

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Crecimiento de Cinco Especies de *Pinus* en una Plantación  
a 27 Años de Establecida en Buenavista, Saltillo, Coahuila

Por:

**YULTZIN DEYANIRA VÁZQUEZ GÓMEZ**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Crecimiento de Cinco Especies de *Pinus* en una Plantación  
a 27 Años de Establecida en Buenavista, Saltillo, Coahuila

Por:

**YULTZIN DEYANIRA VÁZQUEZ GÓMEZ**


TESIS

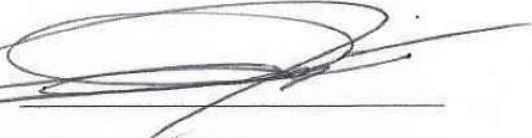
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Aprobada por el Comité de Asesoría

  
Dr. Celestino Flores López  
Asesor Principal

  
M.C. Salvador Valencia Manzo  
Coasesor

  
Dr. Jorge Méndez González  
Coasesor

DEPARTAMENTO FORESTAL

  
Dr. Gabriel Gallegos Morales  
Coordinador de la División de Agronomía

Coordinación  
Saltillo, Coahuila, México de Agronomía  
Diciembre de 2015

Este proyecto de tesis ha sido apoyado por el proyecto de investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con clave 38-111-3613-2122, a cargo del Dr. Celestino Flores López.

## DEDICATORIA

**A DIOS** que me ha llenado de bendiciones, entre ellas la fuerza, misma con la que me he levantado en las veces que caí. Por haberme permitido llegar hasta este momento de mi vida y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. Porque sé que guiará mis pasos durante el desempeño de mi vida laboral y me permitirá tomar las mejores decisiones, siempre en pro del prójimo.

**A MI MADRE** Ma. Amalia Gómez Colunga, grande mujer, mi más grande tesoro, porque siempre estuviste, en cada momento de mi vida y por qué estas ahora mismo. Porque si tu no estuvieras tal vez este momento no hubiese llegado y porque no tengo palabras para describir lo mucho que te amo. Esto es gracias a ti y por ti seguiré en el camino y espero jamás defraudarte. María Amalia Gómez Colunga eres el ejemplo perfecto de una verdadera madre. Me resta decirte GRACIAS infinitas mamá.

**A MI PADRE** Javier Vázquez Castillo, porque con su ejemplo he sabido salir adelante y luchar por lo que quiero, porque con cada gota de sudor en su frente nos brindó el alimento diario y nunca nos faltó absolutamente nada. Eres un guerrero padre mío, eres el vivo amor; porque no solo eres mi padre, sino el de muchos y esa bondad ha hecho de mí y de mis hermanos grandes personas, y porque algún día, si Dios me presta la vida, cumpliré cada uno de los deseos que tienes. Le pido a Dios que tanto tú como mi madre me duren una eternidad.

**A MIS HERMANOS** Javier Vázquez y Alma Vázquez, por su apoyo incondicional en cada momento, porque además de ser mis hermanos son mis amigos, son personas ejemplares y guerreras. Espero que sigamos juntos en el camino y que siempre digamos con orgullo “somos hijos de Javier Vázquez Castillo y Amalia Gómez Colunga”. Los amo hermanos y sepan que siempre estaré para ustedes. Dios los bendiga.

**A TI AMOR MÍO**, Ing. For. Eduardo Hernán Santiago Mateo, porque me enseñaste que todo se puede lograr y no dejaste que me diera por vencida, porque eres el sol de mis mañanas; he aprendido tanto de ti. Valió la espera, ahora sé que caminaremos juntos y que estarás a mi lado para compartir todos los momentos. GRACIAS por tu gran apoyo moral y físico para la culminación de este documento.

## AGRADECIMIENTOS

A mi ALMA MATER, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Saltillo, por abrirme sus puertas y haberme brindado la oportunidad de forjarme como profesionista.

A mi asesor principal, el Dr. Celestino Flores López, quien además de maestro ha sido un ejemplo de persona. Porque sin su apoyo este estudio no se habría terminado. Usted es parte fundamental de este logro y le agradezco inmensamente el tiempo que me brindó y todos los conocimientos que compartió conmigo.

Al Dr. Jorge Méndez González por ser un excelente maestro, por sus sabios consejos y por la preocupación que mostró hacia mi persona. Por su asesoría para la realización de este estudio. Por ser más que un maestro, un amigo.

Al M.C Salvador Valencia Manzo por su asesoría para la elaboración de este documento y por todos los consejos que me brindó.

A la Dra. Gabriela Ramírez Fuentes quien siempre me brindó su apoyo incondicional y compartió conmigo sus conocimientos. Por ser una gran persona, maestra y amiga.

A toda mi familia, porque sin ella no tendría fuerza suficiente para salir adelante y es en gran parte por ellos que he podido cumplir este logro.

A mis grandes compañeros y amigos Jesús Alejandro Gómez Quiroz, Saúl Alejandro Salmerón Bravo, Manuel Alfredo Pérez Ávila, José Luis Antonio Elías Rodríguez, Cecilia Pérez Jiménez, Leticia Jiménez Hernández, José Luis Cárdenas Domínguez, María del Rocío Hernández Ramírez, con quienes viví muchas cosas bellas y aprendí otras tantas, porque juntos hemos salido adelante en cada etapa de la universidad y espero que así sigamos durante muchos años más.

A mis compañeros de generación CXIX con quienes compartí muchos momentos, los cuales serán inolvidables.

Al Centro de Educación y Capacitación Forestal No.3 (CECFOR 3) “Ing. José Ángel de la Cruz Campa” por ser parte fundamental en mi formación como profesionista forestal.

A todo el pueblo de México que mantiene por medio de su trabajo a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, a todos a aquellos que construyen con su esfuerzo día a día la UAAAN y que hacen de ella una de las mejores universidades de México.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN .....	x
ABSTRACT .....	xi
1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
1.3 Hipótesis .....	14
2 REVISIÓN DE LITERATURA .....	15
2.1 Descripción y distribución de especies estudiadas .....	15
2.2 Plantaciones forestales .....	19
2.3 Métodos para determinar el crecimiento .....	20
2.4 Crecimiento e incremento en variables dasométricas .....	21
2.5 Estudios afines .....	22
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
3.1 Descripción general del área de estudio.....	27
3.2 Análisis troncal .....	28
3.2.1 Selección y derribo del arbolado.....	28
3.2.2 Acondicionamiento para la evaluación de las rodajas .....	30
3.2.3 Conteo de anillos y llenado de formato.....	30
3.2.4 Tipos dendrométricos.....	30
3.2.5 Cálculo de edad y variables dasométricas.....	31
3.3 Modelos de crecimiento.....	33

3.4 Estadísticos para comparación de modelos .....	34
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1 Mejores modelos de ajuste.....	36
4.2 Crecimiento e Incremento.....	37
4.2.1 Crecimiento e incremento en altura .....	37
4.2.2 Crecimiento e incremento en diámetro a 0.30 m .....	42
4.2.3 Crecimiento e incremento en área basal.....	46
4.2.4 Crecimiento e incremento en volumen.....	50
5 CONCLUSIONES.....	56
6 RECOMENDACIONES .....	57
7 LITERATURA CITADA .....	58
8 APÉNDICE .....	65

## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Alturas y diámetros de cada uno de los individuos bajo estudio de cinco especies de del genero Pinus evaluadas en Buenavista, Saltillo Coah. ....	29
Cuadro 2. Modelos de crecimiento empleados para cinco especies del género Pinus en Buenavista, Saltillo, Coah. ....	34
Cuadro 3. Modelos con mejor ajuste y valores de coeficiente de determinación ( $R^2_{adj}$ ) y Cuadrado Medio del Error (CME), en la relación edad-altura, edad-diámetro, edad-área basal y edad-volumen para las cinco especies del género Pinus en Buenavista, Saltillo, Coahuila.....	36
Cuadro 4. Investigaciones realizadas por diferentes autores para las variables altura y diámetro donde se presenta área de estudio, especies y modelos utilizados. ....	39
Cuadro 5. Investigaciones realizadas por diferentes autores para las variables área basal y volumen donde se presenta área de estudio, especies y modelos utilizados. ....	40



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación del área de estudio .....	27
Figura 2. Curvas de ajuste en la relación edad-altura (f) para las especies <i>P. cembroides</i> Zucc (a), <i>P. eldarica</i> Medw (b), <i>P. halepensis</i> Mill (c), <i>P. maximartinezii</i> Rzedowski (d), <i>P. pinea</i> L (e) establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.....	43
Figura 3. Curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en la relación edad-altura para las cinco especies de pino establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah. ....	44
Figura 4. Curvas de ajuste en la relación edad-diámetro (f) para las especies <i>P. cembroides</i> Zucc (a), <i>P. eldarica</i> Medw (b), <i>P. halepensis</i> Mill (c), <i>P. maximartinezii</i> Rzedowski (d), <i>P. pinea</i> L (e) establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.....	47
Figura 5. Curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en la relación edad-diámetro para las cinco especies de pino establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah. ....	48
Figura 6. Curvas de ajuste en la relación edad-área basal (f) para las especies <i>P. cembroides</i> Zucc (a), <i>P. eldarica</i> Medw (b), <i>P. halepensis</i> Mill (c), <i>P. maximartinezii</i> Rzedowski (d), <i>P. pinea</i> L (e) establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah. ....	51
Figura 7. Curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en la relación edad-área basal para las cinco especies de pino establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah. ....	52
Figura 8. Curvas de ajuste en la relación edad-volumen (f) para las especies <i>P. cembroides</i> Zucc (a), <i>P. eldarica</i> Medw (b), <i>P. halepensis</i> Mill (c), <i>P. maximartinezii</i> Rzedowski (d), <i>P. pinea</i> L (e) establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.....	54
Figura 9. Curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en la relación edad-volumen para las cinco especies de pino establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah. ....	55

## RESUMEN

El presente estudio fue realizado en Buenavista Saltillo, Coahuila, en terrenos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (25° 21' Norte y 101° 01" Oeste) aproximadamente, con una altitud de 1810 msnm. Se seleccionaron 25 árboles en total de las cinco especies del género *Pinus* (*Pinus halepensis* Mill, *Pinus eldarica* Medw, *Pinus pinea* L, *Pinus maximartinezii* Rzedowski y *Pinus cembroides* Zucc) distribuidos en las 20 parcelas del ensayo de especies en el área de estudio. Para cada una de las especies se evaluaron las variables altura y diámetro antes del apeo, posteriormente, para cada árbol representativo se realizó el análisis troncal de acuerdo a la metodología señalada por Klepac (1983). Se emplearon tres modelos de crecimiento, Schumacher, Chapman-Richards y Weibull, para evaluar las variables altura, diámetro a 0.30 m, área basal y volumen con el fin de comparar el crecimiento e incremento entre cada una de las variables y por especie a 27 años del establecimiento de la plantación. Con el apoyo del paquete estadístico SAS utilizando el procedimiento de regresión no lineal, se estimaron los parámetros de cada modelo. Los resultados muestran que el mejor modelo para describir el crecimiento en altura es el de Schumacher mostrando los mejores criterios de bondad de ajuste. Para el diámetro y área basal, es el Weibull y por último para la variable volumen los que resultaron con mejor ajuste fueron Weibull y Schumacher. Por otra parte, a partir de la comparación de ICA e IMA de las diferentes especies, se tiene que la especie que registró mayor crecimiento en altura, diámetro, área basal y volumen, en un lapso de 27 años fue *P. halepensis* Mill seguida por *P. cembroides* Zucc y *P. eldarica* Medw. Mientras que en lo referente a *P. maximartinezii* Rzedowski y *P. pinea* L., fueron las especies que registraron menor crecimiento.

Palabras clave: *P. cembroides* Zucc, *P. eldarica* Medw, *P. halepensis* Mill, *P. maximartinezii* Rzedowski, *P. pinea* L, crecimiento, incremento, modelos de crecimiento.

Correo electrónico: Yultzin Deyanira Vázquez Gómez. [yultzin.forestal@gmail.com](mailto:yultzin.forestal@gmail.com)

## ABSTRACT

This study was performed in Buenavista, Saltillo, Coahuila, on lands of the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. This is located at the geographic coordinates (25 ° 21' North latitude and 101 ° 01' West longitude) approximately, with an altitude of 1810 a.s.l. 25 trees were selected in total from five *Pinus* species (*Pinus halepensis* Mill, *Pinus eldarica* Medw, *Pinus pinea* L, *Pinus maximartinezii* Rzedowski and *Pinus cembroides* Zucc) distributed in 20 blocks of the test species in the study area. For each species the variables height and diameter were evaluated before the cut down, subsequently, for each representative tree stem analysis was conducted according to the methodology outlined on literature. Three models of growth, Schumacher, Chapman-Richards and Weibull were used to evaluate the forest variables, age-diameter, age-height, age-basal area and area-volume in order to compare the growth and increment between these and between the species in 27 years since the establishment of the plantation. With the support of SAS using the method of nonlinear regression (Nonlinear Regression or NLIN), the parameters of each model were estimated. The results show that the best model to describe the height was the Schumacher model showing the best criteria of goodness of fit. For diameter and basal area, was the Weibull model and finally in the variable volume the results with better fit were Schumacher and Weibull models. Moreover, from the comparison of ICA e IMA of the different species is known that the species that registered the highest growth in height, diameter, basal area and volume, in a span of 27 years was *P. halepensis* Mill followed by *P. cembroides* Zucc and *P. eldarica* Medw. While regarding the species *P. maximartinezii* Rzedowski and *P. pinea* L registered the slower growth in the measured variables.

Keywords: *P. cembroides* Zucc, *P. eldarica* Medw, *P. halepensis* Mill, *P. maximartinezii* Rzedowski, *P. pinea* L, growth, growth models.

## 1 INTRODUCCIÓN

Del área total del bosque en el mundo, cerca de 1,200 millones de hectáreas se ordenan principalmente para la producción de productos forestales maderables y no maderables; además, otras 949 millones que representan el 24 por ciento, están designadas para usos múltiples y en la mayoría de los casos estos usos comprenden la producción de productos forestales maderables y no maderables. Sin embargo, el problema de la deforestación es grave y a nivel mundial, las extracciones de madera registradas en el año 2005 ascendieron a 3,400 millones de metros cúbicos anuales, que es un volumen semejante al registrado para 1990 y equivalente al 0.7 por ciento del total de las existencias en formación (FAO, 2010).

Esto ha sido producto de la explotación forestal inadecuada, sobre todo la clandestina, así como los desmontes para fines de ampliación de zonas agrícolas, ganaderas y habitacionales, además de que constituyen factores que restan superficie a los bosques y modifican la composición de los que quedan, por lo tanto, en el problema de deforestación y desabasto de bienes y servicios derivados del bosque, el establecimiento de plantaciones forestales juega un papel importante, ya que por un lado permite restaurar la cobertura arbórea y quizá detener el avance de la agricultura y la ganadería extensivas al convertirse en una actividad rentable a largo plazo, mientras que por otro lado permite incrementar la producción maderable por unidad de superficie que actualmente tienen los bosques naturales (Rzedowski, 1978; Torres-Rojo y Magaña-Torres, 2001).

Al respecto, México es un país que tiene un excelente potencial biológico, físico y climático para el establecimiento de plantaciones por lo que es considerado como una opción viable para incrementar la productividad del sector. El país cuenta con ocho millones de hectáreas de terrenos preferentemente forestales, con aptitud para realizar plantaciones forestales; lamentablemente, no todas las plantaciones tienen un impacto positivo desde los puntos de vista económico, ambiental, social o cultural. Si no existe una planificación adecuada y sin un manejo apropiado, las plantaciones forestales pueden establecerse en los lugares equivocados, utilizando especies y orígenes incorrectos, por parte de silvicultores no apropiados, por razones erradas. Aunado a esto, en México, la evaluación de plantaciones forestales es una actividad que ha sido abordada sin una línea de acción, pues en los trabajos existentes se han utilizado técnicas y enfoques muy variados y

en algunos casos los objetivos de la evaluación han sido incongruentes con los de la misma plantación (FAO, 2000; Arano-Santos *et al.*, 2003).

Una parte muy importante en esta problemática es la falta de estudios encaminados a disminuir los fracasos en las plantaciones forestales, y hablando específicamente de México los estudios son pocos especialmente para coníferas, entre ellos se encuentra el de Zúñiga-Hernández (2013) en donde el objetivo principal fue determinar el índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus patula* Schl., y *Pinus douglasiana* Martínez en plantaciones de Miahuatlán. Oaxaca; y el de Corral y Návar-Cháidez (2005), en donde se analizaron diversas ecuaciones de crecimiento e incremento en diámetro, altura y volumen para las especies *Pinus durangensis* Ehren., *P. cooperi* Engelm, *P. leiophylla* Schl., y Cham., *P. engelmannii* Carr., y *P. herrerae* Martínez que se distribuyen naturalmente en la región de El Salto, Durango, México; solo por mencionar algunos.

Siguiendo con la problemática en cuanto a este tema, se requieren evaluaciones de crecimiento e incremento en estos ensayos a partir de mediciones periódicas de estas mismas variables o en su caso realizar un análisis troncal de las especies. El crecimiento e incremento de árboles y rodales es una herramienta de gran utilidad en la correcta toma de decisiones sobre tratamientos silvícolas y aprovechamiento de los bosques en la parte norte, sur y centro del país, ya que además facilitan la cuantificación de sus respuestas y aunque estos estudios de crecimiento tengan como objetivo primordial cuantificar la producción forestal, también tienen una estrecha relación con la silvicultura de las especies en particular o con grupos de especies con requerimientos ecológicos similares (Cuevas-García *et al.*, 1992) para estos ensayos en especies de *Pinus* spp, las evaluaciones sugeridas son al final de la fase de vivero y a los dos, cinco, ocho, quince y treinta años, incluyendo principalmente las características del fuste, las ramas y la madera (Cornelius y Mesén, 1994).

En el caso del norte del país y para esta investigación se tiene un ensayo de especies establecido en el año 1986 en Buenavista, Saltillo, Coahuila específicamente en terrenos de la UAAAN, el cual ha sido evaluado dos veces, por Rodríguez-Soto (1989) y Trujillo-Sánchez (1995), sin embargo, no se tiene información del crecimiento que ha tenido en el paso de los años.

Para esto se consideró los análisis troncales, los cuales se aplicaron a cada una de las especies ensayadas, *Pinus halepensis* Mill, *Pinus eldarica* Medw, *Pinus pinea* L., *Pinus maximartinezii* Rzedowski y *Pinus cembroides* Zucc, con la finalidad de obtener el crecimiento e incremento en altura, diámetro, área basal y volumen, así como realizar la comparación de estas mismas variables entre las especies. De esta manera se establecieron el objetivo general y los objetivos particulares.

### 1.1 Objetivo general

Analizar el crecimiento e incremento de cinco especies de pinos en cuatro variables dasométricas a una edad base de 27 años a través del método de análisis troncales.

### 1.2 Objetivos específicos

Determinar el mejor modelo que describa el crecimiento en altura, diámetro a 0.30 m, área basal y volumen, para las especies *P. cembroides* Zucc, *Pinus halepensis* Mill, *P. eldarica* Medw, *P. maximartinezii* Rzedowski y *P. pinea* L de un ensayo de especies en Buenavista, Saltillo, Coahuila.

Generar curvas de crecimiento para las variables altura, diámetro a 0.30 m, área basal y volumen para cada una de las cinco especies.

Generar curvas de incremento para las variables altura, diámetro a 0.30 m, área basal y volumen para cada una de las cinco especies.

### 1.3 Hipótesis

Ho: No existe regresión para la relación edad-altura, edad-diámetro a 0.30 m, edad-área basal y edad-volumen para cada una de las cinco especies bajo estudio.

Ha: Si existe regresión para la relación edad-altura, edad-diámetro a 0.30 m, edad-área basal y edad-volumen para cada una de las cinco especies bajo estudio.

## 2 REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Descripción y distribución de especies estudiadas

A continuación se presenta la descripción taxonómica general e información sobre la distribución y ecología de cada una de las especies bajo estudio.

#### *Pinus cembroides* Zucc.

Es un árbol monoico con altura de 5 a 15 m y diámetro de 30 a 60 cm; fuste corto, copa redondeada a piramidal y rala; ramas verticiladas o irregularmente dispuestas. La corteza es de color gris, delgado, agrietado y dividida en placas cortas e irregulares. El grosor total de la corteza varía de 10 a 25 mm. Las hojas son acículas de color verde oscuro a amarillento en fascículos de tres o raramente dos, de 2.5 a 7 cm de largo y de 1.2 a 1.6 mm de ancho, robustas, rígidas, agudas, de bordes enteros, triangulares, con estomas en las tres caras, canales resiníferos de dos a tres, externos. Las vainas son de color café claro, caedizo. Yemas florales cilíndricas, largas y amarillentas.

Los conillos son globulosos, de color moreno rojizo, con escamas gruesas. Los frutos son conos subglobosos, de 5 a 6 cm de diámetro y se presentan aislados o en grupos de hasta cinco, caedizos, casi sésiles, de color moreno anaranjado o rojizos, con pocas escamas gruesas en su extremidad y delgadas en los bordes. Las escamas presentan un umbo dorsal, apófisis gruesa y piramidal con una pequeña punta caediza.

La madera es suave y ligera, amarillenta de una textura uniforme, con un peso específico de 0.56 a 0.65 g/cm<sup>3</sup>. La albura de color blanco amarillento pálido y el duramen rojizo pálido. Es utilizada en construcción de minas, casas pequeñas, puertas y para leña.

Se distribuye de forma natural desde los 31° N en Estados Unidos hasta los 18° N en México. Su distribución altitudinal varía de 1800 a 2800 msnm, con precipitaciones anuales de 400 a 700 mm y una estación seca de siete meses y temperaturas de 0 a 22°C. Crece en zonas cálidas a templadas y frías. La especie se ha observado creciendo en lugares abiertos, suelos rocosos y superficiales asociada con robles arbustivos, *Juniperus* pequeños y *Yucca* Spp. En los límites superiores y más húmedos de su hábitat se encuentra asociado con *Pinus engelmannii* Carr., y *Pinus chihuahuana* Engelmann in Wizlizenus, Mem. Tour N. Mexico (Salazar y Soihet, 2001).

### *Pinus maximartinezii* Rzedowski

Esta especie se distribuye en suelos calcáreos, rocosos, de buen drenaje y muy secos. El pino azul puede ser abundante en laderas llegando a formar rodales pequeños y fragmentados de una hectárea y raramente rodales más grandes. Los árboles adultos más comunes fluctúan entre 40 y 60 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP) con alturas que generalmente no exceden 15 m. Sin embargo, en sitios más húmedos y protegidos en cañadas existen individuos excepcionalmente grandes, con más de 110 cm de DAP. Las semillas de *P. maximartinezii* pueden medir hasta 25 mm de largo, 12.8 mm de ancho y 10.4 mm de grueso (López-Mata y Galván-Escobedo, 2011).

Representa una entidad biológica resultado de la historia evolutiva del reino vegetal a través de millones de años, que se ha desarrollado en forma aislada geográfica y taxonómicamente, por lo que tiene marcadas diferencias con el resto de los taxa. Perteneció al grupo de los pinos piñoneros, es endémico del "Cerro de Piñones" donde crece en un área restringida cercana al poblado de Juchipila en el Estado de Zacatecas. El bosque está, ubicado entre los paralelos 21° 20' y 21° 23' de latitud norte y entre los meridianos 103° 12' y 103° 5' de longitud oeste. El patrón de distribución espacial que exhibe la especie en el lugar, comprende algunos rodales uniespecíficos donde se concentra la mayor parte de los árboles y el resto se encuentra en pequeños grupos aislados con menos de 40 individuos (Lara-Rodríguez, 1997).

Cabe mencionar que esta especie se encuentra en peligro de extinción (P) según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010).

### *Pinus halepensis* Mill

Este es el pino menos robusto de todos los pinos españoles y el que alcanza una talla más modesta, llegando a los 20 m de altura. Tiene el tronco erguido, a menudo sinuoso, la corteza grisácea y la copa clara y con poco follaje. Las acículas aparecen en grupos de 2, en el extremo de ramitas torcidas, desprovistas en su mayor parte de hojas. Son finas, de menos de 1 mm de grosor, de 6-10 cm de longitud y de color verde claro. Las piñas crecen sobre un grueso pedúnculo y son alargadas y cónicas, de 6-12 cm de longitud, con escamas



aplastadas y ombligo poco saliente. Son de color marrón brillante y maduran al final del verano del segundo año. Los piñones se diseminan la primavera siguiente.

El pino carrasco crece en el contorno de la región mediterránea, incluidas las islas de este mar. En la Península Ibérica ocupa un área continua desde el noreste hasta el sureste, penetrando hacia el interior del valle del Ebro y hasta las cabeceras de los ríos Tajo y Guadiana. En la Comunidad Valenciana se distribuye de manera continua por todo su territorio y es con diferencia la especie arbórea más abundante y la que configura gran parte de sus paisajes vegetales (Deltoro-Torro, 2008).

En la Península Ibérica, el pino carrasco crece desde el nivel del mar hasta los 1,200 metros de altitud. Es una especie tolerante a la sequía, creciendo normalmente en zonas con precipitaciones del orden de los 500 mm, aunque se sabe que en algunos puntos se desarrolla con apenas 200-250 mm (304). Respecto al suelo, es indiferente en cuanto a su composición, ya que puede crecer en cualquier tipo de terreno (excepto en los suelos con gran contenido salino). No obstante, tolera mal los suelos de textura arcillosa, muy compactos o encharcados, prefiriendo los suelos sueltos y de textura equilibrada (Perelló-Guarro, 2012)

Esta especie tiene una enorme importancia ecológica y medioambiental en el entorno mediterráneo ya que es altamente resistente al estrés hídrico, restauradora de primera magnitud en zonas semiáridas y un colonizador insustituible en la dinámica evolutiva de la vegetación mediterránea (Orozco-Bayo *et al.*, 2007).

### *Pinus pinea* L

Árbol de hasta 30 m, aunque lo más frecuente es que no supere los 20. La copa, desde joven, tiende a adoptar una forma globosa. Ya adulto, la fisionomía más típica es la de un árbol con un tronco limpio de ramas desde la base, que se ramifica en la parte superior formando una copa globosa, más ancha que alta, que recuerda la forma de una seta. La corteza de los troncos gruesos tiene grietas longitudinales amplias y largas, y unas placas pardas, más o menos rojizas u oscuras. En las ramas intermedias, de 10 cm o menos de grosor, la corteza es ya lisa y grisácea a pardo-grisácea. Las acículas miden entre (6) 10 y 15 (20) cm, y son flexibles.

Los conos floríferos se producen en primavera. Los masculinos se encuentran reunidos en grupos numerosos, miden aproximadamente de 1 a 1,5 cm de longitud, son amarillos y muy vistosos. Los femeninos, poco evidentes, tienen aspecto de piñas diminutas, de alrededor de 6 mm de longitud y de colores amarillo o púrpura. Después de recibir el polen, se tornan de colores pardos y empiezan su lento desarrollo, que se prolonga a lo largo de tres años, hasta convertirse en piñas.

Estás se unen a la ramilla mediante un pedúnculo corto, prácticamente inapreciable. En la madurez toman colores de verde a pardo-oscuro. Cuando están cerradas tienen forma ovoidea o globosa, de 8 a 12 y hasta 15 cm de longitud y de 6 a 10 de ancho, con la cara visible de las escamas (apófisis), de contorno poligonal, entre cóncavas y piramidales, con un ombligo central amplio, pero no saliente ni pinchudo. Cuando se abren, mantienen la forma globosa y se aprecian en la cara superior de las escamas dos cavidades muy marcadas en las que se alojan las semillas (piñones). Las piñas caen enteras al suelo y en seguida comienzan a deshacerse para liberar los piñones. Estos son gruesos, largos (de 1.5 a 2 cm), con cáscara leñosa, generalmente cubierta de un polvillo negruzco, y con un ala muy corta y rápidamente caduca.

Se distribuye por el sur de Europa y el oeste de Asia. Aparece en el centro, este y sur de la Península y en islas Baleares. En el pasado su carácter autóctono fue puesto en entredicho por algunos autores, pero hoy día es incuestionable su naturalidad como lo prueban los restos de piñas, piñones y carbones que se han encontrado en numerosas excavaciones arqueológicas por toda nuestra geografía (Cádiz, Málaga, Granada, Badajoz, Alicante, Valladolid, etc).

Es especie de clima mediterráneo, con veranos prolongados y secos e inviernos de templados a relativamente fríos, como los de Castilla, desde el nivel del mar hasta algo más de 1000 m. Los mayores crecimientos se producen en suelos profundos, sueltos y algo arenosos, pero también puede vivir en los que son algo calizos, e incluso con un poco de yeso (Galán-Cela *et al.*, 2013).

#### *Pinus eldarica* Medw.

Esta especie crece rápidamente cuando es joven, alcanza alturas de 10 a 13 m y es bastante denso. Este árbol se destaca entre los pinos debido al hábito de crecimiento recto

que se queda a lo largo de su vida. Las agujas verdes medianas pareadas son de 13 a 16.5 cm de largo y unidas por 8 cm de largo. El árbol más a menudo se cultiva en partes de Texas (Gilman y Watson, 1994).

Es una especie que se adapta a un amplio rango de condiciones de crecimiento, y es excelente para las zonas templadas, semiáridas y áridas. Tolera rangos amplios de temperatura que abarcan desde los  $-25^{\circ}\text{C}$  hasta los  $47^{\circ}\text{C}$ . Condición rara entre los pinos, esta especie tolera suelos alcalinos y prospera en suelos con pH de 7.5 y mayores. Prefiere los suelos bien drenados, arenosos y francos, y crece más lentamente en suelos arcillosos. Una vez que se ha establecido, este árbol es capaz de adaptarse a las sequías prolongadas (Cano-Pineda y Martínez-Burciaga, 2004).

## 2.2 Plantaciones forestales

Las plantaciones forestales abarcaban 187 millones de hectáreas en 2000, el 62 % de ellas se encontraba en Asia. El área de plantaciones forestales aumentó de manera significativa respecto a las estimaciones de 1995 que consistían en 124 millones de hectáreas. La nueva tasa anual registrada es de 4.5 millones de hectáreas en todo el mundo, de las cuales el 89 % se encontraba en Asia y en América del Sur. Se estima que cerca de 3 millones de hectáreas se han desarrollado con éxito. En el contexto mundial, la mitad de las plantaciones forestales tiene fines industriales, un cuarto está destinado a fines no comerciales y un cuarto a fines no especificados; en el contexto mundial, las principales especies de rápido crecimiento y de rotación breve pertenecen a los géneros *Eucalyptus* y *Acacia*. Los pinos y otras especies de coníferas constituyen las principales especies útiles con períodos de rotación media, sobre todo en las zonas templadas y boreales (FAO, 2000).

Las plantaciones forestales además de generar ingresos directos a sus propietarios generan también servicios ambientales a la colectividad, y se ha demostrado científicamente que son los ecosistemas menos dañinos al ambiente después de los existentes en las áreas protegidas y los bosques naturales manejados (Cabrera-Gaillard, 2003). Además debieran atender a mediano y largo plazo la demanda de la industria forestal, ya que la composición de los bosques naturales no permite atender eficientemente las necesidades de la industria, debido a la diversidad de dimensiones y calidades de madera que ofrece los bosques naturales (CONAFOR, 2012).

En México existen más de 10 millones de ha disponibles para las plantaciones forestales comerciales, ya que cuentan con los factores idóneos para un crecimiento rápido como clima favorable, buena calidad de suelos, mano de obra disponible, así como de un mercado interno que demanda cada día más de productos forestales. En el periodo de 2005 a 2011, las entidades que proporcionaron el 51.5% en este tipo de plantaciones fueron Campeche, Coahuila, Chiapas, Tabasco y Veracruz (INEGI, 2012).

### 2.3 Métodos para determinar el crecimiento

Existen numerosos métodos por medio de los cuales es posible determinar el crecimiento. De manera general pueden clasificarse en métodos indirectos y directos. Los primeros consisten en que el crecimiento se determina de una manera indirecta, por ejemplo, por medio del clima o la cubierta vegetal; los métodos directos son aquellos en los cuales se toman medidas del incremento directamente (Klepac, 1983). Algunos ejemplos de métodos directos se describen enseguida.

El taladro de Pressler, el cual, es una herramienta que extrae una muestra (viruta) de la sección transversal del tronco del árbol, donde pueden contarse los anillos de crecimiento, lo mismo que medir su grosor (Rivas-Torres, 2006), generalmente se perfora el árbol en ángulo recto a su eje longitudinal y a una altura de 1.3 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, 1983).

Las tablas de producción, otro método directo, son modelos estáticos de crecimiento y producción de rodales forestales regulares, que han sido y son utilizadas frecuentemente en casi todo el mundo, aunque a medida que se van desarrollando modelos dinámicos para la misma especie y ámbito geográfico su uso se descarta frente a estas últimas herramientas, más fiables y flexibles; describen las características de las variables dasométricas más importantes de un rodal forestal en función de la edad y la calidad de estación. Su empleo como para predecir el incremento y como guías de en el manejo

forestal se emplea desde la introducción del manejo de bosque regular (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009).

Por otra parte, el método de control es un sistema especialmente de manejo para bosques de selección, de este método, solamente se toma en consideración la producción que se medirá con base en inventarios periódicos del volumen del rodal en pie. La medida del incremento por el método de control está basada en los libros de registro del volumen en el rodal en pie. Si estos libros son llevados apropiadamente, con seguridad nos pueden decir cómo fluctúa el volumen del rodal en pie, cuál es el incremento en el rodal inventariado, cuál es la incorporación de árboles en el rodal (Klepac, 1983).

Los análisis troncales son el último método directo y son quizá la técnica más utilizada para conocer el crecimiento e incremento de árboles de coníferas durante su vida; esta metodología estima el incremento en los años anteriores para predecir el incremento futuro basándose en el conteo de anillos de diversas secciones del fuste. En tal método se hacen un muestreo árboles llamados medios, árboles tipo o árboles dominantes (Magaña-Torres e Islas-Gutiérrez, 1989; Klepac, 1983).

#### 2.4 Crecimiento e incremento en variables dasométricas

Cuando se habla del incremento en diámetro de un rodal de selección se refiere al incremento en diámetro de los árboles tipo de las diversas categorías diamétricas. Las especies tolerantes muestran una tendencia a sostener durante más tiempo un buen incremento en diámetro. Los árboles tipo de las categorías más grandes de 80 a 90 cm, muestran aún un buen ritmo de incremento, aun cuando la culminación del incremento en diámetro haya ocurrido ya en cada árbol individualmente (Klepac, 1983).

Conocer el valor de la altura de los árboles de un rodal es muy importante en la gestión forestal, ya que esta variable se utiliza para diversos propósitos. En primer lugar, el diámetro normal y la altura total de un árbol permiten predecir con gran precisión su volumen total o comercial mediante el uso de una tarifa de cubicación, una función de perfil de tronco o una tarifa de volumen porcentual; en segundo lugar, en rodales regulares es habitual emplear la altura dominante y la edad para estimar la productividad de la estación forestal, generalmente mediante el índice de sitio. Por último, el valor de la altura de los árboles de un rodal es una información imprescindible para caracterizar su estructura

vertical (Romero-Hernández, 2005). La respuesta de crecimiento en las variables altura-diámetro de una masa de selección tiene más o menos un carácter estable. O dicho de otra manera, si un bosque de selección tiene una estructura normal y está balanceado, la curva de la altura-diámetro no cambia mucho en el curso del tiempo. La curva de la altura-diámetro en un bosque de selección usualmente no se traza en función de la edad, sino en función del diámetro normal; por medio del incremento en diámetro se puede calcular el incremento del área basal. La característica de este incremento recae en el hecho de que es más consistente que el incremento en diámetro (Klepac, 1983).

El incremento del área basal puede predecirse como una función de la edad o del área basal en pie. Si se usa la edad, se requieren diferentes conjuntos de incrementos para cada clase de índice de sitio. Con el área basal en pie, no pueden obtenerse modelos satisfactorios para rodales con historias muy variables. Consecuentemente, la predicción del incremento del área basal en función de la altura dominante y de la densidad (Alder, 1980).

El volumen del árbol aumenta paralelamente con la altura y el diámetro desde su nacimiento hasta su muerte. La curva de crecimiento es también en forma de S, pero el punto de inflexión en esta curva ocurre aun 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 al incremento en volumen siempre culmina después del incremento en altura, diámetro y área basal; el volumen de un rodal en su juventud es muy pequeño, incrementa lentamente y a una edad determinada incrementa con rapidez. Después este incremento disminuye y no cesa hasta que ésta comienza a declinar. Se puede seguir el desarrollo de un rodal desde su establecimiento hasta su corta de dos maneras: tomando en cuenta el volumen total de madera producida, o considerando el desarrollo del rodal en pie (Klepac, 1983).

## 2.5 Estudios afines

Rodríguez-Soto (1989) realizó un ensayo de cinco especies del género *Pinus*: *P. cembroides*, *P. halepensis*, *P. eldarica*, *P. maximartinezii* y *P. pinea* en Buenavista Saltillo, Coahuila; con información derivada después de los 23 meses de establecido el ensayo, concluye preliminarmente, que el *P. cembroides* resultó ser superior a las otras especies; su buena adaptación la atribuye a que esta especie es de distribución regional. Por otra parte,

en el mismo ensayo de especies donde se realizó la anterior investigación, Trujillo-Sánchez (1995) con información después de 93 meses de establecido este mismo ensayo en Buenavista Saltillo, Coahuila, y a partir de las variables evaluadas (sobrevivencia, incremento en altura y diámetro) y por medio de un análisis de varianza así como una prueba de comparación de medias de Turkey, en su investigación, concluye que la especies exóticas *Pinus eldarica* y *Pinus halepensis* alcanzaron después de 93 meses de establecida la plantación, similar sobrevivencia que la nativa *P. cembroides* y que el *P. pinea* y el *P. maximartinezii* arrojaron los más bajos valores de sobrevivencia, atribuyéndose esto a las condiciones xéricas del área en donde se llevó a cabo el experimento.

Corral y Návar-Cháidez (2005), a partir de diversas ecuaciones de crecimiento e incremento en diámetro, altura, volumen y un ajuste y validación para las especies *Pinus durangensis*, *P. cooperi* Engelm, *P. leiophylla*, *P. engelmannii* y *P. herrerae*, muestran en sus resultados que a través del modelo de Chapman-Richards las cinco especies presentan los crecimientos e incrementos mayores cuando el crecimiento se estima a nivel grupo de árboles e individualmente y que *P. durangensis* alcanza los crecimientos e incrementos mayores en diámetro, altura y volumen para las condiciones observadas de la región. El estudio se realizó en la región del Salto, Durango, la cual comprende los predios de la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal (UCODEFO) No. 6, localizándose en el sistema montañoso denominado Sierra Madre Occidental. La base de datos con las variables diámetro, altura y volumen a una edad dada se integró con información de análisis troncales provenientes de árboles ubicados en las diferentes condiciones de sitio del área que comprende la UCODEFO. La estimación de alturas se realizó de acuerdo al método ISSA, el volumen se determinó usando la fórmula de Smalian y la fórmula del cono para el diámetro de la parte distal del fuste. La muestra incluyó solamente arbolado creciendo libre de competencia e incluyó varias clases de edad. Para ajustar los modelos de crecimiento e incremento la muestra comprendió 42 árboles de *P. cooperi* Engelm, 39 de *P. durangensis*, 37 de *P. engelmannii*, 35 de *P. leiophylla* y 29 de *P. herrerae*. Para validar los modelos se usó una muestra independiente de datos con 23 árboles de cada especie.

Continuando con los estudios afines, Hernández-López (2003), por medio de análisis troncales, describe el crecimiento del árbol representativo de *Pinus patula* Schl. et Cham. var. *longipedunculata* Martínez, *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus ayacahuite*

Ehr., en una plantación en Santiago Comaltepec, Ixtlán, Oaxaca, establecidas bajo el tratamiento silvícola de selección en grupo. Se emplearon diez modelos de crecimiento para estimar el crecimiento en coníferas. Con el apoyo del paquete estadístico SAS utilizando el procedimiento de regresión no lineal (Nonlinear Regression o NLIN), se estimaron los parámetros de cada modelo y se obtuvo la suma de cuadrados del error (SCE). El modelo seleccionado fue aquel que presentó menor SCE, además de rectificar el diagrama de dispersión con el ajuste del modelo y los valores graficados de los residuales. Los modelos de crecimiento empleados en este trabajo que presentaron mejores ajustes fueron los modelos Schumacher, Monomolecular, Logístico y Weibull. Los resultados arrojaron que la especie que presentó mayor crecimiento fue *P. patula* var. *longipedunculata*, seguido por *P. pseudostrobus*, la especie que mostró menor crecimiento fue *P. ayacahuite*. Las tres especies estudiadas presentaron crecimientos ascendentes, esto se debe principalmente a su etapa juvenil

Se han obtenido modelos explicativos de los parámetros de la función Weibull biparamétrica para modelizar las distribuciones diamétricas en rodales regulares de *Pinus pinea*, en la provincia de Valladolid (España). A partir de datos experimentales tomados en 131 parcelas (20 árboles/parcela), se han determinado inicialmente los parámetros de la distribución teórica ajustada a las distribuciones reales mediante el método de los percentiles y regresión no lineal. A continuación se han ajustado modelos lineales predictivos de los parámetros calculados, que incluyen variables de masa. El parámetro «b» se asocia muy estrechamente con el diámetro medio cuadrático (dg), mientras que el parámetro «c» presenta una mayor dificultad de ajuste, relacionándose con dg y una segunda variable (edad o fracción de cabida cubierta) (García-Güemes *et al*, 2002).

López-Hernández y Valles-Gándara (2009) en su investigación donde el objetivo fue ajustar un grupo de modelos para predecir el índice de sitio de *Pinus durangensis* con datos derivados de una remediación de sitios permanentes establecidos en un bosque natural en el Ejido Vencedores en San Dimas, Durango; encontraron que el modelo que mejor estima el índice de sitio fue el modelo logarítmico 6 ( $\ln[E/H] = \beta_0 + \beta_1[1/E]$ ), pues proporciona los valores más altos: en la prueba de  $R^2$  de los residuales fue de 0.7419; el de CME fue de 0.01608 y un valor en la prueba de “F” de 221.304. en total se probaron 13 modelos matemáticos ajustados con el procedimiento de mínimos cuadrados, de los cuales



10 son lineales y tres no lineales; los lineales fueron: logarítmicos, cuadráticos y un modelo combinado, en tanto para los no lineales se trabajó con la función Chapman-Richards, la de Schumacher y el modelo Weibull. Se seleccionaron los mejores modelos de acuerdo al grado de ajuste o Pseudo  $R^2$ , la prueba de “F”, el cuadrado medio del error (CME), la prueba de hipótesis de los estimadores y el signo del parámetro.

Para Zuñiga-Hernández (2013) el propósito de su investigación fue determinar el índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus patula* Schl. et Cham., y *Pinus douglasiana* Martínez, en plantaciones de Miahuatlán. Oaxaca, se utilizó información proveniente de 85 sitios permanentes de 100 m<sup>2</sup>, cada uno, donde se realizaron 6 evaluaciones anuales consecutivas desde 2005 a 2011 de las cuales dos fueron evaluadas en este estudio (2010-2011) y las restantes estimaciones fueron datos de evaluaciones previas. Las variables evaluadas fueron edad y altura dominante. Para ajustar los pares edad-altura se probaron cuatro modelos no lineales y se eligió el de mejor ajuste en base a los estadísticos de  $R^2_{adj}$ ,  $R^2$ , CME. Para la determinación de los índices de sitio se utilizó el método de la curva guía con una edad base de 18 años. Los resultados arrojan que el modelo de Chapman-Richards fue el de mejor ajuste presentando los valores más altos de coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}=0.9973$ ) y coeficiente de determinación ( $R^2=0.9974$ ) y el valor más bajo de cuadrado medio del error (CME= 0.2401)

En un estudio para estimar el crecimiento en diámetro, altura y área basal de *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King y *Tabebuia donnell-smithii* Rose establecidas en plantaciones de enriquecimiento de acahual y sistema agroforestal en San José Chacalapa, Municipio de San Pedro Pochutla y en Santiago La Galera, municipio de Candelaria Loxicha, ambos del distrito de Pochutla Oaxaca, se establecieron 40 sitios permanentes de forma circular de 250 m<sup>2</sup> cada uno en los cuales se remidieron las variables diámetro normal y altura total, en base a los datos obtenidos previamente en el año 2008, 2009 y 2010 y con la evaluación del 2011, teniendo un total de 160 valores de sitios de muestreo, con base en estos se determinó el crecimiento de las tres especies, utilizando los modelos de Schumacher modificado por Bailey y Clutter, Chapman- Richards y Weibull. El mejor modelo que se ajustó para las diferentes variables, fue el de Weibull seguida por el de Schumacher. De las especies evaluadas la que mostró mejor crecimiento en diámetro normal, altura y área basal fue *Cedrella odorata*, seguida *Tabebuia donnell-smithii*, y por

ultimo *Swietenia macrophylla*, mostrando cada una de ellas una tendencia de crecimiento sigmooidal (Cruz-Méndez, 2013).

Arteaga-Martínez (2001) evaluó el crecimiento de cuatro especies de pinos en la región de Ayotoxtla del estado de Guerrero: *Pinus radiata* D. Don., *P. oaxacana* Mirov., *P. montezumae* Lamb., y *P. pseudostrobus* Lindl. Se obtuvo el incremento corriente anual y el incremento medio anual de cada variable dasométrica por medio de análisis troncal, lo cual sirvió para ajustar modelos de índice de sitio a través de relaciones edad-altura, obtener modelos para predecir el volumen en función del diámetro normal y la edad, y obtener modelos de crecimiento en volumen, diámetro normal y altura total en función de la edad. El modelo de Chapman-Ricards, fue el que mejor ajuste presentó en el cálculo de índices de sitio de las diferentes especies. Los modelos predictores de volumen obtenidos fueron para *Pinus radiata* el de la variable combinada, el Australiano para *P. oaxacana* y el Meyer modificado para *P. pseudostrobus*. En la prueba de modelos de crecimiento en función de la edad, se obtuvo que el modelo de Schumacher tuvo una gran representatividad, excepto para el diámetro normal en las especies *Pinus oaxacana* y *P. pseudostrobus*, en las que el mejor ajuste lo presentó el modelo de Chapman-Richards.

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Descripción general del área de estudio

El presente estudio fue realizado en Buenavista Saltillo, Coahuila, en terrenos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Éste se localiza en las coordenadas geográficas 25° 21' de latitud Norte y 101° 01" de longitud Oeste aproximadamente (Figura 1), con una altitud de 1810 msnm y con una exposición topográfica Oeste, el terreno tiene una pendiente media del 7 %.

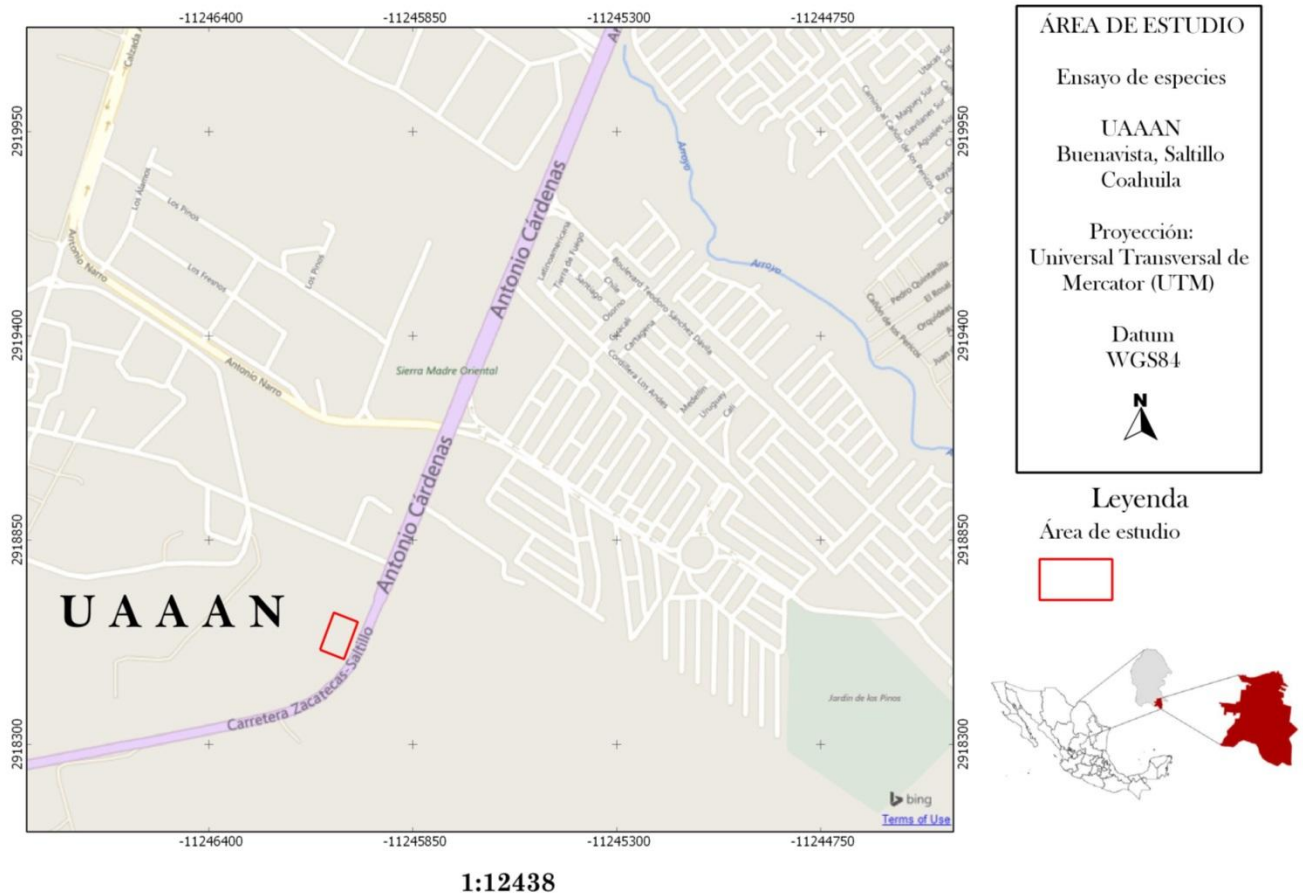


Figura 1. Ubicación del área de estudio

De acuerdo con la carta de climas CONABIO (1998), el área presenta un clima semiárido BSohw que es un clima árido, semicálido, con temperatura promedio de 18° a 22°C, la temperatura del mes más frío es menor a 18°C, la temperatura promedio del mes más caliente es mayo en 22 °C. El área presenta una precipitación media anual de 347.5 mm, la temporada lluviosa es de junio a octubre, siendo el más lluvioso julio y el mes más

seco marzo. La temperatura media anual es de 18.5 °C y se han observado máximas extremas de 35°C y mínimas extremas de -17°C, ambas en el año de 2010. Las heladas principian en noviembre, siendo regularmente severas en noviembre y diciembre, son mas severas y frecuentes en enero (hasta -10°C) y terminan en marzo, mes en que son intensas y frecuentes; en ocasiones puede haber heladas leves en abril.

En cuanto al suelo, de acuerdo con la carta edafológica, el suelo es Xerosol Cálcico con textura media, representado con su abreviatura (Xk). Estos suelos se caracterizan por tener cal en alguna parte del suelo (CONABIO, 1995).

Como antecedente para este estudio, Rodríguez-Soto (1989) menciona que, los árboles se plantaron con una distribución regular de triángulos equiláteros utilizando el sistema de plantación de cepa común de 30 x 30 x 30 cm con un cajete en forma de media luna. La plantación se realizó el día 8 de julio de 1986, con plantas de una edad promedio de entre 18 y 24 meses. El sitio experimental se dividió en cuatro bloques (cuatro repeticiones por tratamiento) ubicados de manera perpendicular con la pendiente del terreno. Dentro de cada bloque se ubicaron las cinco unidades experimentales. El número de plantas por tratamiento fue de 100, por repetición 25 y el total de las plantas del ensayo fue de 500.

### 3.2 Análisis troncal

El 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 y 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).

#### 3.2.1 Selección y derribo del arbolado

Se seleccionaron 25 árboles en total de las cinco especies del género *Pinus* distribuidos en las 20 unidades experimentales del ensayo de especies en el área de estudio. Los árboles que se seleccionaron fueron aquellos que se encontraban en mejores condiciones.

Se evaluaron las variables altura y diámetro de cada individuo antes del apeo (Cuadro 1). Posterior al derribo de los árboles, de cada uno de ellos se tomaron secciones o rodajas transversales con apoyo de una motosierra y una segueta de metal. Las rodajas se obtuvieron a alturas de 0.0 m, 0.30 m y a partir de 0.30 m y después cada medio metro hasta cubrir la longitud total de los árboles. Las rodajas se identificaron con una clave con el propósito de evitar pérdida y confusión de rodajas. La clave incluía la especie y fecha de corte. Se guardaron en bolsas de papel y plástico para ser transportadas al laboratorio.

Cuadro 1. Alturas y diámetros de cada uno de los individuos bajo estudio de cinco especies de del genero *Pinus* evaluadas en Buenavista, Saltillo Coah.

Especie	Ejemplar	Altura total (m)	Diámetro a 0.30 metros de altura (cm)
<i>Pinus cembroides</i> Zucc.	1	5.32	13.80
	2	4.57	9.60
	3	4.80	15.80
	4	3.32	7.70
	5	4.30	10.50
<i>Pinus eldarica</i> Medw.	1	4.49	19.10
	2	3.10	10.80
	3	3.84	15.30
	4	4.05	10.00
	5	3.65	10.50
<i>Pinus halepensis</i> Mill	1	6.00	16.70
	2	8.20	38.30
	3	4.59	13.50
	4	5.15	18.60
	5	6.52	14.90
<i>Pinus maximartinezii</i> Rzedowski	1	3.75	14.00
	2	3.98	13.80
	3	3.69	15.30
	4	3.97	13.60
	5	3.51	11.30
<i>Pinus pinea</i> L.	1	0.64	3.80
	2	1.25	7.00
	3	1.00	7.30
	4	1.97	3.20
	5	1.31	4.70

### 3.2.2 Acondicionamiento para la evaluación de las rodajas

Las rodajas se secaron al aire libre, una vez secas éstas, se procedió a lijarlas y pulirlas para aclarar los anillos mediante el empleo de una pulidora manual. Posteriormente, con ayuda de un lápiz, se marcó un radio sobre cada rodaja para después seguir con el conteo y medición de los anillos de cada una de ellas.

### 3.2.3 Conteo de anillos y llenado de formato

Con el apoyo de un estereoscopio 10x y sobre el radio marcado anteriormente se identificaron los anillos de crecimiento y se tomaron medidas anuales, es decir, se midió cada uno de los anillos de crecimiento, desde la médula hasta el área de la corteza. Posteriormente, para medir el diámetro con corteza, se empleó un pie de rey. En un formato elaborado previamente se registraron todos los datos obtenidos para después proceder a su análisis.

### 3.2.4 Tipos dendrométricos

Los troncos de los árboles cuyo crecimiento no ha sido perturbado por causas exteriores tienden a tomar una forma regular o simétrica, de tal modo que su eje resulta sensiblemente rectilíneo, su sección transversal más o menos circular y en su conjunto pueden asemejarse a cuerpos geométricos generados por la rotación de una línea alrededor de un eje situado en el mismo plano, se llaman, en consecuencia, tipos dendrométricos a los cuerpos geométricos que se asemejan a los troncos o fustes de los árboles para determinar su volumen (Romahn-de la Vega y Ramírez-Maldonado, 2010)

La mejor aproximación a la forma real del árbol, se hace descomponiendo éste en trozas y aplicando a cada una de ellas el tipo geométrico más apropiado. Así, por lo general, la parte inferior del árbol se ajusta a un neiloide truncado, el tramo medio inferior a un cilindro o a un paraboloides truncado, el tramo medio superior a un paraboloides truncado y el extremo superior a un cono o a un paraboloides truncado. No obstante los puntos de inflexión entre estas formas no presentan un patrón definido (Picos-Martin y Cogolludo-Agustín, 2008; Romahn-de la Vega y Ramírez-Maldonado, 2010).

A partir de los tipos dendrométricos neiloide truncado, paraboloides apolónicos truncados y conos truncados se estimaron los volúmenes de cada sección en cada uno de los árboles (Cailliez, 1980; Romahn-de la Vega y Ramírez-Maldonado, 2010).

### 3.2.5 Cálculo de edad y variables dasométricas

Para cada árbol representativo se realizó el análisis troncal de acuerdo a la metodología señalada por Klepac (1983).

La determinación del crecimiento en altura para las secciones se obtuvo contando los anillos de crecimiento en cada rodaja y para la edad en cada altura del corte se realizó una diferencia entre la edad total y el número de anillos de las secciones anteriores.

Para obtener el crecimiento en diámetro por año se trazó una línea al centro de la rodaja. Con el apoyo de un estereoscopio 10x se identificaron los anillos de crecimiento. Para medir el diámetro incluyendo diámetro con corteza, se empleó un pie de rey.

Para el caso de la evaluación del crecimiento e incremento en altura de cada una de las especies evaluadas, se utilizaron los datos previos obtenidos en el momento de extraer las rodajas en campo.

Para la evaluación en diámetro de los 25 árboles, se consideraron los datos obtenidos de la rodaja de la base a 0.00 metros de altura, tomando como justificación que los ejemplares de una de las especies estudiadas (*Pinus pinea*) tienen una altura total promedio de 1.03 metros.

Para la evaluación de los incrementos, en área basal se realizó utilizando como base el diámetro a 0.30 metros de altura en cada uno de los ejemplares y se calculó con la siguiente fórmula (Romahn-de la Vega *et al.*, 1994):

$$AB = \frac{\pi}{4} (D^2)$$

dónde:

AB = área basal de la sección (m<sup>2</sup>)

$\pi = 3.1416$

D<sup>2</sup> = diámetro al cuadrado tomado a 0.3 (m)

Para el caso del volumen fue necesario calcular los metros cúbicos por sección del árbol utilizando tipos dendrométricos que asemejan la forma del fuste y hacen que su cálculo sea aún más preciso.

Para el cálculo de volumen del tocón correspondiente a la altura 0 a 0.30 m se empleó la fórmula del neiloide truncado siendo el que más se asemeja al tocón (Romahn-de la Vega *et al.*, 1994):

$$V = \frac{H}{4} \left( S_0 + S_1 + \sqrt[3]{S_0 S_1} (\sqrt[3]{S_0} + \sqrt[3]{S_1}) \right)$$

dónde:

V = volumen en m<sup>3</sup>

S<sub>0</sub> = área menor en m<sup>2</sup>

S<sub>1</sub> = área mayor en m<sup>2</sup>

H = longitud de la troza en m

A partir de los 30 cm de longitud en adelante exceptuando la última sección (cono), el cálculo del volumen se realizó con la fórmula de Smalian (Cailliez, 1980):

$$V = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D_1^2 + D_2^2}{2} \right) L$$

dónde:

V = volumen en m<sup>3</sup>

D<sub>1</sub><sup>2</sup> = diámetro menor en m<sup>2</sup>

D<sub>2</sub><sup>2</sup> = diámetro mayor en m<sup>2</sup>

L = longitud de la sección en m

π = 3.1416

Para el cálculo de la última sección, en el caso de *P. cembroides*, *P. maximartinezii*, *P. halepensis* y *P. eldarica*, se utilizó la fórmula del cono (Romahn-de la Vega y Ramírez-Maldonado, 2010).



$$V = \frac{S_0 h}{3}$$

dónde:

V = volumen en m<sup>3</sup>

S<sub>0</sub> = área de la base del cono en m<sup>2</sup>

h = altura total del cono en m

En *Pinus pinea*, el cálculo del volumen para la sección de la base hasta justo antes de donde empieza la punta se utilizó la fórmula del paraboloides apolónico y posteriormente en la sección de la punta, se utilizó el tipo dendrométrico como truncado (Romahn-de la Vega y Ramírez-Maldonado, 2010), ya que el ápice del fuste no se representaba en la forma de un cono como tal, más bien su apariencia se asemejaba más a este tipo dendrométrico.

$$V = \frac{L}{3} (S_0 + S_1 + \sqrt{S_0 S_1})$$

dónde:

V = volumen en m<sup>3</sup>

S<sub>0</sub> = área menor de la base del cono en m<sup>2</sup>

S<sub>1</sub> = área mayor de la base del cono en m<sup>2</sup>

L = longitud de la sección en m

### 3.3 Modelos de crecimiento

Se emplearon tres modelos de crecimiento (Cuadro 2) para evaluar las variables dasométricas edad-diámetro, edad-altura, edad-área basal y edad-volumen; éstos, fueron seleccionados con base en otras investigaciones realizadas, las cuales demuestran que son los que presentan el mejor ajuste para el caso de coníferas y han mostrado una estimación satisfactoria, como por ejemplo (Sit y Poulin-Costello, 1994; Arteaga-Martínez, 2001; Hernández-López, 2003; Corral y Nívar-Cháidez, 2005; Calvillo-García *et al.*, 2005; López-Hernández y Valles-Gándara, 2009; Zuñiga-Hernández, 2013; Cruz-Méndez, 2013).

Cuadro 2. Modelos de crecimiento empleados para cinco especies del género *Pinus* en Buenavista, Saltillo, Coah.

Modelo	Forma funcional
Schumacher	$Y = e^{a+b/X}$
Chapman-Richards	$Y = a[1 - e^{-bX}]^c$
Weibull	$Y = 1 - e^{-aX^b}$

Dónde: Y = variable de estudio; a, b, c, d= parámetros de regresión; X = edad; e = base logaritmos naturales.

Fuente: Sit y Poulin-Costello (1994)

Con el apoyo del paquete estadístico SAS utilizando el procedimiento de regresión no lineal (Nonlinear Regression o NLIN), se estimaron los parámetros de cada modelo.

### 3.4 Estadísticos para comparación de modelos

Para realizar la comparación entre los diferentes modelos se calculó para cada uno de ellos los siguientes estadísticos: el cuadrado medio del error, que analiza la precisión de las estimaciones; y el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ), que refleja la variabilidad total que es explicada por el modelo y que tiene en cuenta el número total de parámetros a estimar. Un modelo será mejor que otro si se obtienen menores valores de *CME* y mayores de ( $R^2_{adj}$ ) (Corral y Nívar-Cháidez, 2005; Cabanillas-Saldaña, 2010), además de rectificar el diagrama de dispersión con el ajuste del modelo y los valores graficados de los residuales. Sus expresiones matemáticas son las siguientes:

Coeficiente de determinación ajustado (Cabanillas-Saldaña, 2010):

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \cdot \left( \frac{N-1}{N-p} \right)$$

dónde:

$y_i$  = datos observados.

$\hat{y}$  = datos estimados con el modelo.

$\bar{y}$  = promedio de los datos de la variable dependiente.

$N$  = número de observaciones.

$p$  = número de parámetros de la regresión.

Cuadrado Medio del Error (Cabanillas-Saldaña, 2010):

$$CME = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - p}$$

dónde:

$y_i$  = datos observados.

$\hat{y}$  = datos estimados con el modelo.

$N$  = número de observaciones.

$p$  = número de parámetros de la regresión.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Mejores modelos de ajuste

A continuación se muestran los modelos con mejor ajuste para altura, diámetro a 0.3 m, área basal y volumen (Cuadro 3), así como su respuesta para cada una de las diferentes especies en cuanto a criterios de bondad de ajuste.

Cuadro 3. Modelos con mejor ajuste y valores de coeficiente de determinación ( $R^2_{adj}$ ) y Cuadrado Medio del Error (CME), en la relación edad-altura, edad-diámetro, edad-área basal y edad-volumen para las cinco especies del género *Pinus* en Buenavista, Saltillo, Coahuila.

Relación	Especie	Modelo	Parámetros de regresión			$R^2_{adj}$	CME
			$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$		
Edad- Altura	P.c.	Schumacher	2.22450	-22.0679		0.9542	0.3508000
	P.e.	Schumacher	1.97620	-18.9615		0.9753	0.1349000
	P.h.	Schumacher	2.37130	-20.1785		0.9535	0.6221000
	P.m.	Schumacher	2.20470	-24.6534		0.9844	0.0765000
	P.p.	Weibull	0.00563	1.8770		0.9506	0.0190000
Edad- Diámetro	P.c.	Weibull	0.000850	1.5059		0.9373	0.0002690
	P.e.	Weibull	0.000943	1.4947		0.9794	0.0001010
	P.h.	Chapman- Richards	13.725000	0.0014	1.3156	0.9784	0.0003310
	P.m.	Weibull	0.001350	1.3745		0.9303	0.0003220
	P.p.	Weibull	0.000360	1.5402		0.9845	0.0000130
Edad-Área Basal	P.c.	Schumacher	-2.3676000000	-58.7552		0.8107	0.0000058
	P.e.	Weibull	0.00000012430	3.4978		0.9440	0.0000021
	P.h.	Chapman- Richards	1281.90000000	0.0006	2.6353	0.9701	0.0000120
	P.m.	Weibull	0.00000225200	2.5914		0.8135	0.0000061
	P.p.	Weibull	0.00000004535	3.3293		0.9476	0.0000001
Edad- Volumen	P.c.	Schumacher	-1.033600000000	-86.5961		0.7722	0.000011000
	P.e.	Weibull	0.000000000324	5.3282		0.9003	0.000004813
	P.h.	Weibull	0.000000022630	4.3		0.9857	0.000018000
	P.m.	Schumacher	-1.071900000000	-96.2537		0.9095	0.000001456
	P.p.	Weibull	0.000000000038	5.2305		0.8618	0.000000023

Dónde: P.c.= *Pinus cembroides* Zucc., P.e.= *Pinus eldarica* Medw., P.h.= *Pinus halepensis* Mill., P.m.= *Pinus maximartinezii* Rzedowski., P.p.= *Pinus pinea* L.,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ = Parámetros de regresión,  $R^2_{adj}$ = Coeficiente de determinación ajustado, CME= Cuadrado medio del error.

## 4.2 Crecimiento e Incremento

A continuación se muestran los resultados obtenidos en crecimiento e incremento de cada una de las variables para las cinco especies en este estudio.

### 4.2.1 Crecimiento e incremento en altura

El modelo de mejor ajuste en la relación edad-altura para las especies *Pinus cembroides* (P.c.), *Pinus eldarica* (P.e.), *Pinus halepensis* (P.h.) y *Pinus maximartinezii* (P.m.) fue Schumacher ya que presentó el menor CME no aumentando su valor más de 0.6300, así como el valor más alto del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ), presentando también valores por arriba de 0.9500, en el caso de *Pinus pinea* (P.p.) el modelo de mejor ajuste fue Weibull presentando, igualmente un valor menor en CME y un valor alto en  $R^2_{adj}$  (Cuadro 3). De los tres modelos utilizados para el ajuste edad-altura la variación estadística no es significativa, por lo que también se pueden utilizar (Apéndice 1).

Uno de los objetivos específicos en este estudio es seleccionar el mejor modelo de ajuste para las variables altura, diámetro 0.30 m, área basal y volumen por especie. Para la variable altura los resultados demuestran que los modelos Schumacher y Weibull presentan el mejor ajuste según los criterios  $R^2_{adj}$  y CME.

De igual forma Aguilar-Ramírez (1991) a través de su investigación (Cuadro 4) demuestra también que los mejores modelos de crecimiento son los mismos que para este estudio Schumacher y Weibull, aplicados a la relación edad-altura mediante funciones continuas de forma sigmoideal. Se puede notar que el autor utiliza la misma metodología para su investigación, aunque a diferencia de ésta, en el presente estudio se trabaja con cinco especies que crecen en condiciones ambientales similares. Con esto se puede resaltar que al hacer investigaciones de este tipo es mejor utilizar no solo una, sino, varias especies porque al obtener los resultados se diferencia la respuesta de los modelos seleccionados y se tiene una base comparativa de los mismos, con todo esto se puede deducir aquel modelo que explica mejor la relación entre las variables; cabe mencionar que en el estudio anterior se obtuvieron los parámetros coeficiente de regresión ( $r$ ), coeficiente de determinación  $R^2$ , análisis de varianza, F calculada y residuales. Para el modelo Schumacher se obtuvo un  $R^2 = 0.99$  y para Weibull un  $R^2 = 0.94$ , sin embargo, a diferencia de este estudio, el autor en su investigación, no utiliza el CME como criterio de bondad de ajuste.

García-Corona *et al.* (2000) elaboraron tablas de producción en su investigación (Cuadro 4) y para la evaluación de la calidad de sitio se tomó como criterio la calidad productiva; el modelo que presentó mejor ajuste en altura dominante fue Schumacher, al igual que en este estudio, obteniendo el menor valor del CME y el mayor valor de  $R^2$  (0.74). Al comparar los resultados obtenidos por García-Corona *et al.* (2000) se diferencia del presente estudio por no presentar el coeficiente de correlación, desviación estándar y alturas por categoría diamétrica, además de que el diámetro que se utilizó para este estudio fue el de la base y no para el diámetro a la altura del pecho.

De los modelos que más se ajustaron y que se han mencionado anteriormente, se nota que es frecuente el ajuste sobre todo para plantaciones en etapas juveniles, por mencionar un ejemplo está la investigación de Hernández-López (2003) quien realizó un estudio de crecimiento de tres especies de pino utilizando análisis troncales (Cuadro 4) en donde para el crecimiento en altura presentó mejor ajuste en las tres especies el modelo Schumacher, para *P. patula* var. *longipedunculata*, al igual que en el presente estudio, seguido por el modelo Weibull. Para el presente estudio los mejores modelos de ajuste fueron los mismos y al comparar los resultados obtenidos por Hernández-López (2003) con este estudio, el autor no reporta los valores de  $R^2$ , ni los valores del CME sino solo los de la SCE, sin embargo las plantaciones al momento de someterlas a investigación, se encontraban en una etapa relativamente juvenil.

Por otra parte Calvillo-García *et al.* (2005) probaron modelos matemáticos para describir el crecimiento, con base en el diagrama de dispersión de la relación edad-altura, edad-diámetro, edad-área basal y edad-volumen (Cuadro 4); la selección del mejor modelo se fundamentó en los siguientes criterios de bondad de ajuste: cuadrado medio del error (CME), coeficiente de determinación ( $R^2$ ), así como t-Student y convergencia. El mejor modelo seleccionado para describir el crecimiento en altura fue Chapman-Richards. Las diferencias que existen es que el autor del estudio anterior considera el área basal a 2.84 metros y en el presente estudio se le considera a 0.30 metros, ésta podría ser la causa de que el mejor modelo de ajuste para la relación edad- altura sea diferente al de este estudio.

Cuadro 4. Investigaciones realizadas por diferentes autores para las variables altura y diámetro donde se presenta área de estudio, especies y modelos utilizados.

Variable	Autor (año)	Área de estudio	Especie (s)	Modelo (s) utilizados
Altura	Aguilar-Ramírez (1991)	Atenquique, Jalisco, México	<i>P. douglasiana</i>	Weibull, Schumacher, Gompertz y Logístico.
	García-Corona <i>et al.</i> (2000)	Empresa Forestal Integral Macurije del Pinar del Río, Cuba.	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	Schumacher
	Hernández-López (2003)	Santiago Comaltepec, Ixtlán, Oaxaca, México	<i>Pinus patula</i> Schl. et Cham var. <i>longipedunculata</i> Martínez, <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. y <i>Pinus ayacahuite</i> Ehr	Schumacher, Chapman-Richard's, Von Bertalanffy, Logístico, Weibull, Gompertz, Levakovic I, Korf, Sloboda, Monomolecular.
	Calvillo-García <i>et al</i> (2005)	Cd. Hidalgo, Michoacán, México.	<i>Pinus herrerae</i> Martínez	Chapman-Richards, Gompertz, Logístico, Schumacher, Weibull y Exponencial.
Diámetro	Corral y Návar-Cháidez (2005)	Predios de la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal (UCODEFO) No. 6., El Salto, Durango, México.	<i>Pinus durangensis</i> , <i>P. cooperi</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. engelmannii</i> y <i>P. herrerae</i>	Chapman-Richard's, Hossfeld IV, Gompertz, Logístico, Monomolecular, Von Bertalanffy, Korf, Weibull, Sloboda, Levakovic III, Schumacher.
	Arteaga-Martínez (2001)	Ayotoxtla del estado de Guerrero, México.	<i>Pinus radiata</i> , <i>P. oaxacana</i> , <i>P. montezumae</i> y <i>P. pseudostrobus</i>	Shumacher, Chapman Richard's
	Cruz-Méndez (2013)	San José Chacalapa, Municipio de San Pedro Pochutla y en Santiago la Galera, Municipio de Candelaria Loxicha, ambos del Distrito de Pochutla Oaxaca, México	<i>Cedrela odorata</i> L. <i>Swietenia macrophylla</i> King, <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	Schumacher modificado por Bailey y Clutter, Chapman-Richards y Weibull

Cuadro 5. Investigaciones realizadas por diferentes autores para las variables área basal y volumen donde se presenta área de estudio, especies y modelos utilizados.

Variable	Autor (año)	Área de estudio	Especie (s)	Modelo (s) utilizados
	González-Zárate (2000)	Sur de Nuevo León y Sureste de Coahuila, México.	<i>Pinus estevezii</i> Mtz Perry	Schumacher, Chapman-Richard's, Von Bertalanffy, Logístico, Weibull, Gompertz, Levakovic I, Korf, Sloboda, Monomolecular.
Área basal	Hernández-López (2003)	Santiago Comaltepec, Ixtlán, Oaxaca, México	<i>Pinus patula</i> Schl. et Cham var. <i>longipedunculata</i> Martínez, <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. y <i>Pinus ayacahuite</i> Ehr	Schumacher, Chapman-Richard's, Von Bertalanffy, Logístico, Weibull, Gompertz, Levakovic I, Korf, Sloboda, Monomolecular.
	Cruz-Méndez (2013)	San José Chacalapa, Municipio de San Pedro Pochutla y en Santiago la Galera, Municipio de Candelaria Loxicha, ambos del Distrito de Pochutla Oaxaca, México	<i>Cedrela odorata</i> L. <i>Swietenia macrophylla</i> King, <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	Schumacher modificado por Bailey y Clutter, Chapman-Richards y Weibull
	González-Zárate (2000)	Sur de Nuevo León y Sureste de Coahuila, México.	<i>Pinus estevezii</i> Mtz Perry	Schumacher, Chapman-Richard's, Von Bertalanffy, Logístico, Weibull, Gompertz, Levakovic I, Korf, Sloboda, Monomolecular.
Volumen	Corral y Návar-Cháidez (2005)	Predios de la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal (UCODEFO) No. 6., El Salto, Durango, México.	<i>Pinus durangensis</i> , <i>P. cooperi</i> Engelm, <i>P. leiophylla</i> , <i>P. engelmannii</i> y <i>P. herrerae</i>	Chapman-Richard's, Hossfeld IV, Gompertz, Logístico, Monomolecular, Von Bertalanffy, Korf, Weibull, Sloboda, Levakovic III, Schumacher.



Con relación a las curvas ajustadas; para las cinco especies el crecimiento se presenta lento hasta los seis años, posteriormente se acelera hasta alcanzar los 27 años de edad con alturas entre tres y cinco años. La mayor altura la presenta *P. halepensis* alcanzando cinco metros, que a comparación del *P. cembroides* creció un metro más, ya que esta última especie solo alcanzó cuatro metros; en cuanto a *P. pinea*, ésta alcanza 0.93 m y con esta cifra es la especie que menos creció de todas (Figura 2).

Cabe mencionar que la tendencia de las curvas de ajuste, en las cinco especies, después de 27 años es a estabilizarse, sin embargo esto no ocurre, por lo que se puede decir que las especies aún están en crecimiento y que en otro periodo de tiempo esto podría suceder conforme avanza la edad.

Con los resultados anteriores se puede recomendar como especie de rápido crecimiento específicamente para esta región a *P. halepensis* ya que en los últimos 27 años ha alcanzado una buena altura, aunque todo depende del fin para el que se necesite este ejemplar. Otras opciones en cuanto especies que se pueden recomendar son el *P. cembroides* el cual es nativo de la región y al igual que la primera especie mencionada presenta un buen crecimiento.

Los incrementos corriente anual (ICA) y medio anual (IMA) (Figura 3) mismos que se derivaron con el mejor modelo de ajuste para cada especie, muestran en general que la curva de incremento es inicialmente cóncava, luego aumenta su pendiente hasta tener un punto de inflexión. La curva comienza con un crecimiento rápido en los primeros cinco años, teniendo que para *P. halepensis*, el ICA alcanza su máximo valor de  $0.28 \text{ m año}^{-1}$  a la edad de 11 años, en cuanto al IMA comienza con un crecimiento más lento, desde los 2 años hasta cerca de los 20 años en donde alcanza su máximo valor de incremento de  $0.19 \text{ m año}^{-1}$  y en donde también se intercepta con la curva de ICA alcanzando su turno absoluto y es aquí donde se estabiliza durante los próximos años hasta llegar a los 27.

En *P. cembroides*, *P. eldarica* y *P. maximartinezii* el ICA alcanza su máximo incremento de  $0.23 \text{ m año}^{-1}$ ,  $0.20 \text{ m año}^{-1}$  y  $0.19 \text{ m año}^{-1}$  a las edades de 12, 10 y 13 años respectivamente, desde estas edades en las especies mencionadas anteriormente las curvas comienzan a decrecer rápidamente, llegando a los 27 años, sin lograr estabilizarse. En cuanto al IMA, este alcanza su máximo incremento para estas especies, a las edades de 22, 19 y 26 años con  $0.15 \text{ m año}^{-1}$  para *P. cembroides*,  $0.13 \text{ m año}^{-1}$  para *P. eldarica* y *P.*

*maximartinezii*. Los turnos absolutos para *P. cembroides*, *P. eldarica* y *P. maximartinezii* se presentan a las edades de 22, 19 y 25 años respectivamente.

*Pinus pinea* es la especie que muestra los incrementos más bajos, el valor máximo de incremento para ICA es de 0.05 m año<sup>-1</sup> a la edad de 11 años y para el IMA el máximo incremento es de 0.041 m año<sup>-1</sup> a la edad de 14 años. En este estudio el turno absoluto *P. pinea* lo alcanza a la edad de 17 años.

#### 4.2.2 Crecimiento e incremento en diámetro a 0.30 m

El modelo de Weibull se ajustó para las especies *Pinus cembroides* (P.c.), *Pinus eldarica* (P.e.), *Pinus maximartinezii* (P.m.) y *Pinus pinea* (P.p.) ya que presentó el menor CME no aumentando su valor más de 0.0003220, así como el valor más alto del coeficiente de determinación ajustado  $R^2_{adj}$ , presentando también valores por arriba de 0.9300 hasta 0.9845 el más alto. Con respecto a *Pinus halepensis* (P.h.) el modelo que mejor se ajustó fue el de Chapman-Richards presentando, igualmente, un menor valor en el CME (0.0003310) y un valor alto en  $R^2_{adj}$  (0.9784) (Cuadro 3).

Los resultados que se obtuvieron para el ajuste de la relación edad-diámetro se pueden encontrar completos y pueden ser utilizados de igual manera ya que su variación no es de gran escala (Apéndice 2).

A partir de diversas ecuaciones de crecimiento e incremento en diámetro, altura, volumen y un ajuste y validación para diferentes especies de pino, Corral y Nívar-Cháidez (2005), muestran en sus resultados que a través del modelo de Chapman-Richards las cinco especies de su estudio presentan los crecimientos e incrementos mayores (Cuadro 4). El estudio demuestra, a partir de análisis troncales, que para la variable diámetro los mejores modelos de ajuste son el de Chapman-Richards y el Weibull. Al hacer la comparación del presente estudio con los resultados de Corral y Nívar-Cháidez (2005), se nota que los modelos de mejor ajuste son los mismos e igualmente se diferencia bien ya que se trabaja con cinco especies a diferentes condiciones de sitio y aunque en el presente estudio las especies con las que se trabajó hayan sido extraídas de un mismo sitio y sus condiciones de ambientales sean similares, se sigue notando que los modelos de Chapman-Richards y el de Weibull explican muy bien el crecimiento para diferentes especies de coníferas. Sin embargo el autor no presenta los valores del CME, utilizó 11 modelos y una muestra más grande teniendo así mayor precisión en sus resultados.

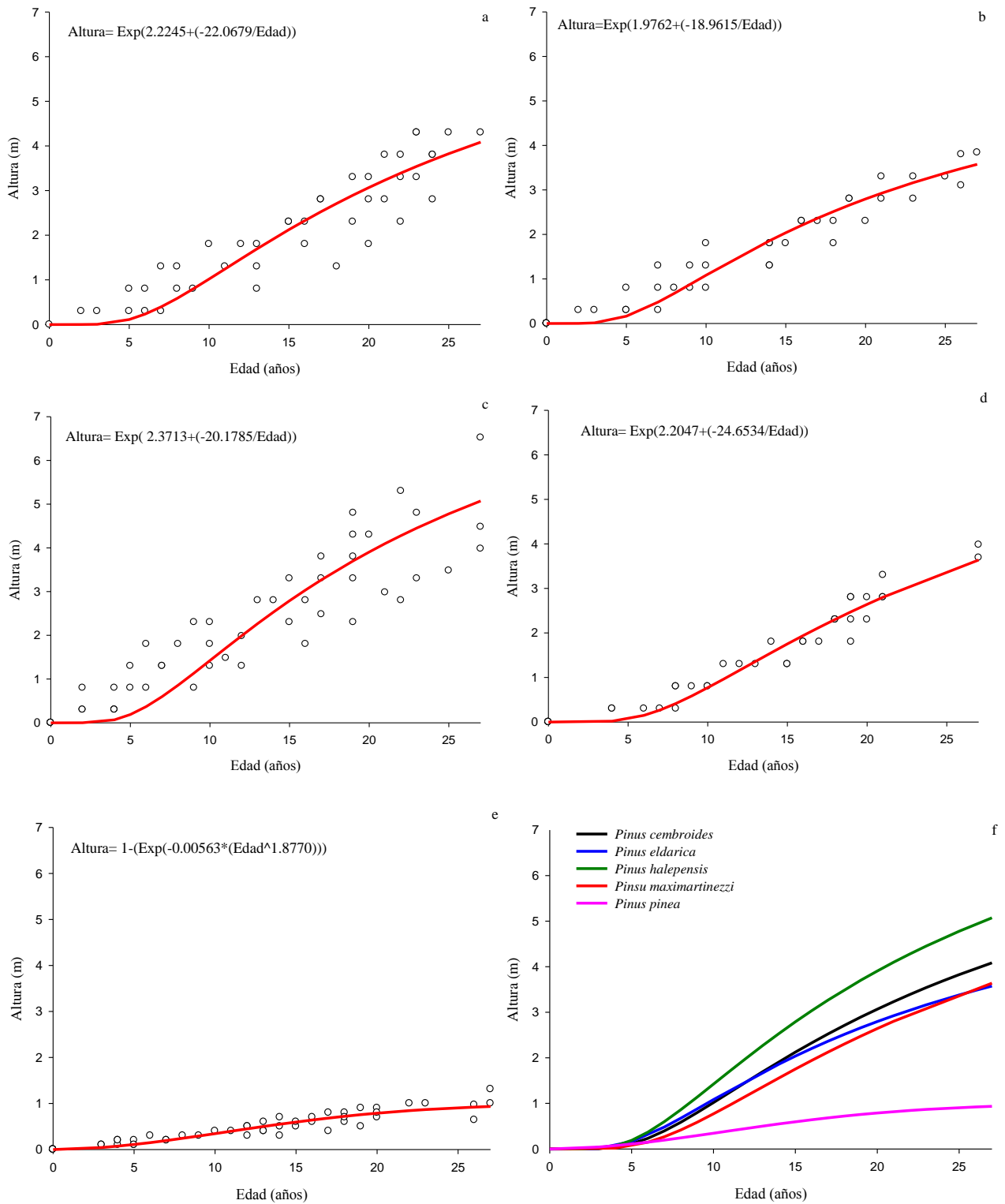


Figura 2. Curvas de ajuste en la relación edad-altura (f) para las especies *P. cembroides* Zucc (a), *P. eldarica* Medw (b), *P. halepensis* Mill (c), *P. maximartinezii* Rzedowski (d), *P. pinea* L (e) establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.

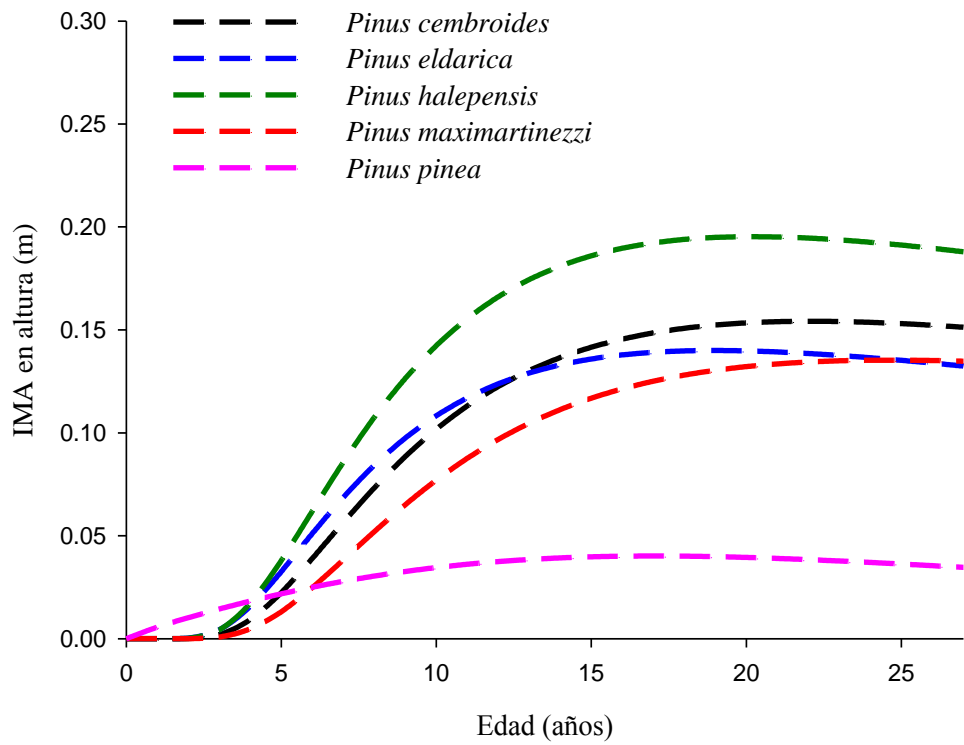
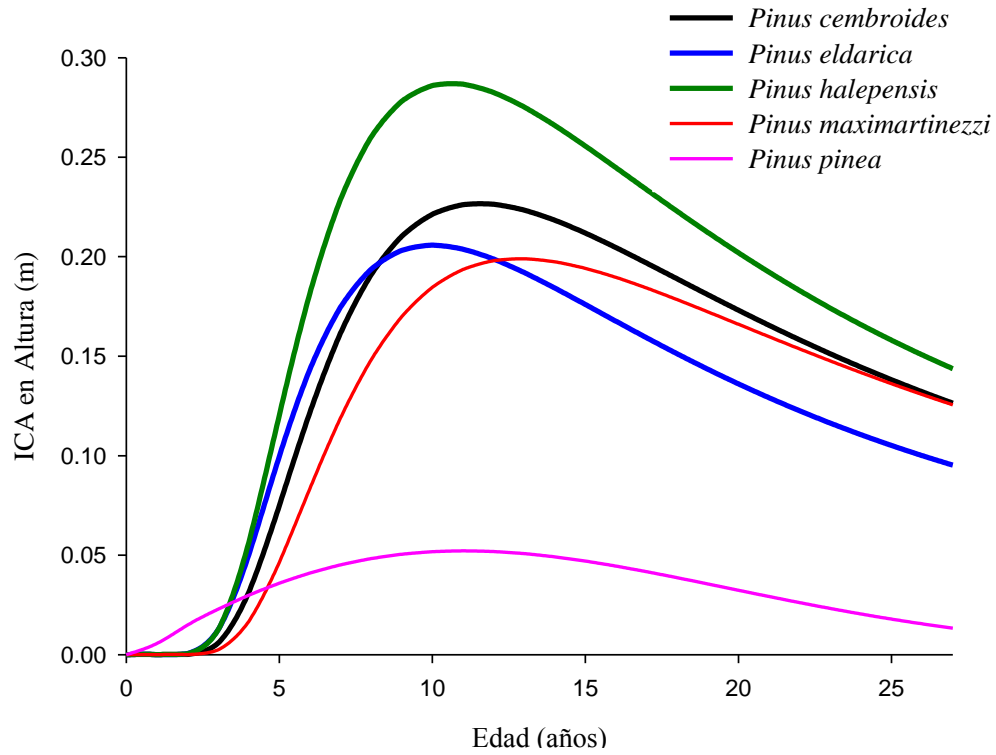


Figura 3. Curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en la relación edad-altura para las cinco especies de pino establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.

Cruz-Méndez (2013) realizó una estimación del crecimiento en diámetro, altura y área basal de 3 especies tropicales establecidas en plantaciones de enriquecimiento de acahual y sistema agroforestal en donde se establecieron 40 sitios permanentes. Aquí se remidieron las variables diámetro normal y altura total teniendo un total de 160 valores de sitios de muestreo; en base a éstos se determinó el crecimiento de las tres especies, utilizando los mismos modelos de crecimiento que en el presente estudio (Cuadro 4), los resultados arrojan que el mejor modelo de ajuste para las diferentes variables, fue el de Weibull seguido por el de Schumacher modificado por Bailey & Clutter obteniendo los más altos valores de  $R^2$ ,  $R^2_{adj}$  y CME para las tres especies diferentes. En comparación con el presente estudio, en el del autor anterior las especies son tropicales y utilizan sitios de muestreo, a pesar de esto se sigue demostrando que el modelo de Weibull describe de excelente manera al diámetro como se nota en el presente estudio y en el de Corral y Návar-Cháidez (2005).

Se evaluó el crecimiento de cuatro especies de pinos (Cuadro 4) en donde los resultados arrojan que el mejor modelo de ajuste para la variable diámetro normal sin corteza fue el Chapman-Richards para las especies *Pinus oaxacana* ( $R^2=0.9912$  y el  $EE=0.009$ ) y *P. pseudostrobus* ( $R^2=0.9908$  y el  $EE=0.01281$ ) (Arteaga-Martínez, 2001). En comparación del presente estudio con el del autor anterior, no aparece el CME y utiliza solo los modelos de Schumacher y Chapman-Richards, sin embargo las  $R^2$  son similares.

Con relación a las curvas ajustadas en diámetro para cada especie; se presenta un crecimiento relativamente rápido y progresivo desde el primer año hasta los 27 años sin lograr estabilizarse para las siguientes especies, presentando un diámetro de 0.11 m para *P.cembroides* y m 0.17 m para *P. halepensis* a la edad de 27 años (Figura 4), alcanzando este ultimo 0.06 m más que la especie nativa (*P. cembroides*). De igual manera en *P.eldarica*, *P. maximartinezii* y *P. pinea* el crecimiento se presenta de una manera progresiva hasta los 27 años, hasta alcanzar una diámetro de 0.12, 0.055 m y 0.056 m respectivamente. Según los resultados anteriores se puede recomendar a ambas especies para posibles plantaciones con objetivos diferentes y específicos para esta región.

Sigue resaltando en gran escala que el incremento en *P. halepensis* es mayor que las demás especies, presentando un ICA de  $0.008 \text{ m año}^{-1}$  a la edad de 27 años y un IMA de  $0.006 \text{ m año}^{-1}$  a la misma edad; las especies *P. eldarica*, *P. cembroides* y *P. maximartinezii*

presentan un ICA e IMA similares, es decir su incremento ha sido casi en las mismas proporciones. *P. pinea* sigue resaltando por ser la especie que presenta los menores incrementos, su ICA presenta  $0.003 \text{ m año}^{-1}$  a la edad de 27 años y su IMA tiene un valor de  $0.002 \text{ m año}^{-1}$  a la misma edad (Figura 5). En general ni una sola de las curvas se cruza, es decir, las especies no llegaron a su incremento máximo por lo tanto no alcanzaron su turno absoluto.

#### 4.2.3 Crecimiento e incremento en área basal

Para las especies *Pinus eldarica* (P.e.), *Pinus maximartinezii* (P.m.) y *Pinus pinea* (P.p.) el mejor modelo de ajuste fue el de Weibull, obteniendo valores buenos para los dos criterios de bondad de ajuste para este estudio (Cuadro 3). Por otra parte el modelo seleccionado para *Pinus cembroides* (P.c.) es el de Schumacher, con un alto  $R^2_{\text{adj}}$  (0.8107) y un mínimo valor de CME (0.00000577), de igual forma para *Pinus halepensis*, el valor de  $R^2_{\text{adj}}$  fue alto (0.9701) y el CME mínimo (0.000012) ajustándose con el modelo de Chapman- Richards. Los resultados para los demás modelos también fueron buenos, existe una mínima variación en sus valores (Apéndice 3).

En un estudio realizado por González-Zárate (2000) (Cuadro 5) mediante el procedimiento de análisis troncal se obtuvo información de edades, diámetros y alturas de 130 árboles y se compararon diez modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal para las características de altura, diámetro, área basal y volumen respectivamente. En sus resultados encontraron que el mejor modelo de ajuste para el área basal y volumen en esta especie es el modelo de Schumacher (al igual que en este estudio para la especie *Pinus cembroides*, presentando sus valores para área basal en  $\text{CME}= 18.4704$  para área basal y para volumen  $\text{CME}=434942.72$ , sin embargo no muestra resultados para  $R^2_{\text{Ajust}}$ , su muestra es más grande y utilizaron 10 modelos matemáticos lo que hace que en sus resultados se tenga una mayor precisión y menor error.

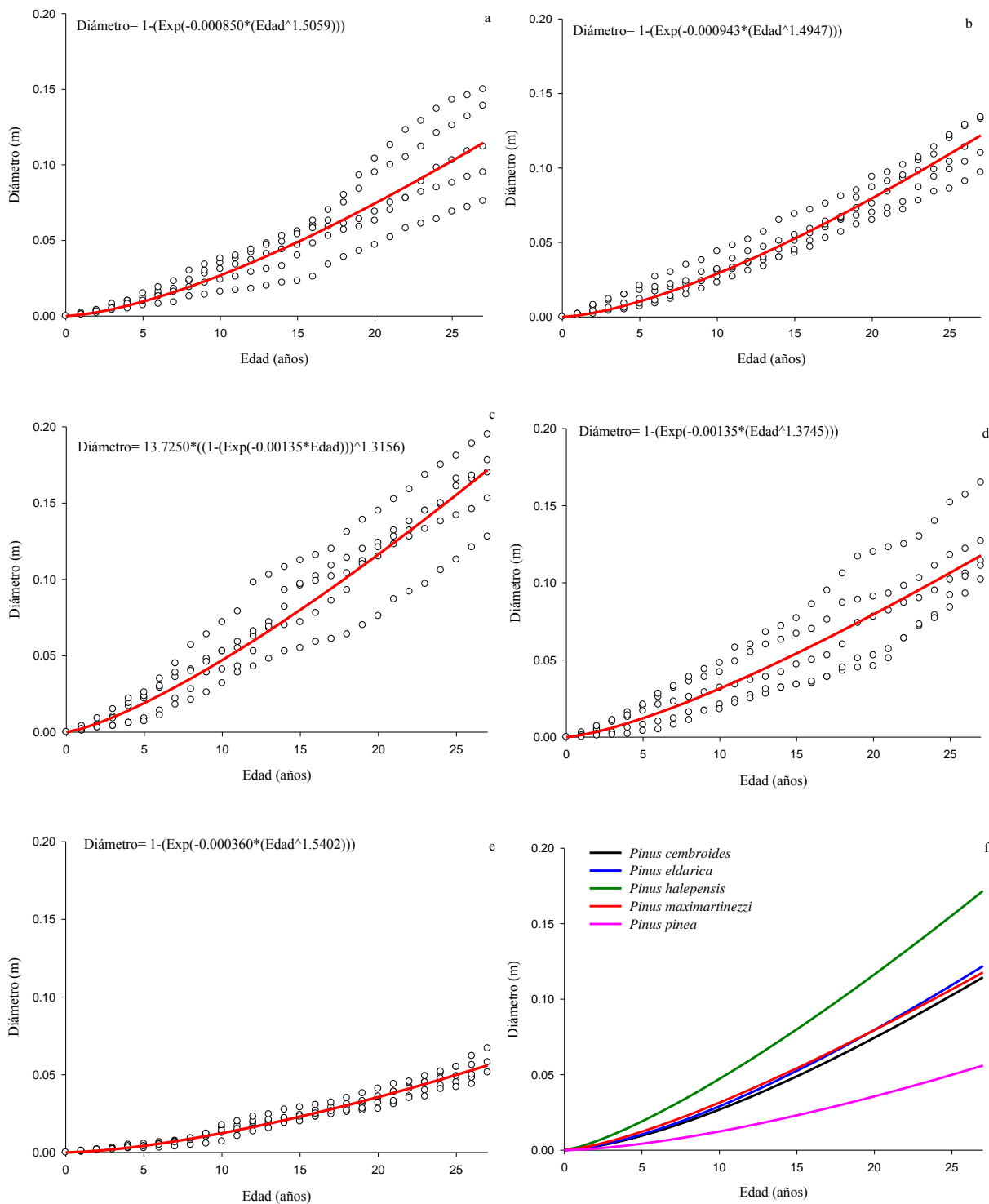


Figura 4. Curvas de ajuste en la relación edad-diámetro (f) para las especies *P. cembroides* Zucc (a), *P. eldarica* Medw (b), *P. halepensis* Mill (c), *P. maximartinezii* Rzedowski (d), *P. pinea* L (e) establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.

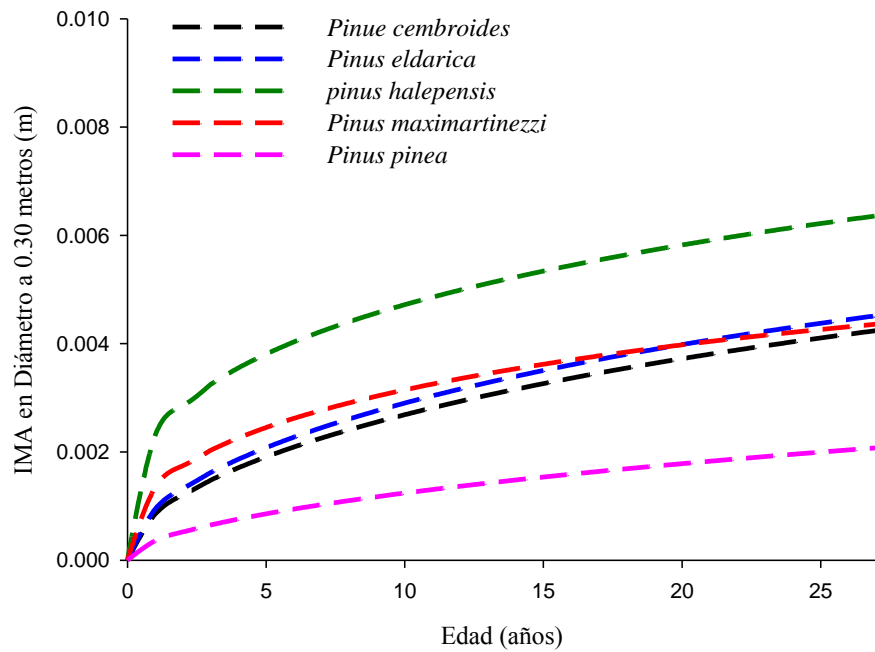
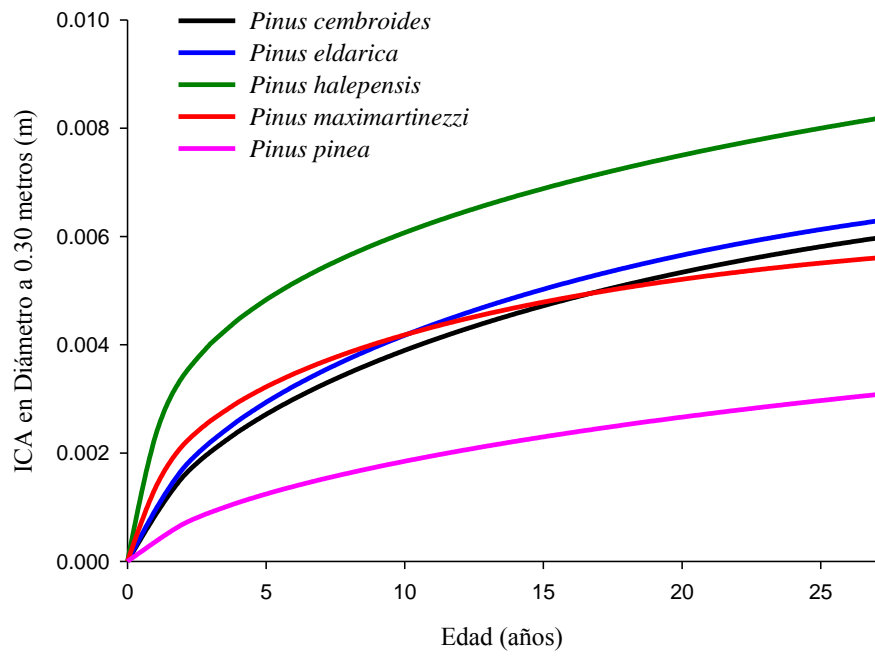


Figura 5. Curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en la relación edad-diámetro para las cinco especies de pino establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.



En el apartado de crecimiento en altura se menciona el estudio de Hernández-López (2003) en donde se muestran los resultados solo para esta variable, sin embargo también obtuvo resultados para la variable área basal (Cuadro 5) en la que el mejor modelo de ajuste para *P. patula* var. *longipedunculata* resultó ser el de Weibull en donde presentó la menor SCE, sin embargo a diferencia de este estudio, en el estudio el autor no muestra los resultados para el CME ni la  $R^2_{adj}$ . Por otra parte este modelo se ajustó también en el presente estudio para tres de las especies mostrando un alto valor de  $R^2_{adj}$ .

Cruz-Méndez (2013) no solo muestra los resultados solo para la variable altura, sino también obtuvo resultados para la variable área basal (Cuadro 5) en la que el mejor modelo de ajuste para las tres especies que el autor maneja resultó ser el de Schumacher modificado por Bailey & Clutter. Para el presente estudio este modelo se torna como el mejor en ajuste de área basal para la especie de *P. cembroides* teniendo un  $R^2_{adj}$  mucho mayor que en el estudio anterior. Por otro lado las especies con las que trabaja el autor son tropicales y para el presente estudio son coníferas.

Para el área basal las curvas ajustadas presentan un crecimiento exponencial lento hasta los 10 años, después se acelera en menor medida para el caso de *P. cembroides* alcanzando un área basal de  $0.010 \text{ m}^2$  a la edad de 27 años; en *P. eldarica* el crecimiento se torna más acelerado alcanzando un área basal de  $0.012 \text{ m}^2$  a la misma edad. Cabe mencionar que las curvas no muestran una tendencia a estabilizarse (Figura 6).

*P. halepensis* también presenta un crecimiento exponencial relativamente acelerado a partir de los 10 años, alcanzando un área basal de  $0.023 \text{ m}^2$ , alcanzando de esta manera  $0.013 \text{ m}^2$  más que la especie nativa (*P. cembroides*) a la misma edad. Por otro lado, las especies *P. maximartinezii* y *P. pinea* aumentan su crecimiento exponencial lentamente sin lograr estabilizarse alcanzando un área basal de  $0.011 \text{ m}^2$  y  $0.0026 \text{ m}^2$  a los 27 años, siendo esta última especie aquella que presenta el menor crecimiento para esta variable.

Nuevamente *P. halepensis* y *P. cembroides* se muestran viables para posibles plantaciones en la región, según los resultados obtenidos para ambas especies.

Para el área basal el incremento es de forma exponencial relativamente acelerado y se nota nuevamente que las curvas no llegan a cruzarse, es decir, las especies no han alcanzado a su incremento máximo por lo tanto no llegaron a su turno absoluto hasta los 27 años. *P. halepensis* muestra un mayor incremento en ICA alcanzando un valor de  $0.002 \text{ m}^2$

año<sup>-1</sup> e IMA de 0.0008 m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup> a la edad de 27 años. *P. eldarica* por su parte alcanza un ICA de 0.001 m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup> y un IMA de 0.0004 m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup> (Figura 7). *P. maximartinezii* y *P. cembroides* presentan un crecimiento similar tanto en ICA como en IMA y *P. pinea* presenta los menores valores para ICA (0.0003 m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>) e IMA (0.0001 m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>) a la misma edad.

#### 4.2.4 Crecimiento e incremento en volumen

Para las especies *Pinus eldarica* (P.e.), *Pinus halepensis* (P.h.), y *Pinus pinea* (P.p.) el mejor modelo de ajuste fue el de Weibull, obteniendo valores buenos para los dos criterios de selección en este estudio (Cuadro 3). Por otra parte el modelo seleccionado para *Pinus cembroides* (P.c.) es el de Schumacher, con un R<sup>2</sup><sub>adj</sub> relativamente mayor (0.7722) y un mínimo valor de CME (0.000011); de igual forma este modelo se ajustó de buena manera para *Pinus maximartinezii* (P.m.), con un valor alto de R<sup>2</sup><sub>adj</sub> (0.9095) y un mínimo CME (0.000001456). Los resultados para los demás modelos también fueron buenos, existe una mínima variación en sus valores (Apéndice 4).

González-Zárate (2000) en un estudio realizado mediante el procedimiento de análisis troncal obtuvo información de edades, diámetros y alturas de 130 árboles y se compararon diez modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal para las características de altura, diámetro, área basal y volumen respectivamente (Cuadro 5). En sus resultados encontró que el mejor modelo de ajuste para el área basal y volumen en esta especie es el modelo de Schumacher (al igual en este estudio para *P. cembroides* y *P. maximartinezii* presentando sus valores para área basal en CME= 18.4704 para área basal y para volumen CME=434942.72, sin embargo no muestra resultados para R<sup>2</sup><sub>adj</sub> lo que hace que no se conozca el porcentaje de explicación de la variable Y a la variable X, su muestra es más grande y utilizó 10 modelos matemáticos, lo que hace que sus resultados tengan menos error y más precisión.

En el apartado de crecimiento en diámetro un estudio de Corral y Nívar-Cháidez, (2005), muestra los resultados solo para esta variable, sin embargo también obtuvo resultados para la variable volumen (Cuadro 5) en la que el mejor modelo de ajuste para las especies con las que el autor trabajó resultó ser el de Schumacher al presentar los valores más altos en R<sup>2</sup> y CV. Igualmente para este estudio este modelo es el que mejor tiene ajuste para dos de las cinco especies.

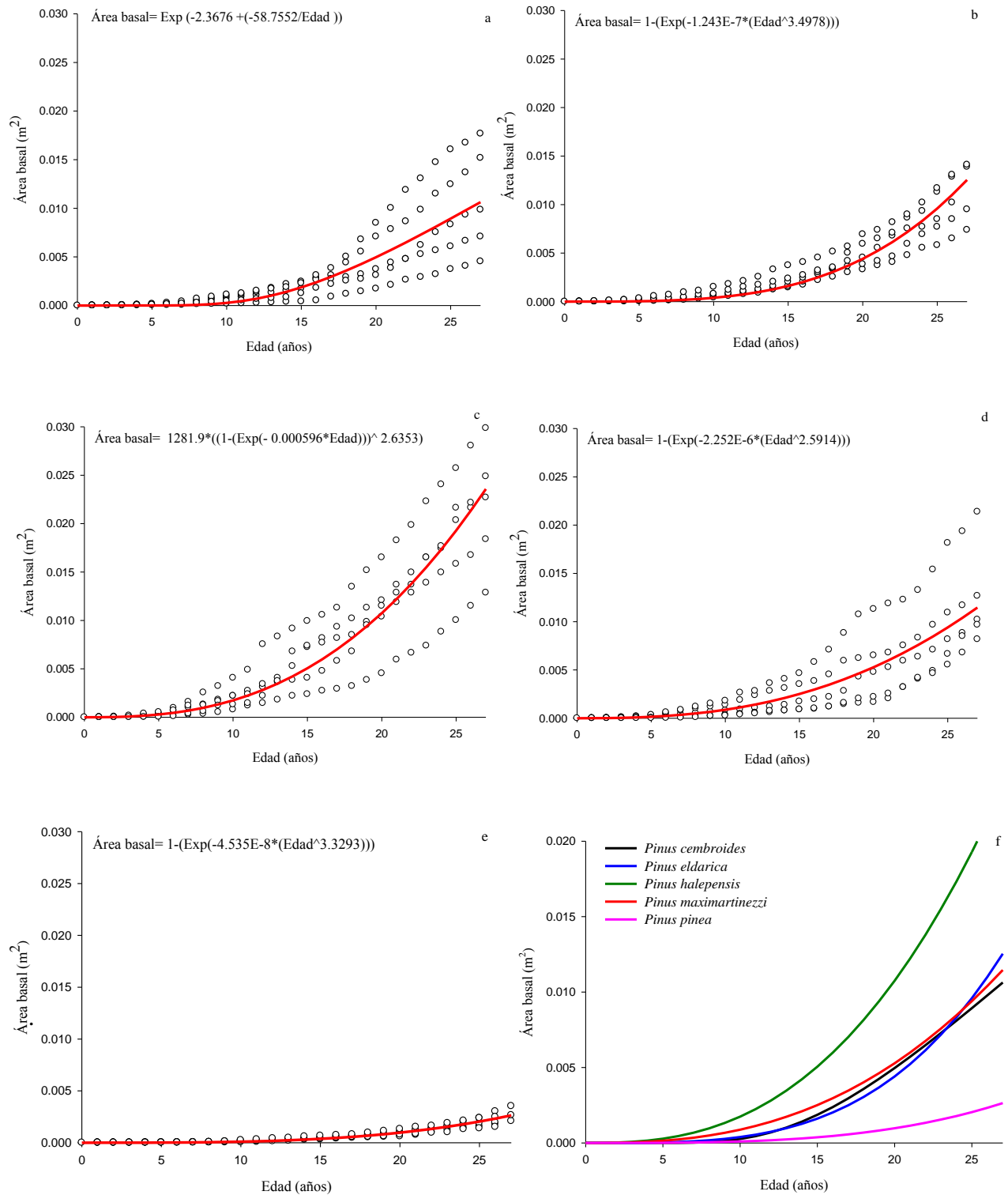


Figura 6. Curvas de ajuste en la relación edad-área basal (f) para las especies *P. cembroides* Zucc (a), *P. eldarica* Medw (b), *P. halepensis* Mill (c), *P. maximartinezii* Rzedowski (d), *P. pinea* L (e) establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.

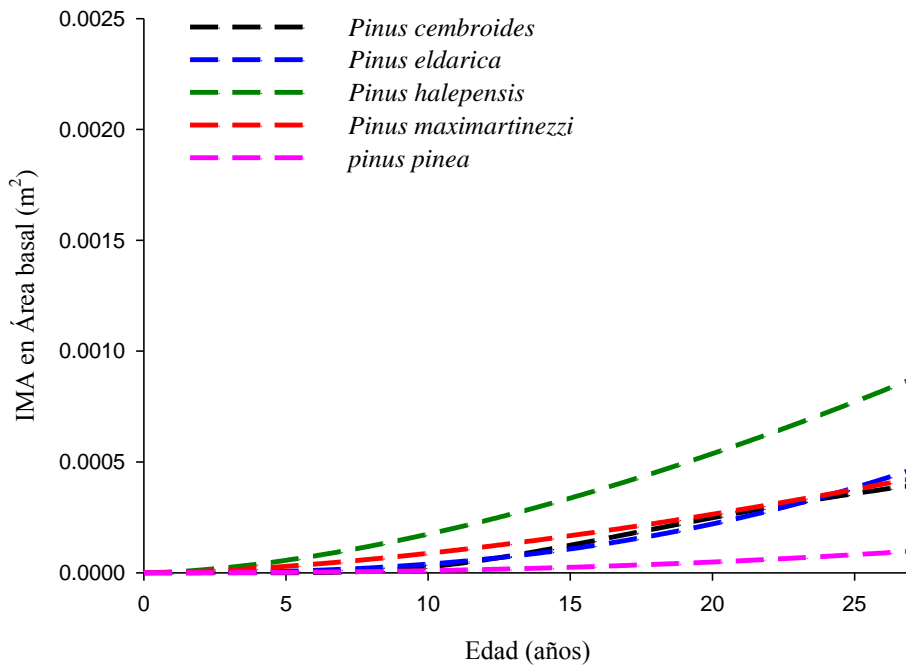
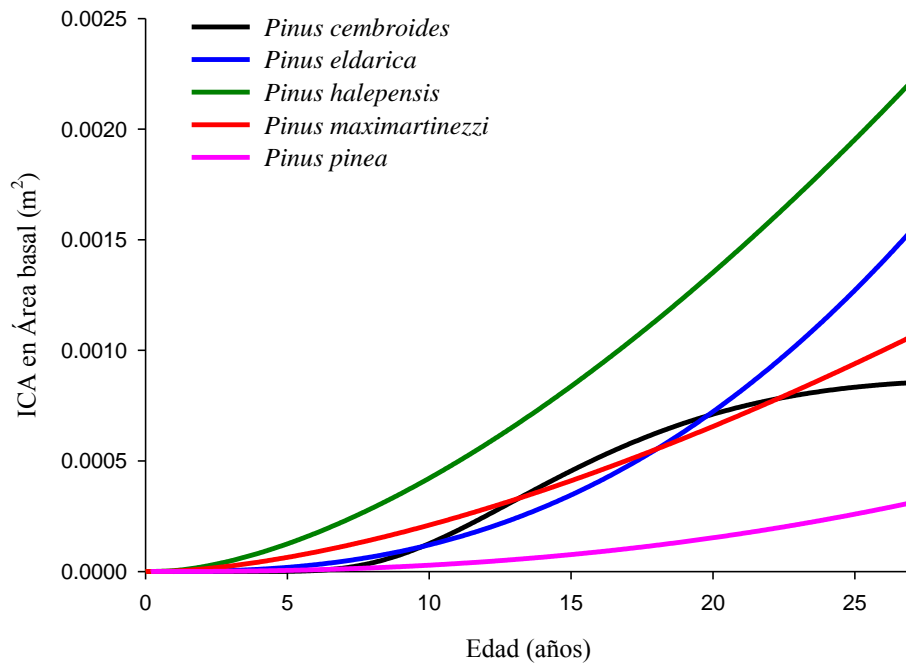


Figura 7. Curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en la relación edad-área basal para las cinco especies de pino establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.

Para el volumen las curvas ajustadas presentan un crecimiento exponencial lento hasta los 15 años, después se acelera en menor medida para el caso de *P.cembroides* alcanza un volumen de  $0.014 \text{ m}^3$  a la edad de 27 años; en *P.eldarica* el crecimiento se torna más acelerado de los 20 a 27 años alcanzando un volumen de  $0.013 \text{ m}^3$  a la misma edad (Figura 8).

*P. halepensis* también presenta un crecimiento exponencial relativamente acelerado a partir de los 15 años, alcanzando un volumen de  $0.027 \text{ m}^3$  a los 27 años. Por otro lado, las especies *P. maximartinezii* y *p. pinea* aumentan su crecimiento exponencial lentamente alcanzando un volumen de  $0.009 \text{ m}^3$  y  $0.001 \text{ m}^3$  a los 27 años. Finalmente las especies *cembroides* y *P. halepensis* siguen resaltando por su buen crecimiento en cada una de las diferentes variables y obviamente son las más recomendadas para su uso en la región; cabe mencionar que esta última especie creció  $0.013 \text{ m}^3$  que la especie nativa (*P. cembroides*).

Para el volumen el incremento es relativamente acelerado y se nota nuevamente que las curvas no llegan a cruzarse, es decir, las especies no han alcanzado su incremento máximo ni su turno absoluto a la edad de 27 años.

*P. halepensis* nuevamente muestra un mayor incremento en ICA alcanzando un valor de  $0.004 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  e IMA de  $0.0001 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  a la edad de 27 años (Figura 9). *P. cembroides* por su parte muestra un ICA de  $0.0001 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  y un IMA de  $0.0005 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ . *P. eldarica* por su parte alcanza un ICA de  $0.002 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  y un IMA igual al de *P. cembroides* de  $0.0005 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ . *P. maximartinezii* y *P. pinea* presentan un crecimiento lento y bajo tanto en ICA como en IMA, el primero alcanza un ICA de  $0.001 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  y un IMA de  $0.0003 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  y para *P. pinea* presenta los menores valores para ICA ( $0.0002 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ) e IMA ( $0.00005 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ) a la edad de 27 años.

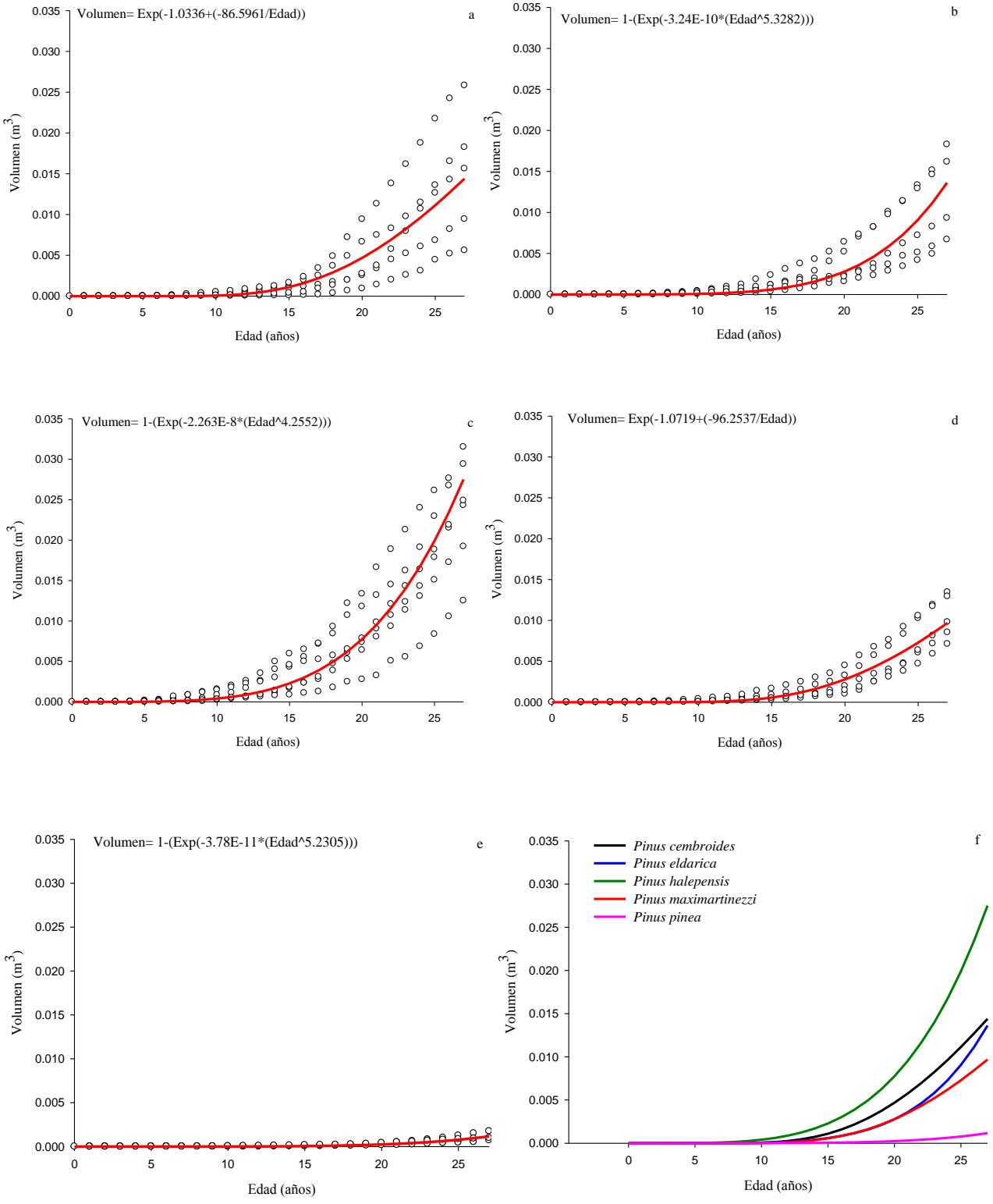


Figura 8. Curvas de ajuste en la relación edad-volumen (f) para las especies *P. cembroides* Zucc (a), *P. eldarica* Medw (b), *P. halepensis* Mill (c), *P. maximartinezii* Rzedowski (d), *P. pinea* L (e) establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.

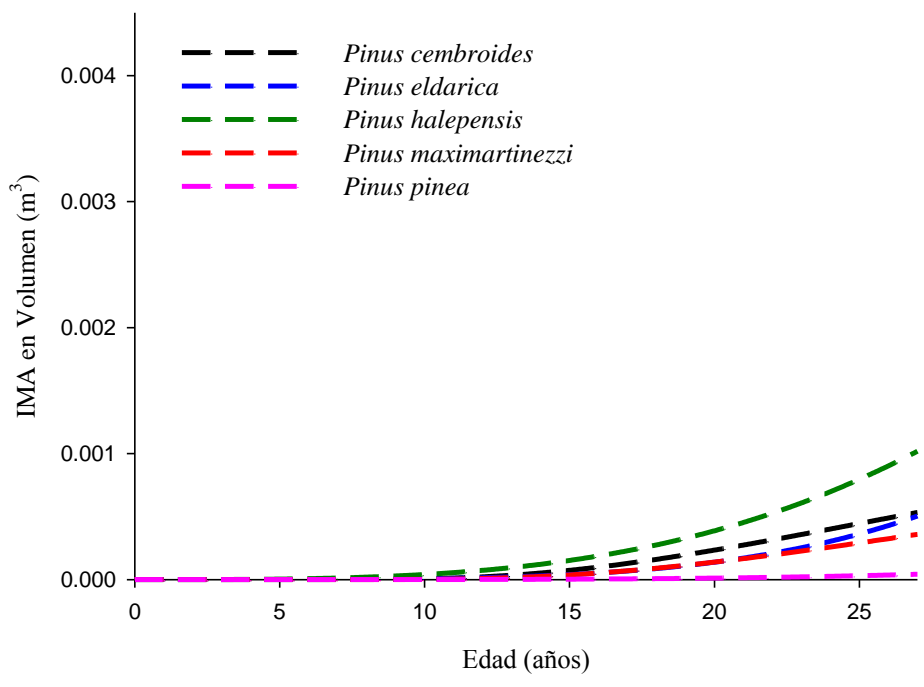
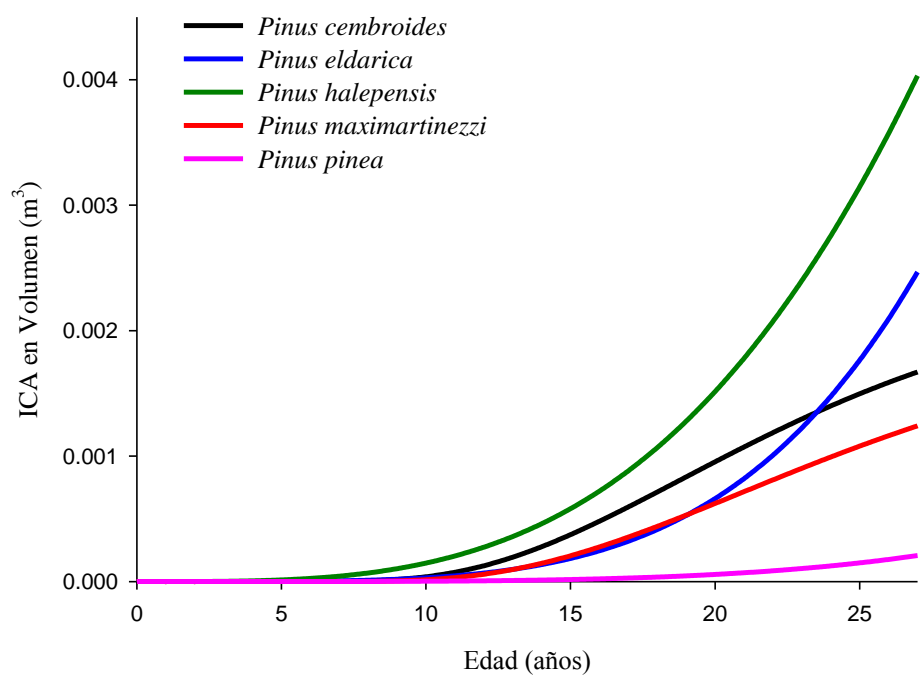


Figura 9. Curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en la relación edad-volumen para las cinco especies de pino establecidas en Buenavista, Saltillo, Coah.

## 5 CONCLUSIONES

1. El mejor modelo de crecimiento para altura, es el de Schumacher a excepción de *P. pinea* L, según sus criterios de bondad de ajuste. Para diámetro a 0.30, área basal y volumen Weibul con excepción de especies en cada variable.
2. La especie que registró mayor crecimiento en altura, diámetro a 0.30 m, área basal y volumen en un lapso de 27 años fue *P. halepensis* Mill seguida por *P. cembroides* Zucc y *P. eldarica* Medw.
3. *P. pinea* y *P. maximartinezzi* fueron las especies que registraron menor crecimiento para las cuatro variables.
4. La especie que registró mayor incremento en altura, diámetro a 0.30 m, área basal y volumen fue *P. halepensis* Mill presentando su máximo ICA e IMA a la edad de 11 y 20 años respectivamente en la variable altura. El menor incremento lo presentó *P. pinea* L en las cuatro variables.



## 6 RECOMENDACIONES

1. Utilizar un mayor número de muestra por especie para aumentar la confiabilidad en el ajuste de los modelos.
2. Utilizar un mayor número de modelos de crecimiento e incremento para ampliar el margen de elección del mejor modelo y predecir las variables de interés.
3. A partir de los resultados de este estudio se recomienda que para futuras plantaciones de restauración se utilicen principalmente las especies de *P. halepensis* Mill, *P. cembroides* Zucc y *P. eldarica* Medw.
4. En cuanto a *P. pinea* es recomendable no introducirla a la región ya que sería un fracaso total si se quisiera utilizar en futuras plantaciones.

## 7 LITERATURA CITADA

- Aguilar-Ramírez, M. 1991. Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. *Revista Ciencia Forestal en México*. 16(70): 87-108.
- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Vol. 1 Predicción del rendimiento. FAO: Montes 22/2. Roma. 80 p.
- Arano-Santos, G., J. A. Torres-Pérez, B. Arteaga-Martínez y J. Santillán-Pérez. 2003. Evaluación de las plantaciones establecidas por el PRODEPLAN en el sur de Veracruz (1998 - 2003). Universidad de Chapingo. Texcoco, Estado de México. 20 p.
- Arteaga-Martínez, B. 2001. Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pinos en Ayotoxtla, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 6(2): 151-157.
- Cabanillas-Saldaña, A. M. 2010. Bases para la gestión de masas naturales de *Pinus halepensis* Mill. en el Valle del Ebro. Departamento de Ingeniería de Ingeniería Forestal. Escuela técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 209 p.
- Cabrera-Gaillard, C. 2003. Plantaciones forestales: oportunidades para el desarrollo sostenible. Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente, Fortalecimiento Institucional en Políticas Ambientales y United States Agency for International Development. Guatemala. 20 p.
- Cailliez, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Vol. 1 Estimación del volumen. FAO: Montes 22/1. Roma. 100 p.

- Calvillo-García, J. C., E.H. Cornejo-Oviedo S. Valencia-Manzo y C. Flores-López. 2005. Estudio epidemétrico para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán, México. *Foresta Veracruzana*. 7(1): 5-10.
- Cano-Pineda, A. y Martínez-Burciaga O. U. 2004. Diagnóstico para el establecimiento de plantaciones con pino afgano, (*Pinus eldarica* Mill.) en el estado de Nuevo León. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Saltillo. Publicación Especial Núm. 3. Coahuila, México. 44 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2010. *Pinus cembroides* Zucc. Paquetes tecnológicos. México. 7 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2012. Programa de desarrollo de plantaciones forestales comerciales a 15 años de su creación. Comisión Nacional Forestal. México. 198 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1995. Mapa base de edafología de la república mexicana. Escala 1: 1, 000,000. México. (Archivo en línea en formato ESRI Shapefile). Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. Mapa base de climas de la república mexicana. Escala 1: 1, 000,000. México. (Archivo en línea en formato ESRI Shapefile). Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Cornelius, J. P., y J.F. Mesén. 1994. Manual sobre mejoramiento genético forestal con referencia especial a América Central. Centro Agronómico tropical de investigación y enseñanza. Proyecto mejoramiento genético forestal. Departamento noruego de cooperación para el desarrollo. Administración británica para el desarrollo en Ultramar. Turrialba, Cartago, Costa Rica. 218 p.
- Corral R., S. y J.J. Návar-Cháidez. 2005. Análisis del crecimiento e incremento de cinco pináceas de los bosques de Durango, México. *Madera y bosques*. 11(1): 29-47.

- Cruz-Méndez, M. 2013. Crecimiento de tres especies forestales en plantaciones con enriquecimiento de acahual y agroforestal en Pochutla, Oaxaca. División de Agronomía. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 50 p.
- Cuevas-García, X., C. Lezama-Parraguirre y B. Rodríguez-Santiago. 1992. Modelos de crecimiento para un plantación de caoba (*Swietenia macrophylla* King). Revista Ciencia Forestal en México. 17(71): 87-102.
- Deltoro-Torro, V. 2008. Ficha técnica de *Pinus halepensis*. Banco de datos de biodiversidad. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Valencia, España 2 p.
- Diéguez-Aranda, U., A. Rojo-Alboreca, F. Castedo-Dorado, J. G. Álvarez-González, M. Barrio-Anta, F. Crecente-Campo, J. M. González-González, C. Pérez-Cruzado, R. Rodríguez-Soalleiro, C. A. López-Sánchez, M. A. Balboa-Murias, J. J. Gorgoso-Varela y F. Sánchez-Rodríguez. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Unidad de Gestión Forestal Sostenible (UXFS). Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Dirección Xeral de Montes, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia. Lugo, España. 259 p.
- Galán-Cela, P., R. Gamarra-Gamarra, J. I. García-Viñas, y S. Álvarez-Díaz. 2013. Descripción de *Pinus pinea*. Árboles Ibéricos, contenido y diseño Árboles Ibéricos. Madrid, España 1 p.
- García-Corona, I., A. Zaldivar S. y E. Aldana P. 2000. Tabla de producción para las plantaciones de *P. caribaea* var. *caribaea* de la Empresa Forestal Integral Macurije, Pinar del Rio Cuba. 13 p.
- García-Güemes, C., N. Cañadas y G. Montero. 2002. Modelización de la distribución diamétrica de las masas de *Pinus pinea* L. de Valladolid (España) mediante la función de Weibull. Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales. 11(2): 263-282.

- Gilman, E., F. y D.G. Watson. 1994. *Pinus eldarica*. Environmental Horticulture Department. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida Fact Sheet ST-46. Florida Cooperative Extension Service. Gainesville, Florida 3 p.
- González-Zárate, M. 2000. Crecimiento e incremento de la regeneración natural de *Pinus estevezii* (Mtz) Perry y su relación con características ambientales al sur de Nuevo León. División de Agronomía. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 91 p.
- Hernández-López, I. 2003. Crecimiento de tres especies de pino plantadas bajo dos tratamientos silvícolas en Santiago Comaltepec, Ixtlán, Oaxaca. Tesis de licenciatura. División de Agronomía, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 100 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2012. Estadísticas a propósito del día mundial forestal. Instituto Nacional de Ecología. Aguascalientes, Aguascalientes. 8 p.
- Klepac, D. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Departamento de Enseñanza, investigación y servicio en bosques. Segunda Edición. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 297 p.
- Lara-Rodríguez, E. A. 1997. Caracterización y evaluación del bosque natural del pino azul (*Pinus maximartinezii* Rzed) en el cerro de piñones de Juchipila, Zacatecas. Tesis profesional. Facultad de Agronomía, Subdivisión de Estudios de Postgrado. Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, Nuevo León. 52 p.
- López-Hernández, J. A. y A. G. Valles-Gándara. 2009. Modelos para la estimación del índice de sitio para *Pinus durangensis* Martínez en San Dimas, Durango. Nota técnica. Revista Ciencia Forestal en México. 34(105): 187-198.
- López-Mata, L., e I. G. Galván-Escobedo. 2011. Extracción de semillas de *Pinus maximartinezii* y sus consecuencias poblacionales. CONABIO. Biodiversitas. México D.F. 98:1-7.

- Magaña-Torres, O. S., F. Islas-Gutiérrez. 1989. Sistema para la realización de análisis troncales: ANATRON. Revista Ciencia Forestal. 66(14): 97-113.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2000. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000. Informe principal. Estudio FAO: Montes. FAO. Roma. 468 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal. Estudio FAO: Montes. FAO. Roma. 346 p.
- Orozco-Bayo, E., E. Jordán-González., E. Del Pozo-Garnica., J. Carmona-García., J.A. López-Donate, y J.J. Martínez-Sánchez. 2007. Estudio de la influencia de la intensidad de poda en *Pinus halepensis* Mill sobre diversos parámetros morfológicos, fisiológicos y biológicos. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, España 63 p.
- Perelló-Guarro, P. I. 2012. Inventario del potencial generador de biomasa como fuente renovable a escala local. Trabajo final de carrera. Ingeniería Técnica Forestal. Escuela Politécnica Superior de Gandia. Universidad Politécnica de Valencia. Gandia, Valencia, España. 115 p.
- Picos-Martin, J. y M.A. Cogolludo-Agustín. 2007. Apuntes de dasometría. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad de Vigo. Pontevedra, España. 191 p.
- Prodan, M., Peters R., Cox F., y Real P. 1997. Mensura forestal. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 561 p.
- Rivas-Torres, D. 2006. Sistemas de producción forestal. Unidad II Evaluación de los recursos forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. Preparatoria agrícola. Área de agronomía. Chapingo, México. 26 p.

- Rodríguez-Soto, R. 1989. Ensayo de adaptación de cinco especies del género *Pinus* en Buenavista, Saltillo, Coahuila. Tesis de licenciatura. División de Agronomía, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 75 p.
- Romahn de la Vega, C. F., H. Ramírez-Maldonado y J. L. Treviño-García. 1994. Dendrometría. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo. México. 354 p.
- Romahn de la Vega, C. F., y H. Ramírez-Maldonado. 2010. Dendrometría. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 312 p.
- Romero-Hernández, A. E. 2005. Tabla de volúmenes para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en su área de distribución natural en los estados de Puebla y Veracruz. Tesis profesional. División de ciencias forestales, universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Texcoco, México. 92 p.
- Rzedowski. 1978. Vegetación de México. Limusa. México D. F. 432 p.
- Salazar, R. y C. Soihet. 2001. Manejo de semillas de 7 especies forestales de América Latina: Volumen II. Centro Agronómico Tropical de Investigaciones y Enseñanza, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 156 p.
- Secretaría del Medio Ambiente Y Recursos Naturales (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, exclusión o cambio – lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. Segunda Sección. 30 de diciembre de 2010. México. 78 p.
- Sit, V. y Poulin-Costello. 1994. Catalog of curves for curve fitting. Biometrics information handbook series. Handbook No. 4. Province of British Columbia. Forest Science Research Branch. Victoria, B. C, U.S.A. 110 p.
- Torres-Rojo, J. M. y O. S. Magaña-Torres. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Limusa. México D.F. 272 p.

- Trujillo-Sánchez, R. 1995. Evaluación del crecimiento de *Pinus cembroides* Zucc., *P. halepensis* Mill. y *P. eldarica* Medw., a 93 meses de establecida la plantación en, Buenavista, Saltillo Coahuila. Tesis de licenciatura. División de Agronomía, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 47 p.
- Zuñiga-Hernández, J. V. 2013. Índice de sitio para tres especies de *Pinus* en plantaciones mixtas, Miahuatlán, Oaxaca. División de Agronomía. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 69 p.



## 8 APÉNDICE

Apéndice 1. Modelos parámetros y estadísticos de ajuste para la relación edad-altura para las cinco especies.

Relación	Especie	Modelo	Parámetros de regresión			R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	CME
			$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$		
Edad-Altura	P.c.	Schumacher	2.2245	-22.0679		0.9542	0.3508
		Chapman-Richards	45002	0.00000082	0.9	0.8857	0.8761
		Weibull	0.0124	2.5585		0.4764	4.0123
	P.e.	Schumacher	1.9762	-18.9615		0.9753	0.1349
		Chapman-Richards	1.5333	0.9077	153.9	0.7155	1.5536
		Weibull	0.0102	2.6466		0.5395	2.5148
	P.h.	Schumacher	2.3713	-20.1785		0.9535	0.6221
		Chapman-Richards	6.1	0.1	3.1	0.9466	0.7147
		Weibull	0.1	2.1		0.3620	8.5430
	P.m.	Schumacher	2.2047	-24.6534		0.9844	0.0765
		Chapman-Richards	2.9934	0.2909	0.5637	0.5365	2.2712
		Weibull	0.0006	3.6056		0.5634	2.1393
	P.p.	Schumacher	0.6490	-17.4		0.9496	0.0194
		Chapman-Richards	1	1	59	0.4554	0.2096
		Weibull	0.0056	1.877		0.9506	0.0190

Dónde: P.c.= *Pinus cembroides*, P.e.= *Pinus eldarica*, P.h.= *Pinus halepensis*, P.m.= *Pinus maximartinezii*, P.p.= *Pinus pinea*,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ = Parámetros de regresión, R<sup>2</sup><sub>adj</sub>= Coeficiente de determinación ajustado, CME= Cuadrado medio del error.

Apéndice 2. Modelos parámetros y estadísticos de ajuste para la relación edad-diámetro para las cinco especies.

Relación	Especie	Modelo	Parámetros de regresión			$R^2_{adj}$	CME
			$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$		
Edad-Diámetro	P.c.	Schumacher	-1.2586	-25.6822		0.9313	0.0002950
		Chapman-Richards	2.5093	0.0053	1.5256	0.9369	0.0002710
		Weibull	0.0009	1.5059		0.9373	0.0002690
	P.e.	Schumacher	-1.1949	-25.5471		0.9672	0.0001610
		Chapman-Richards	2.5086	0.0053	1.5256	0.9447	0.0002710
		Weibull	0.0009	1.4947		0.9794	0.0001010
	P.h.	Schumacher	-0.6659	-28.1529		0.9630	0.0005660
		Chapman-Richards	13.7250	0.0014	1.3156	0.9784	0.0003310
		Weibull	0.0019	1.3990		0.9780	0.0003370
	P.m.	Schumacher	-1.3917	-21.8743		0.9303	0.0003220
		Chapman-Richards	22.4916	0.0007	1.3358	0.9300	0.0003230
		Weibull	0.0014	1.3745		0.9303	0.0003220
	P.p.	Schumacher	-2.0225	-25.2163		0.9762	0.0000200
		Chapman-Richards	31.9557	0.0006	1.5242	0.9833	0.0000140
		Weibull	0.0004	1.5402		0.9845	0.0000130

Dónde: P.c.= *Pinus cembroides*, P.e.= *Pinus eldarica*, P.h.= *Pinus halepensis*, P.m.= *Pinus maximartinezii*, P.p.= *Pinus pinea*,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ = Parámetros de regresión,  $R^2_{adj}$ = Coeficiente de determinación ajustado, CME= Cuadrado medio del error.

Apéndice 3. Modelos parámetros y estadísticos de ajuste para la relación edad-área basal para las cinco especies.

Relación	Especie	Modelo	Parámetros de regresión			R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	CME
			$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$		
Edad-Area Basal	P.c.	Schumacher	-2.3676	-58.7552		0.8107	0.00000577
		Chapman-Richards	0.0217	0.0966	9.4089	0.8101	0.00000579
		Weibull	0.0000013	2.7395		0.8081	0.00000585
	P.e.	Schumacher	-1.2617	-83.7197		0.9284	0.00000271
		Chapman-Richards	1136.60	0.0016	3.5916	0.9434	0.00000214
		Weibull	0.00000012	3.4978		0.9440	0.00000212
	P.h.	Schumacher	-0.7682	-78.9143		0.9602	0.00001600
		Chapman-Richards	1281.9000	0.0006	2.6353	0.9701	0.00001200
		Weibull	0.0000	2.6828		0.9701	0.00001200
	P.m.	Schumacher	-2.5096	-53.6776		0.8108	0.00000621
		Chapman-Richards	593.60	0.0006	2.5955	0.8120	0.00000617
		Weibull	0.0000023	2.5914		0.8135	0.00000612
	P.p.	Schumacher	-3.3592	-70.7548		0.9383	0.00000007
		Chapman-Richards	36562.20	0.0001	2.5980	0.9343	0.00000007
		Weibull	0.000000045	3.3293		0.9476	0.000000056

Dónde: P.c.= *Pinus cembroides*, P.e.= *Pinus eldarica*, P.h.= *Pinus halepensis*, P.m.= *Pinus maximartinezii*, P.p.= *Pinus pinea*,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ = Parámetros de regresión, R<sup>2</sup><sub>adj</sub>= Coeficiente de determinación ajustado, CME= Cuadrado medio del error.

Apéndice 4. Modelos parámetros y estadísticos de ajuste para la relación edad-volumen para las cinco especies.

Relación	Especie	Modelo	Parámetros de regresión			$R^2_{adj}$	CME
			$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$		
Edad-Volumen	P.c.	Schumacher	-1.0336	-86.5961		0.7722	0.000011000
		Chapman-Richards	0.00573	0.000468	0.1055	0.2959	0.000034000
		Weibull	0.0000000551	3.7870		0.7722	0.000011000
	P.e.	Schumacher	0.9793	-141.7000		0.8906	0.000005284
		Chapman-Richards	67195.4	0.0022	5.4335	0.8995	0.000004852
		Weibull	0.00000000032	5.3282		0.9003	0.000004813
	P.h.	Schumacher	1.4013	-135.1		0.9842	0.000020000
		Chapman-Richards	23317.2	0.0	4.2	0.9849	0.000019000
		Weibull	0.00000002263	4.3		0.9857	0.000018000
	P.m.	Schumacher	-1.0719	-96.2537		0.9095	0.000001456
		Chapman-Richards	17642.8	0.0012	4.2235	0.9071	0.000001494
		Weibull	0.00000001031	4.1770		0.9080	0.000001480
	P.p.	Schumacher	-2.2846	-121.50		0.8541	0.000000024
		Chapman-Richards	20282.8	0.0017	5.3466	0.8605	0.000000023
		Weibull	0.00000000004	5.2305		0.8618	0.000000023

Dónde: P.c.= *Pinus cembroides*, P.e.= *Pinus eldarica*, P.h.= *Pinus halepensis*, P.m.= *Pinus maximartinezii*, P.p.= *Pinus pinea*,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ = Parámetros de regresión,  $R^2_{adj}$ = Coeficiente de determinación ajustado, CME= Cuadrado medio del error.

Apéndice 5. Mejores modelos de ajuste por especie y por variable para las cinco especies.

Especie	Altura	Diámetro a 0.30 m	Área basal	Volumen
<i>P.cembroides</i>	Schumacher	Weibull	Schumacher	Schumacher
<i>P.eldarica</i>	Schumacher	Weibull	Weibull	Weibull
<i>P.halepensis</i>	Schumacher	Chapman-Richards	Chapman-Richards	Weibull
<i>P.maximartinezii</i>	Schumacher	Weibull	Weibull	Schumacher
<i>P.pinea</i>	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull