards, Gompertz y Weibull. Se eligieron los modelos que gráficamente predijeran los incrementos de forma adecuada y que tuvieran mayores valores de R^2_{adj} , menor $RCME$, y Syx . También se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y homocedasticidad de los residuales mediante inspección gráfica y el test de White. Los resultados indicaron que los modelos de Chapman-Richards y Schumacher se ajustaron adecuadamente con valores de $R^2 > 0.90$ para estimar incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen; Los turnos absolutos obtenidos fueron: 22 años en diámetro, 14 años en altura, 85 años en área basal y 97 años en volumen; con esas edades es posible planear los primeros aclareos en base al diámetro, aclareos de copa o podas en base a la altura, segundo y tercer aclareo en base al área basal y la cosecha final en base al volumen.

ABSTRACT

The estimation of increments in dasometric variables is important to determine the optimal times to apply thinning, schedule pruning and determine technical shifts for timber harvesting, as well as the final cut. The objective of this study was to adjust 5 forest growth models for the prediction of growth and increase in diameter, height, basal area and volume in *Pinus oocarpa*, Motaña de Guerrero. The methodology consisted in the demolition of 24 representative sample trees and by applying the trunk analysis technique, dasometric variables were measured as a function of age i , then 4 growth models were adjusted: Schumacher, Chapman-Richards, Gompertz and Weibul. Subsequently, the models that graphically predicted the increases in an adequate way and that had higher values of R^2_{adj} , lower CME, and SY were chosen. Also, the Shapiro-Wilk test was applied to verify the normality of the errors and finally the homoscedasticity of the model was verified by graphic inspection. The results indicate that the Schumacher model was adequately adjusted with values of $R^2 > 0.90$ to estimate increases in height, basal area and volume; for diameter it was the Gompertz model. The following absolute shifts obtained were as follows: 22 years in diameter, 14 years in height, 85 years in basal area and 97 years in volume; At these ages it is possible to plan the first thinning based on diameter, crown thinning or pruning based on height, second and third thinning based on basal area and the final harvest based on volume.

4.1 INTRODUCCIÓN

En el manejo forestal, estudiar la dinámica de crecimiento del bosque es un aspecto importante para conocer las tasas de cambio en cualquier variable dasométrica (diámetro, altura, área basal y volumen) referidas a unidades de tiempo, mismas que son necesarias para aplicar correctamente cualquier práctica y técnica silvícola (Fierros et al., 2014)

La importancia del estudio del crecimiento e incremento de los bosques y árboles, recae en el interés de los silvicultores para poder determinar su comportamiento y su proyección a un determinado periodo para su mejor manejo; como, por ejemplo, estimar los intervalos de tiempo adecuados para realización de podas, aplicación de aclareos, tiempo de cosecha maderable, entre otros. Esto es posible gracias a diversos estudios que se realizan día con día para comprender el fenómeno de crecimiento de las especies forestales (Daniel *et al*, 1982; Prodan *et al*, 1994).

El manejo silvícola prescrito en una inadecuada época de aplicación de aclareos, podas, cosecha de semillas, aprovechamiento de los árboles cuando no están en máxima ganancia maderable, entre otros, ocasiona que el recurso forestal pueda degradarse a grandes escalas (Mongil, 2018).

Por tal motivo, se hace importante el buen manejo forestal y la aplicación de las técnicas silvícolas pertinentes, para el buen desarrollo del bosque y asegurar su permanencia para futuras generaciones (Smith et al., 1997).

La región Montaña del estado de Guerrero, México, cuenta con gran riqueza forestal aportando múltiples servicios ambientales en beneficio de la sociedad. Particularmente los bosques de pino y encino son los más abundantes en esta región por su amplio hábitat de crecimiento, destacando *Pinus oocarpa* Schiede y *Pinus teocote* Schl. et Cham. (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014).

En el presente trabajo se evaluaron modelos de crecimiento y se determinaron los incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen de *Pinus oocarpa*

Schiede (especie con gran potencial maderable de la Montaña de Guerrero) de un área experimental de 50 hectáreas perteneciente a la región Montaña de Guerrero. Se determinó el incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA) en diámetro normal (cm), altura (m), área basal (m^2) y volumen (m^3), para finalmente estimar turno técnico y absoluto, con el propósito de obtener un conocimiento básico para planificación de labores silvícolas, así como generar información relativa al crecimiento e incremento de las masas boscosas en la región Montaña del Estado de Guerrero.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se encuentra ubicada entre los 98° 39' 24" LW y 17°19' 30" LN (Figura 17) a una altitud promedio de 2100 m (Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática [INEGI, 2016]), comprendiendo los municipios de Malinaltepec e Iliatenco, Guerrero, donde se desarrolla de manera natural la especie de *Pinus* seleccionada formando bosques puros.

El área de estudio tiene un clima A(c) w₂ (2), es decir, templado semi-cálido, con lluvias intensas en los meses de Julio-Agosto; la temperatura mínima y máxima oscila de -3°a 26° respectivamente. El tipo de suelo en su mayoría es Regosol con abundante en materia orgánica (INEGI, 2008; INEGI, 2014).

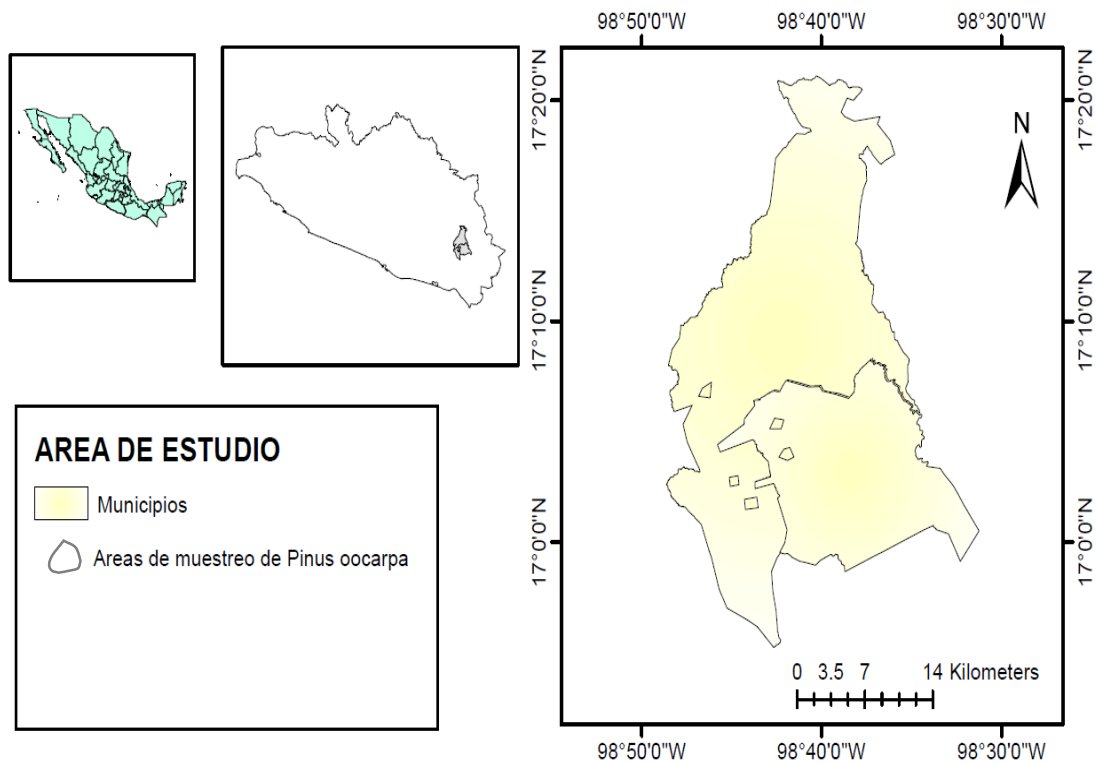


Figura 17. Localización geográfica del área de estudio.

4.2.1 Delimitación del área de estudio

Previo al muestreo, se hicieron recorridos de campo para ubicar las áreas de bosque donde crece de forma natural *Pinus oocarpa* Schiede. En total se seleccionaron áreas estratificadas y representativas con presencia de bosques maduros de la especie estudiada cubriendo un total de 60 ha. El criterio para la elección de la especie fue su amplia distribución en la región Montaña del estado de Guerrero, México.

4.2.2 Derribo de árboles muestra

El método de muestreo que se utilizó para la elección del arbolado fue selectivo tomando en cuenta los criterios necesarios para obtener turno y calidad de sitio: árboles dominantes, codominantes e intermedios, fustes no bifurcados y libres de plagas y enfermedades.

El muestreo consistió en seleccionar dos o tres árboles por categoría diamétrica representativos de la especie estudiada en todo el bosque, desde la categoría 5 a 50 cm, cubriendo las características morfológicas de la especie.

Se eligieron los árboles más representativos de cada categoría diamétrica en el sitio. Se seleccionaron 24 árboles de *Pinus oocarpa*. Antes de derribar cada árbol se midió el diámetro normal con cinta diamétrica y se usó un clinómetro para medir la altura.

Se realizó el derribo direccional con la ayuda de una motosierra, se cuidó la caída libre del árbol sobre una lona. El corte del derribo se realizó a 0.3 m. Una vez realizado el derribo se procedió en la separación de hojas-ramas dejando el fuste limpio con el fin de facilitar las mediciones y trozado a lo largo del fuste desde la base hasta la punta.

4.2.3 Colecta de rodajas

El troceo se inició a partir del tocón a una altura de 0.30 m, para la segunda troza a una altura de 1.30 y para las demás fueron a cada 2 m de altura hasta llegar al

ápice del árbol, el grosor de las rodajas fue de 5 cm recomendado por Imaña y Encinas (2008) y Klepac (1976).

Una vez obtenidas todas las rodajas, se ordenaron de mayor a menor y se anotó en la parte contraria a la cara en donde se hicieron las mediciones, los siguientes datos: número de árbol, número de rodaja, especie, sección o altura de corte.

4.2.4 Proceso de secado

Una vez obtenidas las muestras rodajas, se llevaron al Laboratorio de Manejo Forestal de la Universidad Intercultural de Estado de Guerrero (UIEG) para su pesado y secado en una estufa, en un lapso de tres días (72 horas); sin embargo, se logró hasta los 7 días (160 horas) a una temperatura de 80 a 100 °C del cual se obtuvo el peso seco (Díaz et al., 2007).

Una vez secadas las muestras se lijaron y barnizaron, esto con la finalidad de hacer la superficie más lisa y tener mejor visión de los anillos de crecimiento y facilitar la detección de los anillos falsos y verdaderos.

4.2.5 Agrupamiento y conteo de anillos

Las evaluaciones de las rodajas se realizaron en base a su diámetro, para evitar que se sobreestimaran las medidas; sobre el diámetro se trazó una línea horizontal donde se contaron los anillos verdaderos y falsos incompletos o punteados, siguiendo el procedimiento de análisis de crecimiento propuesto por Monroy (1996); esto se realizó para cada árbol y su respectivo número de rodajas:

a) Se contaron los anillos de crecimiento en la rodaja a 0.30 m de altura del fuste, evitando incluir los falsos anillos.

b) Al número de anillos encontrados, se sumó 2 años (tiempo estimado para que el árbol haya alcanzado la altura de 0.30 m) y obtener la edad total del árbol (Klepac, 1976).

c) Se procedió a calcular las edades de cada corte realizado en el árbol a diferentes alturas. Esto se determinó por diferencia entre la edad actual del árbol y el número de anillos encontrados en cada sección.

Para determinar el número de anillos y edad de las siguientes rodajas, se utilizó el mismo procedimiento que con la rodaja de 0.30 m, sin considerar la edad del tocón, aplicando la fórmula:

$$E_s = N_{sa} - N_{as} + E_{sa}$$

Donde:

E_s = edad de la sección

N_{sa} = número de anillos de la sección anterior

N_{as} = número de anillos de la sección

E_{sa} = edad de la sección anterior

d) Se agruparon las edades por categorías de edad de cinco y diez años (dependiendo el grosor y tamaño del árbol) y a estas edades se tomó el diámetro de cada categoría.

Con un marcador se indicó con precisión el centro de cada rodaja; después con una regla apoyada en la marca del centro, se desplazó sobre la superficie de la misma, hasta coincidir con el exterior de su corteza en el último anillo cercano al cambium (Figura 18).



Figura 18. Medición de anillos mediante la aplicación de análisis troncales en *Pinus oocarpa*, Guerrero, México.

Este diámetro se indicó sobre la rodaja, con una línea recta de color, con el fin de que las mediciones posteriores sean menos difíciles y más exactas.

En cada rodaja se marcaron grupos de anillos de la periferia hacia el centro, en periodos de 5 y 10 años.

4.2.6 Determinación de variables dasométricas

Los datos de análisis troncal de los árboles se agruparon en pares tomando todas las variables en relación con la edad.

Las relaciones dasométricas empleadas fueron:

- a) edad-diámetro de sección (en base al grupo de edad)
- b) edad-altura alcanzada en cada sección
- c) edad-área basal de la sección (en base a la agrupación de edad)
- d) edad-volumen de las secciones de edad correspondiente

El diámetro normal se obtuvo por medio de una ponderación entre la rodaja inferior y superior a 1.3 m. La variable altura se obtuvo con medición directa, correspondiente a cada altura donde se realizó el corte de rodajas en el árbol

y se midió cada vez que se extraía una rodaja. El área basal corresponde al área del diámetro normal a 1.30 m que fue calculado con ponderación, realizando esto para cada categoría de edad del árbol mediante la fórmula:

$$AB = \left(\frac{\pi}{4}\right) * DN^2$$

Donde:

AB = Área basal a 1.30 m.

DN = Diámetro normal en metros a 1.30 m,

El volumen se calculó para cada una de las trozas por categoría de edad y por altura de troza de cada una de las secciones, el cálculo del volumen de las trozas se determinó mediante la aplicación de la fórmula de Smalian, para el caso del volumen de puntas (m³) se empleó la fórmula del cono.

Fórmula de Smalian para el cálculo del volumen a una edad *i*:

$$Vi = \left(\frac{Ai + As}{2}\right) * L$$

Donde:

Vi= es el volumen del paraboloides de cada sección de troza para categoría de edad.

Ai: es el área de la sección basal inferior de la troza

As: es el área de la sección superior de la troza

L: es la longitud de la troza (sección de altura)

Para el caso de volumen de puntas de cada sección de edad, se aplicó la siguiente fórmula:

$$Vp = \left(\frac{As}{3}\right) * L$$

Donde:

V_p = es el volumen de la punta del árbol de cada sección de troza para cada categoría de edad

A_s : es el área de la sección basal final de la troza

L : es la longitud de la troza (sección de altura final)

El volumen por sección de edad se obtuvo mediante la sumatoria de volúmenes unitarios de cada troza (V_i) y V_p (volumen de puntas) presentes en cada categoría de edad.

4.2.7 Ajuste de modelos de crecimiento

Se probaron 4 modelos de crecimiento: Schumacher, Gompertz, Chapman-Richards y Weibull, ampliamente usados por su practicidad y ajustes satisfactorios en diversos estudios de crecimiento forestal (Aguilar *et al.*, 2016; Hernández *et al.*, 2016; Murillo *et al.*, 2017), los cuales se presentan en el Cuadro 15; de cada fórmula integral se determinó el incremento corriente anual (ICA) y el incremento medio anual (IMA). Con el mejor modelo ajustado se estimó el turno absoluto (punto óptimo de los tratamientos silvícolas y el aprovechamiento, mediante el cruce de ICA e IMA).

Cuadro 15. Ecuaciones de crecimiento empleadas para determinación de incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen de *Pinus oocarpa*, Guerrero.

No.	Ecuación de crecimiento	Forma integral	Incremento corriente anual (ICA)	Incremento medio anual (IMA)
1	Schumacher (1939)	$Y = a * e^{-b/X}$	$-\frac{b}{X^2} * e^{a+b/X}$	$\frac{1}{X} e^{a+b/X}$
2	Gompertz (1825)	$Y=ae^{-be^{cX}}$	$ace^{-e^{b-c*X}} e^{b-c*}$	$-ae^{-e^{b-c*X}} e^{b-c*X}$
3	Chapman-Richards (1959)	$Y = a(1 - e^{-b*X})^c$	$abce^{-bx}(1 - e^{-b*X})^{c-1}$	$acXe^{-bx}(1 - e^{-b*X})^{c-1}$
4	Weibull (1951)	$Y=a\sqrt[1-e^{-bX^c}]{}$	$acX^{b-1}e^{-b*X^c}$	$abX^{bc}e^{-b*X^c}\ln(X)$

Así mismo, con fines de comparación, se aplicó el método alterno de estimación de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA), acorde a lo propuesto por Hernández (2012), como se muestra a continuación:

$$ICA = \frac{y_2 - y_1}{E_2 - E_1} \quad IMA = \frac{Y(\text{estimados})}{Edad}$$

Donde:

Y= incrementos en diámetro, altura, área basal o volumen.

y1= valor dasométrico anterior o primera medición

y2= valor dasométrico superior o segunda medición

E1= edad anterior o de la primera medición

E2= edad superior o de la segunda medición

Para seleccionar el modelo de mejor ajuste se tomó en cuenta el nivel de significancia del modelo ($p < 0.05$) con los menores valores de la raíz del error medio cuadrático (*REMC*), mayor coeficiente de determinación (*R²adj*) y menor sesgo promedio (*e*).

Se empleó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk, 1965), contrastando el siguiente supuesto:

Ho: los errores se distribuyen normalmente

Ha: los errores no se distribuyen de forma normal.

Generalmente si el estadístico de Shapiro-Wilk (SW) fuese menor a 1, se consideró que los errores siguen una distribución normal y viceversa (Shapiro-Wilk, 1965).

Posteriormente se aplicó la prueba de Durbin-Watson para detectar la independencia de los residuos (autocorrelación), la cual se midió mediante los siguientes criterios:

Estadístico de Durbin-Watson (DW) menor a 1, existe correlación positiva.

Estadístico de Durbin-Watson (DW) entre 1 y 2, no existe correlación en los residuos.

Estadístico de Durbin-Watson (DW) entre 2 y 4, existe correlación negativa (Durbin y Watson, 1948).

Se validó el modelo mediante la técnica de validación cruzada (cross of all variables) empleando el “test de heterocedasticidad” mediante el procedimiento “White test” (White, 1980) del programa SAS, la cual contrasta las siguientes hipótesis:

Ho: los errores son homocedásticos

Ha: los errores son heterocedásticos

Dado que la mayoría de los modelos de crecimiento presentan problemas de heterocedasticidad al tratar con la variable tiempo, se realizó una corrección de heterocedasticidad en aquellos que presentasen ese problema. Para ello se efectuó una ponderación con los mismos pesos a la inversa cuadrática de la variable de cada observación para garantizar las estimaciones de los parámetros. La varianza desconocida se estimó con la función potencial $s^2 = j * x^k$. Los valores de j y del exponente k se optimizaron empleando los errores del modelo ajustado sin pesos como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error. Finalmente, el peso considerado fue la raíz cuadrática ($1/x^2$) para las variables independientes de la ecuación de crecimiento seleccionada (Guzmán et al., 2019; Corral et al., 2017).

Finalmente se empleó el criterio de información de Akaike (AIC), como medida para elegir el modelo que presente mejor parsimonia en los parámetros de la estructura de dicho modelo.

Todos los ajustes alométricos se realizaron con el método de mínimos cuadrados ordinarios, mediante el procedimiento no lineal PROC MODEL, del programa estadístico SAS (Statistical Analysis System, 2008). Así mismo se utilizó la función PROC MEANS para la estadística descriptiva; para la prueba de normalidad,

autocorrelación y heterocedasticidad se empleó el procedimiento PROC UNIVARIATE, PROC AUTO REG y WHITE TEST del mismo programa.

4.2.8 Determinación del turno absoluto

El turno absoluto es aquel en que una especie produce la mayor cantidad de material leñoso, sin interesar la naturaleza, la calidad de los productos u otra especificación para un uso potencial (SARH-SF, 1985).

Graficando los valores del ICA e IMA calculados (predichos) de cada variable (diámetro, altura, área basal y volumen), donde presentan una intercepción de estas dos líneas, el valor de la edad en ese punto correspondió al turno absoluto de la especie.

4.2.9 Determinación del turno técnico

El turno técnico es aquel en el que una especie dada rinde la mayor cantidad de materia prima de un tamaño u otra especificación para un uso especial en función a las dimensiones del diámetro de referencia (diámetro normal) (Klepac, 1976).

La especificación que se puede dar para determinar este turno depende del uso al cual será destinada esta materia prima; caso más común es el diámetro en el que se determina una cierta medida comercial y en base al diámetro se puede determinar la edad a la que se alcanza esta dimensión, determinando estos años como el turno técnico de la especie.

Para este estudio se consideraron cuatro categorías diamétricas de aprovechamiento maderable: DN= 30 cm, 40 cm, 50 cm, y 60 cm, dimensiones comerciales para el aprovechamiento forestal, en función de los productos que se pueden obtener (Romahn & Ramírez, 2010).

Troza para aserrío= 2.4 m de largo y 30 cm de diámetro mínimo.

Trozas cortas= 1.8 m de largo máximo y diámetro variable (30 cm a 50 cm).

Para chapa= 2.4, 3.0 y 3.6 m de largo y diámetro mínimo de 60 cm

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1 Características dasométrica de los árboles muestreados

De acuerdo con los datos reconstruidos mediante análisis troncales de los árboles derribados de *Pinus oocarpa* Schiede, la edad mínima encontrada fue de 5 años y de 104 años como máximo; los diámetros normales fluctuaron de 1.5 cm a 59.8 cm, con un volumen maderable de entre 0.00005 y 3.3589 m³ (Cuadro 16).

Cuadro 16. Parámetros descriptivos de análisis troncales de *Pinus oocarpa* Schiede, Montaña de Guerrero.

Variable	Ns	\bar{x}	DE	Mín	Max	EE	CV
E	108	32.4	24.2	4	104	2.3	74.5
DN	108	22.9	15.9	1.5	59.8	1.5	69.2
H	108	14.4	8.3	1.2	29	0.8	57.7
G	108	0.0608	0.0687	0.0002	0.2809	0.0066	113.0
V	108	0.6395	0.7991	0.0005	3.3589	0.1	125.0

Donde: N=número de secciones analizadas; E=edad (años); H=altura total (m); \bar{x} = promedio; DN=diámetro normal (cm); G=área basal (m²); V=volumen (m³); DE=Desviación estándar; Min y Max= valores mínimos y máximos; EE= error estadar; CV= coeficiente de variación en porcentaje.

4.3.2 Ajuste de modelos de crecimiento

No todos los modelos de crecimiento convergieron en los parámetros correctos, los modelos de Chapman-Richards, Schumacher y Gompertz presentaron problemas de heterocedasticidad (acorde al test de White) y autocorrelación (Prueba de Durbin y Watson); por lo tanto, se tuvo que aplicar la corrección de heterocedasticidad mediante la ponderación inversa de la varianza, empleando pesos ponderados ($1/E^2$, $1/E$ y $1/E^3$) (Guzman et al, 2019; Corral et al., 2017). Para las variables diámetro normal (DN) y área basal (G) el modelo Gompertz presentó la mejor bondad de ajuste, en altura (H) el modelo de Schumacher y en volumen (V) el modelo de Chapman Richards; sin embargo, al realizar la proyección gráfica del crecimiento de los tres modelos seleccionados, el modelo de Weibull y de Gompertz predijeron mayores incrementos a edades tempranas

y muy lento incremento a partir de 50 años. Lo anterior provocó que tanto el incremento corriente anual como el medio anual no se mostraran visualmente de forma clara; en contraparte el modelo de Chapman-Richards presentó una tendencia clara al crecimiento biológico en diámetro, la cual puede observarse en la Figura 19; el modelo de Schumacher no presentó problemas de heterocedasticidad en altura, donde se observa la proyección de estimación en forma de "S" alargada, correspondiente al ciclo de vida de cualquier organismo. Así mismo las curvas generadas de ICA y el IMA fueron satisfactorias; por lo tanto, estos modelos fueron elegidos para estimación de incrementos en diámetro y altura. El modelo de crecimiento de Chapman-Richards fue ligeramente superior al resto de las ecuaciones de crecimiento con valores de $R^2=0.97$, $CME= 14.3$ y $Sy=3.7$ (Cuadro 17); las gráficas de observados y predichos de incrementos en diámetro se ajustaron adecuadamente.

Se pudo notar que al ajustar la misma variable con otros modelos no seleccionados se comprobó que existió una variación de hasta 20 años entre un modelo y otro sobre todo en el turno de área basal y volumen; ese comportamiento no se dio en el cálculo de incrementos en diámetro y altura donde los 4 modelos ajustados en este estudio presentaron una diferencia máxima entre sí de 4 años en el cruce de ICA e IMA.

Cuadro 17. Bondad de ajuste de modelos de crecimientos para estimación de incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen de *Pinus oocarpa*, Montaña, Guerrero.

Ec	R²adj	REMC	e	SW	DW	White test	AIC	Pr> F
Diámetro (cm)								
1	0.80	6.98	2.24	0.95	1.180	0.0001	656	0.0001
2	0.90	4.98	0.37	0.87	1.183	0.2568	745	0.0001
3	0.92	4.373	0.01	0.79	1.99	0.3685	641	0.0001
4	0.92	4.437	0.04	0.81	1.68	0.0458	643	0.0001
Altura (m)								
1	0.86	3.02	0.08	0.64	1.99	0.0586	610	0.0001
2	0.81	3.58	0.65	0.77	1.45	0.6874	617	0.0001
3	0.83	3.34	0.40	0.56	1.47	0.0365	622	0.0001
4	0.82	3.48	0.50	0.52	1.46	0.0001	617	0.0001
Área basal (m ²)								
1	0.87	0.0247	0.0020	0.69	1.33	0.0195	-505.9	0.0001
2	0.87	0.0247	0.0440	0.66	1.95	0.1002	-511.4	0.0001
3	0.87	0.0239	-0.0001	0.76	1.94	0.0387	-508.1	0.0001
4	0.89	0.0227	0.0001	0.72	1.35	0.0238	-519.27	0.0001
Volumen (m ³)								
1	0.87	0.278	0.0178	0.91	1.92	0.0047	27.6	0.0001
2	0.87	0.265	0.0097	0.92	1.56	0.0970	29.1	0.0001
3	0.89	0.245	0.0076	0.85	1.23	0.0756	27.5	0.0001
4	0.89	0.248	0.0083	0.8	1.54	0.0052	31.9	0.0001

Donde: Ec= ecuación de crecimiento seleccionada; Var= Variable analizada; D=diámetro normal (cm); H=altura (m); G= área basal (m²); V=volumen (m³); R²adj = Coeficiente de determinación ajustado; REMC = Raíz del error medio cuadrático; e= Sesgo promedio de residuales; White test=Prueba de heterocedasticidad; DW= prueba de Durbin y Watson para autocorrelación; SW= prueba de normalidad de errores de Shapiro-Wilk; AIC= Criterio de información de Akaike; Pr>F= Valor de la probabilidad de la distribución F al 99%.

Las ecuaciones generadas de los mejores modelos de crecimiento seleccionados se presentan en el Cuadro 18 y 19. Se puede notar que debido a la variabilidad de la edad en cada una de las variables dasométricas no fue posible ajustar un solo modelo de crecimiento para todos los datos; para el diámetro el modelo de Chapman-Richards presentó los mejores ajustes, en altura el modelo de Schumacher, para el volumen se ajustó de mejor forma el modelo de Chapman-Richards y para área basal el modelo de Schumacher fue el único que tuvo convergencia (Figura 19).

Cuadro 18. Estimadores de ecuaciones seleccionadas de incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen de *Pinus oocarpa*, Guerrero.

Ec	V	R ² adj	RMCE	e	Parámetros	Estimador	EE	Valor -T	Pr>F
3	D	0.92	4.36	0.01	b0	67.4266	7.31	9.21	<.0001
					b1	0.0193	0.0046	4.19	<.0001
					b2	1.406514	0.1199	11.68	<.0001
1	H	0.86	3.02	0.08	b0	30.87331	1.001	30.8	<.0001
					b1	17.47304	1.057	16.52	<.0001
1	G	0.89	0.022	0.0001	b0	-0.75519	0.0002	3.18	0.0020
					b1	-71.4503	0.1875	8.92	<.0001
					b0	17.46261	1.264	3.53	0.0006
3	V	0.89	0.238	0.0010	b1	0.005205	0.007	3.51	0.0007
					b2	1.900032	0.3819	7.34	<.0001

Donde: Ec= ecuación de crecimiento seleccionada; Var= Variable analizada; D=diámetro (cm); H=altura (m); G= área basal (m²); V=volumen (m³); R²adj = Coeficiente de determinación ajustado; RMCE = Raíz del error medio cuadrático; e= Sesgo promedio de residuales; b₀,b₁,b₂= parámetros estimadores; EE= error estándar de los estimadores; Pr>T= Valor de la probabilidad de la distribución *t* de Student.

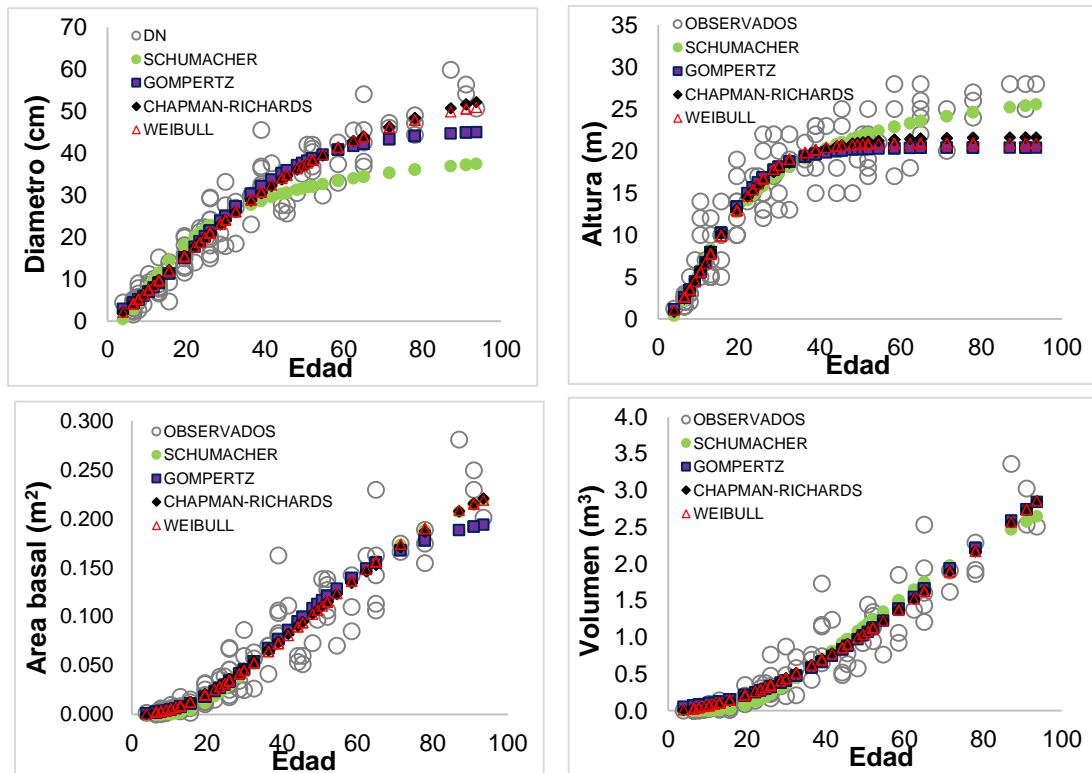


Figura 19. Gráfica de observados y estimados para estimación de incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen en *Pinus oocarpa*, Montaña, Guerrero.

Cuadro 19. Ecuaciones de crecimiento seleccionadas para estimación de incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen de *Pinus oocarpa*, Montaña de Guerrero.

Variable	Ecuación de crecimiento generada	R ² adj
D	$D = 60.629(1 - e^{-0.24385*X})^{1.4065}$	0.92
H	$H = e^{(3.4228+ -17.1173/X)}$	0.86
G	$G = e^{(-0.75519+ -71.4503/X)}$	0.87
V	$V = 17.4626(1 - e^{-0.0052*X})^{1.90}$	0.89

Donde: D=Diámetro (cm); H=Altura (m); G=Área basal (m²); V=Volumen (m³); e=exponencial; X=edad (años); R²adj= coeficiente de determinación ajustado.

Estos resultados coinciden por lo obtenido por Bautista (2001), quien determinó incrementos en diámetro en un bosque de *Pinus rudis* en Coahuila, encontrando que el modelo de crecimiento de Chapman-Richards presentó los mejores estadísticos con CME= 0.0213, Sy= 0.1458 y R²= 0.99; así mismo coincide en que el modelo de crecimiento de Schumacher es el que presentó mejores ajustes para determinar incrementos en área basal (m²) por tener un menor cuadrado medio residual (CME) de 1.9303, menor desviación estándar residual (S) de 1.3894, menor coeficiente de variación (CV) de 7.3732 y el mayor coeficiente de determinación (R²) de 0.997

Hernández (2012) ajustó 3 modelos de crecimiento en diámetro en bosques naturales de *Pinus teocote*, de los cuales el modelo de Korf fue el mejor con valores de R²adj = 0.95 y un CME = 69.47, presentando muy poca diferencia en los resultados de cada modelo de crecimiento en diámetro.

Calvillo (2003) realizó un estudio epidométrico para *Pinus herrerae* Mart. en la región de Cd. Hidalgo, Mich. usando 41 árboles muestra. El modelo que seleccionó para la relación edad–altura fue el de Chapman-Richards con valores de CME=7.4891 y el valor más alto R² (0.9845). Sin embargo, para determinar el crecimiento en volumen fue el Gompertz con valores bajos en el CME (0.1324) y un alto coeficiente de determinación R² (0.9091); destacando los modelos de

Chapman-Richards, Schumacher y Exponencial probados también en el presente estudio.

Por su parte, Sosa (2001) encontró que el modelo de crecimiento en área basal para una regeneración joven de *Pinus teocote* fue el Logístico con valores de $R^2=0.68$, mientras que Pereyra (2003) reportó que el modelo de crecimiento en área basal fue el de Chapman–Richards con valores de $R^2 = 0.87$. Esto podría indicar que el ajuste del modelo de crecimiento en área basal dependerá en gran medida de la variación de los datos de la muestra analizada.

Hernández (2012) determinó que los incrementos en volumen para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht & Cham. se pueden determinar con el modelo de Schumacher, obteniendo valores de R^2 de 0.98 y CME de 1.7020, presentando muy poca diferencia con otros modelos.

4.3.3 Análisis de residuales

Rodríguez et al. (2004), indican que la mayoría de modelos de crecimiento forestal presentan una fuerte heterocedasticidad debido a la variabilidad de la edad con las variables dasométricas que invalidaría la construcción de las bandas de confianza de predicción, pero que es posible corregir mediante la ponderación de los residuos mediante la metodología SUR.

A pesar que se realizó el procedimiento de corrección por heterocedasticidad mediante la ponderación inversa de la variable independiente al cuadrado (Guzmán et al., 2019; Rodríguez et al, 2004), no se logró corregir al cien por ciento la distribución de los errores; se puede notar que los valores de diámetro, altura y volumen presentaron heterocedasticidad a partir de los 60 años (Figura 20). De acuerdo con Rodríguez et al. (2004) en edades tempranas los intervalos son más estrechos, y en edades tardías son más amplios, lo cual justificaría el comportamiento de los residuos en este presente estudio.

Así mismo, Valera (2018) afirma que los modelos de crecimiento tienen la cualidad de aumentar la variabilidad al incrementar la edad

(heterocedasticidad). Estas consideraciones implican carencia de precisión y predicción de los modelos ajustados con las consideraciones clásicas.

De forma general, el análisis de los residuales en categorías de 5 a 60 años presentó homocedasticidad con una distribución de los errores (sesgo) uniforme hacia ambos lados del eje en cada categoría de edad (Figura 20), por lo que no se aprecia el efecto embudo (heterocedasticidad) que indique que se trata de un mal modelo, como lo indica Walpole y Myers (1996).

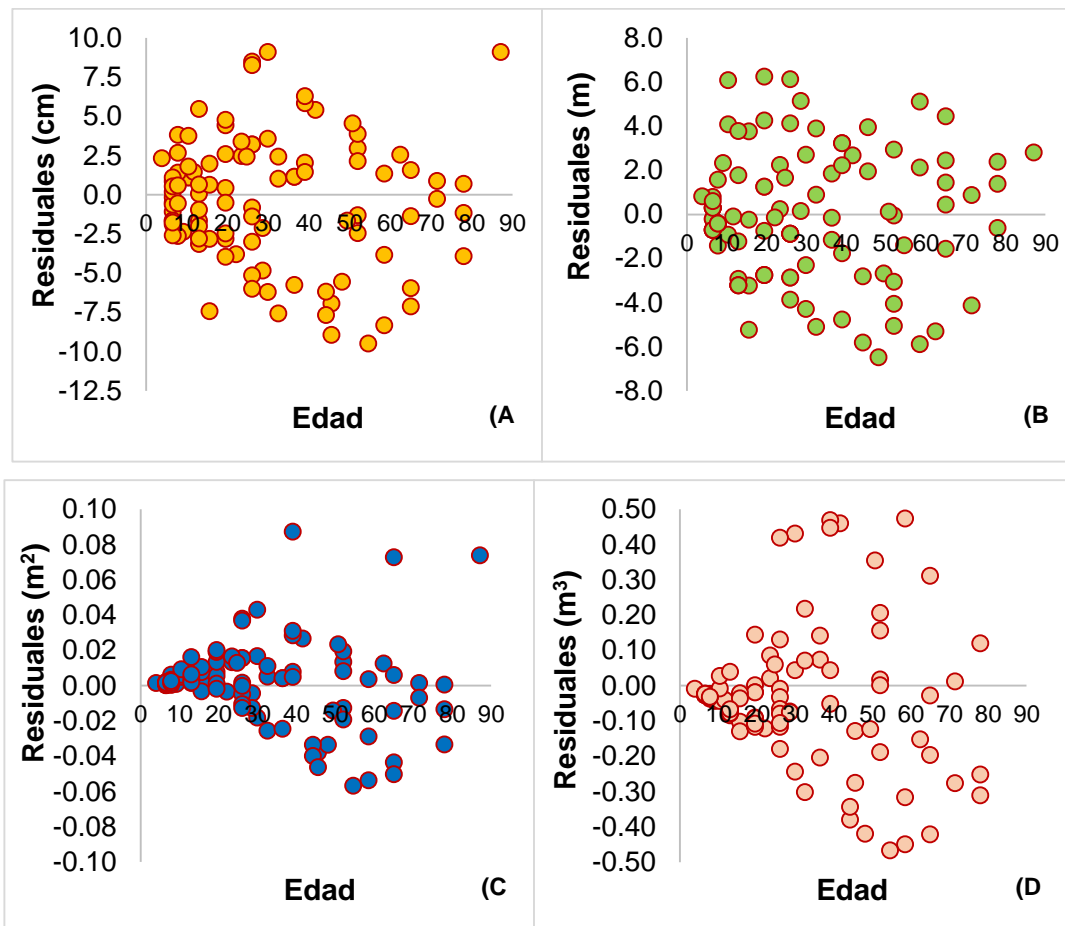


Figura 20. Distribución de residuales por categoría de edad para estimación de incrementos en diámetro (A), altura (B), área basal (C) y volumen (D) de *Pinus oocarpa*, Montaña, Guerrero.

4.3.4 Determinación de incrementos

Los incrementos ICA e IMA en diámetro siguen una tendencia acelerada de aumento a tempranas edades (ICA max); el denominado crecimiento instantáneo en diámetro ocurrió a los 14 años con un incremento anual de hasta 0.9 cm en dicha edad (Figura 21 A1, A2), lo cual significaría que después de ese crecimiento acelerado temprano, la competencia por espacio y nutrientes comienza a notarse y poco a poco empieza a hacerse más marcada, por lo que podrían programarse los primeros aclareos; posteriormente el crecimiento en diámetro seguiría aumentando a un ritmo menos rápido que en el ICA max, llegando a la edad de 26 años con incremento de 0.8 cm año⁻¹ al momento del cruce del incremento promedio anual (IMA) y el ICA (incremento corriente anual).

Calvillo (2003) en un estudio epidométrico para *Pinus herrerae* Mart. en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán, encontró que el incremento en diámetro (ICA max) ocurrió a los 34 años (0.75 cm año⁻¹), posteriormente decrece gradualmente; resultados muy por debajo a lo encontrado en el presente estudio, puesto que para *Pinus oocarpa* puede incrementar hasta 0.88 cm año⁻¹ en el turno absoluto (29 años, cuando ICA=IMA).

El turno absoluto en diámetro encontrado en esta investigación fue inferior a lo encontrado por Hernández (2012), quien reportó un turno absoluto a los 41 años para *Pinus montezumae* en el Estado de Hidalgo. El mismo autor reportó un máximo de ICA de 0.9328 cm año⁻¹ a la edad de 21 años, valor mayor al encontrado en la presente investigación, lo que podría indicar que *Pinus montezumae* incrementa su crecimiento mas rápido a edad tempranas respecto a *Pinus oocarpa*.

Por su parte, Sosa (2001) encontró que el turno absoluto de *Pinus teocote* en una regeneración natural al Sureste de Coahuila y Sur de Nuevo León fue a los 8 años, punto en que el IMA y el ICA se cruzan, inferior al encontrado en el presente estudio. Es obvio que al ser un estudio de plantaciones jóvenes no hay manera de saber si esa tendencia se mantendrá o disminuirá, por ello resulta de mayor

relevancia analizar el crecimiento e incremento durante todo el ciclo biológico del árbol.

Para el caso de la altura se encontró que en promedio *Pinus oocarpa* presentó el máximo crecimiento instantáneo (ICA max) a la edad de 11 años con un incremento de 0.85 m anuales a esa edad, lo cual quiere decir que el crecimiento acelerado en altura culmina a esa edad y comienzan a notarse pequeñas disminuciones de las tasas de crecimiento en altura ocasionadas por la competencia, principalmente por radiación solar, hasta alcanzar el cruce del IMA e ICA a los 19 años, pudiendo incrementar hasta 0.6 metros de altura año⁻¹ (cuando ICA=IMA). A partir de ese intervalo los árboles empiezan a entrar en competencia por luz y quizá sea factor para que gradualmente el bosque comience a clasificar los árboles suprimidos y los dominantes del rodal. Junto con el análisis del incremento en diámetro podría iniciarse la programación de preaclareos y aclareos para dar mayor espacio al bosque y mejorar su estructura, a fin de que esta especie alcance mejores rendimientos maderables y mejores servicios ambientales (Figura 21 B1, B2).

De la Cruz (2010) para una plantación de *Pinus greggii* Engelm, reporta un turno absoluto determinado para altura a los de 13 años con una altura de 6.23 m, alcanzando un máximo valor de IMA de 0.48 m año⁻¹.

Por otra parte, Hernández (2012) reporta un turno absoluto en altura a los 42 años para *Pinus montezumae* Lamb con una altura de 17.23 m, con valores de ICA de 0.4132 m y valor de IMA máximo de 0.4102 m; turno absoluto muy superior encontrado en el presente trabajo.

Valores similares encontró De La Cruz (2010) en *Pinus greggii* Engelm con valores de ICA max en altura a la edad de 7 años con un valor de 0.26 m año⁻¹; Carrillo (2003) para *Pinus herrerae* Mart. reportó que el ICA max en altura fue a los 20 años con 0.74 m año⁻¹.

El incremento en área basal a veces se deja pasar por alto, pero es el incremento que mejor explica la competencia por espacio a edad más avanzada del bosque. Es útil para programar segundo o tercer aclareo por el intervalo de tiempo extendido que resulta de su análisis. Para este estudio se encontró que el incremento máximo en área basal (ICA max) sucedió a los 51 años ($0.003 \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$ de incremento); indicando que después de las primeras competencias (en diámetro y altura) por espacio de crecimiento y luz en etapas iniciales, hay mortalidad natural y el bosque sigue aumentando de forma más o menos creciente hasta los 76 años (turno absoluto mediante el cruce de ICA a IMA) con un incremento de 0.0024 m^2 de área basal. Por lo tanto, a esa edad el bosque empieza a disminuir el ritmo de crecimiento en diámetro, pero ya no por espacio ni nutrientes sino por efecto de su crecimiento biológico, indicando que a partir de esa fecha comienza a marcarse la disminución del grosor del ancho de los anillos de crecimiento y el árbol comienza a entrar a la etapa de madurez (Figura 21 C1,C2).

Hernández (2016) en su estudio de turnos técnicos para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht & Cham. reporta que el cruce de ICA e IMA en área basal ocurrió a los 54 años, este valor es menor al encontrado en esta investigación. En contraparte, Hernández (2012) reportó que las curvas del ICA e IMA se interceptan a los 104 años área basal con valores de ICA de $0.0020 \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$ correspondiendo al turno absoluto en área basal de la especie de *Pinus montezumae* Lamb, la cual resultó de ser de más lento crecimiento.

El máximo crecimiento instantáneo en área basal (m^2) se alcanzó a los 51 años con valor de ICA max de $0.0033 \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$ (Figura 26). Estos valores coinciden con lo reportado por Hernández (2012) con valores de ICA máx a los 48 años con un valor de 0.0026 m^2 ; así mismo Pereyra (2003) encontró el ICA max en área basal a los 65 años con valor de $0.0029 \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$, posteriormente decrece gradualmente hasta los 136 años para *Pinus montezumae* Lamb. en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán.

El análisis de volumen indicó que el máximo incremento instantáneo (*ICAm_{max}*) sucedió a los 56 años con un incremento año⁻¹ de 0.0381 m³ de madera; es decir que aunque en área basal el ICA max sucedió a los 51 años, el árbol siguió aumentando en diámetro mas lentamente que altura, mostrando hasta la edad de 98 años con un incremento año⁻¹ de 0.0280 m³ al momento de alcanzar el turno absoluto (punto de inflexión entre ICA e IMA); por lo tanto, esa edad es la óptima para obtener el máximo de ganancia maderable, turno importante desde el punto de vista del aprovechamiento forestal. Después de esa edad el árbol se podría aprovechar, pero no aumentarían significativamente sus dimensiones por lo que se perdería tiempo de aprovechamiento reflejándose en menores ingresos o utilidad de la especie. También se podría aprovechar a menor edad, sin embargo, eso convellaría a verificar el objetivo del aprovechamiento en función de los turnos silvícolas y la demanda del destino de uso de la madera (Figura 21 D1, D2).

Pereyra (2003) en *Pinus montezumae* Lamb. reportó un turno absoluto en volumen a la edad de 80 años, con valores de IMA de 0.0347 m³ año⁻¹; Calvillo (2003) obtuvo un turno absoluto en volumen a los 76 años para *Pinus herrerae* Mart.

Hernández (2016) determinó para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht & Cham. en Hidalgo un ICA max para volumen a la edad de 43.20 años y un turno absoluto a la edad 86.40 años, valores importantes para decidir la aplicación de la corta final. Por su parte Calvillo (2003) para *Pinus herrerae* Mart reporta el ICA max a los 48 años con un incremento de 0.048 m³ año⁻¹, también Pereyra (2003) menciona que a la edad 50 años la especie *Pinus montezumae* alcanza su máximo valor de ICA (0.050 m³), decreciendo gradualmente hasta los 136 años.

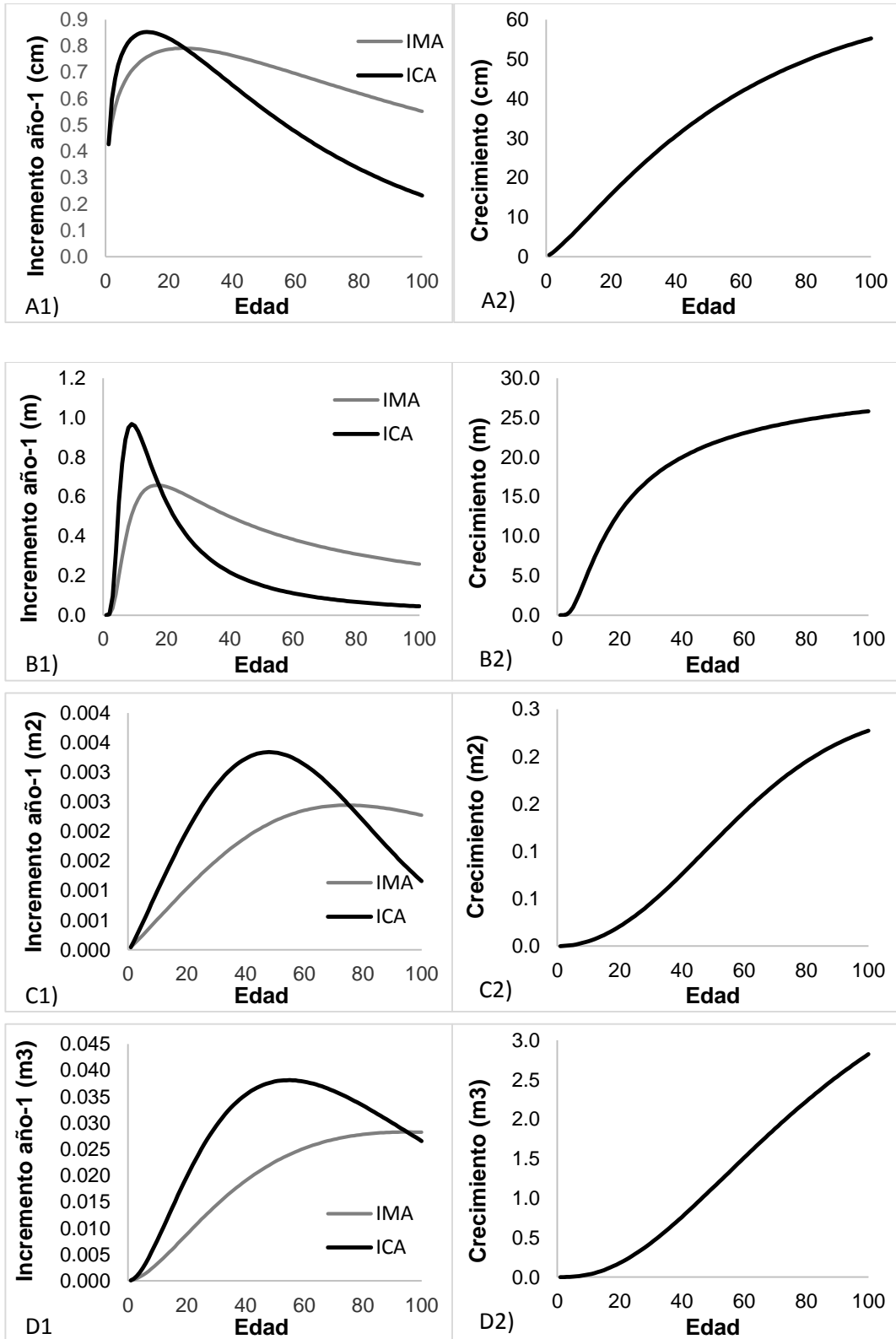
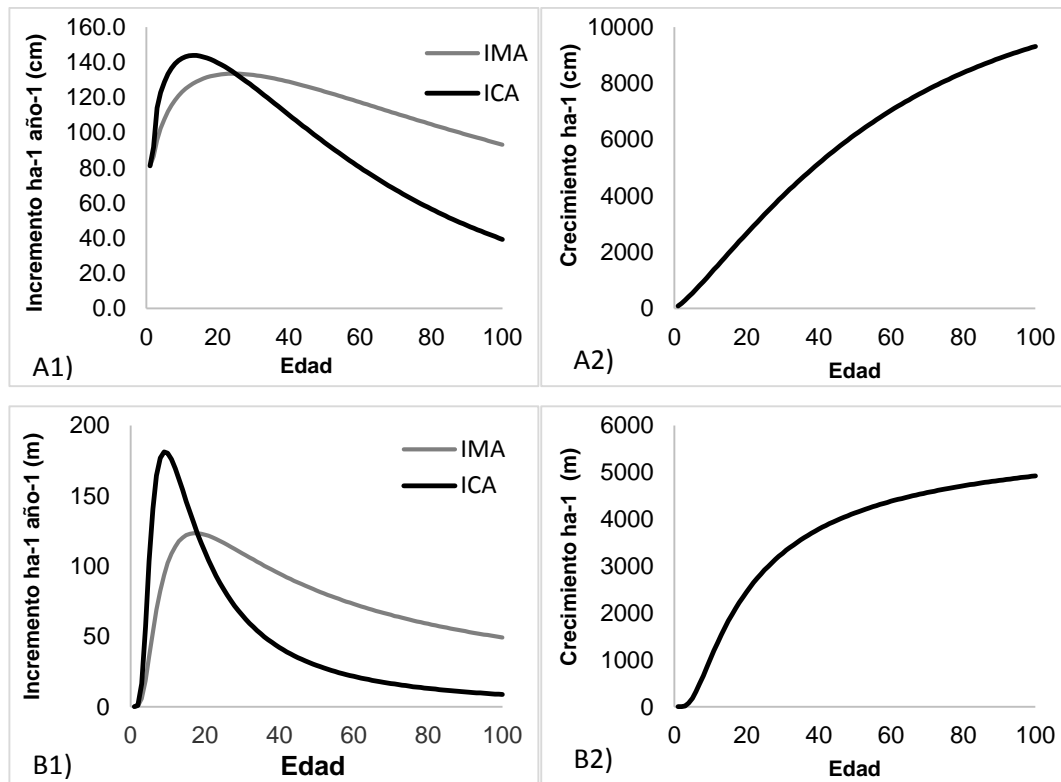


Figura 21. Curvas de crecimiento e incrementos anuales en diámetro (A1,A2), altura (B1,B2), área basal (C1,C2) y volumen (D1,D2) en *Pinus oocarpa*, Montaña, Guerrero.

Tomando como base el número promedio de árboles por hectárea (190 ind ha^{-1}), se proyectaron los incrementos y el crecimiento acumulativo $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ hasta el turno absoluto para cada variable dasométrica, los cuales se pueden observar en la Figura 22 (A1, A2, B1, B2, C1,C2, D1,D2). La suma de 190 árboles de *Pinus oocarpa* de 26 años de edad (turno absoluto en diámetro) pueden crecer en conjunto hasta 132.2 cm ha^{-1} (1.32 m ha^{-1}) en diámetro (ICA=IMA).

En relación a la altura, se encontró que, en conjunto, los árboles de 19 años de edad (turno absoluto) pueden incrementar hasta 116 m de altura por $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, acumulando el total de árboles ha^{-1} promedio (190) desde que nacen hasta el turno absoluto en altura (19 años).



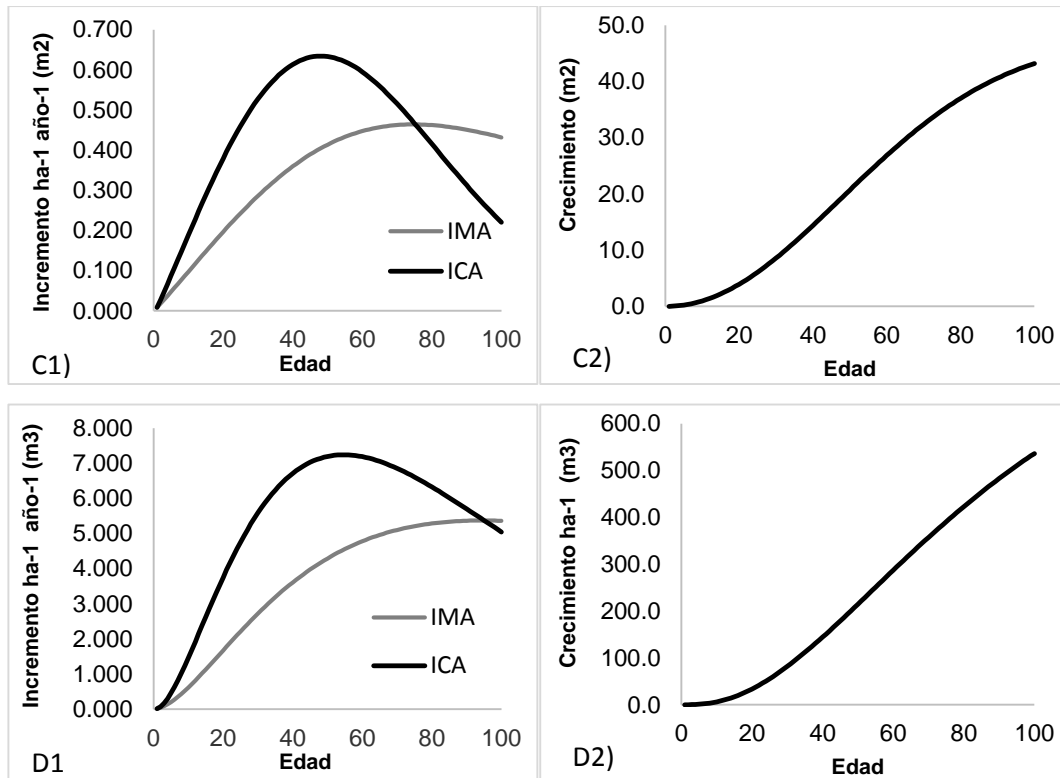


Figura 22. Proyección de crecimiento acumulativo ha⁻¹ año⁻¹, en diámetro (A1,A2), altura (B1,B2), área basal (C1,C2) y volumen (D1,D2)) en *Pinus oocarpa*, Montaña, Guerrero.

Para el incremento en volumen ha⁻¹ año⁻¹ se encontró que árboles de 96 años en conjunto puede alcanzar a incrementar hasta 5.30 m³ ha⁻¹ (considerando que el promedio de árboles ha⁻¹ tuviera la misma edad), con una acumulación máxima en conjunto de árboles de 98 años de edad de hasta 304 m³ de madera por ha⁻¹. Cifras de crecimiento mas bajas de 3 m³ ha⁻¹ año⁻¹ se han reportado en bosques de coníferas por CONAFOR (2019) para especies del estado de Guerrero; sin embargo, *Pinus Pseudostrobus* y *P. montezumae* de Michoacán reportaron un crecimiento de 4.23 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (Cortes et al, 2007).

El turno técnico de categorización de madera de diferentes dimensiones en base al diámetro fue el siguiente: árboles de de 30 cm con un turno técnico a los 38 años, de los cuales se pueden aprovechar los primeros 6 a 9 metros de altura para tablas y el resto para postes; árboles de 40 cm con un turno técnico a los 56 años, ideal para tablas de más calidad, polines y postes en alturas más reducidas;

los árboles de 50 cm pueden aprovecharse a los 80 años (vigas y tablones, así como también tablas, y el resto de productos forestales maderables); en ese sentido el diámetro mínimo comercial puede variar dependiendo el objetivo del aprovechamiento, por ejemplo Villa (2006) encontró para 10 especies de bosques de Colombia diámetros mínimos aprovechables de 20 cm y 30 cm a la edad de 51 años.

Finalmente, los árboles más longevos de 60 cm de diámetro a partir de los 120 años, lo cuales no se recomiendan aprovechar porque podrían tener otra función en el bosque como productores de semillas para favorecer la regeneración, o para provisión de hábitat para fauna silvestre, por ejemplo; conviene también considerar que el tiempo de espera entre el turno técnico anterior (50 cm) y el de 60 cm son 40 años, lo cual para fines prácticos de aprovechamiento forestal no es viable (Figura 23)

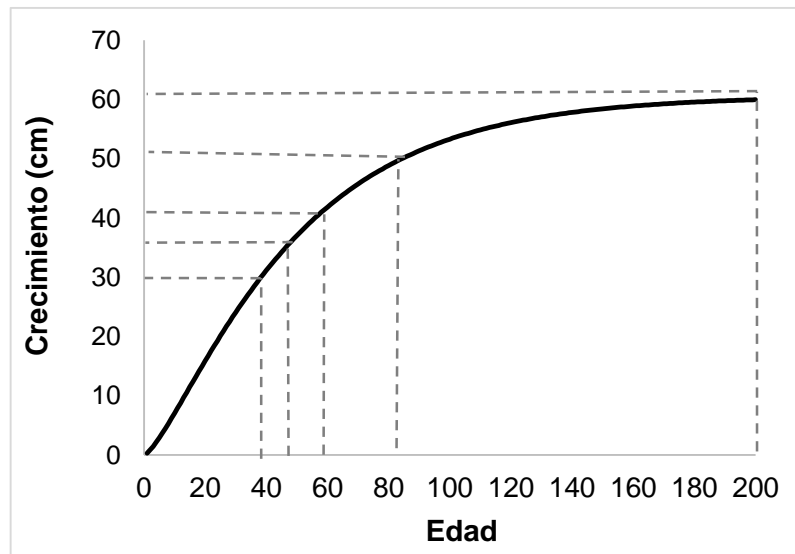


Figura 23. Determinación de turnos técnicos en base al crecimiento en diámetro normal de *Pinus oocarpa*, Montaña de Guerrero.

4.4 CONCLUSIONES

El modelo de Chapman-Richards se ajustó adecuadamente para estimación de incrementos en diámetro y volumen; el de Schumacher para estimación de incrementos en altura y área basal.

Los turnos estimados para *Pinus oocarpa* fueron diferentes dependiendo de las variables dasométricas (19 años en altura, 26 años en diámetro, 76 años en área basal y 96 años en volumen), con lo cual ayudará a la programación de labores silvícolas en el área de estudio. Así mismo, se recomienda verificar rigurosamente el mejor modelo de crecimiento (heterocedasticad, autocorrelación y significancia de los parámetros, sobre todo al trabajar con la variable tiempo), puesto que una mala elección puede encausar a sobreestimaciones en el cálculo de incrementos. Finalmente, con la información generada se pueden planear de mejor forma las intervenciones silvícolas y la cosecha final para el manejo sustentable de *Pinus oocarpa* de la región Montaña de Guerrero.

4.5 REFERENCIAS

Aguilar, G. P., Juárez, W. S., Santiago, D. M., & Barrios, R. O. (2016). Análisis del crecimiento e incremento y estimación de índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. EN SANTIAGO TEXTITLÁN, SOLA DE VEGA, OAXACA. *Foresta Veracruzana*, 18(2), 21-28.

Bieto, J. A., Bou, I. F., Aranda, X., y Casanovas, N. G. (2008). Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático. *In Fundamentos de fisiología Vegetal* (pp. 247-263). McGraw-Hill Interamericana de España.

Canfield D.E (2014), Oxígeno, Una historia de cuatro mil millones de años. Editorial Planeta. Barcelona,. España. 265pp

Carrillo, E. G. (2008). Casos prácticos para muestreo e inventarios forestales. Universidad Autónoma Chapingo. *División de Ciencias Forestales*. México: DiCiFo. 98 pp.

De la Vega J.A. (2007). Calentamiento Global y captura de carbono en bosques. Agro-Proyectos, Mexico. 12 pp. Recuperado de <https://www.gestiopolis.com/calentamiento-global-y-captura-de-carbono/>.

De Lima Abouhamad, S., Ramírez, M. V. R., Ramírez, J. L. M., Céspedes, K. S., & Alpízar, A. L. S. (2017). Servicios ecosistémicos de regulación que benefician a la sociedad y su relación con la restauración ecológica. *Biocenosis*, 31(1-2).

Escobar, C. y Eduardo, C. (2017). Servicio ambiental de secuestro de CO₂ y emisión de O₂ del bosque natural arboretum el Huayo por niveles de dureza de la madera en Puerto Almendra, Loreto-Perú-2015.

Gayoso J, J Guerra, D Alarcón (2002) Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. *Proyecto FONDEF*. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 157 pp.

Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85, 126-133.

González, J. Á., Murias, M. B., Merino, A., & Soalleiro, R. R. (2018). Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster*, Galicia, España. *Recursos Rurais*, (1), 21-30.

Guerrero (2013). Cuantificación de biomasa, carbono y producción de oxígeno en *Pinus cembroides*, en Mapimil, Zacatecas, Mexico. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 42 pp.

IPCC (2010). Intergovernmental panel on climate change. Aspectos del cambio climaticom incluidos su potencial ambiental y sus consecuencias socioeconómicas. 14 pp.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2008. Conjunto de datos vectoriales Unidades Climáticas Escala 1:1 000 000. n/p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2014. Conjunto de datos vectoriales Perfiles de suelos. Escala 1:1 000 000. n/p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2016. Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación. Serie VI. (Capa Unión). Escala 1:250 000. n/p.

López S. J. Á., Méndez G. J., Zermeño G.A., Cerano P. J., y García A. M. A. (2017). Impacto de descortezadores en el incremento radial de *Pinus teocote*

Schiede. ex Schldl. & Cham. y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(41), 82-108.

Marroquín M. P., Méndez G.J., Jiménez P.J., Aguirre C.O., y Yerena Y J. (2018). Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 094-110.

Medina V. J. (2010). La dieta del Dióxido de Carbono (CO₂). Instituto Tecnológico de Aguascalientes *Conciencia tecnológica*, (39). México

Méndez, G.J., Luckie, N.S.L., Capó, A.M.A. y Nájera, L.J.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*. 45(4):479-491.

Murillo B.Y., Domínguez D.M., Martínez Z.P., Lagunes E.L y Aldrete, A. (2017). Índice de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* en el trópico húmedo de México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo, 49(1), 15-31.

Návar, J. J, González, N. y Graciano, J. 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. *Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales*. Valdivia Chile, 12 pp

Pérez-Urria Carril, E. (2009). Fotosíntesis: aspectos básicos. *Reduca (Biología)*, 2(3). 10 pp.

Perry, J., and M.D. LeVan. c. 2003. Air Purification in Closed Environments: Overview of Spacecraft Systems. U.S. Army *Natricks Soldier Center*. 22 pp. Recuperado de <http://nsc.natick.army.mil/jocotas/ColProPapers/Perry-LeVan>

Schelegel B, Gayoso J. y Guerra, J. (2000). Manual de procedimientos, muestreo de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. *Proyecto FONDEF*. Universidad Austral de Chile. 24 p.

Soriano M. D. Ángeles P.G., Martínez T.T., Plascencia E.F., y Razo Z. R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423-438.

Statistical Analysis Software System, (2002). SAS versión 9 For Windows copyright ©2002 SAS Institute Inc. Cary, NC 27813, USA All. Rights Reserved.

White, H. (1980). A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. *Econometrica*. 48 (4): 817–838.

doi: <https://doi.org/10.2307/1912934>

CAPITULO V. CONCLUSIONES GENERALES

En base a la generación de 16 ecuaciones matemáticas resultantes de los diferentes objetivos planteados en cada capítulo de esta investigación, se pudo comprobar que la Montaña de Guerrero tiene alto potencial maderable, producción de biomasa, captura de carbono y generación de oxígeno. Estos bienes y servicios pueden ser potenciados y apoyados financieramente mediante la implementación de programas por pago de servicios ambientales, particularmente.

En conclusión, *Pinus oocarpa* fue la especie de mayor potencial maderable y ambiental en la región Montaña de Guerrero, puesto que fue la de mayor longevidad y mejor ritmo de crecimiento hasta alcanzar el turno absoluto, esto se reflejó en la mayor captura de carbono, mayor producción de oxígeno, mayores existencias reales volumétricas e incrementos en diámetro, altura, área basal y volumen; por lo tanto, se recomienda para programas de servicios ambientales y aprovechamiento sustentable maderable de la Montaña de Guerrero. Lo anterior no significa que *Pinus teocote* y *Q. elliptica* sean descartadas, de igual forma cumplen una función ecológica importante y pueden ser manejadas sustentablemente pues de acuerdo con los resultados se encuentran al mismo nivel y rango de resultados en biomasa y volumen que diversas especies en otras regiones del País.

Desde el punto de vista social, las herramientas matemáticas generadas en este estudio serán de importancia para el manejo comunitario de los bosques por parte de los pobladores locales y todos aquellos interesados en el manejo de los bosques de Guerrero; podrán estimar eficientemente el volumen maderable, almacenes de biomasa, biomasa por componentes e incrementos de los bosques de pino o árboles individuales tanto de *Pinus teocote* o *Pinus oocarpa*, a partir de variables dasométricas de fácil medición como lo es el diámetro normal (cm), la altura total (m), la edad o la densidad básica (gr/cm^3). Así mismo podrán estimar

de forma precisa los almacenes de carbono o bióxido de carbono y la producción de oxígeno que pueden abastecer sus bosques y hacer conciencia de la importancia actual en la mitigación de los gases de efecto invernadero.

Por otra parte, esta investigación realiza un pequeño aporte al vasto mundo que aún queda por conocer del quehacer forestal, particularmente para la región Montaña es uno de los primeros esfuerzos que se están realizando para manejar los bosques naturales inmersos en comunidades con usos y costumbres propios y que en muchas ocasiones la falta de empatía o acercamiento por parte de los investigadores han ocasionado que la brecha no se logre unir de la mejor forma.

Se recomienda finalmente realizar estudios en otras áreas de bosque de la región Montaña, puesto que faltan muchas áreas por estudiar para acrecentar las investigaciones relacionadas al manejo forestal en esta zona. También existen servicios ambientales diferentes al carbono y dióxido de carbono que se pueden cuantificar como el potencial de captación de agua, biodiversidad, entre otros, que son de mucho valor en zonas de conservación o de manejo comunitario de la Montaña de Guerrero.