

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Curvas de Crecimiento e Incremento de Cuatro Pináceas
en el Noreste de México

Por

JOSÉ LUIS ANTONIO ELÍAS RODRÍGUEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Curvas de Crecimiento e Incremento de Cuatro Pináceas
en el Noreste de México

Por

JOSÉ LUIS ANTONIO ELIAS RODRÍGUEZ


TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría


Dr. Celestino Flores López
Asesor Principal


M.C. Héctor Darío González López

Coasesor


M.C. Salvador Valencia Manzo

Coasesor


Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía
Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2015

DEDICATORIAS

A mis padres, José de Jesús Elías Juárez y Ana Bertha Rodríguez Licea, por ser el origen de mis esfuerzos para superarme, ser mi soporte para salir adelante, les comparto este logro que es más suyo que nada con el fin de mostrar lo mucho que los amo, sin ustedes ningún logro es victorioso, esto como un tributo a su dedicación con tal de verme triunfar.

A mis hermanos, Guadalupe Cristabel, Ana Karen, Jesús Alberto, Dalia Graciela, Joselyn Estrella, por sus ánimos y fuente de inspiración a ser ejemplo a seguir, para que vean que todo en esta vida se puede cumplir, que sepan que con decisión y voluntad de salir adelante pueden lograr cualquier meta que se propongan.

A mis abuelos, por sus sabios consejos y su apoyo en todo momento, porque ellos son las raíces más valiosas de mi vida y a ellos les rindo el tributo agradeciendo de corazón estar para mí.

A mis tíos y tías que en todo momento están al pendiente de mi formación profesional para que sientan el orgullo de ayudarme a cumplir con una meta más en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, a quien todo le debo, por darme la vida, por permitirme llegar a cumplir una meta más, por su compañía fiel e incesante de la cual estoy infinitamente agradecido.

A mi Alma Mater, por darme la oportunidad de ser un profesional, ser la fuente de mis conocimientos y porque en sus instalaciones pase inolvidables momentos.

A todos los profesores del Departamento Forestal, especialmente,

Al Dr. Celestino Flores López, Asesor principal, por su gran apoyo en la realización de este trabajo, por su interés en mi formación y superación personal.

Al M.C. Salvador Valencia Manzo, por los consejos sabios y justos sobre la vida que me compartió, además, de ayudarme a realizar este trabajo con toda la paciencia del mundo.

Al M.C. Héctor Darío González López, por su gran amistad y valiosos comentarios en este trabajo.

A mis compañeros de la generación CXIX, porque me ayudaron a mejorar mi formación personal y alimentar el conocimiento dentro y fuera de clases.

A mis amigos; Mayra, Elizabeth, Rocío, Yonathan Piña, Jesús Decéano, Canchola, Isidro, Pedro, Víctor Manolo, Elder, Carlos Eduardo, Adán, Quintero, Cárdenas, Godofredo, Everildo, Librado, Manuel, Hernán, Saúl, Alejandro, Gustavo, Jonathan, Mario, Juan Carlos, Caralampio, Darío, Oliver, Leticia, Eunice, Alejandra, Cecilia, María, Yultzin, Cecilia Ruiz, Gabriela, Diana, Madeny, Erick, Leopoldo y Carmen por esos días de momentos gratos, sus

alientos, sus consejos, su apoyo y su invaluable amistad para que al paso del tiempo se mantenga.

A Fabiola Mondragón Sánchez, por la amistad que me brindó, por su apoyo, sus consejos y regaños, por ser una compañera que me enseñó a valorar las cosas y recordarme la diferencia entre mi persona y las demás.

A Rosa Linda Mondragón Sánchez, por cada uno de los invaluable momentos de estancia dentro y fuera de la Universidad, por sus consejos, cariños y cuidados, por lo que comenzó como una linda amistad para que perdure en el tiempo, por todo el apoyo brindado que contribuyó a mi formación personal, por las alegrías y tristezas, por ser única y especial, por ayudarme a seguir un camino de bien y enfocarme en la vida a través de sus mensajes de aliento, por ser lo más hermoso que me pudo suceder en este mundo y en esta vida, te quiero mucho.

A toda mi familia por estar conmigo en las buenas y en las malas todo el tiempo, a cada momento constantes conmigo para que nada me derrumbara, les debo mil favores, los quiero mucho y espero contar con sus ánimos a través del tiempo.

A todas las personas que contribuyeron y ayudaron al logro de esta meta y que involuntariamente he omitido muchas gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | Página |
|---|--------|
| RESUMEN..... | II |
| ABSTRACT..... | III |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 4 |
| 2 REVISIÓN DE LITERATURA..... | 5 |
| 2.1 Descripción de las especies en estudio, su importancia ecológica y económica..... | 5 |
| 2.1.1 <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> (Mart.) Perry..... | 5 |
| 2.1.2 <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry..... | 6 |
| 2.1.3 <i>Pinus patula</i> Schltl. y Cham..... | 7 |
| 2.1.4 <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco..... | 9 |
| 2.2 Crecimiento de árboles forestales..... | 11 |
| 2.2.1 Anillos de crecimiento de las coníferas..... | 12 |
| 2.2.2 Crecimiento del árbol en altura..... | 13 |
| 2.2.3 Crecimiento del árbol en diámetro..... | 14 |
| 2.2.4 Crecimiento del árbol en volumen..... | 15 |
| 2.2.5 Crecimiento del árbol en área basal..... | 16 |
| 2.3 Métodos en el análisis del crecimiento..... | 17 |
| 2.3.1 Índice de productividad de Paterson C. P. V..... | 17 |
| 2.3.2 Determinación del incremento con base en flora..... | 18 |
| 2.3.3 Tablas de producción..... | 18 |
| 2.3.4 Análisis troncal..... | 19 |
| 2.3.5 Métodos para la determinación del incremento en viruta.. | 20 |
| 2.4 Curvas de crecimiento..... | 22 |
| 2.5 Calidad de sitio..... | 25 |
| 2.6 Índice de sitio..... | 26 |
| 2.7 Modelos de crecimiento..... | 26 |
| 2.8 Trabajos afines..... | 27 |
| 3 MATERIALES Y MÉTODOS..... | 31 |
| 3.1 Descripción del área de estudio..... | 31 |
| 3.2 Muestreo y toma de datos..... | 35 |
| 3.2.1 Variables evaluadas..... | 35 |
| 3.2.2 Obtención de virutas de crecimiento y acondicionamiento de las muestras..... | 37 |
| 3.3 Evaluación de las virutas y cálculo de los Incrementos..... | 37 |
| 3.3.1 Determinación de la edad a la altura del pecho..... | 38 |
| 3.3.2 Cálculo de los incrementos..... | 39 |
| 3.4 Análisis estadístico..... | 39 |
| 3.4.1 Puntos dudosos o aberrantes..... | 39 |
| 3.4.2 Modelos de crecimiento e incremento y ajustes..... | 40 |
| 3.4.3 Selección y comparación de los modelos de crecimiento e incremento..... | 41 |
| 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 42 |
| 4.1 Modelos de crecimiento e incremento en altura y diámetro..... | 42 |
| 4.2 Crecimiento e incremento en altura..... | 43 |
| 4.3 Crecimiento e incremento en diámetro..... | 51 |
| 4.4 Comparación de curvas de crecimiento en altura y diámetro..... | 56 |
| 5 CONCLUSIONES..... | 59 |

| | |
|--------------------------|----|
| 6 RECOMENDACIONES..... | 60 |
| 7 LITERATURA CITADA..... | 61 |
| 8 APÉNDICE..... | 71 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | | Página |
|-----|--|--------|
| 1 | Estudios de crecimiento sobre el género <i>Pinus</i> y <i>Pseudotsuga</i> en México..... | 28 |
| 2 | Estudios sobre evaluación en virutas de crecimiento..... | 30 |
| 3 | Ubicación geográfica de las cuatro especies en estudio..... | 32 |
| 4 | Los diferentes climas de las cuatro especies en estudio por localidad para la región noreste de México..... | 33 |
| 5 | Aspectos hidrológicos de las cuatro especies..... | 33 |
| 6 | Geología de acuerdo a la ubicación de los puntos de muestreo para las especies estudiadas..... | 34 |
| 7 | Tipo de suelo para las especies en estudio según su ubicación..... | 36 |
| 8 | Árboles muestreados y taladrados por especie..... | 38 |
| 9 | Edad (años) promedio a 1.30 m en la localidad de <i>las especies en estudio</i> | 38 |
| 10 | Modelos de crecimiento utilizados para el ajuste en altura y diámetro de las cuatro especies, para el noreste de México..... | 40 |
| 11. | Modelos de incremento utilizados para las variables de altura y diámetro en las cuatro especies..... | 41 |
| 12 | Modelos ajustados en diámetro para las cuatro especies en estudio y sus respectivos valores estadísticos..... | 44 |
| 13 | Modelos ajustados en altura para las cuatro especies en estudio y sus respectivos estadísticos..... | 44 |
| 14 | Estudios con modelos de mejor ajuste en altura..... | 45 |
| 15 | Estudios con modelos de mejor ajuste en diámetro..... | 46 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| 1 Localización de las cuatro especies de pino en estudio en el noreste de México..... | 31 |
| 2 Diagrama de dispersión de datos de las cuatro especies, con la línea de ajuste del mejor modelo y curvas de ICA e IMA en relación a la variable altura..... | 48 |
| 3 Diagrama de dispersión de datos de las especies en estudio, con la línea de ajuste del mejor modelo y curvas de ICA e IMA en relación a la variable diámetro..... | 52 |
| 4 Curvas de crecimiento en relación a la variable de diámetro (a) y altura (b) de las cuatro especies..... | 57 |

ÍNDICE DE APÉNDICE

| | | Página |
|----|---|--------|
| 1 | Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable altura en <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart..... | 71 |
| 2 | Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable diámetro en <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart..... | 71 |
| 3 | Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable altura en <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry..... | 72 |
| 4 | Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable diámetro en <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry..... | 72 |
| 5 | Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable altura en <i>Pinus patula</i> Schltl. & Cham..... | 73 |
| 6 | Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable diámetro en <i>Pinus patula</i> Schltl. & Cham..... | 73 |
| 7 | Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable en altura en <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco..... | 74 |
| 8 | Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable en diámetro en <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco..... | 74 |
| 9 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable altura de <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart..... | 75 |
| 10 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable altura de <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart..... | 75 |
| 11 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable altura de <i>Pinus estevezii</i> (Mart) Perry..... | 76 |
| 12 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable altura de <i>Pinus estevezii</i> (Mart) Perry..... | 76 |
| 13 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable altura de <i>Pinus patula</i> Schltl & Cham..... | 77 |
| 14 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable altura de <i>Pinus patula</i> Schltl & Cham..... | 77 |
| 15 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable altura de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco..... | 78 |
| 16 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable altura de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco..... | 78 |

| | | |
|----|--|----|
| 17 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable diámetro normal de <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart..... | 79 |
| 18 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable diámetro normal de <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart..... | 79 |
| 19 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable diámetro normal de <i>Pinus estevezii</i> (Mart) Perry..... | 80 |
| 20 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable diámetro normal de <i>Pinus estevezii</i> (Mart) Perry..... | 80 |
| 21 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable diámetro normal de <i>Pinus patula</i> Schltdl & Cham..... | 81 |
| 22 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable diámetro normal de <i>Pinus patula</i> Schltdl & Cham..... | 81 |
| 23 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable diámetro normal de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco..... | 82 |
| 24 | Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable diámetro normal de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco..... | 82 |
| 25 | Modelos de incremento seleccionados por especie y variable en estudio..... | 83 |

RESUMEN

El presente estudio se realizó en la región noreste de México, para analizar el crecimiento e incremento de altura y diámetro con datos obtenidos de virutas de incremento para las especies de *Pinus estevezii*, *P. arizonica* var. *stormiae*, *P. patula* y *Pseudotsuga menziesii*. Los modelos que mejor ajuste presentaron en crecimiento fueron los de Chapman-Richards, Schumacher y Hossfeld IV para la relación edad-altura y edad-diámetro. Los modelos de Bertalanffy y Vanclay fueron los mejores para el Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA). Los resultados mostraron que las curvas típicas de incremento corriente anual e incremento medio anual sólo se generan cuando la curva de crecimiento es sigmoideal.

Palabras clave: Crecimiento, Virutas, Modelos, ICA, IMA.

Correo Electronico; Jose Luis Antonio Elias Rodriguez, erodant@gmail.com

ABSTRACT

This study was performed in the Northeast region of Mexico, to analyze growth and increment for diameter and height with data obtained from increment cores of the species of *Pinus estevezii*, *P. arizonica* var. *stormiae*, *P. patula* and *Pseudotsuga menziesii*. The best fitting models in growing were Chapman-Richards, Schumacher and Hossfeld IV to the relation age-height and age-diameter. Bertalanffy and Vanclay models were the best in the Current Annual Increment (CAI) and Medium Annual Increment (MAI). The results showed that the typical curves of current annual increment and medium annual increment only generated when the growth curve is sigmoidal.

Keywords: Growth, Increment, Cores, Models, CAI, MAI.

1 INTRODUCCIÓN

En México las coníferas están presentes en diversos tipos de vegetación, de acuerdo con Rzedowski (1978) se encuentran en el bosque de pino, matorral de pino, bosque de *Abies*, bosque de *Pseudotsuga* y *Picea*, bosque o matorral de *Juniperus* y bosque de *Cupressus*. Para el grupo de las gimnospermas se registra un total de 71 especies en el territorio nacional, con uno de los grupos más diversos, el de los pinos, con 48 especies, de las cuales 50% de ellas son endémicas. Este número representa 48% del total de especies de *Pinus* conocidas en el mundo (Styles, 1993), lo que coloca a México en el primer lugar mundial en cuanto a riqueza de especies de pino. Además al contar con la mitad de especies de *Pinus* en el mundo con cerca de 42% y un alto porcentaje de endemismos (más del 55%) concentrados en islas biogeográficas (Price *et al.*, 1998 y Perry, 1991), se convierte en el segundo centro de diversidad de este género, debido a que en él existen 46 especies de pinos del total de especies conocidas en todo el mundo sin tomar en cuenta las subespecies y variedades (Sánchez, 2008).

Estas especies de pinos pueden ser encontradas con una distribución en México y Centro América entre los 12° y 32° de latitud Norte. Esta distribución se debe a la migración de éstos desde Canadá y Estados Unidos hacia el sur de México y Centro América a través de dos grandes cordilleras montañosas, la Sierra Madre Occidental en el Oeste y la Sierra Madre Oriental en el Este (Perry, 1991). Con excepción de Yucatán, existen bosques de pinos en todas las entidades federativas de México (Rzedowski, 1978). Ahora bien, los pinos en México están distribuidos principalmente a lo largo de la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Eje Neo volcánico, Sierra Madre del Sur, Macizo de Oaxaca, Sierra Madre de Chiapas y las Sierras de Juárez y San Pedro Mártir en Baja California Norte (Eguiluz, 1982).

El presente estudio tiene lugar en una pequeña parte de la Sierra Madre Oriental ya que ésta inicia en la parte central de Nuevo León y corre hacia el sur-sureste, hasta el centro de Puebla y de Veracruz, donde se une con el Eje Neovolcánico (Rzedowski, 1978). Como la región objeto de este estudio está en el noreste del país, es importante hacer notar que la Sierra Madre Oriental incluye gran parte de los estados de Nuevo León y Coahuila presentándose las condiciones ecológicas adecuadas para que se presente una mayor diversidad

del género *Pinus*; con respecto al estado de Tamaulipas éste ofrece otro tipo de condiciones ecológicas y altitudes menores de tal forma que la diversidad del género es mucho menor (Favela, 1999).

Según los antecedentes bibliográficos para el noreste de México se han reportado alrededor de 32 especies de pinos, siendo Nuevo León, el estado a nivel nacional que alberga la mayor diversidad de este género con 26 especies, Coahuila con 22 y Tamaulipas con 9, (Eguiluz, 1978). Nuevo León, contiene las especies de *Pinus ayacahuite* var. *brachyptera* Shaw, *P. nelsonii* Shaw, *P. teocote* Schl. et Cham., *P. teocote* forma *macrocarpa*, *P. arizonica* var. *stormiae* Mart., *P. culminicula* Andresen et Beaman, *P. remota* (Little) Bailey et Hawksworth, *P. pinceana* Gord., *P. cembroides* Zucc., *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* Mart., *P. pseudostrobus* var. *estevezii* (Mart.) Perry, *P. hartwegii* Lindley, *P. greggii* Engelm., *P. strobiformis* Sudw., *P. patula* Schltdl. et Cham., *P. johannis* M-F Robert, *P. montezumae* Lamb., las cuales son de las especies más importantes y están registradas para el estado (Hinton y Hinton, 1995).

Dentro del número de especies mencionado anteriormente, existe una clasificación donde algunos taxónomos, botánicos y forestales están en acuerdo general, sobre la clasificación de una mayor división del género *Pinus* dentro de dos subgéneros: Haploxilon; también conocido como pinos suaves o pinos blancos y; Diploxilon; también conocido como pinos duros o pinos amarillos (Perry, 1991).

Los pinos de nuestro interés están clasificados en el subgénero Diploxilon o pinos duros; dentro de la sección ponderosae, *Pinus arizonica* var. *stormiae* Mart; en la sección pseudostrobus, subsección oaxacana el *Pinus estevezii* (Mart.) Perry; en la sección serotinae, subsección patula el *Pinus patula* Schltdl. et Cham, según la clasificación de pinos de México y Centro América (Perry, 1991).

Los pinos en estudio como la especie de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *Pinus patula*, son consideradas como especies prioritarias para fines de conservación, reforestación y restauración características del bosque de coníferas, tomando en cuenta que son especies con un alto valor ecológico, social y económico para México (SEMARNAT, 2010; CONABIO, 2011).

Pinus arizonica var. *stormiae*, y *P. estevezii*, no cuentan con suficiente información sobre su ecología y manejo. Aunque son especies que también

han sido aprovechadas de forma doméstica y comercial por su madera (Perry, 1991).

Para México los pinos representan una gran importancia ecológica, económica y social. Éstos a menudo son el componente dominante de la vegetación en el medio, influyen en los procesos funcionales del ecosistema tales como, los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos, los regímenes de fuego, además son hábitat y fuente de alimento para la fauna silvestre. También ofrecen importantes servicios ambientales como captación de agua, producción de oxígeno, recreación, secuestro de carbono, belleza escénica e influyen en el clima regional donde se encuentran (García y González, 2003; Ramírez *et al.*, 2005).

Para entender un poco más sobre el estudio es importante mencionar que los árboles del género *Pinus* son de importancia ecológica como miembros primordiales de los bosques templados, además, de tener importancia económica siendo una fuente de extracción de madera y resinas, ya que desde los primeros tiempos, los humanos han usado los productos de los bosques de pino como alimento, remedios medicinales, material para construcción y combustible (Styles, 1993). Además, en México los pinares fueron el pilar más fuerte de la industria forestal del país, ya que aproximadamente un 60% de las especies de pinos mexicanos tienen importancia comercial, y más del 80% del total de productos forestales del país son obtenidos de los pinos (Eguiluz, 1977).

En cuestión de aprovechamiento de pinos, en muchas regiones del mundo, se acepta que el manejo forestal constituye un gran apoyo para la conservación de los diversos ecosistemas forestales y también para mejorar la productividad económica de los bosques (Gadow *et al.*, 2004).

La estimación del crecimiento es una etapa esencial en el manejo forestal, ya que es importante para cualquier planificación con el recurso natural.

Conocer el crecimiento e incremento de las especies forestales coadyuva a la identificación e instrumentación de estrategias productivas para cubrir la necesidad de productos maderables en el país. Además, realizar este tipo de análisis permite complementar las técnicas de aprovechamiento existentes, permite conocer las estimaciones objetivas que el manejo forestal

requiere. Dicha información es clave para el manejo sustentable de los recursos maderables, ya que el aprovechamiento debe ser racional y no deber ir más allá del crecimiento que presentan los bosques (Prodan, 1993; Corral y Návar, 2005). Por lo tanto, los estudios de crecimiento e incremento de árboles y rodales representan una etapa de suma importancia en el manejo forestal (González, 2000).

El presente trabajo, está encaminado a obtener un análisis del crecimiento e incremento de árboles de *Pinus arizonica* var. *stormiae*, *P. estevezii*, *P. patula* y *Pseudotsuga menziesii*, mediante la comparación de curvas de crecimiento a partir de la evaluación de virutas.

1.1 Objetivos

Objetivo general

Analizar el crecimiento e incremento en altura y diámetro para *Pinus arizonica* var. *stormiae*, *Pinus estevezii*, *Pinus patula* y *Pseudotsuga menziesii* de la región noreste de México.

Objetivos específicos

- Seleccionar el modelo de mejor ajuste para el crecimiento y para el incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en altura y diámetro de *Pinus arizonica* var. *stormiae*, *Pinus estevezii*, *Pinus patula* y *Pseudotsuga menziesii*.
- Analizar las curvas de crecimiento y las del incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) entre especies a partir de la evaluación de virutas de incremento.

Hipótesis

Ho: Las curvas de crecimiento de cada una de las cuatro especies en altura y diámetro no se ajustan a una curva del tipo sigmoideal con el uso de ecuaciones no lineales.

Ha: Las curvas de crecimiento de cada una de las cuatro especies en altura y diámetro se ajustan a una curva del tipo sigmoideal con el uso de ecuaciones no lineales.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Descripción de las especies en estudio, su importancia ecológica y económica

La descripción morfológica de las especies, su importancia ecológica y económica en estudio, están basadas principalmente por las descripciones de Rzedowski (1978), Perry (1991), Farjon, Pérez de la Rosa y Styles (1997) y en el caso del *Pseudotsuga* en la de Domínguez (1986), Reyes *et al.* (2005) y Mápula *et al.* (2008).

2.1.1 *Pinus arizonica* var. *stormiae* (Mart.) Perry

Es un árbol mediano de 10 a 20 m de altura; las ramas bajas son largas, horizontales e inclinadas tendientes a extenderse casi hasta la tierra. La copa es a menudo densa y redondeada, abierta en forma piramidal, en árboles maduros. En árboles jóvenes la corteza es rasposa y escamosa pero sin placas como en los árboles viejos.

Las ramillas son gruesas, duras, resistentes, escamosas; café rojizo; la base de las brácteas de las hojas son decurrentes. Las hojas se presentan en fascículos de 3 pero también 4 y 5; de 20 a 30 cm de largo, son gruesas, resistentes, con los márgenes finamente aserrados.

El cono es alargado, ovoide, recto a ligeramente reflexo, de ligeramente curvado a simétrico; café oscuro; de 7 a 10 cm de largo, brotan en grupos de 2 a 4, ocasionalmente 5, sobre pedúnculos resistentes, cortos de (6 a 10 mm). Su maduración es en noviembre-diciembre y las semillas son liberadas rápidamente; sin embargo, los conos permanecen unidos a las ramas por muchos meses.

La semilla mide alrededor de 6 - 7 mm de largo, café, con ala articulada de 20 - 22 mm de longitud y cerca de 8 - 10 mm de ancho. Las semillas son casi del mismo tamaño que la semilla de *Pinus arizonica*.

La variedad *stormiae* se distribuye en los estados de Coahuila en Sierra de los Patos, General Cepeda, en Nuevo León, en la esquina suroeste de Tamaulipas cerca del asentamiento de Miquihuana y en pequeñas poblaciones apartadas en San Luis Potosí, esta variedad crece en laderas secas del este y sureste y en las mesetas de la Sierra Madre Oriental a elevaciones de 1900 a

3000 msnm. En precipitaciones de 400 a 500 mm, a 3000 msnm la precipitación se incrementa hasta 500 - 700 mm (Perry, 1991; Instituto de Biología, 2011).

Estos pinos crecen en rodales abiertos y puros; sin embargo, la mayoría de los bosques han sido fragmentados en el tiempo y los árboles restantes son encontrados como individuales o pequeños grupos dispersos (Martínez, 1948; Perry, 1991).

Pinus arizonica var. *stormiae*, forma parte del bosque mediano subperennifolio, asociado con *P. arizonica*, *P. greggii* Engelm., *P. montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* Lindl., *P. teocote* Schltdl. & Cham., *Pseudotsuga flahautii* Flous., *Cupressus arizonica* Greene., *Juniperus monosperma* (Engelm.) Sarg. y *Quercus* sp. A si también sé le puede encontrar en sitios similares al de la variedad *arizonica*, pero generalmente en lugares más secos. Se encuentra formando rodales puros, y cuando no, se encuentra mezclado con *Quercus* sp., *Juniperus* y *Pinus* como *P. cembroides* Zucc. y *P. pseudostrobus* Lindl. (Capó, 1972a; Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

Pinus arizonica var. *stormiae* se localiza en suelos yesosos cerca de Galeana, N. L., y en la Sierra La Marta (Capó, 1972b).

La madera es destinada principalmente al aserrío, en menor grado a pulpa para papel, durmientes, cajas de empaque y postes para cercas; frecuentemente es usado en implementos domésticos regionales. También como leña y para vigas o postes en la construcción (Perry, 1991).

La especie está catalogada en todo caso dentro del umbral de vulnerable y hay tendencia a la disminución debido a la tala, según la clasificación de la Lista Roja (Red List) de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza por sus siglas en Ingles (IUCN) (Farjon, 2013a).

2.1.2 *Pinus estevezii* (Mart.) Perry

Es un árbol de tamaño mediano de 15 - 20 m de altura con un diámetro normal de 75 a 100 cm; la copa es densa y redondeada con las ramas bajas y horizontales. Los árboles jóvenes tienen apariencia arbustiva densa, ligeramente piramidal.

Tiene ramillas café grisáceo, lisas; hojas en fascículos de 5 color verde claro, de 20 a 30 cm de largo, alrededor de 1 mm de grosor, resistentes,

márgenes finamente aserrados; estoma en el envés y superficies ventrales; vaina del fascículo de aproximadamente 20 mm de largo, persistente de color café claro.

Los conos son de color café amarillento a café; de 10 - 13 cm de largo y de 7 - 8 cm de ancho cuando abre; ovoide alargado o conoide, asimétrico, a menudo reflexo, abriendo en la madurez, generalmente en el periodo de diciembre-enero; nace en pedicelos cortos de 1 cm de que permanecen unidos a la ramilla con un poco de brácteas basales del cono cuando éste cae. Las semillas son de color café oscuro, de 6 - 7 mm de largo con ala articulada, color café, de alrededor de 25 mm de largo y 7 - 9 mm de ancho.

Esta especie de pino por su apariencia se asemeja al *Pinus pseudostrobus* Lindl. y al *Pinus montezumae* Lamb. (Martínez, 1948). La diferencia típica con respecto al *P. pseudostrobus* y *P. montezumae* radica en sus semillas ásperas, su hipodermo más grueso e irregular y paredes externas del endodermo que son levemente engrosadas, por su cono que es largamente ovoide y acuminado, fuerte, oblicuo y asimétrico, con escamas muy duras, apófisis levantadas y provistas de una espinita persistente. Guarda una estrecha relación con el *P. montezumae* por sus hojas fuertes con hipodermo grueso y penetrante (Martínez, 1948).

Este taxón tiene un rango de distribución limitado siendo encontrado en el noreste de México solo en los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Crece en altitudes que van desde los 800 a los 1800 msnm en laderas bajas, secas, rocosas, al pie de montaña asociado con *P. cembroides* y *P. arizonica* var. *stormiae*, con precipitaciones de 300 - 400 mm anualmente que se presenta de junio a septiembre durante los meses más helados y secos de invierno en noviembre, diciembre y enero (Perry, 1991).

La madera parece ser de dureza media y sin resina, y el duramen de color marrón pálido (Perry, 1991).

Esta especie se encuentra catalogada como una especie de menor preocupación en la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 2015).

2.1.3 *Pinus patula* Schltdl. y Cham.

Árbol muy bien conformado que tiene alturas de 30 - 35 m y diámetros de hasta 120 cm, ocasionalmente se puede encontrar árboles de 40 m y diámetro de 1 m, pero esto es muy raro. El fuste es usualmente recto y limpio con ramas cerca de los 20 m. Las ramas están horizontales a algo inclinadas, formando una copa abierta y redondeada.

Las ramillas son delgadas, a menudo un poco inclinadas, la corteza escamosa de color rojo amarillento. Las hojas están en fascículos de 3, ocasionalmente 4, raramente 5; delgadas, de 15 a 25 cm de largo, colgantes, de color verde pálido a verde amarillento, los márgenes finamente aserrados; vainas del fascículo pálidas, café cenizo, de 10 - 15 mm de largo y persistentes.

Los conos son duros, resistentes, seróticos; de cónicos a cónico alargado, generalmente un poco curvados y reflexos; de 7 - 10 cm de largo, son sésiles y extremadamente tenaces con un color café o café amarillento brillante.

Los conos alcanzan la madurez en los meses de invierno (noviembre-febrero) pueden permanecer cerrados por años, no es muy inusual encontrar grupos de conos de 4, 5, 6 u 8 profundamente incrustados en las ramas o el fuste.

Las semillas son café oscuras a casi negras, muy pequeñas, de aproximadamente 5 mm de largo, con ala de color café pálido de aproximadamente 17 mm de largo, ésta última es ligeramente engrosada en la base donde se une con la semilla.

P. patula se distribuye en manchones alejados y en franjas relativamente estrechas a lo largo de la escarpadura del Este de la Sierra Madre Oriental alrededor de 24° de latitud Norte hasta el estado de Oaxaca. La especie ha sido reportada en el estado de Nuevo León, Tamaulipas, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Oaxaca, el Distrito Federal y Tlaxcala. Crece en altitudes desde los 1500 - 3100 msnm y lleva a cabo su mejor crecimiento en sitios bien drenados con precipitaciones de 2000 - 1500 mm anualmente (Perry, 1991).

P. patula se presenta a menudo en rodales puros, pero a veces se acompaña de otras especies, principalmente de *P. pseudostrobus*, especie que también tiene afinidades, aunque más moderadas, por climas o microclimas húmedos de altura (Rzedowski, 1978).

Generalmente ocupa sitios que reciben entre 1000 y 2000 mm de precipitación anual con distintas temporadas secas de hasta 4 meses. Las tasas de crecimiento de los árboles de *P. patula* en bosques naturales podrían ser hasta de 8 m³ por hectárea por año en los mejores sitios (Dvorak *et al.* 1995). Esta especie tiene hábitos de colonizadora, con exigencia de luz para su desarrollo inicial, es decir, es una especie intolerante que se presenta en espacios abiertos y con una alta densidad poblacional (Patiño y Kageyama, 1991).

Es una de las especies de pinos subtropicales nativos de México con mayor velocidad de crecimiento e importancia económica en diferentes regiones del país (Vargas *et al.*, 2004). La especie ha sido plantada en una amplia gama de suelos, creciendo en forma adecuada aun en suelos infértiles, aunque presenta mejores respuestas en suelos profundos fértiles. En sitios adecuados, la productividad de la especie alcanza 35 m³ por hectárea por año; en la mayoría de las localidades donde la especie se viene plantando, la productividad oscila entre 10 y 20 m³ por hectárea por año (Vela, 1980; Patiño y Kageyama, 1991).

La especie ha sido probada en ensayos y plantaciones piloto como una especie exótica en más de 20 países (Wormald, 1975), es ahora una de las principales especies de las plantaciones en el sur de África y las montañas de la parte norte de América del Sur (Birks y Barnes, 1991).

Es una de la especies de pino más importantes a nivel mundial debido a su tasa de crecimiento excepcionalmente rápida, y por sus características favorables de la madera para productos de celulosa (Dvorak *et al.*, 2000).

Su madera se utiliza para la producción de postes, tablas, cajas para fruta, vigas, madera de contrachapa, marcos para barcos, contenedores para productos de exportación, mueblería, para fabricación de celulosa, triplay, durmientes y como leña (Patiño y Kageyama, 1991).

P. patula se encuentra catalogada como una especie de menor preocupación en la lista roja (Red List) de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza o por sus siglas en inglés (Farjon, 2013b).

2.1.4 *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Es un árbol de porte grande con alturas entre 12 a 20 m, y hasta 40 m, con diámetro normal de 35 a 70 cm, y hasta 3 m. la copa es compacta de forma piramidal en árboles viejos, en arbolado joven es cónica. Las ramas están dispuestas irregularmente o en forma subverticilada, extendida y algo levantadas.

Las hojas son delgadas, las inferiores subdísticas (casi dispuestas en dos filas), y las superiores están orientadas en todas direcciones, son rectas o levemente falcadas (curvadas), lineares, por lo general de 15 a 25 mm de largo por 1.25 a 1.40 mm de ancho, de color verde claro, a veces algo amarillento y glauco en la cara inferior.

Las acículas (hojas) son persistentes y permanecen en el árbol de 5 a 8 años. Los conos son de color rojo anaranjado arreglados en conitos axilares, cilíndricos oblongos, caedizos, de aproximadamente 10 mm de largo y protegidos con brácteas traslucidas de color castaño. Los conos femeninos están colocados en conillos terminales o axilares de color verde-rojizo y protegidos por escamas provistas de grandes brácteas; en la base de cada escama hay dos óvulos.

El cono es oval o largamente ovoide de 5.5 a 7 cm de largo, pocas veces alcanza los 8 cm, de 3.5 a 4 cm de diámetro, con 25 a 30 escamas fértiles.

Las semillas son vagamente ovoides o subtriangulares, de 5 a 7 mm de largo por 3.6 mm de ancho, aplanadas en una cara y convexas en la otra, donde queda envuelta por la base de la ala; el ala mide aproximadamente 15 mm de largo (Reyes *et al.*, 2005; Mápula *et al.*, 2008).

En México el *Pseudotsuga menziesii* se encuentra creciendo en pequeños manchones, mezclada con especies de *Pinus*, *Abies* y *Quercus*, en lugares sombríos y húmedos, en laderas de cañadas y barrancas. Forma bosques entre altitudes de 1500 a 3600 msnm (Rzedowski, 1978) prefiere climas templados y fríos. Se adapta a una gran variedad de suelos, aunque prefiere aquellos que tienen altos contenidos de nitrógeno y buena porosidad.

En el territorio mexicano las poblaciones de esta especie se encuentran fragmentadas, encontrándose rodales o manchones aislados la mayoría de las veces mezclados y dominados por otras especies (Del Castillo *et al.*, 2004; Domínguez *et al.*, 2004; Reyes *et al.*, 2005). La distribución natural de *P.*

menziesii en nuestro país incluye las porción norte de la Sierra Madre Occidental, en los estados de Chihuahua, Sonora, Durango y Zacatecas, donde ocupa la mayor extensión de su área de distribución natural, y en la Sierra Madre Oriental, en los estados de Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas (Domínguez, 1986).

Pseudotsuga menziesii juega un papel importante en los ecosistemas donde se desarrolla, ya que es un elemento botánico relevante dentro de la mezcla de los bosques del Oeste norteamericano (Domínguez, 1986). Se encuentra creciendo en sitios donde los suelos son Regozol, Feozem, Leptosol y Cambisol de acuerdo a la clasificación de la FAO encontrándose en suelos desde someros a profundos principalmente en suelos pedregosos (Domínguez, 1986; Nájera, 1990).

La madera de esta especie es dura y de textura fina, con una gran resistencia mecánica pero fácil de trabajar y una vez aserrada muestra un grano muy apreciable. La madera también es utilizada para construcciones locales, pero no existe una producción comercial abundante. A mediados de los 80's la semilla de esta especie comenzó a tener demanda para el establecimiento de plantaciones de árboles de navidad en el centro del país (Domínguez, 1986).

Esta especie según la NOM-059-SEMARNAT-2010, está sujeta a protección especial (Pr) categorizada por medio del método de evaluación de riesgo (MER). Es considerada una de las especies de lento crecimiento y de las más longevas en México, llega a vivir hasta 600 años (Villanueva *et al.*, 2010). Además, está catalogada como una especie de menor preocupación en la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 2015).

2.2 Crecimiento de árboles forestales

Para saber cómo crece un árbol primero debemos saber que es crecimiento, éste, se refiere al aumento en las dimensiones de uno o más organismos e individuos en el rodal durante un período determinado de tiempo (Klepac, 1976; Vanclay, 1994; Prodan *et al.*, 1997; Avery y Burkhart, 2002). Por otro lado, también se define como crecimiento al fenómeno de desarrollo que experimenta un árbol o rodal a lo largo de toda su vida, es decir, es el aumento

en las dimensiones de la planta de manera cuantitativa susceptible de medirse, expresándolo como un aumento de la longitud o del diámetro y por lo tanto un aumento de peso (Corral, 2004).

Cabe señalar que el crecimiento del árbol depende de la capacidad genética de una especie y la interacción con el ambiente. Y que el crecimiento de un árbol y de un rodal en cualquiera de sus dimensiones debe expresarse en base a un periodo de tiempo. Sin embargo, el crecimiento de un árbol o de un rodal está representado por su desarrollo en altura, diámetro y del desarrollo en volumen (Husch *et al.*, 1982). A medida que un árbol crece, sus dimensiones aumentan. A éste crecimiento del árbol en un periodo determinado se llama incremento (Klepac, 1976).

Se pueden distinguir tres tipos de crecimiento en volumen de los árboles: incremento corriente anual, incremento periódico anual e incremento medio anual. El incremento corriente anual (ICA) es el crecimiento en volumen durante cierto año, en cualquier etapa de la vida del árbol. El incremento periódico anual (IPA) es el incremento medio anual durante un periodo definitivo. El incremento medio anual (IMA) es el incremento anual durante la edad del árbol (Rivas, 2006).

El crecimiento e incremento de los árboles individuales está influenciado por sus características genéticas y su interrelación con el ambiente, factores climáticos, suelo y de características topográficas. La conformación general de la copa de cada árbol depende de la especie, su variedad, edad, composición, densidad y calidad de la localidad en la cual está creciendo, pero presenta mejor forma en árboles que se encuentran creciendo en localidades abiertas donde la copa no ha sido modificada por la competencia o daño (Hocker, 1984).

2.2.1 Anillos de crecimiento de las coníferas

En las coníferas, las células del cambium se dividen para producir traqueidas, que están presentes en la madera de primavera, tienen diámetros apreciables y paredes delgadas, la temporada de crecimiento sufre una transición, pues cesa la producción de traqueidas de la madera de primavera para la formación de traqueidas de madera de otoño, las que son de modo

característico, más lignificadas, de paredes más gruesas y de menor lumen, éstas a su vez forman anillos concéntricos (Daniel *et al.*, 1982).

Dichos anillos de crecimiento resultan de la sobreposición sucesiva de las capas de tejidos leñosos en el tronco del árbol, en razón de la actividad periódica del cambium. Así, la actividad del cambium se va acumulando con los años en capas sobrepuestas que van a originar la formación de los anillos de crecimiento (Imaña y Encinas, 2008).

En las coníferas se pueden presentar anillos falsos, los que no necesariamente se extienden alrededor del tronco en su totalidad y se presentan con mayor frecuencia en las porciones superiores del tronco. Estos anillos se presentan como resultado de condiciones hormonales adversas a las condiciones hídricas o de carbohidratos que afectan sólo una porción del tronco (Daniel *et al.*, 1982).

El incremento anual puede dar lugar a un anillo múltiple en el que se forman varios anillos de crecimiento cada año cuando se presentan largos periodos de sequía y cuando la humedad del suelo llega a ser insuficiente para soportar el crecimiento del árbol y, por consiguiente, el anillo anual se pierde en dicho año (Morey, 1977).

La formación de anillos anuales está afectada indirectamente por un conjunto de factores ambientales que impiden o alteran el crecimiento de la copa del árbol. Algunos elementos ambientales que afectan dicha formación son la intensidad de la luz, la temperatura y la defoliación por insectos o granizo. En algunas regiones áridas donde la sequía es intensa la cantidad de humedad del suelo puede limitar el crecimiento de los brotes y dar lugar a un anillo anual muy fino o incluso nulo (Morey, 1977).

Los anillos anuales tienden a ser más anchos durante la edad temprana de un árbol; según incrementa la edad, el ancho del anillo generalmente comienza a reducirse, resultando en disminución del crecimiento anual en diámetro. Además el ancho de cada anillo normalmente se reduce cuando el árbol se hace viejo (Avery y Burkhart, 2002).

En las zonas de clima templado las capas del incremento anual se aprecian claramente como anillos de crecimiento. Estas capas sirven para la estimación del crecimiento e incremento del árbol, debido a que es posible por

medio de ellas saber qué tan grande era el árbol, cuál era su diámetro, y cuál era su volumen en un determinado año de su vida (Klepac, 1976).

Muchas especies de árboles que se encuentran en zonas templadas del norte crecen en diámetro mediante la adición de una sola y distintiva capa de madera cada año. La formación de esta capa comienza al principio de la temporada de crecimiento y continúa así a través de él (Avery y Burkhart, 2002).

2.2.2 Crecimiento del árbol en altura

El incremento en altura se manifiesta en la primavera. Generalmente comienza con una gran intensidad, que dura de 2 a 3 semanas, posteriormente decrece gradualmente y en algunas especies se interrumpe mientras que en otras se presenta sin esa interrupción hasta septiembre u octubre (Klepac, 1976).

La duración del aumento en altura puede ser menor debido a un verano seco y frío, pero puede alargarse con un verano húmedo y caluroso, lo que hace posible la formación de brotes, los cuales en algunas especies pueden ser mayores que los brotes de primavera (Klepac, 1976).

El aumento en altura, característicamente es una curva de crecimiento acumulado sobre la edad para los árboles que muestra un periodo juvenil menor a una década, un largo periodo de madurez cuando la tendencia es casi lineal y se estabiliza a una edad madura (Husch *et al.*, 1982).

2.2.3 Crecimiento del árbol en diámetro

El crecimiento en diámetro es el resultante de las actividades del cambium vascular que implica la división pericial (división en plano tangencial) de las células del cambium dando origen a una fila de elementos alineados radialmente del xilema y floema. Aquellas células del cambium vascular que se hallan en división constituyen la zona del cambium, desde ésta, los elementos del xilema se diferencian hacia adentro de manera regular durante el proceso de desarrollo creciendo en superficie, engrosando la pared y lignificándose (Morey, 1977).

El incremento anual en diámetro depende de la cantidad de reservas materiales acumuladas por el árbol durante el año, pero depende más del

ambiente que el crecimiento e incremento en altura; dentro de ciertos límites el incremento en diámetro es mayor cuando hay más espacio, lo mismo sucede con la luz, esto se manifiesta en los anillos de crecimiento que bajo condiciones normales su crecimiento es pequeño al principio, después aumenta hasta alcanzar una fase de alta actividad y disminuye gradualmente hasta llegar a ser muy reducidos en árboles viejos (Klepac, 1976).

El crecimiento en diámetro se ve afectado en forma uniforme por las altas densidades de vegetación presentes en el sitio, mientras que en densidades bajas o con amplios espacios ocurre un mejor crecimiento que se prolonga hasta el final de su vida, de un árbol o de rodales de edad uniforme (Clutter *et al.*, 1983).

El crecimiento radial anual comienza en la primera parte de la primavera y no termina hasta la última parte del verano o primera del otoño, aunque puede variar el grado de crecimiento durante este período. El crecimiento radial se puede atribuir al incremento en la masa celular alrededor del meristemo lateral del cambium, el cual produce cada año las células xilemáticas hacia el interior del tallo y las floemáticas hacia el exterior (Hocker, 1984).

El incremento anual en diámetro del árbol se manifiesta en los anillos de crecimiento, aunque no es igual su anchura a lo largo de todo el fuste. Los anillos de crecimiento son más anchos en la parte superior del fuste inmediatamente abajo de las primeras ramas; más abajo el ancho de los anillos decrece y en la base del árbol se ensanchan otra vez (Klepac, 1976).

Una curva de crecimiento acumulado del diámetro sobre la edad muestra mucho la misma tendencia; hay, sin embargo, más de la tendencia hacia la curvilinearidad durante el periodo de madurez (Husch *et al.*, 1982).

2.2.4 Crecimiento del árbol en volumen

El volumen ha sido y será, la medida más ampliamente utilizada para cuantificar la madera (Husch *et al.*, 1982).

El incremento total en volumen del árbol, no sólo consiste de la parte leñosa, sino también del follaje, frutos y sistema radicular. El volumen del árbol aumenta paralelamente con la altura y el diámetro desde su nacimiento hasta su muerte. La curva es también en forma de "S" sigmoidea, pero el punto de inflexión en esta curva ocurre aún más tarde que en las curvas del incremento

en altura y diámetro, lo que tiene una repercusión en la culminación del incremento en volumen. Bajo condiciones diferentes el incremento en volumen siempre culmina después del incremento en altura, diámetro y área basal. Con la edad el incremento anual en diámetro del árbol disminuye gradualmente; los anillos de crecimiento tienden a ser más estrechos, pero el correspondiente incremento en volumen permanece más tiempo y cuando los anillos de crecimiento se hacen considerablemente más estrechos comienza la disminución (Klepac, 1976).

El volumen depende directamente del diámetro y la altura, pero tiene una relación lineal con el área basal, mientras el incremento en el número de árboles por hectárea eleve la magnitud del área basal y se sostenga la relación lineal entre el área basal y el volumen, la densidad carece de efectos significativos sobre el crecimiento en altura. Cuando el área basal disminuye al aumentar el número de árboles por unidad de superficie el incremento en volumen, y probablemente el crecimiento en altura también se reducen (Daniel *et al.*, 1982).

2.2.5 Crecimiento del árbol en área basal

El área basal, es el área de la sección transversal a la altura del pecho (Avery y Burkhart, 2002). El crecimiento en área basal es una medida de la capacidad de los árboles o rodales para producir elementos del xilema, producción que está parcialmente controlada por factores genéticos, bióticos, físicos y químicos del ambiente. A medida que se desarrollan los rodales, el área basal se acumula y alcanza su máximo crecimiento, bajo condiciones de población completa. Los tratamientos silvícolas pueden reducir y redistribuir el área basal en rodales de edad uniforme. En rodales bien poblados y en condiciones naturales, la tasa de crecimiento en área basal se estabiliza con la edad, interrumpiendo el aumento de la tasa de acumulación, independientemente de la calidad de sitio (Daniel *et al.*, 1982).

Sin embargo, el efecto de la calidad de sitio en función de la edad sobre la acumulación de área basal influye notablemente el incremento en sitios de buena calidad, pero a medida que la edad aumenta, es relativamente pequeña en comparación con sitios de baja calidad, una mejoría en la calidad de un sitio

empobrecido ocasiona un notable incremento en la acumulación de área basal (Daniel *et al.*, 1982).

Por otro lado cuando el número de árboles aumenta por hectárea, el área basal aumentará con cada árbol, sumando al final una cantidad total de área basal, esta acumulación de áreas transversales, por hectárea, de los fustes de los árboles a 1.30 m sobre el nivel del suelo es una medida ampliamente utilizada para la densidad de un bosque (Clutter *et al.*, 1983). Sin embargo, existen diferencias entre las especies en sus áreas basales, a una edad fija, esta variación puede deberse a la tolerancia de las especies, esto constituirá, en área basal, una correlación suficiente para garantizar que la tolerancia ejerce una cierta influencia sobre el área basal; pero resulta errático, porque los árboles tolerantes pierden esta cualidad al avanzar su edad. El área basal es una de las características más importantes en la descripción de un rodal, debido a que presenta una de las tasas de crecimiento más notables que se reconocen en la silvicultura (Daniel *et al.*, 1982).

El cálculo del área basal puede llevarse a cabo por medio de la medición del diámetro a la altura del pecho, es decir, conociendo el incremento que el diámetro sufre, para el cálculo del área basal se asume que el fuste a la altura de 1.30 m es circular en una sección transversal (Klepac, 1976; Husch *et al.*, 1982; Avery y Burkhart, 2002). Al igual que con el número de árboles por hectárea, la utilidad del área basal por hectárea es un indicador de aglomeración restringido, cuando la historia previa del bosque es desconocida (Clutter *et al.*, 1983).

El área basal está directamente relacionada con el volumen de una masa, además es una buena medida de la densidad de un bosque cuando así se desea (Husch *et al.*, 1982).

2.3 Métodos en el análisis del crecimiento

Existen numerosos métodos por medio de los cuales es posible determinar el incremento en el manejo forestal; de manera general pueden clasificarse en métodos indirectos y directos (Klepac, 1976).

Los métodos indirectos son aquellos que consisten en el incremento que se determina de una manera indirecta, es decir, por medio del clima o la cubierta vegetal; los métodos directos son aquellos en los cuales se toman

medidas del incremento directamente. A continuación se mencionan de forma general algunos de los más utilizados (Klepac, 1976).

2.3.1 Índice de productividad de Paterson C. P. V.

A partir del hecho de que el clima es uno de los elementos esenciales en la producción forestal, Paterson se limitó a estudiar la temperatura, humedad, época del periodo de crecimiento e intensidad de la radiación. Por medio de estos factores quiso determinar la productividad, la cual la expresó por el incremento medio anual total por hectárea a la edad de 100 años.

El índice fue llamado CVP (C= clima, V= vegetación, P= productividad). Varía de 0 a 100,000 cuando el CVP es inferior a 25, no es posible la cosecha forestal; aumentando el índice, la productividad incrementada, y comienza a declinar cuando el CVP excede el valor de 30,000.

Paterson determinó el índice CVP para 100 lugares en el mundo y en todos los casos pudo establecer una correlación entre su índice y la producción forestal, la cual varió de 0 m³ /ha/año a 15 a 16 m³/ha/año (Klepac, 1976).

2.3.2 Determinación del incremento con base en flora

El análisis de la cubierta vegetal puede indicar la capacidad productiva de un bosque. Existen dos procedimientos, los cuales con el paso del tiempo han sido probados con respecto al tipo de bosque y a la comunidad vegetal (asociación vegetal y fitocenosis). A la agrupación diversa de vegetales que caracterizan el paisaje geográfico de determinada región se le denomina asociación vegetal. Los vegetales se agrupan de manera muy diversa, contribuyendo con su presencia a caracterizar el paisaje geográfico de determinadas regiones de la Tierra. Se constituyen, así, las denominadas formaciones o asociaciones vegetales. Se entiende por fitocenosis al conjunto de vegetales que habitan en un determinado biotipo relacionados entre sí de modo que constituyen una comunidad de estructura y funcionalismo definido (Klepac, 1976).

2.3.3 Tablas de producción

Las tablas de producción son extensiones lógicas de las tablas de volumen con una relación linear entre volúmenes de árboles individuales y sus áreas basales asociadas (Clutter *et al.*, 1983).

Las tablas de producción son aquellas que muestran el cambio progresivo en el desarrollo de una localidad a intervalos periódicos que cubren el rango de edad de las especies en localizaciones determinadas (Hocker, 1984). Estas pueden incluir información del diámetro y la altura promedio, así como, el área basal, el número de árboles, el volumen y otros datos esenciales. También se definen como representaciones tabulares del crecimiento y el aprovechamiento de los rodales de una especie determinada a lo largo de su vida, considerando la calidad del sitio y el tratamiento silvícola realizado (Aguirre, 1991).

Las tablas de producción representan la calidad o clase de sitio por la altura que el rodal tiene a una cierta edad (Aguirre y Kramer, 1990). La aplicación práctica de las tablas de producción es simple. Con base en la edad del rodal y altura media del mismo, se determina la clase de calidad de estación, entonces de una tabla correspondiente se leen los valores, los cuales se reducen de acuerdo al estado concreto de las masas (Klepac, 1976).

2.3.4 Análisis troncal

El análisis del tronco es un historial del crecimiento del árbol en altura y, también, el de su diámetro tanto en el tocón como en cierto número de puntos situados más arriba del tronco, además, es el procedimiento por medio del cual se puede conocer el crecimiento e incremento del árbol durante su vida (Bruce y Schumacher, 1965; Klepac, 1976).

El análisis del tronco o análisis troncal es el camino más directo y preciso para estudiar el desarrollo e incremento de un árbol, determinar su crecimiento e investigar diferentes relaciones que lo controlan. Este procedimiento consiste en la medición por secciones de las dimensiones del árbol a diferentes edades, a partir de ello se calculan los distintos elementos y el crecimiento. Los datos requeridos para esto se obtienen por conteo y medición de los anillos sobre las rodajas obtenidas a diferentes alturas fustales (Prodan *et al.*, 1997).

Para este propósito el árbol debe ser derribado, del árbol apeado se toman secciones o rodajas transversales de las cuales dos de ellas deben ubicarse en sitios precisos. La primera debe tomarse precisamente a la altura del apeo (20 - 30 cm), y la segunda a la altura del pecho (1.30 m), las restantes se obtienen a igual distancia unas de otras (1, 2 o 3 m) si es posible. En las partes superiores del fuste la distancia entre las secciones es generalmente menor. En las secciones aserradas se anota en el lado inferior, la altura a la cual se hizo el corte, en el lado superior, que corresponde exactamente a la altura anotada, se cuentan los anillos de crecimiento y se llevan a cabo las mediciones (Klepac, 1976).

En lugar de medir el incremento anual, generalmente se mide el incremento en periodos de 5 o 10 años. En los árboles jóvenes de rápido crecimiento se toman periodos de 5 años y para árboles viejos periodos de 10 años. Se determina la edad, contando los anillos de crecimiento en la sección de apeo o tocón; generalmente se considera, que el número de anillos de crecimiento en una sección transversal muestra la edad de esa parte del árbol. Si el árbol en su primer año de su crecimiento, en altura, creció al nivel del tocón y sí en medio de la sección transversal se encuentra la sección de la planta a esa edad, entonces el número de anillos de crecimiento del tocón nos da la edad total del árbol. Si la condición anterior no se llena, se añade el número de anillos del tocón al número de años que fueron necesarios para que la planta en sus primeras etapas, haya alcanzado la altura del tocón. De esta manera se obtiene la edad física del árbol. Pero si el árbol creció bajo condición adversa, se debe reemplazar la edad física por la edad económica; se entiende por edad económica aquella en la cual el árbol hubiera obtenido sus dimensiones, si hubiera crecido bajo condiciones normales (Klepac, 1976).

Entre algunos ejemplos de análisis troncal se encuentra el crecimiento e incremento de la regeneración de *Pinus estevezii*, en la región Sur del estado de Nuevo León, mediante análisis troncales se obtuvo información de edades, diámetros y alturas de 130 árboles, con la cual generó curvas de crecimiento en dichas variables para su comparación con la ayuda de modelos de crecimiento y modelos de incremento (González, 2000).

También se ha determinado el índice de sitio mediante análisis troncales de ocho especies de *Pinus* para elaborar curvas ana-polimórficas o poli-

anamórficas, también llamadas “Curvas compuestas” y elaborar curvas de índice de sitio de forma y escala variable en Investigación Forestal (Torres, 2001).

Otro análisis troncal donde utilizaron 72 árboles de *Pinus pseudostrobus* Lindl., se desarrolló en el noreste de México para la elaboración de curvas de índice de sitio evaluando varias ecuaciones con el fin de estimar la altura dominante de las masas forestales (Vargas *et al.*, 2013).

2.3.5 Métodos para la determinación del incremento en viruta

Hace 100 años Pressler inventó un taladro por medio del cual es posible extraer de los árboles muestras de madera, los llamados cilindros o virutas de incremento (Klepac, 1976). El taladro o barreno de Pressler es un instrumento utilizado para obtener muestras de madera, en forma de tarugos o cilindros, que permiten el conteo de los anillos de crecimiento de árboles en pie (Imaña y Encinas, 2008).

Con el taladro de Pressler se perfora el árbol en ángulo recto a su eje longitudinal y a una altura de 1.30 m sobre el suelo. Las muestras o cilindros extraídos pueden ser pequeños o grandes. Por medio de una perforación grande o larga es posible penetrar hasta el centro de los árboles. Analizando los cilindros se obtiene datos del crecimiento e incremento de los árboles durante los años de su vida. Por lo tanto, es claro que se tratará con el crecimiento e incremento en diámetro de un árbol, con base en el cual se determinará el incremento en volumen sin medir directamente el incremento en altura del árbol (Klepac, 1976).

La mayoría de estos métodos son usados en la zona templada en donde el incremento radial forma anillos de crecimiento más o menos visibles. En los trópicos y subtropicos, y aún en algunas especies mediterráneas, es muy difícil, y a veces casi imposibles distinguir los anillos de crecimiento. Naturalmente, en estos casos los métodos para determinar el incremento pierden su importancia. Este método se desarrolló primeramente en Alemania, posteriormente se utilizó en Francia y llegó a otros países europeos y americanos en donde fue modificado (Klepac, 1976).

Para la extracción de las muestras, éstas se toman del árbol a una altura de 1.30 m (Husch *et al.*, 1982). El taladro debe penetrar en el árbol en ángulo recto al eje longitudinal, del lado en el cual se tomó la medida del diámetro del fuste o el lado de la pendiente. De esta manera se obtienen resultados más conservadores (Klepac, 1976).

Cabe mencionar que el crecimiento medio radial o diámetro medio puede determinarse a partir de varios tacos de crecimiento, pero por lo general se toma una sola viruta. Cuando se toma una sola viruta, debe ser extraída de la parte de en medio entre los diámetros largos y cortos. La longitud de la viruta depende del período pasado para el cual se desea la medición del crecimiento. Si es necesario un crecimiento para un período pasado como base de las predicciones de crecimiento, la perforación debe incluir el número de anillos en el período deseado, generalmente se toman 5 o 10 años. Si se necesita el crecimiento para la vida del árbol, las perforaciones deben llegar al centro de este (Husch *et al.*, 1982).

En lo que respecta al análisis de muestras hay muchas posibilidades. En general se distinguen dos procedimientos: a) contar o medir los anillos de crecimiento en una longitud definida, y b) medir los últimos (n) anillos. Con el primer procedimiento se obtiene el tiempo de paso y con el segundo el incremento en diámetro del árbol (Klepac, 1976).

El tiempo de paso es utilizado para la toma de decisiones en manejo forestal principalmente para la silvicultura y está definido como el número de años que transcurren para que un árbol pase de una categoría diamétrica, a la inmediata superior (SEMARNAT, 2008).

El análisis de la muestra, consiste en que en cada una de ellas se miden (del exterior al interior) los anillos que están comprendidos en 2.5 cm. El número de anillos en dicha longitud de la muestra se expresa por (t), este representa el número de años comprendidos en esa longitud denominado tiempo de paso, el cual, indica el número de años que requiere un árbol para obtener un incremento de 5 cm de diámetro normal, o sea, pasar de una categoría diamétrica a otra (Klepac, 1976).

El tiempo de paso tiene una aplicación muy amplia no sólo en el campo de la determinación del incremento, sino en general en el manejo y evaluación de los bosques, especialmente en los bosques de selección (Klepac, 1976).

En el Incremento en diámetro y volumen en virutas, los análisis de estas muestras por lo general se llevan a cabo con la ayuda de lupas o instrumentos especialmente hechos para este fin. Como es el caso para la anchura de los anillos de crecimiento, correspondientes a determinados años, ya que pueden medirse en las muestras. Para determinar el incremento en diámetro es necesario medir la anchura de los anillos anuales que corresponden a los años de la muestra. Para obtener dicho incremento tenemos que duplicar la anchura de los anillos (Klepac, 1976).

Por otro lado en la determinación del incremento en volumen de un rodal, por lo general se analiza un mayor número de muestras y se obtienen varios incrementos individuales en diámetro, como primer paso se clasifican según las categorías diamétrica, después se calcula la media aritmética del incremento en diámetro para cada categoría y por último, estos valores medios se expresan en forma gráfica o numéricamente (Klepac, 1976).

2.4 Curvas de crecimiento

Cuando el tamaño de un organismo (volumen, peso, diámetro, o altura de un árbol) es graficado con su edad, la curva definida comúnmente se llama curva de crecimiento (Husch *et al.*, 1982). Gráficamente una curva de crecimiento se parece a una forma sigmoidea o forma de "S", en la cual se encuentra la etapa juvenil, la edad madura, y la edad senil o vieja, cada una mantiene un ritmo de crecimiento característico en la vida total del árbol y juntos conforman dicha curva (Imaña y Encinas, 2008).

La curva de crecimiento (a menudo se refiere como el crecimiento anual actual o incremento anual actual) aumenta hasta el punto de inflexión de la curva de rendimiento y disminuye después (Avery y Burkhart, 2002).

La altura alcanzada en un punto determinado del tiempo en función de la edad, representada en forma gráfica, produce la curva de desarrollo en altura o la curva de rendimiento. Esta curva de rendimiento tiene forma típica para todos los elementos de árbol y rodal. Se asemeja a una "S" extendida o el símbolo de la integral (Prodan *et al.*, 1997).

Entre la curva de rendimiento y crecimiento existe una relación, donde la dimensión total (crecimiento acumulado o rendimiento) alcanzado en un momento del tiempo determinado es igual a la sumatoria de todos los

crecimientos anuales. Por lo tanto, la curva de rendimiento es la curva acumulativa de la curva de crecimiento (Prodan *et al.*, 1997).

La curva de crecimiento, se define como una curva acumulativa del incremento de la producción o una integral de todas las diferenciales representadas por la curva del (ICA) Incremento Corriente Anual. Esta curva indica la cantidad de producto total obtenido a lo largo de la vida de un árbol o un rodal coetáneo, es decir, representa el producto total máximo que puede obtenerse usando una combinación de las cantidades de insumos involucrados (Corral, 2004).

El ICA y el IMA son los tipos de incrementos más comúnmente utilizados para fines de manejo, debido a que sus representaciones gráficas muestran la respuesta en el tiempo; ambas expresiones fungen como indicadores de la productividad de los árboles y los rodales, pero no son medidas en sí de la productividad (Corral, 2004).

El incremento de las dimensiones de un árbol durante un año se refiere al Incremento Corriente Anual (ICA), otra cantidad importante es el crecimiento medio anual o incremento (IMA), que se define como el rendimiento en cualquier edad, dividido por el número total de años que se requieren para lograr ese rendimiento (Avery y Burkhart, 2002).

Las curvas de incremento corriente anual, incremento periódico anual, e incremento medio anual pueden derivarse de la curva de crecimiento acumulado calculando incrementos de diferentes tamaños de la curva de crecimiento acumulado a edades establecidas y graficando los incrementos con su respectiva edad (Husch *et al.*, 1982).

Otras curvas establecidas en el crecimiento son las de índice de sitio, éstas a menudo están basadas en datos provenientes de análisis troncales. Estos datos proporcionan información útil acerca de la productividad potencial del sitio (Corral *et al.*, 2004). La construcción de las curvas de índice de sitio, si se mide un rodal que está en una edad índice, la altura promedio de los dominantes y codominantes es el índice de sitio. En la mayoría de las veces, casi siempre, los arbolados medidos son menores o mayores que la edad índice. Consecuentemente, un conjunto de curvas o una ecuación son necesarios para proyectar la altura dominante del arbolado a la edad de referencia estándar (Avery y Burkhart, 2002).

A principios las curvas de índice de sitio se construían por técnicas gráficas. Datos en altura y edad fueron colectados de una variedad de árboles en diferentes calidades de sitio y de edades diferentes. Estos valores de altura y edad emparejados fueron graficados sobre papel, y una curva guía fue dibujada para representar la tendencia general en los datos. Todas las otras curvas de índice de sitio fueron proporcionales a la curva guía. Cuando varias curvas de clases de índice de sitio son proporcionales se denominan curvas anamórficas (Avery y Burkhart, 2002).

Las curvas anamórficas de índice de sitio son construidas a través de técnicas de regresión. La representación de altura con edad para rodales puros y coetáneos resulta generalmente en una forma sigmoidea; así alguna transformación de las variables es necesaria si los métodos de regresión lineal son aplicados. La transformación más común es:

$$\ln H_d = b_0 + b_1 A^{-1}$$

Este es un caso especial del modelo de regresión lineal simple.

$$Y = b_0 + b_1 X$$

Donde Y es el logaritmo de la altura de dominantes y codominantes, H_d , y X son los recíprocos de las edad del arbolado (Avery y Burkhart, 2002).

Cabe mencionar que, en el trabajo con las curvas de crecimiento, uno debe darse cuenta de que cada especie, tal vez cada árbol, dispensa un momento de su propia creación. Estos tiempos fisiológicos varían de una sola especie de árbol a otro, y de una etapa de desarrollo a otra (Husch *et al.*, 1982).

2.5 Calidad de sitio

Sitio, se refiere al área en la cual un árbol o un rodal crecen (Avery y Burkhart, 2002). El crecimiento de los árboles depende de su edad, la especie y la capacidad productiva de una localidad, denominada calidad de sitio (Rivas, 2006).

Para un bosque natural, la calidad de sitio, se define como la capacidad productiva innata que tienen algunos lugares donde los árboles se desarrollan mejor, concepto que debe diferenciarse de la densidad, el cual se refiere a cuántos árboles están utilizando esa capacidad innata de producción (Clutter *et al.*, 1983).

La calidad de sitio se mide en términos de la máxima cantidad de madera producida dentro de un determinado periodo, el valor que se le asigne puede variar según la especie de árboles y la longitud del lapso de tiempo (Daniel *et al.*, 1982). La productividad de un sitio para el crecimiento de un árbol es usualmente evaluada en las bases de un bosque, dicho esto la calidad de sitio expresa la productividad promedio de una superficie determinada para el crecimiento de árboles forestales. Una forma común para expresar la calidad de sitio relativa es crear de tres a cinco clases o rangos ordinarios, como sitio I, sitio II y sitio III, designando las capacidades productivas comparativas en orden descendente (Husch *et al.*, 1982).

Existen varios métodos para estimar la calidad de sitio, entendiéndose como el proceso mediante el cual es posible estimar, en forma un tanto aproximada el grado de productividad del sitio. Varios autores han dividido los métodos para evaluar la calidad de sitio de la siguiente manera:

A. Directos

Un método preciso de estimación de calidad de un sitio es desarrollar un bosque de una especie determinada, sobre un sitio señalado y durante un periodo dado. Resulta obvio que este procedimiento no podría producir líneas para los silvicultores antes de varios años, se considera también que la calidad de sitio es estimada en función de los datos históricos de rendimiento en volumen, crecimiento en altura dominante o en base al crecimiento de los entrenudos (Daniel *et al.*, 1982).

B. Indirectos

El método indirecto más común para la evaluación de la calidad del sitio con fines productores de madera consiste en la medición de la altura de los árboles en el sitio. De todas las mediciones indirectas aplicadas para el sitio, la altura del árbol en relación a la edad del árbol se ha encontrado como el más práctico, consistente y sencillo indicador (Avery y Burkhart, 2002).

2.6 Índice de sitio

El índice de sitio es la relación de la altura de los árboles dominantes de cierta especie en determinado lugar, a una edad de referencia (edad base) (Husch *et al.*, 1982; Clutter *et al.*, 1983).

Tal como se aplica en general, el índice de sitio se calcula mediante la determinación de la altura total media y la edad de los árboles dominantes y codominantes en rodales con clases de edad bien distribuidas; para determinar el índice de sitio de una masa forestal, la altura y la edad promedio total se determinan a partir de mediciones obtenidos de los árboles del sitio (Avery y Burkhart, 2002).

Los índices de sitio son indispensables en los planes de manejo para la planificación y aplicación adecuada de prácticas de silvicultura y la clasificación de tierras forestales de acuerdo a su productividad, que va íntimamente relacionado con las inversiones económicas a efectuar (Daniel *et al.*, 1982).

Los índices de sitio han sido utilizados por muchos años en la evaluación de la calidad de sitio para masas coetáneas de una especie o masas de composición casi pura (Husch *et al.*, 1982).

2.7 Modelos de crecimiento

Un modelo es una forma de caracterizar un sistema o parte de un sistema. Es una abstracción y simplificación o una representación simplificada de un proceso natural que permite su estudio y análisis sobre algún aspecto de la realidad deseado (Vanclay, 1994; Prodan *et al.*, 1997).

Existen los modelos matemáticos que son una de las herramientas analíticas más utilizadas en la actualidad para la generación de conocimientos en el área del crecimiento y producción de rodales ya que, a través de fórmulas matemáticas, se representan los procesos biológicos que ocurren a nivel de árbol individual y del rodal completo (Alemán, 2001).

Por otro lado existen los modelos de crecimiento que por lo general se refieren a un sistema de ecuaciones que permiten predecir el crecimiento y rendimiento de un rodal bajo varias condiciones. Los modelos proporcionan una forma eficaz para preparar las previsiones de recursos, pero un papel más importante puede ser su capacidad para explorar las opciones de gestión y alternativas silvícolas (Vanclay, 1994).

Los modelos de predicción de rendimiento se clasifican por la complejidad de la aproximación matemática en cuestión (Clutter *et al.*, 1983).

A. Modelos en forma de tabla, raramente utilizados,

B. Modelos como ecuaciones y sistemas de ecuaciones, que explícita o implícitamente predicen el crecimiento, requieren por lo menos alguna remediación en parcela, éstos a su vez se clasifican como:

1. Predicción directa de los valores de unidad de área.
2. Valores de unidad de área obtenidos por suma, estos se dividen en dos tipos:
 - a) Ecuaciones para clases de árboles,
 - b) Ecuaciones para árboles individuales.

Los modelos de crecimiento para árboles individuales, se pueden diferenciar en dos tipos en los cuales la distinción básica entre los dos tipos es que las variables de predicción en modelos a nivel de rodal son estadísticos de rodal, mientras que al menos algunas de las variables predictoras en cualquier modelo a nivel de árbol son las estadísticas individuales de árboles (Clutter *et al.*, 1983).

2.8 Trabajos afines

En este apartado se habla de las investigaciones relacionadas al crecimiento e incremento de coníferas, así como también del uso de técnicas para evaluarlos Cuadro 1.

Cuadro 1. Estudios de crecimiento sobre el género *Pinus* y *Pseudotsuga* en México.

| Autor (es) | Título | Año | Lugar |
|----------------------------------|--|------|---------------------------------------|
| Benavides Solorio | Índices de sitio para estimar la calidad de sitio en bosques de coníferas. | 1991 | Tapalpa, Jalisco. |
| Monroy Rivera. | Índice de sitio para <i>Pinus patula</i> Schltdl. et Cham., en la región de Huayacocotla, Veracruz. | 1996 | Huayacocotla, Veracruz |
| Aguilar Ramírez | Estudio del Crecimiento de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez y <i>Pinus lawsonii</i> Roehl., en la región central de Michoacán. | 1997 | Uruapan, Michoacán. |
| Zepeda y Domínguez. | Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de <i>Pinus arizonica</i> Engl. | 1998 | La Mesa del Poleo, Madera, Chihuahua. |
| Bautista Malagón | Crecimiento e incremento en altura, diámetro, área basal y volumen de la regeneración de <i>Pinus rudis</i> Endl., en la Sierra las Alazanas, Arteaga, Coah. | 2001 | Arteaga, Coahuila. |
| Domínguez Calleros <i>et al.</i> | Comparación del rendimiento de pinos en la reforestación de sitios marginales en Nuevo León. | 2001 | Iturbide, Nuevo León. |
| Corral Rivas <i>et al.</i> | Compatible height and site index models for five pine species in El Salto, Durango (Mexico). | 2004 | El Salto, Durango. |
| López Upton <i>et al.</i> | Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de <i>Pinus greggii</i> | 2004 | Huachinango, Puebla. |
| Corral Rivas <i>et al.</i> | The effect of competition on individual tree basal area growth in mature stands of <i>Pinus cooperi</i> Blanco in Durango (Mexico) | 2005 | El Salto, Durango. |

| | | | |
|-----------------------------------|--|------|------------------------------------|
| Corral y Návar. | Análisis del crecimiento e incremento de cinco pináceas de los bosques de Durango, México | 2005 | El Salto, Durango. |
| López Hernández y Valles Gándara. | Modelos para la estimación del Índice de Sitio para <i>Pinus durangensis</i> Martínez en San Dimas, Durango | 2009 | San Dimas, Durango. |
| Cortés Martínez. | Crecimiento de diámetro y altura para tres plantaciones de pinos en Miahuatlán, Oaxaca. | 2010 | Miahuatlán, Oaxaca. |
| Santiago García. | Análisis de Crecimiento en diámetro y altura de tres especies tropicales en Plantación de Enriquecimiento en Pochutla, Oaxaca. | 2012 | San Pedro Pochutla, Oaxaca. |
| Herrera Santiago. | Evaluación de la productividad maderable de dos especies de <i>Pinus</i> en reforestaciones de La Trinidad, Ixtlán, Oaxaca. | 2012 | Ixtlán, Oaxaca. |
| Vargas Larreta <i>et al.</i> | Modelo de crecimiento en altura dominante e índice de sitio para <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl., en el noreste de México. | 2013 | Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas. |
| Uranga Valenzuela. | Crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de <i>Pinus patula</i> . | 2014 | Zacualpan, Veracruz. |

En el Cuadro 2 se muestran estudios donde la obtención de los datos de crecimiento y en algunos casos datos de incremento para su análisis ha sido realizada a través de análisis de virutas por medio del Taladro de Pressler.

Cuadro 2. Estudios sobre evaluación en virutas de crecimiento.

| Autor (es) | Título | Año | Lugar |
|------------------------------------|---|------|---|
| Návar <i>et al.</i> | Predicción del crecimiento de masas forestales irregulares en base a las distribuciones diamétricas en el sureste de Sinaloa, México. | 1996 | Rosario, Sinaloa. |
| De la Fuente <i>et al.</i> | Predicción del crecimiento y rendimiento de <i>Pinus rudis</i> Endl., en pueblos mancomunados, Ixtlán, Oaxaca. | 1998 | Ixtlán, Oaxaca. |
| Valencia Manzo y Vargas Hernández. | Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en <i>Pinus patula</i> | 2001 | Zacualpan, Veracruz. |
| Gómez López | Crecimiento e incremento de <i>Picea martinezii</i> T. F. Patterson en tres poblaciones de Nuevo León. | 2007 | Nuevo León |
| Lara Beltrán. | Estudio de crecimiento e incremento de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco. | 2012 | Altzayanca, Tlaxcala e Ixtacamaxtitlán, Puebla. |
| Constante García. | Análisis de patrones de crecimiento de especies arbóreas utilizando técnicas dendroecológicas en la Sierra Madre Occidental. | 2013 | Nuevo León. |
| Correa Díaz <i>et al.</i> | Análisis dendroclimático de Ahuehuete (<i>Taxodium mucronatum</i> Ten.) en el centro de México. | 2014 | San Felipe, Estado de México; San Miguel, estado de Querétaro; Tasquillo, estado de Hidalgo y, Jantetelco, estado de Morelos. |
| Cervantes Ángel | Crecimiento de pináceas asociadas a poblaciones naturales de <i>Picea mexicana</i> Mart. | 2014 | Coahuila de Zaragoza y Chihuahua. |

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

La localización del área de estudio (Figura 1), se encuentra en el noreste de México en el macizo montañoso de la Sierra Madre Oriental; la localización exacta de las especies se muestra en el Cuadro 3, donde se indica el lugar de muestreo de los individuos evaluados.

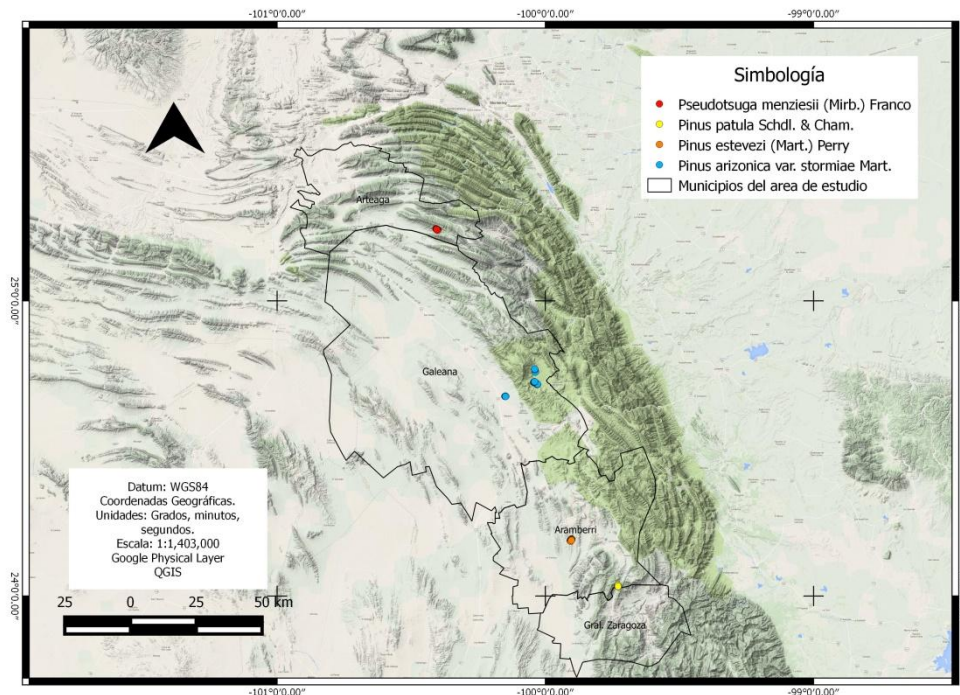


Figura 1. Localización de las cuatro especies de pino en estudio en el noreste de México.

Respecto al tipo de clima, considerando los diferentes puntos de localización, este es variable (Cuadro 4), ya que en las zonas donde se encuentra cada una de las especies existen los climas: templado subhúmedo y seco semicálido. Con temperatura media anual que varía de los 12° a 18° C. La precipitación varía de los 400 a los 800 mm anuales considerando el rango de la distribución de las especies evaluadas a lo largo de la Sierra Madre Oriental (García, 1988; INEGI, 2000a).

El área de estudio se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, en el municipio de Arteaga, Coahuila, y los municipios de Galeana y Aramberri en Nuevo León (INEGI, 2000b). Esta provincia se empieza a observar desde la continuidad de los pliegues que forman la Sierra

de Mapimí hasta llegar al Istmo de Tehuantepec. Constituida por el frente de los plegamientos, excepto en las zonas suroeste de Monterrey, al oeste de Tamazunchale y el este de Tehuacán, además de algunas secciones como la del río Pantepec. El rumbo de las sierras pasa de una dirección este a oeste entre las poblaciones de Saltillo a Monterrey, de Galeana a Linares se puede observar que las Sierras son francamente de noroeste a sureste, la cual se mantiene hasta el Istmo de Tehuantepec. La elevación más importante es el Cerro el Potosí en Galeana, Nuevo León (INEGI, 2012).

Cuadro 3. Ubicación geográfica de las cuatro especies en estudio.

| Especie | Municipio & Estado | Localidad | Longitud "O" | Latitud "N" | Altitud (msnm) |
|---|--------------------|------------------------------------|--------------|-------------|----------------|
| <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart. | Galeana, N. L. | Puerto Pastores | 100° 02' 20" | 24° 46' 01" | 1636 |
| | | La Poza | 100° 01' 51" | 24° 43' 06" | 1752 |
| | | Primavera | 100° 08' 58" | 24° 40' 40" | 2109 |
| | | Y Griega de Arriba | 100° 02' 28" | 24° 43' 34" | 1757 |
| <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry | Aramberri, N. L. | San Rafael del Llano "El Pinalito" | 99° 54' 14" | 24° 11' 27" | 1980 |
| <i>Pinus patula</i> Schlttdl & Cham. | | Agua Fría | 99° 43' 43" | 24° 02' 02" | 2270 |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco | Arteaga, Coah. | Mesa de las Tablas | 100° 24' 14" | 25° 14' 27" | 2668 |

En cuanto a la hidrología que caracteriza al área estudio de acuerdo a INEGI (2010), ésta se encuentra en su mayor parte dentro del "Bolsón del Salado" que abarca parte de los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas, inmerso en la región hidrográfica de San Fernando-Soto La Marina y la región de Bravo-Conchos como se explica en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Los diferentes climas de las cuatro especies en estudio por localidad para la región noreste de México.

| Especie | Localidad | Clima | Temperatura Media | Precipitación (mm) |
|---|------------------------------------|-------|-------------------|--------------------|
| <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart. | Puerto Pastores | BS0hw | 18°C | 400 – 500 |
| | La Poza | | | |
| <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry | Primavera | Cx' | 16°C | 500 – 600 |
| | Y Griega de Arriba | BS0hw | 18°C | 400 – 500 |
| <i>Pinus patula</i> Schltldl & Cham. | San Rafael del Llano "El Pinalito" | C(w1) | 16°C | 600 – 700 |
| | Agua Fría | | | |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco | Mesa de las Tablas | Cx' | 12°C | 500 – 600 |

Donde: BS0hw = seco semicálido; Cx', C(w0) y C(w1) = Templado subhúmedo. Fuente: (García, 1988; INEGI, 2000a).

Cuadro 5. Aspectos hidrológicos de las cuatro especies.

| Especie | Región Hidrológica | Cuenca |
|---|-------------------------------|--------------------|
| <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart. | San Fernando – Soto La Marina | San Fernando |
| <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry | | Rio Soto La Marina |
| <i>Pinus patula</i> Schltldl & Cham. | Bravo – Conchos | Bravo – San Juan |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco | | |

Fuente: (INEGI, 2010).

Referente a la vegetación de la región de la Sierra Madre Oriental existen pinares diversos, sobre todo en las partes más altas de la cordillera y también en sus declives occidentales. Pocas veces, sin embargo, forman grandes bosques, su extensión es discontinua y a menudo se presentan en forma de bosques mixtos de *Quercus* y *Pinus*. De las partes más altas (hasta los 3000 m de altitud) se conocen los bosques de *Pinus rudis*, *P. montezumae*, mientras que el *Pinus arizonica* desciende cerca de Galeana hasta los fondos de algunos valles en forma de comunidades abiertas. *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae* y *P. teocote* son los principales componentes de los pinares entre los 1500 y 2800 m de altitud (Rzedowski, 1978).

El tipo de vegetación dominante existente en los alrededores de las especies en estudio se encuentra con asociaciones de bosque de pino y bosque de pino - encino (INEGI, 1994). Además, de la vertiente occidental de la

Sierra Madre Oriental en Nuevo León, principalmente en altitudes entre 2000 y 2800 m, existe una variedad de matorral xerófilo, encinares arbustivos (Chaparral) con *Q. cordifolia*, *Q. saltillensis*, *Q. flocculenta*, *Q. pringlei*, *Q. errans f. graciliramis*, *Q. clivicola f. dentata* y *Q. porphyrogenita f. macropetiolata*, como principales encinos, además de especies de *Ceanothus*, *Cercocarpus*, *Rhus*, *Garrya*, *Arbutus*, *Juniperus*, *Pinus*, *Agave*, *Yucca*, *Nolina*, *Arctostaphylos*, *Berberis*, *Cowania*, *Amelanchler* y *Philadelphus* como componentes arbustivos (Rzedowski, 1978).

En la Sierra Madre Oriental la geología del área en estudio se caracteriza por contar con lugares donde predominan rocas calizas, sus montañas están constituidas por rocas sedimentarias de origen marino, calizas y lutitas, principalmente de la era mesozoica; los estratos de estas rocas están doblados a manera de grandes pliegues que forman una sucesión de crestas alternadas con bajos; las cumbres oscilan entre los 2,000 y 3,000 m. y los bosques de *Quercus* prevalecen ampliamente, aunque también presentan bosques de *Pinus* (Rzedowski, 1978) el tipo de rocas presentes en cada localidad se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Geología de acuerdo a la ubicación de los puntos de muestreo para las especies estudiadas.

| Especie | Localidad | Era Geológica | Tipo de roca |
|---|------------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart. | Puerto Pastores | Mesozoico – Jurásico Superior | Caliza - Yeso |
| | La Poza | | |
| | Primavera | Mesozoico-Cretácico Inferior | |
| | Y Griega de Arriba | Mesozoico – Jurásico Superior | Caliza – Yeso |
| <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry | San Rafael del Llano “El Pinalito” | Mesozoico-Cretácico Inferior | Caliza |
| <i>Pinus patula</i> Schltl & Cham. | Agua Fría | | |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco | Mesa de las Tablas | Mesozoico – Cretácico Superior | Caliza – Lutita |

Fuente: (INEGI, 1998b).

Referente a la edafología el tipo de suelo que generalmente predomina para las especies en estudio según la clasificación dada por la asociación FAO/UNESCO modificado por la Dirección General de Geografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) se explica en el Cuadro 7.

3.2 Muestreo y registro de datos

Para el registro de las variables dasométricas de los individuos de cada especie en estudio, se llevó a cabo la selección de varios árboles para cada una de ellas, se registró 31 individuos para *Pinus arizonica* var. *stormiae* al igual que para *Pinus estevezii* y *Pseudotsuga menziesii*, en el caso de *Pinus patula* se registró 20 árboles, de tal manera que estos representan al “árbol promedio” del rodal, se cuidó en especial aquellos que no presentaran algún daño físico, plaga, enfermedad, algún defecto de forma natural o artificial, sino que fuesen árboles de buenas características por buen crecimiento, se incluyeron árboles que se encontraron creciendo libres de competencia, la elección del arbolado no incluyó solamente arbolado dominante o codominante en un rodal, aunque fue requisito que el arbolado fuese de varias edades y que creciera libre de competencia y sobre diferentes condiciones del lugar. Así se asegura que la información refleje el crecimiento real en altura en una amplia gama de edades, evitando el sesgo de usar sólo arbolado maduro. Se midieron árboles por especie a una distancia de 100 m uno de otro y se procuró medir árboles pequeños para identificar la edad promedio del arbolado a la altura de 1.30 m.

3.2.1 Variables evaluadas

Las variables a considerar en el formato de campo fueron las siguientes: No. árbol, coordenadas de cada individuo, altitud, exposición, % de pendiente, diámetro normal (cm), corteza (mm), altura total (m), diámetro de la copa (m), longitud de copa (m) y finalmente se llevó a cabo la extracción de la viruta del tronco a la altura de 1.30 m.

En las diferentes localidades; se utilizó Geoposicionador Satelital (GPS) para obtener las coordenadas de los árboles seleccionados; libreta de campo para registro de los datos; cinta diamétrica y flexómetro para medir los

diámetros tanto del fuste como de la copa, este último en forma de cruz, para realizar dos

Cuadro 7. Tipo de suelo para las especies en estudio según su ubicación.

| Especie | Localidad | Edafología | Fórmula de suelo | Descripción del Suelo |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|------------------|---|
| | Puerto Pastores | Litosol, Rendzina, Regosol Calcárico | I+E+Rc/2 | Suelos con clase textural media, el Litosol es un suelo con menos de 10 cm. de espesor y Regosol con algo de cal a menos de 50 cm de profundidad |
| <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart. | La Poza | Feozem calcárico, Regosol Calcárico | Hc+Rc/2/G | Suelos con clase textural media, el Feozem es un suelo con una capa superficial oscura, algo gruesa, rica en materia orgánica y nutrientes y Regosol con algo de cal a menos de 50 cm de profundidad |
| | Primavera | Feozem calcárico, Regosol Calcárico | Hc+Rc/2/G | |
| | Y Griega de Arriba | Feozem calcárico, Regosol Calcárico | Hc+Rc/2/G | |
| <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry | San Rafael del Llano "El Pinalito" | Litosol, Rendzina, Regosol Calcárico | I+E+Rc/2 | Suelos con clase textural media, el Litosol es un suelo con menos de 10 cm. de espesor, tiene Regosol con algo de cal a menos de 50 cm de profundidad y Rendzinas que generalmente están a menos de 50 cm de espesor encima de rocas duras ricas en cal |
| <i>Pinus patula</i> Schltdl & Cham. | Agua Fría | Litosol, Rendzina, Regosol Calcárico | I+E+Rc/2 | Suelos con clase textural media, el Litosol es un suelo con menos de 10 cm. de espesor, tiene algo de cal a menos de 50 cm de profundidad y Rendzinas que generalmente están a menos de 50 cm de espesor encima rocas duras ricas en cal |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco | Mesa de las Tablas | Litosol, Rendzina, Regosol Calcárico | I+E+Rc/2 | Suelos con clase textural media, el Litosol es un suelo con menos de 10 cm. de espesor, tiene algo de cal a menos de 50 cm de profundidad |
| Fuente: | (INEGI, | | | 1998a) |

medidas y obtener un promedio; pistola Haga para la medición de la altura del árbol y la longitud de la copa, considerando para esta medición la primera rama como la base de la copa hasta la última punta del fuste; brújula para el trazo de los rumbos, orientación y para obtener las exposiciones geográficas de cada individuo.

3.2.2 Obtención de virutas de crecimiento y acondicionamiento de las muestras

Las muestras (virutas) se obtuvieron de cada uno de los árboles a la altura de 1.30 m con ayuda del taladro o barreno de Pressler. Para esto los árboles seleccionados se “taladraron” para extraer la viruta procurando que el taladro tocara el centro del fuste para contabilizar el total de anillos. Una vez extraídas las virutas en forma de cilindros se guardaron en popotes para su traslado y protección, estos fueron marcados con el nombre de la especie, el número de árbol, el lugar de extracción y la fecha de colecta.

Para el análisis en viruta y la evaluación de incremento, se llevó a cabo el montaje de las virutas en fajillas de madera acanaladas las cuales se adhirieron con pegamento, rotuladas propiamente con los datos de origen de cada uno de los individuos, luego, se colocaron en una estufa de secado para apresurar el secado durante un día, después de estar completamente secas las muestras se lijaron transversalmente para facilitar el conteo de los anillos y su medición.

Se realizó el conteo del número total de anillos (años), así como la medición de éstos, en lo que corresponde al tiempo de paso, la longitud de los últimos 5 anillos y la longitud de los últimos 10 anillos, así como el grosor de corteza en su caso.

Además, se llevó a cabo la medición de los diámetros a cada cinco anillos doblando la medida para obtener los diámetros correspondientes a cada clase de edad para cada una de las virutas y por consiguiente a cada una de las especies.

3.3 Evaluación de las virutas y cálculo de los incrementos

De las muestras colectadas se utilizaron 110 virutas (Cuadro 8) con sus respectivos datos de diámetro normal y altura total para el análisis de crecimiento e incremento.

3.3.1 Determinación de la edad a la altura del pecho

Para determinar la edad a la base y a 1.30 m se tomaron pares de muestras con el taladro de dos árboles por cada especie a 0.30 y a 1.30 m, se tuvo que para la especie de *Pinus arizonica* var. *stormiae*, la edad para alcanzar 1.30 m fue de 12 años, para *Pinus estevezii* la edad estimada fue de 13 años, para la especie *Pinus patula* la edad fue de 11 años y para *Pseudotsuga menziesii* se encontró una edad de 15 años, se tomaron virutas a una altura de 0.30 m de árboles que tuvieran una altura mínima de 1.30 m para *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* var. *stormiae* y *P. estevezii*, en las cuales se investigó la edad que logra la especie a un altura de 30 cm (González, 2000; Juárez *et al.*, 2006; Patricio, 2014) para *P. patula* se obtuvo la viruta a la base para determinar la edad total. Posteriormente se procedió a determinar la edad promedio para una altura a 1.30 m por diferencia como se explica en el Cuadro 9.

Cuadro 8. Árboles muestreados y taladrados por especie.

| Especie | No. de árboles taladrados | DN (min. y máx.) | HT (min. y máx.) | Edad (min. y máx.) |
|---|---------------------------|------------------|------------------|--------------------|
| <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart. | 31 | 12.1 - 66 | 4 - 18 | 18 - 169 |
| <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry | 29 | 6 - 69.6 | 4 - 19 | 6 - 111 |
| <i>Pinus patula</i> Schltld & Cham. | 19 | 5.1 - 68.8 | 4.8 - 29 | 14 - 91 |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco | 31 | 7 - 47.8 | 4 - 23 | 20 - 103 |

Dónde: DN = diámetro normal (cm), HT = altura total (m), Edad = Número de años, min. = número más pequeño muestreado y máx. = número más grande muestreado.

Cuadro 9. Edad (años) promedio a 1.30 m en la localidad de las especies en estudio.

| Número de muestra | <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> | <i>Pinus estevezii</i> | <i>Pinus patula</i> | <i>Pseudotsuga menziesii</i> |
|-------------------|---|------------------------|---------------------|------------------------------|
| | | | | |

| | | | | |
|---------------|---|---|---|----|
| 1 | 8 | 6 | 3 | 16 |
| 2 | 8 | 7 | 3 | 6 |
| 3 | | 6 | | 3 |
| Edad promedio | 8 | 6 | 3 | 8 |

3.3.2 Cálculo de los incrementos

Para la determinación de los incrementos se procedió a graficar los valores del incremento corriente anual (ICA) y los valores del incremento medio anual (IMA), a partir de los valores de altura y diámetro.

Para la obtención del incremento corriente anual (ICA) se utilizó la fórmula:

$$ICA = \frac{DN_2 - DN_1}{E_2 - E_1} =$$

Dónde:

DN_2 = Valor del diámetro normal anterior o menor

DN_1 = Valor del diámetro normal superior o mayor

E_1 = Edad anterior

E_2 = Edad superior

Para la obtención del incremento medio anual (IMA) este se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$IMA = \frac{DN (estimados)}{Edad}$$

Donde:

DN = diámetro normal

3.4 Análisis estadístico

Se generó una base de datos en la plataforma de Excel, tanto en los datos adquiridos en campo como para los datos obtenidos de la evaluación en virutas, el formato para su evaluación se encuentra en el apéndice 9. La información obtenida de campo y la evaluación en virutas, se procesó mediante el paquete de análisis estadístico S. A. S. (Statistical Analysis System 9.0). Para realizar el procedimiento de regresión no lineal y calcular los valores predichos de las variables en altura y diámetro, con los modelos de crecimiento a utilizar se realizó en SAS el procedimiento Proc NLin, el cual, ayuda para

obtener por regresión los parámetros de cada uno de los modelos a ensayar por especie.

3.4.1 Puntos dudosos o aberrantes

Para que no hubiera problemas en el ajuste de los modelos y su respectivo análisis, se procedió a revisar la base de datos para verificar los datos que pudieran estar incorrectos por diversas circunstancias como pudo haber sido, una mala medición o por una mala captura en la base de datos digital, tal es el caso de la base de datos que se tiene para la altura y diámetro de *Pinus patula*, ya que se eliminaron cuatro árboles que podrían provocar un mala respuesta del ajuste en los modelos a utilizar, estos árboles se suplantaron por árboles hipotéticos de una edad de cero años con un diámetro y una altura de cero para que el ajuste del modelo partiera del origen y tuviera una mejor representación.

3.4.2 Modelos de crecimiento e incremento y ajustes

Los modelos de crecimiento para altura y diámetro, a utilizar son aquellos reportados por Clutter *et al.*, (1983), Sit y Poulin (1994) en total son seis, los cuales se pueden observar en el Cuadro 10. A éstos por medio del paquete estadístico de SAS se les extrajo los estadísticos y los coeficientes de regresión.

Por otro lado para el cálculo de algunos estadísticos que no brinda el paquete SAS, se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$R^2 = 1 - \frac{SS(Residual)}{SS(Total\ Correcto)}$$

$$R_{Adj}^2 = 1 - \frac{MS(Residual)}{MS(Total\ correcto)}$$

Donde: R^2 = coeficiente de correlación al cuadrado, R_{adj}^2 = coeficiente de correlación ajustado, SS=Suma de cuadrados, MS=Cuadrado Medio.

Se estimaron los parámetros de cada modelo y se obtuvo la suma de cuadrados del error para cada uno de ellos; además, se determinó la curva de crecimiento a partir de la selección del mejor entre estos con el fin de realizar su comparación.

Cuadro 10. Modelos de crecimiento utilizados para el ajuste en altura y diámetro de las cuatro especies, para el noreste de México.

| Nombre | Modelo |
|--------------------|---|
| 1 Schumacher: | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{-1})$ |
| 2 Chapman–Richards | $Y = B_0 [1 - \exp(-B_1 E)]^{B_2}$ |
| 3 Weibull | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{B_2})$ |
| 4 Hossfeld IV | $Y = B_0 (1 + \exp(B_1) E^{-B_2})^{-1}$ |
| 5 Logístico | $Y = B_1 (1 + B_2 * \exp -B_1 * E)$ |
| 6 Korf | $Y = B_0 \exp -B_1 * E^{B_2}$ |

Dónde: Y= variables dasométricas del árbol, diámetro (cm), altura (m); E= edad (años); Exp= exponente; B₀,... B_n = parámetros estadísticos del modelo.

En tanto los modelos de incremento (Cuadro 11) a utilizar son aquellos reportados por Vanclay (1994).

Cuadro 11. Modelos de incremento utilizados para las variables de altura y diámetro en las cuatro especies.

| Nombre | Modelo |
|-----------------|---------------------------------------|
| 1 (cuadrática) | $Y = B_0 + B_1 X + B_2 X^2$ |
| 2 | $Y = B_0 + B_1 \ln X$ |
| 3 | $\ln Y = B_0 + B_1 X$ |
| 4 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X$ |
| 5 (Vanclay) | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X$ |
| 6 (Wykoff) | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^2$ |
| 7 (Bertalanffy) | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^B_3$ |

Dónde: y = ICA e IMA para las diferentes variables dasométricas; B₀,... B_n = parámetros de regresión de la ecuación; X = edad; ln = logaritmo natural.

Fuente: Alder (1980); Vanclay (1994); Sit y Poulin (1994).

3.4.3 Selección y comparación de los modelos de crecimiento e incremento

Para la selección del modelo con mejor ajuste del crecimiento, los valores de los estadísticos fueron comparados para cada modelo con base en los siguientes criterios: los valores de los cuadrados medios del error (CME) deberán de ser los más bajos, contar con los valores más altos del coeficiente de determinación (R²) y del coeficiente de determinación ajustado (R²_{Adj}), además de representar gráficamente la realidad de los datos procurando que la tendencia del crecimiento inicie a partir del origen.

Para el caso del mejor modelo de incremento se eligió a aquel por medio de los valores estadísticos, considerando principalmente el mayor valor de R^2_{Adj} y menor valor en el CME.

Para cumplir con el primer objetivo específico se llevó a cabo lo siguiente:

Se consideró las respuestas de las variables representadas en un diagrama de dispersión (gráficamente), con el modelo ajustado para observar su respuesta y los residuales con los valores ajustados para conocer y evaluar el ajuste de los modelos se visualizaron según lo dispuesto por Vanclay (1994). Además, se tomó en cuenta que la diferencia entre los residuales “e” de los valores reales con los valores de los predichos fuera uniforme, es decir, $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ entonces, lo ideal es que las variaciones de los e_i con respecto a las \hat{Y} sea uniforme.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. 1 Modelos de crecimiento e incremento en altura y diámetro

Pinus arizonica var. *stormiae*, resultó ser la especie donde los valores de ajuste en altura están muy próximos entre sí, ya que los modelos utilizados se encuentran en un rango de R^2 ajustada que va de 0.9653 a 0.9576, cada modelo cuenta con un buen ajuste estadísticamente (Apéndice 1). *Pinus estevezii* comparte la misma característica de *P. arizonica* var. *stormiae*, pues el ajuste de los modelos utilizados de acuerdo al R^2 ajustada también son muy cercanos al rango en el que se encuentran respecto al R^2 ajustada va de 0.9577 a 0.9474 (Apéndice 3). El *Pinus patula*, presenta modelos que están muy cercanos en ajuste y modelos que no tienen un buen ajuste y la diferencia entre los valores de R^2 ajustada y CME de cada modelo es mayor, en este caso los R^2 ajustada van de 0.9810 a 0.3910 (Apéndice 5). En el caso de *Pseudotsuga menziesii*, los modelos tienen valores estadísticos muy cercanos en R^2 ajustada, ya que los valores están entre 0.9668 y 0.9339 (Apéndice 7).

Los mejores modelos seleccionados por contar con los estadísticos adecuados a los criterios establecidos y por tener la mejor representación gráfica en el ajuste de las curvas en altura son el modelo de Chapman-Richards para las tres especies del genero *Pinus* en estudio y el modelo Hosffeld IV para *Pseudotsuga menziesii* (Cuadro 12).

En la predicción del diámetro normal en el crecimiento de *Pinus arizonica* var. *stormiae*, los modelos utilizados (Apéndice 2) presentan valores muy próximos entre uno y otro, es decir, el valor de R^2 ajustada se encuentra entre 0.9617 y 0.9472, situación que se repitió en el caso de *P. estevezii* con valores de 0.9468 a 0.9327 (Apéndice 4) y *Pseudotsuga menziesii* con valores de 0.9570 a 0.9274 (Apéndice 8), caso distinto a lo que sucedió con los valores en R^2 ajustada para el crecimiento de *P. patula*, ya que la mayoría se encuentran cercanos entre si excepto por el modelo Korf, el rango en el que se encuentra la mejor R^2 ajustada va de 0.9582 a 0.2442 (Apéndice 6).

Los mejores modelos en ajuste seleccionados del total utilizado para predecir el diámetro normal de las cuatro especies son el modelo Chapman-Richards para *Pinus estevezii*, *P. patula* y *Pseudotsuga menziesii*, por otro lado

el modelo Schumacher es el mejor para *P. arizonica* var. *stormiae*, estos modelos

(Cuadro 13) son aquellos que cuentan con valores altos (> 0.9) de R^2 ajustada, cumplieron los criterios establecidos para su selección y cuentan con la característica de ser los que mejor representan la realidad de los datos, además, cuentan con buena bondad de ajuste.

Se ha mencionado que el coeficiente de determinación ajustado es más comparable a R^2 para los modelos que implican diferentes números de parámetros como es el caso de este estudio, ya que un modelo con gran R^2 ajustada es más favorable, debido a su estructura, además, el criterio R^2 ajustada a menudo conduce a la misma conclusión que el criterio Cuadrado Medio del Error (Sit y Poulin, 1994).

El ajuste de las ecuaciones de crecimiento para el caso de las especies del género *Pinus* en este estudio se logró en su mayoría con los modelos de Chapman-Richards, Schumacher y Hossfeld IV, algo similar a lo que mencionan algunos de los autores, Cabe mencionar que en este estudio se empleó un tamaño de muestra pequeño en comparación con otros estudios, sin embargo, el número de datos que se utilizó para realizar los ajustes es cercano a otros estudios donde se obtuvieron ajustes similares, se puede decir que este es un estudio más, donde se revalida el uso de este modelo para predecir el crecimiento en coníferas (Cuadro 14 y 15).

El modelo Chapman-Richards fue el que tuvo mayor consistencia en representación de las cinco especies estudiadas, además de haber utilizado los modelos de Korf, Weibull, Schumacher, Hossfeld IV y el Logístico para su comparación en ajuste y representación. Esto muestra que los modelos son los más comunes y adecuados para representar el crecimiento de pinos por su bondad de ajuste (Corral y Návar, 2005).

4.2 Crecimiento e incremento en altura

Referente a los datos obtenidos en altura para los 31 árboles de *Pinus arizonica* var. *stormiae*, el modelo que tuvo mejor ajuste a su dispersión y el que presentó los mejores valores en los estadísticos fue el modelo de Chapman-Richards, con el cual se generaron las curvas de crecimiento e incremento.

La curva de crecimiento ajustada al modelo no presenta la forma habitual de “S” sigmoidea, solamente muestra un ligero punto de inflexión y un crecimiento ascendente que parece no tener punto de culminación a la edad de

Cuadro 12. Modelos ajustados en altura para las cuatro especies en estudio y sus respectivos estadísticos.

| Especie | Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} |
|---|------------------|--|----------------|-------------------------------|
| <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart. | Chapman-Richards | $Y = 4.4072[1 - \exp(-0.0197 E)]^1$ | 0.9676 | 0.9653 |
| <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry | Chapman-Richards | $Y = 3.8136[1 - \exp(-0.0367 E)]^1$ | 0.9598 | 0.9568 |
| <i>Pinus patula</i> Schltl & Cham. | Chapman-Richards | $Y = 4.2046[1 - \exp(-0.00603 E)]^1$ | 0.9830 | 0.9810 |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco | Hossfeld IV | $Y = 8.8375(1 + \exp(14.3064)E^{-4.138})^{-1}$ | 0.9690 | 0.9657 |

Y=altura; E=Edad (años); R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado.

Cuadro 13. Modelos ajustados en diámetro para las cuatro especies en estudio y sus respectivos valores estadísticos.

| Especie | Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} |
|---|------------------|---------------------------------------|----------------|-------------------------------|
| <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart. | Schumacher | $Y = 58.6361 \exp^{(24.4226 E^{-1})}$ | 0.9642 | 0.9617 |
| <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry | Chapman-Richards | $Y = 59.5719[1 - \exp(0.0232 E)]^1$ | 0.9481 | 0.9442 |
| <i>Pinus patula</i> Schltl & Cham. | Chapman-Richards | $Y = -183.3[1 - \exp(-0.00292 E)]^1$ | 0.9567 | 0.9517 |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco | Chapman-Richards | $Y = 47.239[1 - \exp(-0.018E)]^1$ | 0.949 | 0.945 |

E=Edad (años); Y=diámetro; R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado.

Cuadro 14. Estudios con modelos de mejor ajuste en altura.

| Autor | Año | Especie(s) | Modelo(s) | No. Árboles |
|------------------------|------|---|---|------------------------|
| Aguilar | 1991 | <i>Pinus douglasiana</i> | Chapman-Richards, Weibull, Schumacher & Gompertz | 62 |
| Benavides | 1991 | <i>Pinus michoacana</i> , <i>P. oocarpa</i> , <i>P. leiophylla</i> & <i>P. lumholtzii</i> | Schumacher | 50, 70, 45 y 100 |
| Madrigal y Ramírez | 1995 | <i>Pinus douglasiana</i> & <i>P. lawsonii</i> | Schumacher | 40 |
| Monroy | 1996 | <i>Pinus patula</i> | Schumacher | 70 |
| Arteaga | 2000 | <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>P. oaxacana</i> , <i>P. radiata</i> & <i>P. montezumae</i> | Chapman-Richards | 38 |
| González Z. | 2000 | <i>Pinus estevezii</i> | Schumacher & Weibull | 114 |
| Bautista | 2001 | <i>Pinus rudis</i> | Weibull | 30 |
| Monárrez y Ramírez | 2003 | <i>Pinus duranguensis</i> | Chapman-Richards | 47 |
| Corral <i>et al.</i> | 2004 | <i>Pinus cooperi</i> , <i>P. durangensis</i> , <i>P. engelmannii</i> , <i>P. leiophylla</i> & <i>P. herrerae</i> | Hossfeld IV & Chapman-Richards | 47, 37, 34, 17 y 25 |
| Corral y Návar | 2005 | <i>Pinus cooperi</i> , <i>P. durangensis</i> , <i>P. engelmannii</i> , <i>P. leiophylla</i> & <i>P. herrerae</i> | Chapman-Richards | 23/sp |
| Calvillo <i>et al.</i> | 2005 | <i>Pinus herrerae</i> | Chapman-Richards | 36 |
| Montiel y Zamudio | 2007 | <i>Pinus patula</i> | Schumacher | 4 |
| López y Valles | 2009 | <i>Pinus durangensis</i> | Chapman-Richards, Schumacher & Weibull | 78 |

Cuadro 15. Estudios con modelos de mejor ajuste en diámetro.

| Autor | Año | Especie(s) | Modelo(s) | No. Árboles |
|------------------------|------|--|----------------------------|-------------|
| Arteaga | 2000 | <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>P. oaxacana</i> , <i>P. radiata</i> y <i>P. montezumae</i> | Chapman-Richards | 38 |
| González Z. | 2000 | <i>Pinus estevezii</i> | Schumacher | 114 |
| Bautista | 2001 | <i>Pinus rudis</i> | Chapman-Richards | 30 |
| Fontes <i>et al.</i> | 2003 | <i>Pseudotsuga menziesii</i> | Chapman Richards & Korf | 150 |
| Monárrez y Ramírez | 2003 | <i>Pinus duranguensis</i> | Schumacher | 47 |
| Corral y Návar | 2005 | <i>Pinus cooperi</i> , <i>P. durangensis</i> , <i>P. engelmannii</i> , <i>P. leiophylla</i> & <i>P. herrerae</i> | Chapman-Richards & Weibull | 23 |
| Calvillo <i>et al.</i> | 2005 | <i>Pinus herrerae</i> | Gompertz | 36 |
| Montiel y Zamudio | 2007 | <i>Pinus patula</i> | Chapman-Richards | 4 |
| Cervantes | 2014 | <i>Pseudotsuga menziesii</i> & <i>Picea martinezii</i> | Korf | 77 |

180 años, el ritmo de crecimiento es ascendente de acuerdo al modelo de Chapman-Richards.

La curva de incremento ajustada en altura de *Pinus arizonica* var. *stormiae*, para el ICA se logró con el modelo de Bertalanffy (No. 7) pues este tuvo un ajuste del 100 por ciento al contar con una R^2 ajustada de 1 y un cuadrado medio del error (CME) de $1.63E^{-20}$, este fue el mejor modelo y seguido de este se encuentra el modelo de Vanclay y el Modelo 3 con una $R^2_{Adj} = 0.9924$ y un CME = 0.0074 y $R^2_{Adj} = 0.9908$ y un CME = 0.0090 respectivamente, los otros modelos también tuvieron un buen ajuste sin embargo, el valor de la R^2_{Adj} es menor y el valor en el CME para cada uno de ellos es mayor (Apéndice 9).

La curva de incremento ajustada para el IMA coincidió en el mismo modelo con una $R^2_{Adj} = 0.9998$ y un CME = 0.00002, el modelo más próximo en ajuste de acuerdo a sus estadísticos fue el modelo de Vanclay pero tuvo valores menores en la R^2_{Adj} y valor mayor en el CME. Los otros modelos se encuentran con estadísticos más bajos (Apéndice 10).

En este caso ambas curvas de incremento son de forma descendente se originan con su punto máximo de incremento a edades tempranas partiendo casi desde el mismo punto y posteriormente comienzan a decrecer sin mostrar un punto de cruce posteriormente. Su incremento medio anual máximo alcanza los 0.2810 m al año de edad y su incremento corriente anual máximo lo alcanza con 0.2774 m a los dos años, este punto es el único donde interceptan ambas curvas (Figura 2).

Respecto a los datos obtenidos en altura para los 29 árboles de *Pinus estevezii*, el modelo que tuvo un mejor ajuste a su dispersión y el que presentó los mejores estadísticos fue el modelo Schumacher.

Es importante mencionar que para la representación gráfica se tomó en cuenta al modelo Chapman-Richards, el cual también tiene buen ajuste que se queda un poco debajo de los demás modelos.

La curva de crecimiento no presenta la forma habitual de "S" sigmoidea y ésta se presenta casi como una línea inclinada ascendente con un punto de inflexión que tiene un crecimiento ascendente hasta la edad de 85 años, para luego mantenerse horizontal, no tiene punto de culminación a la edad de 110

años según el ajuste del modelo Chapman-Richards como se ve en la Figura 2 para el diagrama de dispersión de los datos en altura.

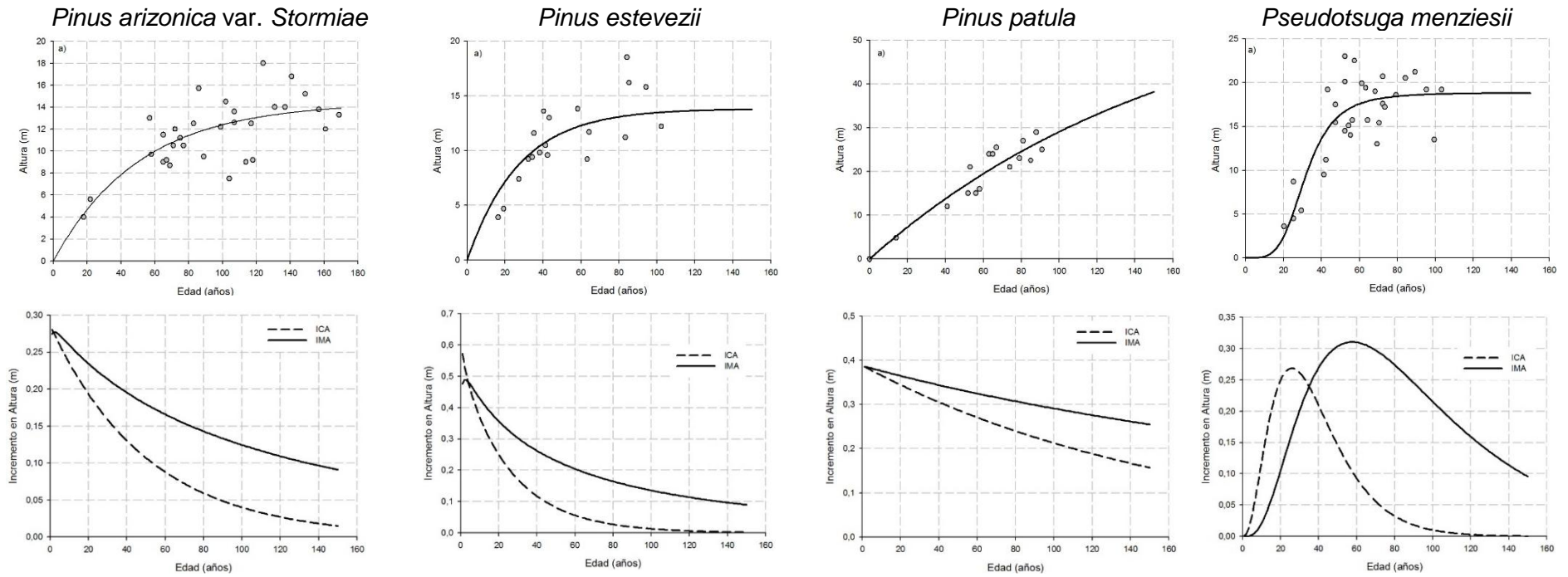


Figura 2. Diagrama de dispersión de datos de las cuatro especies, con la línea de ajuste del mejor modelo y curvas de ICA e IMA en relación a la variable altura.

La curva de incremento ajustada del ICA para *Pinus estevezii* se construyó con el modelo de Vanclay (No. 5), el valor de $R^2_{Adj} = 0.9991$ y un $CME = 0.0023$ fueron los mejores, los modelos que se aproximaron en ajuste de acuerdo a sus estadísticos fueron el Modelo 3 y el Modelo 6 al tener valores cercanos (Apéndice 11).

El ajuste de la curva de incremento para el IMA se realizó con el modelo de Bertalanffy porque el valor de la $R^2_{Adj} = 0.9995$ fue el más alto y el valor del $CME = 0.0001$ fue el más bajo, los otros modelos mostraron buen ajuste pero los valores en R^2_{Adj} fueron menores y en el CME fueron mayores (Apéndice 12).

Las curvas ajustadas se interceptan en sus inicios aproximadamente a la edad de 4 años, casi empiezan con su punto máximo de incremento y posteriormente comienzan a decrecer alcanzando su incremento corriente anual a la altura de 0.5723 m en su primer año y su incremento medio anual máximo es de 0.4896 m en su segundo año (Figura 2).

Para los datos obtenidos en altura de los 19 árboles de *Pinus patula*, el modelo que tuvo mejor ajuste a su dispersión y el que presentó los mejores valores en los estadísticos fue el modelo de Chapman-Richards (Figura 2).

La curva de crecimiento ajustada para la altura no presenta la forma "S" sigmoideal. Solamente muestra una línea inclinada ascendente de acuerdo al modelo de Chapman-Richards, presenta una respuesta de crecimiento que se mantiene en aumento para todas las edades y no muestra un punto de culminación a la edad de 150 años. Se puede observar que esta especie sigue un buen ritmo de crecimiento (Figura 2).

En *Pinus patula*, la curva de incremento ajustada del ICA se desarrolló con el modelo de Bertalanffy al igual que para el IMA, los valores de la R^2_{Adj} y del CME son para $R^2_{Adj} = 1$ y $CME = 0.0000$ y para IMA valores idénticos. Los modelos más cercanos a este en ICA son el 5 y el 6 y el resto se quedan más abajo (Apéndice 13), del resto de los modelos para el ajuste de IMA el modelo más cercano al seleccionado es el de Wykoff (Apéndice 14).

Como se observa en la Figura 2, ambas curvas ajustadas para el incremento parten desde el mismo punto y no presentan la forma típica de campana, tampoco llegan a cruzarse y la tendencia es en decremento, en su primer año alcanzan sus incrementos máximos y posteriormente comienzan a disminuir. El ICA máximo lo presenta en su primer año de edad para después

disminuir, alcanzando 0.3859 m y en IMA alcanza un incremento de 0.3859 m como máximo.

Respecto a los datos que se obtuvieron en altura para los 31 árboles de *Pseudotsuga menziesii*, el modelo que tuvo mejor ajuste a su dispersión y el que presentó los mejores valores en sus estadísticos fue el modelo Logístico, seguido del modelo Hossfeld IV por tener los valores de los estadísticos más cercanos al haber poca diferencia entre ellos, para la representación gráfica de la curva de ajuste se utilizó este último modelo (Figura 2).

La curva de crecimiento ajustada presenta la forma de "S" sigmoidea. En este caso la curva de acuerdo al modelo seleccionado (Hossfeld IV), presenta un crecimiento ascendente que se detiene a la edad de 80 años y posterior a esos años el crecimiento se mantiene sin mostrar un punto de culminación a la edad de 150 años, el mayor crecimiento lo muestra de los 10 a 50 años, la curva tiene dos puntos de inflexión aproximadamente a los 20 años y el otro a los 70 años aproximadamente (Figura 2).

La curva ajustada para *Pseudotsuga menziesii* del ICA y la curva ajustada para el IMA fueron representadas con el modelo de Bertalanffy, al contar con los mejores valores estadísticos, como es una $R^2_{Adj} = 0.8426$, $CME = 0.7514$ y una $R^2_{Adj} = 0.9830$, $CME = 0.0335$, respectivamente, los otros modelos no tienen un nivel de ajuste adecuado y se encuentran con valores estadísticos muy bajos en el caso de la R^2_{Adj} . Solo están próximos en ajuste para el ICA los modelos 5 y 6, el modelo más cercano en ajuste al IMA fue el modelo Vanclay (Apéndice 15 y 16).

En este caso la curva del ICA si tiene la forma de campana y la del IMA también el incremento corriente anual máximo queda por debajo del incremento medio anual máximo, pues en ICA se alcanza un incremento de 0.2686 m a los 26 años aproximadamente y en IMA se logra un incremento de 0.3105 m a los 59 años de edad aproximadamente, tienen un punto de intercepción, a los 35 años de edad aproximadamente (Figura 2).

Al comparar la curva de crecimiento de *Pinus arizonica* var. *stormiae* con las demás se puede observar que la tendencia del crecimiento es similar a la de *P. estevezii*, difiere al inicio con la de *P. patula* y es totalmente distinta a la tendencia que toma *Pseudotsuga menziesii* al ser la única que presenta la forma sigmoidea; se puede observar como a la edad de 50 años *P. arizonica*

var. *stormiae* alcanza menores alturas que *P. estevezii*, *P. patula* y *Pseudotsuga menziesii*, posterior a esa edad las que no dejan de aumentar en crecimiento son *P. arizonica* var. *stormiae* y *P. patula*.

Al contrastar las tendencias de la curva de incremento de *Pinus arizonica* var. *stormiae* contra las otras especies se puede observar que las tendencias son similares en *P. estevezii* y *P. patula* al ser decrecientes y en *Pseudotsuga menziesii* cambia totalmente al presentar una distribución normal o asimétrica.

4.3 Crecimiento e incremento en diámetro

Para el conjunto de datos obtenidos por análisis de crecimiento en virutas de 31 árboles de la especie *Pinus arizonica* var. *stormiae*, el modelo de crecimiento que mejor se ajustó fue el de Schumacher, al presentar los mejores valores estadísticos, los modelos que le siguen en mejor ajuste son el de Korf y Hossfeld IV.

La curva de crecimiento ajustada no presenta una forma Sigmoidea o de “S”, en este caso la curva presenta un crecimiento ascendente en todas las edades, presenta un ligero punto de inflexión aproximadamente a la edad de 40 años y no tiene culminación (Figura 3).

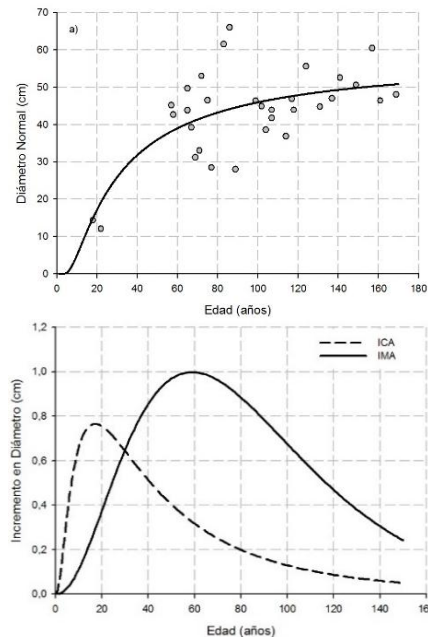
La curva ajustada (Figura 3) en diámetro de *Pinus arizonica* var. *stormiae*, para el ICA se logró con el modelo 7 de Bertalanffy, ya que este tuvo el valor de $R^2_{Adj} = 0.7239$ y el más bajo en el CME = 0.367, los otros modelos tiene valores muy bajos en R^2_{Adj} y valores más altos en el CME (Apéndice 17).

La curva de incremento ajustada para el IMA se generó con el modelo de Vanclay pues el valor del coeficiente de determinación fue de una $R^2_{Adj} = 0.4225$ y un CME = 1.68839, en este caso los otros modelos tuvieron un ajuste muy bajo de acuerdo a los valores de sus estadísticos excepto el modelo de Bertalanffy que tuvo un coeficiente de correlación ajustado mayor a este (Apéndice 18).

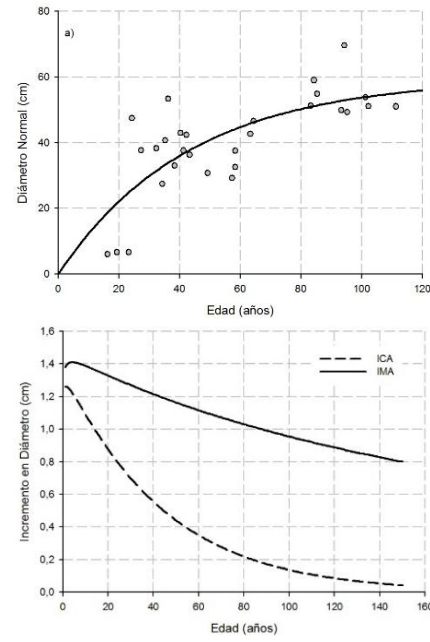
Las curvas de incremento parten del origen y se cruzan a una edad mucho más tardía, se puede observar incluso que el incremento corriente anual queda muy por debajo de los valores que alcanza el incremento medio anual. El incremento medio anual máximo de acuerdo al modelo de ajuste

Seleccionado (Vanclay) llega al cm de diámetro a la edad de 60 años, en el caso del ICA máximo este alcanza 0.7657 cm a la edad de 17 años y a la edad de 59 años el IMA máximo que alcanza es de 0.9980 cm (Figura 3).

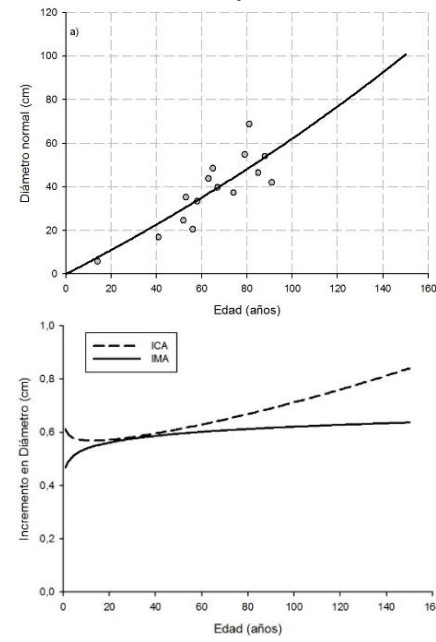
Pinus arizonica var. *Stormiae*



Pinus estevezi



Pinus patula



Pseudotsuga menziesii

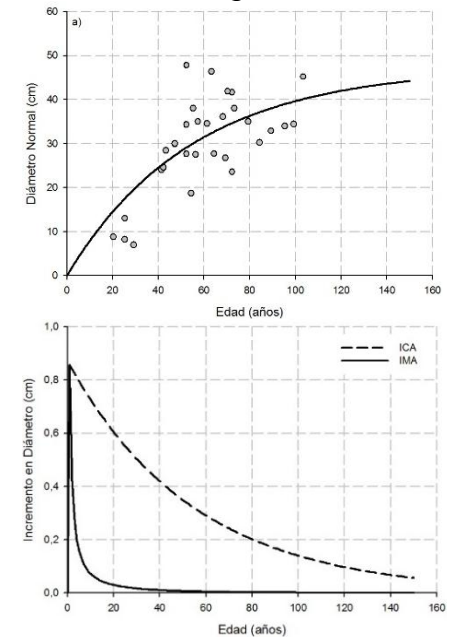


Figura 3. Diagrama de dispersión de datos de las especies en estudio, con la línea de ajuste del mejor modelo y curvas de ICA e IMA en relación a la variable diámetro.

Para el grupo de datos obtenidos por análisis de crecimiento en virutas de 29 árboles de la especie *Pinus estevezii*, el modelo de crecimiento que mejor se tomó en cuenta para elaborar la curva fue Chapman-Richards.

El ajuste del modelo Chapman-Richards presenta un crecimiento rápido en aumento y no muestra un punto de culminación en este caso la curva de crecimiento ajustada a la dispersión de datos en diámetro no presenta una forma habitual de “S” sigmoidea, la tendencia del crecimiento presenta un aumento de forma constante hasta la edad de 115 años no deja de crecer y no tiene un punto de culminación, presenta un ritmo de crecimiento ascendente para todas las edades (Figura 3).

La curva de incremento ajustada en diámetro de *Pinus estevezii* para el ICA se logró con el modelo de Vanclay (Modelo 5) y los valores de los estadísticos que se obtuvieron para este modelo son para la $R^2_{Adj} = 0.9989$ y para el CME = 0.0007 el modelo 3 se sigue de este al tener una $R^2_{Adj} = 0.9986$ y un CME = 0.0009 y posterior a estos dos se sigue el modelo de Wykoff (Modelo 6) con una $R^2_{Adj} = 0.9835$ y un CME = 0.0108, en el caso de los demás modelos sus valores son bajos en la R^2_{Adj} y altos en el CME (Apéndice 19).

La curva de incremento ajustada para el IMA se realizó con el modelo de Bertalanffy pues este fue el que tuvo el mejor ajuste con una $R^2_{Adj} = 0.9999$ y un CME = 0.00001, el segundo en mejor ajuste resultó ser el Modelo 5 (Vanclay) pues este tiene valores cercanos a los antes mencionados, el valor de $R^2_{Adj} = 0.9892$ y el valor para el CME = 0.00106 y el tercero más cercano fue el Modelo 3 con una de $R^2_{Adj} = 0.9891$ y un CME = 0.00108, los otros modelos tuvieron un buen ajuste, sin embargo los valores en la R^2_{Adj} son menores y el valor que tienen de CME son mayores (Apéndice 20).

Las curvas ajustadas tienen su punto máximo de crecimiento en sus primeros años el ICA alcanza los 1.2642 cm al año de edad y el IMA alcanza los 1.4017 cm a los dos años de edad, después comienzan a decrecer ambos incrementos sin tener un punto de cruce y con forma descendente tanto el ICA como el IMA (Figura 3).

Para el conjunto de datos obtenidos por análisis de crecimiento en virutas de *Pinus patula*, el modelo de crecimiento que mejor se ajustó fue el modelo Chapman-Richards. La curva de crecimiento ajustada no llega a presentar la forma habitual de “S” sigmoidea, más bien, es una línea inclinada

ascendente sin puntos de inflexión la cual muestra al crecimiento que se mantiene en ascenso.

Para *Pinus patula* Schltl & Cham., la curva de incremento ajustada del ICA en diámetro se generó con el modelo Vanclay (Modelo 5) tomando en cuenta que el valor de la $R^2_{Adj} = 0.8773$ fue el más alto y que el valor del CME = 0.0021 fue el más bajo ya que respecto a los demás modelos la diferencia entre sus estadísticos se da a notar por sus valores bajos en la R^2_{Adj} y sus valores altos en el CME (Apéndice 21).

La curva de incremento ajustada para el IMA se plasmó con el modelo 7 (Bertalanffy) y en este caso sus valores estadísticos fueron para $R^2_{Adj} = 0.7905$ y para el CME = 0.000932, los otros modelos para esta variable se quedan más alejados (Apéndice 22).

En este caso ambas curvas presentan una forma ascendente y no tienen algún punto de intercepción el primero a la edad de 9 años y el segundo a la edad de 81 años aproximadamente. El incremento corriente anual máximo llega a ser mayor que el incremento medio anual máximo (Figura 3). La curva de IMA tiene una ligera tendencia a ser constante con el paso de tiempo sin embargo, el aumento en el incremento lo mantiene.

Para el conjunto de datos obtenidos por análisis de crecimiento en virutas de 31 árboles de la especie *Pseudotsuga menziesii*, el modelo de crecimiento que mejor se ajustó fue el Logístico, al presentar los mejores valores estadísticos. Cabe mencionar que para el ajuste de la curva de crecimiento se consideró el modelo Chapman-Richards debido a que la representación gráfica de los datos es mejor, además también tiene un buen ajuste aunque los estadísticos tengan un valor más bajo (Figura 3).

La curva de crecimiento ajustada no llega a presentar la forma habitual de "S" sigmoidea. Sin embargo, muestra la forma de una curva cóncava, presenta un crecimiento ascendente hasta la edad máxima que presenta el gráfico y no muestra un punto de culminación.

La curva de incremento ajustada para el ICA en diámetro de *Pseudotsuga menziesii*, se elaboró con el modelo de Bertalanffy (Modelo 7) pues tiene una $R^2_{Adj} = 1$ y un CME = 1.65E-21, el más cercano a los valores estadísticos de este ajuste fue el Modelo 3 con una $R^2_{Adj} = 0.9998$ y un CME = 0.0001217, los valores de los otros modelos se pueden ver en el Apéndice 23

donde se observa la diferencia entre ellos y lo alejado que se encuentran al modelo seleccionado.

La curva de incremento ajustada para el IMA se realizó con el modelo 5 (Vanclay) ya que este tuvo una $R^2_{Adj} = 1$ y un $CME = 2.25E-19$, en este caso el modelo más próximo fue el 5 (Vanclay) al contar con una $R^2_{Adj} = 1$ y un $CME = 9.94E-05$, los modelos restantes tuvieron un ajuste bajo (Apéndice 24).

Las curvas de ajuste tiene forma descendente y presentan un decremento rápido, observe que aquí la curva de ICA es la que alcanza un mayor incremento y la curva de ajuste del IMA se queda por debajo, el incremento corriente anual máximo alcanzado es de 0.8565 cm al primer año de edad y el incremento medio anual máximo que se alcanzó fue de 0.8565 cm también (Figura 3).

En general ninguna de las especies tiene la forma de crecimiento de “S” sigmoidea en sus tendencias, además se puede observar que a una edad de 20 años la que mayores diámetros alcanza es la especie de *Pinus estevezii*, mientras que el *P. patula* es el que presenta menores diámetros, ninguna tiene un punto de culminación y sus diámetros aumentan conforme pasan los años.

P. arizonica var. stormiae, *P. estevezii* y *Pseudotsuga menziesii* tienen una tendencia similar en el desarrollo de su crecimiento y difieren de la tendencia ascendente que mantiene la curva de *P. patula*.

Por otro lado las tendencias de las curvas de incremento comparando a *P. arizonica var. stormiae* que fue la única que tuvo una distribución normal con las demás es la única que mostró esa forma y que las curvas de *P. estevezii* y *Pseudotsuga menziesii* son las que mayor similitud tienen y la que no tuvo parecido alguno fue la tendencia que tuvo el incremento de *P. patula*.

La especie en la cual se logró obtener un punto de cruce en las curvas de incremento es *P. arizonica var. stormiae*, mientras *P. estevezii* y *Pseudotsuga menziesii* muestran un incremento inicial alto y luego tiende a disminuir, por otro lado *P. patula* muestra que su incremento sigue en aumento.

Dentro de la Sierra Purépecha en Michoacán, se encontraron índices de incremento medio anual en altura (IMAA) e incremento medio anual en diámetro (IMAD) de 0.85 a 1.13 m y de 1.3 a 2.2 cm, respectivamente, a una altitud de 1780 m con una edad de 18.8 años en reforestaciones y plantaciones comerciales de *Pinus patula* (Muñoz *et al.*, 2010).

El modelo que tuvo mejor ajuste para la mayoría de los incrementos fue el modelo 7 (Bertanlanffy), seguido de este en ajuste se encuentra el modelo 5 (Vanclay) se presenta un resumen de la consistencia de ambos modelos en el Apéndice 25.

En el método de taladro de Pressler para los estudios de incremento, generalmente se recomienda tomar 150 muestras si el bosque tiene menos de 75 ha; dos muestras por hectárea, si el área del bosque varía entre 75 a 150 ha, y 1.5 muestras si el área es mayor a 150 ha. El número total de muestras depende del grado de seguridad que se desee alcanzar (Klepac, 1976).

Los datos de incremento son muy variables, debido al efecto combinado de las variaciones en el incremento de año con año, por las fluctuaciones climáticas y a los errores de medición instrumentales (Alder, 1980).

González (2001), menciona que el mejor ajuste lo obtuvo con el modelo de Bertanlanffy para el incremento corriente anual (ICA) así como el incremento medio anual (IMA) sobre la especie de *Pinus rudis* en Nuevo León.

Gómez (2007), encontró en *Picea martinezii* al aplicar modelos similares a los de este estudio que el modelo Bertanlanffy es el que más consistencia tiene para el ajuste en la variable diámetro y altura cuando utilizó sus datos para obtener incrementos.

4.4 Comparación de curvas de crecimiento en altura y diámetro

En la Figura 4b, se muestran las curvas de crecimiento en altura para las diferentes especies para las cuales se consideró una edad mínima para su representación gráfica de 100 años donde se observa que la curva de crecimiento en altura para *Pinus patula* sigue en aumento y además es la que mayor crecimiento alcanza durante el periodo considerado. La tendencia que mantiene *P. arizonica* var. *stormiae* indica que su crecimiento continúa pero que puede llegar a ser constante después de los 100 años de edad. Por otro lado, *Pseudotsuga menziesii* en su curva de crecimiento en altura denota un rápido crecimiento entre los 20 y 50 años de edad y posterior a los 60 años comienza a disminuir inclusive mantenerse constante hasta la edad de 100 años.

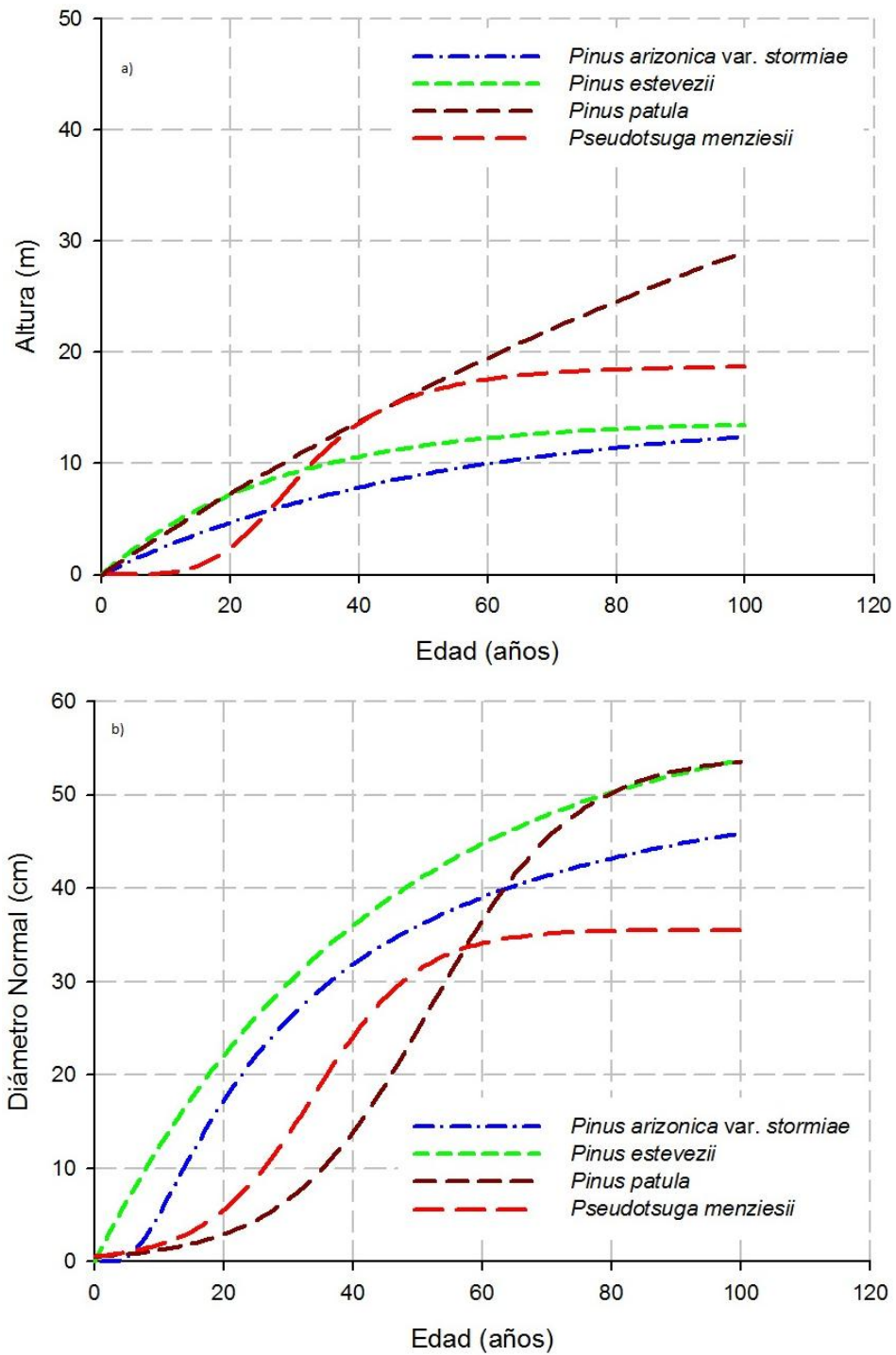


Figura 4. Curvas de crecimiento en relación a la variable de altura (a) y diámetro (b) de las cuatro especies.

Las curvas en diámetro fueron ajustadas con diferentes modelos de crecimiento, como se muestra a continuación para hacer notar el contraste entre curvas de las diferentes especies en el diámetro con relación a la edad para el noreste de México se consideró una edad que todas las especies alcanzaran para que la curva se pudiera comparar con el fin de observar las

diferencias de forma visual entre curvas, para este caso la edad que se consideró fue de 100 años, la curva que muestra un mejor crecimiento en diámetro fue para la especie de *Pinus estevezii* de acuerdo a su modelo de ajuste (Figura 4a).

En general las curvas obtenidas no son típicas al crecimiento sigmoideal ya que, característicamente, una curva de crecimiento en altura en relación con el tiempo muestra un periodo juvenil de menos de una década, un largo periodo de madurez, con tendencia lineal y una tendencia a estabilizarse a edad senil. Por otro lado, la curva de crecimiento en diámetro durante el periodo de madurez presenta una tendencia a la curvilinearidad (forma curva) (Husch *et al.*, 1982).

En los casos donde se encontró una curva de forma sigmoidea correspondiente al modelo de Chapman-Richards y Hossfeld IV para *Pseudotsuga menziesii*, comparado con otros estudios donde se utilizó el mismo modelo las curvas de crecimiento presentan el crecimiento característico en forma de "S" (González, 1997; Cieszewski, 2001; Corral *et al.*, 2004).

Como se pudo observar el crecimiento e incremento de los árboles individuales está influido por sus características genéticas y su interrelación con el medio ambiente, factores climáticos, suelo y de características topográficas (Hooker, 1984). Se puede decir que la similitud en la tendencia del crecimiento de *Pinus arizonica* var. *stormiae* y *P. estevezii* puede deberse a que estas se encuentran asociadas en la misma vegetación y se encuentran en lugares con las mismas condiciones para su crecimiento ya que también se encuentran creciendo bajo precipitaciones parecidas (Capó, 1972a; García, 1988; Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997; INEGI, 2000a). La tendencia que sigue el crecimiento de *Pinus patula* se debe a los hábitos de crecimiento que tiene la especie, ya que crece en suelos bien drenados, bajo precipitaciones más altas comparada con las otras especies en estudio, y a diferencia de ellas, ésta se encuentra creciendo en espacios abiertos por su exigencia para la luz y crece en lugares donde hay alta densidad poblacional (García, 1988; Patiño y Kageyama, 1991; Dvorak *et al.* 1995; INEGI, 2000a).

Por otro lado la tendencia que sigue *Pseudotsuga menziesii* pudo ser debido a sus características de crecimiento ya que es una especie que se

encuentra en rodales o manchones aislados en su mayoría dominados por otras especies y es una especie considerada de lento crecimiento (Del Castillo *et al.*, 2004; Domínguez *et al.*, 2004; Reyes *et al.*, 2005; Villanueva *et al.*, 2010).

5 CONCLUSIONES

Para el estudio de crecimiento e incremento en altura y diámetro de cuatro especies forestales en el noreste de México a través del análisis de virutas, se concluye:

Se obtuvo una curva del tipo sigmoideal en el ajuste de altura para *Pseudotsuga menziesii* y en el ajuste en diámetro para *Pinus arizonica* var. *stormiae*.

Los modelos Chapman-Richards y Schumacher tienen un buen ajuste para modelar el crecimiento en altura y diámetro en las cuatro especies.

Los modelos Bertalanffy y Vanclay son los que tienen mejor ajuste para modelar los incrementos en altura y diámetro en las cuatro especies.

Las curvas típicas de incremento corriente anual e incremento medio anual sólo se generan cuando la curva de crecimiento es sigmoideal.

6 RECOMENDACIONES

En trabajos posteriores donde se lleve a cabo la comparación entre especies, se deben obtener datos que cubran un rango de edad más amplio y una cantidad mayor de árboles.

Utilizar los modelos ajustados que se seleccionaron en las especies de este estudio y para esta región.

Utilizar esta técnica para evaluar el crecimiento en lugares donde se desee un menor grado de daño en la vegetación.

7 LITERATURA CITADA

- Aguilar R., M. 1991. Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. *Rev. Ciencia Forestal en México*. 16(70): 87-108.
- Aguilar R., M. 1997. Estudio de crecimiento de *Pinus douglasiana* Martínez y *Pinus lawsonii* Roezl en la región central de Michoacán. *Rev. Ciencia Forestal en México*. 22(81): 41-70.
- Aguirre C., O. A. 1991. Elaboración de tablas de producción en base a sitios temporales de muestreo. Un ejemplo con *Pinus pseudostrobus* Lindl., en el noreste de México. Linares, Nuevo León. *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales* 0(5): 43.
- Aguirre C., O. A. y H. Kramer. 1990. Observaciones sobre el crecimiento de los bosques en el mundo. Reporte Científico No. 17. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. 37 p.
- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. *Predicción del rendimiento*. FAO: Montes 22/2. Roma. 80 p.
- Alemán V., R. 2001. Evaluación de la calidad de sitio para cuatro especies de pino en el P. P. Sierra del Nayar, municipio de Durango. Tesis de Licenciatura. Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED). Escuela de Ciencias Forestales. Durango, Dgo. México. 80 p.
- Arteaga M., B. 2000. Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pinos en Ayotoxtla, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 6(2): 151-157.
- Avery, T. E y Burkhart, H. E. 2002. *Forest Measurements*. Fifth edition. Mc Graw Hill Series in Forest Resources. Mc Graw Hill. 456 p.
- Birks, J. S. and R. D. Barnes. 1991. Genetic control of wood quality in *Pinus panda*. Final Report, ODA Research Scheme R4616, Oxford Forestry Institute, University of Oxford, UK. 29 p.
- Bruce, D. y F. X. Schumacher. 1965. *Medición forestal*. Ed. Herrero S. A. México. 474 p.
- Bautista M., J. L. 2001. Crecimiento e incremento en altura, diámetro, área basal y volumen de la regeneración de *Pinus rudis* Endl., en la Sierra

- Las Alazanas, Arteaga, Coahuila. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. Tesis de Licenciatura. 57 p.
- Benavides S., J. de J. 1991. "Índices de sitio" para estimar la "calidad de sitio" en bosques de coníferas. *Rev. Ciencia Forestal en México*. 16 (69): 10-23.
- Calvillo G., J. C., E. H. Cornejo O., S. Valencia M. y C. Flores López. 2005. Estudio epidométrico para *Pinus herrerae* Martínez, en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán, México. *Rev. Foresta Veracruzana*. 7(1): 5-10.
- Capó A., M. A. 1972a. Observaciones sobre la taxonomía y la distribución de las coníferas de Nuevo León, México. Tesis profesional. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León, México. 190 p.
- Capó A., M. A. 1972b. Notas para la colecta de coníferas en Nuevo León. *Bosques* 9(4): 30-36.
- Cervantes A., G. E. 2014. Crecimiento de Pináceas asociadas a Poblaciones de *Picea mexicana* Martínez en México. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. Tesis de Licenciatura. 81 p.
- Cieszewski C. J. 2001. Three methods of deriving advance dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. *Canada Journal Forest Research* 31: 165-173.
- Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. V. Pienaar, H. G. Briester and R. L. Bailey. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. John Wiley & Sons, Inc. New York, N. Y. USA. 333 p.
- CONABIO. 2011. Índice de especies. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/reforestacion/P.html>
- Constante G., V. 2013. Análisis de patrones de crecimiento de especies arbóreas utilizando técnicas dendroecológicas en la Sierra Madre del Sur. Seminarios de posgrados. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 11 p.
- Corral R., J. J., K. Von Gadow., J. G. Álvarez G., and A. D. Ruiz G. 2004. Compatible height and site index models for five pine species in El Salto, Durango, México. *Forest Ecology And Management*. 201: 145-160.
- Corral R., S. 2004. Epidometría. Instituto Tecnológico Forestal No.1. DGETA. SEP. El Salto. Pueblo Nuevo Durango. México. 113 p.

- Corral R., S. y J. J. Návar C. 2005. Análisis del crecimiento e incremento de cinco pináceas de los bosques de Durango, México. *Madera y Bosques*. 11(1): 29-47.
- Corral R., J. J., J. G. Álvarez G., O. Aguirre y F. J. Hernández. 2005. The effect of competition on individual tree basal area growth in mature stands of *Pinus cooperi* Blanco in Durango (Mexico). *Europe Journal Forest Resources*. 124: 133-142.
- Correa D., A., A. Gómez G., J. Villanueva D., U. Castruita E., T. Martínez T. y R. Cervantes M. 2014. Análisis dendroclimático de Ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el centro de México. *Agrociencia*. 48: 537-551.
- Cortés M., J. P. 2010. Crecimiento de diámetro y altura para tres plantaciones de Pinos en Miahuatlán, Oaxaca. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. Tesis de Licenciatura. 67 p.
- Daniel, T. W., J. A. Helms y F. S. Baker. 1982. Principios de silvicultura. Ed. McGraw Hill. México, D. F. 493 p.
- De la Fuente E., A., A. Velázquez M., J. M. Torres R., H. Ramírez M., C. Rodríguez F., y A. Trinidad S. 1998. Predicción del crecimiento y rendimiento de *Pinus rudis* Endl., en pueblos mancomunados, Ixtlán, Oaxaca, México. *Rev. Ciencia Forestal. México*. 23(84): 3-8.
- Del Castillo R., F., J. A. Pérez de la R., G. Vargas A. y R. Rivera G. 2004. Coníferas. In. Biodiversidad de Oaxaca. A. J. García Mendoza, M. de Jesús Ordoñez y M. Briones-Salas (Eds). Instituto de Biología, UNAM-fondo Oaxaqueño para la conservación de la Naturaleza-World Wildlife Foundation. Pp. 141-158.
- Domínguez A., F. A. 1986. Estudio ecológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco, en la región de Huayacocotla, Ver. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 266 p.
- Domínguez A., F. A., J. J. Vargas H., J. López U., P. Ramírez V. y E. Guízar Nolazco. 2004. Aspectos ecológicos de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido La Barranca, Pinal de Amoles, Querétaro. *Anales del Instituto de Biología. Universidad Autónoma de México. Serie Botánica*. 75(2): 191-203.

- Dominguez C., P. A., J. de J. Návar C. y J. A. Loera O. 2001. Comparación del rendimiento de pinos en la reforestación de sitios marginales en Nuevo León. México. Rev. Madera y Bosques. 7(1): 27-35.
- Dvorak, W. S., G. R. Hodge, J. E. Kietzka, F. Malan, L. F. Osorio, and T. K. Stangen. 2000. *Pinus patula*. In: Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative. CAMCORE Cooperative, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina. Pp 149-173.
- Dvorak, W. S., J. K. Donahue and J. A. Vasquez. 1995. Early performance of CAMCORE Introductions of *Pinus patula* in Brazil, Colombia and South Africa. South African Forestry Journal. 174: 23-33.
- Eguiluz P., T. 1977. Los pinos del Mundo. Departamento de Bosques. Pub. Esp. 1. Escuela nacional de Agricultura Chapingo, México. 74 p.
- Eguiluz P., T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. 623 p.
- Eguiluz P., T. 1982. Reporte: Clima y distribución del género *Pinus* en México. Rev. Ciencia Forestal. 7(38) 30-44.
- Farjon, A. 2013a. *Pinus arizonica* var. *stormiae*. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2014.3. <www.iucnredlist.org>.
- Farjon, A. 2013b. *Pinus patula*. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2014.3. <www.iucnredlist.org>.
- Farjon, A. y T. B. Styles. 1997. *Pinus* (PINACEAE) Flora Neotropica, Monograph 75. Organization for Flora Neotropica. The New York Botanical Garden, New York, USA. 291 p.
- Farjon A., J. A. Pérez de la R. y T. B. Styles. 1997. Guía de campo de los Pinos de México y América Central. The Royal Botanic Gardens, Kew. Universidad de Oxford. 158 p.
- Favela L., S. 1999. Taxonomía de los pinos del noreste de México. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Biológicas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. H038. México D. F. 29 p.
- Fontes L., Margarida T., M. Baptista C., H. Wrihgt, J. Sales L. and P. Savill. 2003. Modelling dominant height growth of Douglas-fir (*Pseudotsuga*

- menziesii* (Mirb.) Franco) in Portugal. Institute of Chartered Foresters. Forestry. 75(5): 509-523.
- Gadow, K. V., Sánchez O. S. y Aguirre C. O. A. 2004. Manejo Forestal con bases científicas. Rev. Madera y Bosques. 10(2): 3-16.
- García A., A. y S. González. E. 2003. Pináceas de Durango. Instituto de Ecología, A. C. Comisión Nacional Forestal. México. 187 p.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4ª Ed. Secretaría de la Presidencia. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México. 217 p.
- Gómez L., J. A. 2007. Crecimiento e Incremento de *Picea martinezii* T. F. Pateterson en tres poblaciones de Nuevo León. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. Tesis de Licenciatura. 50 p.
- González L., H. D. 1997. Calidad de sitio, crecimiento e incremento de la regeneración de *Pinus rudis* Endl. De la región de San José de la Joya, Galeana, Nuevo León. Tesis profesional. U.A.A.A.N. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 121 p.
- González L., H. D. 2001. Calidad de sitio mediante análisis troncal y crecimiento entre verticilos en regeneración de *Pinus rudis* Endl. Tesis Maestría en Ciencias. U.A.A.A.N. Buenavista, Saltillo, México. 117 p.
- González Z., M. 2000. Crecimiento e Incremento en Regeneración de *Pinus estevezii* (Mtz) Perry y su Relación con Características Ambientales al Sur de Nuevo León. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 98 p.
- Herrera S., M. 2012. Evaluación de la productividad maderable de dos especies de *Pinus* en reforestación de la Trinidad, Ixtlán, Oaxaca. Tesis profesional. U.A.A.A.N. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 59 p.
- Hinton, J. y Hinton G. S. 1995. Checklist of Hinton's collections of the flora of south central, Nuevo Leon and adjacent Coahuila. Instituto de Ecología A. C. México. Acta Botánica Mexicana. 30: 41-112.
- Hocker, Jr. 1984. Introducción a la Biología Forestal. Ed. A.G.T. México. D.F. 287 p.
- Husch, B., Miller C. I. y Beers T. W. 1982. Forest Mensuration. Third Edition. U. S. A. 402 p.

- Imaña E., José y O. Encinas B. 2008. Epidometría Forestal. Brasilia: Universidad de Brasilia, Departamento de Ingeniería Forestal. Mérida: Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. 1ª Edición. 72 p.
- INEGI. 1994. Carta de uso de suelo y Vegetación. Escala 1: 1 000 000
- INEGI. 1998b. Carta Edafológica. Escala 1: 1 000 000.
- INEGI. 1998a. Carta geológica. Escala 1: 250 000.
- INEGI. 2000a. Carta Climatológica. Escala 1: 1 000 000.
- INEGI. 2000b. Carta de Hidrología Superficial. Escala 1: 250 000 y 1: 1 000 000.
- INEGI. 2010. Subcuencas Hidrológicas de México. Escala: 1:50000. Edición: 2.
- INEGI. 2012. Perspectiva estadística. Nuevo León.
- Instituto de Biología. "*Pinus arizonica* var. *stormiae* Engelm. - IBUNAM: MEXU: PVT2489". UNIBIO: Colecciones Biológicas. 2011-06-14. Universidad Nacional Autónoma de México. Consultada en: 2015-2-3. Disponible en: <<http://unibio.unam.mx/collections/specimens/urn/IBUNAM:MEXU:PVT2489>>
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). Red List of Threatened Species. 2015. Version 2014. 3. Disponible en: <www.iucnredlist.org>.
- Juárez A., A., López U., J., Vargas H., J. J. y Sáenz R., C. 2006. Variación geográfica en la germinación y crecimiento inicial de plántulas de *Pseudotsuga menziesii* de México. *Agrociencia*. 40(6): 783-792.
- Klepac, D. 1976. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Departamento de Enseñanza e Investigaciones y Servicio en Bosques, Universidad Autónoma de Chapingo, México 365 p.
- Lara B., A. 2012. Estudio de crecimiento e incremento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en el municipio de Alzayanca, Tlaxcala y el Ejido de Cuatxmola, municipio de Ixtacamaxtitlan, Puebla. México. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. 128 p.
- López H., J. A. y A. G. Valles G. 2009. Modelos para la estimación del índice de sitio para *Pinus duranguensis* Martínez en San Dimas, Durango. *Rev. Ciencia Forestal en México*. 34(105): 187-198.

- López U., J., C. Ramírez H., O. Plascencia E. y J. Jasso M. 2004. Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de *Pinus greggii*. *Agrociencia*. 38: 457-464.
- Madrigal H., S. y H. Ramírez M. 1995. Comparación de nueve modelos empíricos para la determinación de índice de sitio en Michoacán. *Rev. Ciencia Forestal en México*. 20 (78): 35-57.
- Mápula L., M., López U. J., Vargas H. J. J. y Hernández L. A. 2008. Geminación y vigor de semillas de *Pseudotsuga menziesii* de México. *Ra Ximhai*. 4: 119-134.
- Martínez, M. 1948. Los pinos mexicanos. 3a. ed. Ed. Botas, México, D. F. 361 p.
- Monárrez G., J. C. y H. Ramírez M. 2003. Predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus duranguensis* Mtz., en el Estado de Durango. *Rev. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 9(1): 45-56.
- Montiel O., Diego e I. Zamudio V. 2007. Caracterización de una plantación de pino (*Pinus patula* Schl. et Cham.) en el Municipio de Teziutlán, Estado de Puebla. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 76 p.
- Monroy R., C. R. 1996. Índice de Sitio para *Pinus patula* Schl. Et Cham., en la región de Huayacocotla, estado de Veracruz. *Rev. Ciencia Forestal en México*. 21(80): 57-77.
- Morey, R. P. 1977. Cómo crecen los árboles. Ediciones Omega. Segunda ed. al español. Barcelona, España. 65 p.
- Muñoz F, H. J., G. Orozco G., V. M. Coria A., y J. J. García M. 2010. Factores ambientales de *Pinus patula* Schl. et Cham., y su adaptación a las condiciones de la Sierra Purépecha, Michoacán. México. *Recursos Genéticos Forestales. Foresta Veracruzana*. 12(2): 27-33.
- Nájera, F. 1990. Estudio ecológico de *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* (Mayr) Franco. Seminario de titulación, Chapingo. México. 75 P.
- Návar J., J. Jiménez, P. A. Domínguez y O. A. Aguirre. 1996. Predicción del crecimiento de masas forestales irregulares en base a las distribuciones diamétricas en el sureste de Sinaloa, México. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. 5(2): 213-229.

- Patiño F., V. y P. Y. Kageyama. 1991. *Pinus patula* Schiede & Deppe. Seed Leaflet No. 8. Danida Forest Seed Centre. Humleback, Denmark. March. 25 p.
- Patricio H., N. 2014. Evaluación de tres dosis de Hidrogel en la sobrevivencia y desarrollo de *Pinus arizonica* Engelm. variedad *stormiae* Martínez plantado bajo condiciones de sequía extrema. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. Tesis de Licenciatura. 58 p.
- Perry, J. P. Jr. 1991. The Pines of Mexico and Central America. Timber Press. Portland, Oregon, USA. 231 p.
- Price, R. A., A. Liston and S. H. Strauss. 1998. Phylogeny and systematics of *Pinus*. In: M. D. Richardson (ed). Ecology and Biogeography of *Pinus*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. Pp: 49-68.
- Prodan M., R. Peters, F. Cox y P. Real, 1997. Mensura forestal. Proyecto IICA/GTZ, sobre agricultura, recursos naturales y desarrollo sostenible. San José de Costa Rica. 586 p.
- Prodan, M. 1993. Discurso pronunciado en la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia. Publicado en la Revista Quebracho. (4):51-55.
- Ramírez H., C., J. J. Vargas Hernández y J. López U. 2005. Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. Acta Botánica Mexicana. 72: 1-16.
- Reyes H., V. J., J. J. Vargas H., J. López U. y H. Vaquera H. 2005. Variación morfológica y anatomía en poblaciones mexicanas de *Pseudotsuga* (Pinaceae). Acta Botánica Mexicana. 70: 47-67.
- Rivas T., D. 2006. Sistemas de Producción Forestal. Unidad 2: Evaluación de los recursos forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Preparatoria Agrícola. 26 p.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Editorial Limusa. México. D. F. 432 p.
- Sánchez G., A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. Madera y Bosques. 14(1): 107-120.
- Santiago G., B. 2012. Análisis de Crecimiento en diámetro y altura de tres Especies Tropicales en Plantación de Enriquecimiento en Pochutla,

- Oaxaca. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. Tesis de Licenciatura. 64 p.
- SEMARNAT. 2008. Norma Oficial Mexicana. NOM-152-SEMARNAT-2006, Que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas. Diario Oficial. México, D. F. 24 p.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana. NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestre. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión o cambio. Lista de especies en riesgo. Diario oficial de la federación. México, D.F. 81p.
- Sit V., M. Poulin C. 1994. Catalog of curves for curve fitting. Biometrics Information Handbook Series. Handbook No. 4. Ministry of forest: Research Program. Province of British Columbia. 110 p.
- Styles, B. T. 1993. Genus *Pinus*: A Mexican purview. In: Ramamoorthy TP, Beye R, Lot A, Fa J, eds. Biological diversity of Mexico: origins and distribution. New York. Oxford University Press. Pp. 397-420.
- Torres R., J. M. 2001. Curvas de Índice de Sitio de Forma y Escala Variables en Investigación Forestal. Centro de investigación y Docencia Económicas. División Economía. Agrociencia. 35(1): 87-98.
- Uranga V., L. P. 2014. Crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de *Pinus patula* en Zacualpan, Veracruz. Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 105 p.
- Valencia M., S. y J. J. Vargas H. 2001. Correlaciones Genéticas y Selección Simultanea del Crecimiento y Densidad de la madera en *Pinus patula*. México. Rev. Agrociencia. 31(1):109-120.
- Vanclay, J. K. 1994 Modelling forest growth and yield, application to mixed tropical forest. CAB INTERNATIONAL. Wallingford, U K. 312 p.
- Vargas H., J. J., Basilio B. V. † y Thomas L. F. (eds.). 2004. Manejo de Recursos Genéticos Forestales, (2^{da} edición). Colegio de Postgraduados, Montecillo, México y Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. 188 p.

- Vargas L., B., O. A. Aguirre C., J. J. Corral R., F. Crecente C., y U. Diéguez A. 2013. Modelo de Crecimiento en Altura Dominante e Índice de Sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., en el noreste de México. *Agrociencia*. 47: 91-106.
- Vela G., L. 1980. Contribución a la ecología de *Pinus patula*. Publicación especial. INIF, México, (19):1-109.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., Stahle D. W., V. Constante G., L. Vázquez S., J. Estrada A., y J. de D. Benavides S. 2010. Árboles Longevos de México. Ensayo. México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 1(2): 7-29.
- Wormald, T. J. 1975. *Pinus patula*. Oxford Commonwealth Forestry Institute. 172 p.
- Zepeda B., E. M. y A. Domínguez, P. 1998. Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engl., de El Poleo, Chihuahua. México. *Madera y Bosques* 4(1): 27-39.

8 APÉNDICE

Apéndice 1. Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable altura en *Pinus arizonica* var. *stormiae* Mart.

| Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} | CME | Parámetros | | |
|------------------|---|----------------|-------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | B ₀ | B ₁ | B ₂ |
| Schumacher | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{-1})$ | 0.9674 | 0.9652 | 5.0424 | 16.0808 | 26.4091 | |
| Chapman-Richards | $Y = B_0 [1 - \exp(-B_1 E)]^{B_2}$ | 0.9676 | 0.9653 | 5.0185 | 14.4072 | 0.0197 | 1 |
| Weibull | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{B_2})$ | 0.9603 | 0.9576 | 6.1407 | 7.7122 | -0.00413 | 1 |
| Hossfeld IV | $Y = B_0 (1 + \exp(B_1) E^{-B_2})^{-1}$ | 0.9678 | 0.9643 | 5.1664 | 17.2482 | 4.2727 | 1.1257 |
| Logístico | $Y = B_1 (1 + B_2 * \exp -B_1 * E)$ | 0.9670 | 0.9634 | 5.2957 | 13.9247 | 1.1067 | 0.0327 |
| Korf | $Y = B_0 \exp -B_1 * E^{B_2}$ | 0.9679 | 0.9644 | 5.1544 | 19.9436 | 10.0794 | -0.6588 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀, B₁ y B₂=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 2. Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable diámetro en *Pinus arizonica* var. *stormiae* Mart.

| Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} | CME | Parámetros | | |
|------------------|---|----------------|-------------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | B ₀ | B ₁ | B ₂ |
| Schumacher | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{-1})$ | 0.9642 | 0.9617 | 77.2057 | 58.6361 | 24.4226 | |
| Chapman-Richards | $Y = B_0 [1 - \exp(-B_1 E)]^{B_2}$ | 0.9633 | 0.9607 | 79.1196 | 50.412 | 0.0247 | 1 |
| Weibull | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{B_2})$ | 0.9506 | 0.9472 | 106.4 | 30.4105 | -0.00356 | 1 |
| Hossfeld IV | $Y = B_0 (1 + \exp(B_1) E^{-B_2})^{-1}$ | 0.9649 | 0.9611 | 78.3927 | 49.5718 | 7.57 | 2.22 |
| Logístico | $Y = B_1 (1 + B_2 * \exp -B_1 * E)$ | 0.9642 | 0.9603 | 79.9489 | 47.0722 | 2.2056 | 0.0677 |
| Korf | $Y = B_0 \exp -B_1 * E^{B_2}$ | 0.9649 | 0.9612 | 78.2583 | 51.3366 | 134.90 | -1.55 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀, B₁ y B₂=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 3. Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable altura en *Pinus estevezii* (Mart.) Perry

| Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} | CME | Parámetros | | |
|------------------|---|----------------|-------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | B ₀ | B ₁ | B ₂ |
| Schumacher | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{-1})$ | 0.9606 | 0.9577 | 5.6906 | 16.0251 | 16.4229 | |
| Chapman-Richards | $Y = B_0 [1 - \exp(-B_1 E)]^{B_2}$ | 0.9598 | 0.9568 | 5.8083 | 13.8136 | 0.0367 | 1 |
| Weibull | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{B_2})$ | 0.9510 | 0.9474 | 7.0812 | 7.9783 | -0.00568 | 1 |
| Hossfeld IV | $Y = B_0 (1 + \exp(B_1) E^{-B_2})^{-1}$ | 0.9609 | 0.9563 | 5.875 | 13.6896 | 6.3521 | 2.1011 |
| Logístico | $Y = B_1 (1 + B_2 * \exp -B_1 * E)$ | 0.9588 | 0.9540 | 6.1843 | 13.0824 | 1.4408 | 0.0769 |
| Korf | $Y = B_0 \exp -B_1 * E^{B_2}$ | 0.9614 | 0.9569 | 5.7958 | 13.9144 | 114.6 | -1.6784 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀, B₁ y B₂=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 4. Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable diámetro en *Pinus estevezii* (Mart.) Perry

| Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} | CME | Parámetros | | |
|------------------|---|----------------|-------------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | B ₀ | B ₁ | B ₂ |
| Schumacher | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{-1})$ | 0.9504 | 0.9468 | 97.6876 | 67.9924 | 24.3914 | |
| Chapman-Richards | $Y = B_0 [1 - \exp(-B_1 E)]^{B_2}$ | 0.9481 | 0.9442 | 102.4 | 59.5719 | 0.0232 | 1 |
| Weibull | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{B_2})$ | 0.9373 | 0.9327 | 123.6 | 24.3437 | -0.00837 | 1 |
| Hossfeld IV | $Y = B_0 (1 + \exp(B_1) E^{-B_2})^{-1}$ | 0.9493 | 0.9435 | 103.7 | 57.72 | 6.1 | 1.8204 |
| Logístico | $Y = B_1 (1 + B_2 * \exp -B_1 * E)$ | 0.9450 | 0.9386 | 112.6 | 54.5966 | 1.307 | 0.0486 |
| Korf | $Y = B_0 \exp -B_1 * E^{B_2}$ | 0.9510 | 0.9453 | 100.4 | 57.9249 | 93.8694 | -1.469 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀, B₁ y B₂=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 5. Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable altura en *Pinus patula* Schltdl. & Cham.

| Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} | CME | Parámetros | | |
|------------------|---|----------------|-------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | B ₀ | B ₁ | B ₂ |
| Schumacher | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{-1})$ | 0.9821 | 0.9794 | 9.3 | 46.545 | 51.0417 | |
| Chapman-Richards | $Y = B_0 [1 - \exp(-B_1 E)]^{B_2}$ | 0.9830 | 0.9810 | 6.8 | 64.2046 | 0.00603 | 1 |
| Weibull | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{B_2})$ | 0.9523 | 0.9467 | 19.04 | 5.2778 | -0.0193 | 1 |
| Hossfeld IV | $Y = B_0 (1 + \exp(B_1) E^{-B_2})^{-1}$ | 0.9825 | 0.9799 | 9.1 | 1.17E+09 | 21.3943 | 0.8493 |
| Logístico | $Y = B_1 (1 + B_2 * \exp -B_1 * E)$ | 0.9839 | 0.9809 | 6.8 | 26.7307 | 3.3135 | 0.0741 |
| Korf | $Y = B_0 \exp -B_1 * E^{B_2}$ | 0.4345 | 0.3910 | 25.8 | 21.4286 | 8.60E+23 | -20.7302 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀, B₁ y B₂=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 6. Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable diámetro en *Pinus patula* Schltdl. & Cham.

| Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} | CME | Parámetros | | |
|------------------|---|----------------|-------------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | B ₀ | B ₁ | B ₂ |
| Schumacher | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{-1})$ | 0.9599 | 0.9537 | 78.7832 | 129.5 | 77.5466 | |
| Chapman-Richards | $Y = B_0 [1 - \exp(-B_1 E)]^{B_2}$ | 0.9567 | 0.9517 | 64.9 | -183.3 | -0.00292 | 1 |
| Weibull | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{B_2})$ | 0.9337 | 0.9259 | 99.5 | 8.5143 | -0.2163 | 0.1 |
| Hossfeld IV | $Y = B_0 (1 + \exp(B_1) E^{-B_2})^{-1}$ | 0.9633 | 0.9541 | 78.0818 | 57.2962 | 18.33 | 4.6188 |
| Logístico | $Y = B_1 (1 + B_2 * \exp -B_1 * E)$ | 0.9648 | 0.9582 | 56.2 | 54.2997 | 4.6476 | 0.0895 |
| Korf | $Y = B_0 \exp -B_1 * E^{B_2}$ | -0.0664 | -0.2442 | 330.5 | 42.1819 | -22.81 | -11.9642 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀, B₁ y B₂=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 7. Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable en altura en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

| Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} | CME | Parámetros | | |
|------------------|---|----------------|-------------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | B ₀ | B ₁ | B ₂ |
| Schumacher | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{-1})$ | 0.9612 | 0.9585 | 11.4238 | 27.8593 | 30.5144 | |
| Chapman-Richards | $Y = B_0 [1 - \exp(-B_1 E)]^{B_2}$ | 0.9574 | 0.9545 | 12.5379 | 22.579 | 0.0222 | 1 |
| Weibull | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{B_2})$ | 0.9382 | 0.9339 | 18.2034 | 9.717 | -0.00793 | 1 |
| Hossfeld IV | $Y = B_0 (1 + \exp(B_1) E^{-B_2})^{-1}$ | 0.9690 | 0.9657 | 9.4481 | 18.8375 | 14.3064 | 4.138 |
| Logístico | $Y = B_1 (1 + B_2 * \exp -B_1 * E)$ | 0.9700 | 0.9668 | 9.1401 | 18.3751 | 4.0524 | 0.1255 |
| Korf | $Y = B_0 \exp -B_1 * E^{B_2}$ | 0.9680 | 0.9646 | 9.7638 | 19.4035 | 10944.70 | -2.8151 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀, B₁ y B₂=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 8. Valores de los estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable en diámetro en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

| Modelo | Ecuación | R ² | R ² _{Adj} | CME | Parámetros | | |
|------------------|---|----------------|-------------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | B ₀ | B ₁ | B ₂ |
| Schumacher | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{-1})$ | 0.9540 | 0.9508 | 49.770 | 56.289 | 34.05 | |
| Chapman-Richards | $Y = B_0 [1 - \exp(-B_1 E)]^{B_2}$ | 0.949 | 0.945 | 54.7246 | 47.239 | 0.018 | |
| Weibull | $Y = B_0 \exp(-B_1 E^{B_2})$ | 0.9321 | 0.9274 | 73.445 | 17.087 | -0.00916 | 1 |
| Hossfeld IV | $Y = B_0 (1 + \exp(B_1) E^{-B_2})^{-1}$ | 0.9604 | 0.9561 | 44.391 | 36.750 | 14.1116 | 4.0283 |
| Logístico | $Y = B_1 (1 + B_2 * \exp -B_1 * E)$ | 0.9612 | 0.9570 | 43.4516 | 35.5434 | 4.1317 | 0.122 |
| Korf | $Y = B_0 \exp -B_1 * E^{B_2}$ | 0.9592 | 0.9548 | 45.6886 | 38.5137 | 5518.3 | -2.5724 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀, B₁ y B₂=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 9. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable altura de *Pinus arizonica* var. *stormiae* Mart.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-----------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.24728 | -0.00321 | 0.00001102 | | 0.9188 | 0.9179 | 0.0004405 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.35336 | -0.06584 | | | 0.8056 | 0.8045 | 0.00105 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -1.22057 | -0.01995 | | | 0.9909 | 0.9908 | 0.00902 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | 0.74769 | -0.88684 | | | 0.7959 | 0.7947 | 0.20223 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -1.00037 | -0.08375 | -0.01847 | | 0.9925 | 0.9924 | 0.00744 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -0.57713 | -0.38888 | -0.00007584 | | 0.9865 | 0.9863 | 0.01345 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -1.2495 | -9.91E-12 | -0.0197 | 1 | 1 | 1.00E+00 | 1.63E-20 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 10. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable altura de *Pinus arizonica* var. *stormiae* Mart.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-----------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.26136 | -0.00181 | 0.00000447 | | 0.8671 | 0.8656 | 0.0004351 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.3448 | -0.047 | | | 0.6804 | 0.6785 | 0.00104 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -1.30008 | -0.00754 | | | 0.9263 | 0.9259 | 0.01115 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | -0.45728 | -0.35906 | | | 0.8544 | 0.8536 | 0.02202 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -0.94429 | -0.13531 | -0.00515 | | 0.9544 | 0.9539 | 0.00694 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -0.82613 | -0.22042 | -0.00002112 | | 0.9512 | 0.9506 | 0.00743 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -1.235 | 0.061 | -0.0571 | 0.648 | 0.9998 | 0.9998 | 0.000024 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n=Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 11. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable altura de *Pinus estevezii* (Mart) Perry.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | -19.63356 | 15.02567 | 0.00458 | | 0.9872 | 0.987 | 24.89201 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.53597 | -0.11103 | | | 0.8181 | 0.8169 | 0.00274 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -0.64358 | -0.03687 | | | 0.9989 | 0.9989 | 0.00285 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | 2.3252 | -1.43114 | | | 0.7824 | 0.7809 | 0.57035 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -0.5221 | -0.0485 | -0.0359 | | 0.9991 | 0.9991 | 0.00233 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | 0.17312 | -0.58414 | -0.000165 | | 0.9888 | 0.9887 | 0.02954 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | 2.6251 | -1.5017 | 0 | 0 | 0.79171067 | 0.79034583 | 0.533 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 12. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable altura de *Pinus estevezii* (Mart) Perry.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.17312 | -0.58414 | -0.000165 | | 0.9888 | 0.9887 | 0.02954 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.58805 | -0.09497 | | | 0.743 | 0.7413 | 0.00312 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -0.82537 | -0.01136 | | | 0.9644 | 0.9641 | 0.00918 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | 0.22962 | -0.47599 | | | 0.8799 | 0.8791 | 0.03096 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -0.40512 | -0.16776 | -0.008 | | 0.9894 | 0.9892 | 0.00275 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -0.23137 | -0.29456 | -0.00003534 | | 0.9762 | 0.9759 | 0.00618 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -0.379 | 0.2236 | -0.3634 | 0.4311 | 0.9995 | 0.9995 | 0.000111 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 13. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable altura de *Pinus patula* Schltdl & Cham.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|------------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.36417 | -0.00161 | 0.00000124 | | 0.8042 | 0.8016 | 0.00095165 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.45828 | -0.05121 | | | 0.5437 | 0.5406 | 0.0022 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -0.92111 | -0.00628 | | | 0.9284 | 0.928 | 0.00585 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | -0.35962 | -0.25764 | | | 0.8131 | 0.8119 | 0.01527 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -0.74724 | -0.06941 | -0.00489 | | 0.942 | 0.9412 | 0.00478 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -0.66511 | -0.1374 | -0.00002342 | | 0.9465 | 0.9458 | 0.0044 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -0.9459 | 0.00 | -0.00603 | 1 | 1 | 1.00 | 0.00 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 14. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable altura de *Pinus patula* Schltdl & Cham.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|------------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.36425 | -0.00053346 | -0.00000162 | | 0.5523 | 0.5463 | 0.00095173 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.41024 | -0.0245 | | | 0.2845 | 0.2797 | 0.00151 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -0.08406 | -0.00654 | | | 0.2045 | 0.1972 | 0.17406 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | -0.62106 | -0.13386 | | | 0.7562 | 0.7546 | 0.00578 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -0.74465 | -0.07385 | -0.00156 | | 0.8013 | 0.7986 | 0.00475 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -0.72684 | -0.09223 | -0.00000811 | | 0.8113 | 0.8087 | 0.00451 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -0.9491 | 0.00339 | -0.00456 | 0.91 | 0.99995 | 1.0000 | 0.00 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 15. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable altura de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|---------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.31006 | -0.0022 | -0.00000268 | | 0.3447 | 0.3359 | 0.02508 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.39491 | -0.06748 | | | 0.1199 | 0.114 | 0.03346 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -0.72478 | -0.04046 | | | 0.6475 | 0.6451 | 1.71602 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | 0.83464 | -1.14656 | | | 0.2703 | 0.2654 | 3.55217 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -5.2305 | 1.79867 | -0.07648 | | 0.7998 | 0.7971 | 0.98133 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -3.67335 | 0.62766 | -0.00034563 | | 0.758 | 0.7547 | 1.1863 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -6.8794 | 2.62 | -0.1659 | 0.8851 | 0.8457 | 0.8426 | 0.75 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 16. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable altura de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|--------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.04561 | 0.00614 | -0.00004149 | | 0.5788 | 0.5731 | 0.0037 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.06232 | 0.03292 | | | 0.1244 | 0.1185 | 0.0076 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -2.74622 | 0.01026 | | | 0.0959 | 0.0899 | 1.9118 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | -5.67295 | 0.92258 | | | 0.4029 | 0.3989 | 1.2626 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -8.51728 | 2.30379 | -0.03586 | | 0.671 | 0.6666 | 0.7004 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -7.79828 | 1.75906 | -0.00016295 | | 0.6525 | 0.6478 | 0.7399 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -10.1924 | 5.0159 | -1.8751 | 0.4433 | 0.9833 | 0.9830 | 0.0335 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 17. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable diámetro normal de *Pinus arizonica* var. *stormiae* Mart.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|---------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.93308 | -0.01221 | 0.00004162 | | 0.6212 | 0.6167 | 0.04503 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 1.17285 | -0.21196 | | | 0.3811 | 0.3774 | 0.07315 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -0.23688 | -0.01804 | | | 0.5954 | 0.593 | 0.54534 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | 0.93455 | -0.6546 | | | 0.3188 | 0.3148 | 0.91808 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -1.70866 | 0.55974 | -0.02793 | | 0.6493 | 0.6451 | 0.47543 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -0.83447 | 0.01032 | -0.00010127 | | 0.5686 | 0.5635 | 0.5848 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | 53.1793 | 9.1779 | -57.276 | 0.1155 | 0.7289 | 0.7239 | 0.367 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 18. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable diámetro normal de *Pinus arizonica* var. *stormiae* Mart.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|---------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.56931 | 0.00289 | -0.00003094 | | 0.4243 | 0.4175 | 0.02521 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.65928 | -0.03472 | | | 0.0278 | 0.022 | 0.04233 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -1.04246 | 0.00167 | | | 0.0023 | -0.0036 | 2.93415 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | -3.42525 | 0.61094 | | | 0.1272 | 0.1221 | 2.56677 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -7.15787 | 2.32579 | -0.03945 | | 0.4293 | 0.4225 | 1.68839 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -5.81489 | 1.50914 | -0.0001368 | | 0.3362 | 0.3283 | 1.96389 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | 9164.2 | 141.9 | -9178.2 | 0.0146 | 0.8227 | 0.8205 | 0.5271 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 19. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable diámetro normal de *Pinus estevezii* (Mart) Perry.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|------------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 1.2146 | -0.01932 | 0.00008434 | | 0.8899 | 0.888 | 0.01418 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 1.63516 | -0.31009 | | | 0.7514 | 0.7493 | 0.03174 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | 0.32426 | -0.02306 | | | 0.9986 | 0.9986 | 0.00091338 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | 1.62799 | -0.71032 | | | 0.7617 | 0.7597 | 0.15748 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | 0.25829 | 0.02888 | -0.02379 | | 0.9989 | 0.9989 | 0.00073374 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | 0.58919 | -0.26441 | -0.00013451 | | 0.9838 | 0.9835 | 0.01081 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | 1.8688 | -0.7699 | 0 | 0 | 0.7975 | 0.7958 | 0.133 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 20. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable diámetro normal de *Pinus estevezii* (Mart) Perry.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.58919 | -0.26441 | -0.00013451 | | 0.9838 | 0.9835 | 0.01081 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 1.56496 | -0.20404 | | | 0.5854 | 0.5819 | 0.02942 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | 0.2634 | -0.0089 | | | 0.9892 | 0.9891 | 0.00108 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | 0.78484 | -0.27903 | | | 0.781 | 0.7791 | 0.02178 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | 0.28678 | -0.01024 | -0.00865 | | 0.9894 | 0.9892 | 0.00106 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | 0.41841 | -0.12174 | -0.00004745 | | 0.9646 | 0.964 | 0.00355 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | 0.3457 | 0.0442 | -0.0468 | 0.699 | 0.9999 | 0.9999 | 0.000011 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 21. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable diámetro normal de *Pinus patula* Schltl & Cham.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|---------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.50387 | 0.00235 | -0.00000172 | | 0.8234 | 0.821 | 0.00182 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.3156 | 0.08774 | | | 0.7524 | 0.7508 | 0.00254 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -0.61007 | 0.00276 | | | 0.8508 | 0.8498 | 0.00257 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | -0.78651 | 0.09563 | | | 0.5325 | 0.5293 | 0.00804 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -0.49492 | -0.04597 | 0.00368 | | 0.879 | 0.8773 | 0.0021 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -0.57626 | 0.01288 | 0.00001612 | | 0.8328 | 0.8305 | 0.00289 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -0.888 | 0.12 | 0 | 0 | 0.7918 | 0.7906 | 0.00337 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 22. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable diámetro normal de *Pinus patula* Schltl & Cham.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.50427 | 0.0016 | -0.00000367 | | 0.543 | 0.5368 | 0.00182 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.40113 | 0.04877 | | | 0.6005 | 0.5978 | 0.00158 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -0.60997 | 0.00135 | | | 0.5777 | 0.5749 | 0.00256 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | -0.67405 | 0.04126 | | | 0.2806 | 0.2758 | 0.00437 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -0.49259 | -0.04686 | 0.00229 | | 0.6605 | 0.6559 | 0.00208 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | -0.54639 | -0.00899 | 0.00000979 | | 0.5941 | 0.5886 | 0.00248 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -0.761 | 0.0617 | 0 | 0 | 0.7858 | 0.7845 | 0.000932 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 23. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del ICA en la variable diámetro normal de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.77118 | -0.00988 | 0.0000349 | | 0.9094 | 0.9081 | 0.00453 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 1.07623 | -0.19554 | | | 0.7714 | 0.7699 | 0.01134 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -0.13288 | -0.01834 | | | 0.9998 | 0.9998 | 0.00012 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | 1.33047 | -0.70843 | | | 0.776 | 0.7745 | 0.14504 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -0.1078 | -0.01001 | -0.01814 | | 0.9998 | 0.9998 | 0.00001 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | 0.24626 | -0.28172 | -0.00008313 | | 0.9881 | 0.9879 | 0.00778 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -0.1365 | 0 | -0.0183 | 1 | 1 | 1 | 1.65E-21 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 24. Parámetros de regresión y estadísticos empleados para comparación de los modelos utilizados para el ajuste del IMA en la variable diámetro normal de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

| No. | Modelo | Parámetros | | | | R ² | R ² _{Adj} | CME |
|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------|
| | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | | | |
| 1 | Y=B ₀ + B ₁ X + B ₂ X ² | 0.15092 | -0.00362 | 0.00001909 | | 0.3073 | 0.2979 | 0.00492 |
| 2 | Y= B ₀ + B ₁ ln X | 0.2456 | -0.05554 | | | 0.4376 | 0.4338 | 0.00397 |
| 3 | ln Y = B ₀ + B ₁ X | -2.63791 | -0.03836 | | | 0.9238 | 0.9232 | 0.23384 |
| 4 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X | 1.33047 | -1.70843 | | | 0.9527 | 0.9524 | 0.14504 |
| 5 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X | -0.1078 | -1.01001 | -0.01814 | | 1 | 1 | 0.00001 |
| 6 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ² | 0.24626 | -1.28172 | -0.00008313 | | 0.9975 | 0.9974 | 0.00778 |
| 7 | ln Y = B ₀ + B ₁ ln X + B ₂ X ^{B₃} | -0.1365 | -1 | -0.0183 | 1 | 1 | 1 | 2.25E-19 |

R²=coeficiente de determinación; R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado; B₀...B_n =Parámetros del modelo y CME=Cuadrado medio del error.

Apéndice 25. Modelos de incremento seleccionados por especie y variable en estudio.

| Especie | Variable | Incremento | Modelo | Ecuación | Parámetros de Regresión | | | |
|--|----------|------------|--------|---|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ |
| <i>Pinus arizonica</i> var. <i>stormiae</i> Mart. | Diámetro | ICA | 7 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^{B_3}$ | 53.1793 | 9.1779 | -57.276 | 0.1155 |
| | | IMA | | | 9164.2 | 141.9 | -9178.2 | 0.0146 |
| | Altura | ICA | 7 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^{B_3}$ | -1.2495 | -9.91E-12 | -0.0197 | 1 |
| | | IMA | | | -1.235 | 0.061 | -0.0571 | 0.648 |
| <i>Pinus estevezii</i> (Mart.) Perry | Diámetro | ICA | 5 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X$ | 0.25829 | 0.02888 | -0.02379 | |
| | | IMA | 7 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^{B_3}$ | 0.3457 | 0.0442 | -0.0468 | 0.699 |
| | Altura | ICA | 5 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X$ | -0.5221 | -0.0485 | -0.0359 | |
| | | IMA | 7 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^{B_3}$ | -0.379 | 0.2236 | -0.3634 | 0.4311 |
| <i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham. | Diámetro | ICA | 5 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X$ | -0.49492 | -0.04597 | 0.00368 | |
| | | IMA | 7 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^{B_3}$ | -0.761 | 0.0617 | 0 | 0 |
| | Altura | ICA | 7 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^{B_3}$ | -0.9459 | 0 | -0.00603 | 1 |
| | | IMA | | | -0.9491 | 0.00339 | -0.00456 | 0.91 |
| <i>Pseudotsuga</i> <i>menziesii</i> (Mirb.) Franco | Diámetro | ICA | 7 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^{B_3}$ | -0.1365 | 2.8E-12 | -0.0183 | 1 |
| | | IMA | | | -0.1365 | -1 | -0.0183 | 1 |
| | Altura | ICA | 7 | $\ln Y = B_0 + B_1 \ln X + B_2 X^{B_3}$ | -6.8794 | 2.62 | -0.1659 | 0.8851 |
| | | IMA | | | -10.1924 | 5.0159 | -1.8751 | 0.4433 |

Donde: ICA=Incremento corriente anual; IMA=Incremento medio anual; ln=Logaritmo natural, Y=ICA o IMA, X=Edad; B₀...B_n=Parámetros del modelo.