

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCION DE POSTGRADO



Ajuste y Validación de Modelos para Estimar Biomasa y Crecimiento de
Biomasa en Plantaciones Forestales del Estado de Durango México.

TESIS DE MAESTRIA

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

PRESENTA

ING. NICOLAS GONZALEZ BARRIENTOS.

Linares, Nuevo León, México.

Junio de 2001

TM

Z599

FCF

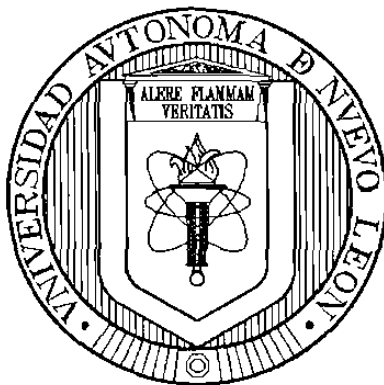
2001

G6



1020145410

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCION DE POSTGRADO



**Ajuste y Validación de Modelos para Estimar Biomasa y Crecimiento de
Biomasa en Plantaciones Forestales del Estado de Durango México.**

TESIS DE MAESTRIA

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

PRESENTA

ING. NICOLAS GONZALEZ BARRIENTOS.

Linares, Nuevo León, México.

Junio de 2001

-60860

TM
25 -1
F1F
2001
G6



FONDO
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**

**Ajuste y Validación de Modelos para Estimar Biomasa y Crecimiento de
Biomasa en Plantaciones Forestales del Estado de Durango, Méx.**

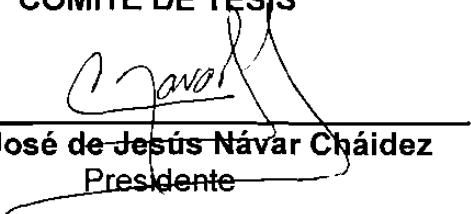
TESIS DE MAESTRIA

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

PRESENTA

ING. NICOLAS GONZALEZ BARRIENTOS

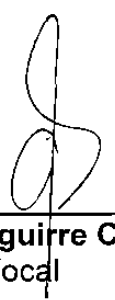
COMITÉ DE TESIS



Ph. D. José de Jesús Nívar Cháidez
Presidente



Dr. Pedro A. Domínguez Calleros.
Secretario



Dr. Oscar Aguirre Calderón.
Vocal

Linares, Nuevo León, México.

Junio de 2001

DEDICATORIA

A MIS PADRES

Alfonso González Reyes y Francisca Barrientos Domínguez (†) por darme siempre lo mejor de ellos mismos, por la confianza y el apoyo brindado a través de todos los años y etapas de mi vida.

A MI ESPOSA

Mague, por el apoyo y comprensión incondicional que me brindó siempre en la realización de mis estudios y sobre todo por compartir los buenos y amargos momentos, dándome siempre palabras de aliento para proseguir y llegar a las meta que me propuse desde el inicio de mis intenciones.

A MIS HIJOS

Luis Carlos, Francisco Saúl y Alan Emmanuel por las satisfacciones que me han dado cada uno de ellos y sobre todo por el animo que siempre me han transmitido con palabras de aliento en momentos de debilidad emocional .

A MIS HERMANOS

Gloria Edith(†), Irma, Ma. Guadalupe, Elizabeth, Silvia, David, Alfonso, Raúl, Adrián, Rubén, Agustín, que si bien ausentes físicamente, siempre fueron solidarios en mis deseos de superarme.

A todas las personas que de alguna manera u otra contribuyeron para lograr mis propósitos, a ellos siempre gracias.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (D.G.E.T.A), por darme las facilidades para llevar a cabo los estudios de Maestría en Ciencias Forestales y la prorroga de tiempo para realizar la preparación y elaboración de Tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de beca, durante el periodo de estudios de Maestría y extensión para la respectiva Titulación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del proyecto 28536-B titulado Tecnologías Computacionales Interactivas para el Manejo Forestal Sustentable por el apoyo económico para la realización del trabajo de Tesis.

Al Programa de apoyo PAICyT que a través del proyecto de investigación CN 323 00 financió parcialmente el proyecto de Tesis.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), por otorgarme ayuda económica, la cual se destinó para gastos de insumos y otros rubros para elaborar la Tesis, que fueron desde la toma de datos en el campo hasta el encuadernado de la misma.

Al Ph D. José de Jesús Navár Cháidez., *Director de éste trabajo de tesis*, que estuvo siempre pendiente de dar la orientación y la supervisión adecuada en todo momento, como también el de verter sus observaciones y consideraciones oportunas para el tema desarrollado.

Al Dr. Oscar Aguirre Calderón por la disposición de formar parte del comité de tesis, por la revisión del escrito y por las sugerencias para que ésta se enriqueciera mas.

Al Dr. Pedro Antonio Domínguez Calleros por ser asesor del presente trabajo, por la revisión del mismo, así como el estar pendiente de tenderme la mano cuando lo requería.

A los maestros de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, quienes dieron de sí, sin egoísmos sus conocimientos

A las familias Nívar Mendiola y Graciano Estrada por brindarme su amistad y hospitalidad incondicional.

Al personal directivo, técnico y de apoyo de la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal No. 6, como también a las autoridades ejidales de la región del Salto P.N. Dgo, México., por las facilidades otorgadas y la participación que tuvieron en la toma de información de campo.

Al M.C. Clemente Estrada Márquez por aceptar ser mi asesor externo y que además me impulsó y dio ánimos desde el inicio para salir avante en la meta que me propuse.

A mis amigos Jesús Graciano, David Maldonado, Eduardo Méndez, Jorge Méndez, Félix Cervantes, Javier Corral por el apoyo en todos los momentos de mi estancia en la Facultad

A los que me ayudaron en la toma de datos en el campo: Cesar, Jorge, Blas, Pepe y chino Tovalín del Salto P.N. Dgo; apoyo brindado durante el tiempo que duró la recolección de datos los cuales fueron base para el presente estudio.

A todos mis compañeros y amigos que conforman la plantilla de trabajadores del C.B.T.F. No. 4 de Durango, que de alguna manera directa o indirectamente mostraron solidaridad con el deseo propio expresado de superarme profesionalmente, demostrándolo siempre con hechos mediante el logro de los objetivos de nuestra Institución.

C O N T E N I D O

Contenido	i
Índice de cuadros	iv
Índice de figuras	v
Resumen	vii
Abstract	viii
CAPITULO I	
Introducción	1
CAPITULO II	
Objetivos.....	8
2.1 Objetivo general.....	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
2.3 Hipótesis.....	8
CAPITULO III	
Revisión de literatura	10
3.1 El ciclo del carbono en la tierra.....	10
3.2 Principales almacenes de CO ₂ en la tierra	11
3.2.1 Bosques	11
3.2.1.1 Almacenamiento de carbono en diferentes latitudes	11
3.2.2 Océanos y mares	13
3.3 Cambios importantes de CO ₂ entre almacenamientos	14
3.3.1 Quema de combustibles fósiles	14
3.3.2 La generación de energía eléctrica	15

3.3.3 Los cambios del uso del suelo	15
3.4 Cambios del CO ₂ en la atmósfera	16
3.4.1 Efectos del incremento del CO ₂ en la atmósfera.....	16
3.4.2 Dióxido de carbono y el efecto invernadero	18
3.5 El protocolo de Kyoto.....	18
3.6 Biomasa.....	19
3.7 Descripción de las especies de estudio.....	20
3.7.1 <i>Pinus cooperi</i> var. <i>Ornelasii</i> (Martínez)	20
3.7.2 <i>Pinus dunangensis</i> (Martínez).....	21
3.7.3 <i>Pinus arizónica</i> (Engelmanni Carr).....	21
3.7.4 <i>Pinus cooperi</i> var. <i>Blancoi</i> (Blanco)	22
3.7.5 <i>Pinus engelmanni</i> (Carr)	22
 CAPITULO IV	
Materiales y métodos.....	24
 4.1 Caracterización física del área de estudio	24
4.1.1 Localización	24
4.1.2 Topografía.....	24
4.1.3 Geología.....	24
4.1.4 Suelos	26
4.1.4.1 Descripción de los suelos en a región de El Salto Dgo	26
4.2 Caracterización climática	27
4.2.1 Clima	27
4.2.1.1 Descripción de los tipos de climas en la región de El Salo Dgo ..	27
4.2.2 Precipitación.....	28
4.3 Caracterización biótica	28
4.3.1 Vegetación	28
4.3.1.1 Bosques de pino.....	29
4.3.1.2. Bosque de pino-encino	30
4.3.1.3 Bosque encino – pino	30

4.3.1.4 Bosque de encino	31
4.3.2 Especies de importancia económica	31
4.3.2.1 Maderables	31
4.3.3 Fauna	32
4.4 Metodología general de campo y laboratorio	32
4.4.1 Análisis estadísticos	35

CAPITULO V

Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México	37
Resumen	37
Abstract	37
Introducción	38
Materiales y métodos	39
Muestreo	40
Procedimiento	40
Resultados y discusión	43
Conclusiones	49
Reconocimientos	50
Referencias	50

CAPITULO VI

Ecuaciones para estimar el rendimiento e incremento en biomasa total en plantaciones forestales de Durango, México	53
Resumen	53
Abstract	53
Introducción	54
Materiales y métodos	54
Muestreo	56

Procedimiento	57
Resultados y discusión	59
Modelo 1 al nivel del rodal	59
Modelo 1 al nivel del rodal	60
Modelo al nivel de los árboles individuales	63
Conclusiones	64
Reconocimientos	64
Referencias	64
CAPITULO VII	71
Bibliografía complementaria	71

INDICE DE CUADROS

CAPITULO IV

Cuadro 4.1 Características de ubicación e información dasométrica de las parcelas estudiadas en plantaciones de la región de El Salto, Durango, México	33
Cuadro 4.2 Características dasométrica de <i>Pinus durangensis</i> por parcela en plantaciones forestales de Durango, México	34
Cuadro 4.3 Características dasométrica de <i>Pinus cooperi</i> ornelasi por parcela en plantaciones forestales de Durango, México	35

CAPITULO V

Cuadro 1 Parámetros dasométricos promedio de especies del genero <i>Pinus</i> de la Sierra Madre Occidental del norte de México	40
Cuadro 2 Estimadores promedio de estadísticos de bondad de ajuste para seis ecuaciones aditivas para dos especies de pino de Durango, México	44

Cuadro 4 Estimadores estadísticos de ajuste y de la biomasa total (Kg de todos árboles) por cada procedimiento de estimación de parámetros en dos especies de pino de Durango, México..... 47

Cuadro 5 Resultados de la validación de los modelos generados con técnicas aditivas y no aditivas para estimar biomasa total en especies de pino plantadas en Durango, México 48

CAPITULO VI

Cuadro 1 Parámetros dasométricos promedio de coníferas del género *Pinus* de la Sierra Madre Occidental del norte de México 55

Cuadro 2 Ecuaciones para predecir parámetros de la distribución probabilística Weibull ajustada a los diámetros de 18 rodales plantados con 4 especies de pino en Durango, México..... 61

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO VI

Figura 1 Índices de sitio para las 23 parcelas plantadas en la región de El Salto, Durango, México..... 67

Figura 2 Los modelos de rendimiento e incremento en biomasa para 18 parcelas plantadas con 5 especies en la región de El Salto, Durango, México 68

Figura 3 Distribución Weibull ajustada a las estructuras diamétricas con *Pinus durangensis* en la región de El Salto, Durango 69

Figura 4 Densidad de la regeneración observada y modelada para cada una de las parcelas observadas en la región de El Salto, Durango 70

RESUMEN

En este trabajo de investigación se estimaron los almacenamientos de la biomasa y su rendimiento e incremento en plantaciones forestales como una forma de estimar el almacén y su tasa de captura de bióxido de carbono. Para esto se desarrollaron ecuaciones de biomasa al nivel de la especie y para el grupo de especie con ecuaciones alométricas que reúnen los requisitos de aditividad. Para estimar el rendimiento e incremento en biomasa se probaron tres tipos de modelos utilizados convencionalmente en la estimación del volumen forestal. Los modelos desarrollados en regresión sin relación para cada componente de biomasa sin relación estimó con mayor precisión la biomasa de las especies probadas. De los modelos de rendimiento e incremento, se determinó que el modelo basado en árboles individuales independientes de la distancia proveen las mejores estimaciones de la tasa de almacenamiento en biomasa total y por consiguiente en captura de bióxido de carbono. Estos modelos deben de ser utilizados preliminarmente en la estimación del almacén y captura de carbono en plantaciones forestales de Durango, México.

Palabras Clave: Modelos de Biomasa, Rendimiento e Incremento en Biomasa, Plantaciones Forestales, Bióxido de Carbono, Sierra Madre Occidental, Durango, México.

ABSTRACT

In this research we estimated biomass storage and the rate of sequestration in forest plantations as the main compartment of carbon dioxide. To accomplish this task, biomass equations and biomass growth and yield were developed. The first set of equations meets the additivity requirements of allometric equations. To estimate biomass growth and yield, we tested three modeling technologies conventionally used to estimate volume or basal area growth and yield. Biomass models developed in seemingly unrelated regression fitted more precisely observed biomass for all species tested. The biomass growth and yield model based on individual trees, independent of the distance, provided the best estimation of biomass growth and yield and therefore the rate of carbon dioxide sequestration. These models must be used to preliminary estimate carbon dioxide storage and the rate of sequestration in forest plantations of Durango, Mexico.

Key words: Biomass models, biomass growth and yield, Forest Plantations. Carbon Dioxide, Western Sierra Madre Mountain Range, Durango, Mexico.

CAPITULO I

INTRODUCCION

La acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre ha venido incrementándose desde el comienzo de la revolución industrial, debido principalmente en gran medida a actividades humanas como son la combustión de combustibles fósiles y el cambio del uso de la tierra.

La concentración del dióxido de carbono (CO_2), considerado como el principal gas de efecto invernadero emitido por las actividades humanas, aumentó en casi 80 partes por millón por volumen (ppmv) entre 1880 y 1994, aunque fluctuó en torno a 10 ppmv durante los 1000 años anteriores (Schimel et al., 1996). Es difícil determinar con precisión los efectos del incremento de los gases de efecto invernadero en la estructura mundial, aunque se ha registrado un aumento de la temperatura media de la superficie terrestre y el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC) ha llegado a la conclusión de que “la pruebas de que se dispone indican que existe una influencia humana perceptible en el clima” (Houghton et al., 1996).

Los bosques pueden actuar como depósitos, sumideros y fuentes de gases de efecto invernadero, por lo cual, tienen gran importancia en la moderación del intercambio neto de este tipo de gases entre la tierra y la atmósfera. Los bosques actúan como depósitos almacenando carbono en la biomasa y el suelo. Son sumideros de carbono cuando aumenta su extensión o productividad, que dan lugar a la absorción de CO_2 atmosférico.

A la inversa, actúan como fuentes emisoras cuando la quema y decadencia de la biomasa y la perturbación del suelo producen emisiones de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero. En la actualidad, las emisiones netas de CO₂ por los cambios registrados en el uso de la tierra (principalmente la deforestación que tiene lugar sobre todo en las zonas tropicales) suponen aproximadamente el 20 por ciento de las emisiones mundiales de CO₂ de origen humano (Schimel *et al.*, 1996).

Actualmente, la deforestación de casi 17 millones de hectáreas por año causa emisiones anuales a la atmósfera de 1.8Gt de carbono como bióxido de carbono, gas que mayor contribución tiene en el calentamiento global. Esto representa el 20% del total de bióxido de carbono emitido por el hombre. Sin embargo, cuando los bosques son renovados o conservados pueden servir como depósitos para el bióxido de carbono. La captura de carbono por medio de la forestación posibilita una racionalidad económica que permite reducir el calentamiento global y preservar los recursos forestales.

Diversas prácticas relacionadas con el sector forestal pueden ser agrupadas en función de su contribución a reducir la acumulación de CO₂ en la atmósfera (Brown *et al.*, 1996), dentro de las cuales destacan la conservación, almacenamiento y sustitución.

Practica de conservación. Se pueden mantener los niveles de carbono existentes en los bosques mediante la preservación forestal, la explotación sostenible y el aumento de la productividad en las tierras agrícolas las que puede reducir la tasa de deforestación y la degradación forestal e impedir las emisiones conexas de CO₂.

Practica de almacenamiento. Las actividades que aumentan el carbono almacenado en los bosques y los productos forestales incluyen la ampliación de la superficie forestal, el incremento del carbono forestal almacenado por unidad de

superficie a través de medidas silvícolas (por ejemplo, turnos más largos, mayor densidad de árboles, reducción del impacto de la explotación) y la prolongación del tiempo durante el cual se utiliza la madera extraída. Estas actividades ocasionan una absorción neta de CO₂ de la atmósfera. Dentro de esta área se incluyen las plantaciones forestales.

Practica de sustitución. La sustitución de combustibles fósiles por leña procedente de bosques ordenados de forma sostenible produce un beneficio respecto de CO₂ cuando las emisiones derivadas de la combustión de la biomasa se compensan con su crecimiento y se evitan las emisiones procedentes de la combustión de combustibles fósiles. La utilización de productos de madera en lugar de otros productos de alto consumo energético, como el acero y el cemento, pueden reducir las emisiones de CO₂ de las industrias manufactureras.

Los beneficios en materia de CO₂ que reportan estas estrategias de ordenación varían considerablemente en el tiempo, magnitud y permanencia. Por ejemplo, el tiempo y magnitud de los beneficios derivados del aumento de la producción forestal (la estrategia del almacenamiento) dependen de la tasa y duración del crecimiento de la biomasa. En el caso de los proyectos de conservación y almacenamiento, la permanencia depende de la protección de los depósitos de carbono frente a las amenazas naturales (los incendios forestales, las tormentas y enfermedades) y las amenazas humanas (tala de bosques para dedicarlos a otros usos). Por ejemplo, los beneficios de la conservación de los bosques respecto del CO₂ pueden no conseguirse si el bosque se quema o se le somete a una explotación excesiva, o si un menor índice de extracción de madera en un bosque determinado da lugar a un aumento de la misma en otro bosque. En el caso de la sustitución de los combustibles fósiles por leña, los beneficios tienen lugar cuando se evita la combustión de los combustibles fósiles. Esos beneficios se consideran permanentes y la sustitución del combustible fósil se puede conseguir repetidas veces, con ciclos constantes de explotación forestal. Los beneficios respecto del CO₂ derivados de la sustitución por productos de madera varía en función del tipo y calidad del material

desplazado, de la vida útil del producto (incluido el reciclado) y del método utilizado para la eliminación del producto de madera.

Sin duda, cada una de las tres estrategias de ordenación forestal a las que se ha hecho referencia tiene unas determinadas ventajas comparativas. Por ejemplo, el aumento de la producción de madera para la estrategia de almacenamiento o de sustitución supondrá, previsiblemente, una menor existencia de carbono forestal que la estrategia de conservación. A la inversa, intensificar al máximo la protección de los bosques puede contribuir a aumentar la utilización de combustibles fósiles no renovables y de materiales distintos de la madera intensivos desde el punto de vista de la emisión. La estrategia de sustitución puede ser la más apropiada cuando la tasa de crecimiento de la biomasa es elevada y ésta desplaza a los combustibles o productos con emisiones muy intensas.

En el caso de los bosques primarios de regiones en las que los procesos de extracción y elaboración son ineficientes, la conservación de los bosques puede reportar más beneficios en cuanto al CO₂ que la estrategia de sustitución. Sin embargo, es importante comprender que esas estrategias de ordenación no son siempre mutuamente excluyentes. Por ejemplo, la forestación, combinada con la extracción subsiguiente, puede producir beneficios en materia de emisiones de CO₂ cuando la madera extraída desplaza la utilización de combustibles fósiles o compensa la demanda de madera de bosques maduros con un gran volumen de biomasa en pie.

La utilización de los bosques para mitigar las emisiones de CO₂ exigirá contabilizar todas las fuentes y sumideros de carbono a lo largo del tiempo y analizar pormenorizadamente otros criterios ambientales y socioeconómicos que influyen en las decisiones relativas a la ordenación forestal. En teoría, el efecto de la captura de carbono puede ser cuantificado estimando el almacenamiento de carbono en la biomasa forestal, ya que las plantas verdes absorben el carbono de la atmósfera a través de la fotosíntesis separando el átomo de carbono de los átomos de oxígeno.

El oxígeno es devuelto a la atmósfera y el carbono es empleado para producir la biomasa en forma de raíces, tallos y follaje (Tipper, 1996; Brown, 1996). Afortunadamente éstos servicios ambientales que proveen los bosques están siendo apreciados cada vez mas durante los últimos años (Kari, 1998).

Los bosques nativos de coníferas de la Sierra Madre Occidental del estado de Durango, México han estado incluyendo plantaciones forestales con especies de coníferas regionales para recuperar terrenos degradados, áreas incendiadas y sobrepastoreo. Los servicios ambientales generados por estas plantaciones no se han considerado en detalle. Según cálculos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente el incremento anual neto de CO₂ en la atmósfera es de unos 3 000 millones de toneladas de equivalente en carbón. Si un metro cubico de crecimiento de la biomasa forestal (tronco, raíces, ramas) absorbe 0.26 toneladas Carbón equivalente (Brown et al 1968, citado por Kyrklund, 1990), para compensar el aumento de contenido de CO₂ en la atmósfera, se necesitarían 465 millones de hectáreas de bosque nuevo en zonas en que el crecimiento medio sea de 15 m³ ha⁻¹ año.

LAS PLANTACIONES FORESTALES EN MEXICO

México ha estado impulsando las plantaciones forestales como una oportunidad de revertir la difícil situación que afecta el desarrollo forestal nacional. Esta actividad no solo contribuiría a restaurar el equilibrio ecológico, económico y social en regiones, sino podría hacer de esta actividad, en el mediano plazo, una de las más importantes de la economía nacional. El país tiene grandes oportunidades de convertirse en una potencia silvícola si se aprovechan adecuadamente sus bosques y selvas nativas, así como el potencial natural que se tiene para el desarrollo de las plantaciones.

Se estima que se pudiera incrementar un período de 10 a 15 años la producción de madera en 200 %, con un incremento de sólo 2% en la superficie de bosques. Esta perspectiva resalta la importancia del establecimiento de plantaciones

forestales. Se ha estimado que México cuenta con 8.1 millones de hectáreas con condiciones óptimas de clima y suelo para el establecimiento de plantaciones forestales. Las regiones que por sus condiciones climáticas, de *infraestructura*, planta industrial y tradición forestal pudieran contar con el mayor potencial son: Norte (Chihuahua y Durango), Pacífico - Centro (Jalisco y Michoacán) y Golfo - Sudeste (Veracruz, Tabasco, Campeche, Chiapas, Oaxaca, Yucatán y Quintana Roo. En esta última región se localizan más de 5 millones de hectáreas, con características óptimas para el desarrollo de especies tropicales, técnicamente viables para su cultivo y aprovechamiento.

Las plantaciones forestales además de capturar CO₂:

A). - Recuperan directamente áreas perturbadas y se pueden realizar en armonía con el medio ambiente, ajustándose a la diversidad de las condiciones agroecológicas.

B) - Esta actividad por su período de maduración de largo plazo obliga a una reinversión no sólo al medio natural que incide en la producción, sino también al bienestar social de la región, propiciando el arraigo de la población.

C) - El desarrollo de este tipo de proyectos contribuye al crecimiento económico y a que satisface la demanda interna de productos forestales específico a precios competitivos, lo que permite reducir el déficit de la balanza comercial y contribuir al PIB nacional.

Contribución al entorno natural

El establecimiento de plantaciones forestales proporciona bajo esquemas de manejo adecuados las condiciones para el restablecimiento de algunos nichos ecológicos perdidos, y la conservación y desarrollo de flora y fauna.

El establecer una masa arbórea densa permite:

- Reducir los procesos erosivos
- Formación de suelo

- Regula el ciclo Hidrológico.
- Contribuye a la recarga de los mantos acuíferos.
- Mejora la calidad del agua.
- Proporciona las condiciones escénicas.
- Permite la fijación de carbono de la atmósfera.
- Producción de oxígeno.

Estos beneficios adicionales tampoco se han cuantificado en detalle. Se percibe que las plantaciones forestales deben de modelarse en rendimiento e incremento para poder estimar los valores económicos generados por la producción de biomasa para diferentes propósitos dentro de los cuales destacan la captura de CO₂. Por esta razón, este trabajo pretende contribuir al conocimiento del modelaje de la estimación de la biomasa, el incremento y rendimiento en biomasa como una forma de cuantificar el almacén y tasa de captura de CO₂ por las plantaciones forestales del Estado de Durango, México.

CAPITULO II

OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1 Objetivo general

Desarrollar y ajustar ecuaciones matemáticas para estimar la 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 de el Salto P.N. Dgo., México.

2.2 Objetivos específicos

1. Generar, ajustar y comparar modelos para estimar los diferentes componentes de la biomasa aérea del árbol para plantaciones del genero *Pinus* ubicadas en la región sudeste del Estado de Durango.

2. Generar, ajustar y probar tres modelos para estimar el rendimiento e incremento de la biomasa total de dos especies forestales de la Sierra Madre Occidental de la región mencionada.

3. Estimar la cantidad de carbono capturado en la biomasa foliar, ramal y fustal a nivel especie y árbol individual en plantaciones forestales del género *Pinus* ubicadas en la región sudeste del Estado de Durango, México.

2.3 Hipótesis

Las especies y parcelas plantadas con el género *Pinus* consideradas en el presente estudio almacenan y capturan CO₂ a través de la fotosíntesis integrándolo como biomasa en las hojas, ramas, y fustes a una tasa similar en tiempo y en espacio.

CAPITULO III

REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 El ciclo del carbono en la Tierra

El carbono (C) al igual que el agua, se encuentra en constante movimiento en la biosfera: atmósfera – vegetación suelo - atmósfera. El ciclo del carbono es particularmente importante, puesto que se encuentra presente en todas las células vivas. Dicho ciclo gira especialmente alrededor del dióxido del carbono, porque aunque su porcentaje es muy bajo, los flujos existentes entre compartimentos son importantes, además de que éste es el material predominante en la atmósfera entre las especies que contiene carbono. El ciclo funciona básicamente a través de la fotosíntesis, la respiración, las emisiones por combustión de combustibles fósiles y las erupciones volcánicas (Raiswell et al., 1983 citado por Ludevid, 1997) . El ciclo global del carbono es considerado como uno de los ciclos biogeoquímicos mas importantes, debido a su papel en la regulación de la concentración en la atmósfera de CO₂, uno de los principales gases de efecto de invernadero. Los océanos y los seres vivos que viven en ellos, desempeñan un papel central en el ciclo del carbono y de otros nutrientes. Contienen más del 90% del carbón y de los nutrientes no sedimentarios de la Tierra y se cree que eliminan al menos la mitad de las emisiones de dióxido de carbono presentes en la atmósfera debidas a la actividad humana. En la vegetación, el C se almacena en la biomasa, por el proceso fotosintético (captura de CO₂ para formar carbohidratos), se transfiere hacia el suelo, por procesos de incorporación y degradación de materia orgánica y hacia la atmósfera, por los procesos de respiración (oxidación de carbohidratos para liberar CO₂) y degradación también de la materia orgánica (Tipper, 1996). Por lo tanto , la

fotosíntesis y la respiración son procesos importantes en el flujo de CO₂ en la biosfera.

3.2 Principales Almacenes de CO₂ en la Tierra

3.2.1 Bosques

Los bosques son los almacenes mas importantes del mundo y son responsables por la mayor parte de los flujos de carbono entre la tierra y la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración (Tipper, 1996). Aproximadamente el 90% de la biomasa acumulada en la tierra se encuentra en los bosques en forma de fustes, ramas, hojas, raíces y materia orgánica (Raev *et al.*, 1996; Leith y Whitacker, 1975). Se estima que la producción neta anual de biomasa a nivel mundial oscila entre 50 a 75 X 10⁹ t (Roeb y Fuhr, 1990; Letith y Whitacker, 1975; citado por Nájera, 1999). A nivel mundial los bosques contienen alrededor de 830 Pg C (1 Pg = 10¹⁵ g) en la vegetación y en el suelo, con 1.5 veces aproximadamente más en el suelo que en la vegetación. Este parámetro (830 Pg C) es una indicación de la capacidad de la vegetación para acumular materia orgánica. Su importancia se debe a la influencia que tiene la biomasa vegetal en las relaciones de luz y temperatura de toda la comunidad biótica, en la intercepción del agua de lluvia, en la proporción de transpiración por unidad de superficie y en la circulación de nutrientes en el ecosistema. Durante los años 80, el análisis de las provisiones de C demostró que los bosques de los países templados y boreales constituían un sumidero neto de C atmosférico de unos 0.7 Pg año⁻¹ (Brown, 1997).

3.2.1.1 Almacenamiento de C en diferentes latitudes

La reserva total de C en los bosques de latitudes elevadas es de unos 278 Pg, o mil millones de toneladas métricas), no incluyendo a los países nórdicos que forman parte de Europa (los países nórdicos podrían añadir otros 10 Pg C). La reserva de C en el suelo, predomina sobre la reserva total de C en los bosques de la

zona boreal (71% de la reserva total). Los bosques de la Unión Soviética contienen la mayor parte de C de esta zona (63%). La zona de latitudes elevadas se estima que representa un sumidero de C de $0.48 \pm 0.2 \text{ Pg año}^{-1}$ correspondiendo prácticamente todo a la Unión Soviética. La captación de C en los bosques de Canadá ha venido disminuyendo desde principios de los años 1980, como resultado del aumento de las perturbaciones debido a los aprovechamientos, plagas de insectos e incendios (Kurz y Apps 1996). El efecto de la mayor perturbación es el aumento de las reservas de materia orgánica muerta que se traduce en emisiones superiores de C debido a la descomposición subsiguiente de este material.

Los bosques de latitudes medias contienen 120 Pg de C en la vegetación y el suelo, representando el suelo alrededor de 58% del total. Los bosques de latitud media se estima un sumidero de C de $0.26 \pm 0.1 \text{ Pg año}^{-1}$ FAO (1995). Los bosques de latitudes medias y de latitudes elevadas, son en su mayor parte sumideros de C debido a que: (1) están, como promedio, compuestos de clases de edad relativamente jóvenes con tasas superiores de producción neta ya que se recuperan de anteriores perturbaciones humanas y naturales; (2) una mayor proporción de estos bosques están sujetos a una ordenación intensa; (3) algunas áreas pueden estar respondiendo a unos niveles superiores de CO_2 y nitrógeno (Brown et al. 1997).

Los bosques tropicales o de baja latitud contienen alrededor de 428 Pg C o 52% de las reservas de C de todos los bosques del mundo.

El flujo neto estimado de C de los bosques mundiales es fuente de $0.9 \pm 0.5 \text{ Pg año}^{-1}$, o sea alrededor de la cuantía producida por la quema de combustibles fósiles y la fabricación de cemento (Robinson 1989).

3.2.2 Océanos y mares

Buena parte del ciclo del carbono tiene lugar en el agua, donde enormes cantidades de organismos acuáticos fotosintéticos lo fijan en moléculas orgánicas, mientras que otros lo liberan mediante la respiración. Algunos científicos calculan que la mitad del CO_2 que circula se encuentra absorbido por los océanos. En los océanos, en condiciones naturales, existen ecosistemas en perfecto equilibrio. Se considera que cerca del 80% de los organismos del orbe, cuya actividad es fundamental para la conservación de las condiciones vitales sobre el planeta, habitan en los mares. En el océano, mediante la fotosíntesis que realiza el fitoplancton, se genera la materia orgánica, que una vez elaborada, es transferida con pérdidas a los animales, a través de complejas cadenas alimenticias. Además, éste produce, por medio de la fotosíntesis, aproximadamente el 70% del oxígeno del planeta. Los mares tienen funciones importantes como reguladores de una serie de finos mecanismos que gobiernan el mantenimiento de la vida, tales como la regulación de la temperatura, la dinámica atmosférica y el intercambio de gases con la atmósfera, del cual dependen la fotosíntesis y la respiración (Vizcaino, 1987). El bióxido de carbono liberado pasa a formar compuestos como los carbonatos, muchos de estos carbonatos se encuentran sobre el fondo marino arrastrados por los organismos que mueren y caen a las profundidades. Una serie de reacciones carbonato \rightleftharpoons bicarbonato ocurren constantemente en el agua. Los sedimentos calcáreos contienen mucho de esos compuestos y así, el carbono permanece depositado en el fondo marino, pues estos compuestos se disuelven muy lentamente. Los océanos desempeñan un papel importante en la abundancia del oxígeno y el dióxido de carbono necesarios para los procesos vitales. En cierto modo, los océanos representan una gran cubeta de reacción, que es el destino final de todo el material hecho partículas y disuelto (Ludevid, 1997). Los océanos tienen una enorme capacidad calorífica y de transporte; por ello, tienen una gran influencia en la moderación de las fluctuaciones y los gradientes de latitud de temperaturas, una influencia importante para la química y la biología globales (NASA, 1986., citado por Ludevid, 1997).

3.3 Cambios Importantes de CO₂ entre Almacenamientos

El papel de los ecosistemas terrestres es asimismo esencial. Son claves, en este sentido, los procesos físicos y biológicos que ordenan la circulación de los elementos en la biosfera. Aspectos tales como la productividad y la evolución de las especies vegetales, animales y bacteriológica, la composición interna de la corteza terrestre o la presencia de la acidez del agua dulce, son aspectos cruciales en el funcionamiento de los ciclos.

Los gases presentes en las capas más bajas de la atmósfera son componentes claves de los ciclos biogeoquímicos y, en ocasiones, desempeñan un papel importante en la transmisión de la radiación solar y/o terrestre y constituyen un vínculo con el sistema climático.

3.3.1 Quema de Combustibles Fósiles

Se entiende por combustibles fósiles el carbón mineral, el petróleo (y sus derivados) y el gas natural. Por lo que, la causa principal de origen humano del cambio global es el consumo de estos combustibles. Se calcula que el 77% de las emisiones de dióxido de carbono de origen humano provienen del consumo y el procesamiento de estos combustibles fósiles (Holdren 1989, citado por Ludevid 1997). Esta tendencia se asocia al desarrollo industrial. Se ha estimado que el consumo de los combustibles fósiles añade cada año 5 Pg de CO₂ a la atmósfera (Ludevid, 1997). Si este consumo sigue aumentando en el futuro al ritmo actual (entre 1 y el 2% anual desde 1973), la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera sería, en el año 2100, un 100% mas elevada que en la época preindustrial (Holdren, 1991). El consumo de combustibles fósiles significa, también, en menor medida, la emisión a la atmósfera de metano y de óxido de nitrógeno, gases que contribuyen a la intensificación del efecto invernadero.

Los responsables de la lluvia ácida son los óxidos de azufre y de nitrógeno que se acumulan en la atmósfera a consecuencia de las emisiones precedentes, entre otras fuentes, de la quema, del procesamiento y el transporte de combustibles fósiles. La principal causa de las emisiones de óxido de azufre se relaciona también con el uso de combustibles fósiles. También en el caso de la lluvia ácida, la combustión de carbón es más nociva que la del petróleo. La combustión de gas natural parece ser que tiene efectos mucho menores respecto a la lluvia ácida (Husar, 1986). Los transportes son los causantes del mayor porcentaje de contaminación atmosférica en las áreas urbanas de todo el mundo.

En Estados Unidos, por ejemplo, 100 millones de vehículos queman anualmente 250 mil millones de combustible y arrojan toneladas de monóxido y dióxido de carbono y de hidrocarburos según la Agencia de Protección Ambiental causaron el 60% de la contaminación atmosférica en 1970, suma que llegó al 80% en algunas zonas urbanas (Vizcaíno, 1987).

3.3.2 La generación de energía eléctrica

La primera fuente antropogénica de emisiones la constituye la producción de electricidad por parte de centrales térmicas alimentadas por combustibles fósiles (carbón ó derivados del petróleo). La introducción de la generación térmica de electricidad en el consumo de combustibles fósiles, esencialmente carbono almacenado, y la emisión creciente de dióxido de carbono, al cual por lo general se le atribuyen los cambios en la atmósfera.

3.3.3 Los cambios del uso del suelo

Se entiende por cambio de uso de la tierra el propósito productivo a que se dedica o se subordina la corteza terrestre. Dicho de otro modo, los medios a través de los cuales los seres humanos se apropian a la producción primaria neta (Meyer, 1992). Las consecuencias negativas para el medio ambiente global son muy

diversas. Las principales son la pérdida de biodiversidad y la intensificación del efecto invernadero. Los efectos del cambio de uso de la tierra se traducen en cambios en los ciclos biogeoquímicos, dentro de procesos que tienen una base de ámbito local y acaban presentando consecuencias globales. A menudo la tierra queda inutilizable para la agricultura y se degrada irreversiblemente a través de la oxidación y la erosión. Los efectos benéficos de los bosques al regular los ciclos del agua y al prevenir la erosión del suelo disminuyen con estas prácticas y, por consiguiente, aumenta el riesgo de inundaciones y la obstrucción con sedimentos de los pantanos. La principal preocupación es el aspecto de un cambio climático a largo plazo, producido por la disminución de la biomasa, que contribuye al calentamiento global (Williams, 1990)

3.4 Cambios del CO₂ en la Atmósfera

3.4.1 Efectos del Incremento del CO₂ en la Atmósfera

El bióxido de carbono, CO₂, es un componente normal del aire de la biosfera; por consiguiente, no se le considerará, por regla general como contaminante. Sin embargo, el quemar carbón, petróleo y gas natural como combustible se producen grandes cantidades de CO₂, que se liberan hacia la atmósfera. El bióxido de carbono, CO₂, contribuye con aproximadamente el 49% de los gases con efectos de invernadero (Miller, 1994; citado por Návar, 1997). Las concentraciones de este gas han incrementado notoriamente en la atmósfera terrestre desde la revolución industrial y recientemente se han reportado una tasa de incremento de 1-1.5 ppm año⁻¹; desde 315 ppm en 1958 hasta 363 ppm en 1997 (ORNL, 1999; citado por Návar, 1997). El efecto invernadero está asociado directamente con la acumulación de bióxido de carbono en la atmósfera (alrededor del 50%) y su impacto aumenta en la medida que consumimos combustibles fósiles, permitimos la tala de bosques en toda la superficie terrestre y continuamos contaminando el mar con desechos y derrames de productos químicos. Otros contaminantes que contribuyen al efecto invernadero son el metano y los clorofluorocarbonos (CFC's, utilizados como

propelentes de aerosoles y en sistemas de refrigeración). El más discutido de los efectos de larga duración es el que causa la cambiante concentración del dióxido de carbono CO_2 . La variación por estación se puede describir mediante la mayor demanda de dióxido de carbono por las plantas durante primavera y verano, cuando están creciendo rápidamente y disminuyen la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. Los registros de concentraciones de CO_2 durante el siglo XIX indican que ha habido un incremento gradual desde casi 290 ppm antes de 1890 hasta el valor actual 364 ppm (Strauss y Mainwaring, 1990).

Las moléculas del bióxido de carbono, a diferencia de los demás componentes del aire, poseen la propiedad de absorber la radiación infrarroja (calor) del sol. Por consiguiente, cuanto más CO_2 haya en la atmósfera, tanto mas calor puede ésta absorber. No sabemos cuán grave puede ser el efecto de esto sobre la tierra. Una de las consecuencias posibles más graves sería el derretimiento de los hielos polares, con la inundación consiguiente de varias áreas costeras en todo el globo. (Turk et al., 1973).

El dióxido de carbono es un fuerte absorbente de luz en la región del infrarrojo, pero es prácticamente transparente a la región ultravioleta y al extremo visible del espectro. Esto significa que la radiación que entra proveniente del sol, predominante ultravioleta y visible, no se obstruye por la presencia del componente dióxido de carbono en la atmósfera mientras que la radiación infrarroja que sale de la tierra sí lo hace. Se predice que el efecto resultante será un sistema de la atmósfera de la tierra más cálido acompañado por cambios substanciales en el clima de muchas partes del mundo.

Debido al incremento del bióxido de carbono, CO_2 , atmosférico, se calcula que los climas se harán cada vez más variables en las próximas décadas, ocasionando cambios en la composición de especies, y desplazamientos de la vegetación de clima templado hacia el norte y hacia mayores elevaciones (Fisher et al. 1995; Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez 1998; citado por García y González 1998). Esto

repercutiría en una notable disminución de las áreas boscosas que cubren la Sierra Madre Occidental, y en sus consecuentes efectos ecológicos devastadores de reducción en la captación de agua e incremento en erosión y azolve de cuerpos de agua (García y González, 1998).

3.4.2 Dióxido de carbono y el efecto del invernadero

Con creciente dióxido de carbono en la atmósfera se ha comprendido que los bosques del mundo, los cuales sirven como almacenamientos de carbono, se han reducido en forma significativa durante el último siglo, y por medio de ellos se libera dióxido de carbono hacia la atmósfera. La emisión anual de CO₂ liberado como consecuencia de las actividades de desmonte forestal del hombre, se estima que es del mismo orden de magnitud que la emisión a partir del combustible fósil; si éste es el caso, los modelos no son por mucho los adecuados y el asunto importante de predecir las concentraciones futuras de CO₂ permanece sin solución. Tal información es de importancia considerable debido a que el incremento de temperatura predicho se asocia con un aumento en las concentraciones de dióxido de carbono; el así llamado efecto de invernadero (Strauss y Mainwaring, 1990).

El aumento del CO₂ en la atmósfera, por influencia antropogénica, está contribuyendo al cambio climático global (Schimel *et al.*, 1995) y puede impedir el progreso del desarrollo sostenido por el daño causado al ecosistema global y a los sistemas básicos de vida del planeta (OECD, 1998; citado por Návar, 1997).

3.5 El Protocolo de Kyoto

El Protocolo de Kyoto preparado en 1997 y su revisión posterior en Buenos Aires señalan la importancia que tienen las actividades humanas llevadas a cabo para capturar C atmosférico como una de las maneras de llevar a cabo el cumplimiento legal con las metas de los llamados gases de efecto invernadero, GHG. El protocolo da un enfoque específico, mencionando emisiones de fuentes y

remociones por transferencia a almacenes resultantes del cambio del uso del suelo y otras eminentemente dentro del campo forestal como son la deforestación, reforestación y forestación llevadas a cabo desde 1990, las cuales deben incluirse dentro de los balances (Sedjo *et al.*, 1998; citado por Návar, 1997). Aunque el Protocolo no define como estos créditos pueden ser evaluados y verificados, el IPCC, Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, en reuniones llevadas a cabo en 1995 y en Senegal en 1998 han evaluado estrategias para ser aplicadas a niveles nacionales para estimar las emisiones netas de CO₂ por la cosecha forestal y transformación en productos forestales. Dentro de las metodologías propuestas en un reporte para IPCC escrito por Brown *et al.*, (1998; citado por Návar, 1997) se encuentran: (1) cambios en las reservas; la cual considera el cambio neto de C en el almacén del bosque y de productos forestales, los cuales cuando son exportados se incluyen en los balances del país comprador, (2) la producción; la cual considera los mismos compartimientos que en (1) pero los productos forestales exportados son considerados en el país productor; (3) el flujo atmosférico; en la cual se consideran los flujos de CO₂ entre la biosfera y la atmósfera y las emisiones totales causadas por la cosecha; los productos forestales son cuantificados en el país consumidor, mientras que la fijación por el incremento de los bosques se cuantifican en el país productor. Estas metodologías también cumplen con los requisitos de La convención sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (Strauss y Mainwaring, 1990).

3.6 Biomasa

Es la cantidad de materia vegetal que contienen por unidad de superficie, expresada en peso de materia seca, en kilocalorías (GOUNOT, 1969., citado por MOPT, 1992).

Para la estimación de la biomasa existen métodos directos e indirectos. Los métodos directos implican la destrucción de la vegetación, que se ha de cortar, incluso desenterrando las raíces, para determinar el peso de materia vegetal seca. Uno de estos métodos fue desarrollado por Klapp (1929), revisado más tarde por

Wacker (1943), citados por MOPT 1992; que se aplica a comunidades de herbáceas y que se basa en la proporción entre el peso de materia vegetal seca y el peso de materia vegetal húmeda. Relacionando las proporciones halladas para cada una de las especies en una zona o unidad preestablecida, se obtiene una idea de las relaciones de competencia entre las distintas especies.

Los métodos indirectos tratan de establecer relaciones entre la biomasa y algún parámetro de la vegetación (altura, diámetro del tronco, grado de cubierta etc.) cuya medida no sea destructiva.

Los trabajos de investigación en lo referente a biomasa en México, son escasos (PICC, 1995). Es importante contar con la información necesaria para poder calcular el CO₂ almacenado en la vegetación. La producción de biomasa y la distribución en los componentes del árbol son de los aspectos importantes de estimar en las especies forestales, ya que con esta información se pueden proponer prácticas silvícolas, además se puede definir la madera aprovechable para diferentes usos (Castellanos *et al.*, 1996; citado por Nájera, 1999).

3.7 Descripción de las especies de estudio.

3.7.1 *Pinus cooperi* var. *ornelasi* (Martínez).

Árbol de 20 a 40 metros de altura y de 40 a 90 cm o más de diámetro. Corteza rugosa gris oscuro con placas irregulares no desprendibles. Fascículos de vaina persistente con hojas en grupos de 5 cifras predominantes, de 10 a 15 cm de largo, a veces más, de color verde oscuro algo glauco, dispuestas a lo largo de la ramilla que presenta las brácteas muy aproximadas salientes y que fácilmente se descaman, conos largamente ovoides casi simétricos o levemente encorvados, de 7 a 10 cm de largo, a veces hasta 12 de color café claro amarillento, algo lustroso. Se presentan en pares o en grupos de 3. Escamas de umbo dorsal con apófisis algo achatada con espina delgada y persistente, semilla pequeña con ala de 5 a 8 mm de

largo de color café oscuro. Se le localiza entre los 2400 y 2800 m s n m en las partes más altas de la sierra, asociado principalmente con *Pinus durangensis*, *P. teocote*, *P. cooperi blanco* entre otros. Madera de buena calidad.

3.7.2 *Pinus durangensis* Martínez

Árbol de fuste recto de 15 a 40 m de altura y hasta de 1-1.5 m de diámetro. Corteza rugosa, dividida en grandes placas escamosas de color café rojizo pálido en la parte media y separadas por fisuras. Hojas en fascículos de 6 frecuentemente de vaina persistente, medianamente gruesas de 14 a 30 cm de largo y de 0.6 a 1 de ancho. Conos ovoides o cónico ovoides, se presentan en pares o en grupos de 3, miden de 7 a 9 cm de largo y tienen un color moreno rojizo. Las escamas con umbo dorsal, tienen apófisis levantada, algo reflejada y subpiramidal, la cúspide saliente y provista de una espinita corta y delgada. Semillas pequeñas con ala, de color gris, de 5 a 7 mm de largo.

Se localiza principalmente en altitudes de 2500 a 2800 m s n m, se asocia con *Pinus cooperi*, *P. teocote*, *P. cooperi omelasi*, *P. herrerae* y *P. leiophylla* entre otros. Es la especie más apreciada en Durango por su calidad de su madera.

NOTA: Si se identifica un árbol con estas características pero con fascículos con 5 hojas como cifra predominante se tratará de la especie *Pinus durangensis f. quinquefoliata* Martínez.

3.7.3 *Pinus arizonica* Engelmanni

Árbol con tronco recto de 12-25 (-45) m de altura y 20-80 (-110) cm de diámetro. Corteza de color gris oscuro a casi negro en los árboles jóvenes, en los árboles viejos con placas amplias hasta de 4 a 5 cm de grosor, de color rojizo o pálidas en el centro, las fisuras profundas entre las placas. Hojas en fascículos de 3 a 5 (-6), con frecuencia 5, a veces solo 3, y raramente 6, de color verde claro o verde limón. De

11.5 a 19 cm de largo, flexibles y delgadas. Conos ovoides de 5 a 8 cm de longitud, color moreno oscuro algo rojizo. Escamas fuertes y duras con umbo dorsal y apófisis levantada, espina corta y delgada. Semilla de color café oscuro que mide de 6 a 7 mm con ala de unos 25mm. Esta asociado con *Pinus ayacahuite*, *P. teocote*, *P. durangensis*, *P. cooperi*, *Quercus sideroxyla*. Madera de buena calidad, muy apreciada por tener pocos nudos (debido a la copa alta). Tiene amplia distribución en el estado presentándose masas puras y con ejemplares de alta calidad en los municipios del norte del estado principalmente.

3.7.4 *Pinus cooperi* Blancoi

Árbol de 15 a 35 m de altura y de diámetro de 30 a 80 cm; copa densa, redondeada o cónica, formada por ramas gruesas de forma sigmoideal, descendentes, copa puede ser irregular, corteza rugosa de gris a gris oscuro con placas irregulares desprendibles. Hojas en fascículos de 3 a 5 generalmente 5 de color verde oscuro o verde ceniciento, gruesas y tiesas y fuertes generalmente curvadas de 4 a 9 cm de largo. Cono ovoide de 4 a 9 cm de longitud. Se localiza en bajíos y planicies de suelo profundo y en laderas poco pronunciadas, entre los 2400 y 2700 m de altitud. Ocasionalmente comparte el hábitat con la variedad *ornelasii*. Por lo general se encuentra formando masas puras, o a veces asociado con *P. leiophylla*, *P. arizonica*, *P. teocote*, *Quercus durifolia*, *Q. sideroxyla* o *Juniperus deppeana*. Madera de buena calidad. Sin embargo, debido a que con frecuencia los árboles presentan ramificación desde poca altura la madera es nudosa. Distribución Sierra Madre Occidental en Durango y parte de Chihuahua.

3.7.5 *Pinus engelmannii* Carr.

Árbol de 12 a 35 m de altura y de 25 a 100 cm de diámetro copa abierta y redondeada. Ramas largas y gruesas. Corteza de los árboles maduros de color café rojizo a oscuro, rugosa, escamosa dividida en placas largas y angostas. Hojas en fascículos de 2 a 5, con frecuencia predominando uno u otro número, agrupadas en

los extremos de las ramillas de 20 a 43 cm de largo, gruesas de 1,4 a 2 mm de ancho y alrededor de 1 mm de grosor de color verde pálido o verde amarillento ásperas. Conos asimétricos, ovoides a anchamente ovoides, de 10 a 16 cm de largo, 6 a 12 cm de ancho, ligeramente curvados, café amarillentos, duros, pesados, en grupos de 2 a 5 sobre pedúnculos fuertes de 5 a 10 mm de largo y hasta 20 mm de ancho. Madera suave de buena calidad. Distribución: Laderas orientales de la Sierra Madre Occidental. En terrenos muy pobres laderas entre 2400 a 2800 m. En Durango: Durango, Pueblo Nuevo, Súchil y El Mezquital.

CAPITULO IV

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Caracterización física del área de estudio

4.1.1 Localización

El presente estudio se llevó a cabo en la región forestal de El Salto, P. N. Durango, en los predios: La Campana, La Victoria, Los Bancos, la Ciudad y San Pablo, los cuales se localizan en la Sierra Madre Occidental, que se encuentra entre las coordenadas $23^{\circ} 30'$ y $24^{\circ} 15'$ de altitud norte y coordenadas $105^{\circ} 15'$ y $105^{\circ} 45'$ de longitud oeste, entre los Kilómetros 100 – 140 de la carretera Durango - Mazatlán al sudoeste del Estado de Durango.

4.1.2 Topografía

El área de estudio presenta en su parte alta relieve característico de sierra alta y algunas mesetas, algunos lomeríos y zonas onduladas. En la parte media, donde la altitud es más baja presentando pendientes moderadas.

4.1.3 Geología

El área de estudio está conformada por rocas ígneas extrusivas ácidas y basaltos. La distribución de las asociaciones de rocas en la región de El Salto, Durango se presentan a continuación.

T(Igea). Toba ácida. Es un conjunto de productos piroclásticos de diversas características, comprende tobas radioasíticas, riolíticas, dasíticas e ignibrítas, que presentan diversas texturas tales como piroclásticas, holocristalinas, afaníticas y porfídicas. Se presentan en pseudoestratificación, fracturamiento moderado, intemperismo somero; su color varía de pardo claro a rozado con tonos blancos, negros y amarillo ocre. Se asocia con depósitos vulcanoclásticos, sus relaciones estratigráficas son discordantes sobre las rocas más antiguas, subyace de igual modo a basaltos.

T(Igei). Toba intermedia. Secuencia volcánica formada por intercalación irregular de tobas líticas y derrames andesítico. La unidad presenta a en general colores oscuros con alteraciones locales de clorita y epidota. La andesita tiene textura afanítica y porfídica. La toba tiene una textura piro clástica. Sobreyace en contacto irregular a la granodiorita de edad cretácico superior. Le sobreyacen la secuencia de toba ácida de Oligoceno-Mioceno, morfológicamente constituye sierras pronunciadas a sierras bajas. La unidad aflora hacia la parte occidental del área.

T(Igeb). Toba básica. Sobreyace a la unidad toba ácida oligomiocénica y subyace a los aluviones cuaternarios. Aunque al parecer algunos basaltos en el área son de esta edad, solamente la unidad cartografiada se consideró en este lapso al apreciarse con mayor claridad las relaciones estratigráficas.

Ki(cz). Caliza. Esta unidad consiste de caliza masiva, en capas mayores a un metro de espesor, de textura mudston, parcialmente recristalizada, en ocasiones con módulos de pedernal y frecuentemente con miliólidos pelecípidos. Estructuralmente presenta grandes estructuras de plegamiento normal del orden de la decena de kilómetros. Es común encontrar en posición esta unidad sobre las unidades J(Gn), PE(Gn) y P(Gn) y de modo concordante Ki(lu-ar). El contacto superior es concordante con la unidad Ks(lu-ar) y discordante con T(Igea). UCODEFO No. 6, Programa de Manejo Forestal 1997-2007.

4.1.4 Suelos

De acuerdo a la clasificación de la FAO/UNESCO (1970) modificado por la DETENAL (1979) y a la información contenida en las cartas edafológicas de (INEGI, 1988), el área de estudio comprende diferentes tipos de suelos, de los cuales predominan los cambisoles, litosoles, ferozems y regosoles.

4.1.4.1 Descripción de los suelos en la región de El Salto, Durango

Cambisoles. Es un suelo joven, poco desarrollado, de cualquier clima, menos de zonas áridas, con cualquier tipo de vegetación, en el subsuelo tiene una capa de terrones que presentan un cambio con respecto al tipo de roca subyacente con alguna acumulación de arcilla, calcio, etc. Susceptibles de moderada a alta a la erosión.

Litosol. Es un suelo de distribución muy amplia, se encuentra en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, son suelos sin desarrollo, con profundidad menor a 19 cm; tiene características muy variables, según el material que los forma. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona donde se encuentre, pudiendo ser desde moderada a alta.

Feozem. Tiene una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes, se encuentran desde zonas semiáridas hasta templadas y tropicales. Se encuentra casi cualquier tipo de vegetación y en terrenos desde planos hasta montañosos y la susceptibilidad a la erosión depende del tipo de terreno donde ocurra.

Regosoles. Se caracteriza por no presentar capas distintas, son claros y se parecen a la roca que les dio origen, se pueden presentar en muy diferentes climas y

con diversos tipos de vegetación, son de susceptibilidad variable e la erosión (UCODEFO No. 6, Programa de Manejo Forestal 1997-2007).

4.2 Caracterización climática

4.2.1 Clima

Uno de los factores determinantes en los climas en el estado de Durango es la barrera construida por la Sierra Madre Occidental, que detiene los vientos húmedos, presentándose en la región de las quebradas un clima marítimo subtropical con temperaturas generalmente altas más o menos uniforme durante el año, con abundante precipitación pluvial y alta humedad atmosférica, a excepción de la región citada, la mayor parte de la sierra, por su altitud, tiene un clima subhúmedo templado o semifrío, que se vuelve templado o semiseco en el lado oriental de la sierra y en buena parte de la franja central del estado.

4.2.1.1 Descripción de los tipos de climas en la región de El Salto, Durango.

(A)C(W₁). Clima semicálido subhúmedo, con lluvias en verano, con precipitación del mes más seco menor de 40 mm, y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 (agrupa los subtipos de humedad media de los semicálidos subhúmedos).

(A)C(W₂). Climas semicálidos subhúmedos, con lluvias en verano, con precipitación del mes más seco menor de 40 mm y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 (agrupa los subtipos más húmedos de los semicálidos subhúmedos).

AW₁(W). Clima cálido subhúmedo con lluvias en verano con porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2mm.

AW₂(W). Clima cálido subhúmedo con lluvias en verano con un porcentaje de lluvia invernal menor de 5mm.

C(E)(W₂). Clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano con un porcentaje de precipitación entre 5 y 10.2 mm.

C(W₂). Clima templado subhúmedo con lluvias en verano con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2 mm.

C(E)(M). Clima semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano con porcentaje de precipitación invernal mayor de 5 mm (UCODEFO No. 6, Programa de Manejo Forestal 1997-2007).

4.2.2 Precipitación

Los patrones de distribución en espacio y tiempo de la precipitación, conjuntamente con la temperatura son utilizados para realizar la caracterización del clima local. Para el área de estudio, García (1987) reporta una precipitación media anual que fluctúa de 800 a 1200 mm.

4.3 Caracterización biótica

4.3.1 Vegetación

Los bosques de coníferas presentan amplia diversidad. En México existen 35 especies del género *Pinus*, número que representa el 37% del total de las especies vegetales (Rzedowski, 1978).

Por su ubicación geográfica, la zona presenta diversas condiciones de vegetación que va desde selva baja caducifolia, masas puras de encino y pino y bosques mezclados de pino-encino. Las especies de mayor valor comercial, tanto

por las características tecnológicas de su madera como por su rango de distribución son las del género pino, con las especies listadas en orden de importancia por su volumen de aprovechamiento: *P. cooperi* Blanco, *P. durangensis* Martínez, *P. leiophylla* Schl et Cham, *P. engelmannii* Carr, *P. cooperi* var *Ornelasis*, *P. teocote* et Cham, *P. herrerae* Martínez. Otras especies de menor valor comercial, distribución y abundancia son *P. ayacahuite* Ehrenb, *P. lumholtzii* Rob et Fern, *P. douglasiana* Martínez, *P. michoacana cornuta* Martínez, *P. oocarpa* Shide. Además se aprovechan algunas especies de encino (*Quercus spp*) y otras especies asociadas con las coníferas y hojosas de los géneros *Arbutus*, *Juniperus*, *Pseudotsuga*, *Abies* y *Picea*.

4.3.1.1 Bosque de pino

Vegetación constituida por especies arbóreas de fuste recto, con altura de 8 a 25 m, excepcionalmente más de 30 m, hoja acicular en fascículos, perenne, caracterizado por la dominancia del género *Pinus* y su distribución es amplia en toda la cadena montañosa del país (García y González, 1998). Se desarrolla en altitudes entre 1,500 y 3,000 m s n m, aunque también se les ha registrado en áreas de clima caliente a 150 m s n m, y a niveles superiores de más de 4,000 msnm (Rzedowski, 1978), la caracterización climática existe una gran variedad de condiciones asociadas a los bosques de *Pinus* en México, donde los límites de distribución marcan tolerancia de temperatura media anual entre 6 y 28°C. Aunque si se restringe la caracterización climática al área de las grandes masas forestales de pino, pueden aproximarse los límites entre 10 y 20°C de temperatura media anual y entre 600 y 1,000 mm de lluvia al año, en general son áreas afectadas por heladas todo los años y la precipitación se concentra en 6 a 7 meses.

El color del suelo, su textura y el contenido de nutrientes presentan variaciones de un lugar a otro, son frecuentes las tierras rojas, más o menos arcillosas, derivadas de basaltos; en cambio las adesitas producen coloraciones cafés y texturas más livianas. Los suelos negros o muy oscuros son también frecuentes

sobre todo en altitudes mayores a 3,000 m s n m. Es característico de estos bosques un horizonte de humus de 10 a 30 cm y el suelo cubierto de hoja de pino.

Este grupo de vegetación constituye uno de los recursos naturales de mayor importancia en el estado de Durango, tanto por la magnitud de distribución como por su valor económico que representa. Las especies más representativas son el *Pinus cooperi*, *P. durangensis*, *P. Leiophylla*, *P. Engelmannii*, *P. Teocote*, *P. Herrerae*. Otras especies de menor distribución y abundancia como el *P. Ayacahuite*, *P. Lumholtzii*, *P. Douglasiana*, *P. Michoacana*, *P. Oocarpa*.

4.3.1.2 Bosque de pino - encino

Esta comunidad es la que ocupa la mayor parte de la superficie forestal de las partes superiores de los sistemas montañosos del país. Está constituida por la mezcla de diferentes especies de pino (*Pinus* spp.) y encino (*Quercus* spp.), ocupando muchas condiciones comprendidas dentro del área general de distribución de los pinos (INEGI, 1992).

4.3.1.3 Bosque encino - pino

Este tipo de bosque está formado por la dominancia de encinos (*Quercus* spp) sobre pino (*Pinus* spp.), y generalmente se desarrolla en las áreas de mayor explotación forestal, en los límites inferiores de los bosques de pino-encino (INEGI, 1992).

En el se puede observar el área que ocupa cada tipo de vegetación, el área que no sustenta vegetación forestal (TA) como son los terrenos agrícolas, frutícolas, asentamientos humanos, etc., y el porcentaje que representa cada uno con respecto al total del área del predio en estudio.

4.3.1.4 Bosque de encino (Q)

Bosque formado por individuos del género *Quercus* (encino, roble) en muy diferentes condiciones ecológicas, que abarcan desde cerca del nivel del mar hasta los 2800 m.

4.3.2 Especies de importancia económica

Se consideran especies de importancia económica a las especies vegetales de las que el hombre depende para satisfacer sus diversas necesidades como son su desarrollo biológico, científico, cultural y consecuentemente económico.

4.3.2.1 Maderables

Las especies de mayor valor comercial, tanto por las características tecnológicas de su madera como por su rango de distribución son las de pino. Las principales especies en orden de importancia, de acuerdo con su volumen de aprovechamiento son: *P. cooperi* Blanco, *P. leiophylla* Schl et Cham, *P. engelmannii* Carr, *P. durangensis* Martinez, *P. cooperi* var *ornelasi*, *P. teocote* et Cham, *P. herrerae* y otras especies de menor valor comercial, distribución y abundancia con son *P. ayacahuite* Ehrenb, *P. lumholzi*, *P. douglasiana*, *P. michoacana* y *P. maximinoi*, además se aprovechan algunas especies de encino (*Quercus*), mismo que ha recobrado importancia económica y es utilizado para elaborar partes para empaque, molduras, estructuras para construcción, etc. Existen en los predios algunas especies de *Arbutus*, *Juniperus*, *Pseudotsuga* cuya importancia es menor ya que se usan con fines domésticos, para leña y construcciones rústicas de casas y corrales.

4.3.3 Fauna

En la región están registradas 170 especies de fauna entre mamíferos, reptiles y aves

4.4 Metodología general de campo y laboratorio

La toma de datos en la investigación se realizó en siete plantaciones de edades y densidades diferentes: Las edades fueron de: 6, 9, 10, 15, 16, 18 y 20 años y densidades de las mismas con espaciamentos que van desde 1m por 1m, hasta 3m por 3m lo cual equivale a tener 10,000 y 1111 plantas ha⁻¹, respectivamente. En las plantaciones se establecieron 23 parcelas al azar, que en su mayoría fueron con dimensiones de 20m por 30m (600 m²) y las variables dasométricas que se midieron fueron: diámetro a la base, altura total, altura de fuste limpio y cobertura

Las especies que se consideraron para el estudio fueron: *Pinus arizonica*, *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis*, *P. engelmannii* y *P. cooperi* Blancoi (Cuadro 4.1)

Cuadro 4.1 características de ubicación e información dasométrica de las parcelas estudiadas en plantaciones de la región de el Salto Durango, México.

Ejido	Paraje	Género <i>Pinus</i>					Parcela	edad	No. Árboles	Sup. Tot.Ha.
		d	c	a	e	c.b				
La Campana	La Escondida	3	4	2			9	20	18	12
	Alto de L.	1	1				2	15	4	10
La ciudad	Rancho viejo	1	1				2	6	6	2
La Victoria	San Antonio	4					4	16	8	30
	Piloncillos					1	1	18	2	2
Sn Pablo	El mirador	1	1		1		3	9	9	3
Los Bancos	La panda	1	1		1		2	10	9	2
Total		11	8	4	2	1	23		56	61

d= *P. durangensis*; c=*P. cooperi*; a= *P. arizónica*; e= *P. engelmannii* c.b= *P. cooperi blanco*

El tamaño de las parcelas y el espaciamento entre arboles fue variable observándose también una densidad irregular debido a mortalidad de árboles y la actividad de aclareos en las plantaciones.

Para la toma de datos que sirvieron para el cálculo de biomasa y análisis troncales se derribaron 56 árboles los cuales se eligieron aquellos que reunieron características dasométricas representativas del mismo sitio. Se derribaron los 56 árboles en total, de los cuales 25 fueron de *P. durangensis* y 19 fueron de *P. cooperi* O. El resto de los árboles derribados fueron de *P. arizónica*, *P. engelmannii* y *P. cooperi blancoi*; a cada árbol se le midieron primero en pié las variables dasométricas descritas en párrafos anteriores. Posteriormente se pesaron separadamente el total de cada componente en verde de cada árbol por especie que se derribó (fuste, rama seca y húmeda, follaje).

Se obtuvo de cada uno de los árboles derribados de cada uno de los componentes de biomasa (hojas, ramas y fustes) pequeñas muestras para así aplicar un secado natural y artificial de cada componente y repetir el procedimiento de pesaje en seco de las muestras. De los fustes se extrajeron rodajas cortadas a la base, a 0.5, 1.0, 1.3, 1.5, y a cada metro hasta la parte distal del fuste. Las características de estos árboles derribados se presentan en el Cuadro 4.2 y 4.3, respectivamente.

Cuadro 4.2 Características dasométricas de *P. durangensis* por parcela en plantaciones forestales de Durango, México.

	Árbol No.	Edad	Dbcc	Dsc	htotal
La escondida	1	20	18.79	16.29	9.7
	2	20	11.58	9.52	8.8
	3	20	16.94	13.68	8.2
	4	20	12.72	10.49	6.1
	5	20	14.51	11.18	7.3
	6	20	17.79	14.77	9.8
San Antonio	7	16	12.47	9.47	5.5
	8	16	14.10	11.85	6.3
	9	16	18.88	15.98	8.6
	10	16	16.28	13.14	5
	11	16	16.42	13.74	6.1
	12	16	21.20	18.04	7.6
	13	16	7.31	7.14	4.5
	14	16	14.90	11.84	6.4
Alto de latas	15	15	12.85	10.58	7
	16	15	17.20	14.6	7.5
Los bancos	17	10	9.24	8.41	5.3
	18	10	8.06	5.82	4
	19	10	18.35	15.22	7.1
San Pablo	20	9	9.17	7.61	2.9
	21	9	10.29	7.61	2.7
	22	9	12.70	10.2	3.3
Rancho viejo	23	6	9.06	7.59	3.8
	24	6	9.97	8.23	2.9
	25	6	5.64	3.93	1.3

Cuadro 4.3 Características dasométricas de *P. cooperi ornelasii* por parcela en plantaciones forestales de Durango, México.

	árbol No.	Edad	Dbcc	dsc	htotal
La Campana	1	20	14.78	11.94	10.9
	2	20	19.12	15.85	9.4
	3	20	12.55	9.39	10.5
	4	20	14.72	11.95	8.9
	5	20	11.63	9.73	9.9
	6	20	17.06	13.28	9.4
	7	20	17.58	14.84	7.1
	8	20	11.05	8.56	5.7
Alto de latas	9	15	10.71	9.48	6.9
	10	15	15.92	13.46	7.9
Los Bancos	11	10	9.33	7.82	6
	12	10	7.73	6.48	3.7
	13	10	17.49	15.39	6
San Pablo	14	9	7.31	6.02	2.3
	15	9	13.73	11.65	3.4
	16	9	10.12	8.23	2.8
Rancho viejo	17	6	11.29	9.34	3.9
	18	6	7.36	6	2.6
	19	6	6.88	5.56	1.9

En cada una de las 23 parcelas establecidas, a cada árbol presente se les midió las características dasométricas tradicionales diámetro a la base (DB), altura de fuste limpio, cobertura y altura total.

4.4.1 Análisis Estadístico

Con los datos de los 56 árboles derribados se calcularon los parámetros de las ecuaciones de biomasa que reúnen los requisitos de aditividad (Návar et al., 2001; Parresol, 1999). Los parámetros de las ecuaciones fueron estimados en regresión lineal, no lineal, múltiple lineal y no lineal, con variables dummy. Estas ecuaciones se desarrollaron para cada una de las dos especies: *P. durangensis* y *P. cooperi* por presentar la mayor fuente de información. También se estimó una sola

ecuación para todas las especies y se validó con los datos de biomasa de los árboles de las especies *P. cooperi* B, *P. engelmannii* y *P. arizonica*.

Posteriormente se estimó la biomasa total por parcela con una de estas ecuaciones. Con la biomasa por parcela, sus atributos a nivel del rodal, del grupo de árboles por clase diamétrica y al nivel del árbol individual se procedió a ajustar 3 modelos de rendimiento e incremento en biomasa: dos a nivel del rodal y uno a nivel del árbol individual. El primer modelo a nivel del árbol individual basa su teoría en la metodología desarrollada por Clutter (1963) y descrita por Zepeda y Bautista (1999). El segundo modelo al nivel del rodal se basa en el ajuste y predicción de parámetros de la distribución weibull cuya descripción se reporta en Wenger (1983); Návar et al. (1996) y Návar y Corral (2000). El último de los modelos de crecimiento, a nivel del árbol individual, es independiente de la distancia y proyecta el diámetro y la altura de cada uno de los árboles de la masa con ponderaciones por sus mismos atributos. La densidad en los últimos dos modelos se predice con la edad a través del modelo descrito por Clutter et al. (1983).

ECUACIONES PARA ESTIMAR COMPONENTES DE BIOMASA EN PLANTACIONES FORESTALES DE DURANGO, MEXICO

Nicolás González¹ y José Návar²

¹Estudiante de Maestría en Ciencias Forestales y ²Profesor Titular B FCF-UANL
Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Km 145 Carretera Nacional Linares, N.L
67700 México. Tel (821 24895). Email: jnavar@ccr.dsi.uanl.mx

RESUMEN

En este reporte de investigación se presentan las ecuaciones convencionalmente usadas para estimar los componentes de biomasa y biomasa total para plantaciones forestales con especies típicas de la Sierra Madre Occidental de Durango, México. Se presentan ecuaciones desarrolladas en regresión lineal, no lineal, múltiple lineal, múltiple no lineal y lineal generalizada que cumplen con los requisitos de aditividad para estimar la biomasa total. Con datos de 56 árboles de cinco especies de pino se estimaron parámetros de los modelos alométricos al nivel de la especie y para el grupo de especies. Los modelos desarrollados regresión lineal generalizada se ajustaron mejor a la biomasa total, a partir de sus componentes. Por esta razón se recomienda su utilización en la elaboración de tablas de biomasa para estas especies de pino.

Palabras clave: Componentes de Biomasa Aérea, Modelos Aditivos, Regresión Lineal generalizada.

ABSTRACT

In this research we present equations conventionally used to estimate biomass components and total biomass for forest plantations with typical species of the Western Sierra Madre mountain range of south central Durango, México. Equations were developed in linear, non linear, multiple linear, multiple non linear and generalized linear regression techniques, which meet the additivity requirements to

estimate total biomass. Data collected from 56 trees from five pine species was used to estimate parameters of allometric equations at the species and group of species scales. Models developed in generalized least squares fitted total biomass better when estimated by estimating its components. Therefore this model technology is recommended to construct biomass tables for these pine species.

Key words: Components of aerial biomass, Additive models, Generalized Linear Regression.

INTRODUCCION

En las últimas décadas se ha dado considerable atención a la estimación de biomasa de árboles individuales y rodales forestales. Se han desarrollado ecuaciones que relacionan la biomasa o sus componentes (raíces, hojas, ramas y fustes) con las características dasométricas de los árboles. El interés radica en entender la productividad del sitio (Bakersville, 1965), en comparar la productividad con modelos convencionales de rendimiento e incremento (Pastor and Bockheim, 1981) y en la estimación de biocombustibles (Agee, 1983).

En la actualidad, los estudios sobre la biomasa tienen como finalidad entender los ciclos de la energía y de los nutrientes. También se están usando para observar el efecto de la vegetación en el ciclo global del CO₂ (Brown, 1997). Algunos modelos de CO₂ (e.g., Makela, 1997; Mohren, 1994) incluyen la estimación de la biomasa o una función de la biomasa como el volumen, sus componentes o algunos parámetros relacionados, para establecer los flujos de este gas entre la vegetación, el suelo y la atmósfera. Dada esta importancia ambiental, las ecuaciones de biomasa se han desarrollado para bosques tropicales, templados y algunos tipos de vegetación semi-árida (Schroeder *et al.*, 1997; Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997; Brown *et al.*, 1989; Návar *et al.*, 2001). Sin embargo, existe muy poca información sobre la estimación de la biomasa en plantaciones forestales de México. Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue reportar las tecnologías matemáticas

disponibles para estimar los componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México.

MATERIALES Y METODOS

Los estudios para desarrollar las ecuaciones de biomasa se realizaron en plantaciones forestales de la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal No 6 del Salto, Durango, México. El área donde se plantaron las especies de pino se caracteriza por ser la parte alta del macizo principal de la Sierra Madre Occidental del centro-sur de Durango. El clima del área se caracteriza por ser templado frío con lluvias veraniegas, con una temperatura y precipitación promedio anual de 11.7°C y 1200 mm, respectivamente. Los suelos son predominantemente Litosoles, Rendzinas y Cambisoles, someros, con textura media, generalmente francos. La vegetación está caracterizada por bosques mixtos de coníferas y latifoliadas, con abundancias relativas caracterizadas por la altitud sobre el nivel del mar y la pendiente (Graciano, 2001). Las especies de pino que dominan son: *P. durangensis*, *P. cooperi* O, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *P. engelmannii*. Las especies de encino características son: *Quercus rubra*, *Quercus virginiana*, *Quercus potosina*, *Quercus nigra*, *Quercus sideroxyla*, *Quercus cupreata*, *Q. crassifolia*.

Las plantaciones se realizaron en sitios disturbados por incendios preferencialmente y se realizaron en parcelas de diferentes dimensiones y espaciamientos, dominando los 2x2. Las parcelas estudiadas fueron plantadas desde 1978 hasta 1994. Las características dasométricas se reportan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros dasométricos promedio de especies del género *Pinus* de la Sierra Madre Occidental del norte de México.

Especies	N	Edad	DB	Std	H	Std	CB	Std
<i>Pinus durangensis</i>	25	14.0	13.4	4.14	5.91	2.31	5.39	2.77
<i>Pinus cooperi</i> O	19	14.0	12.4	3.86	6.27	3.02	4.19	2.52
<i>Pinus arizonica</i>	4	20.0	11.0	2.16	5.48	0.45	2.06	0.18
<i>Pinus cooperi</i> B	1	18.0	16.3	0.00	4.00	0.00	6.26	0.00
<i>Pinus engelmannii</i>	5	9.4	12.1	4.69	3.46	1.09	5.79	0.73

DB= Diámetro basal (cm); H= Altura total (m); HF= Altura del fuste (m); CB = Proyección vertical de la copa (m²); Std= Desviación estándar.

Las especies estudiadas se usan tradicionalmente como tutores y latas para cimbras cuando son bajos fustales; para muebles, construcción, pulpa para papel, chapa, aglomerado, cuando son altos fustales.

Muestreo

En las plantaciones forestales se observaron 25 árboles de *P. durangensis*, 19 de *P. cooperi* O, 4 de *P. arizonica*, 2 de *P. cooperi* B y 6 de *P. engelmannii*. Cada uno de los individuos se midieron en su diámetro basal, altura total (HT), altura del fuste (HF) y la proyección vertical de la copa (CB). Los individuos se seleccionaron cubriendo el rango de características dasométricas y cortados dentro de un período no mayor a 2 meses para que la biomasa sobre todo foliar no mostrara variaciones temporales. Este procedimiento ha sido recomendado por Monserud *et al.* (1996) y Marklund (1983). Los individuos cortados se separaron en hojas, ramas y fuste, se pesaron por separado estos componentes, se colectaron muestras para secar en estufa y se volvieron a pesar después de secado.

Procedimiento

Las ecuaciones comúnmente usada en la estimación de biomasa tienen formas simples lineales, simples no-lineales, lineales múltiples y no-lineales múltiples (Clutter *et al.*, 1983). En este trabajo se desarrollaron ecuaciones para los componentes de biomasa para cada especie y por grupo de especies: (1) relaciones no-lineales, ONL, ($y = b_0 DB^2 H^{b_1} + b_2 DB^2 H^{b_3} + b_4 DB^2 H^{b_5}$); (2) relaciones no-lineales, con transformaciones, LTP, ($\ln y = b_0 + b_1 \ln DB^2 H + b_2 + b_3 \ln DB^2 H + b_4 + b_5 \ln DB^2 H$); (3) relaciones lineales sencillas, RL, ($y = b_0 + b_1 DB^2 H + b_2 + b_3 DB^2 H + b_4 + b_5 DB^2 H$); (4) relaciones lineales múltiples en procedimientos stepwise, MLSP, ($y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots + b_n X_n$); (5) relaciones no-lineales múltiples en stepwise, MNSP ($\ln y = b_0 + b_1 \ln X_1 + b_2 \ln X_2 + b_3 \ln X_3 + \dots + b_n \ln X_n$) y (6) regresiones similares no-relacionadas, SUR. Las primeras dos ecuaciones usan el parámetro db^2h , diámetro basal al cuadrado por la altura total, como la única variable independiente mientras que las dos últimas ecuaciones incluyen solo las variables DB, HT, COB y DB^2H . El rasgo deseable de estas ecuaciones es que la suma de los componentes de biomasa resultan en la biomasa total aérea por los modelos aditivos

$$\begin{aligned}
 [1] \quad & \hat{y}_1 = x' b_1 \\
 & \hat{y}_2 = x' b_2 \\
 & \hat{y}_k = x' b_k \\
 & \hat{y}_{total} = x' [b_1 + b_2 + \dots + b_k] \\
 [2] \quad & \hat{y}_1 = f(x'_1) \\
 & \hat{y}_2 = f(x'_2) \\
 & \hat{y}_k = f(x'_k) \\
 & \hat{y}_{total} = \hat{y}_1 + \hat{y}_2 + \dots + \hat{y}_k \\
 [3] \quad & \hat{y}_1 = f(X_1) + \epsilon_1 \\
 & \hat{y}_2 = f(X_2) + \epsilon_2 \\
 & \hat{y}_k = f(X_n) + \epsilon_n \\
 & \hat{y}_{total} = f[X_1 + X_2 + \dots + X_n] + \epsilon_{total}
 \end{aligned}$$

[1], [2] y [3] (Cunia and Briggs, 1985; Reed and Green, 1985; Parresol, 1999):

Donde la aditividad de los componentes en [1] se asegura por el uso de la misma variable independiente. En el modelo [2], la biomasa total de la muestra se define como la función de la suma de cada una de las regresiones individuales. En el

modelo [3] la aditividad se asegura por confirmar los coeficientes de la regresión a ciertas restricciones. Los coeficientes de regresión de la ecuación total son calculados agregando los coeficientes de las ecuaciones de los componentes de biomasa.

La varianza total de la ecuación aditiva [1], [2] y [3] se determinaron de [4] y [5]:

$$[4] \quad \text{Var}(\hat{y}_{total}) = \sum_{i=1}^j \text{var}(\hat{y}_i)$$

$$[5] \quad \text{Var}(\hat{y}_{total}) = \sum_{i=1}^k \text{var}(\hat{y}_i) + 2 \sum_{i < j} \text{cov}(\hat{y}_i, \hat{y}_j)$$

donde:

$$\text{cov}(\hat{y}_i, \hat{y}_j) = \rho_{y_i, y_j} \sqrt{\text{var}(\hat{y}_i) \text{var}(\hat{y}_j)}$$

ρ_{y_i, y_j} = correlación entre Y_i and Y_j

La evaluación de las ecuaciones se realizó por medio de los estadísticos de bondad de ajuste: el coeficiente de determinación, r^2 , el error estándar, S_e , y el coeficiente de variación, CV. Los estadísticos σ^2 , S_e , r^2 , y CV de las ecuaciones LTP y MNSP, cuyas variables son transformadas al logaritmo natural no son compatibles con los estadísticos del resto de las ecuaciones desarrolladas. Parresol (1999) y Cunia y Briggs (1985) enfatizaron la necesidad de usar un factor de corrección para transformar los estadísticos a sus dimensiones originales. En esta investigación primero se estimaron los parámetros de las ecuaciones, después se corrieron las ecuaciones y finalmente los estadísticos de bondad de ajuste se estimaron con las dimensiones originales de los componentes de biomasa. Se usaron técnicas de cuadrados mínimos en regresión no lineal, lineal y múltiple para estimar los parámetros de las ecuaciones. El procedimiento no lineal se corrió en SAS siguiendo el método de Newton. Este conjunto de ecuaciones siguen los procedimientos de desarrollo de ecuaciones de Burkhart y Sprinz (1984), Green y Reed (1985), Reed y Green (1985) y Parresol (1999). Estos procedimientos se realizaron para cada una de las especies probadas de cada tipo de vegetación.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los estadísticos de bondad de ajuste r^2 y S_x de las ecuaciones para cada uno de los componentes de biomasa de cada especie mostraron diferencias importantes. En general, los estadísticos de los modelos para estimar biomasa foliar para cada una de las dos especies probadas resultaron ser muy bajos, con promedio de r^2 de 0.38 y de S_x de 1.21 Kg. Esta falta de precisión en las estimaciones de biomasa foliar se ha reportado por otros investigadores para otras especies (Prado et al., 1987; Clough y Scott, 1989; Castellanos et al., 1996). Este componente, sin embargo representa solo el 13.5% para *P. durangensis* y el 10% para *P. cooperi*. Otros parámetros tales como índice de área foliar, volumen de copa, apertura del follaje podrían ser incorporados adicionalmente para explicar parte de la variación remanente. Los modelos para estimar biomasa de ramas para cada una de las especies presentaron valores promedio de r^2 de 0.66 y de S_x de 1.57 Kg. Los modelos para estimar biomasa de fustes incrementaron la precisión en sus estimaciones, con valores promedio de r^2 de 0.83 y de S_x de 3.12Kg. Los modelos para estimar biomasa total, sin aditividad mostraron los estadísticos de mejor ajuste, con valores promedio de r^2 de 0.87 y S_x de 4.15 Kg. El incremento en la precisión de las estimaciones de la biomasa foliar parece estar relacionado, además de las variables dimensionales del fuste, con la mayor biomasa aérea en los otros compartimentos. Para *P. durangensis* y *P. cooperi*, los fustes, ramas y hojas representaron el 64 y 67%; 22.5 y 22.4% y el 13.5 y 10.6%, respectivamente. Estos resultados son consistentes con aquellos reportados por Prado y Alarcón (1990) para *E. globulus*. Sin embargo son contrastantes para especies típicas de ecosistemas áridos y semi-áridos, donde una parte importante de la biomasa se concentra en las ramas (Hoda et al., 1993; Návar et al., 2001).

El procedimiento de regresión lineal generalizada, SUR, registró los estadísticos de mejor bondad de ajuste para cada una de las especies y para el grupo de especies. Para *P. durangensis*, el r^2 incrementó notoriamente en contraste con el modelo generado en regresión no lineal. El S_x se redujo hasta un 79% en contraste

con el Sx de los otros modelos y hasta un 35% en contraste con el Sx del modelo generado en regresión no lineal. Para la especie *P. cooperi*, el r^2 incrementó en 12% en contraste con el r^2 promedio del resto de los modelos. El Sx se redujo en promedio hasta un 83% en contraste con el Sx promedio del resto de los modelos. Para las dos especies, el r^2 se incremento en el modelo desarrollado en SUR en un 6% y el Sx se redujo hasta un 84%. Como ha sido observado por otros investigadores (e.g., Cunia y Briggs, 1984; Cunia y Briggs, 1985; Parresol, 1999) los procedimientos SUR para estimar parámetros consistentemente incrementaron la precisión en las estimaciones de la biomasa total por los valores promedio mayores de r^2 (0.91) y las valores promedio menores en S_e (± 4.5 kg). En contraste los modelos aditivos con una sola variable independiente mostraron las menores bondades de ajuste, con valores de r^2 de 0.67 y de S_e de ± 7.9 kg). Los modelos aditivos no lineales mostraron las menores bondades de ajuste con valores promedio entre especies y grupo de especies de r^2 de 0.46 y de S_e de ± 10.8 kg.

Cuadro 2. Estimadores promedio de estadísticos de bondad de ajuste para seis ecuaciones aditivas para dos especies de pino de Durango, México.

Especie	Estadísticos Promedio de Bondad de Ajuste											
	Nolineal		Lineal Simple		Logarítmico		Múltiple Lineal		Múltiple Logarítmico		SUR	
	R^2	Sx	R^2	Sx	R^2	Sx	R^2	Sx	R^2	Sx	R^2	Sx
<i>P. durangensis</i>	0.38	15085	0.87	5660	0.86	6190	0.89	5760	0.89	6130	0.89	5330
<i>P. cooperi</i>	0.10	12361	0.90	4370	0.88	4640	0.94	3776	0.93	3890	0.94	3550
Dos Especies	0.89	4990	0.89	4970	0.87	5400	0.91	4710	0.70	8220	0.91	4560

El procedimiento SUR de estimación de parámetros incrementa la eficiencia, considerando el aumento en el r^2 y la reducción en el Sx en un 15% en contraste con los otros procedimientos empleados. En particular, el valor de r^2 incrementó en un 13% y los valores de S_e disminuyeron en un 17%, respectivamente cuando se compararon con los valores promedio estimados con los otros procedimientos. El procedimiento MLSP resultó ser comparable en el coeficiente de determinación con el modelo SUR para cada una de las especies y para el grupo de especies. Sin

embargo, el error estándar creció en promedio en 6% en contraste con los estadísticos promedio derivados del procedimiento SUR.

El modelo para estimar la biomasa total en forma aditiva incrementa la eficiencia cuando se deriva una ecuación para las dos especies para todos los modelos. El r^2 creció en promedio en un 7% y este fue mas notorio para *P. durangensis*. Para *P. cooperi*, el r^2 se redujo para todos los modelos, con la excepción de aquel derivado en regresión no lineal, en promedio en 8%. Sumando los dos errores estándares de cada especie y contrastando este valor con aquel estimado para las dos especies en conjunto, este valor se redujo en un 50%, como promedio. El modelo generado con el procedimiento ONLS mostró la mayor reducción en el Sx cuando se deriva para las dos especies hasta un 80%. El resto de los modelos mostró reducciones en el Sx hasta en un 50%. Es decir, el Sx derivado de un solo modelo se aproxima al promedio de los dos Sx derivado de cada especie individualmente. En actividades de inventario de biomasa con varias especies de pináceas, es de utilidad entonces generar un solo modelo porque ahorra tiempo y reduce notoriamente el error.

La biomasa total observada y estimada por especies y para el grupo de especies, derivada de los modelos aditivos se presenta en el Cuadro 3. Los valores de biomasa total para cada una de las especies y para el grupo de especies fueron similares para los modelos derivados de procedimientos RL, MLSP y SUR. El modelo ONL subestimó la biomasa total para cada una de las dos especies en promedio en 3.4%, mientras que para el grupo de especies se sobrestimó en 0.8%. El modelo desarrollado con los procedimientos transformados, LTP y MNSP, sobrestimaron la biomasa para cada una de las especies en promedio en 6.6 y 3.7%, respectivamente. Para el grupo de las dos especies, estos procedimientos sobrestimaron aun mas la biomasa total en 7.1 y 25.7%, respectivamente. Reed y Green (1985) estimaron los componentes de biomasa con un error menor al 5% cuando se usaron tres procedimientos de estimación de componentes de biomasa para árboles de la especie *Q. robur*.

Entre los modelos aditivos, el procedimiento SUR consistentemente mostró valores de biomasa total similares a los observados, con desviaciones promedio de 0.0%. En contraste, los modelos aditivos de los procedimientos LTP, ONL y MNSP sesgaron las estimaciones de la biomasa total. La pérdida de eficiencia en la estimación de la biomasa total con modelos transformados puede ser consecuencia de la consideración de datos extremos en biomasa y sesgando sus estimaciones en la mayoría de los adtos con biomasa pequeña.

Cuadro 3. La biomasa total medida y estimada por los cinco modelos aditivos en dos especies del género *Pinus* en plantaciones forestales de Durango, México

Especies	Biomasa Total (kg arbusto ⁻¹)						
	Observada	Nolineal	Lineal	Logaritmico	Múltiple Lineal	Múltiple Log	SUR
<i>P. durangensis</i>	478.0	499.0	478.0	447.0	478.0	463.0	478.0
<i>P. cooperi</i>	323.0	331.0	323.0	301.0	323.0	309.0	323.0
Dos Especies	800.6	794.5	800.6	743.9	800.6	594.9	800.6

Los estadísticos de los modelos aditivos, además de modelos para estimar biomasa total directamente sin considerar sus componentes foliar, ramal y fustal, para el grupo de especies se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Estimadores estadísticos de ajuste y de la biomasa total (kg de todos los árboles) por cada procedimiento de estimación de parámetros en dos especies de pino de Durango, México.

Modelo	Ecuación	Biomasa	Estadístico		
			R ²	Se	CV
Observado		800.66			
M1	$B_{total}=1.2244+0.01298d^2h$	800.65	89	4.9	27
M2	$\ln B_{total}=-3.0279+0.8252\ln d^2h$	756.24	86	5.3	29
M3	$B_{total}=-1.7315+1.2097Cob+0.01073d^2h$	800.65	91	4.3	24
M4	$\ln B_{total}=-3.843+1.376\ln d+0.4315\ln d^2h$	768.10	88	4.9	27
Mad1	$B_{total}=-0.29+0.0093d2h-1.36+0.71Cob+0.0015d2h-$	800.52	91	4.7	26
Mad2	$\ln B_{total}=-4.197+0.351\ln h+0.834\ln d^2h-$	594.89	70	8.2	45
Mad3 LR	$B_{total}=-$	800.59	89	4.9	27
Mad4 LTP	$\ln B_{total}=-4.62+0.98\ln d^2h-4.12+0.76\ln d^2h-1.83+0.34\ln d^2h$	743.94	87	5.4	30
Mad5 ONL	$B_{total}=0.008(d^2h)^{1.01}+0.006(d^2h)^{0.89}+0.12(d^2h)^{0.42}$	794.52	89	4.9	27
Mad6 SUR	$B_{total}=-0.2425+0.01145d^2h-0.2426h+1.1147Cob$	800.63	91	4.5	25

Nota: Los modelos aditivos no se han reducido para observar la ecuación que define cada uno de los componentes de biomasa.

El modelo múltiple lineal que estima la biomasa total, sin considerar los componentes de biomasa, presentó los mejores estadísticos de ajuste, en contraste con el resto de los modelos. Este tipo de modelos no identifica los componentes de biomasa y por consiguiente presenta debilidades. De los modelos aditivos, el procedimiento SUR resultó con los mejores estadísticos de bondad de ajuste y casi comparable con el modelo múltiple lineal no aditivo discutido anteriormente. La pérdida de eficiencia en los modelos aditivos, en contraste con los modelos directos de biomasa total, ha sido reportada también para sauces de Mississippi (Parresol, 1999) y para robles de Michigan (Reed y Green, 1985) y es una consecuencia del número creciente de parámetros considerados dentro de las ecuaciones.

Los resultados del ajuste de las pruebas de validación de los modelos para estimar biomasa total, con las ecuaciones del Cuadro 4, se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Resultados de la validación de los modelos generados con técnicas aditivas y no aditivas para estimar biomasa total en especies de pino plantadas en Durango, México.

Especie	Biomasa Observada	Biomasa Total Estimada (kg árbol ⁻¹)									
		M1	M2	M3	M4	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5	MA6
<i>P. arizonica</i>	5.63	9.32	9.81	6.39	9.53	7.16	7.03	9.33	9.27	9.48	7.00
<i>P. arizonica</i>	15.02	16.2	16.3	14.6	16.6	15.3	12.2	16.2	15.6	16.4	15.2
<i>P. arizonica</i>	9.21	8.62	9.10	8.24	8.16	7.99	6.37	8.62	8.60	8.75	8.53
<i>P. arizonica</i>	6.16	6.41	6.79	3.92	5.49	3.67	4.59	6.41	6.43	6.45	4.28
<i>P. cooperi</i> B	25.52	14.9	15.1	17.7	20.0	19.1	13.4	14.9	14.4	15.1	18.3
<i>P. engelmannii</i>	17.42	16.5	16.5	23.2	23.1	24.0	15.6	16.5	15.9	16.7	23.6
<i>P. engelmannii</i>	13.67	8.80	9.28	12.8	12.2	13.6	8.85	8.80	8.77	8.94	13.3
<i>P. engelmannii</i>	2.51	1.90	1.26	1.31	1.20	1.05	1.01	1.90	1.44	1.31	2.20
<i>P. engelmannii</i>	14.33	14.2	14.5	21.3	16.8	20.9	11.4	14.2	13.8	14.4	21.4
<i>P. engelmannii</i>	4.27	5.85	6.17	5.16	6.15	5.48	4.44	5.85	5.87	5.85	5.74
Estadísticos De Ajuste	R ²	0.66	0.67	0.66	0.79	0.69	0.56	0.66	0.64	0.67	0.67
	Sx	4.40	4.36	4.68	3.70	11.9	7.13	6.21	6.45	6.15	4.99

Los valores de r^2 se redujeron en contraste con los valores de r^2 estimados para las ecuaciones de ajuste de los modelos. Sin embargo, el error estándar continuó siendo similar a aquel de las ecuaciones de ajuste de parámetros. De los modelos aditivos, el procedimiento SUR de estimación de parámetros continuó siendo el de mejor ajuste. Mientras que los modelos generales, sin componentes de biomasa mejoraron sus predicciones en comparación con sus ajustes iniciales. Estas pruebas de validación son el resultado de ajustar las ecuaciones a árboles de mediana talla en biomasa, ya que su promedio oscila en los 11 kg árbol⁻¹, cuando el promedio de biomasa total para *P. durangensis* oscila en los 19 kg árbol⁻¹ y para *P. cooperi* en los 17 kg árbol⁻¹.

Los modelos aditivos desarrollados en regresión similar sin relación, SUR, en general se ajustaron mejor a la biomasa total para cada especie probada y para el grupo de especies. Estas ecuaciones pierden poca eficiencia cuando contrastadas con las ecuaciones generales de estimación de biomasa total, la cual ha sido discutida por Parresol (1999) y Reed y Green (1985). Sin embargo, los procedimientos aditivos tienen la ventaja de que su ecuación general resulta en la suma de los componentes de biomasa. Para grupos de especies, Brown *et al.*, (1989) usaron modelos lineales múltiples pero no desarrollaron los modelos aditivos

ni discutieron su aplicabilidad cuando se estima la biomasa total. Los modelos desarrollados con procedimientos SUR resuelven los problemas de multicolinealidad que presentan los componentes de biomasa y este puede ser un problema importante en la precisión de estimar la biomasa y sus componentes (Cunha y Briggs, 1984; Parresol, 1999).

La utilización de estas ecuaciones en la estimación de los componentes de biomasa y biomasa total se debe de tomar con precaución cuando se realicen inventarios de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Su aplicabilidad es más eficiente en el rango de parámetros dasométricos observados en este reporte. Cuando aplicadas estas ecuaciones a árboles de mayor talla, las estimaciones de biomasa total podrían resultar sesgadas. Otra fuente de variación adicional incluye el error asociado con la selección aleatoria del rodal (Parresol, 1999). El esquema de muestreo y la variación inherente a la selección de la unidad muestral son las consideraciones más importantes en el error. Los gradientes en altitud sobre el nivel del mar, aunados con otras variables asociadas con la pendiente originan unidades muestrales diferentes en estructura y diversidad y el error total en la estimación la biomasa total puede incrementar considerablemente. Brown *et al.*, (1989) incluyeron otras variables tales como la densidad de la madera y la zona de vida de Holdridge para reducir la variación asociada con la selección de la muestra. La inclusión de estas variables en las ecuaciones de biomasa es materia de estudios adicionales en este ecosistema.

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron ecuaciones para estimar los componentes de biomasa y biomasa total para especies típicas de bosques plantados con especies de pino de la Sierra Madre Occidental. Se mostró que la aplicabilidad de las ecuaciones desarrolladas en modelos de regresión similar no relacionada proveen las estimaciones más eficientes y con menor sesgo. Estas ecuaciones se pueden utilizar preliminarmente en inventarios de biomasa aunque requieren de una mayor afinación para ser utilizadas a los niveles espaciales deseados.

RECONOCIMIENTOS

El CONACyT y PAICyT, financiaron este proyecto de investigación a través de los proyectos 28536-B y CN 323 00, respectivamente.

REFERENCIAS

- Agee, J.K. 1983. Field weights of understory-grown conifers in southern Oregon. *Can. J. For. Res.* 13: 648-656.
- Alanís, G. 1982. El matorral como recurso pecuario en el nordeste de México. Facultad de Ciencias Biológicas, UANL. Monterrey, México. 44 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 Arbores*. Vol 1. Antalya Turkia 13-22 October of 1997.
- Brown, S., A. J. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35(4): 881-902.
- Baskerville, G.L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. For. Res.* 2: 49-53.
- Burkhart, H.E. and P.T. Sprinz. 1984. Compatible cubic volume and basal area projection equations for thinned old-field loblolly pine plantations. *For. Sci.* 30: 86-93.
- Chiyenda, S.S. and A. Kozak. 1984. Additivity of component biomass regression equations when the underlying model is linear. *Can. J. For. Res.* 14: 441-446.
- Clough, B.F. and K. Scott. 1989. Allometric relationships for estimating aboveground biomass in six mangrove species. *Forest Ecology & Management* 27: 117-127.
- Clutter, J.L., J.C. Forston, L.V. Pienaar, G.H. Brister, and R.L. Bailey. 1983. *Timber management: A quantitative approach*. Wiley, New York. 333 p.
- COTECOCA-SARH. 1973. Coeficientes de agostadero de la República Mexicana, Edo. de N. L., Secretaría de Agricultura y Ganadería. Comisión Técnico Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostadero, México.

-
- Cunia, T. and R.D. Briggs. 1985. Forcing additivity for biomass tables: use of the generalized least square method. *Can. J. For. Res.* 15: 23-28.
- Deans, J.D., J. Moran, and J. Grace. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameroon. *For. Ecol. & Manag.* 88: 215-225.
- Estrada, E. and J. Marroquin. 1990. Leguminosas en el centro-sur de Nuevo León. Reporte científico número 10. Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, N.L., México.
- Green, E.J. and D.D. Reed. 1985. Compatible tree volume and taper equations for pitch pine. *North. J. Appl. For.* 2: 14-16.
- Heiseke, D. 1984. Regeneración por rebrotes en dos tipos de matorral subinermes de la región de Linares, N.L., Facultad de silvicultura y Manejo de Recursos Renovables, UANL, México, 17 p.
- Heiseke, D. and R. Foroughbakhch. 1985. El matorral como recurso forestal. Reporte científico Número 1. Facultad de Ciencias Forestales UANL, Linares, N. L., México, 31 p.
- Hooda, M.S., R. Bahadur, and K.S. Bangarwa. 1993. Growth and biomass yield of six multipurpose trees of arid and semiarid India. *Nitrogen Fixing Trees Research Reporte* 11: 8-9.
- Mákelá: A. 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in tree based on structural relationships. *For. Sci.* 43: 7-24.
- Manzano, M.G., and J. Návar. 2000. Processes of desertification by goats overgrazing in the tamaulipan thornscrub (matorral) in north-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 44: 1-17.
- Marklund, L. 1983. Collecting data for biomass equation development: some methodological aspects. *Mesures des biomasses et des accroissements forestiers. Les Colloques de l'INRA Orleáns, France* 19: 37-43.
- Monserud, R., A. Onuchin, and N. Tchebakova. 1996. Needle, crown, stem, and root phytomass of *Pinus silvestris* stands in Russia. *Forest Ecology and Management* 82: 59-67.

-
- Mohren, F. 1994. CO₂ Fix Model. Institute of Forestry and Nature Research. Wageningen, Netherlands.
- Návar, J., T. Cavazos and P.A. Domínguez. 1994. Los balances hidrológicos mensuales con tres probabilidades de precipitación en el Estado de Nuevo León. Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra. Ed. C. Pola, J.A. Ramírez F., M.M. Rangel y I. Navarro-L. NANL. Linares, N. L. México.
- Návar, J., F. Charles, and E. Jurado. 1999. Spatial variations of interception loss components by Tamaulipan thornscrub in northeastern Mexico. *Forest ecology and Management* 124: 231-239.
- Parresol, B. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45: 573-593.
- Pastor, J. and J.G. Bockheim. 1981. Biomass and production of an aspen mixed hardwood-spodosol ecosystem in northern Wisconsin. *Can. J. For. Res.* 11: 132-138.
- Prado, J., P. Infante, M. Arriaga y S. Aguirre. 1987. Funciones de biomasa para seis especies arbustivas de la zona árida de Chile. *Ciencia e Investigación Forestal* 1(2): 11-20.
- Prado, J.A. y C. Alarcón. 1990. Funciones de biomasa de *Eucalyptus globulus* en la región costera central. *Ciencia e Investigación Forestal* 5(1): 59-70.
- Reed, D. and E.J. Green. 1985. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. *Can. J. For. Res.* 15: 1184-1187.
- Reid, N., J. Marroquin, and P. Beyer-Munzel. 1990. Utilization of shrubs and trees for browse, fuelwood and timber in the Tamaulipan thornscrub, northeastern México. *Forest Ecology and Management* 36: 61-79.
- Schroeder, P., S. Brown, J. Mo, R. Birdsey, and C. Cieszewski. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *For. Sci.* 43 (3) 424-434.
- Ter-Mikaelian, M.T. and M.D. Korzukhin. 1997. Biomass equations for sixty five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1-24.

ECUACIONES PARA ESTIMAR EL RENDIMIENTO E INCREMENTO EN BIOMASA TOTAL EN PLANTACIONES FORESTALES DE DURANGO, MEXICO

Nicolás González¹ y José Návar²

¹Estudiante de Maestría en Ciencias Forestales y ²Profesor Titular B FCF-UANL Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Km 145 Carretera Nacional Linares, N.L 67700 México. Tel (821 24895). Email: jnavar@ccr.dsi.uanl.mx

RESUMEN

En este reporte de investigación se presentan tres modelos para estimar el crecimiento de la biomasa total de plantaciones forestales de Durango, México. Se ajustaron modelos al nivel del rodal (2) y al nivel de árboles individuales (1) a 18 parcelas y se validaron con cinco parcelas plantadas con *P. durangensis*, *P. cooperi* O, *P. cooperi* B., *P. engelmannii* y *P. arizonica*. El modelo al nivel de los árboles individuales predijo mejor el crecimiento en biomasa total y por esta razón se recomienda su utilización preliminar en la estimación de la biomasa total y sus atributos secundarios.

Palabras clave: Sierra Madre Occidental, Modelos al nivel del Rodal y Arboles Individuales independientes de la distancia, Weibull.

ABSTRACT

In this research, we present three models to estimate biomass growth in forest plantations of Durango, Mexico. We fitted models at the stand (2) and at the individual tree (1) scales to 18 stands and validated with five stands planted with con *P. durangensis*, *P. cooperi* O, *P. cooperi* B., *P. engelmannii* y *P. arizonica*. The individual tree model predicted better biomass growth and therefore it is recommended to be preliminarily used to estimate biomass growth and yield and secondary stand attributes.

Key Words: Sierra Madre Occidental mountain range, Biomass Growth & Yield Models at the Stand, and individual tree models, Weibull.

INTRODUCCION

En las últimas décadas se ha dado considerable atención a la estimación de biomasa de árboles individuales y rodales forestales. Se han desarrollado ecuaciones que relacionan la biomasa o sus componentes (raíces, hojas, ramas y fustes) con las características dasométricas de los árboles (Bakersville, 1965; Pastor and Bockheim, 1981; Agee, 1983). En la actualidad existen ecuaciones de biomasa desarrolladas o compiladas para bosques tropicales, templados (Schroeder *et al.*, 1997; Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997; Brown *et al.*, 1989) y algunos tipos de vegetación semiarida (Návar *et al.*, 2001). Sin embargo, los modelos de rendimiento e incremento en biomasa son escasos en la literatura científica.

Los estudios sobre el rendimiento e incremento en biomasa tienen como finalidad entender los ciclos de la energía y de los nutrientes. También se están usando para observar el efecto de la vegetación en el ciclo global del CO₂ (Brown, 1997). Algunos modelos de CO₂ (e.g., Makela, 1997; Mohren, 1994) incluyen la estimación del incremento y rendimiento en volumen como el atributo principal de la biomasa y algunos de sus componentes o parámetros relacionados para establecer los flujos de este gas entre la vegetación, el suelo y la atmósfera. Estos modelos adolecen precisión en la estimación de la biomasa porque la densidad no es constante en diámetro y altura por las diferencias estructurales de sus componentes principales albura y duramen. Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue ajustar tecnologías matemáticas disponibles para estimar el incremento y rendimiento de la biomasa total en plantaciones forestales de la Sierra Madre Occidental de Durango, México.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo de campo para desarrollar los modelos de incremento y rendimiento en biomasa se realizó en el municipio de Pueblo Nuevo del Estado de Durango,

México. Se estudiaron plantaciones forestales de cinco especies: *P. durangensis* M, *P. cooperi* O, *P. cooperi* B, *P. engelmannii* C, y *P. arizonica*. En total se midieron 23 parcelas plantadas en diferentes tiempos desde 1978 hasta 1994 en áreas incendiadas o plagadas, con coberturas espaciales de menos de 12 ha, densidades iniciales variables y en diferentes espaciamientos entre plántulas.

El área de estudio se ubica en el municipio de Pueblo Nuevo, al sudeste del estado de Durango, México, en el maciso principal de la Sierra Madre Occidental. El clima predominante del área es templado o semifrío subhúmedo, con lluvias veraniegas que ascienden a los 1200 mm anuales, con una temperatura promedio anual de 11.7°C. Los suelos son predominantemente cambisoles, litosoles y regosoles, con profundidades que no exceden los 30 cm. La vegetación nativa se caracteriza por ser bosques desde mixtos e irregulares de pino-encino hasta masas puras de pino en altitudes mayores a los 2500 msnm.

Las características dasométricas de las parcelas estudiadas se reportan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros dasométricos promedio de coníferas del género *Pinus* de la Sierra Madre Occidental del norte de México.

Especies	DB (cm)	H (m)	RCopa (m)	Edad (años)	Densidad No ha ⁻¹	
					Inicial	Edad ^t
LE1: <i>P. durangensis</i>	12.24	8.15	1.0.3	21	6667	4667
LE2: <i>P. arizonica</i>	10.60	5.78	1.04	21	6667	4217
LE3: <i>P. cooperi</i>	15.52	7.34	1.18	21	6667	1900
LE4: <i>P. arizonica</i>	9.55	4.61	-	21	6667	5500
LE5: <i>P. cooperi</i>	15.69	9.77	-	21	6667	2450
LE6: <i>P. cooperi</i>	15.93	8.63	1.27	21	6667	2882
LE7: <i>P. durangensis</i>	14.77	7.23	1.24	21	6667	3138
LE8: <i>P. durangensis</i>	14.84	8.91	1.22	21	6667	3090
LE9: <i>P. cooperi</i>	10.19	4.81	0.97	21	6667	3100
SA1: <i>P. durangensis</i>	16.27	6.06	1.25	17	2500	1867
SA2: <i>P. durangensis</i>	20.31	7.20	0.90	17	1111	689
SA3: <i>P. durangensis</i>	17.56	6.41	1.45	17	1600	1444
SA4: <i>P. durangensis</i>	14.43	6.14	1.94	17	4444	2633

PI1: <i>P. cooperi</i> B	14.00	3.63		18	2500	1633
AL1: <i>P. durangensis</i>	15.68	7.30	1.09	16	5000	2233
AL2: <i>P. cooperi</i>	11.03	5.83	1.65	16	5000	1817
SP1: <i>P. engelmannii</i>	11.16	2.87	1.06	10	2500	1617
SP2: <i>P. cooperi</i>	8.69	2.66	1.21	10	2500	1867
SP3: <i>P. durangensis</i>	8.41	2.81	1.38	10	2500	2133
LB1: <i>P. engelmannii</i>	5.61	2.80	0.59	11	10000	3575
LB2: <i>P. cooperi</i>	10.55	5.84	1.11	11	10000	4950
LC1: <i>P. durangensis</i>	6.32	2.26	1.29	7	2500	1767
LC2: <i>P. cooperi</i>	4.97	1.74	1.10	7	2500	1950

DB= Diámetro basal (cm); rCopa= radio promedio de la copa (m)

Las especies plantadas se usan tradicionalmente como trocería, postes, pilotes, muebles, combustible, pulpa para papel y cuando son bajos fustales o altos latizales se utilizan como tutores o latas para cimbras.

Muestreo

En cada una de las 25 parcelas se aislaron sitios temporales de muestreo, predominantemente de 20x30 m, dentro de las cuales se midieron y cuantificaron todos los individuos presentes. Las medidas realizadas incluyeron el diámetro a la base (DB), la altura total (H) y la cobertura dada por la medición de un radio o un diámetro de copa y ajustada a la superficie de un círculo (COB). Además se cortaron 56 árboles para realizar los estudios de análisis troncales y biomasa, los cuales consistieron en separar los componentes ramas, hojas y fustes. Estos árboles se midieron también en sus características dasométricas mencionadas y además se les tomó el diámetro a cada 0.5 m del fuste hasta la parte distal. Se cortaron rodajas para los análisis troncales. Los árboles derribados se pesaron en fresco por componente de biomasa (hojas, ramas y fustes). Se colectaron muestras de los componentes de biomasa se pesaron, se secaron en el laboratorio por 100°C por 24 horas y vueltas a pesar. El índice peso seco/peso fresco de la muestra sirvió como factor para estimar el peso seco por componente por árbol. Con esto se desarrollaron ecuaciones de biomasa desde tres perspectivas de aditividad. Los individuos se seleccionaron cubriendo el rango de características dasométricas y cortados dentro de un período no mayor a 2 meses para que la biomasa sobre todo

foliar no mostrara variaciones temporales. Este procedimiento ha sido recomendado por Monserud *et al.* (1996) y Marklund (1983).

Procedimiento

Primero se ajustaron ecuaciones para estimar la biomasa de los árboles individuales cortados. Las ecuaciones comúnmente usadas tienen formas simples lineales, simples no lineales, lineales múltiples y no lineales múltiples (Clutter *et al.*, 1983). En este trabajo se ajustaron dos tipos de ecuaciones que reúnen los requisitos de aditividad descritos por Cunia y Briggs (1985); Reed y Green (1985) y Parresol (1999), donde la aditividad de los componentes se asegura por el uso de la misma variable independiente o se define como la función de la suma de cada una de las mejores regresiones individuales de cada componente en biomasa. La evaluación de las ecuaciones se realizó por medio de los estadísticos de bondad de ajuste: el coeficiente de determinación, r^2 , el error estándar, S_x y el coeficiente de variación, CV. La ecuación seleccionada y reportada en Nívar *et al.* (2001) es la siguiente:

$$BT = -0.2912 + 0.009299Db^2h - 1.3604 + 0.71155Cob + 0.01512Db^2h - 0.905066 + \\ + 0.3385Db - 0.380066H + 0.2165Cob$$

$$r^2 = 0.91; \quad S_x = 4.71Kg; \quad CV = S_x(\%) = 26\% \quad [1]$$

Donde BT= biomasa total (kg), Db=diámetro basal (cm), H=altura total (m) y Cob=cobertura total (m^2). La ecuación [1] no se redujo porque cada parte estima los componentes hojas, ramas y fustes, respectivamente. Esta ecuación se utilizó para estimar la biomasa total de cada árbol de cada parcela para conocer este parámetro al nivel espacial (1 ha).

Con los datos de biomasa total por hectárea, los atributos dasométricos de los árboles medidos de cada parcela, sus promedios por parcela, además de la edad de la plantación, el área basal, el índice de sitio, se procedió a ajustar los siguientes tres modelos de rendimiento e incremento en biomasa. Estos modelos, por tener plantaciones de diferentes edades, suponen que el crecimiento futuro de una

plantación seguirá el comportamiento de otra plantación de mayor edad, siempre y cuando su densidad e índice de sitio sean similares. El primer modelo sigue el procedimiento de Clutter (1963) y Clutter *et al.* (1983) y es descrito en Zepeda y Domínguez (1998) para la estimación del incremento y rendimiento en volumen, como sigue:

$$\frac{\partial AB}{\partial E} = -AB \frac{[\ln(AB)]}{E} + c_1 \left(\frac{AB}{E} \right)$$

$$\ln(AB_2) = \left(\frac{E_1}{E_2} \right) * \ln(AB_1) + c_1 \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right)$$

$$\ln(BT) = B_0 + B_1 IS + \frac{B_2}{E} + B_3 \ln(AB)$$

$$Ho = \frac{E^2}{B_0 + B_1 E + B_2 E^2}$$

$$\frac{\partial BT}{\partial E} = BT \left[\frac{-B_2}{E^2} \right] + B_3 \left(\frac{\partial AB}{\partial E} \right) \frac{1}{AB}$$

$$\ln(BT_2) = B_0 + B_1 IS + \frac{B_2}{E_2} + B_3 \left(\frac{E_1}{E_2} \right) * \ln(AB) + B_4 \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \quad [2]$$

Donde E=edad (años), AB= área basal (m²), BT= biomasa total (Mg ha⁻¹), IS= índice de sitio, c, B₀, B₁, B₂, B₃, son parámetros estadísticos.

El segundo modelo de rendimiento e incremento en biomasa total se basa en el ajuste y predicción de parámetros de la distribución weibull al nivel del rodal, ponderado por el índice de sitio y su teoría se describe a continuación.

$$BT = f(Db, H, Cob) * N * IS$$

$$N_2 = N_1 \left[\frac{E_2}{E_1} \right]^{B_0} \text{Exp}[(B_1 - B_2, S)(E_2 - E_1)]$$

$$N_{2CDI} = f(X) = \frac{\alpha}{\beta} \left[\frac{x - \varepsilon}{\beta} \right]^{\alpha-1} \text{Exp} - \left[\frac{x - \varepsilon}{\beta} \right]^\alpha CD$$

$$\alpha = f(Db, Dq, AB, H, Ho)$$

$$\beta = f(Db, Dq, AB, H, Ho)$$

$$\varepsilon = f(Db, Dq, AB, H, Ho)$$

[3]

Donde: D_q = diámetro cuadrático promedio (cm), H_o = altura dominante (m), $\alpha, \beta, \varepsilon$ = parámetros de forma, escala y posición de la distribución weibull.

El modelos para árboles individuales basó su teoría en la ecuación [4]:

$$\begin{aligned}
 BT &= f(Db, H, Cob) * N * IS \\
 Db_{ei} &= f(E) = Db_1 * B_0(1 - Exp(B_1 E))^{B_2} \\
 H_{ei} &= f(E) = Db_1 * B_0(1 - Exp(B_1 E))^{B_2}
 \end{aligned}
 \quad [4]$$

Donde: Db_{ei} y H_{ei} = Diámetro a la base (cm) y Altura total (m) a la edad i de la masa; B_0 , B_1 y B_2 = parámetros estadísticos.

RESULTADOS Y DISCUSION

Modelo 1 al nivel del Rodal

El índice de sitio. En la Figura 1 se muestra el índice de sitio estimado para las 23 parcelas de observación para las cinco especies plantadas en la Sierra Madre Occidental de Durango, México. La ecuación de Chapman Richards se ajustó mejor a la tendencia mostrada entre la altura dominante y la edad de las plantaciones, en contraste con el resto de los modelos probados de Weibull, Levakovick, Sloboda y Logístico. La ecuación muestra una constante $k=11.9$ m y es el resultado de la corta base de datos en edad y altura. El índice de sitio se tomó a la edad base de 15 años.

Las plantaciones de Los Bancos y La Ciudad mostraron los mayores crecimientos en altura a las edades observadas y esto es el resultado de encontrarse en los mejores sitios las especies adecuadas. *P. cooperi* y *P. durangensis* dominan las partes altas de la Sierra Madre Occidental de esta parte de Durango y se localizan en mesetas, con suelos profundos, ricos en materia orgánica, bien drenados y en altitudes sobre el nivel del mar mayores a los 2600 msnm. No es sorprendente observar como *P. engelmannii* que se encuentra fuera de su rango de distribución, se localiza primordialmente por debajo de los 2400 msnm (Graciano,

2001) ha mostrado crecimientos bajos en altura comparados con las especies nativas.

Los sitios de Piloncillos y San Pablo muestran las calidades mas bajas en crecimiento en altura por localizarse en sitios pobres, con suelos poco profundos, rocosos, localizados en bajíos, con poco drenaje.

Los estadísticos de ajuste del modelo 1 mostraron que el área basal se puede predecir con la menor precisión ($r^2=0.35$, $S_x=10.7\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$; $S_x(\%)=63\%$) con parámetro $c=3.1797$. Este parámetro de incremento en biomasa es un tanto bajo en contraste con aquel reportado para rendimiento e incremento en volumen para las plantaciones esteafricanas (Alder, 1979) y de bosques nativos del norte de México (Zepeda y Domínguez, 1998). En contraste, el modelo para predecir la biomasa total tuvo una mejor eficiencia ($r^2=0.95$, $S_x=9.1\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$; $S_x(\%)=19\%$). En la Figura 2 se muestra el crecimiento en biomasa total, de donde se desprende la cobertura tan amplia en crecimiento en biomasa por los índices de sitio. En este caso se detectó que las parcelas con *P. durangensis* y *P. cooperi* prefirieron suelos bien drenados, con exposiciones zenitales o las derivadas del norte. Las plantaciones de *P. arizonica* y una plantación de *P. cooperi* mostraron rendimientos muy bajos en biomasa, porque la primera especie pertenece a un rango de distribución un poco mas al norte del estado. Otras plantaciones con especies como *P. engelmannii* estan desarrollando regularmente a pesar de encontrarse fuera de la zona de distribución.

Los estadísticos de bondad de ajuste del modelo al rendimiento en biomasa total reportaron los siguientes valores $r^2=0.58$, $S_x=24.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $\text{CV}=50\%$. Para las parcelas de validación del modelo estas estadísticas cambiaron a $r^2=0.20$, $S_x=15.3 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $\text{CV}=35\%$.

Modelo 1 al nivel del Rodal 2

La distribución weibull ajustada a las estructuras diamétricas de varias parcelas se muestran en la Figura 3. Es notorio observar que a medida que la edad de la

plantación se incrementa, la distribución se desplaza hacia la derecha. Es decir, la distribución weibull ajustada crece notoriamente en el parámetro de escala posición, tratando de desplazarse en su diámetro mínimo e incrementando su variación. El incremento en la variación se debe primordialmente a: (1) la mortalidad de los árboles dominados o suprimidos, los cuales ya no crecen en diámetro pero aun se encuentran en el sitio y (2) al crecimiento de los árboles dominantes, mejor adaptados al sitio. El crecimiento en el parámetro de forma es un proceso casi aleatorio y para todos propósitos se definió como una constante. Es decir, la forma casi de una curva de Gauss de la estructura diamétrica con diferente edad es característico en plantaciones forestales donde los diámetros se encuentran bien balanceados desde sus primeras etapas de la plantación.

Las ecuaciones de predicción de parámetros de la distribución weibull se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Ecuaciones para predecir parámetros de la distribución probabilística Weibull ajustada a los diámetros de 18 rodales plantados con 4 especies de pinos en Durango, México.

Ecuación	Estadísticos de Ajuste		
	R2	Sx	Sx(%)
$\beta = e(0.1567 + .946 \ln(D) + 0.033375 \ln(H_0))$	0.99	0.22	1.6
$\alpha = e(-0.198 + 21.0157 \ln(\beta) - 20.89 \ln(Dq) - 1.364 \ln(H))$	0.92	1.59	48.7
$\varepsilon = e(0.911 - 44.66 \ln(\beta) + 31.485 \ln(D) + 14.03 \ln(dq) + 0.3511 \ln(Da))$	0.97		

El parámetro de escala muestra la mayor precisión en sus predicción por el bajo error estándar y el alto coeficiente de determinación, mientras que los otros dos parámetros adolecen de una falta de mayor precisión por sus altos errores porcentuales. Esto también ha sido observado por Nívar et al. (1996) y Nívar y Corral (2000) en bosques nativos de pinos y encinos de la Sierra Madre Occidental de Durango, México. Con este modelo se acepta el ajuste de la distribución weibull en 11 de 18 casos, con un error de 0.05, con la prueba de χ^2 . Para los rodales de validación de los modelos, esta distribución se ajusta adecuadamente a 4 de 5

casos, con la misma prueba de hipótesis, en el mismo error probabilístico. Estos resultados definieron la bondad de la primera parte del modelo.

La predicción de D , H , H_0 y Da mostraron buenas estadísticas de ajuste, con coeficientes de determinación por arriba del 0.70 y errores estándares porcentuales menores que 50%. Sin embargo, los modelos tendieron a alcanzar constantes rápidamente con la edad $t=20$ años. Los modelos seleccionados fueron los siguientes:

$$D=12.9072/(1+13.867*\exp(-0.30643t)); r^2=0.88; S_x=1.22\text{cm}$$

$$D_q=0.6276+1.0403D; r^2=0.99; S_x=0.11\text{cm}$$

$$H=8.3436/(1+29.10228*\exp(-0.2740t)); r^2=0.76; S_x=1.56\text{m}$$

$$H_0=0.7087+1.2374H; r^2=0.98; S_x=0.55\text{m}$$

$$Cob=((0.256813851385+0.14046D+0.0281151H)^2)*3.1416; r^2=0.65; S_x=1.26\text{m}^2$$

El modelo de la densidad también mostró buena bondad de ajuste, aunque también mostró un error porcentual grande (Figura 4). Debido a esto y a que la densidad inicial fue muy variable, el modelo 3 se corrió con una densidad inicial promedio de 5000 árbolillos.

El modelo al nivel del rodal2 o de la distribución weibull tiende a estimar adecuadamente la biomasa total hasta 15 años y posteriormente alcanza un estadio constante no característico de las curvas de rendimiento e incremento (Figura 2). Este artificio matemático se debe a la estimación de los parámetros de altura y diámetro en función de la edad de la plantación. Con la aplicación de los modelos sigmoïdales y la fuente de datos en edad sin sobrepasar los 20 años, la altura y edad alcanzan estadios constantes en tiempos menores a 20 años. Como consecuencia, los parámetros de la distribución weibull, donde en plantaciones mayores que 17 años, ya no se desplazan significativamente, sin desplazar tampoco las distribuciones diamétricas. Se recomienda estimar los parámetros D , H y H_0 en función de la edad con datos de mayor edad en tiempo o con datos colectados en la región para las especies estudiadas en rodales naturales.

Los estadísticos de bondad de ajuste del modelo al rendimiento en biomasa total fueron mejores que aquellos reportados para el modelo 1 con $r^2=0.79$, $S_x=16.7$ Mg ha⁻¹ y CV=35%. Para las parcelas de validación del modelo estas estadísticas también mejoraron con valores de $r^2=0.22$, $S_x=14.0$ Mg ha⁻¹ y CV=32%.

Modelo al nivel de los Árboles Individuales

Los modelos de crecimiento en diámetro y altura para los árboles individuales fueron ponderados por el diámetro a la edad actual de cada árbol para mejorar las proyecciones de cada árbol en función de la edad. Para esto se ajustaron tres tipos de modelos sigmoidales de Capman-Richards, Weibull y Logístico. El primer modelo mostró los mejores ajustes y fue considerado en las predicciones del diámetro y la altura en función de la edad. La cobertura fue predicha en función de estos parámetros y con estos parámetros se predijo la biomasa total en función del modelo 1. Los modelos para predecir la altura total t diámetro basal fueron las siguientes para cada una de las especies:

Diámetro:

P.durangensis; $db=Dbi*1.19848*(1-\exp(-0.137535t)^{2.4339})$; $r^2=0.94$; $S_x=1.09$ cm

P.arizonica; $db=Dbi*1.632645*(1-\exp(-0.063109t)^{1.4567})$; $r^2=0.90$; $S_x=1.23$ cm

P.cooperi; $db=Dbi*1.189003*(1-\exp(-0.10817t)^{1.5694})$; $r^2=0.95$; $S_x=1.08$ cm

Altura

P.durangensis; $h=Dbi*1.030771*(1-\exp(-0.06763t)^{2.1091})$; $r^2=0.86$; $S_x=1.99$ m

P.arizonica; $h=Dbi*0.6093*(1-\exp(-0.1384t)^{2.8179})$; $r^2=0.85$; $S_x=2.13$ m

P.cooperi; $h=Dbi*1.189003*(1-\exp(-0.10817t)^{1.5694})$; $r^2=0.89$; $S_x=1.65$ m

El modelo al nivel de los árboles individuales por el contrario crece a una tasa similar a aquella mostrada por el modelo 2. El modelo 4 predice adecuadamente la biomasa de las parcelas en todo el rango de observaciones, con la excepción de la parcela denominada Los Bancos, donde se plantó la especie *P. cooperi*. El crecimiento futuro no es tan pronunciado como aquella tendencia mostrada por el

modelo 1 y tampoco alcanza una constante tan rápido como el modelo 2. Estas observaciones se pueden apreciar en la Figura 2, gráfica 4.

Los estadísticos de bondad de ajuste del modelo 3 fueron mejores que aquellos reportados para los modelos 1 y 2, con valores de $r^2=0.75$, $S_x=18.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $CV=37\%$. Para las parcelas de validación del modelo estas estadísticas también mejoraron con valores de $r^2=0.49$, $S_x=9.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $CV=22\%$. Los estadísticos de ajuste y validación de los tres modelos indicaron que la técnica de predicción al nivel del árbol individual provee los mejores estimadores del rendimiento e incremento de la biomasa total en las plantaciones probadas. Por esta razón se recomienda su utilización preliminar en la estimación de biomasa al nivel del rodal en las plantaciones forestales del Estado de Durango, México.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ajustaron y validaron tres modelos de rendimiento e incremento de biomasa total en plantaciones forestales del estado de Durango, México. El modelo al nivel de los árboles individuales predice mejor el crecimiento en biomasa total y se recomienda su utilización preliminar para la estimación de la biomasa total y sus parámetros secuenciales.

RECONOCIMIENTOS

El CONACyT y PAICyT, financiaron este proyecto de investigación a través de los proyectos 28536-B y CN 323 00, respectivamente.

REFERENCIAS

- Alder, D. 1979. A distance-independent tree model for exotic conifer plantations in east Africa. For. Sci. 25: 59-71
- Agee, J.K. 1983. Field weights of understory-grown conifers in southern Oregon. Can. J. For. Res. 13: 648-656.

-
- 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 Arbores*. Vol 1. Antalya Turkia 13-22 October of 1997.
- Brown, S., A. J. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35(4): 881-902.
- Baskerville, G.L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. For. Res.* 2: 49-53.
- Clutter, J.L. 1963. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *For. Sci.* 9: 354-371.
- Clutter, J.L., J.C. Forston, L.V. Pienaar, G.H. Brister, and R.L. Bailey. 1983. *Timber management: A quantitative approach*. Wiley, New York. 333 p.
- Cunia, T. and R.D. Briggs. 1985. Forcing additivity for biomass tables: use of the generalized least square method. *Can. J. For. Res.* 15: 23-28.
- Mákelá: A. 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in tree based on structural relationships. *For. Sci.* 43: 7-24.
- Marklund, L. 1983. Collecting data for biomass equation development: some methodological aspects. *Mesures des biomasses et des accroissements forestiers. Les Colloques de l'INRA Orleáns, France* 19: 37-43.
- Monserud, R., A. Onuchin, and N. Tchebakova. 1996. Needle, crown, stem, and root phytomass of *Pinus silvestris* stands in Russia. *Forest Ecology and Management* 82: 59-67.
- Mohren, F. 1994. CO₂ Fix Model. Institute of Forestry and Nature Research. Wageningen, Netherlands.
- NÁVAR, J., Jiménez, J., Domínguez, P.A., Aguirre, O., Galván M y Páez A. 1996. Predicción del crecimiento de masas forestales mixtas e irregulares en base a las distribuciones diamétricas en el sureste de Sinaloa, México. *Investigación Agraria: Sistemas Forestales* 5: 213-229.
- Návar, J. y Corral, S. 2000. Modelling the weibull distribution parameters of uneven-aged Pine and oak diameter structures of Durango, Mexico. *International Conference on Forest Ecosystem Restoration*. 10-12 April 2000. Vienna, Austria.

-
- Parresol, B. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45: 573-593.
- Pastor, J. and J.G. Bockheim. 1981. Biomass and production of an aspen mixed hardwood-spodosol ecosystem in northern Wisconsin. *Can. J. For. Res.* 11: 132-138.
- Reed, D. and E.J. Green. 1985. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. *Can. J. For. Res.* 15: 1184-1187.
- Schroeder, P., S. Brown, J. Mo, R. Birdsey, and C. Cieszewski. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *For. Sci.* 43 (3) 424-434.
- Ter-Mikaelian, M.T. and M.D. Korzukhin. 1997. Biomass equations for sixty five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1-24.
- Zepeda Bautista, M.E. y Domínguez-Pereda, A. 1998. Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engl., de El Poleo, Chihuahua.

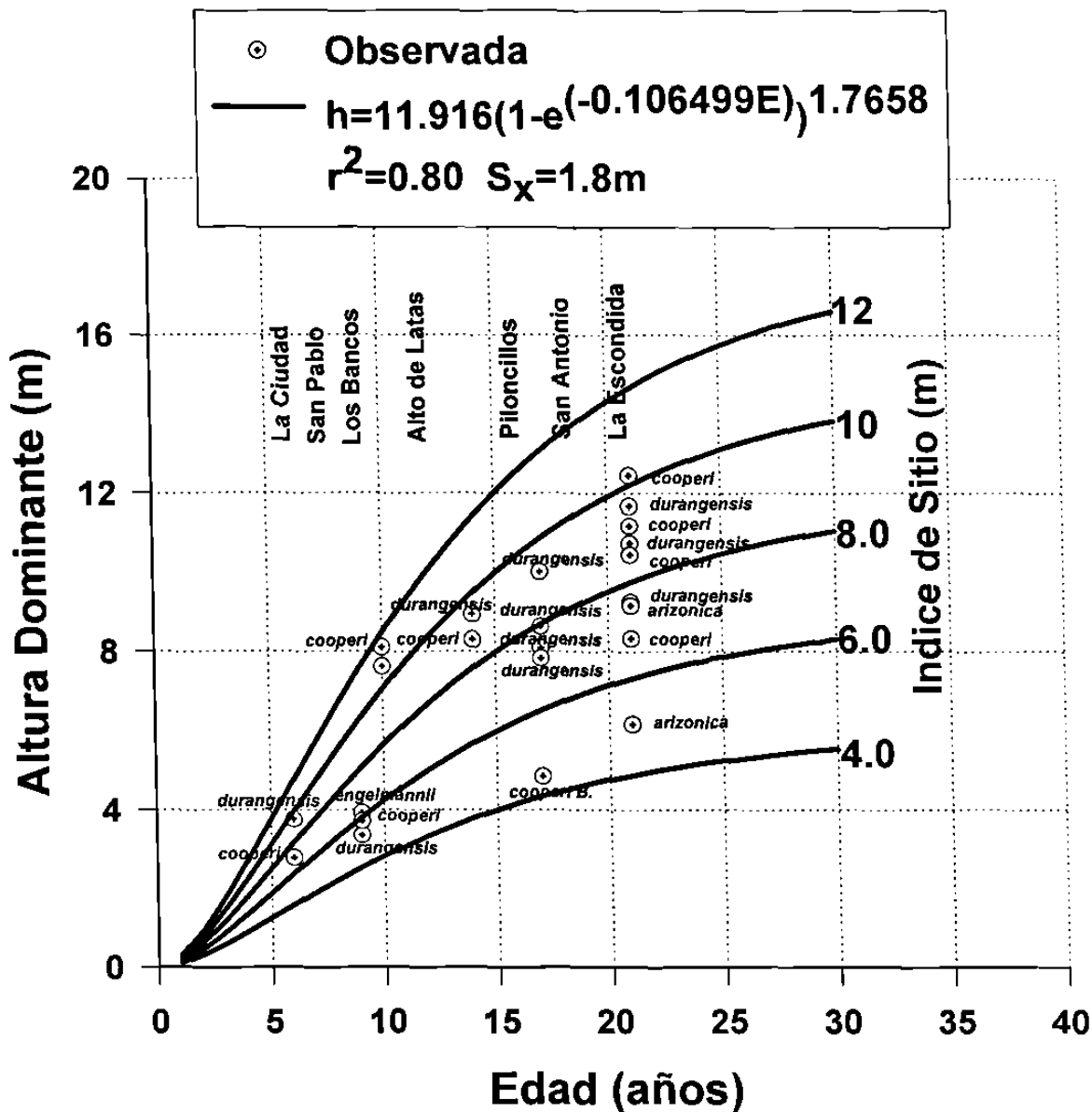


Figura 1. Los índices de sitio para las 23 parcelas plantadas en la región del Salto, Durango, México.

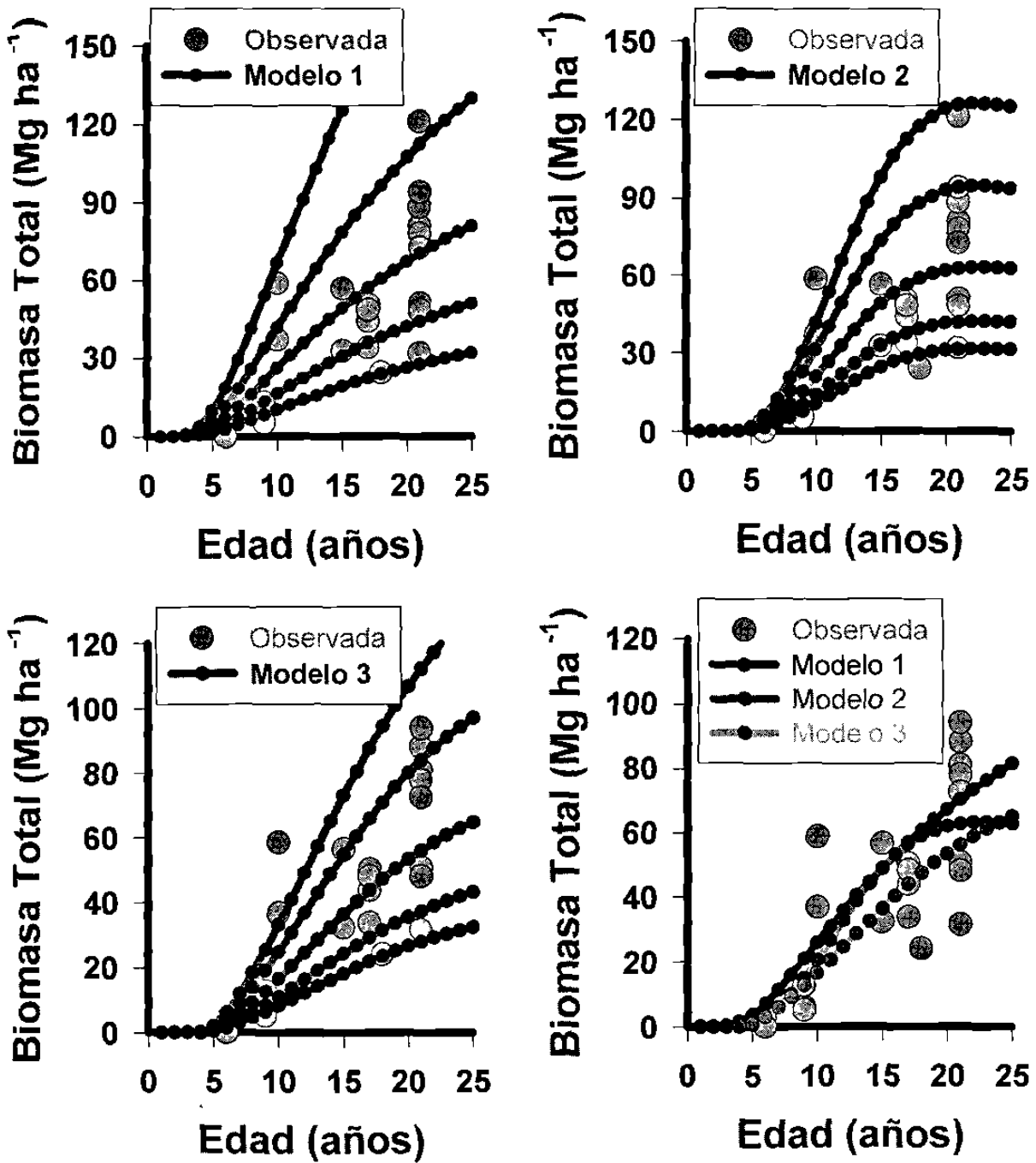


Figura 2. Los modelos de rendimiento e incremento en biomasa para 18 parcelas plantadas con cinco especies en la región del Salto, Durango.

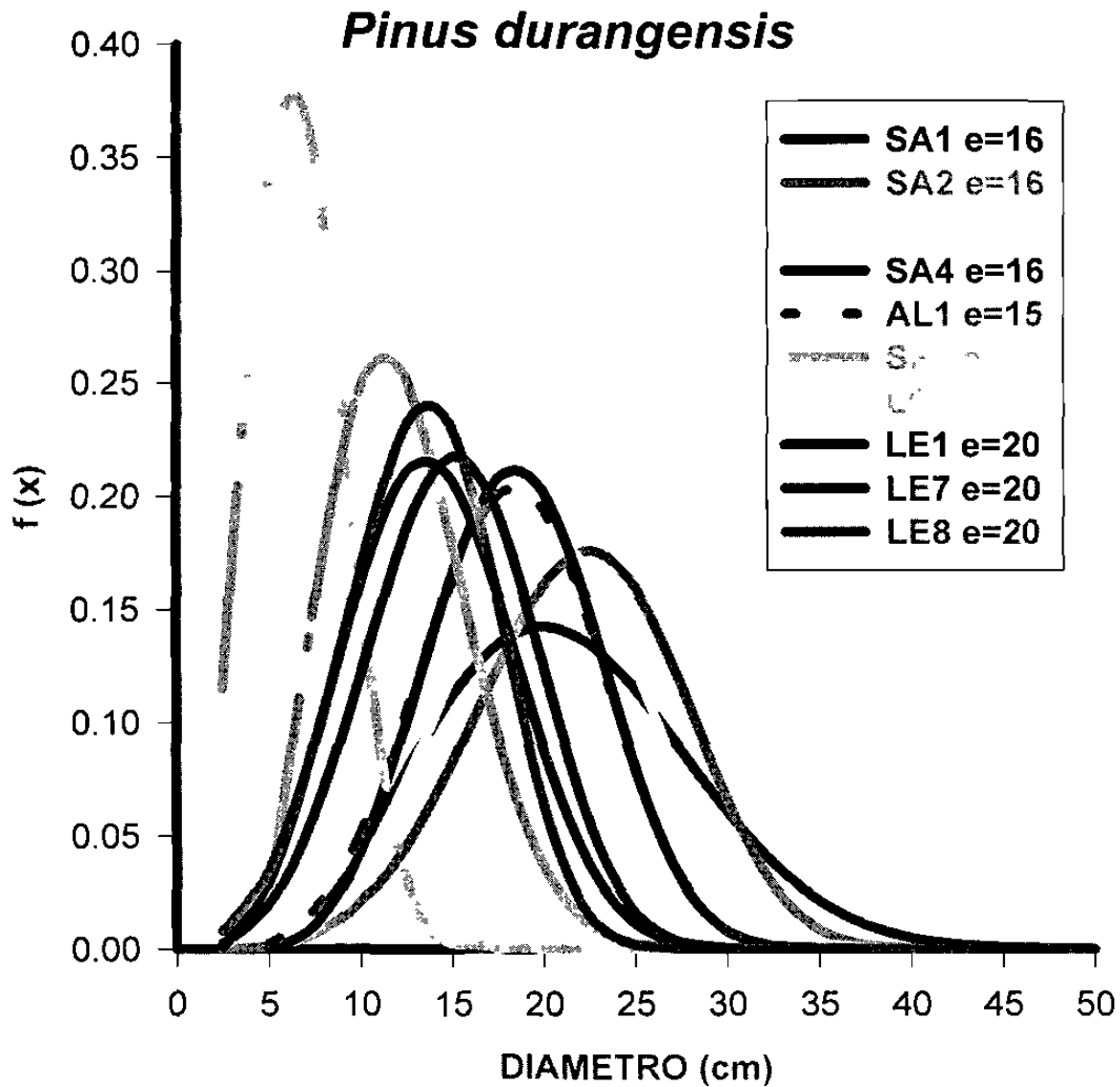


Figura 3. La distribución weibull ajustada a las estructuras diméricas de varios rodales plantados con *P. durangensis* en le región del Salto, Durango

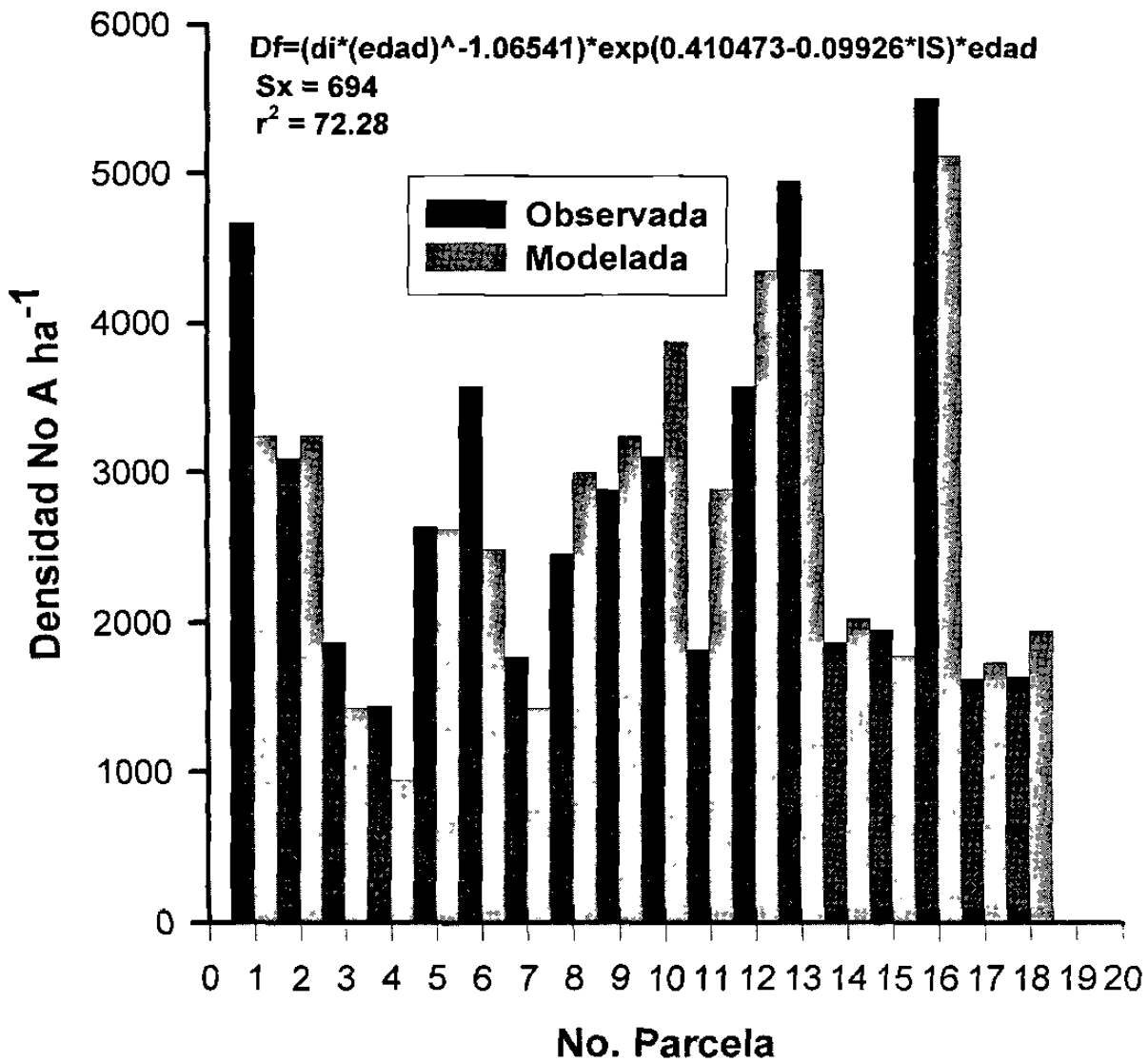


Figura 4. La densidad de la regeneración observada y modelada para cada una de las parcelas observadas en la región del Salto, Durango.

CAPITULO VII**BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA**

Andrasco, K. 1990. El recalentamiento del globo terráqueo de los bosques: estado actual de los conocimiento. *Unasyva* 163 (41) 3-11.

Bidwell, R. G. 1979. Fisiología vegetal. A. G.T. Editor. México. 734 p.

Brown, S. 1996. Los Bosques y el Cambio Climático: El Papel de los terrenos Forestales como sumideros de carbono. XI congreso mundial forestal, Antalia, Turkía. Pp 107-121.

Castellanos, J., A. Velásquez., J. Vargas., F. Rodríguez y A. Fierros. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30: 123-128.

FAO. 1999. Situación de los bosques en el mundo. Roma, Italia. Pp 30-33.

García, A. y González, E. 1998. Pináceas de Durango. Instituto de Ecología. Jalapa Veracruz. México. Pp 11 y 179.

Goreau, T. J., De mello, W.Z. 1988. Tropical deforestation: some effects on atmosferic. Chemistry. *Ambio*. 17 (4) 275-281.

Holdren, J. 1999. Energy and human predicament. Standford Univrsity 170 p.

IPCC. 1995: Climate Change 1995. The Science of Climate Change. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Garris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds). Cambridge University Pess, Cambridge U. K. 572 Pp.

Kari, K. 1998. Desafíos de políticas y financiamiento forestal en América Latina y el Caribe. Primer congreso Latinoamericano IUFRO Valdivia, Chile.

Kyrklund, B. 1990. Como pueden contribuir los bosques y las industrias forestales a reducir el exceso de anhídrido carbónico en la atmosfera. *Unasyva* 163 vol 41 12-14.

Leith, H. R. Whithacker. 1975. Primary Productivity of the biosphere. *Ecological studies*. No. 14. New York.

Ludevid, A.M. 1997. El cambio global en el medio ambiente. Macombo, S. A. Barcelono, España. 330p.

Llerena, C. A. 1991. Contaminación atmosférica, efecto invernadero y cambios climáticos: sus impactos forestales. *Revista Forestal del Perú*. 18 (2) 101 a 135.

Medina, E. 1977. Introducción a la ecofisiología vegetal. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Caracas, Venezuela.

Meller, W. And B. Turner. 1992. Global land use and land cover change. Office for Interdisciplinary Earth Studies (OIS). Boulder. Colorado, USA.

Mopt. 1992. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Ministerio de obras Públicas y Transporte. España. Pp 388-389.

Nájera, L. J. 1999. Ecuaciones para estimar Biomasa, Volumen y Crecimiento en Biomasa y Captura de Carbono en diez especies típicas del matorral Espinoso Tamaulipeco del Nordeste de México. UANL, Facultad de Ciencias Forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. 93 p.

Návar, Ch. J. 1999. *Desarrollo Sustentable, compromiso social del tercer milenio*. IV Congreso mexicano sobre recursos forestales. Durango, México Pp 198-199.

Raiswell, R., et al, 1983. *Química ambiental*. Ediciones Omega. Barcelona, España. p 10.

SARH. 1993. *Síntesis ejecutiva sobre estadísticas de deforestación*. México, D. F.

SARH. 1994. *Inventario Nacional Forestal periódico*. México, D. F. 127 Pp.

SEMARNAP. 1998. *Programa nacional de acción climática*. Documento para consulta pública.

Strawss y Mainwaring. 1990. *Contaminación del aire Causas Efectos y Soluciones*. Editorial Trillas. México, D. F. Pp 76-79.

Tipper, R. 1996. *Hacia un programa nacional de captura de carbono y desarrollo agroforestal*. Documento de trabajo. Versión 1.2.

Turk, A., Turk, J. y Witles, J. 1973. *Ecología contaminación medio ambiente*. Editorial Interamericana. México, D.F. Pp 87-88.

UCODEFO 6. 1997. *Memoria general de predios para el programa de manejo forestal 1997-1997*. El Salto, Durango, México.

Vizcaíno. 1987. *La contaminación en México*. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. Pp 143-144.

.Williams, M. 1990. *The Earth as Transformed by human actino*. Cambridge University Press. Cambidge. 189 Pp.

