

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**EVALUACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN PLANTACIONES DEL
GENERO *Pinus* EN EL NORDESTE DE MÉXICO**

TESIS DE MAESTRÍA

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

PRESENTA:

ING. EDUARDO DE LOS RÍOS CARRAZCO

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2003

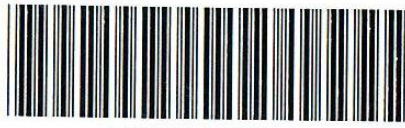
TM

Z599

FCF

2003

.R5



1020149397

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**EVALUACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN PLANTACIONES DEL
GENERO *Pinus* EN EL NORDESTE DE MÉXICO**

TESIS DE MAESTRÍA

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

PRESENTA:

ING. EDUARDO DE LOS RÍOS CARRAZCO

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2003

978051

TH
E 5901
FCF
2003
.P5



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCION DE POSGRADO

**EVALUACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN PLANTACIONES DEL
GENERO *PINUS* EN EL NORDESTE DE MÉXICO**

TESIS DE MAESTRÍA

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES**

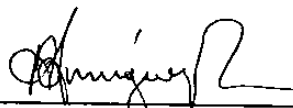
PRESENTA

ING. EDUARDO DE LOS RÍOS CARRAZCO

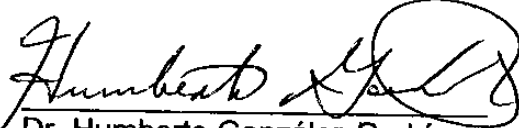
COMITÉ DE TESIS



Dr. José de Jesús Navar Chaidez
Presidente



Dr. Pedro Antonio Domínguez Calleros
Secretario



Dr. Humberto González Rodríguez
Vocal



Dr. Mario Marzano Camarillo
Asesor externo

LINARES, NUEVO LEÓN

DICIEMBRE DE 2003

DEDICATORIA

A mis padres: Sra. Juana Carrasco Guadiana (†²⁰⁰³) y Francisco de Los Ríos Salazar (†²⁰⁰¹) por darme la vida por, enseñarme la dirección correcta para abrirme el camino, por su apoyo incondicional en las etapas más difíciles de mi vida a ellos que siempre estuvieron conmigo, nunca los olvidaré.

A mi esposa: Flor Elena, gracias por tu amor, paciencia y comprensión, por compartir a mi lado los momentos de júbilo y tristezas, por tu gran apoyo en esta segunda etapa de mi superación profesional, por darme los hijos más preciosos.

A mis hijos: Eduardo Alan, Erick Raziel y Floricel por su gran ternura e inocencia de niños, por los agradables momentos que disfruto a su lado, por ser parte de mi vida, motivo de orgullo y superación.

A mis hermanos: Esthela, Lazara, Octavio (†¹⁹⁹²), Anna, Juan, Engracia, Manuel, Nery (†²⁰⁰³), Sindy y Susy. Por la unión de familia que siempre hemos llevado, por ser tan fuertes para afrontar el adelanto de nuestros seres queridos, por el apoyo moral que siempre me han brindado en las etapas más difíciles de mi vida, por compartir con ellos pocos pero inolvidables momentos. A todos gracias...

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado el don vivir y permitirme la satisfacción de alcanzar una meta más en mi vida.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme el apoyo económico a través una beca crédito para realizar mis estudios de Maestría en Ciencias Forestales, así como el apoyo parcial del proyecto Almacenes y Tasa de Secuestro de Bióxido de Carbono en las Plantaciones Forestales del Norte de México. Clave No. CONACYT-CONAFOR 2002-C01-6230.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por aceptarme en su programa de maestría y las facilidades otorgadas para culminar con el presente estudio.

Al Dr. José de Jesús Návar Cháidez. Director del trabajo de tesis, por su excelente dirección, apoyo profesional en las diferentes etapas del trabajo, por sus valiosos consejos y observaciones, por la amistad y confianza que depositó en mi persona.

Al Dr. Pedro A. Domínguez Calleros. Por el interés y disposición que siempre demostró en la asesoría de este trabajo, por las invaluable y acertadas observaciones para la realización de un mejor trabajo.

Al Dr. Humberto González Rodríguez. Por su valiosa participación en el presente trabajo de tesis, por sus atinados comentarios y excelentes sugerencias al termino del estudio.

Al Dr. Mario Manzano Camarillo por sus amables sugerencias y disposición para colaborar como asesor externo en el presente trabajo.

Al Dr. Reinout J. de Hoogh Por ser el autor e iniciador del diseño experimental del presente trabajo durante su estancia en México.

Al Ing. Roque Félix Cervantes Soto colega y amigo quien participó de manara directa en los diferentes procesos de trabajos de campo del presente estudio.

A mis compañeros de generación: Tamara, Arturo, Pilar y Chuy, con quienes compartí diversas experiencias en el trascurso de la carrera.

A los compañeros del laboratorio José Dueñez, Jorge Méndez, Julio Ríos, Martín Juárez Joel Balboa y Chancho Reyna,

Al Ing. Oscar Ramírez: por su participación en al encuadernación de este trabajo de tesis.

INDICE

Lista de figuras	i
Lista de tablas	ii
Resumen	iv
Summary	v

Página

CAPITULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 2.....	3
Objetivos.....	3
2.1 General.....	3
2.2 Específicos.....	3
2.3 Hipótesis.....	4
CAPITULO 3.....	5
ANTECEDENTES.....	5
3.1 Modelaje de crecimiento.....	6
3.2.1 Opciones y alternativas.....	6
3.2.2 Funciones de crecimiento y rendimiento.....	9
3.2.3 Utilidades de las funciones de crecimiento en el campo forestal.....	11

3.2.4 Características importantes que debe tener un modelo de crecimiento.....	13
3.2.5 Clasificación de los modelos de crecimiento basado en su expresión matemática.....	15
3.3 Estimación de volumen de árboles individuales.....	20
3.3.1 Volumen de árboles individuales.....	21
3.3.2 Volumen del fuste.....	22
3.3.3 Funciones de volumen.....	23
3.3.4 Ahusamiento.....	25
3.3.5 Modelos a nivel del rodal.....	27
3.3.6 La clasificación de rodales o plantaciones por nivel de productividad.....	29
3.3.7 Distribución Weibull.....	30
3.3.8 Antecedentes de funciones de crecimiento desarrolladas para bosques de coníferas en México.....	31
CAPITULO 4.....	35
MATERIALES Y METODOS.....	35
4.1 Localización del área de estudio.....	35
4.2 Metodología.....	37
4.3 Diseño experimental.....	38
4.4 Características de los pinos piñoneros.....	38
4.5 Descripción de los bosques de pinos piñoneros.....	40
4.6 Hábitat y distribución.....	41
4.6.1 <i>Pinus cembroides</i>	41
4.6.2 <i>Pinus pinceana</i>	41
4.6.3 <i>Pinus nelsonii</i>	42
4.7 Estimación de volumen de árboles individuales.....	44
Procedimiento para la estimación del volumen fustal.....	44

4.7.1 Modelos de crecimiento.....	45
Procedimiento para el ajuste de parámetros estadísticos de las ecuaciones de crecimiento.....	45
4.7.2 Estimación y predicción de parámetros de la distribución Weibull.....	46
Procedimiento.....	47
4.8 Densidad.....	47
4.8.1 Factor de competencia de copas (FCC).....	47
Procedimiento.....	47
4.9 Modelos de Incremento y Rendimiento a nivel del rodal.....	49
Procedimiento.....	49
4.10 Estimación de biomasa (Carbono).....	51
Procedimiento.....	51
CAPITULO 5.....	53
RESULTADOS Y DISCUSION.....	53
5.1 Volumen fustal.....	53
5.1.1 Ecuaciones lineales.....	53
5.1.2 Ecuaciones no lineales.....	55
5.1.3 Comparación de Ecuaciones lineales y Ecuaciones no lineales.....	57
5.2 Crecimiento.....	57
5.3 incremento.....	60
5.4 Densidad.....	64
5.5 Crecimiento de árboles individuales.....	66
5.5.1 Comparación del crecimiento de un bosque nativo y de la plantación de <i>P. cembroides</i>	66
5.5.2 Volumen.....	66
5.5.3 Diámetro.....	68

5.5.4 Altura.....	70
5.6 El modelo de incremento y rendimiento de árboles individuales	71
5.7 Los modelos de incremento y rendimiento al nivel del rodal para las plantaciones de piñoneros.....	74
5.7.1 La distribución Weibull.....	74
5.7.2 Proyecciones diamétricas en tiempo.....	79
5.8 Clasificación de rodales por productividad de sitio.....	80
5.8.1 Rendimiento actual.....	84
5.8.1.1 El área basal.....	86
5.8.1.2 Volumen.....	87
5.8.1.3 Biomasa y Carbono en el compartimiento aéreo...	88
CAPITULO 6.....	91
CONCLUSIONES.....	91
LITERATURA CITADA.....	93

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.- Localización del área de estudio.....	35
Figura 2.- Comparación de las curvas de crecimiento e incremento en volumen, diámetro y altura en la plantación de <i>Pinus cembroides</i>	61
Figura 3.- Comparación de las curvas de crecimiento e incremento en volumen, diámetro y altura en rodal natural de <i>Pinus cembroides</i>	62
Figura 4.- Comparación de crecimiento en volumen entre las especies plantadas y bosque nativo de <i>Pinus cembroides</i>	67
Figura 5.- Comparación de crecimiento en diámetro entre las especies plantadas y bosque nativo de <i>Pinus cembroides</i>	68
Figura 6.- Comparación de crecimiento en altura entre las especies plantadas y bosque nativo de <i>Pinus cembroides</i>	69
Figura 7.- Curvas de los modelos de incremento y rendimiento para árboles individuales para las especies plantadas.	71
Figura 8.- Ajuste de la distribución Weibull para <i>Pinus cembroides</i> en los dos sitios de plantación en Iturbide Nuevo, León México.....	75
Figura 9.- Ajuste de la distribución Weibull para <i>Pinus pinceana</i> en los dos sitios de plantación en Iturbide Nuevo, León México.....	76
Figura 10.- Ajuste de la distribución Weibull para <i>Pinus nelsonii</i> en los dos sitios de plantación en Iturbide Nuevo, León México.....	77
Figura 11.- Proyecciones diamétricas de los parámetros de la distribución Weibull para las especies plantadas.....	78
Figura 12.- Índices de sitio estimados para las especies <i>Pinus cembroides</i> , <i>P. pinceana</i> y <i>P. nelsonii</i> establecidas en dos sitios con diferente gradiente altitudinal (Las Adjuntas 1250m y Loma 1680m).....	82
Figura 13.- Densidad proyectada a través del tiempo	84
Figura 14.- Crecimiento del área basal por índice de sitio en las plantaciones.....	85
Figura 15.- Crecimiento en volumen por índice de sitio en las plantaciones	87
Figura 16.- Biomasa alcanzada por índice de sitio en las plantaciones.....	88
Figura 17.- Carbono almacenado por índice de sitio en las plantaciones.....	89

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1.- Modelos de crecimiento no lineales utilizados para estimar altura diámetro y volumen en función de la edad.	15
Tabla 2.- Formulas de los tipos dendrométricos usados para el cálculo del volumen.	22
Tabla 3.- Ecuaciones lineales para estimar volúmenes de árboles individuales	23
Tabla 4.- Modelos no lineales sin considerar la forma del árbol, para generar ecuaciones de volumen.	24
Tabla 5.- Modelos de ahusamiento.....	25
Tabla 6.- Distribución de las tres especies estudiadas en el presente trabajo...	42
Tabla 7.- Estadísticos de ajuste de las ecuaciones ponderadas linealizadas para estimar volúmenes de árboles individuales de tres especies de piñoneros plantados en Iturbide, N.L., México.	53
Tabla 8.- Estadísticos de ajuste de las ecuaciones ponderadas no lineales para estimar volúmenes de árboles individuales	55
Tabla 9.- Estadísticos de los modelos de crecimiento no lineales utilizados para estimar altura, diámetro y volumen en función de la edad para <i>Pinus cembroides</i>	58
Tabla 10.- Estadísticos del modelo de crecimiento no lineal utilizado para estimar altura, diámetro y volumen en función de la edad para las especies plantadas.	59
Tabla 11.- Las ecuaciones resultantes de la predicción del diámetro de copas en función del diámetro basal para tres especies de piñonero plantadas en Iturbide, N.L., México.....	63
Tabla 12.- Densidades máximas promedio, para tres especies de pinos piñoneros (<i>Pinus cembroides</i> Zucc., <i>P. pincheana</i> Gord. y <i>P. nelsonii</i> Schaw.) plantados en Iturbide, N.L., México.	64
Tabla 13.- Ecuación para predecir el parámetro e y b de posición y escala de la distribución weibull.....	74
Tabla 14.- Estadísticos de ajuste para modelos de crecimiento en altura dominante-edad y ecuación de índice de sitio por el método de la curva guía.....	80

Tabla 15.- Resultados de las ecuaciones basadas en el modelo de Schumacher y Clutter et al., (1983) y sus estadísticos de ajuste para plantaciones forestales de piñoneros de Iturbide, N.L., México.....	83
---	----

RESUMEN

En las laderas interiores de la Sierra Madre Oriental del nordeste de México existen numerosas áreas degradadas por efectos del sobrepastoreo. Los trabajos de restauración de la vegetación pueden incluir especies adaptadas a condiciones de sequía y que se han probado satisfactoriamente en otras localidades similares. Este trabajo de investigación tuvo por objetivo desarrollar modelos para entender el incremento y rendimiento y los almacenes y tasas de secuestro de carbono de tres especies de pinos piñoneros (*P. cembroides* Zucc., *P. nelsonii* Shaw. y *P. pinceana* Gord.) plantadas durante 1983. La fuente de datos para el desarrollo de los modelos consistió en dos plantaciones establecidas en bloques completos al azar a 1250 m y 1680 m sobre el nivel del mar. En cada parcela se midieron el diámetro, la altura y la sobrevivencia semestralmente durante los primeros tres años y finalmente durante 2003. Los modelos de incremento y rendimiento al nivel de árboles individuales y al nivel del rodal, con proyecciones diamétricas fueron probados. Estos incluyeron ecuaciones para predecir el volumen, el diámetro basal, la altura total, la densidad, el área basal y las estructuras diamétricas. Los modelos claramente indicaron, consistente con las observaciones de campo que *P. cembroides* creciendo a 1250 m se adapta y crece mejor que *P. pinceana* y *P. nelsonii*. Esta misma especie se desarrolla mejor también a 1680 m en contraste con *P. nelsonii* a 1250 m. Los modelos proyectan buenos crecimientos y tasas de captura de carbono en las áreas más productivas de estos sitios degradados. La producción de torcería y la captura de carbono son fuentes alternativas de ingresos en los proyectos de restauración de la vegetación en las laderas de la Sierra Madre Oriental del estado de Nuevo León.

SUMMARY

In the slopes of the Eastern Sierra Madre mountain range of north-eastern Mexico there are numerous degraded lands by overgrazing practices. The forestation practices recommended to restore plant cover must include tree species adapted to dry, low fertility, degraded lands. This research aimed to develop growth and yield models to understand carbon stocks and sequestration rates in the aboveground biomass of three pinyon species (*P. cembroides* Zucc., *P. nelsonii* Shaw. y *P. pinceana* Gord.) planted during 1983. The source of information to develop models consisted on two plantations established in randomized blocks at two sites: 1250 and 1680 m. In each site, measurements of basal diameter, top height, and seedling survival were recorded every 6 months during the first three years and a last measurement conducted during 2003. Growth and yield models for single trees and at the whole stand, including projection of diameter structures were tested. These techniques included equations to predict stem volume, stand density, basal diameter, top height, basal area and diameter structures. Models clearly indicated, consistent with the field observations that *P. cembroides* adapts and grows better at both sites than *P. pinceana* and *P. nelsonii*. This species develops better at 1250 m but at 1680 grows better than *P. nelsonii* planted at any of the two sites. Models project good volume growth and carbon sequestration in the most productive sites. Timber production and carbon sequestration are alternate sources of income when restoring plant cover in the slopes of the eastern Sierra Madre mountain range of the State of Nuevo Leon, Mexico.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Los bosques naturales templados que cubren parte importante de las zonas semisecas y templadas del norte de México, han sido durante siglos los mayormente afectados por acciones antropogénicas de índole diversas. En las laderas interiores de la Sierra Madre Oriental del nordeste de México, el pastoreo es la principal actividad económica en la actualidad y sus cargas animales sobrepasan normalmente la recomendada por agencias gubernamentales como Cotecoca-Sarh (1982). Es posible que primero se hayan sobre explotado los bosques nativos porque aún se observan relictos de bosques caracterizados por *P. cembroides*, *P. psedostrobus* y *P. greggii*. Otras acciones ligadas a la destrucción de las áreas boscosas han sido los incendios forestales y los posibles cambios sutiles del clima. Particularmente para el estado de Nuevo León, los incendios forestales ocurridos en los años 1989 y 1998 son considerados los más catastróficos afectando 30, 899 ha y 28, 000 ha de superficie respectivamente Semarnat (2002); Gobierno del estado de Nuevo León (1998).

Los Programas de plantaciones desarrollados en los 1970-s en el nordeste de México no han mostrado resultados sorprendentes. Por esta razón, las especies de pinos piñoneros de la región y que algunos de estos se encuentran en algún estatus de conservación (UICN, 2000) podrían ser utilizadas en programas preliminares de reforestación. Estas especies están adaptadas a condiciones degradadas, se distribuyen en regiones con clima árido y semi-árido del norte de México Farjon y Styles (1997) y pueden proporcionar beneficios secundarios por la producción de semillas (piñones) además de la madera y la restauración de la productividad del sitio. Se ha señalado que otros beneficios ambientales como la captura de carbono, la protección de cuencas, la conservación de suelos y aguas pudieran ser también importantes dentro de los incentivos captados por la reforestación de especies de lento crecimiento. Domínguez y Návar (1998) han demostrado que las plantaciones con especies no nativas de la localidad pueden propiciar ambientes favorables para el establecimiento de una de las especies nativas de la región (*P. greggii*). Los ensayos de procedencias son claves en la selección de las especies que pudieran potencialmente desarrollar mejores adaptaciones a través de la supervivencia y el crecimiento en los sitios a reforestar. Estos trabajos incluyen generalmente un estudio previo con la finalidad de garantizar el éxito en los programas de reforestación.

CAPITULO 2

OBJETIVOS

2.1 General.

Estimar el potencial de captura de carbono así como la dinámica de desarrollo e incremento en dos plantaciones de tres especies del género *Pinus* de la Sierra Madre Oriental, en el Estado de Nuevo León.

2.2 Específicos.

1) Desarrollar y ajustar modelos que permitan estimar el volumen y la biomasa de tres especies del género *Pinus* plantadas en el nordeste de México.

2) Comparar el desarrollo de las especies plantadas fuera de su hábitat natural, respecto a las mismas especies creciendo en condiciones naturales.

3) Determinar el efecto de la altitud sobre el nivel del mar en las características adaptativas de las especies en terrenos degradados del nordeste de México.

4) Comparar la adaptación de tres especies de pinos piñoneros (*Pinus nelsonii*, *Pinus pinceana* y *Pinus cembroides*), de las cuales las dos primeras especies se encuentran listadas en estado de protección especial, a través del crecimiento en diámetro, altura y supervivencia.

5) Contribuir con información precisa (modelos y ecuaciones) para el manejo adecuado de estas especies como una alternativa de uso ambiental dirigida al almacenamiento y/o captura de carbono.

2.3 Hipótesis

La tasa de secuestro de CO₂ en la cobertura aérea es independiente de las especies (*P. cembroides*, *P. pinceana* y *P. nelsonii*), del sitio (1250 - 1650) y de la edad (0 - 20 años).

CAPITULO 3

ANTECEDENTES

Desde hace 200 años las primeras tablas de producción fueron publicadas Vuokila (1965), 30 años desde que los modelos compatibles con la producción y cosecha fueron reportados (Buckman 1962, Clutter, 1963) y 20 años desde que la primera reunión sobre modelaje de crecimiento de IUFRO fue organizada Fries (1974). A pesar de esta herencia, el modelaje sobre el crecimiento forestal continua siendo mas un arte que una ciencia. Muchos modelos son excesivamente empíricos, confiando en la calibración de los datos en lugar de resaltar las teorías biológicas. Estos problemas son relevantes en modelos que se ajustan a bosques naturales con muchas especies.

Aunque las plantaciones forestales son sujetas a modelar empíricamente, los bosques templados mixtos y los bosques tropicales húmedos ofrecen un reto especial para el modelador del crecimiento, porque estos pueden ser los ecosistemas forestales más complejos. En bosques tropicales, existen posiblemente 100 especies arbóreas por hectárea y 1000 en una unidad de manejo, 100 de los cuales pueden ser de importancia comercial. En los bosques templados mixtos pueden existir 10 especies en los sitios, de las

cuales solo 3 o 4 son comerciales. La mezcla de las especies o diversidad biológica exhibe un amplio rango de formas de vida y dimensiones fustales. En estos bosques, la edad es irrelevante como una variable del modelo.

Esta tesis enfatiza sobre algunas técnicas de modelación del crecimiento forestal de plantaciones forestales con especies del genero *Pinus*. El énfasis es sobre los modelos de relevancia práctica para el manejo de bosques regulares y uniespecíficos. Con el modelaje del crecimiento en diámetro, altura y volumen al nivel de los árboles individuales y del rodal se puede derivar la biomasa aérea y el bióxido de carbono contenido en esta parte del ecosistema.

3.1 MODELAJE DEL CRECIMIENTO:

3.2.1 OPCIONES Y ALTERNATIVAS

Un modelo puede representar alguna estructura mostrando las proporciones y arreglos de las partes que lo componen. Se puede referir a una expresión formal de una teoría Ford-Robertson (1971). El uso común del término modelo de crecimiento conjunta las ecuaciones matemáticas, los valores numéricos dentro de las ecuaciones, la lógica necesaria para relacionar estas ecuaciones en una forma significativa, y el código computacional necesario para implementar el modelo en una computadora.

Levins (1966) sugiere que los modelos biológicos pueden no ser generales, reales, o precisos, pero pueden solo alcanzar dos de estas metas. Prentice (1986), Prentice y Helmisaari (1991) ofrecieron una clasificación basada en estos atributos. Modelos abstractos Gatto y Rinaldi (1987) pueden ser precisos y generales, pero no intentan simular las dinámicas de ciertos tipos de bosques. Los modelos sucesionales Shugart (1984), Botkin (1993) pueden ser realísticos y generales, pero no pueden ser suficientemente precisos para las decisiones del manejo forestal. Los modelos de producción y crecimiento pueden ser precisos y reales, pero son limitados en su proyección y pueden requerir datos empíricos para calibración. A pesar de su falta de generalidad, los modelos de crecimiento son de una importancia considerable en el manejo forestal, y son este tipo de modelos los relevantes en este reporte.

Los modelos de crecimiento forman una continuación de las tablas normales de producción para modelos de árboles individuales Leary (1991). Se enfatiza la naturaleza y detalle de los modelos de crecimiento desde aquellos para rodales completos, clases de rodales y de árboles individuales. Los modelos de rodales completos se basan en parámetros al nivel del rodal tales como densidad (árboles por ha^{-1}), área basal del rodal y volumen en pie para predecir el crecimiento o productividad del rodal. Las distribuciones de las dimensiones pueden ser inferidas, pero pocos detalles de los árboles individuales están disponibles. Los modelos de rodales clasificados (stand class models) proveen mas detalles por la simulación de varias clases dentro del

rodal (ej. la proyección de la tabla del rodal). Este procedimiento es un compromiso entre los modelos de rodales completos (una clase individual para todos los árboles) y modelos de árboles individuales (una clase para cada árbol). Los datos requeridos mínimos para un modelo para árboles individuales es una lista que contenga las dimensiones de cada árbol en el rodal.

Otros modelos se basan en diferentes fundaciones para ayudar a entender el crecimiento del árbol y la dinámica del rodal, pero no han sido usados aun con éxito para predecir la cosecha de madera. Los modelos sucesionales Shugart (1984), Botkin (1993) intentan modelar la sucesión de las especies, pero no pueden proveer información confiable sobre la cosecha de madera. Modelos de procesos intentan modelar los procesos del crecimiento, considerando las variables luz, temperatura y niveles de los nutrientes del suelo y modelar la fotosíntesis y la distribución de los fotosintatos a las raíces, los fustes y hojas Sievanen *et al.*, (1988), Bossel *et al.*, (1991). Muchos modelos de procesos se enfocan en especies individuales, pero algunos intentos se están realizando para formular tales modelos para rodales mixtos. Los modelos FOTCYTE Kimmins *et al.*, (1990) y LINKAGES Pastor y Post, (1986) se enfocan en los ciclos del nitrógeno y carbón y han sido usados para examinar los efectos del manejo forestal en la productividad futura y estructura del ecosistema Yarie (1990) pero son finalmente dirigidas por tablas de producción sencillas y no proveen estimaciones de cosecha para el manejo. Bossel y Krieger (1991) usaron un procedimiento de proceso para construir un modelo

estratificado de copas para los bosques Malayos. Tales modelos actualmente ofrecen relevancia práctica limitada, en parte por las dificultades en la estimación de los numerosos parámetros Bossel *et al.*, (1989), de tal manera que existe la necesidad de incluir contenido empírico para desarrollar modelos eficientes para el manejo forestal. El reto es proveer suficientes bases fisiológicas y ecológicas para asegurar predicciones reales en una variedad de sitios y condiciones de los rodales, aún cuando datos empíricos para calibración sean limitados.

3.2.2 Funciones de Crecimiento y Rendimiento

Cuando se trata de estudiar un fenómeno del mundo real en términos cuantitativos se recurre a una expresión matemática, que lo describa en la forma más fiel posible y a dicha expresión se le denomina modelo. Los modelos de crecimiento son una abstracción de la dinámica natural de un ecosistema forestal, contemplando factores como regeneración, crecimiento, competencia, mortalidad, así como cambios en la composición y estructura del mismo, considerando a su vez factores de tipo abiótico González (1999).

Las funciones o ecuaciones de crecimiento describen las variaciones que experimentan el tamaño de un organismo o una población con la edad. El crecimiento biológico, que es el resultado de un gran número de procesos complejos, puede resumirse de una forma simple, particularmente cuando el

organismo o población analizada es un árbol o una masa forestal Kiviste *et al.*, (2002). Crecimiento o incremento son derivados por el cambio en las dimensiones de los árboles que ocurren en el tiempo y son consideradas parte fundamental en las estrategias de planeación en el manejo forestal Husch *et al.*, (1982).

Romero (1993) define el crecimiento como el aumento íntegro y gradual de las características dasonómicas del árbol, grupo de árboles o masas forestales. Además menciona que en el crecimiento de un árbol influyen su constitución genética y el medio que lo rodea donde la información genética determina la respuesta del árbol a los diferentes ambientes, controlando sus manifestaciones y el ambiente proporciona los nutrientes, agua, e iluminación. Es por que el crecimiento es la respuesta a la acción conjunta de estas dos variables.

Zeide (1993) menciona que cuando se trata de plantas, su crecimiento es el resultado de la interacción entre dos factores; por un lado está la tendencia intrínseca hacia el crecimiento ilimitado, que depende del potencial biótico del individuo, de su actividad fotosintética, de la absorción de nutrientes, de los procesos catabólicos y anabólicos, etc.; en el lado opuesto se encuentran las restricciones al crecimiento, impuestas por el entorno en el que se desenvuelve dicho individuo (competencia con otros organismos, limitación de recursos, procesos respiratorios y estrés) y por su propia condición de ser vivo (mecanismos de autorregulación del crecimiento y envejecimiento).

Navar *et al.*, (1996) definieron un modelo de crecimiento utilizando la distribución Weibull y como variable predoctora al diámetro cuadrático promedio. Por su parte Vanclay (1994) manifiesta que los modelos de crecimiento y rendimiento al nivel del rodal utilizan parámetros promedio como el volumen, el área basal y número de árboles por ha⁻¹. Este mismo autor refiere que los modelos de crecimiento ayudan a los manejadores de los recursos naturales en diferentes maneras, ya sea prediciendo el crecimiento futuro y explorando una gran variedad de opciones en los tratamientos silvícolas.

3.2.3 Utilidades de las funciones de crecimiento en el campo forestal

Kiviste *et al.*, (2002) hacen mención de algunas de las aplicaciones de las funciones de crecimiento dentro del ámbito forestal, como se resumen a continuación:

- 1) En primer término, y como es lógico, la primera y más simple aplicación es el propio conocimiento de la evolución o del crecimiento de cualquiera de las variables del árbol o de masas habitualmente estudiadas, tales como diámetro, altura, volumen, área basal, etc.
- 2) El estudio de la evolución con el tiempo de las alturas dominantes de una masa forestal se utiliza para construir las curvas de calidad de la

estación, que permiten estimar y clasificar de forma sencilla la productividad de una determinada especie en un área geográfica determinada.

- 3) Las curvas de calidad son un paso previo e imprescindible para la elaboración de cualquier tipo de tablas de producción, que describen la evolución con la edad de todas las variables de una masa forestal, Además, para la construcción de los modelos mas complejos, las tablas de producción dinámicas, resulta necesario el ajuste de ecuaciones de incremento de ciertas variables, como el área basal o el volumen.
- 4) Otra de las aplicaciones de las funciones de crecimiento es la posibilidad de calcular las tendencias o patrones de valores de los crecimientos medio y corriente (ICA IMA) de diferentes variables. En el caso de volumen de masa, dichos valores permiten determinar el turno de máxima renta en especie.
- 5) Mediante las funciones de crecimiento también es posible determinar las edades a las que alcanzan los turnos financieros, tecnológicos y físicos de las masas forestales.

-
- 6) La estimación de la posibilidad en montes ordenados se simplifica cuando se conocen las funciones que rigen el crecimiento en volumen de sus masas.

 - 7) Los modelos de crecimiento y sus primeras derivadas se pueden utilizar para caracterizar las funciones de distribución y de densidad de probabilidad de variables dendrométricas como diámetros, alturas, secciones o volúmenes, tanto en masas regulares (cuando la primera derivada describe una curva unimodal) como en irregulares (cuando la primera derivada adopta, en algún intervalo, la forma de una *J* invertida).

 - 8) En masas regulares, cuando se conoce la distribución de las clases de edad, es posible utilizar las funciones de crecimiento (de volumen o de área basal) para realizar simulaciones con el objeto de optimizar los aprovechamientos.

3.2.4 Características importantes que debe de tener un modelo de crecimiento

Como es conocido la evolución de las variables de un árbol o de una masa a lo largo del tiempo sigue un patrón definido y estable conocido como curva sigmoide, cuyas características principales son la presencia de un punto de inflexión, que corresponde con el máximo crecimiento corriente de dicha

variable y una asíntota, que representa el tamaño máximo que puede alcanzar la variable.

Además de estos atributos Golez y Burk (1992) citados por Kiviste *et al.*, (2002) describen las características que deben cumplir los modelos empleados para construir curvas de calidad de estación, algunas de las cuales pueden generalizarse a todos los modelos de crecimiento. Las principales son las siguientes:

- 1) Existencia de un punto de inflexión.
- 2) Existencia de una asíntota horizontal.
- 3) Comportamiento lógico: Los modelos no deben permitir valores anormales desde el punto de vista biológico; por ejemplo, la curva de alturas debe pasar por el origen, o el diámetro debe ser igual a cero a la edad en la que el árbol alcanza la altura de 1.3 metros.
- 4) Base biológica: La forma de la ecuación debe derivarse del conocimiento teórico que se tenga del crecimiento de la variable dependiente analizada. Al incorporar esta base teórica en el desarrollo de la ecuación se consigue, además, que se ajuste a cualquier conjunto de datos y

resulte más exacto Peinar y Turnbull (1973) citado por Kiviste *et al.*, (2002).

3.2.5 Clasificación de los modelos de crecimiento basado en su expresión matemática

Se han utilizado una gran variedad de ecuaciones para modelar el crecimiento de los árboles y las masas forestales, desde los más sencillos como la recta, hasta los modelos más complejos que describen el crecimiento de árboles individuales, en los que intervienen, además de la edad, muchas otras variables independientes Kiviste *et al.*, (2001). Estos mismos autores describen y analizan 74 funciones de crecimiento forestal que han sido clasificadas en 8 grupos derivadas de su expresión matemática, como lo propone Kiviste (1988) de las cuales se analizaron y probaron las que a continuación se presentan:

Tabla 1.- Modelos de crecimiento no lineales utilizados para estimar altura diámetro y volumen en función de la edad.

GRUPO	MODELO	DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO
5	MISTERLICH (1919) CHAPMAN-RICHARD	1	$y = a(1 - e^{-bt})^c \quad a > 0 \quad b > 0 \quad c > 0 \quad \{\forall t \geq 0\}$
		2	$I.C.A = y' = abc(1 - e^{-bt})^{c-1} e^{-bt}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{a(1 - e^{-bt})^c}{t} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow bct - e^{bt} + 1 = 0$

3	LEVAKOVIC II (1935)	1	$y = a \left(\frac{t}{b+t} \right)^c \quad a > 0 \quad b > 0 \quad c > 1 \quad \{\forall t \geq 0\}$
		2	$I.C.A = y' = \frac{abct^{c-1}}{(b+t)^{c+t}}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{at^{c-1}}{(b+t)^c} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow t = b(c-1)$
3	LEVAKOVIC III (1935)	1	$y = a \left(\frac{t^2}{b+t^2} \right)^c \quad a > 0 \quad b > 0 \quad c > 0 \quad \{\forall t \geq 0\}$
		2	$I.C.A = y' = \frac{2abct^{2c-1}}{(b+t^2)^{c+t}}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{at^{2c-1}}{(b+t^2)^c} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow t = \sqrt{b(c-1)}$
2	HOSSFELD I (18229)	1	$y = \frac{t^2}{(a+bt+ct^2)} \quad a > 0 \quad c > 0 \quad \left\{ \forall t \geq 0 / t \neq \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c} \right\}$
		2	$I.C.A = y' = \frac{t(bt+2a)}{(a+bt+ct^2)^2}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{t}{(a+bt+ct^2)} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow t = \sqrt{\frac{a}{c}}$
4	GOMPertz (1825)	1	$y = e^{a-be^{-ct}} \quad a > 0 \quad b > 0 \quad c > 0 \quad \{\forall t \geq 0\}$
		2	$I.C.A = y' = bce^{a-ct-be^{-ct}}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{e^{a-be^{-ct}}}{t} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow e^{ct} - bct = 0$
4	SLOBODA (1971)	1	$y = e^{a-be^{-ct^d}} \quad a > 0 \quad b > 0 \quad c > 0 \quad \{\forall t \geq 0\}$
		2	$I.C.A = y' = bcdt^{d-1} e^{a-ct^d-be^{-ct^d}}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{e^{a-be^{-ct^d}}}{t} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow bcdt^d - e^{ct^d} = 0$
4	VERHULST-LOGÍSTICA	1	$y = \frac{a}{1+e^{b-ct}} \quad a > 0 \quad b > 0 \quad c > 0 \quad \{\forall t \geq 0\}$
		2	$I.C.A = y' = \frac{ace^{b-ct}}{(1+e^{b-ct})^2}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{a}{t+te^{b-ct}} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow e^b(ct-1) = e^{ct}$

5	MONOMOLECULAR WEBER (1891)	1	$y = a(1 - e^{-b-c}) \quad a > 0 \quad c > 0 \quad \left\{ \forall t \geq \frac{b}{c} \right\}$
		2	$I.C.A = y' = ace^{b-c}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{a(1 - e^{-b-c})}{t} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow e^b - e^{ct} + cte^b = 0$
5	BERTALANFFY (1938)	1	$y = a(1 - e^{-b-c})^d \quad a > 0 \quad c > 0 \quad d > 0 \quad \left\{ \forall t \geq 0 \right\} \text{ si } b < 0; \left\{ \forall t \geq \frac{b}{c} \right\} \text{ si } b > 0$
		2	$I.C.A = y' = acd(1 - e^{-b-c})^{d-1} e^{-b-c}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{a(1 - e^{-b-c})^d}{t} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow e^b (cdt + 1) - e^{ct} = 0$
5	WEIBULL (1951)	1	$y = a[1 - e^{-b(t-c)^d}] \quad a > 0 \quad b > 0 \quad d > 0 \quad \left\{ \forall t \geq 0 \right\} \text{ si } c < 0; \left\{ \forall t \geq c \right\} \text{ si } c$
		2	$I.C.A \quad y' = \frac{abd(t-c)^{d-1}}{e^{b(t-c)^d}}$
		3	$I.M.A = \frac{y}{t} = \frac{a}{t} [1 - e^{-b(t-c)^d}] \quad C.M. = C.C. \Rightarrow 1 - e^{b(t-c)^d} + bdt(t-c)^{d-1} = 0$
3	YOSCHIDA I (1928)	1	$y = \frac{t^c}{(a + bt^c)^{-d}} \quad a > 0 \quad b > 0 \quad c > 1 \quad \left\{ \forall t \geq 0 / t \neq \left(\frac{-a}{b} \right)^{1/c} \right\}$
		2	$I.C.A = y' = \frac{act^{c-1}}{(a + bt^c)^2}$
		3	$I.M.A = y' = \frac{t^{c-1}}{(a + bt^c)} - \frac{d}{t} \quad C.M. = C.C. \Rightarrow t^{2c}(b^2d - b) + t^c(ac + 2abd - a) + c$

Fuente: (Kiviste et al., 2002).

3.2.6 Descripción

1.- Expresión matemática, restricciones de los parámetros y ámbito de aplicación: se indica la expresión matemática de la función, donde "y" es la variable cuyo crecimiento se pretende estimar (diámetro, altura, área basal,

volumen, etc.), " t " es la edad y " a ", " b ", " c ", " d " y " f " son los parámetros estadísticos a determinar en el ajuste.

En este apartado se incluyen también las restricciones en los valores de los parámetros y el ámbito de aplicación del modelo dentro del primer cuadrante (valores de edad mayor o iguales a cero).

2.- Crecimiento corriente anual (ICA) primera derivada: se incluye la expresión matemática del crecimiento corriente de la variable " y ", que coincide con la primera derivada del modelo con respecto a la edad.

3.- Crecimiento medio anual (IMA) y edad a la que se iguala con el crecimiento corriente (ICA): se indica la expresión matemática del crecimiento medio de la variable " y ", que se corresponde con el cociente entre el modelo y la edad.

Se incluye también la edad a la cual coincide el crecimiento corriente y medio, siempre y cuando esa edad esté dentro del ámbito de aplicación del modelo.

Grupo 2.- Este grupo se caracteriza porque las funciones son cocientes de polinomios. El único modelo incluido de este grupo es el de Hossfeld I y su modificación, ya que ha sido utilizado frecuentemente en la construcción de

curvas de calidad de estación y en la modelización del volumen de masa. Su forma general es:

$$y = \frac{a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + \dots + a_n f_n(t)}{b_0 + b_1 f(t) + b_2 f_2(t) + \dots + b_n f_n(t)} \quad [1]$$

Donde "t" es la edad y "a" es un parámetro a estimar.

Grupo 3.- La principal característica de este grupo radica en que la variable independiente (edad) esta elevada a una potencia. Se han incluido 3 modelos y su forma general es:

$$y = f(t^a) \quad \text{ó} \quad y = [f(t)]^a \quad [2]$$

Donde "t" es la edad y "a" es un parámetro a estimar.

Grupo 4.- En este grupo destaca la presencia de un término exponencial de la edad, ya sea directamente o en el denominador de un cociente. Se incluyeron 3 modelos de este grupo de los cuales destaca la función logística. Su forma general es la siguiente:

$$y = e^{f(t)} \quad \text{ó} \quad y = \frac{a}{1 + e^{b_0 + b_1 f(t) + \dots + b_n f_n(t)}} \quad [3]$$

Donde "t" es la edad y "a" y "b_i" son parámetros a estimar.

Grupo 5.- Los modelos de este grupo se caracterizan porque aparece como regulador del crecimiento el término $1-e^{(t)}$. Se incluyeron 4 modelos entre los que destacan tres de los más importantes como son los de Mitscherlin (habitualmente conocido como de Chapman-Richards, Weibull y von Bertalanffy, que son algunos de los más utilizados en la modelización de crecimiento de variables del árbol y de masa. Su forma general es:

$$y = f_1(1 - e^{f_2(t)}) \quad [4]$$

Donde "t" es la edad

3.3 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ÁRBOLES INDIVIDUALES

Clutter *et al.*, (1983) y Husch *et al.*, (1983) mencionan que la medición o estimación del volumen resulta importante para la obtención de los productos derivados de los árboles. El volumen de madera aserrada, de productos secundarios, de desperdicios, entre otros, se puede deducir mediante la estimación del volumen del árbol. Las existencias reales son el producto de la suma del volumen de los árboles individuales que componen un rodal y se define como la unidad básica del manejo forestal para bosques templados. El crecimiento o incremento en volumen es un indicador de la productividad del sitio también. La estimación del volumen de árboles individuales o por unidad

de superficie debe de incluir técnicas, métodos o modelos probados en la literatura científica. Por esta razón, se deben de considerar los aspectos metodológicos en el desarrollo de ecuaciones para estimar volumen de árboles a diferentes escalas Contreras y Nívar (2003).

3.3.1 Volumen de árboles individuales.

La definición de volumen de un árbol individual es amplia e incluye cualquier o todas las partes del árbol; fuste, ramas, hojas o raíces. En algunas partes de México el término comúnmente usado es el volumen total, conocido como volumen rollo total. Este incluye los componentes tocón, ramas y fuste con o sin corteza, pero no las raíces. El volumen comercial es el volumen de la sección generalmente del fuste que es utilizado comercialmente. La estimación de esta variable cae dentro de las funciones de ahusamiento, o funciones que describen el perfil del fuste Nívar *et al.*, (1998).

Clutter *et al.*, (1983) menciona que las ecuaciones de volumen son la herramienta básica en la planeación de actividades forestales como son los inventarios, ya que derivan el volumen en los árboles en forma total o parcial en función del diámetro normal y altura total.

El procedimiento normalmente utilizado para la estimación de volúmenes de las diferentes secciones de árboles individuales en pié se basa inicialmente

en desarrollar y definir ecuaciones de predicción del volumen (V) en cada una de las secciones i extraídas de las variables dasométricas más fáciles de medir y que normalmente son utilizadas como el diámetro a 1.3 m (D) y la altura total (H), como se expresa en la siguiente ecuación.

$$V = f(D, H) \quad [5]$$

3.3.2 Volumen del fuste

Debido a que el fuste, Vf, de un árbol generalmente no obedece a ninguna figura geométrica en particular, se han desarrollado varias ecuaciones para poder estimar el volumen fustal de un árbol, ya que las secciones del fuste pueden asemejar varias formas en un mismo individuo como el neiloide, el cilindro, la parábola y el cono.

Tabla 2.- Formulas de los tipos dendrométricos usados para el cálculo del volumen.

Tipo dendrométrico (Nombre)	Fórmula
Neiloide truncado	$V = \frac{L * (S_0 + S_1 + \sqrt[3]{(S_0)(S_1)} * (\sqrt[3]{S_0} + \sqrt[3]{S_1}))}{4}$
Cilindro	$V = S_0 * L$
Parábola	$V = S_m * L$

Donde S_0 = área del diámetro menor (m^2); S_1 = área del diámetro mayor (m^2);
 S_m = área promedio de los diámetros menor y mayor (m^2); L = largo (m)

Por esta razón, en el ámbito forestal existen varias ecuaciones para estimar el volumen fustal de un árbol, entre las que destacan por ser más utilizadas para estos propósitos son las siguientes; la ecuación de Huber [6], Newton [7] y Smalian [8], entre otras.

$$V_{fj} = (0.7854d_m \cdot H_i) = H_i \cdot A_m; V_f = \quad [6]$$

$$V_{fj} = (0.7854(d_{mi} + d_{ms})/2) \cdot H_i = (H_i/2) \cdot (A_{mi} + A_{ms}) \quad [7]$$

$$V_{fj} = (H/6)(A_{mi} + 4A_m + A_{ms}) \quad [8]$$

donde: H_i = altura de la sección i del fuste j , d_{mi} , d_{ms} = Diámetros de los extremos de la sección i del fuste j , d_m = diámetro del centro de la sección i del fuste j , A_m = Área basal media de la sección i del fuste j , A_{mi} , A_{ms} = Áreas Básales de los extremos de la sección i del fuste j .

3.3.3 Funciones de volumen

Clutter *et al.*, (1983) y Wenger (1984) mencionan que en la actualidad existe un gran número de ecuaciones para estimar volumen que han sido reportadas en las diferentes publicaciones dirigidas a las ciencias forestales. Se clasifican normalmente en: (a) ecuaciones de volumen locales, (b) ecuaciones de volumen estándar y (c) ecuaciones universales. Las ecuaciones locales

solamente incluyen el diámetro normal como variable de entrada. Las ecuaciones estándar utilizan también la altura del árbol. Las ecuaciones universales incluyen también un factor de forma o ponderan por modelar la estructura del error Nívar *et al.*, (2003). Las ecuaciones de volumen pueden ser desarrolladas para una sola especie. En ocasiones se han reportado ecuaciones para un conjunto de especies, sin perder mucha precisión Tapia y Nívar (1998). Algunas ecuaciones comúnmente usadas para este propósito se reportan en la siguiente tabla (3).

Tabla 3.- Ecuaciones lineales para estimar volúmenes de árboles individuales

De coeficiente mérfico constante	$v = B_0 d^2 h$
De la variable combinada	$v = B_0 + B_1 d^2 h$
De la variable combinada generalizada	$v = B_0 + B_2 d^2 + B_2 h + B_3 d^2 h$
Australiana	$v = B_0 + B_1 d + B_2 h + B_3 d^2 h$
Meyer modificada	$v = B_0 + B_1 d + B_2 dh + B_3 d^2 h$
Comprensible	$v = B_0 + B_1 d + B_2 dh + B_3 d^2 + B_4 h + B_5 d^2 h$
De Naslund	$v = B_0 + B_1 d^2 h + B_2 h + B_3 dh^2$
De takata	$v = d^2 h / (B_0 + B_1 d)$

(Fuente: Clutter *et al.*, 1983; Romahn *et al.*, 1994; Prodan *et al.*, 1997; Tapia y Nívar, 1998).

Tabla 4.- Modelos no lineales sin considerar la forma del árbol, para generar ecuaciones de volumen.

MODELO	FUNCION NO LINEAL	FUNCION LINEALIZADA
Schumacher	$v = B_0 d^{B_1} h^{B_2}$	$\text{Log } v = \log B_0 + B_1 \log(d) + B_2 \log(h)$
Logarítmica con intercepto	$v = B_0 + B_1 d^{B_1} h^{B_2}$	No es linealizable
Korsun	$v = B_0 (d + 1)^{B_1} h^{B_2}$	$\text{Log } v = \log B_0 + B_1 \log(d + 1) + B_2 \log(h)$

Modelo de Dwigth	$v = B_0 d^{B_1} h^{(3-b)}$	$\text{Log } v = \log B_0 + B_1 \log(d) + (3 - B_1) \log(h)$
De la variable combinada	$v = B_0 (d^2 h)^{B_1}$	$\text{Log } v = \log B_0 + B_1 \log(d^2 h)$
Modelos de Thornber	$v = B_0 \left(\frac{h}{d}\right)^{B_1} d^2 h$	$\text{Log } v = \log B_0 + B_1 \log\left(\frac{h}{d}\right) + \log(d^2 h)$
Variable transformada de Honer	$v = \left(d^2 / \left(B_0 + B_1 \left(\frac{1}{h} \right) \right) \right)$	No es linealizable
Berkhout	$v = B_0 d^{B_1}$	$\text{Log } v = \log B_0 + B_1 \log(d)$
Wenk	$v = g \left(\frac{h^2}{B_0 d^{1/2}} + B_1 d^{1/2} \right)$	No es linealizable

Donde: v = Volumen (m^3); Diámetro normal (m); h = Altura (m); g = Área basal (m^2); B_0, B_1, B_2 = Parámetros de regresión

3.3.4 Ahusamiento

La forma del fuste del árbol generalmente nunca obedece a un patrón o figura geométrica estándar, esta variación en el perfil del árbol, se presenta por la interacción de múltiples factores ya sea de orden biótico (densidad, competencia, espacio, nutrientes etc.), y físico (luminosidad, temperatura, suelo, pendiente, cambios climáticos etc.) esto incide en las diferencias del desarrollo y la forma del árbol las cuales también varían de región a región e incluso entre especies.

Es por ello de la importancia de conocer las fuentes de medición para las estimaciones del perfil del árbol, basado en el diámetro del mismo y su ahusamiento se consideran aspectos clave en la distribución de los productos forestales comerciales por la tanto el cálculo del volumen derivado de las

diferentes secciones del fuste tendrá mayor objetividad con el uso de funciones matemáticas que mejor describan el perfil del fuste.

Parresol (1999) comenta que la estimación del perfil del fuste también sirve para conocer analíticamente la variación en la densidad de la madera con la altura del árbol. Por su parte, Nívar *et al.*, (1998) mencionan que el cálculo de los volúmenes fustales totales ahorra también el uso de diferentes ecuaciones para diferentes secciones del fuste.

Tabla 5.- Modelos de ahusamiento

<i>Modelo</i>	<i>Ecuación</i>
Clutter (1980)	$d = B_1 * D^{B_2} * H^{B_3} * (H - h)^{B_4}$
Amidon (1984)	$d = B_1 \frac{D(H-h)}{(H-1.3)} + B_2 \frac{(H^2 - h^2)(h-1.3)}{H^2}$
Biging (1984)	$d = D \left[B_1 + B_2 \ln \left(\left(1 - \exp \left(\frac{B_1}{B_2} \left(\frac{h}{H} \right)^{1/3} \right) \right) \right) \right]$
Kozak 1 (1988)	$\frac{d}{D_1} = \left[\frac{1 - \sqrt{Z}}{1 - \sqrt{P}} \right]^c$
Kozak 2	$\ln(d) = f \left(\ln(X_k), Z, \ln(Z), \exp^z, \sqrt{Z}, \frac{D}{H} \right)$
Newnham (1992)	$\ln \left(\frac{d}{D} \right) = f \left(X, \ln(X), \frac{D}{H}, \frac{D}{\sqrt{h}}, \frac{H}{\sqrt{h}} \right)$
Rustagi y Loveless (1991)	$d = (B_0 + B_1 * D) \left[\frac{H-h}{H_a} \right]^{B_2}$

3.3.5 Modelos a nivel del rodal

Clutter (1963) y Clutter *et al.*, (1983) proponen las siguientes funciones para la construcción del sistema de ecuaciones para estimar rendimientos maderables para bosques regulares y uninespecíficos:

$$\frac{dAB}{dE} = -\frac{AB \ln(AB)}{E} + c_1 \frac{AB}{E} \quad [9]$$

Procediendo en base a lo propuesto por Clutter (1963), se tiene que el área basal se puede estimar de:

$$\ln(AB_2) = \frac{E_1}{E_2} \ln(AB_1) + c_1 \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) \quad [10]$$

A partir de que c_1 fue estimado de (9), (10) y se ajustó al conjunto de datos disponible:

$$\ln(V) = B_0 + B_1 IS + \frac{B_2}{E} + B_3 \ln(AB) \quad [11]$$

Derivando (11) con respecto al tiempo, se genera la siguiente ecuación:

$$\frac{dV}{dE} = V \left\{ -\frac{B_2}{E^2} + \frac{B_3 \left(\frac{dAB}{dE} \right)}{AB} \right\} \quad [12]$$

De las expresiones anteriores, finalmente se tiene:

$$\ln(V_2) = b_0 + b_1 IS + \frac{b_2}{E_2} + b_3 \frac{E_1}{E_2} \ln(AB_1) + b_4 \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \quad [13]$$

Para la ecuación que estima la sobrevivencia promedio, en el supuesto que la tasa de mortalidad (dNo/dE), se relaciona con la edad promedio del rodal (E), para el índice de sitio promedio, resulta de la siguiente manera Clutter *et al.*, (1983):

$$\frac{\left(\frac{dNo}{dE} \right)}{No} = B_0 \quad [14]$$

Dicha expresión que integrada, con la condición de que $N_2 = N_1$, cuando $E_2 = E_1$, corresponde a la siguiente ecuación de diferencia algebraica clutter *et al.*, (1993):

$$N_2 = N_1 * e^{B_0(\ln(E_2) - \ln(E_1))} \quad [15]$$

Donde:

dAB/dE = tasa instantánea, corriente o anual, del incremento en área basal

AB = área basal

E = edad del rodal

V = existencias volumétricas del rodal

IS = índice de sitio

Hd = altura dominante

dV/dE = tasa instantánea de incremento en volumen

N = numero de árboles por hectáreas

Ln = logaritmo natural del argumento. Los subíndices en AB, E, V y N, de las funciones (2), (5) y (7), indica el inicio y final del periodo de estimación del atributo dasométrico de interés.

3.3.6 La Clasificación de Rodales o Plantaciones por nivel de Productividad.

La mayoría de los modelos de crecimiento deben de ser clasificados por nivel de productividad. La productividad es la tasa de almacenamiento de materia orgánica por unidad de tiempo, por unidad de superficie. Existen rodales en donde esta tasa es mayor para una especie o un grupo de especies dados. La productividad medida por métodos directos es difícil para el manejo y

por esta razón, se utiliza la relación altura de los árboles dominantes en función de la edad como un método indirecto. Se ajusta una función y se derivan un grupo de funciones para determinar los diferentes niveles de productividad. Las funciones pueden adquirir múltiples formas (polimórficas) o solo una forma común (anamórficas). Las diferentes funciones sigmoidales que se han ajustado son; a) Chapman-Richards, b) Schumacher, c) Logístico, etc.

3.3.7 Distribución Weibull

La mayoría de los modelos de crecimiento no proveen información sobre la distribución de las dimensiones de los árboles, donde las clases diamétricas son de interés especial Nívar *et al.*, (1996); Nívar y Contreras, (2000). Es por ello que los modelos basados en la distribución Weibull requieren de técnicas eficientes con el propósito de determinar los parámetros que definan la distribución de diámetros dentro de una masa forestal Corral (1999).

Bailey y Dell (1973) publican que los primeros trabajos relacionados con modelos de distribución diamétrica fueron inicialmente propuestos y estudiados por Liocurt en 1988, los cuales se basaban en una progresión geométrica para describir rodales irregulares. Estos mismos autores recomiendan el uso de la distribución Weibull para caracterizar rodales por clase diamétrica debido a que presenta flexibilidad y simplicidad en la manipulación matemática (por ejemplo diferentes formas que van desde la J- invertida hasta la forma de campana).

Desde la época de Liocurt a la fecha se han realizado y descrito diversos trabajos relacionados con las distribuciones diamétricas en rodales forestales utilizando para ello, diferentes procedimientos en la estimación de parámetros de la distribución Weibull. Cohoen (1965), Harter y Moore (1965), Návar y Contreras (2000) y Návar y Corral (2000) proporcionan alternativas para la solución en la estimación de parámetros de la distribución Weibull utilizando el principio de máxima verosimilitud, como ha sido demostrado por los dos últimos autores quienes argumentan que mediante este procedimiento se presentan una mínima varianza y consistencia en los estimadores en rodales con especies nativas de la Sierra Madre Occidental en Durango.

3.3.8 Antecedentes de funciones de crecimiento desarrolladas para bosques de coníferas en México.

Contreras (1997) desarrolló modelos de predicción de parámetros dasométricos que sirvan como herramientas base para el establecimiento de criterios en los Programas de Manejo Forestal Sostenible. Además, probó y ajustó ocho modelos matemáticos de volumen a las diferentes secciones de las especies *Pinus duranguensis* y *Pinus teocote*. Este mismo autor analizó cuatro modelos de ahusamiento para las mismas especies a fin de determinar su bondad de ajuste.

En estudio realizado por Valdéz (2003) para predecir rendimiento en bosques de *Pinus duranguensis* en el estado de Durango utilizó los modelos de Chapman-Richards, Weibull y Shumacher, en donde destaca que para estimar la altura el modelo que resultó ser mejor de acuerdo a los criterios de bondad de ajuste fue el de Chapman-Richards y para la estimación del diámetro normal el de Shumacher. Este mismo autor empleó estas mismas funciones mediante el método de la diferencia algebraica para desarrollar curvas de índice de sitio para *Pinus duranguensis* en el estado de Durango.

Bajo ese mismo esquema Corral (1999) desarrolló modelos de crecimiento para bosques mixtos e irregulares de Durango donde también determinó que la función de Chapman-Richards arrojó los mejores parámetros de predicción en relación a la altura y el volumen en cambio la función Weibull resultó ser la mejor para predecir el incremento en diámetro para cinco especies estudiadas en la región del Salto, Durango.

Maldonado (2001) analizó y evaluó plantaciones forestales a través de modelos de incremento y rendimiento en la región del Salto P. N. del estado de Durango, México.

Vargas (1999) generó una metodología para caracterizar la productividad y estructura de *Pinus hartwegii* Lindl. mediante el apoyo de modelos matemáticos

para representar el crecimiento promedio de distintos parámetros desométricos de la especie.

Navarro *et al.*, (2000) utilizaron diferentes modelos para predecir el volumen de fuste para árboles de *Pinus cembriodes* Zucc. y de esa forma determinar la función más apropiada para la relación entre el volumen y la altura total y el diámetro normal de esta especie.

González (1999) realizó un estudio enfocado a los patrones de dinámica de un ecosistema multicohortal de *Pinus culminicola* y *P. Hartwegii* en diferentes gradientes altitudinales en la Sierra Madre Oriental. Quien además probó diversos modelos matemáticos con la relación de distintas variables (regeneración-cobertura, cobertura-altura y diámetro-altura); para observar cual modelos se ajustaba mejor a la dispersión de los datos.

González y Flores (1999) presentan el trabajo de la comparación de seis modelos de crecimiento no lineales para determinar la calidad de índices de sitio en regeneración de bosques de *Pinus rudis* Endl. en el municipio de Galeana Nuevo, León. Concluyendo finalmente que el modelo de Chapman-Richards resulta ser el modelo más apropiado para esta región.

Los modelos matemáticos tienen una gran variedad de funciones en el ámbito forestal como lo expone González (2002) quien utilizó estas funciones

para desarrollar y ajustar ecuaciones matemáticas para estimar biomasa aérea y la tasa de rendimiento e incremento en biomasa como base en la evaluación del carbono almacenado y su tasa de captura en plantaciones del genero *Pinus* en la región del salto P. N. Durango.

La tasa de captura de carbono se estima a partir de la tabla de producción o de un modelo de rendimiento e incremento Moren y Klein Goldewikjt (1990); Brown (1997). El modelo CO2-fix se encuentra disponible para este propósito y se esta utilizando como la tecnología estandarizada para determinar los almacenes y tasas de secuestro de carbono por la vegetación nativa. A pesar de que el modelo presenta problemas de precisión, continúa ganando popularidad entre usuarios en el mundo.

CAPITULO 4

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización del área de estudio.

El área donde se realizaron las plantaciones es un campo experimental denominado bosque-escuela perteneciente a la Facultad de Ciencias Forestales de la U.A.N.L. El terreno se ubica cerca del pueblo de Santa Rosa en el municipio de Iturbide, Nuevo León a 40 km al suroeste de Linares entre las coordenadas geográficas 24° 43' 00" Latitud Norte 99° 52' 00" Longitud Oeste figura 1. El terreno tiene una superficie de 550 ha con una altitud que oscila desde los 1200 hasta 1900 m.s.n.m., enclavado en la Sierra Madre Oriental, la cual se extiende desde el nordeste de México hasta el altiplano central del país. La precipitación promedio anual del área es de 600 mm y se presenta principalmente durante dos periodos (mayo-junio y septiembre-julio), con una estación interestival seca, denominada canícula. La precipitación presenta una gran variación anual, del orden de 240 mm como desviación estándar. Los inviernos son secos, con la presencia de tormentas y ondas frías ocasionales del norte. La temperatura promedio anual es aproximadamente de 17°C, con

temperaturas que pueden llegar hasta los 30°C en el verano y bajo 0°C en el invierno.

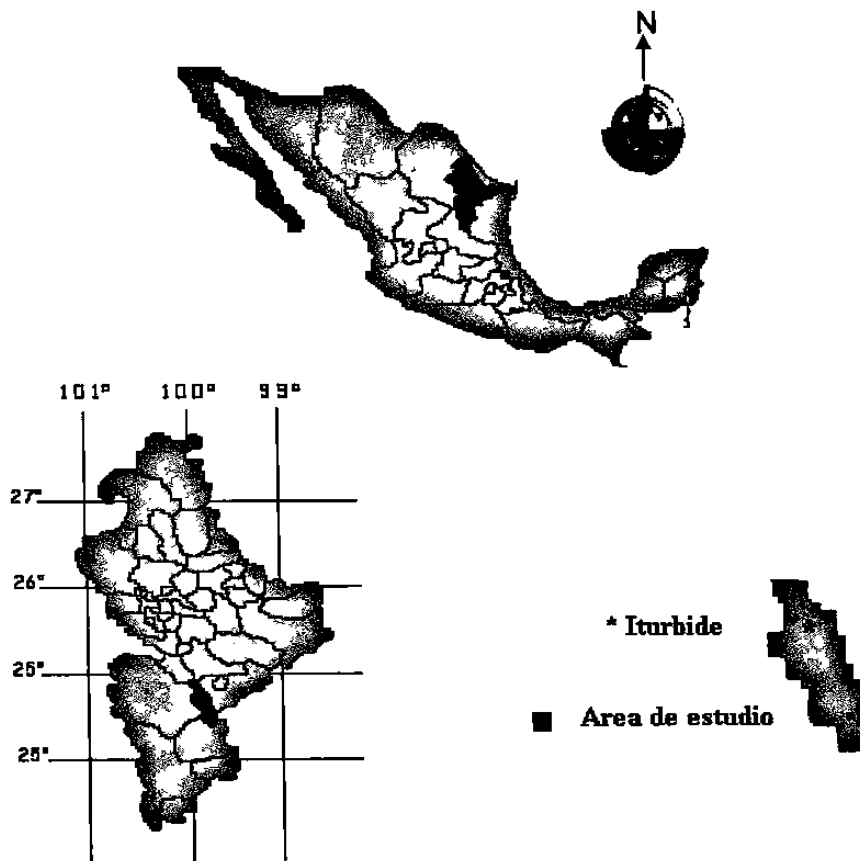


Figura 1.- Localización del área de estudio

La geología de esta área, consiste en lutitas y calizas de Cretácico superior, junto con depósitos sedimentarios recientes. Eflorescencias del Jurásico y del Cretácico inferior se encuentran en las laderas de los alrededores. La topografía es muy accidentada, con pendientes generalmente de 30-70% y con crestas de caliza con pendientes menores. Los suelos son

delgados con una gran variación en cuanto a los colores y fertilidad, afectados por su relación con la pendiente, la exposición, la vegetación y la geología. Las áreas de caliza tienen suelos oscuros de arcilla arriba de la roca maciza, más profundos en las pendientes al norte y en los cañones. Las lutitas son más frágiles: muchas de las pendientes abruptas y las trincheras del camino muestran suelos muy erosionados, con los perfiles y los horizontes poco desarrollados, pero con una alta penetrabilidad por las raíces. Se muestran grandes pérdidas de suelo y movimiento de piedras sueltas Woerner (1990).

4.2 Metodología.

El estudio se realizó en un sector del bosque escuela denominado "La Loma", y un segundo sitio denominado "Las Adjuntas" ambos dentro del campo experimental bosque-escuela propiedad de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León dónde a principios del año 1983 se inició a despejar y limpiar el área de restos de vegetación típica de esa zona como son bosques de pino-encino, así como otras especies *Juniperus* spp. y arbustos (matorral). El terreno fue preparado 4 meses antes de llevarse a cabo la plantación, lo cual consistió en el trazado y la apertura de cepas de 20 cm de ancho y 40 cm de profundidad. Se removió el suelo duro, cubriéndose inmediatamente después la cepa para mantener la humedad del suelo hasta dar inicio la plantación. Esta se llevó a cabo durante los meses de junio a septiembre de 1983. El material de plantación, plántulas, utilizado en la presente investigación fue adquirido en el municipio de Galena, Nuevo León

derivado de programas gubernamentales (IMSS-Coplamar) que en esa época eran patrocinados por el Gobierno Federal para la creación de viveros forestales en todo el país.

4.3 Diseño experimental.

El diseño experimental utilizado fue un arreglo de parcelas completamente al azar para las dos plantaciones, tomando las tres especies *Pinus cembriodes*, *Pinus pincheana* y *Pinus nelsonii* como tratamientos con tres repeticiones para cada una de ellas repartidas en tres bloques, cada bloque consta de seis parcelas acumulando un total de 18 parcelas en cada plantación. En cada parcela se plantaron 49 plantas a un espaciamiento de 1 m x 1 m. Los parámetros evaluados fueron sobrevivencia, (%) altura (cm) y diámetro basal (cm). Estos parámetros se registraron semestralmente durante los años (1983, 1984, 1985, 1986, 1987 y 2002) y se analizaron mediante análisis de varianza, con comparaciones de medias mediante pruebas de Tukey. Las fuentes de variación importantes fueron: las especies (3), los bloques (3) y los sitios (2).

4.4 Características de los pinos piñoneros

En la republica mexicana existe una gran variedad de especies de pinos piñoneros, como lo han expuesto en diferentes trabajos de Passini (1982), y Bailey y Hawksworth (1979, 1983 y 1987) (citados por Benavides, 1989). En especial, el Desierto Chihuahuense presenta un gran número de especies entre

las cuales destacan *Pinus cembroides*, *P. discolor*, *P. pinceana* y *P. nelsonii* Bailey y Hawksworth (1983).

Los pinos piñoneros presentan una serie de características (biológicas, morfológicas y fisiológicas) que los hacen interesantes para su posible utilización en los programas restauración en áreas áridas, degradadas y en proyectos de dasonomía urbana de las ciudades, en especial, las ubicadas en el centro y norte del país.

Entre las características más importantes se tienen:

a).- Los bosques de pinos piñoneros se encuentran generalmente en climas semiáridos y viven frecuentemente en colindancia con pastizales, matorrales xerófilos o encinares arbustivos formando amplias ecotonías con estas comunidades vegetales Rzedowski (1978).

En el caso de *P. cembroides*, los bosques de esta especie se localizan principalmente en los lugares con una precipitación de 300 a 700 mm anuales y una temperatura media anual que oscila entre 12°. Y 18° Rzedowski (1978); Passini (1982).

b).- Las especies piñoneras presentan tasas bajas de transpiración, debido principalmente a las condiciones climáticas en que suelen desarrollarse.

c).- Mantenimiento de altos potenciales de agua. Benavides y García (1987) registraron el potencial hídrico de *P. cembroides* y *P. discolor* bajo condiciones de campo, el cual nunca rebasó -1.3 y -1.1 Mpa, respectivamente.

d).- Especies de lento crecimiento y baja altura. Los pinos piñoneros se han reportado como especies de lento crecimiento Little (1986); Gottfried (1986) (citados por Benavides, 1989), aunque estas características pueden estar en función principalmente de las condiciones ecológicas en que se desarrollan, pero, es muy probable que aún bajo condiciones más favorables los árboles presenten este hábito de crecimiento Benavides (1989).

4.5 Descripción del bosque de pinos piñoneros

El bosque de *Pinus cembroides* en Galeana, N. L. se distribuye principalmente en las áreas más secas, formando ecotonías con otros tipos de vegetación: bosque de *Pinus arizonica*, bosques de *P. Pseudostrobus* y *P. teocote*. En otras áreas, forma también ecotonía con vegetación más típica del altiplano (matorrales y yucas, cactáceas etc.). Se caracteriza por el elevado grado de disturbio que sufren las áreas donde se distribuye. Es frecuente observarlo en las partes bajas de los cerros, disminuyendo su presencia hacia las partes altas, donde puede o no continuarse hacia el otro lado de la cresta Vallejo (1997).

4.6 Hábitat y distribución

4.6.1 *Pinus cembroides*

En México, *Pinus cembroides* es la especie del grupo de los piñoneros más ampliamente repartida, pues sus área de distribución geográfica conocida, se extiende por casi todo el norte y centro del país. Ocupa casi siempre zonas de transición entre la vegetación xerófila de climas áridos y la boscosa de las montañas más húmedas. Sus límites altitudinales conocidos son 1500 y 3000 msnm y los de precipitación media anual oscilan entre 350 y 700 mm. En general forman un bosque bajo y abierto Rzedowski (1978). *P. cembroides* se presenta en toda clase de rocas: calcáreas y con alto contenido de yeso e ígneas, tiene gran potencial adaptativo y de resistencia en condiciones climáticas difíciles Passini (1977).

Flores Olvera (1983) menciona que para el estado de Nuevo León *P. cembroides* se localiza en las partes bajas de las laderas de exposición oeste de la Sierra Madre Oriental, particularmente en las zonas con mayor incidencia de radiación solar. El mismo autor reporta que el límite inferior de su distribución en este estado es de 1700 msnm y el superior de 2600 msnm.

4.6.2 *Pinus pinceana*

Es una especie que crece en cañones secos formando masas puras abiertas, a veces en manchones pequeños; también se le ve asociado con otras especies propias de los matorrales desérticos con *Juniperus* sp, *P. cembroides* y *P. nelsonii*. Es una especie que prospera en suelos calizos, pedregosos, muy delgados y pobres en materia orgánica, en laderas montañosas y lomeríos Martínez (1948). La temperatura media anual oscila entre los 17 a los 20°C con una precipitación que fluctúa entre los 300 y los 800 mm anuales Eguiluz (1978).

4.6.5 *Pinus nelsonii*

Pinus nelsonii, se encuentra reportado para los estados de Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas Perry (1991). Suzan (1987) la define como una especie de distribución restringida al nordeste del país, muy poco estudiada y que presenta una producción anual de semillas, característica poco común en la mayoría de las especies de piñoneros. La testa de la semilla es muy dura, por lo que se ha visto que la incidencia de ataques de insectos es menor que en otras especies. Su almendra es de color blanco y sabor agradable, y tiene un porcentaje de proteínas similar al de *P. cembroides* pero una mayor proporción de fibras, que lo hacen atractivo nutricionalmente. Estas propiedades de la semilla y su alta capacidad de sobrevivir en zonas semiáridas y frías (la altitud promedio es de 2000 msnm). Además de ser la especie piñonera que ocupa el segundo lugar como productor nacional de piñón,

presenta características ecológicas importantes, como distribución endémica al noreste del país; disposición espacial y densidad dependiente del efecto de laderas; patrones de correlación muy fuerte entre algunas variables alométricas; producción de semillas más uniforme que otros pinos y una fenología similar a la de otros piñoneros. Llega a ser dominante en muchas localidades y puede llegar a formar rodales monoespecíficos. Catalogada en la ECOL-NOM-059-2001 como especie en peligro de extinción hacen que sea objeto de más investigaciones en todos los niveles de su población.

Tabla 6.- Distribución de las tres especies estudiadas en el presente trabajo.

Especie	Distribución	
<i>Pinus cembriodes</i> Zucc.	Aguascalientes Baja California Sur Baja California Norte Chihuahua Coahuila Durango Guanajuato Hidalgo Jalisco	México Nuevo León Puebla Querétaro San Luis Potosí Sonora Tamaulipas Veracruz Zacatecas
<i>Pinus nelsonii</i> Shaw	Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas	
<i>Pinus pinceana</i> Gordon	Coahuila, Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, San Luis Potosí Tamaulipas	

Fuente: Bailey y Hawksworth (1987) citado por Vallejo (1997).

4.7 ESTIMACION DEL VOLUMEN DE ÁRBOLES INDIVIDUALES

Procedimiento para la estimación del volumen fustal

Los diferentes procedimientos para evaluar el volumen de un árbol o un conjunto de árboles resultan en diferentes estimadores del volumen. Sin embargo, comparaciones que se han realizado con muestras de árboles, Corral (1999) observó que los procedimientos convencionales de Smalian, Huber y Newton resultan en estimadores estadísticamente similares. El procedimiento para estimar el volumen del árbol se realizó mediante las mediciones directas del diámetro en diferentes secciones de la altura total del fuste de cada especie evaluada. Desde la base del mismo, 0.5, 1.0, 1.3, 1.5, 2.0,.....,H total. Con los datos obtenidos se genera una tabla con las variables dasométricas (volumen estimada por Smalian, diámetro basal y la altura). La cubicación de cada sección del árbol para calcular el volumen, se realizó por medio de la ecuación de Smalian aplicada a cada una de las secciones del fuste y la sumatoria de cada uno de los volúmenes seccionales resulta en el volumen fustal total. El volumen puede ser con o sin corteza.

La ecuación utilizada esta descrita por:

$$\text{Smalian (1804)} \quad V = \frac{(A_1 + A_2)}{2} * L \quad [16]$$

Donde V = Volumen de la troza (m^3); A_1, A_2 = Área basal promedio al inicio y final de la troza (m^2); L = Longitud de la troza (m).

En las Tablas 3 y 4 Capítulo 3.3.3 se definen las diferentes ecuaciones para estimar el volumen fustal a partir del diámetro basal y la altura total. Se empleó la técnica de cuadrados mínimos en regresión lineal simple, polinomial, múltiple y no lineal. Como los datos de volumen o biomasa poseen las características de varianza heterogénea (heterocedasticidad) Parresol (1999), los modelos lineales se ponderaron por medio de la determinación de ecuaciones que describieron la estructura del error, posteriormente se ajustaron las ecuaciones ponderadas, utilizando la ecuación que describe la estructura del error como parámetro de ponderación; a partir de las cuales se realizó el cálculo de los parámetros estadísticos empleando la técnica de cuadrados mínimos en regresión lineal y no lineal.

4.7.1 Modelos de crecimiento

Se aplicaron los modelos de crecimiento no lineales para árboles individuales mostrados en la (tabla 1) para estimar volumen, diámetro y altura dependiendo de la edad

Procedimiento para el ajuste de parámetros estadísticos de las ecuaciones de crecimiento.

Los datos de volumen, diámetro y altura estimados para el promedio de las edades reportadas (1983, 1984, 1985, 1986, 1987 y 2002) además de datos de árboles de *P. cembroides* sobremaduros de la región de Pabillo, N.L. fueron utilizados en la derivación de las curvas.

4.7.2 Estimación y predicción de parámetros de la distribución Weibull

El ajuste y estimación de parámetros de la distribución Weibull resulta importante para predecir y modelar la descripción de las estructuras diamétricas así como el crecimiento de un rodal. A partir de estos atributos dasométricos el manejo forestal requiere de tales proyecciones y estimaciones como base para la toma de decisiones en el manejo del recurso forestal de mediano y largo plazo.

La función probabilística Weibull de tres parámetros como función de densidad probabilística (pdf) se define con la siguiente ecuación matemática:

$$P_x(X) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{X - \varepsilon}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{X - \varepsilon}{\beta}\right)^\alpha} \quad [17]$$

y como función de densidad de probabilidad acumulada (cdp)

$$P(x \leq X) = 1 - e^{-\left(\frac{x - \varepsilon}{\beta}\right)^\alpha} \quad [18]$$

Donde $p_X(x)$ = probabilidad de la variable aleatoria x , β y ϵ son los parámetros de forma, escala y posición respectivamente.

Procedimiento

Návar y Contreras (2000), Návar y Corral (2000) desarrollaron y elaboraron programas computacionales ex profeso utilizando el paquete estadístico SAS quienes se basan en las estructuras diamétricas para la estimación de los parámetros y de esa forma ajustarlos a las Distribuciones Probabilísticas Weibull. Mismo procedimiento fue utilizado en la predicción de parámetros Weibull en el presente estudio.

4.8 DENSIDAD

4.8.1 Factor de competencia de copas (FCC)

Procedimiento

Para este propósito se evaluaron un total de 25 árboles muestra de cada especie plantada (*Pinus cembroides*, *P. pincena* y *P. nelsonii*) la información registrada de cada individuo consistió en la medición de la proyección horizontal de la copa del árbol (diámetro de copa) norte sur y este oeste, diámetro (basal) y altura total del árbol. Las plantas fueron establecidas con espaciamiento de 1 m x 1 m (10000 árboles /ha⁻¹), donde se asume que ha medida que avanza el

tiempo la competencia de los individuos por espacio aéreo cada vez es más fuerte.

Bajo ese esquema se define la relación funcional existente entre el diámetro de copa (dc) y el diámetro normal (dn) (para este caso en la base) en árboles que han crecido con interferencia de copas a partir de los 15 años de edad en las tres especies de pinos piñoneros (20 años edad de la plantación) donde la ecuación se define de la siguiente forma:

$$dc = B_0 + B_1 d \quad [19]$$

$$ac = \left(\frac{\pi}{4}\right)(dc)^2 \quad [20]$$

$$ac = \left(\frac{\pi}{4}\right)(B_0 + B_1 d)^2 \quad [21]$$

$$mc = \left(\frac{\pi}{4}\right)(B_0 + B_1 d)^2 / 100 \quad [22]$$

Donde:

dc = diámetro de copa (m)

d = diámetro basal (cm)

ac = área de copa (m^2)

amc = área máxima de copa (m^2)

B_0 B_1 = parámetros de la regresión

4.9 Modelos de Incremento y Rendimiento a nivel del rodal

Procedimiento

Clutter (1963) y Clutter *et al.*, (1983) proponen las siguientes funciones para la construcción del sistema de ecuaciones para estimar rendimientos maderables para bosques regulares y uinespecíficos. La misma metodología descrita por Clutter fue aplicada para estimar los rendimientos maderables en las plantaciones de pinos piñoneros del presente estudio y se sintetiza partiendo como base con la siguiente ecuación:

$$\frac{dAB}{dE} = -\frac{AB \ln(AB)}{E} + c_1 \frac{AB}{E} \quad [23]$$

Procediendo en base a lo propuesto por Clutter (1963), se tiene que para estimar el área basal de la masa arbórea plantada, esta se realizó de acuerdo a la función que a continuación se presenta:

$$\ln(AB_2) = \frac{E_1}{E_2} \ln(AB_1) + c_1 \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \quad [24]$$

Después de que c_1 es estimada de las ecuaciones (23), (24) y se procedió a ajustarla al conjunto de datos registrados en las mediciones de campo:

$$\ln(V) = B_0 + B_1 IS + \frac{B_2}{E} + B_3 \ln(AB) \quad [25]$$

Posteriormente derivando la ecuación (25) en función de la edad, se consigue generar la siguiente ecuación:

$$\frac{dV}{dE} = V \left\{ -\frac{B_2}{E^2} + \frac{B_3 \left(\frac{dAB}{dE} \right)}{AB} \right\} \quad [26]$$

Y en base a las expresiones anteriores, finalmente se tiene:

$$\ln(V_2) = b_0 + b_1 IS + \frac{b_2}{E_2} + b_3 \frac{E_1}{E_2} \ln(AB_1) + b_4 \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \quad [27]$$

Para la ecuación que estima la sobrevivencia promedio, en el entendimiento que la tasa de mortalidad (dNo/dE), generalmente se relaciona con la edad promedio de la plantación (E), donde se asume como proceso fundamental para estimar el índice de sitio promedio de los sitios plantados, para ello, se utilizó la siguiente ecuación propuesta por Clutter *et al.*, (1983):

$$\frac{\left(\frac{dNo}{dE} \right)}{No} = B_0 \quad [28]$$

Dicha expresión que integrada, con la condición de que $N_2 = N_1$, cuando $E_2 = E_1$, corresponde a la siguiente ecuación de diferencia algebraica clutter *et al.*, (1993):

$$N_2 = N_1 * e^{B_0(\ln(E_2) - \ln(E_1))} \quad [29]$$

Donde:

dAB/dE = tasa instantánea, corriente o anual, del incremento en área basal

AB = área basal

E = edad del rodal

V = existencias volumétricas del rodal

IS = índice de sitio

Hd = altura dominante

dV/dE = tasa instantánea de incremento en volumen

N = numero de árboles por hectáreas

Ln = logaritmo natural del argumento

Los subíndices en AB, E, V y N, de las funciones (2), (5) y (7), indican el inicio y final del período de estimación del atributo dasométrico de interés.

4.10 ESTIMACION DE BIOMASA (CARBONO)

Procedimiento

149397

Las proyecciones del incremento y rendimiento por medio del modelo de Clutter (1963) y Clutter *et al.*, (1983) para el volumen fustal sirvieron de entrada para derivar la biomasa del fuste al nivel del rodal. Con la biomasa del fuste, se derivó la biomasa de las ramas siguiendo la metodología propuesta por Gonzalez-Barrientos (2001) para plantaciones forestales de Durango, México. Con la biomasa aérea total, se utilizó un factor de conversión a carbono almacenado en el compartimiento aéreo.

CAPITULO 5

RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Volumen Fustal

5.1.1 Ecuaciones lineales

Los resultados de los modelos lineales probados para estimar volumen de árboles individuales demuestra que el análisis estadístico evidencía claramente que el modelo de coeficiente mórfico constante (1) resulta ser el mejor en razón a los criterios de bondad de ajuste (R^2 y valor de F). De acuerdo a lo anterior se observa que el modelo (1) para la estimación de volumen en árboles individuales nos arroja un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.99$ y un valor de $F = 2343.4$ para la especie de *Pinus cembroides*, los estadísticos fueron $R^2 = 0.98$ y $F = 1154.8$, para *P. pinceana* y $R^2 = 0.98$ y $F = 1473.4$ y para *P. nelsoni*. Los modelos que registraron valores intermedios de acuerdo a los criterios de valoración mencionados anteriormente son (el modelo Comprensible, De Naslund y Takata). Los modelos que reportaron los estadísticos más bajos con coeficientes de determinación menores al 80% de la variación total explicada son los modelos de la Variable combinada, Meyer modificada y Australiana.

Una desventaja del modelo mórfico constante es que no posee una intercepta y aunque el modelo de volumen originalmente debe salir del origen, sesga los volúmenes observados de los árboles de menores dimensiones. Cabe mencionar, que las ecuaciones descritas en el Tabla 7 fueron ponderadas con el propósito de reducir o eliminar los problemas de varianza heterogénea, heterocedasticidad, a que están sometidos los datos de volumen y biomasa (Clutter *et al.*, 1983). El procedimiento de compresión de la varianza heterogénea resulta de la modelación del error por la(s) variable(s) independiente(s). En general, la(s) variable(s) independiente(s) explica(ron) parte de la varianza del error, con coeficientes de determinación de hasta 0.4.

Tabla 7.- Estadísticos de ajuste de las ecuaciones ponderadas linealizadas para estimar volúmenes de árboles individuales de tres especies de piñoneros plantados en Iturbide, N.L., México.

Modelo	Ecuación	<i>Pinus cembroides</i>	
		R ²	F
De coef. mórfico const.	$V = 0.00002445 \cdot (d^2 h)$	.99	2343.4
De la variable comb.	$V = (0.00132 + 0.00002180) \cdot (d^2 h)$	.89	195.44
Var. comb. genda.	$V = 0.00615 + (-0.00005453) \cdot (d^2) + (-0.00097597) \cdot (h) + 0.00003310 \cdot (d^2 h)$	.82	31.72
Australiana	$V = -0.00756 + 0.00081906 \cdot (d^2) + 0.00136 \cdot (h) + 0.00000947 \cdot (d^2 h)$	.87	48.0
Meyer modificada	$V = -0.00564 + 0.00061409 \cdot (d) + 0.00025016 \cdot (d) \cdot (h) + (-0.0000016) \cdot (d^2 h)$	.87	50.18
Comprensible	$V = -0.00907 + 0.00209 \cdot (d) + (-0.00000014215) \cdot (dh) + (-0.00012173) \cdot (d^2) + 0.00040291 \cdot (h) + 0.00002133 \cdot (d^2 h)$	.94	56.66
De Naslund	$V = -0.00449 + 0.00002447 \cdot (d^2 h) + 0.00177 \cdot (h) + (-0.00001930) \cdot (dh^2)$	.93	97.38
De takata	$V = (d^2 h) / (-1610.24268 + 45940) \cdot (d)$	.68	48.82
		<i>Pinus pinceana</i>	
De coef. mórfico const.	$V = 0.00002351 \cdot (d^2 h)$	.98	1154.8
De la variable comb.	$V = (0.00146 + 0.00002105) \cdot (d^2 h)$	.86	142.73
Var. comb. genda.	$V = -0.00839 + (0.0000000111) \cdot (d^2) + 0.00218 \cdot (h) + 0.00001784 \cdot (d^2 h)$	.90	65.68
Australiana	$V = -0.02060 + 0.00197 \cdot (d^2) + 0.00331 \cdot (h) + (-0.00000802) \cdot (d^2 h)$	.87	48.28

Meyer modificada	$V = -0.00807 + 0.00064271*(d) + 0.000433055*(d)*(h) - 0.00001638*(d^2h)$	.86	43.91
Comprensible	$V = 0.02636 + 0.00915*(d) + 0.00244*(dh) + 0.00064714*(d^2) - 0.00704*(h) - 0.00014964*(d^2h)$	.95	90.71
De Naslund	$V = -0.00304 + 0.00001335*(d^2h) + 0.001009*(h) + 0.00000952*(dh^2)$	.87	50.72
De takata	$V = (d^2h)/(29273 + 1277.23839)*(d)$	.52	25.54
		Pinus nelsonii	
De coef. mórfico const.	$V = 0.00002343*(d^2h)$	.98	1473.4
De la variable comb.	$V = (0.0006673 + 0.00002065)*(d^2h)$	.88	174.95
Var. comb. genda.	$V = 0.00244 + (-0.00013110)*(d^2) + 0.00037144*(h) + 0.00005290*(d^2h)$	.92	84.80
Australiana	$V = -0.00283 - 0.00015045*(d^2) + 0.00115*(h) - 0.0000017*(d^2h)$	.88	56.23
Meyer modificada	$V = -0.00048808 - 0.00051134*(d) + 0.00026262*(d)*(h) - 0.00000733*(d^2h)$	.90	62.82
Comprensible	$V = 0.00350 - 0.00009820*(d) + 0.00044142*(dh) + 0.00012083*(d^2) - 0.00195*(h) + 0.00001723*(d^2h)$	.94	64.0
De Naslund	$V = -0.00449 + 0.00002547*(d^2h) + 0.00177*(h) - 0.00001930*(dh^2)$	.92	77.89
De takata	$V = (d^2h)/(27913 + 1934.86865)*(d)$	.26	8.27

5.1.2 Ecuaciones no lineales

Los estadísticos promedio de ajuste de los 8 modelos no lineales probados para estimar volumen de árboles individuales se presentan en la Tabla 8. Se muestra que el modelo de Schumacher (1), modelo de Dwigth (4) y modelo de Thornber (6) poseen estadísticos de ajuste muy similares en la predicción del volumen fustal. Para la especie *Pinus cembroides* el modelo de Schumacher tuvo el mayor coeficiente de determinación de $R^2 = 93.1$, mientras que los otros dos modelos Dwigth y Thornber presentaron un $R^2 = 92.7$. El error estándar de los tres modelos fue de .0008 para la especie descrita, con un coeficiente de variación de 10.4% para la función de Shumacher y 10.5% para los otros dos modelos. Para las especies *Pinus pinceana* y *P. nelsonii* los estadísticos fueron similares con los tres funciones descritas anteriormente $R^2 =$

93.6, 94.4 error estándar = .0009, .0004 y coeficiente de variación de 12.3% considerando los tres modelos mencionados, excepto para *Pinus nelsonii* con un coeficiente de variación de 12.6% con el modelo de Schumacher.

Tabla 8.- Estadísticos de ajuste de las ecuaciones ponderadas no lineales para estimar volúmenes de árboles individuales

<i>Pinus cembroides</i>				
MODELO	ECUACIÓN	R ²	Sx	C.V.
Schumacher	$V = .000048(d)^{1.568860}(h)^{1.203929}$	93.1	.0008	10.4
Log. Con intercepta.	$V = -.124012 + .099030(d)^{.099030}(h)^{.054701}$	72.4	.0009	10.9
Korsun	$V = .000037(d+1)^{1.054944}(h)^{2.004624}$	82.4	.001	16.3
Dewigh	$V = .000031(d)^{1.715866}(h)^{(3-1.715866)}$	92.7	.0008	10.5
V. combinada	$V = .000027(d^2h)^{.956493}$	91.3	.0009	11.5
Thornber	$V = .000031(h/d)^{.284134}(d^2h)$	92.7	.0008	10.5
Honer	$V = (d^2)/(981.7011 + 981.7011)(1/h)$	49.2	.0022	27.7
Berkhout	$V = .000353(d)^{1.433565}$	65.1	.0018	23.0
Wenk	$V = g(h^2/5895139(d)^{1/2} + (.181988(d)^{1/2}))$	73.8	.0016	19.9
<i>Pinus pinceana</i>				
Schumacher	$V = .000034(d)^{1.47971}(h)^{1.519586}$	93.6	.0009	15.1
Log. Con intercepta.	$V = -.101782 + .081559(d)^{.081559}(h)^{.085169}$	89.0	.0022	35.1
Korsun	$V = .000018(d+1)^{1.671090}(h)^{1.534422}$	93.2	.0010	15.8
Dewigh	$V = .000034(d)^{1.479299}(h)^{(3-1.479299)}$	93.6	.0009	15.1
V. combinada	$V = .000018(d^2h)^{1.214233}$	90.2	.0012	19.4
Thornber	$V = .000034(h/d)^{.520701}(d^2h)$	93.6	.0009	15.1
Honer	$V = (d^2)/(843.3962 + 8433962)(1/h)$	79.8	.0023	35.6
Berkhout	$V = .000286(d)^{1.548212}$	88.6	.0019	30.7
Wenk	$V = g(h^2/62.27180(d)^{1/2} + (.007530(d)^{1/2}))$	72.0	.0010	16.2
<i>Pinus nelsonii</i>				
Schumacher	$V = .000028(d)^{1.559598}(h)^{1.520961}$	94.4	.0004	12.6
Log. Con intercepta.	$V = -.073746 + .066928(d)^{.066928}(h)^{.020239}$	88.6	.0005	16.5
Korsun	$V = .000016(d+1)^{1.719808}(h)^{1.495654}$	94.2	.0004	12.9
Dewigh	$V = .000031(d)^{1.562031}(h)^{(3-1.562031)}$	94.4	.0004	12.3
V. combinada	$V = .000024(d^2h)^{1.028493}$	90.7	.0005	15.2
Thornber	$V = .000031(h/d)^{.437969}(d^2h)$	94.4	.0004	12.3
Honer	$V = (d^2)/(1304.851 + 1304.85)(1/h)$	68.8	.0007	21.8
Berkhout	$V = .000141(d)^{1.806993}$	76.9	.0005	16.4
Wenk	$V = g(h^2/8529036(d)^{1/2} + (.121774(d)^{1/2}))$	93.5	.0008	25.7

5.1.3 Comparación de Ecuaciones lineales y Ecuaciones no lineales

En total se probaron 18 ecuaciones para estimar volumen de árboles individuales en las primeras etapas de desarrollo de las tres especies de pioneros, de los cuales la mitad eran funciones lineales (Tabla 7) la otra parte corresponde a funciones no lineales (Tabla 8). Los resultados obtenidos entre estos dos tipos de modelos nos indica que la ecuación lineal de coeficiente mórfo constante resultó tener el mejor ajuste con un coeficiente de determinación (R^2) con rangos de 99 a 98 entre las tres especies plantadas de los 18 modelos probados, comparado con los valores generados por los modelos no lineales que sus coeficientes de determinación más altos oscilan entre 92 a 94 presentados por las funciones Schumacher, Dwigth y Thornber como segunda opción para ser utilizados en la estimación de volúmenes de árboles individuales.

5.2 Crecimiento

Diámetro basal, altura total y volumen fustal. Los resultados del ajuste de los modelos de crecimiento probados para estimación del volumen, diámetro basal y altura total en función de la edad se presentan en la (tabla 9) para *P. cembroides* creciendo en su hábitat natural. Se observa una similitud en los estadísticos de ajuste entre modelos y parámetros dasométricos. En general, tres funciones de crecimiento (Chapman-Richards, Gompertz y Sloboda) tuvieron los mejores estadísticos de ajuste para esta especie y para las tres

variables dasométricas. Cuando se graficaron estos modelos para la estimación de los incrementos corriente y medio anual (ICA e IMA, respectivamente), el modelo que presentó mayor consistencia fue el de Chapman-Richards. Los otros modelos mostraron tendencias incongruentes en los parámetros dasométricos en ciertas edades. Por esta razón, se seleccionó el modelo de Chapman-Richards. Otra ventaja adicional de este modelo fue la consistencia en la estimación del volumen fustal, directamente por la ecuación de crecimiento, con la proyección del diámetro y la altura y la posterior estimación del volumen con estas dos variables predichas. Ambas estimaciones resultaron ser muy consistentes, en contraste con las estimaciones del volumen utilizando otros modelos.

Debido a ello se decidió utilizar el modelo de Chapman-Richards para realizar las estimaciones del volumen, diámetro y altura en función de la edad para las especies plantadas. Los resultados obtenidos de ajuste del modelo de Chapman-Richards se presentan en la tabla 10.

Tabla 9- Estadísticos de los modelos de crecimiento no lineales utilizados para estimar altura, diámetro y volumen en función de la edad para *Pinus cembroides*.

Modelo		Ecuación	R ²	Sx%	Sx
Chapman R	V	$0.721759 \cdot (1 - \text{Exp}^{(-0.042613 \cdot t)})^{38.77677}$	.81	.530	.240
	D	$52.68951 \cdot (1 - \text{Exp}^{(-0.012466 \cdot t)})^{1.855662}$	.83	.292	8.06
	H	$13.61718 \cdot (1 - \text{Exp}^{(-0.023219 \cdot t)})^{2.12019}$	.86	.210	1.81
Hossfeld	V	$t^{(2.353884)} / ((87731.71 + (t^{2.353884}) / 13070.45))$	.74	.586	.265
	D	$t^{(1.9509773)} / ((171.2446 + (t^{1.9509773}) / 154.1367))$	.82	.297	8.18
	H	$t^{(1.713074)} / ((90.49975 + (t^{1.713074}) / 18.03891))$	.80	.216	1.90
Gompertz	V	$1.60508 \cdot \text{Exp}^{(-39.6184 \cdot \text{Exp}^{(-0.037633 \cdot t)})}$	.79	.533	.241
	D	$99.14337 \cdot \text{Exp}^{(-4.660191 \cdot \text{Exp}^{(-0.015207 \cdot t)})}$	.83	.294	8.08
	H	$14.72537 \cdot \text{Exp}^{(-3.292748 \cdot \text{Exp}^{(-0.026183 \cdot t)})}$	.81	.211	1.86
Logístico	V	$60106.5 / (1 + (1446344 \cdot \text{Exp}^{(-0.024363 \cdot t)}))$	.68	.658	.297
	D	$69.74005 / (1 + (33.46165 \cdot \text{Exp}^{(-0.035844 \cdot t)}))$	.83	.288	7.94
	H	$13.82818 / (1 + (11.36735 \cdot \text{Exp}^{(-0.040021 \cdot t)}))$	.82	.208	1.83
Monomolecular	V	$30.68929 \cdot (1 - 1.014479 \cdot \text{Exp}^{(-0.000363 \cdot t)})$	.68	.654	.296
	D	$592.2738 \cdot (1 - 1.015773 \cdot \text{Exp}^{(-0.000786 \cdot t)})$	.80	.314	8.63
	H	$18.32747 \cdot (1 - 1.09911 \cdot \text{Exp}^{(-0.010219 \cdot t)})$	.80	.218	1.93
Bertalanffy	V	$13.23824 \cdot (1 - \text{Exp}^{(-0.000167 \cdot t)})^3$	.54	1.71	.353
	D	$460.4073 \cdot (1 - \text{Exp}^{(-0.000264 \cdot t)})^3$	.77	.342	9.42
	H	$7.856516 \cdot (1 - \text{Exp}^{(-0.00617 \cdot t)})^3$	.79	.223	1.97
Koff	V	$0.067852 \cdot (\text{Exp}^{(-0.00073 \cdot (t^{(-23.44)}))})$	.69	.640	.290
	D	$13.89795 \cdot (\text{Exp}^{(-0.000062 \cdot (t^{(-138.8777)}))})$	.62	.514	14.1
	H	$4.051193 \cdot (\text{Exp}^{(-1.415087 \cdot (t^{(-0.006416)}))})$	.65	.286	2.52
Parábola	V	$-0.020698 + (-0.002488) \cdot t + 0.000085 \cdot t^2$	.75	.578	.261
	D	$-2.16879 + (0.237448) \cdot t + 0.001323 \cdot t^2$	.82	.447	8.29
	H	$-1.71945 + (0.186814) \cdot t - 0.000573 \cdot t^2$	.81	.214	1.88
Freese	V	$\text{Exp}^{((-15.3551) + (-16.2541) \cdot \log(t) + 0.006584 \cdot t)}$	.55	.778	.352
	D	$\text{Exp}^{((-884.613) + (-885.512) \cdot \log(t) + 0.360031 \cdot t)}$	.77	.340	9.36
	H	$\text{Exp}^{((0.026515) + (-0.872485) \cdot \log(t) + 0.087133 \cdot t)}$	.70	.265	2.34
Yoschida I	V	$379.2534 \cdot t^{2.103199} / (899263 + t^{2.103199}) - 0.08582$	.75	.579	.262
	D	$377339.8 \cdot t^{1.456149} / (8813627 + t^{1.456149}) - 0.0114833$	.82	.300	8.25
	H	$10.51454 \cdot t^{0.142941} / (-0.432898 + t^{0.142941}) - 29.3695$	.80	.216	1.88
Sloboda	V	$1.60514 \cdot (\text{Exp}^{(-39.60799 \cdot \text{Exp}^{(-0.050022 \cdot t) \cdot 0.626944})})$	.79	.533	.241
	D	$99.15556 \cdot (\text{Exp}^{(-4.65981 \cdot \text{Exp}^{(-0.935245 \cdot t) \cdot 0.016257})})$	.83	.293	8.08
	H	$14.72564 \cdot (\text{Exp}^{(-3.292579 \cdot \text{Exp}^{(-0.141969 \cdot t) \cdot 0.177374})})$	.81	.211	1.86
Levackovic I	V	$1.893158 \cdot ((t^{3.109804}) / (1162.169 + (t^{3.109804})^{1525.791}))$	.79	.535	.242
	D	$84.42735 \cdot ((t^{4.100595}) / (901924000 + (t^{4.100595})^{0.447878}))$	.83	.295	8.11
	H	$14.2623 \cdot ((t^{4.436416}) / (976162000 + (t^{4.436416})^{0.268704}))$	.31	.403	3.55
Levackovic III	V	$2.791736 \cdot ((t^2) / (-225 + (t^2)))^{-65.5101}$	.78	.540	.244
	D	$159.2353 \cdot ((t^2) / (39554.05 + (t^2)))^{0.934017}$	.82	.297	8.18
	H	$17.39822 \cdot ((t^2) / (8347.106 + (t^2)))^{0.727218}$	.80	.215	1.89
Schumacher	V	$\text{Exp}^{(-1.13568 + (139.6294 \cdot (1/t)))^{-1.92091}}$	.77	.557	.252
	D	$\text{Exp}^{(1.164286 + (-34.1398 \cdot (1/t)))^{4.374861}}$	.81	.309	8.49
	H	$\text{Exp}^{(4.11774 + (-80.5378 \cdot (1/t)))^{0.728917}}$	.79	.222	1.96

Tabla 10.- Estadísticos del modelo de crecimiento no lineal utilizado para estimar altura, diámetro y volumen en función de la edad para las especies plantadas.

Modelo		Ecuación	R ²	Sx%	Sx	
		Pinus cembroides				
Chapman-R	V	$3.085964 * (1 - \text{Exp}^{(-0.001051 * t)})$ 3.085964	.89	.224	.328	
	D	$8.950755 * (1 - \text{Exp}^{(-0.008116 * t)})$ 9.482920	.96	5.41	.168	
	H	$10.8991 * (1 - \text{Exp}^{(-0.16446 * t)})$ 1.305070	.94	1.53	.202	
			Pinus pinceana			
	V	$2.706824 * (1 - \text{Exp}^{(-0.00139 * t)})$ 2.706824	.89	.222	.328	
	D	$9.193809 * (1 - \text{Exp}^{(-0.007823 * t)})$ 9.428011	.96	5.50	.172	
	H	$10.84722 * (1 - \text{Exp}^{(-0.015414 * t)})$ 1.337777	.94	1.53	.203	
			Pinus nelsonii			
	V	$2.803540 * (1 - \text{Exp}^{(-0.001296 * t)})$ 2.803540	.89	.224	.329	
D	$9.19000 * (1 - \text{Exp}^{(-0.007831 * t)})$ 9.420000	.96	5.59	.175		
H	$12.22238 * (1 - \text{Exp}^{(-0.014688 * t)})$ 1.206321	.94	1.54	.205		

5.3 Incremento

El modelo que mejor predijo el crecimiento en volumen, diámetro y altura para rodales naturales de *Pinus cembroides* y para las especies plantadas fue el de Chapman-Richards (Tabla 9 y 10). Debido a ello, las curvas de crecimiento e incremento en volumen diámetro y altura de las tres especies plantadas (*Pinus cembroides*, *P. pinceana* y *P. nelsonii*) y del rodales naturales de *Pinus cembroides* fueron calibradas a partir de las ecuaciones derivadas del modelo de Chapman-Richards (Figura 2 y Figura 3), las cuales nos muestran que del análisis del incremento medio anual (ICA) máximo alcanzado en volumen fue de $0.021 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ a la edad de 70 años con un turno absoluto alcanzado a la edad de 110 años para las especies plantadas (Figura 2). En lo que respecta a los rodales de *Pinus cembroides* que crecen en su hábitat natural, el incremento corriente anual tuvo su máxima expresión en volumen con un valor de $0.011 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ alcanzado este antes de los 100 años de edad,

el turno absoluto de crecimiento en volumen para esta especie fue alcanzado a los 125 años (Figura 3).

El ICA máximo observado en diámetro para las especies plantadas fue de 0.75 cm año^{-1} a la edad de 30 años con un turno absoluto alcanzado a los 55 años, cuando presenta un incremento en diámetro de 0.6 cm año^{-1} (Figura 2). Los valores de incremento en diámetro para el rodal natural fueron de 0.35 cm año^{-1} en el punto máximo a la edad de 40 años, alcanzando su turno absoluto de crecimiento en diámetro de 0.28 cm año^{-1} a la edad de 90 años (Figura 3).

Los incrementos anuales máximos en altura que fueron observados en 0.20 m año^{-1} a la edad de 10 años, con un turno absoluto de crecimiento en altura estimado a los 15 años, cuando se observa un ICA de 0.19 m año^{-1} en los sitios de plantación (Figura 2). Para las áreas naturales de *Pinus cembroides*, el crecimiento máximo alcanzado fue de 0.16 m año^{-1} de altura en un lapso de 25 años. El turno absoluto de crecimiento en altura registrado fue alcanzado a los 50 años para *Pinus cembroides* creciendo en áreas naturales.

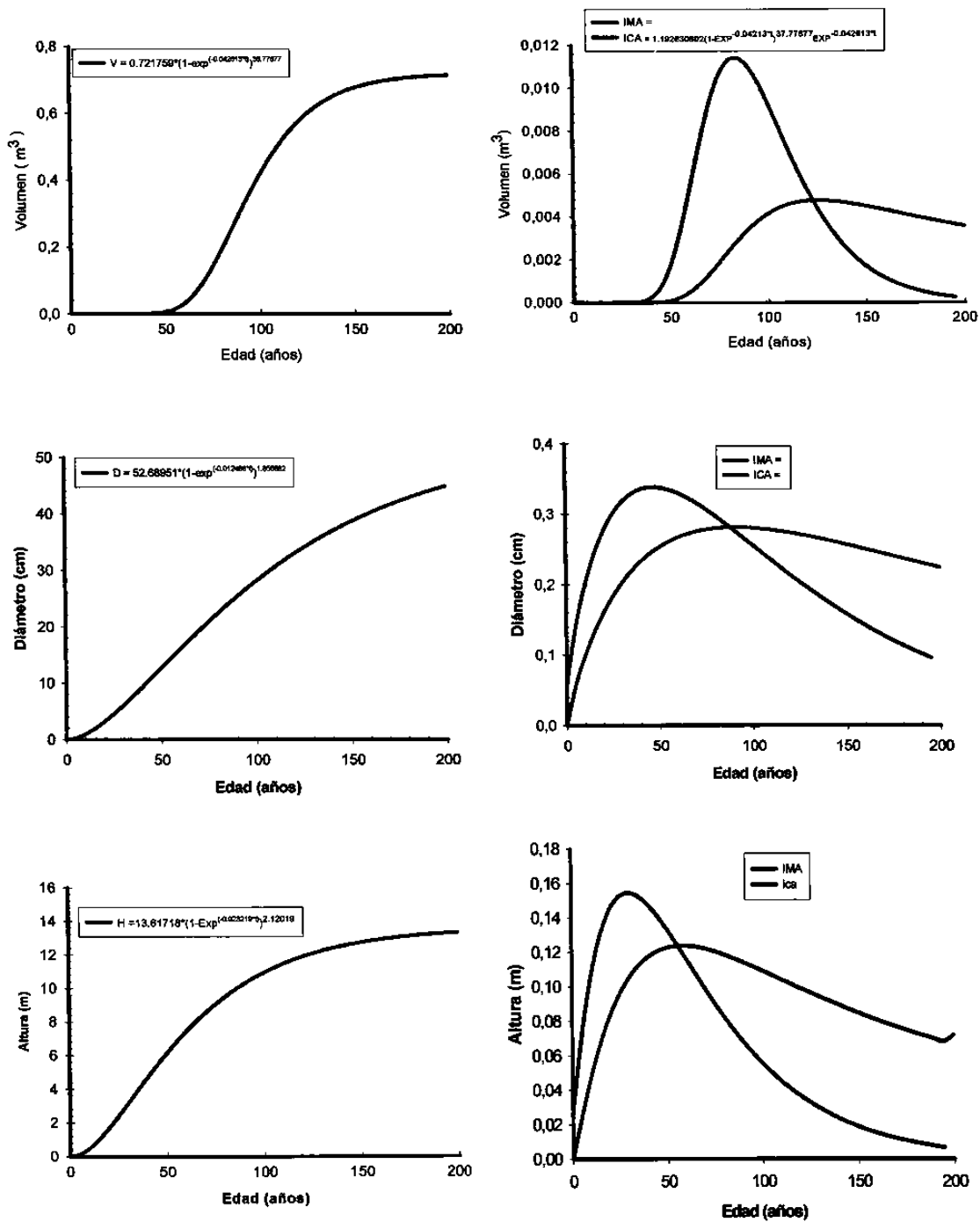


Figura 2.- Comparación de las curvas de crecimiento e incremento en volumen, diámetro y altura en la plantación de *Pinus cembroides*.

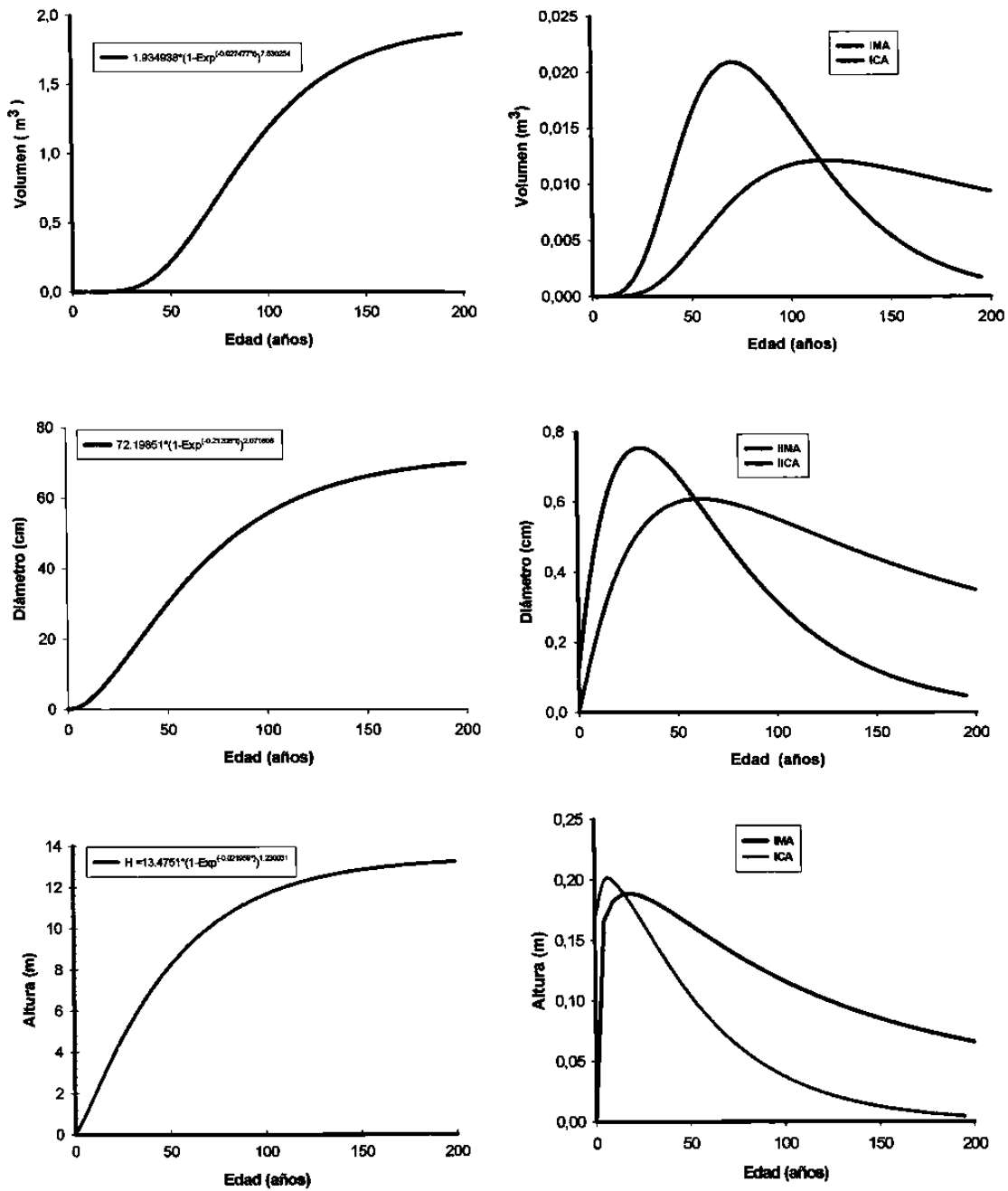


Figura 3.- Comparación de las curvas de crecimiento e incremento en volumen, diámetro y altura en rodal natural de *Pinus cembroides*.

5.4 Densidad

Factor de competencia de copas (FCC). En este apartado se utiliza la relación que existe entre la proyección horizontal de la copa de un árbol y su diámetro basal en individuos que han sido plantados con espaciamiento de 1 m x 1 m (10000 árboles ha⁻¹). Esta información es clave en el entendimiento de la mortalidad de árboles por competencia.

Bajo este esquema se define la relación funcional existente entre el diámetro de copa (dc) y el diámetro basal en árboles que han crecido bajo sistemas de plantaciones, sin competencia aérea o sin interferencia de copas durante las primeras etapas de la vida de la masa y con competencia aérea o interferencia de copas a partir del cierre de copas. Las ecuaciones resultantes del ajuste de la relación diámetro de copas en función del diámetro basal se presentan en el Tabla 11.

Tabla 11.- Las ecuaciones resultantes de la predicción del diámetro de copas en función del diámetro basal para tres especies de piñonero plantadas en Iturbide, N.L., México.

Espece	dc	amc
<i>Pinus cembroides</i>	$1.2364+(-3.8962*db)$	$(-3.8962+1.2364*db)*0.7854$
<i>Pinus pinceana</i>	$1.440+(-2.394)*db$	$(-2.394+1.44*db)*0.7854$
<i>Pinus nelsonii</i>	$0.5764+(-0.4818)*db$	$(-0.4818+0.5764*db)*0.7854$

Donde: dc = diámetro de copa (m), db = diámetro en la base (cm), amc = área máxima de la copa.

El área máxima de copa (amc) para las tres especies plantadas se estima de la siguiente forma:

$$Amc = (0.7854) * dc^2$$

El número de árboles creciendo al cierre copas, calculado de la división de la superficie entre el área máxima de copas se presenta en el Tabla 12.

Tabla 12.- Densidades máximas promedio, para tres especies de pinos piñoneros (*Pinus cembroides* Zucc., *P. pinceana* Gord. y *P. nelsonii* Schaw.) plantados en Iturbide, N.L., México.

Categ diam. (Base cm)	Área de copa (m ²)	Densidad (No ha ⁻¹)	Área basal (m ² ha ⁻¹)
<i>Pinus cembroides</i>			
5	1.80	5570	10.93
10	6.65	1503	11.80
15	11.51	869	15.35
20	16.36	611	19.20
25	21.22	471	23.13
30	26.07	383	27.11
35	30.93	323	31.10
40	35.78	279	35.11
45	40.64	246	39.13
50	45.49	219	43.16
55	50.35	198	47.18
60	55.20	181	51.21
65	60.06	166	55.25
70	64.91	154	59.28
<i>Pinus pinceana</i>			
5	3.77	2649	5.20
10	9.43	1060	8.32
15	15.08	662	11.71
20	20.74	482	15.14
25	26.39	378	18.59
30	32.05	312	22.05
35	37.70	265	25.51

40	43.36	230	28.98
45	49.01	204	32.44
50	54.67	182	35.91
55	60.32	165	39.38
60	65.98	151	42.85
65	71.63	139	46.32
70	77.29	129	49.79
<i>Pinus nelsonii</i>			
5	1.89	5304	10.41
10	4.15	2410	18.93
15	6.41	1559	27.55
20	8.68	1152	36.21
25	10.94	914	44.87
30	13.20	757	53.53
35	15.47	646	62.20
40	17.73	564	70.87
45	19.99	500	79.54
50	22.26	449	88.22
55	24.52	407	96.89
60	26.78	373	105.56
65	29.05	344	114.23
70	31.31	319	122.91

La tabla 12 presenta los valores estimados en relación a la densidad, área de copa y área basal de las tres especies que fueron plantadas y evaluadas.

5.5 Crecimiento de Árboles Individuales

5.5.1 Comparación del crecimiento de un bosque nativo y de la plantación de *P. cembroides*.

5.5.2 Volumen

Los resultados de los patrones de crecimiento e incremento en volumen que muestra la figura 4 fueron estimados por medio del modelo de Chapman-Richards debido a que esta función de crecimiento fue la que proporcionó uno de los mejores ajustes y una mayor consistencia en la estimación de la altura

total, diámetro basal y volumen fustal de un total de 14 modelos probados para árboles individuales provenientes de las plantaciones y de los rodales naturales de *Pinus cembroides* Zucc. del nordeste de México hasta la edad de 200 años. Como lo muestra la (figura 4) el crecimiento en volumen que se observa en los árboles provenientes de la plantación es mayor al crecimiento en volumen generado por la misma especie en rodales que crecen en su hábitat natural. Esta diferencia tan contrastante del crecimiento en volumen es de aproximadamente de un 100% ya que los árboles que fueron plantados tienen un crecimiento en volumen de 1.2 m³ a la edad de 100 años mientras que los árboles de áreas naturales tienen en promedio 0.6 m³ de crecimiento en volumen a la misma edad.

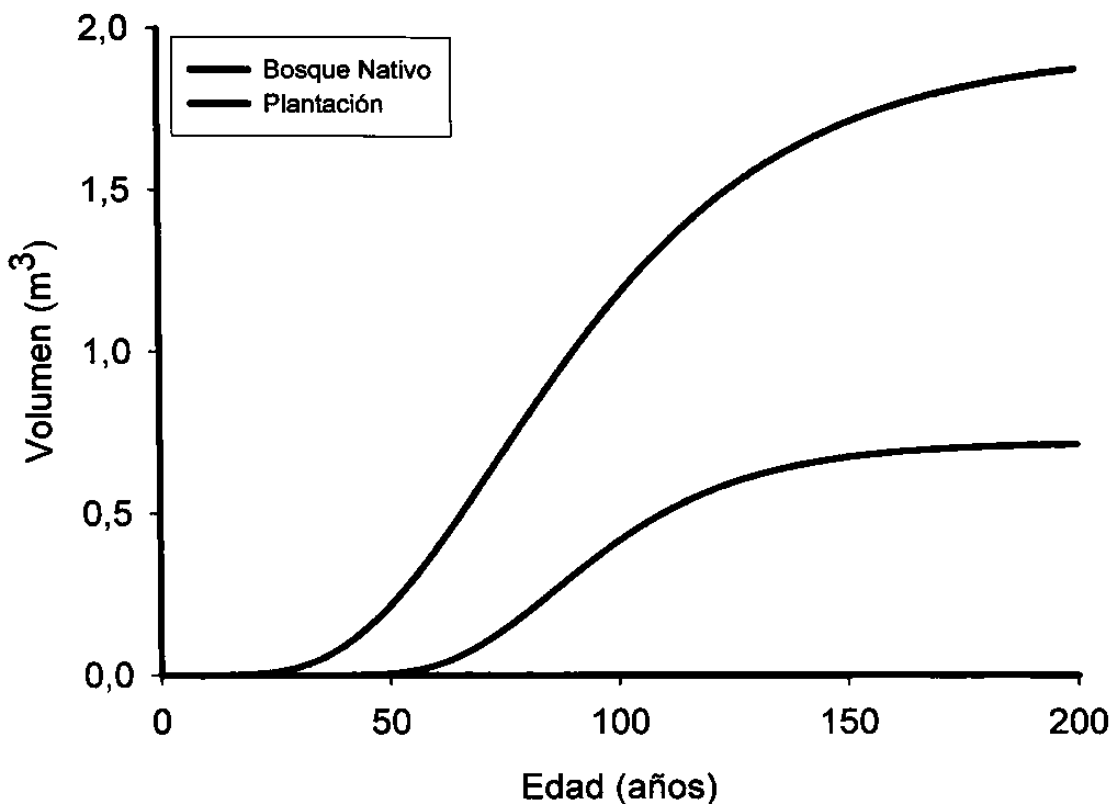


Figura 4.- Comparación de crecimiento en volumen entre las especies plantadas y bosque nativo de *Pinus cembroides*.

5.5 3 Diámetro

El crecimiento en diámetro entre la plantación y el bosque natural tuvo un comportamiento semejante al mostrado en volumen (Figura 5). Esta semejanza en la relación es dependiente en variables correlacionadas como son el diámetro, la altura y el volumen. En base al modelo de Chapman-Richards, la curva de crecimiento en diámetro basal con corteza alcanza un valor de 55 cm a la edad de 100 años para la plantación y de 35 cm para el rodal natural a la

misma edad. Esta diferencia se va estrechando a medida que va pasando el tiempo hasta llegar a la edad de 170 años donde los árboles creciendo en estas dos condiciones diferentes alcanzan un diámetro aproximado de 70 cm. Esta es la parte de la asíntota dada por los dos modelos de Chapman-Richards, las cuales son muy similares por los datos utilizados para la estimación de los crecimientos, donde se utilizaron datos finales del bosque nativo. La edad a la cual se alcanza la asíntota es variable entre árboles plantados y árboles creciendo naturalmente. Este valor es de para plantaciones y de para árboles creciendo en condiciones naturales. Otro parámetro variable entre la plantación y el bosque nativo de la ecuación de Chapman-Richards es la pendiente.

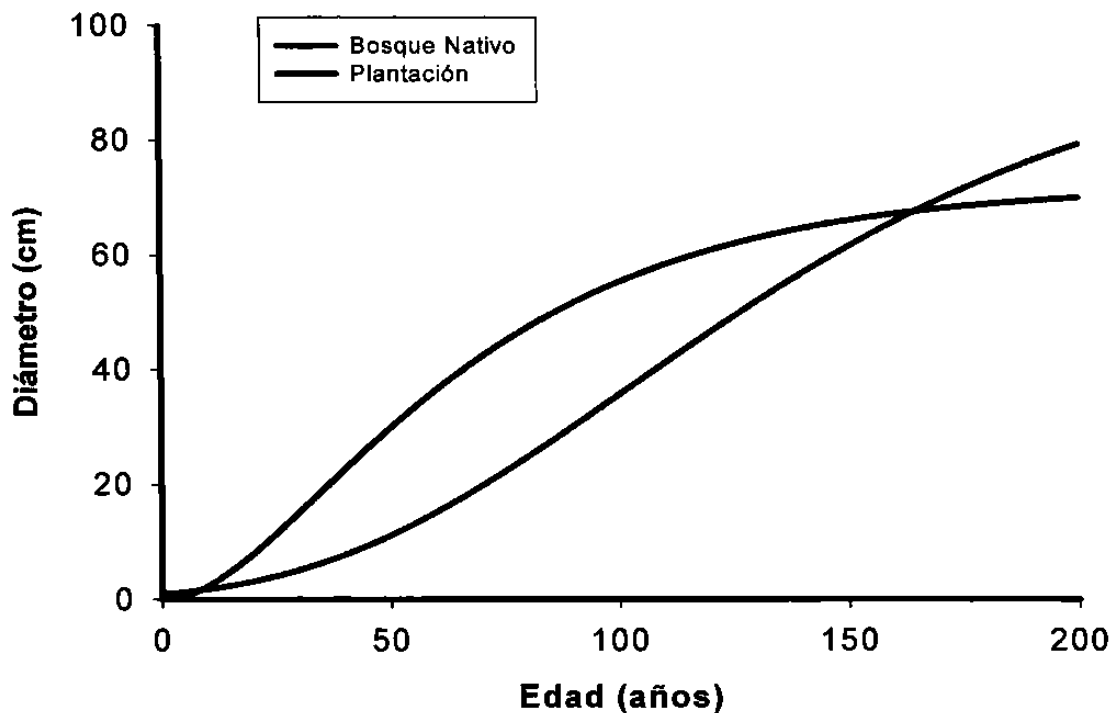


Figura 5.- Comparación de crecimiento en diámetro entre las especies plantadas y bosque nativo de *Pinus cembroides*.

5.5.4 Altura

La figura 6 muestra el crecimiento en altura para árboles creciendo en la plantación y árboles creciendo naturalmente. El comportamiento del crecimiento en altura sigue un patrón diferente entre la plantación y el bosque nativo. Se observa una mayor velocidad en el crecimiento en altura para la plantación hasta la edad de 110 años punto en el que las dos curvas (plantación y bosque nativo) alcanzan una altura de 12 m. A partir de esa edad el bosque nativo supera el crecimiento en altura respecto a la de la plantación. Esta información no puede corroborarse puesto que no existe información para la plantación hasta aquella edad.

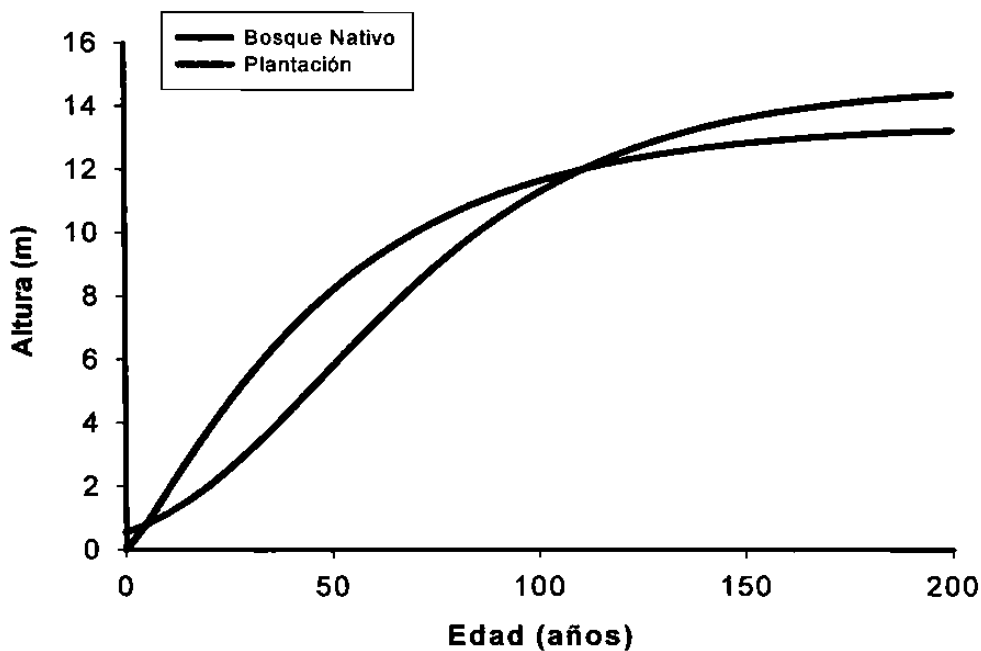


Figura 6.- Comparación de crecimiento en altura entre las especies plantadas y bosque nativo de *Pinus cembroides* .

Resulta interesante señalar las diferentes condiciones en que se encuentra la especie *P. cembroides* (plantadas en Iturbide y hábitat natural en Galeana) es muy diferente. En Iturbide la especie fue plantada en un bajío, con exposición norte, con suelo profundo abandonado a la agricultura, en un clima regional semi árido, dado por la sombra orográfica de la primera cadena de montañas de la Sierra Madre Oriental. Los árboles observados para este trabajo en condiciones de distribución natural fueron colectados de la región de Pablillo, caracterizado por un clima templado, suelos profundos, yesosos y con uso de suelo forestal y agostadero. Las diferencias en los ritmos de crecimiento en diámetro, altura y volumen entre estas dos poblaciones de *P. cembroides* parece ser explicada por el estrés a que son sometidas las plantas durante las primeras etapas del crecimiento. En los bosques templados nativos, el ramoneo, pisoteo, compactación del suelo y otros procesos degradativos de la productividad del sitio hacen que los árboles crezcan lentamente, achaparrados en las primeras etapas. Las plantaciones, por otro lado se encuentran protegidas del pastoreo, pisoteo y compactación del suelo por cercas y se encuentran en áreas de difícil acceso al ganado. Es posible que estas observaciones expliquen parcialmente los diferentes ritmos de crecimiento.

5.6 El Modelo de Incremento y Rendimiento de Árboles Individuales

Los modelos de crecimiento en diámetro, altura, volumen, densidad y área máxima de la copa proveen suficiente información para modelar el

volumen fustal por unidad de superficie y el carbono almacenado por unidad de tiempo, por unidad de superficie. La estructura de los resultados del modelo para estimar la fijación del carbono en la biomasa aérea a partir de información de árboles individuales se presenta en la Figura 7.

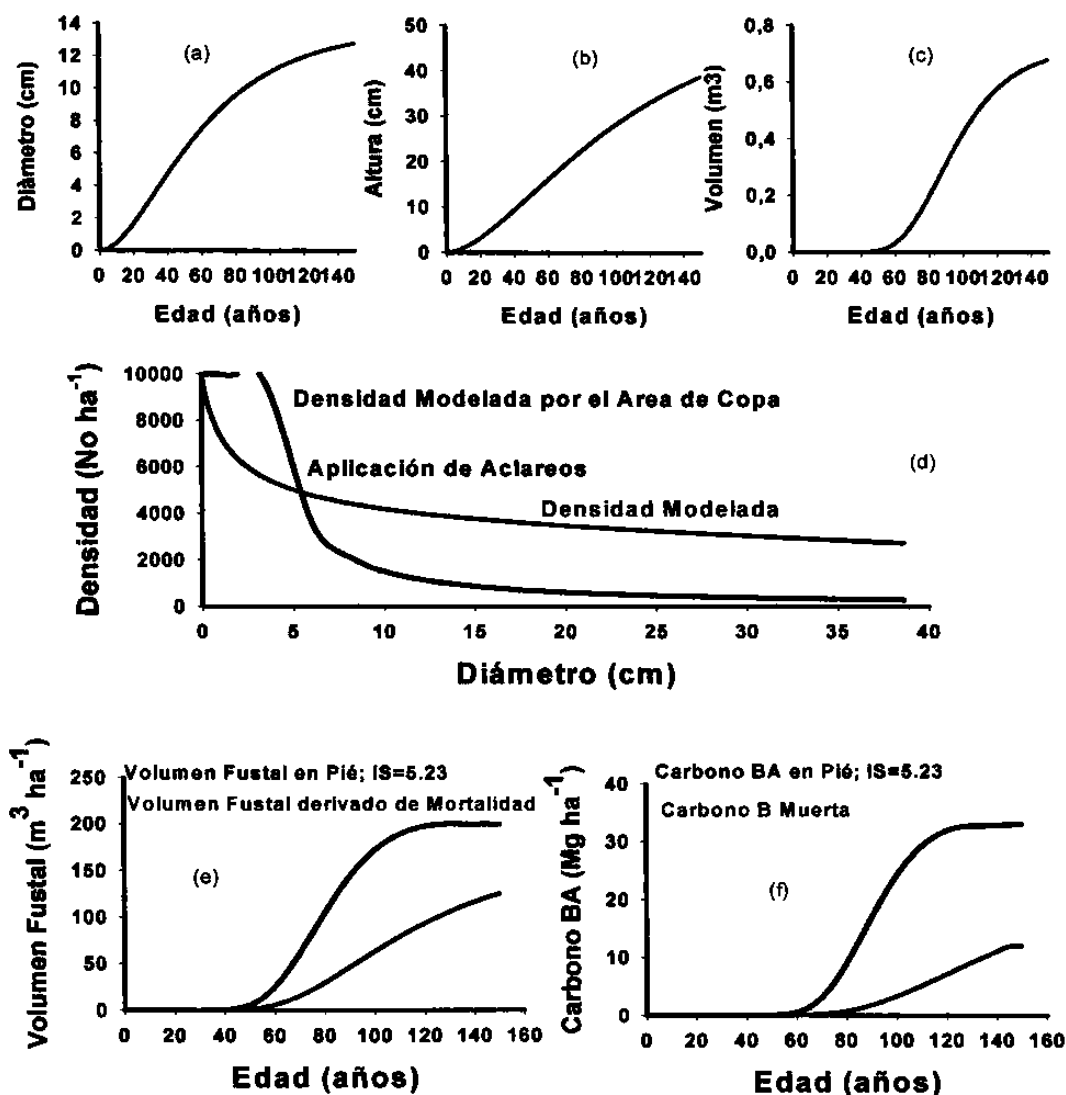


Figura 7.- Curvas de los modelos de incremento y rendimiento para árboles individuales para las especies plantadas.

Los crecimientos promedio en diámetro, altura y volumen fustal son mostrados en las primeras tres figuras (a b c) . Los modelos de las curvas sigmoidales fueron presentados anteriormente. La densidad estimada por medio del área máxima de la copa y también por un modelo modificado de Clutter *et al.*, (1983) se presentan en la cuarta figura (d). Es notorio el diámetro promedio durante el cual las densidades estimadas por el modelo y calculadas por el área de copa se traslapan, indicando las dimensiones a las cuales existe un traslape de copas. En este punto se requiere de los aclareos porque la densidad estimada sobrepasa la densidad máxima estimada por el área ocupada. Este punto se obtiene a los 5 cm de diámetro basal promedio, el cual, de acuerdo con el modelo de crecimiento en diámetro se alcanza a los 26 años. A la edad de 20 años ya se encuentran algunas copas traslapadas notando la necesidad de los primeros aclareos. Es decir, la competencia y la posible mortalidad de árboles por la interacción por los recursos se presentan a partir de los 26 años y no desde las primeras etapas del desarrollo de las plantaciones. Estas observaciones han sido señaladas por Clutter *et al.*, (1983) y se nota su diferencia en contraste con los modelos de mortalidad por competencia para bosques nativos Hamilton (1980).

Las últimas dos gráficas (e y f) presentan el crecimiento promedio en volumen fustal por hectárea y el carbono almacenado en la parte aérea del bosque (fuste, ramas y hojas). Se muestran los valores para los árboles remanentes en pié y para aquellos que se están muriendo por procesos

estocásticos y por procesos de competencia. Las curvas que se presentan son solo para índice de sitio promedio. No se presentan las demás por la debilidad del modelo de incremento y rendimiento al nivel de árboles individuales, el cual usa la densidad estimada y sobre-estima el volumen y por lo tanto el carbono almacenado en la parte aérea del ecosistema.

5.7 Los Modelos de Incremento y Rendimiento al Nivel de Rodal para las Plantaciones de Piñoneros.

5.7.1 La Distribución Weibull

Ajuste de parámetros. Las figuras 8, 9, 10 muestran que la distribución Weibull ajustada a las estructuras diamétricas en una plantación de *Pinus cembroides*, *Pinus pincena* y *P. nelsonii* del nordeste de México nos da una clara evidencia que a medida que la edad de la plantación se incrementa, la distribución diamétrica de los individuos tiende a desplazarse hacia la derecha en las tres especies evaluadas, este desplazamiento es aún mas notorio en los árboles de mayor edad (19 años). La variación diamétrica también crece cuando la edad de la plantación incrementa. Esta variación es notoria en las plantaciones a la edad de 19 años.

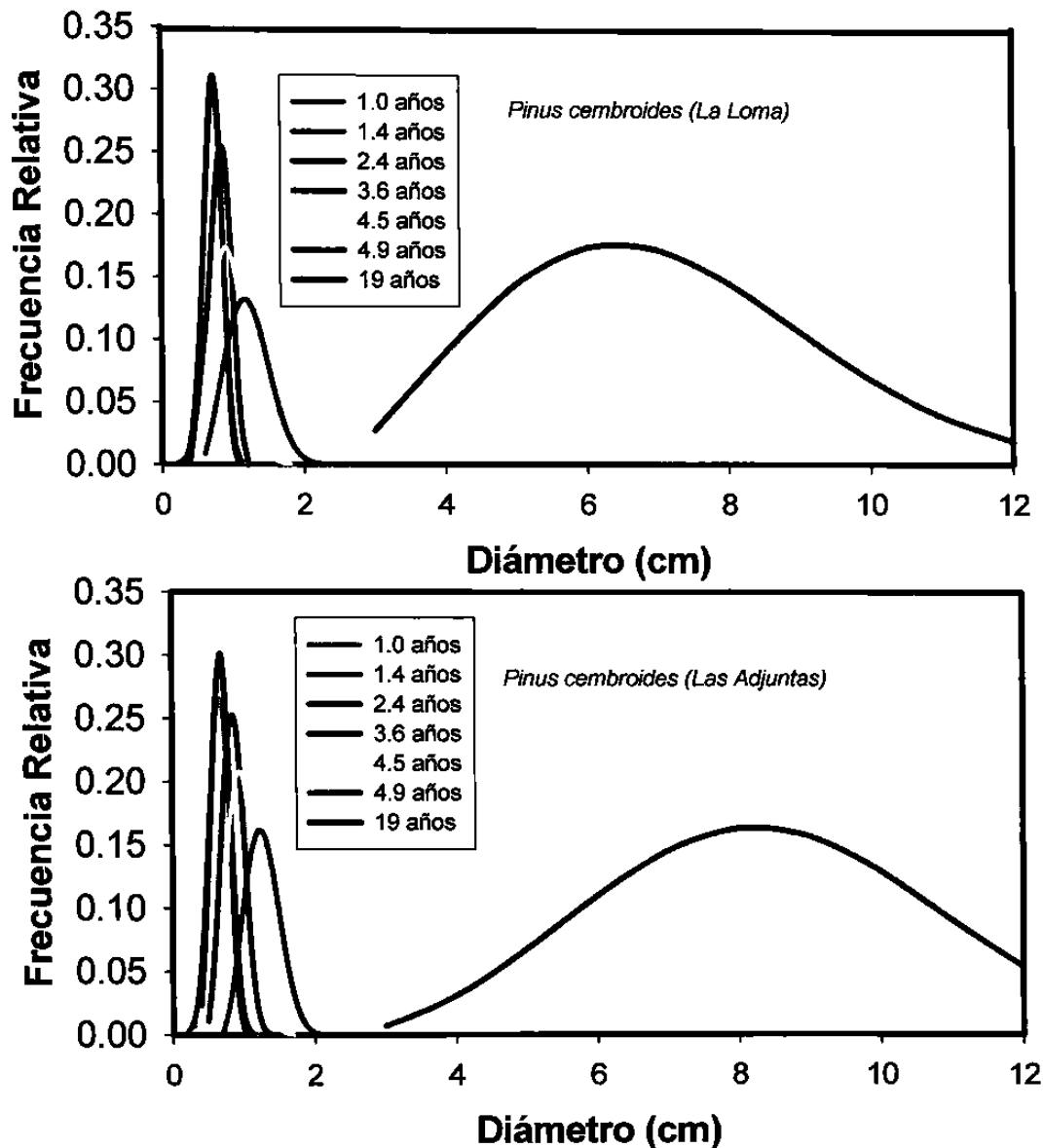
La variación observada es parcialmente atribuible principalmente a 1) a medida que pasa el tiempo los árboles compiten por luz, espacio y nutrientes lo

cual genera crecimientos diamétricos diferenciales entre los individuos, 2) la variación genética intrínseca de los individuos.

Predicción de parámetros de la distribución Weibull. Las ecuaciones resultantes de la estimación de los parámetros de forma (a), escala (b) y posición (e) de la distribución Weibull se presentan en el la (tabla 13). El parámetro de escala posee los mejores estadísticos de ajuste y su predicción ha sido fácilmente discernible con el diámetro cuadrático, diámetro promedio o alguna medida de su variación. Para esta relación, el diámetro promedio en su transformación logarítmica explicó el 99.99% de la variación de a transformado al logaritmo. El parámetro de forma es mas difícil de predecir y se requirieron de las variables independientes altura total promedio, diámetro basal promedio, volumen por hectárea, la edad de la plantación, los parámetros de escala y posición para poder explicar el 67% de la variación total en a . Finalmente el parámetro de posición posee una variación muy alta y para este estudio de plantaciones, el área basal explicó el 77% de la varianza total de e . Estas observaciones para predicciones de parámetros de la distribución Weibull son coincidentes con investigaciones realizadas por Nívar y Contreras (2000) para distribuciones diamétricas de bosques nativos de Durango y Maldonado-Ayala y Nívar (2002) para plantaciones de Durango, México.

Tabla 13.- Ecuación para predecir el parámetro e y b de posición y escala de la distribución weibull

Ecuación	R ²	Sx	C. V.
$e = 0.4093 \cdot AB^{0.4641}$	0.76	0.460	108.0
$B = 1.0749 \cdot dn^{1.00279}$	0.99	0.058	3.80
$a = 13.61 + 0.62dn - 0.64Ln(e) - 3.06Ln(h) + 1.85Ln(d)$	0.76	0.415	15.1

Figura 8.- Ajuste de la distribución Weibull para *Pinus cembroides* en los dos sitios de plantación en Iturbide Nuevo, León México.

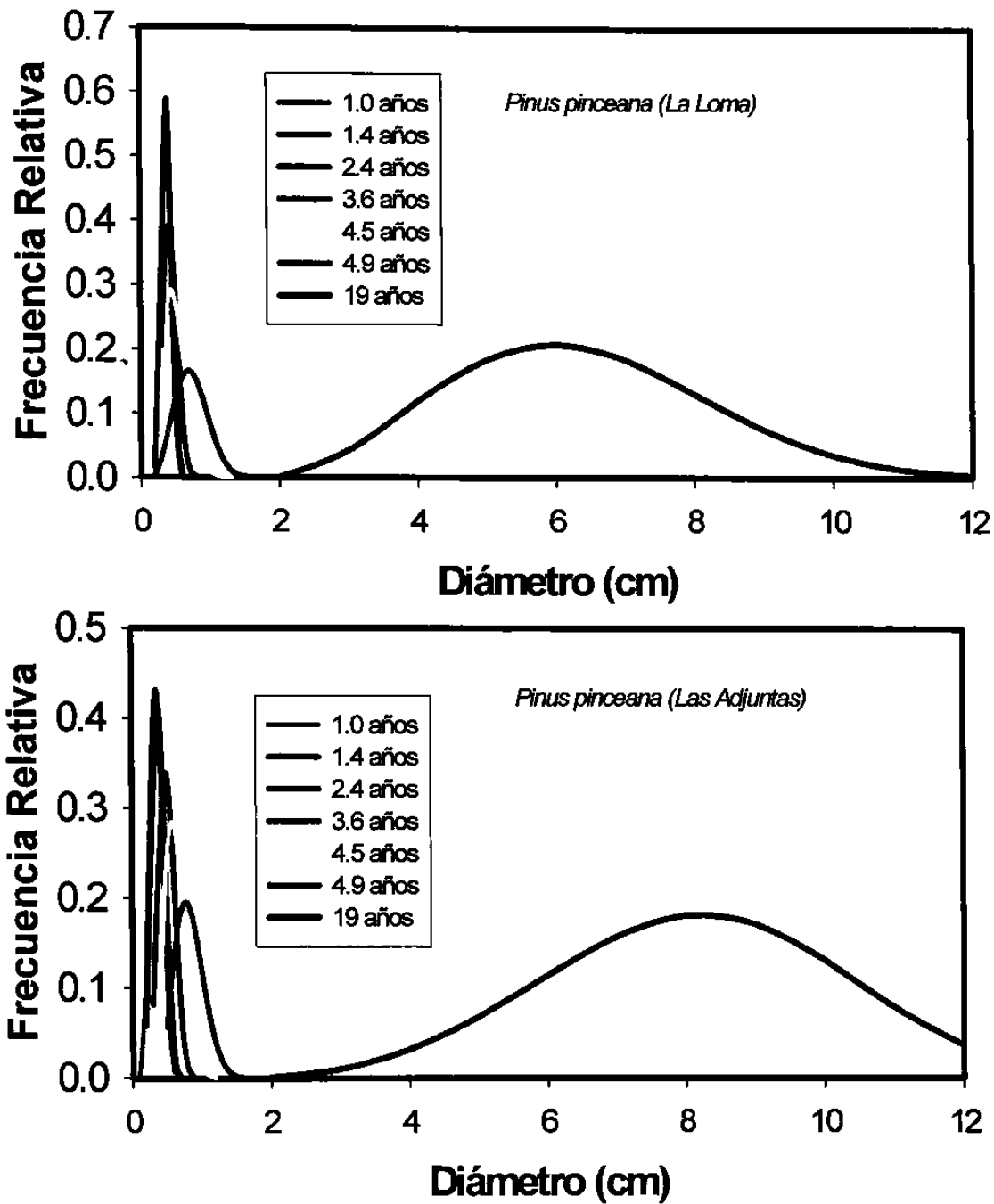


Figura 9.- Ajuste de la distribución Weibull para *Pinus pinceana* en los dos sitios de plantación en Iturbide Nuevo, León México.

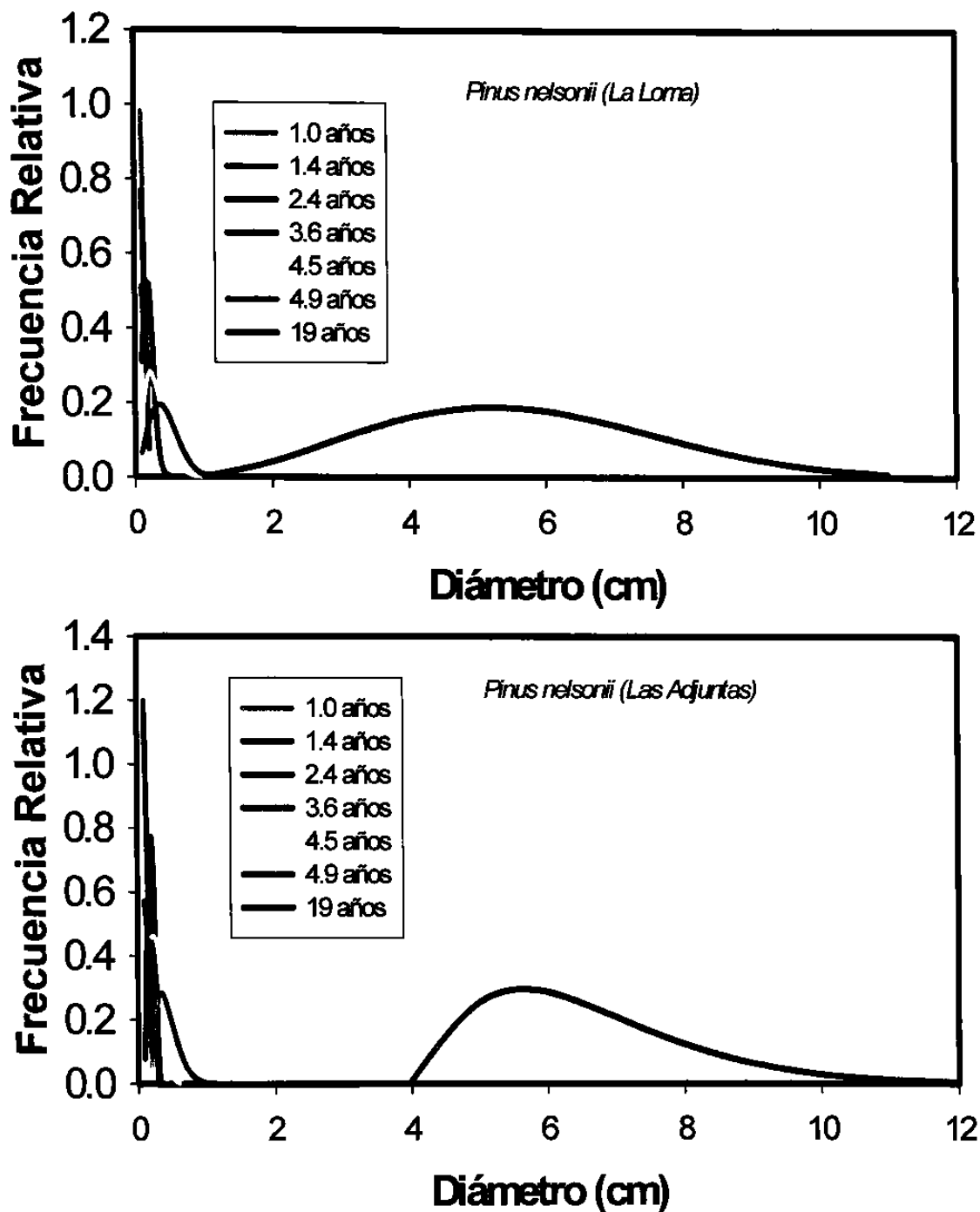


Figura 10.- Ajuste de la distribución Weibull para *Pinus nelsonii* en los dos sitios de plantación en Iturbide Nuevo, León México.

5.7.2 Proyecciones Diamétricas en Tiempo.

Las proyecciones diamétricas con la predicción de parámetros de la distribución Weibull se presentan en la figura 11.

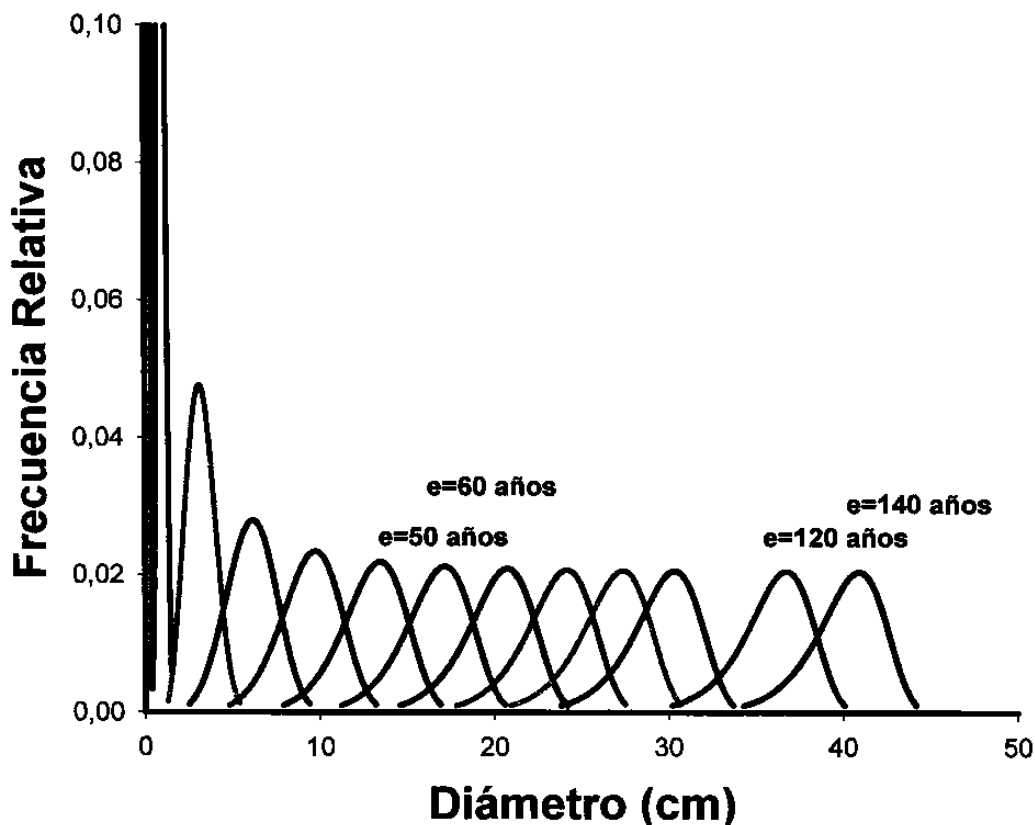


Figura 11.- Proyecciones diamétricas de los parámetros de la distribución Weibull para las especies plantadas

Las distribuciones diamétricas pierden poco la normalidad durante el ciclo de proyecciones. Es decir, para todas las edades de la plantación, las distribuciones diamétricas presentaron valores del parámetro de forma mayores que 2.8 y se nota el sesgo de las mayores probabilidades hacia la derecha de

las distribuciones. Esta información es clásica en el manejo de recursos forestales derivados de plantaciones. A la edad de 140 años, el diámetro promedio ya sobrepasó los 40 cm. La dispersión de los diámetros parece ser una debilidad en la predicción de los parámetros de la distribución. Es decir, a medida que el parámetro de escala crece con el diámetro cuadrático promedio, así lo hace el parámetro de forma describiendo finalmente distribuciones casi normales con dispersiones muy estrechas.

5.8 Clasificación de Rodales por Productividad del Sitio

Las funciones de índice de sitio. El procedimiento para generar la clasificación de las plantaciones o rodales por índice de sitio se basa en la suposición de que la altura de los árboles dominantes es dependiente de la productividad. Este método indirecto se basa en la estimación de la altura en función de la edad a través de alguno de los modelos sigmoidales existentes, los cuales sirven como curvas de índice de sitio y cuando se ponderan por una edad base y se trazan curvas anamórficas tratando de explicar la variación del crecimiento en altura se generan una familia de curvas analíticas. Para este trabajo se ajustaron los modelos sigmoidales clásicos de Schumacher, Chapman-Richards y Weibull. La edad base que generalmente se utiliza es aquella donde los árboles alcanzan un diámetro comercial que puede ser de 25 a 30 cm. Para este propósito la edad base utilizada fue de 20 años en respuesta a que el conjunto de datos provienen de una plantación de esa edad.

Los resultados del ajuste de los tres modelos sigmoidales se presentan en la tabla 14. Los resultados de los modelos de crecimiento probados para estimar índices de sitio por medio de la curva guía muestra que el análisis estadístico de ajuste de los valores obtenidos en los tres modelos probados (Schumacher, Chapaman-Richards y Función Weibull) indican ser muy similares con un coeficiente de determinación, $r^2 = 97$ para los tres modelos y una mínima diferencia en el error estándar, S_x , y coeficiente de variación, C. V. De acuerdo a los criterios de ajuste estadístico mencionados y al número de parámetros de cada modelo, resulta que el modelo de Schumacher con dos parámetros y menor error estándar y coeficiente de variación es el mejor para estimar los cálculos en el trazo de las curvas guía. Siguiendo Chapaman-Richards y Función Weibull respectivamente. Es interesante señalar que a pesar que el modelo de Schumacher obtuvo los mejores estadísticos de ajuste, se decidió utilizar el modelo de Chapaman-Richards para generar y ajustar las curvas de Índice de sitio debido a que a estas parten de su origen en 0 y por otra parte muestran consistencia con el modelaje del diámetro, volumen y altura de los árboles provenientes de las plantaciones y de los bosques nativos de *P. cembroides*.

Tabla 14.- Estadísticos de ajuste para modelos de crecimiento en altura dominante-edad y ecuación de índice de sitio por el método de la curva guía

Modelo	Ecuación de crecimiento	Ecuación de índice de sitio	R ²	Sx	CV
Schumacher	$H = 14.85 \cdot \exp^{-22.84} (1/E)$	$IS = 14.85 \cdot \exp^{-22.84} (1/EB)$	97	.955	.312
Chapman-Richard	$H = 12.61 \cdot (1 - \exp^{-0.038 \cdot E^{1.5924}})$	$IS = 12.61 \cdot (1 - \exp^{-0.038 \cdot EB^{1.5924}})$	97	.965	.315
Weibull	$H = 12.52 \cdot (1 - \exp^{-0.008031 \cdot E^{1.3167}})$	$IS = 12.52 \cdot (1 - \exp^{-0.008031 \cdot EB^{1.3167}})$	97	.974	.318

Donde H = Altura dominante (m); E = Edad (años); IS = Índice de sitio (m); EB = Edad base (años); B_0, B_1, B_2 = Parámetros de regresión

La figura 12 muestra los índices de sitio estimados para las especies *Pinus cembroides*, *P. pinceana* y *P. nelsonii* establecidas en dos sitios con diferente gradiente altitudinal (Las Adjuntas 1250m y Loma 1680m). Se utilizaron los datos provenientes de los bosques nativos de la especie *Pinus cembroides* para poder ajustar la sigmoideal hasta el final del crecimiento en altura. Como se observa en la (figura 10) las especies plantadas en el sitio de Las Adjuntas tuvieron una mejor respuesta al crecimiento en altura a la edad base de 20 años donde *P. cembroides* destaca como el de mayor crecimiento en altura con 5.23 m, *P. pinceana* crece 4.50 m y *Pinus nelsonii* 3.73 m. Es notorio también el crecimiento de *P. cembroides* en el paraje La Loma, alcanza crecimientos superiores a *P. nelsonii* creciendo en el paraje Las Adjuntas.

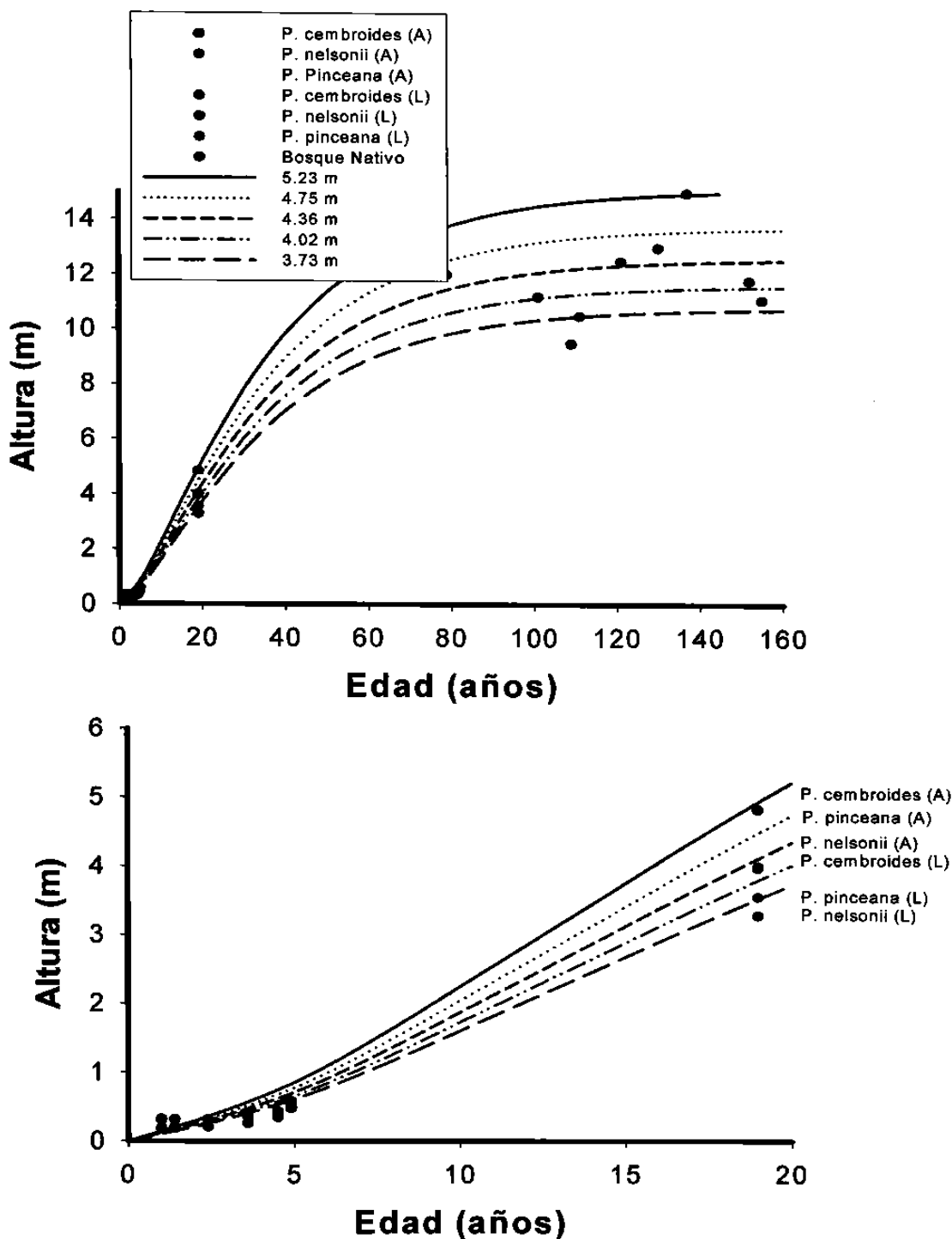


Figura 12.- Índices de sitio estimados para las especies *Pinus cembroides*, *P. pinceana* y *P. nelsonii* establecidas en dos sitios con diferente gradiente altitudinal (Las Adjuntas 1250m y Loma 1680m).

5.8.1 Rendimiento Actual

Tabla 15.- Resultados de las ecuaciones basadas en el modelo de Schumacher y Clutter *et al.*, (1983) y sus estadísticos de ajuste para plantaciones forestales de piñoneros de Iturbide, N.L., México.

Ecuación	R ²	Sx	C. V.
Schumacher			
$\ln Vf = -2.0069 - 0.41146*(1/E) + 5.11267*(1/IS) + 1.3472*\ln(AB)$	99	.25	8.7
$\ln Vf = 0.3868 - 0.4161*(1/E) - 0.2755*(IS) + 1.3459*\ln(AB)$	99	.25	8.8
$\ln Vf = 0.9368 - 0.4136 + (1/E) - 1.1958*(IS) + 1.3446*\ln(AB)$	99	.25	8.7
Clutter <i>et al.</i>, 1983			
$(N_2) = \text{Exp}(4.3556 + 0.4588\ln(N_1) + 0.4674\ln(IS) - 0.16976\ln(E))$	.79	0.11	1.2
$AB = AB_1 * \text{Exp}(-0.89133 + 2.19228*\ln(E/E_1) + 0.46466*\ln(IS))$			
$\ln Vf = 0.38686 - 0.27553(IS) + 1.34597*\ln(AB) - 0.41616/E$	.99	.25	8.8
$Bf+c = 6.29 + 0.35(Vf*0.37)$			
$Cf+c = Bf+c*0.50$			

El Modelo de la densidad. En la Figura 13 se presenta el modelo de la densidad proyectada por 60 años del modelo presentado en la (tabla 15). La densidad inicial, el índice de sitio y sobre todo la edad explicaron mejor la variación del número de árboles por hectárea. Las especies que presentaron mayor mortalidad está dada por los índices mas bajos (*P. nelsonii* y *P. pinceana*; el primero en ambas localidades y el segundo en La Loma). El *P. cembroides*, por otro lado mostró las mas altas sobrevivencias para ambas localidades. Es de importancia mencionar que el índice de densidad de Reineke descrito por Husch *et al.*, (1983) no aplica a las primeras fases de la vida de una plantación, como ha sido sugerido por Clutter *et al.*, (1983). Durante los primeros años de la vida de una plantación, no existe competencia aérea porque las copas no han alcanzado el crecimiento durante el cual las copas se traslapan. En esta etapa, la mortalidad pudiera considerarse un proceso

estocástico, donde otras fuentes de variación explicadas por el pisoteo, eventos climáticos extremos, ramoneo, etc. explican la mortalidad de las plántulas. Este efecto también estocástico también produce un cierto modelo de potencia, parecido a la tendencia mostrada por el índice de densidad de Reineke y la explicación radica en que la mortalidad de las plántulas es mayor durante las primeras etapas y posteriormente esta tasa decae potencialmente con el tiempo. Los problemas adaptativos al los estrés mencionados por las plántulas ocasionan este comportamiento.

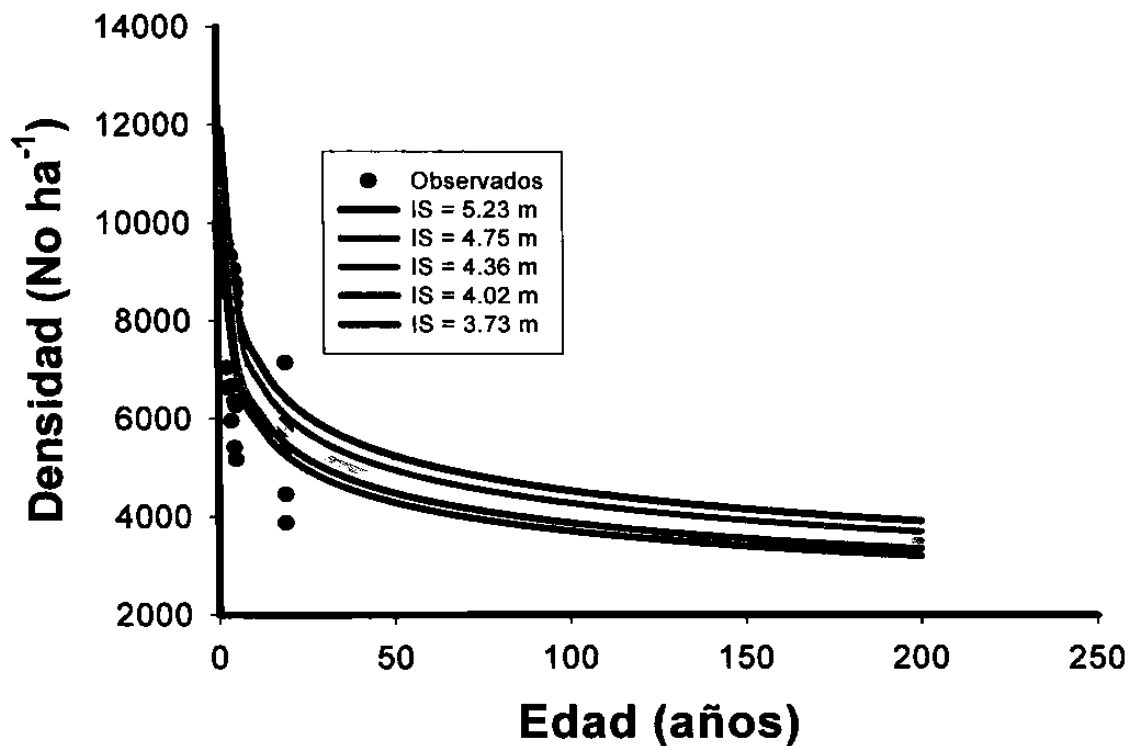


Figura 13.- Densidad proyectada a través del tiempo

5.8.1.1 El área basal

El modelo del crecimiento en área basal se presenta en la (tabla 15) y en forma gráfica se presenta en la (Figura 14). Las variables que explicaron la varianza en el área basal fueron: a) el área basal inicial, b) la edad presente y la inmediatamente pasada y c) el índice de sitio. Este modelo es similar al propuesto por Clutter (1963) y descrito en Clutter *et al.*, (1983). El modelo casi alcanza a explicar la variación total del área basal a la edad de 19 años, como se observa en la (Figura 14). Esto indica que para las poblaciones de *P. cembroides* de las Adjuntas, el modelo subestima el área basal, pero la sobrestima en las plantaciones de *P. nelsonii* del paraje La Loma.

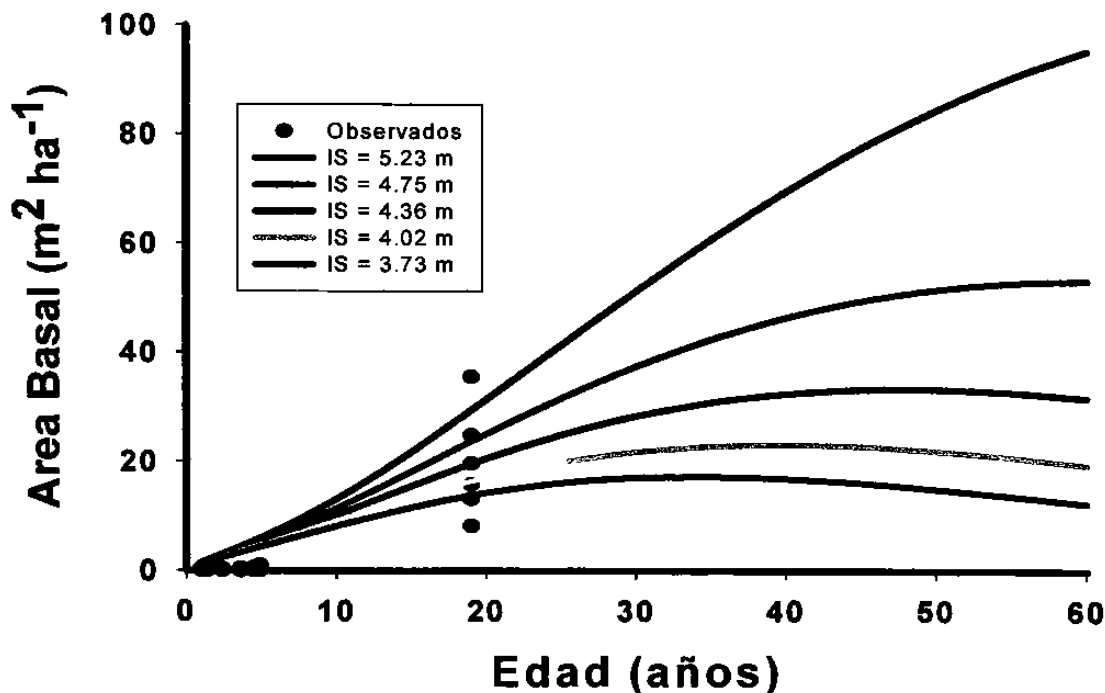


Figura 14.- Crecimiento del área basal por índice de sitio en las plantaciones

Sin embargo, el modelo describe adecuadamente el área basal para el resto de las plantaciones. El área basal para la curva del mayor índice de sitio parece estar sobrestimando el área basal desde la edad de 40 años. Sin embargo, cabe mencionar que el área basal esta siendo estimada con el diámetro basal y no con el diámetro normal, el cual es por lo general el 70% del diámetro basal.

5.8.1.2 Volumen

La ecuación que describe mejor el crecimiento del volumen fustal por unidad de superficie incluyó las variables clásicas de los modelos de Schumacher (1933) y de Clutter *et al.*, (1983); a) el área basal, b) el índice de sitio y c) la edad. El modelo casi explica el 99% de la variación logarítmica de las existencias reales. Según las proyecciones del modelo de crecimiento en volumen por unidad de superficie indican que las máximas existencias reales alcanzadas por los piñoneros de la especie *P. cembroides* podrían ser del rango de los 300 m³ ha⁻¹ a la edad de los 60 años (figura 15). La existencias son en general dos y hasta tres veces menores que las reportadas para plantaciones de *P. cooperii* – *P. duranguensis* y de bosques nativos de *P. montezumae* Maldonado-Ayala (2002); Zepeda y Acosta (2000).

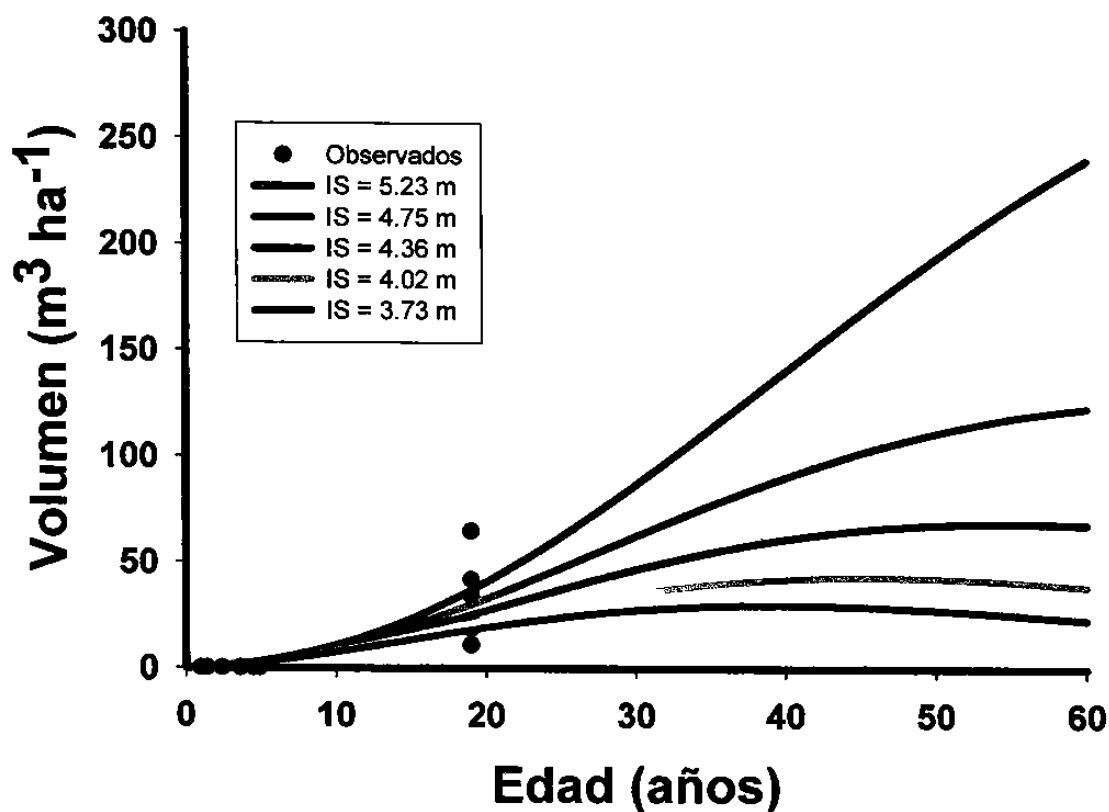


Figura 15.- Crecimiento en volumen por índice de sitio en las plantaciones

Las plantaciones de *P. nelsonii* y *P. pinceana* de la Loma, por otra parte, no alcanzan los $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ a la edad de 60 años.

5.8.1.3 Biomasa y Carbono en el compartimiento aéreo

En las figuras 16 y 17 se presentan las proyecciones de biomasa en el fuste y copas de las plantaciones. En biomasa, las plantaciones de *P. cembroides* podrían alcanzar las 40 Mg ha^{-1} a la edad de 60 años. En carbono almacenado podría alcanzar los 20 Mg ha^{-1} a los 60 años. Esta cantidad es tres

veces menor que el almacén registrado en plantaciones modeladas en Durango con especies de *P. cooperii* – *P. duranguensis*.

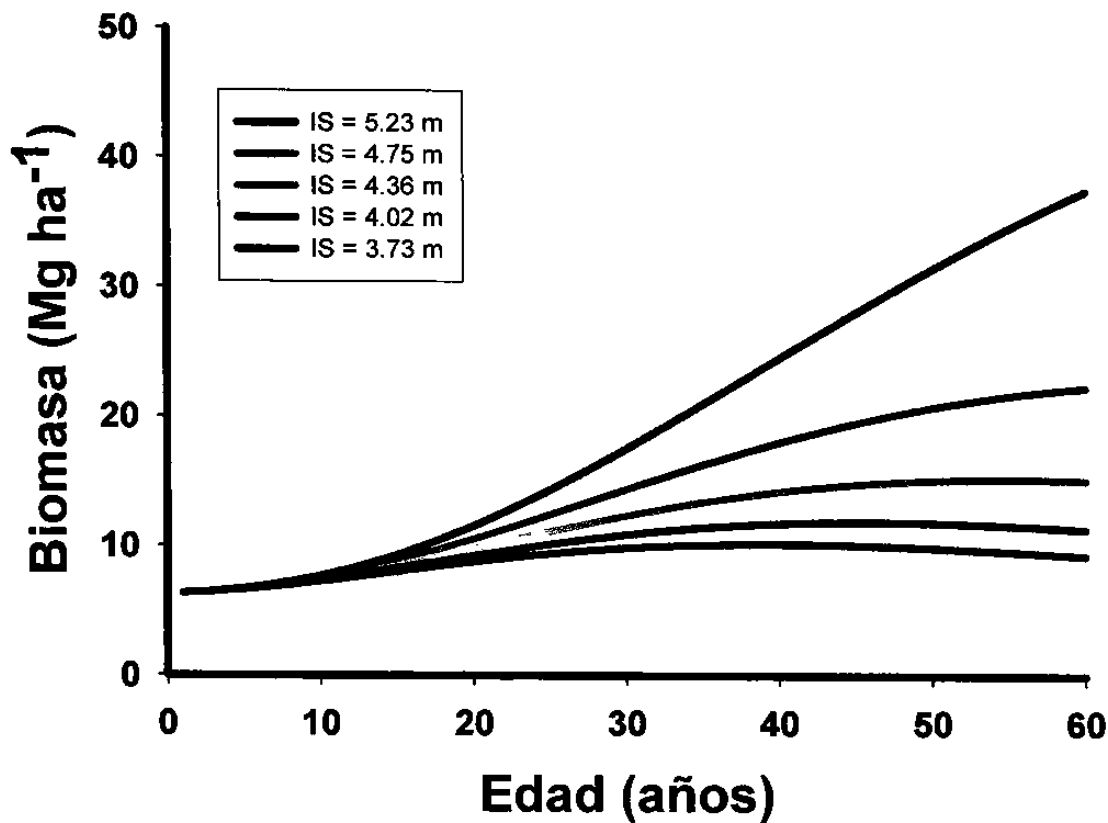


Figura 16.- Biomasa alcanzada por índice de sitio en las plantaciones

Las especies de *P. nelsonii* y *P. pinceana* del paraje La Loma solo podrían almacenar en la biomasa aérea una cantidad no mayor a los 15 Mg ha⁻¹.

Estas cantidades tan bajas en área basal, volumen, biomasa y secuestro de carbono para las plantaciones en piñoneros no las hacen tan deseables para proyectos con propósitos de captura o secuestro de carbono en los bosques degradados de la Sierra Madre Oriental del nordeste de México. Sin embargo,

la obtención de recursos económicos provenientes del cambio climático, además de los incentivos económicos para la restauración de los terrenos degradados de la Sierra Madre Oriental hacen deseables este tipo de prácticas y sobre todo con especies listadas en la NOM- 059 –ECOL- 2001.

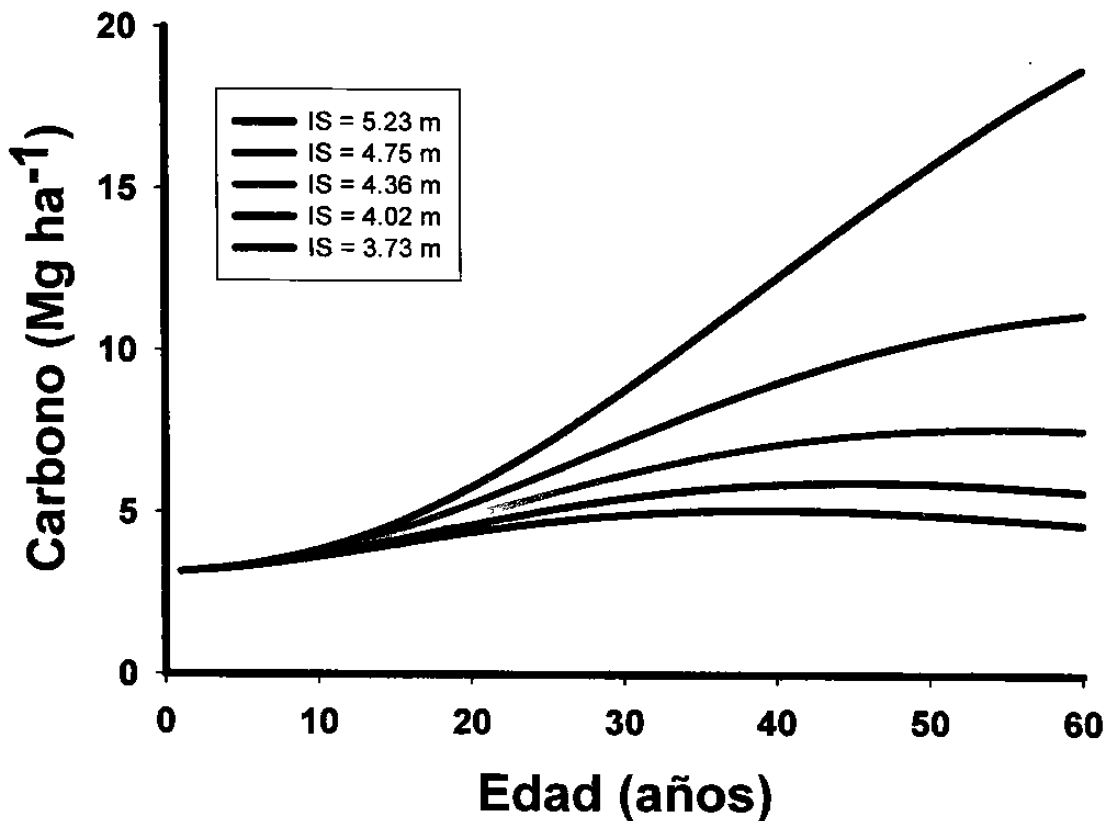


Figura 17.- Carbono almacenado por índice de sitio en las plantaciones

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

Se presentan modelos de crecimiento, incremento y rendimiento al nivel de los árboles individuales y del rodal para plantaciones de tres especies de pinos piñoneros plantados en Iturbide, N.L., México. Las especies *P. cembroides*, *P. pinceana* y *P. nelsonii* fueron plantadas en 1983 en una fracción del bosque escuela de la Facultad de Ciencias Forestales UANL en la Sierra Madre Oriental del nordeste de México. Se ajustaron ecuaciones para predecir el volumen fustal, el crecimiento en diámetro, altura, volumen, al área de copa y la densidad. Estas ecuaciones proporcionaron suficiente información para proyectar las estructuras diamétricas, el volumen y carbono de las plantaciones al nivel de los árboles individuales. También se ajustó un modelo para predecir el incremento y rendimiento al nivel del rodal. El segundo modelo, por su independencia de la densidad provee mejores estimaciones del volumen fustal y carbono almacenado en la biomasa aérea de las plantaciones. Por esta razón, se recomienda utilizarse preliminarmente en la estimación del volumen fustal y carbono almacenado en la biomasa de las plantaciones de pino piñonero de la Sierra Madre Oriental. De acuerdo con las observaciones de campo durante los primeros 20 años de la vida de las plantaciones y con las proyecciones del modelo estas no sobrepasarán los $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ni tampoco los 50 Mg ha^{-1}

durante los primeros 100 años de vida de las plantaciones. A pesar de estos resultados tan poco impresionantes, los proyectos de restauración de la vegetación arbórea y arbustiva de las laderas degradadas de la Sierra Madre Oriental deben de continuar considerando a los pinos piñoneros en sus proyectos de reforestación porque proporcionan beneficios maderables como leña, torcería, estantes; no maderables como piñones; ambientales como desarrollo de microclimas propicios para el establecimiento de especies nativas, captura de carbono, hábitat para la fauna silvestre, etc. Las plantaciones monitoreadas durante 2002 ya contenían una producción incipiente de conos.

LITERATURA CITADA

- Bailey, R. L. and T. R., Dell 1973. Quantifying diameter distribution with the Weibull function. *For. Sci.* 19(2): 97-104.
- Benavides H. 1987. La utilidad de los pinos piñoneros en la dasonomía urbana Memorias del III Simposio Nacional Sobre Pinos Piñoneros. Saltillo, Coahuila. p. 111-115.
- Benavides M., H. M., E. García M. 1987. Potencial hídrico diario y anual de *Pinus cembroides* y *Pinus discolor* en las serranías meridionales de San Luis Potosí. En: *Strategies for classification and management of native vegetation for food production in arid zones*. Coord. Tec. E. F. Aldon; C. González V. y W. H. Moir U.S.D.A., Forest Service. Rocky Mtn. For and Rge. Exp, Sta. Gen. Tech. Rep. RM-150. 207-213 p.
- Bossel, H; *et al.*, 1989. Tropical rainforest ecosystem structure, functions and dynamics. P.35-50 in *Proc. Seminar Growth and yield in tropical mixed/moist forests*, Wan Razali Mohd; H. T.Chan, and S. Appanah (eds). *For. Res.Inst. Malaysia*.
- Bossel, H; and H. Krieger.1991. Simulation model of natural tropical forest dynamics. *Ecol.Model.*59:37-31
- Bossel, H; H. Krieger, H. Schafer, and N .Trost. 1991. Simulation of forest stand dynamics using real-structure process models.*For. Ecol.Manage.* 42:3-21.
- Botkin, D.B.1993. *Forest dynamics:An ecological model*. Oxford University Press, Oxford, U.K. 309 p.
- Brown, S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In *Actas del XI Congreso Mundial*

-
- Forestal: Recursos Forestales y Árboles. Vol 1. Natalia Turkia 13-22 October of 1997.
- Buckman, R.E. 1962. Growth and yield of red pine on Minnesota. USDA For. Serv. Tech. Bull. 1272.
- Clutter, J. L. 1963. Compatible growth and yield models for loblolly pine. For. Sci. 9 (3): 354-371.
- Clutter, J. L., J. C. Forston, L. V. Pienaar, G. H. Brister y R. I. Bailey. 1983. Timber management; A quantitative approach. Wiley, Nueva York. 333 p.
- Cohen, A. C. 1965. Maximum likelihood estimation in the Weibull distribution base on complete and censored samples. Technometrics. 7 (4): 579-588.
- Contreras C. 1997. Ecuaciones de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus duranguensis* Mart. y *Pinus teocote* Schel, et. Cham. del Ejido Vencedores, San dimas, Durango, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales UANL. 79 p.
- Corral R. S., 1999. Tecnologías matemáticas par el desarrollo de modelos de crecimiento de bosques mixtos e irregulares de Durango, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales UANL. 140 p.
- Critchfield, W. B. and Little E. L. 1966. Geographic distribution of the pines of the world. USDA Forest Service. Miscellaneous Publication No. 991. Washington, D. C. 97 p.
- Domínguez, A., Návar, J., Jiménez, J., Aguirre, O. 1995. *Pinus halepensis* Mill.: Una alternativa para la recuperación de terrenos marginales en la Sierra

Madre Oriental del nordeste de México. Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales Vol. 1 No. 4.

Domínguez, A., Návar, J., Jiménez, J. 1997. Supervivencia y crecimiento inicial de una plantación con *Pinus halepensis* Mill., *Pinus eldarica* Medw., y *Pinus brutia* Ten. En comparación con plántulas de *Pinus estevezii* (Mart.) Perry provenientes de regeneración natural en el noreste de México. Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales Vol. 6 No. 1 y 2.

Eguiluz P., T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. U. A. CH. Tesis Profesional. Chapingo, México. 623 p

Farjon B., and Styles B. 1997. *Pinus* (Pinaceae) Flora Neotropica Monografía 75. Organization for Flora Neotropica by The New York Botanical Garden New York 291 p.

Ford-Robertson, F. C. 1971. Terminology of forest science technology practice and products. Soc. Am. For. Bethesda, MD. 349 p.

Fries, J. (ed). 1974 Growth models for tree and stand simulation. Proc. IUFRO Working Party S4.01-4 meetings, 1973. Dep. For. Yield. Res; Royal Coll. For. Stockholm, Res. Note 30. 379 p.

Gatto; and S. Rinaldi: 1987. Some models of catastrophic behaviour in exploited forests. *Vegetatio* 69:213-222.

González L., H. D. y C. Flores L. 1999. Índices de calidad de sitio para regeneración de *Pinus rudis* Endl. En San José de la Joya, Galeana, Nuevo León. *Foresta-AN*. Nota Técnica No. 2. UAAAN. Saltillo, Coahuila. 12 p.

-
- González M. A. 1999. Patrones de dinámica de un ecosistema multicohoctoral de *Pinus culminicola* Andresen & Beaman y *Pinus hartwegii* Lindl. en una fracción de la Sierra Madre Oriental. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales UANL. 76 p.
- González N. 2001. Ajuste y validación de modelos para estimar biomasa y rendimiento e incremento en biomasa en plantaciones forestales del estado de Durango, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales UANL. 76 p.
- Hamilton, D. A. 1980. Modelling mortality: A component of growth and yield modelling. P. 82-99 in Forecasting forest stand dynamics, Brown, K. M., and F. R. Clarke (eds.). Proc. Workshop Sch. For., Lakehead Univ., Thunder Bay, Ontario.
- Harter, H. L. y A. H. Moore. 1965. Maximun likelihood estimation of the parameters of the gamma and Weibull populations from complete and from censored samples. *Technometrics*. 7:639-643.
- Husch B., Miller C., Beers T., 1982. *Forest Mensuration*. 3rd Ed. John Wiley & Sons, New York, 402 p.
- Kimmins, J.P.;K.A Scoullar, M.J. Apps, and W.A. Kurz. 1990. The FORCYTE experience: A decade of model development.P. 60-67 in Forest modelling symposium, Boughton,B.J; and J.K. Samoil (eds). Proc. Symp. For. Can. Inf. Rep. NOR-X-308.
- Kiviste A. K., 1988. Funciones matemáticas de crecimiento forestal. Estonian Agricultural Academy, 179 p.
- Kiviste A., Álvarez J. G., Rojo A., Ruiz A. D. 2003. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Monografías INIA: Forestal No. 4 Madrid, España 190 p.

-
- Leary, R.A. 1991. Near-normal, empirical, and identity yield tables for estimating stand growth. *Can. J. For. Res.* 21:353-362.
- Levins, R. 1996 The strategy of model building in population biology. *Am. Sci.* 54:421-431.
- Maldonado D. 2001. Modelos para evaluación de plantaciones forestales en Durango, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales UANL. 93 p.
- Martínez., M. 1948. Los pinos Mexicanos. 2ª. Edición. Botas, México 367 p.
- Navarro M., S. A., L. M. Torres E., Cano P., S Valencia M. y E. H. Cornejo O. 2000. Predicción de volúmenes de fuste para *Pinus cembroides* Zucc. En el Sureste de Coahuila. *Foresta-AN*. Nota Técnica No. 3 UAAAN. Saltillo, Coah. 16 p.
- Navar, J., J. Contreras 2000. Ajuste de las distribución Weibull a las estructuras diamétricas de rodales irregulares de pino de Durango, México. *Agrociencia*: 34:353-361
- Navar J., Jiménez J., Domínguez P. A., Aguirre O. A y Galván M., Páez A. 1996. Predicción de crecimiento de masas forestales irregulares en base a la distribuciones diamétricas en el sureste de Sinaloa, México.
- NOM-ECOL-059 2001. Que determina las especies y Subespecies de Flora y Fauna Silvestre Terrestre y Acuáticas en Peligro de Extinción, Amenazadas, Raras y las Sujetas a Protección Especial y que Establece Especificaciones para su Protección (Publicada en el D. O. F. De fecha 16 de Mayo de 1994).

-
- Parresol, R. B. 1999. Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and Critical Comparasions. *Forsest Science*, vol. 45, No. 4. 573-593p.
- Passini, M. F. 1982. Les forets de *Pinus cembrides* au Mexique. Mission archeologique francaise au Mexique. *Estudes mesoamericanes* 11-5. Edit. Recherche sur les Civilizations.
- Pastor, J., and W. M. Post. 1986. Influence of climate, soil moisture and succession on forest carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry* 2:3-27.
- Prentice, I.C. 1986. Some concepts and objectives in forest dynamics research. P.32-46 in *Forest dynamics research in Western and Central Europe*, Fanta, J.(ed). PUDOC, Wageningen.
- Prentice, I.C.; and H. Helmisaari. 1991. Silvics of north European trees: Compilation, comparisons and implications for forest succession modelling. *For. Ecol. Manage.* 42:79-93.
- Perry, J. 1991. The Pines of México and Central America. Agricultural Science Program The Rockefeller Foundation Retired 231 p.
- Romero, Y. E. 1993. Análisis de crecimiento de *Pinus patula* Sch et Cham. En diferentes niveles de competencia intraespecificas, en Huayacocotla, Veracruz. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales UACH. Chapingo, Mexico 192 p.
- Robert, M. F. 1977. Notas sobre el estudio ecológico fitogeográfico de los bosques de *Pinus cembriodes* Zucc. en México. *Ciencia Forestal.* 2 (10): 48-58.
- Rzendowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Ed. Limusa, México D. F. 432 p.

Secretaría de desarrollo Urbano y Ecología, Gobierno del Estado de Nuevo León 1998. Los incendios en Nuevo León México durante el verano de 1998. Laboratorio de Información Georreferenciada, Centro de Calidad Ambiental, ITESM Campus Monterrey; Facultad de Ciencias Forestales UANL 20 p.

SEMARNAT 2002. Campaña estatal de protección contra incendios forestales 2002, resultados finales. Subdelegación de Gestión para la protección Ambiental y Recursos Naturales, SEMARNAT Delegación Federal en Nuevo León.

Schumacher, F. X., Y F. S. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. J. Agric. Res. 47:719-734.

Shugart, H.H. 1984. A theory of forest dynamics. Springer Verlag, New York.

Sievanen, R;T.E. Burck, and A.R. Ek. 1988. Construction of a stand growth model utilizing photosynthesis and respiration relationships in individual trees. Can.J.For.Res.18:1027-1035.

Suzan A. H. 1987. Estudios ecológicos en *Pinus nelsonii* de Tamaulipas. II Simposio Nacional Sobre Pinos Piñoneros. México pag. 200-210.

Valdez L. R. J. 2003. Predicción del rendimiento en masas específicas de *Pinus duranguensis* Mtz. en el estado de Durango.

Vallejo G. E. 1997. Asociación de variables dasonómicas a diferentes niveles de producción de conos en el pino piñonero *Pinus cembriodes* Zucc. en el sur de Nuevo León, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales UANL. 119 p.

- Vancly J. K., 1994. Modelling forest growth and yield; applications to mixed tropical forest. Centre for Agriculture and Biosciences International Wallingford, U. K. 312 p.
- Vargas B. 1999. Caracterización de la productividad y estructura de *Pinus hartwegii* Lindl. En tres gradientes altitudinales en el cerro Potosí, Galeana, Nuevo León. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales UANL. 93 p.
- Vuokila, Y. 1965. Functions for variable density yield tables of pine based on temporary sample plots. Commun. Inst. For. Fenn. 60:1-86.
- Woerner, M. 1990. Los suelos del Bosque-Escuela de la UANL en la Sierra Madre Oriental, Iturbide, N. L. Reporte Científico No. 20 Facultad de Ciencias Forestales. UANL Linares, Nuevo León 90 p.
- Yarie, J. 1990. Role of computer models in predicting the consequences of management on forest productivity. P. 3-18 in Impact of intensive harvesting on forest site productivity, Dyck, W. J., and C. A. Mess (eds.). Proc. IEA/BE-A3 Workshop. For. Res. Instit., Rotoura, New Zeland, FRI Bull. No. 159.
- Zepeda B., A. Mireles 2000. Incremento y rendimiento maderable de *Pinus montezumae* Lamb., en San Juan Tetla, Puebla. III Congreso Mexicano de Tecnología de Productos Forestales en Durango. Madera y Bosques Vol. 6 Num. 1. pag. 15-27.
- Zeide B., 1993. Análisis of growth equations. For. Sci. 39, 594-616.

