

## **Agradecimientos**

El grupo de trabajo del Programa Forestal del Colegio de Postgraduados agradece la participación y enlace de los funcionarios de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal involucrados en la realización del presente estudio, en especial al Lic. Roberto Fernández González y a la Ing. Beatriz del Valle Cárdenas de la Dirección de Economía Ambiental.

Al Ing. Rafael Álvarez Reyes, Ing. Fernando Islas, Ing. Antonio Rangel Lara del la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENA) por poner a nuestra disposición información relevante de las reforestaciones en el suelo de conservación del Distrito Federal.

A la Biol. Libertad López Barrios coordinadora de la Regional 1, al Ing. Gerardo A. Marentes Alarcón coordinador de la Regional 2, y al Biol. Alejandro Flores Montaña coordinador de la Regional 3, y personal técnico de dichas regionales por el apoyo durante la fase de campo del presente proyecto. Asimismo queremos expresar nuestro agradecimiento al Ing. Salvador Castro Zavala, director del vivero de San Luis Tlaxialtemalco, y al Ing. Celerino Cigarrero Clavería por las facilidades brindadas durante la fase de vivero.

Agradecemos de manera especial a los ejidatarios poseedores de los terrenos donde se encuentran las reforestaciones realizadas por CORENA, y en especial al Presidente del Comisariado Ejidal de la comunidad San Antonio Totoltepec, Delegación Tlalpan Sr. Salvador Pérez; y al Sr. Julián Flores

Aguilar, Representante Comunal General de Milpa Alta, por otorgarnos el permiso para el levantamiento de la información de campo.

Finalmente deseamos expresar nuestro agradecimiento al personal académico y de apoyo del Instituto de Recursos Naturales, particularmente del Programa Forestal, por la colaboración obtenida durante la realización del presente proyecto.

## Lista de Abreviaturas

C	Carbono
CAMCORE	Central America and Mexico Coniferous Resources Cooperative
CKC	Chuo Kaihatsu Corporation
cm	Centímetros
CO <sub>2</sub>	Bióxido de carbono
CORENA	Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural
CH <sub>4</sub>	Metano
°C	Grados centígrados
D.F.	Distrito Federal
g	Gramos
GEI	Gases de efecto de invernadero
GPS	Global Positioning System
ha	Hectárea
IAF	Índice de Área Foliar
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
Kg/ha	Kilogramos por hectárea
mm	Milímetro
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
SO <sub>2</sub>	Óxido de azufre
t	Toneladas
UTM	Universal Transversal de Mercator

# Índice

Capítulo	Página
Agradecimientos .....	I
Lista de abreviaturas .....	III
Índice .....	IV
Índice de Cuadros .....	VI
Índice de Figuras .....	VIII
Resumen .....	IX
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Objetivo general .....	4
1.2. Objetivos específicos .....	4
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	5
2.1. El proyecto de reforestación del suelo de conservación del ..... Distrito Federal	5
2.2. El suelo de conservación del Distrito Federal .....	7
2.3. Asimilación de CO <sub>2</sub> por las plantas .....	8
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	16
3.1. Fase de gabinete .....	16
3.2. Fase de campo y laboratorio .....	17
3.2.1. Evaluación de plántulas producidas en el vivero San Luis ..... Tlaxialtemalco (Fase de laboratorio).	17
3.2.2. Inventario de la reforestación (Fase de campo) .....	17
3.2.3. Construcción de las ecuaciones de biomasa .....	18
3.3. Análisis de datos .....	20
3.3.1. Ecuaciones alométricas de biomasa .....	20
3.3.2. Estimación de biomasa para árboles mayores de 10 años .....	23
<b>4. RESULTADOS</b> .....	24
4.1. Análisis de plántulas producidas en el Vivero San Luis ..... Tlaxialtemalco.	24
4.2. Ajuste de modelos de biomasa para las especies ..... utilizadas en las plantaciones.	29

4.3. Inventario de biomasa acumulada .....	38
4.4. Proyección del crecimiento y acumulación de biomasa .....	49
5. LITERATURA CITADA .....	54
6. ANEXOS .....	61

## Índice de Cuadros

Cuadro		Página
1	Distribución de la muestra para análisis destructivo, según categoría de edad (año de plantación) de cada especie, agrupando aquellas de hábito de crecimiento similar.	19
2	Diámetro basal, altura e índice de esbeltez de las plántulas producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco, previo a su salida a la plantación.	25
3	Distribución de biomasa en componentes estructurales de plántulas de las especies producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco, previo a su salida a la plantación.	26
4	Volumen aéreo y radical de las plántulas producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco, previo a su salida a la plantación.	28
5	Ajuste del modelo para <i>Abies religiosa</i> .	30
6	Ajuste del modelo para <i>Cupressus lindleyi</i> . Para el $PS_T$ se usó el modelo lineal $PS_T = \beta_0 + \beta_1 D$ .	32
7	Ajuste del modelo no lineal para <i>Cupressus lindleyi</i> .	32
8	Ajuste del modelo para <i>Pinus pseudostrobus</i> .	33
9	Ajuste del modelo para el grupo 1 ( <i>Pinus gregii</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. teocote</i> y <i>P. ayacahuite</i> ).	33
10	Ajuste del modelo para el grupo 2 ( <i>Pinus hartwegii</i> , <i>P. rudis</i> , <i>P. montezumae</i> y <i>P. michoacana</i> ).	35
11	Ajuste para el modelo $\ln(PS_T) = \beta_0 + \beta_1 D$ .	37
12	Ajuste para el modelo $PS_T = \beta_0 D^{\beta_1}$ .	37

13	Diámetro y altura promedio de las especies de la Regional 1.	40
14	Diámetro y altura promedio de las especies de la Regional 2.	41
15	Diámetro y altura promedio de las especies de la Regional 3.	42
16	Biomasa de las especies reforestadas en la Regional 1 por año de plantación.	43
17	Biomasa de las especies reforestadas en la Regional 2 por año de plantación.	44
18	Biomasa de las especies reforestadas en la Regional 3 por año de plantación.	44
19	Concentración de carbono (%) en las especies utilizadas en la reforestación del suelo de conservación del Distrito federal.	48
20	Modelos de biomasa en la literatura.	50
21	Diámetro normal, biomasa individual y biomasa por hectárea estimada a la edad de 30 años de las especies utilizadas en la reforestación del suelo de conservación del D.F.	51
22	Peso específico reportado en la literatura para algunas especies forestales.	52

## Índice de Figuras

Figura		Página
1	La ecuación alométrica.	14
2	La ecuación alométrica transformada logarítmicamente.	15
3	Distribución de biomasa en plántulas de especies arbóreas producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco.	29
4	Dispersión de datos y curva de ajuste de biomasa total de <i>Abies religiosa</i> , <i>Cupressus lindleyi</i> y especies incluidas en el grupo 1 ( <i>Pinus greggii</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. teocote</i> y <i>P. ayacahuite</i> ).	31
5	Valores observados de biomasa para <i>Pinus hartwegii</i> , <i>P. rudis</i> , <i>P. montezumae</i> y <i>P. michoacana</i> .	34
6	Dispersión de datos y curva de ajuste de biomasa total del grupo 2 ( <i>Pinus hartwegii</i> , <i>P. rudis</i> , <i>P. montezumae</i> y <i>P. michoacana</i> ) y de <i>Pinus pseudostrobus</i> .	36
7	Proporción (%) de especies plantadas en la Regional 1 por año de plantación.	45
8	Proporción (%) de especies plantadas en la Regional 2 por año de plantación.	46
9	Proporción (%) de especies plantadas en la Regional 3 por año de plantación.	47

## **Resumen**

El calentamiento global es un problema real que atañe a todos los países del mundo. Uno de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) que contribuye al aumento de la temperatura es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el cual ha incrementado su concentración en la atmósfera en las últimas décadas por el aumento en el consumo de combustibles fósiles. La alternativa viable para reducir esta concentración es el establecimiento de plantaciones forestales, especialmente con especies que tienen alta capacidad para fijar CO<sub>2</sub> en sus estructuras durante largo tiempo.

En el Distrito Federal (D.F.) se han establecido reforestaciones en el suelo de conservación rural a partir de 1998, con el objetivo de mejorar las condiciones ambientales. Dichas plantaciones están contribuyendo a la fijación de CO<sub>2</sub> a través del proceso de fotosíntesis. Con el objetivo de estimar valores de biomasa en la vegetación de la reforestación rural, se realizó un inventario y se ajustaron modelos matemáticos que permiten estimar la biomasa, y por tanto el carbono fijado, con base en el diámetro basal individual de las especies plantadas.

La biomasa total contenida en las especies arbóreas plantadas en el suelo de conservación de 1998 a 2000 es de 324.7 t para la Regional 1, 887.9 t para la Regional 2 y 633.3 t para la Regional 3. El contenido de carbono promedio de estas especies es de 51.76 %, por lo que el carbono fijado en sus componentes estructurales es de 168.1, 459.57, y 327.80 t en las Regionales 1, 2 y 3, respectivamente. El total de carbono almacenado en la reforestación hasta el mes de enero de 2004, es de 955.7 t en 14,115 ha de plantación, lo que hace un promedio de 0.067 t/ha.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El calentamiento global del planeta es un problema que atañe a todos los países del mundo. Los modelos de predicción climática estiman un aumento de la temperatura media de la superficie terrestre de 1.4 a 5.8 °C en el periodo de 1900 a 2100, con las consecuencias atribuibles a dicho fenómeno (IPCC 2002). Resultados de la medición de la concentración de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en la atmósfera indican que estos gases han aumentado a ritmos considerablemente más altos en los últimos 100 años que los experimentados en siglos anteriores (IPCC 2001).

Estos cambios en la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) son resultado de las actividades humanas, las cuales han reducido las reservas de Carbono (C) en la biomasa y en el suelo y se han liberado a la atmósfera. Adicionalmente, la industrialización y la quema de combustibles fósiles ha liberado también SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, gases que al combinarse con el vapor de agua en la atmósfera generan ácidos que caen sobre la superficie foliar de las plantas durante las precipitaciones, ocasionando graves daños a los bosques que circundan a las grandes ciudades, reduciendo consecuentemente su capacidad para fijar CO<sub>2</sub> en el proceso de fotosíntesis.

Los cinco grandes almacenes de C que existen en la tierra son: la atmósfera, la vegetación terrestre, el suelo, los océanos y los depósitos de combustibles fósiles. En condiciones normales, el flujo de carbono entre estos almacenes se mantenía relativamente estable o en equilibrio. Sin embargo, el aumento en la quema de combustibles fósiles y las altas tasas de deforestación han ocasionado un rompimiento en dicho flujo, con la consecuente acumulación de este gas en la atmósfera. El flujo neto de C procedente de los bosques de todo el mundo constituye una fuente de aproximadamente el 16% de la cantidad de C anual

liberada por la utilización de combustibles fósiles y la fabricación de cemento (Brown, 1996).

La alternativa real conocida actualmente para reducir la cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es fijarlo a través del proceso de fotosíntesis en las plantas. Los almacenes de C que el hombre puede controlar son aquellos asociados a los componentes vegetales y al suelo en los ecosistemas. A diferencia de las especies anuales, los árboles almacenan componentes de C en sus estructuras por periodos prolongados.

El interés con relación a la fijación de C en bosques plantados ha crecido, en virtud de su elevada tasa de crecimiento, y a su capacidad de fijar el CO<sub>2</sub> en función de la eficiencia fotosintética. Sin embargo, para determinar la capacidad de fijación C por una determinada especie arbórea, bajo condiciones específicas de plantación, sitio y manejo, es necesario determinar la biomasa y realizar un análisis del contenido de carbono en sus tejidos. Desafortunadamente la cuantificación de la biomasa en los componentes estructurales de una planta requiere de un análisis destructivo directo (Brown *et al.*, 1989). Una alternativa es realizar determinaciones directas en menor escala y emplear modelos de regresión (ecuaciones alométricas), que puedan proporcionar estimaciones precisas, confiables y con menores dificultades.

Las relaciones alométricas han sido utilizadas ampliamente en especies forestales de clima templado para estimar la biomasa aérea total o por componente estructural a partir del diámetro del fuste medido a 1.3 m de altura sobre el suelo (medición fácil de obtener) (Grier y Waring, 1974, Catellanos *et al.*, 1996, Acosta *et al.*, 2002). Sin embargo estas relaciones pueden cambiar dependiendo de la calidad de sitio y de las especies involucradas, por lo que es necesario tener estimaciones locales que nos permitan obtener valores precisos para las especies de interés.

Anualmente en la zona rural del Distrito Federal se pierde superficie con vegetación forestal, debido principalmente al cambio de uso del suelo (con un valor que oscila aproximadamente entre 240 y 495 ha por año). Este proceso ocasiona la pérdida de carbono contenido en la biomasa vegetal e incrementa los efectos del calentamiento global, y por tanto la calidad de vida de los habitantes.

Una de las actividades que contribuye a contrarrestar los cambios de uso del suelo es la reforestación que se lleva a cabo en el área del suelo de conservación del D.F. El establecimiento de vegetación a través de las reforestaciones contribuye a la captura de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico a través del proceso de fotosíntesis, mitigando los cambios en la concentración atmosférica de este gas de una manera local. Sin embargo, en muchas ocasiones los valores de biomasa que se usan para cuantificar dicho proceso y realizar compromisos voluntarios de reducción a través de la captura de carbono, son extrapolados de otras especies y otras regiones y no corresponden a los sitios donde están ubicadas las plantaciones. Por este motivo, es necesario realizar estudios para obtener estimaciones locales y determinar valores más precisos, aplicables a la zona de estudio.

Los valores locales de biomasa que se obtuvieron en este estudio como insumos para la cuantificación de la captura de carbono en la vegetación arbórea, permitirán: a) establecer con claridad compromisos voluntarios de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por reforestación a un nivel local; y b) negociar con certeza y claridad los compromisos voluntarios de reducciones de GEI a nivel internacional.

Los valores estimados de la proyección del crecimiento e incremento de las especies utilizadas en las reforestaciones forman parte de los insumos que permiten cuantificar el contenido de carbono. Debido a lo anterior, fue importante realizar la estimación de biomasa por especie en la reforestación rural

en los primeros 10 años de crecimiento, y estimar su crecimiento fisiológico para el D.F., con los siguientes objetivos:

### **1.1. Objetivo general**

Determinar valores locales de biomasa en la vegetación de la reforestación rural del suelo de conservación del D.F., durante el periodo de 0 a 10 años de edad y estimar funciones de su crecimiento.

### **1.2. Objetivos específicos**

- a) Estimar el volumen de la parte aérea de las especies que se producen en el vivero San Luis y especies reforestadas en 1998, 1999, 2000 y 2001, en laboratorio por el método de desplazamiento de líquidos.
- b) Cuantificar la distribución de biomasa de las especies producidas en el vivero San Luis y especies reforestadas en 1998, 1999, 2000 y 2001.
- c) Obtener una función matemática que permita estimar la biomasa por especie de la vegetación en los primeros diez años de crecimiento, de las áreas reforestadas en el suelo de conservación del D.F.
- d) Considerando los puntos anteriores, obtener un valor de biomasa de la vegetación de la reforestación bajo condiciones de crecimiento local del suelo de conservación del D.F.
- e) Estimar funciones matemáticas de crecimiento, por especie, a partir de revisión bibliográfica, para conocer el incremento en biomasa hasta edades maduras.

## **2. ANTECEDENTES.**

### ***2.1. El proyecto de reforestación del suelo de conservación del Distrito Federal.***

El crecimiento de la población en el Valle de México ha sometido a los recursos naturales a una fuerte presión, lo que ha ocasionado una reducción considerable de la superficie cubierta por vegetación arbórea. Particularmente, los bosques del Distrito Federal han sufrido graves alteraciones durante los últimos años, y se estima que anualmente se pierden alrededor de 240 ha de cubierta forestal debido al cambio de uso del suelo, los incendios forestales, el pastoreo intensivo, y el avance de la zona urbana (CORENA, 2000).

Este problema se refleja en una pérdida de la cubierta forestal estimada en 26,750 ha. Lo anterior ha traído consigo una reducción en la recarga de los mantos acuíferos, aumento de las zonas erosionadas, y pérdida de la flora y fauna silvestres.

Ante este panorama, el Gobierno del D.F. a fin de mejorar las condiciones ambientales ha planteado la ejecución del proyecto de reforestación y recuperación de los bosques del suelo de conservación de la Ciudad de México.

Este proyecto comprende un área aproximada de 180,000 ha que abarca el suelo de conservación del Distrito Federal y parte de los Estados de México y Morelos. Contempla el establecimiento de plantaciones forestales y cortinas rompevientos, con lo que se espera reducir el número de partículas suspendidas totales.

Los Estados de México y Morelos decidieron aplazar su participación en el proyecto, por lo que actualmente el D.F. contempla reforestar sólo el suelo de conservación dentro de su jurisdicción. La meta de plantación original fue de 26,750 ha en las que se plantarían 43 millones de árboles, en un periodo de tres

años. Sin embargo, al proyecto original se le agregaron el Parque Nacional Desierto de los Leones y los humedales de Xochimilco y Tlahuac, con lo que se incrementó la superficie a 31,100 ha.

Para cubrir las necesidades de planta, el proyecto cuenta con un vivero de alta tecnología establecido en San Luis Tlaxialtemalco, el cual tiene una capacidad instalada de producción anual de 30 millones de plántulas. La ejecución del proyecto está a cargo de la Comisión Ambiental Metropolitana como Agencia Ejecutora quién coordina los trabajos a través de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENA).

El objetivo general del proyecto es contribuir a la reducción de la concentración de partículas suspendidas totales en la atmósfera, en el Área Metropolitana de la Ciudad de México, a través de la reforestación en la parte sur del Valle de México.

Adicionalmente se establecieron objetivos particulares como: Incrementar las áreas verdes y la cubierta forestal en el Distrito Federal a fin de mejorar la calidad del aire, la captura de CO<sub>2</sub>, la recarga de los mantos acuíferos; reducir los problemas de erosión y desalentar el cambio de uso del suelo, restaurar las áreas forestales afectadas por la erosión y los incendios, restaurar los ecosistemas forestales y conservar la biodiversidad de los recursos naturales y belleza escénica. Todos encaminados a elevar la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México a través de una mejora del ambiente mediante programas intensivos de reforestación.

## **2.2. El suelo de conservación del Distrito Federal**

El suelo de conservación del Distrito Federal posee características que además de favorecer la existencia de especies de flora y fauna de valor comercial, ofrece bienes y servicios ambientales en beneficio de toda la población del Valle de México a través del papel multifuncional de los recursos naturales que alberga. Entre los bienes y servicios que proporcionan se encuentran: la infiltración de agua para la recarga de mantos acuíferos, del cual proviene aproximadamente el 70% del agua que consume la Ciudad de México; representan una barrera contra partículas producto de la contaminación, tolvaneras e incendios; capturan dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>, el principal gas que contribuye a acrecentar el efecto invernadero y el calentamiento global del planeta); contribuyen a la estabilización de suelos y por tanto la disminución de la erosión; así mismo, de ellos se obtienen numerosos productos medicinales y alimenticios que consumen los habitantes de la zona rural del Distrito Federal.

En el suelo de conservación, además de incluir terrenos con aptitud para el desarrollo de actividades económicas primarias, como las agrícolas, pecuarias y acuícolas, también enmarca Areas Naturales Protegidas (ANP) importantes para la conservación de la diversidad biológica del Distrito Federal. El establecimiento del sistema de ANP's y los programas de manejo que se derivan de las mismas constituyen instrumentos de política ambiental relevantes, ya que deberán estar en concordancia con los objetivos de desarrollo de los pueblos, ejidos y comunidades que habitan dentro o en su periferia.

El suelo de conservación ocupa parte del territorio de las delegaciones Alvaro Obregón, Cuajimalpa de Morelos, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, La Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco. De acuerdo a programas oficiales como el Programa General de Desarrollo Urbano, los

Programas Delegacionales, la declaratoria de la línea limítrofe entre el Área Urbana y el Área de Conservación, entre otros, se determinó que la superficie del suelo de conservación es de 88,639 ha, que corresponden a poco más del 59% del área total del Distrito Federal. Los límites del suelo de conservación son: al norte, este y oeste, el Estado de México y al sur, el Estado de Morelos.

La mayor proporción (93%) del suelo de conservación se ubica en las serranías que delimitan al Valle de México: hacia el sur, La Sierra Chichinautzin y la Sierra del Ajusco; hacia el suroeste, la Sierra de las Cruces; y hacia el norte, la Sierra de Guadalupe. El resto (7%) se incluye dentro del área lacustre de Xochimilco y Tláhuac. De este modo, si bien la altitud del área que comprende el suelo de conservación varía de 2,200 a casi 4,000 msnm, prácticamente la mitad (48%) se ubica por arriba de los 3,000 msnm. Esta característica se refleja en la precipitación media anual y en la temperatura media anual. Las delegaciones con precipitaciones mayores y temperaturas menores son Alvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Milpa Alta y Tlalpan.

### ***2.3. Asimilación de CO<sub>2</sub> por las plantas***

A partir de la problemática mundial causada por la acumulación de gases efecto de invernadero, ha crecido el interés por reducir su presencia en la atmósfera mediante diversas metodologías. Una de ellas involucra a las comunidades vegetales con base en su capacidad de fijar el CO<sub>2</sub>, vía fotosíntesis, al transformarlo en carbohidratos (Larcher, 1969), haciendo más atractivas aquellas especies con mayor capacidad de asimilación de carbono con base en su crecimiento. En investigaciones forestales se ha considerado tradicionalmente al diámetro y altura como medidas del crecimiento por su facilidad de medición y su uso en la determinación del volumen del tronco. Sin embargo el crecimiento

del tronco representa solo una porción del total de carbono acumulado en un árbol (Zhang *et al.*, 1996).

El carbón fijado por una hoja en la fotosíntesis tiene varios posibles usos, es decir, puede distribuirse a la raíz, el tronco o las hojas, o usarse en respiración, reproducción o defensa (Bloom *et al.*, 1985; Poorter, 1989; Korner, 1991), por lo que se hace necesaria una distinción entre el carbono utilizado en procesos de intercambio de aquel destinado a la producción como tal. De esta manera, producción es la acumulación de materia orgánica expresada en unidades de materia seca o energía por unidad de área o superficie de crecimiento (Larcher, 1969), o cantidad de biomasa acumulada, en tanto que productividad se refiere en general al proceso de acumulación o tasa de producción.

La productividad o tasa de crecimiento en comunidades vegetales es inherente al ecosistema más que a la planta individual, por lo que cualquier análisis de producción debe incluir las interrelaciones entre el ambiente físico y biótico que pudiesen afectar la acumulación de biomasa por el organismo en cuestión. La tasa de crecimiento o productividad está referenciada a unidad de área, por lo que usualmente se expresa en  $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . La productividad de las plantas puede determinarse fisiológicamente por métodos directos o indirectos.

El método directo es básicamente la medición de la materia seca acumulada en un periodo determinado o en el periodo vegetal. La productividad se calcula a partir del incremento en biomasa durante varios intervalos de tiempo mediante un análisis de crecimiento en semanas o meses. Los promedios diarios pueden determinarse por interpolación. Este método tiene la ventaja de que la productividad se determina directamente en términos del incremento de materia seca o contenido de carbón. Como desventaja, la aplicación de este método generalmente implica el corte de las plantas, por lo que puede ser causal de disturbio al ecosistema.

Alternativamente, existen técnicas de análisis de crecimiento que separan el crecimiento total en componentes a fin de estudiar el efecto de factores endógenos y exógenos. Su uso en ecología forestal se apoya en los llamados análisis de dimensión, en los que se realizan medidas lineales sobre árboles muestra, mismos que son cortados y separados en componentes (hojas, ramas, tronco y raíz) para su pesaje (Ledig, 1974).

Con las mediciones efectuadas sobre los componentes es posible ajustar modelos matemáticos que relacionen la biomasa con otros parámetros del árbol tales como diámetro, altura, o alguna combinación de éstas u otras dimensiones, por lo que es suficiente obtener mediciones lineales no destructivas en todos los individuos sobre los que se requiere la estimación, incluyendo aquellos destinados a corte en el futuro (Ledig, 1974). De esta manera es posible emplear modelos de regresión matemática para calcular de manera probabilística la biomasa a partir de mediciones lineales sobre la población o muestra experimental y así derivar algunos parámetros como índice de área foliar (área foliar por unidad de área de crecimiento) o productividad (incremento anual en biomasa).

A la relación existente entre biomasa, volumen o área de componentes del árbol, y alguna variable independiente tal como el diámetro del tronco, se le denomina alometría, constituyéndose en una herramienta muy útil en el esclarecimiento de controles fisiológicos sobre la asimilación y distribución de carbono (Gower *et al.*, 1993).

La determinación del índice de área foliar (IAF) en ecosistemas forestales es crítico en estudios de flujo de energía y flujo de carbón, ya que la cantidad de energía radiante capturada por el dosel depende en gran medida del área que ocupa la superficie foliar en el dosel (Jurik *et al.*, 1985). Esta determinación puede hacerse de manera directa mediante el corte de todas las hojas en una

muestra o determinando el área de cada hoja en un submuestreo (Fliervoet y Werger, 1984). Sin embargo esta metodología es laboriosa, destructiva y poco práctica, lo que ha llevado a numerosos investigadores a generar métodos indirectos para la determinación del IAF.

La relación que existe entre masa foliar y área foliar ha sido comúnmente usada en la determinación del IAF, determinándose la masa foliar en un muestreo de hojas o bien realizando mediciones sobre hojas caídas (Madgwick y Olson, 1974), o bien de manera indirecta con el uso de ecuaciones de regresión que relacionen la masa foliar con algún otro parámetro más fácil de medir, tal como el diámetro de tronco (Whittaker y Woodwell, 1968; White, 1979). Este método depende de la especie, la calidad del sitio donde ésta se desarrolla y en general los resultados son mejores para madera que para hojas (Jurik *et al.*, 1985). Una alternativa es la propuesta de Shinozaki *et al.* (1964), quienes relacionan la masa foliar con el área seccional del tejido vascular activo (albura), o área basal de albura, mostrando buenos resultados (Long *et al.*, 1981; Waring *et al.*, 1982), puesto que la albura conduce agua y nutrientes hacia el follaje además de ser un reservorio de agua (Waring y Running, 1978), lo que da una relación funcional entre albura y área foliar, en tanto que mediciones externas como área basal o diámetro del tronco no la tienen (Espinosa y Perry, 1987).

Sin embargo, aunque se han obtenido relaciones fuertes entre área foliar o biomasa y área basal de albura en coníferas y hojosas (Grier y Waring, 1974; Snell y Brown, 1978; Whitehead, 1978; Rogers y Hinckley, 1979; Kauffmann y Troendle, 1981; Waring *et al.*, 1982; Albrekston, 1984), las mediciones de albura realizadas sobre algunas virutas o sobre árboles de diámetro pequeño puede resultar en estimaciones de área foliar poco confiables, como en el caso de mediciones de área basal o diámetro solamente (Brix y Mitchell, 1983; Schonenberger, 1984), en cuyo caso es recomendable obtener un corte

transversal del árbol y derivar el área transversal de albura, medición que ha permitido incluso inferir diferencias en tolerancia a sequía entre especies de árboles (Waring *et al.*, 1982). Diversos estudios han mostrado que en las ecuaciones de regresión lineal que relacionan el área basal de albura y el área foliar, la pendiente puede variar por efecto del sitio (Binkley, 1984), las especies (Kaufmann y Troedle, 1981; Waring *et al.*, 1982; Whitehead *et al.*, 1984), y las condiciones de crecimiento (Brix y Mitchell, 1983).

En diversos estudios se ha mostrado que existe consistencia en la relación entre la masa o área foliar y el área basal de albura obtenida en la base de la copa del árbol (Kaufmann y Troendle, 1981; Long *et al.*, 1981; Waring *et al.*, 1982). Sin embargo, también se ha encontrado que esta relación cambia conforme se realizan las mediciones más al interior de la copa, como lo observaron Brix y Mitchell (1983) en estratos jóvenes de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Whitehead *et al.* (1984) en *Picea sitchensis* (Bong) (Carr.) y *Pinus contorta* Dougl. *ex* Loud., atribuyéndolo a diferencias en la permeabilidad de la madera. Espinosa y Perry (1987) consideran que estos resultados deben tomarse con cautela en la determinación de área foliar o biomasa, puesto que se han reportado diferencias entre estratos y entre especies a causa del diferente patrón de formación del tejido de conducción en el tronco por éstas características, reportando en su estudio para *Pseudotsuga menziesii* diferencias no substanciales en la relación área de albura a diferentes alturas en el tronco con el área foliar.

Como se ha mencionado, Shinozaki *et al.* (1964) propusieron una relación entre masa foliar y el área basal de albura de algún punto sobre el tronco del árbol, comúnmente conocido como “pipe model” o modelo de bombeo. La función por la que se buscó establecer esta relación es de tipo potencial, puesto que algunos investigadores pioneros en la materia consideraron que datos biológicos tienen mejor ajuste en funciones de este tipo que en funciones lineares, simples o

polinomiales, como se habían usado previamente (Zar, 1968). De este modo surgieron diversos modelos de regresión no lineal para su uso en biología.

La función potencial

$$Y = b_0 X^{b_1}$$

comúnmente se emplea para hacer referencia a la “ecuación alométrica”. Como modelo de regresión esta ecuación ha encontrado un amplio uso en biología, se ha aplicado a datos de diversas áreas como fisiología comparativa, evolución, salud física, y en ecología de poblaciones y fisiología ecológica. La Figura 1 presenta este modelo de manera gráfica.

Sin embargo, generalmente en biología el procedimiento de ajuste de este modelo requiere aplicar logaritmos a ambos lados de la ecuación a fin de linearizarla, resultando en:

$$\ln Y = \ln b_0 + b_1 \ln X,$$

que es una ecuación lineal simple de la forma

$$Z = b_0' + b_1 W,$$

Donde  $Z = \ln Y$ ,  $b_0' = \ln b_0$ , y  $W = \ln X$ , por lo que los estimadores  $b_0$  y  $b_1$  pueden ser calculados por técnicas ordinarias de mínimos cuadrados. La Figura 2 muestra la función original de manera lineal al ser transformadas las variables X

y Y en sus logaritmos, de esta manera se estabiliza la varianza del error (Zar, 1968; Baskerville, 1972).

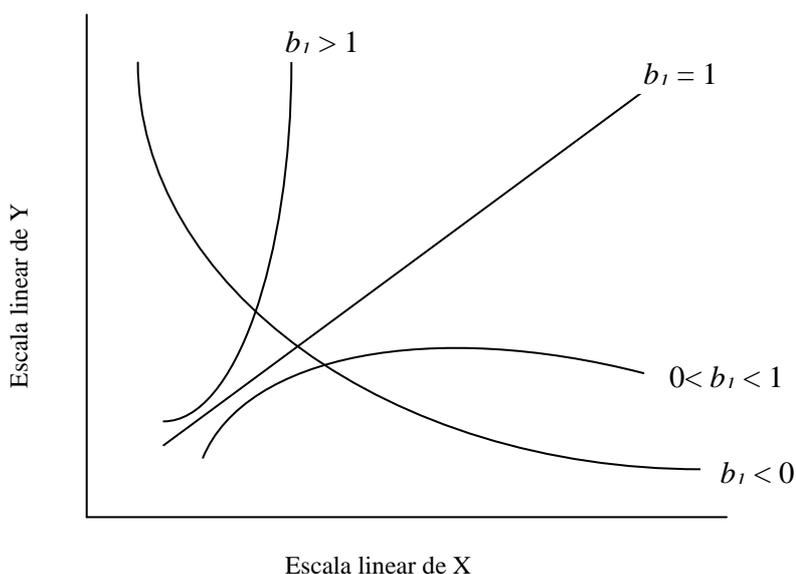


Figura 1. La ecuación alométrica.

La utilización de este modelo ha sido posible ya que describe la forma en que la proporción relativa de materia seca asignada a cada órgano de la planta cambia con el tamaño de la misma, de acuerdo a la teoría de crecimiento alométrico (Bailian *et al.*, 1991). De esta manera, la asignación de materia seca puede ser evaluada mediante la función alométrica linearizada, donde Y es el peso seco de algún órgano de la planta (tronco, hojas o raíz), X es alguna variable dasométrica fácil de medir en la planta (diámetro del tallo, por ejemplo), y  $b_0$  y  $b_1$  son los estimadores de regresión. En estudios comparativos, éstos estimadores cobran importancia, puesto que  $b_1$  describe la partición de biomasa entre Y y X, además

de ser una medida de la proporción -ratio- de su tasa de crecimiento relativo durante la fase exponencial de crecimiento que comúnmente exhiben las plántulas.

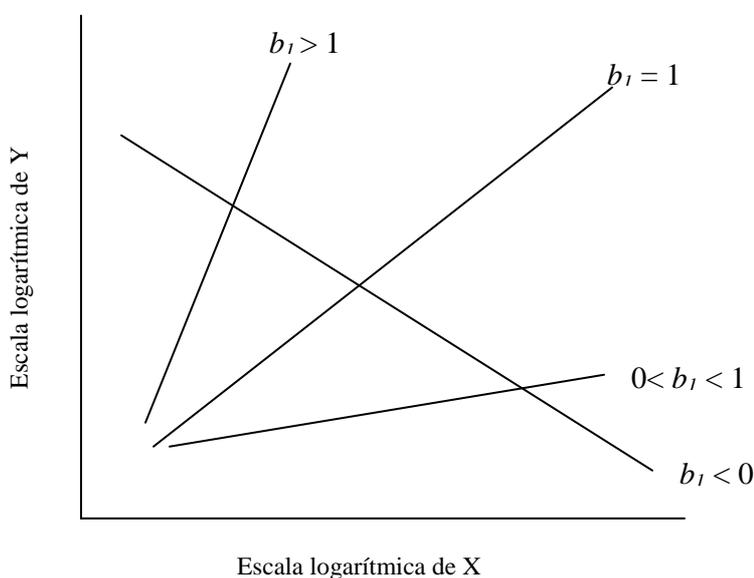


Figura 2. La ecuación alométrica transformada logarítmicamente.

En tanto, diferencias en  $b_0$  entre dos ecuaciones alométricas solo proporciona una interpretación biológica lógica cuando los valores de  $b_1$  son los mismos, ya que  $b_0$  y  $b_1$  son matemáticamente dependientes entre sí. En este caso las diferencias en  $b_0$  se interpretan como una diferencia en la proporción de Y a X, establecida de manera previa al inicio de las mediciones (Kolb y Steiner, 1990).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### ***3.1. Fase de Gabinete***

Se recopiló la información disponible en la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del D.F.

Su obtuvo un mapa topográfico escala 1:10,000, donde se identifican los parajes como unidad de plantación, así como los compartimientos y sub-compartimientos que se delimitaron en el inventario 1995 por CORENA y CKC. Se intentó conseguir la información relevante producto de estudios anteriores, sin embargo, no fue posible tener acceso a ella.

Se ubicaron las áreas reforestadas de 1998, 1999, 2000 y 2001 en mapas proporcionados por las coordinaciones de las Regionales. Inicialmente se consideró utilizar el mapa original creado por CORENA y CKC, sin embargo, las coordinaciones regionales sugirieron emplear los mapas elaborados por ellos mismos ya que representaban mejor la ubicación real de las plantaciones. Es preciso mencionar que todos los mapas tuvieron que ser digitalizados e incorporados a un Sistema de Información Geográfica (SIG) para posteriormente ser procesados a través del paquete ArcView.

Se ubicaron los sitios de muestreo de 200 m<sup>2</sup> de acuerdo a un diseño de muestreo estratificado por edad de la reforestación, con una intensidad de muestreo de 0.1% del área total a evaluar. Este diseño de muestreo permite agrupar la variación por estrato, lo que posibilita hacer predicciones confiables con una precisión adecuada para el estudio.

### ***3.2. Fase de campo y de laboratorio***

#### ***3.2.1. Evaluación de plántulas producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco (Fase de laboratorio).***

Con la finalidad de estimar el volumen de las plántulas de las especies que se producen en el Vivero San Luis, en julio de 2003 se colectaron al azar 15 plántulas de cada una de las especies producidas en ese año. A todas ellas se les midió el diámetro basal, la altura total, el volumen aéreo, el volumen radical, y el peso seco de los componentes estructurales (tallo principal, ramas y follaje y raíz).

El volumen se determinó por desplazamiento de agua en un dispositivo montado en un soporte universal y sobre una balanza de precisión, considerando que el peso de 1 g de agua desplazada es equivalente a 1 cm<sup>3</sup> de volumen. Los componentes estructurales de las plántulas (tallo, follaje y raíz) se secaron en una estufa de circulación forzada a 75 °C por 48 hr. Posteriormente se determinó el peso seco por componente.

#### ***3.2.2. Inventario de la reforestación (Fase de campo)***

La cartografía generada se utilizó para ubicar los sitios de muestreo en campo. Los sitios previamente ubicados cartográficamente fueron localizados en campo con la ayuda de receptores del sistema de posicionamiento global (GPS). Los sitios utilizados fueron rectangulares 10 X 20 m (0.02 ha).

Para cada sitio se levantó información de las siguientes variables: Uso actual del suelo, clasificación vegetal, descripción ecológica del entorno (estado de

sucesión vegetal, condiciones de perturbación, relieve, pedregosidad, y profundidad del suelo) (Anexo 1).

Cada árbol muestreado dentro del sitio se identificó con un número consecutivo y se le tomaron los siguientes datos: especie, edad, no. de verticilos, altura total, diámetro a la base del tallo y condición fitosanitaria (Anexo 2).

### ***3.2.3. Construcción de las ecuaciones de biomasa***

Con la finalidad de minimizar el número de árboles a cosechar para la construcción de los modelos de biomasa, se agruparon especies con hábito de crecimiento similar (Cuadro 3). Acosta *et al.* (2002) probaron que es posible agrupar especies con características morfológicas similares para generar una sola ecuación que estime la biomasa de todas ellas. La agrupación de especies obedece a similitudes en hábito y tasa de crecimiento, descripción botánica (Martínez, 1992) y con base en algunos estudios de análisis de progenie realizados por CAMCORE (Dvorak y Donahue, 1992). Adicionalmente, se realizó un submuestreo de ramas. Este procedimiento permitió aumentar el número de observaciones de pares de datos de diámetro basal y biomasa de tallo, ramas y follaje. Para la determinación de biomasa se separaron los componentes estructurales de cada árbol cosechado (hojas, ramas y tallo), se secaron en estufa de circulación forzada a 75 °C hasta peso constante, y se registró su peso seco (biomasa).

Dado que en esta evaluación se trabajó en plantaciones de edad uniforme, fue posible establecer para cada especie o grupo de especies una muestra de 12 árboles que abarcaran el intervalo de categorías diamétricas a la base del tallo. Este tamaño de muestra reducido buscó compatibilizar las necesidades de

muestreo destructivo con las restricciones legales que se tienen en estas plantaciones por estar establecidas en el suelo de conservación del D.F.

Otros estudios han empleado diversos tamaños de muestra: Acosta *et al.* (2002) utilizaron 12 árboles para determinar relaciones alométricas en 6 especies de bosque mesófilo. Monserud y Marshall (1999) seleccionaron 20 árboles que cubrieran el intervalo de edades en estratos de tres especies de coníferas del norte de Idaho, USA. Con base en lo anterior, se justifica el tamaño de muestra con fines de determinación de volumen y biomasa.

Cuadro 1. Distribución de la muestra para análisis destructivo, según categoría de edad (año de plantación) de cada especie, agrupando aquellas de hábito de crecimiento similar.

Especie o grupo	Muestra por categoría de diámetro (cm)				Muestra Total
	0.1 – 2.0	2.1 – 4.0	4.1 – 6.0	6.1 – 8.0	
<i>Abies religiosa</i>	3	3	3	3	12
<i>Cupressus lindleyii</i>	3	3	3	3	12
<i>P. pseudostrobus</i>	3	3	3	3	12
<i>Pinus greggii</i>					
<i>P. patula</i>					
<i>P. leiophylla</i>	3	3	3	3	12
<i>P. teocote</i>					
<i>P. ayacahuite</i>					
<i>P. hartwegii</i>					
<i>P. rudis</i>	3	3	3	3	12
<i>P. montezumae</i>					
<i>P. michoacana</i>					
<b>TOTAL</b>					<b>150</b>

### 3.3. Análisis de datos

#### 3.3.1. Ecuaciones alométricas de biomasa.

Con el peso seco (biomasa) de los componentes estructurales (tallos, ramas y hojas) de los árboles cosechados por categoría de diámetro basal y especie se ajustaron modelos matemáticos de la forma:

$$y = \beta_0 x^{\beta_1}$$

donde:

y es la variable a predecir, en este caso la biomasa

x es la variable independiente, en este caso el diámetro basal

$\beta_i$  son parámetros del modelo

Como la biomasa de los árboles se dividió en tres componentes (tallos, ramas y hojas) fue necesario ajustar un sistema de ecuaciones de biomasa de la siguiente forma

$$PS_T = \beta_0 D^{\beta_1}$$

$$PS_F = \phi_F PS_T$$

$$PS_R = \phi_R PS_T$$

$$PS_H = \phi_H PS_T$$

donde:

PS<sub>T</sub> es peso seco total de la parte aérea en gramos

PS<sub>F</sub> es peso seco de fuste (tallo) en gramos

PS<sub>R</sub> es peso seco de ramas en gramos

PS<sub>H</sub> es peso seco de hojas en gramos

D es el diámetro basal en mm

$\phi_i$  es el coeficiente por fracción de parte aérea restringido a

$$\phi_F + \phi_R + \phi_H = 1$$

De esta forma se logran propiedades lógicas como el hecho de que todos los componentes cuando divididos en fracciones, sumen el total de la biomasa del árbol, algo que no sería posible si se ajusta cada componente individual usando la formula básica propuesta. Esto se logra para los grupos de especies enumerados excepto para *Cupressus lindleyi*, debido a que en esta especie no se tiene biomasa de hojas separada de las ramas y donde los elementos de partición se reducen a:

$$\phi_F + \phi_R = 1$$

Con el objetivo de aumentar el número de observaciones (pares de datos diámetro basal-biomasa) se muestrearon ramas de los árboles cosechados y se trataron por separado como árboles individuales basados en el principio de desarrollo modular descrito por Causton (1985).

Para la estimación de la biomasa aérea de arbolado se han generado diversas metodologías. La importancia de asegurar alta precisión en la determinación de la biomasa de copa radica en el papel preponderante que esta juega en el desarrollo del árbol. La biomasa foliar de una planta está directamente relacionada con la intercepción de luz, transpiración, y fotosíntesis, considerándosele por tanto como el factor más importante que determina la productividad de la planta. Es posible construir un modelo específico para determinar la biomasa de copa. Posteriormente se obtiene la biomasa total por adición de la biomasa del tallo, que es relativamente fácil de obtener.

Se han desarrollado diversos métodos para construir ecuaciones alométricas, pudiéndose establecer dos categorías: aquellas que utilizan en el proceso la medición total de la copa, donde información adicional sobre algunas variables de interés se obtiene mediante submuestreos en ramas. Posteriormente se obtiene un estimador del tejido en cuestión por la totalidad de la copa.

Alternativamente se encuentran estudios que se realizan con mediciones a nivel de rama. Estos miden características de fácil acceso, tales como diámetro de la rama y su longitud; posteriormente se establece una relación alométrica entre la cantidad de tejido en cuestión y el parámetro fácilmente obtenido. Multiplicando esta predicción por el número de ramas vivas en un verticilo, y sumando los valores obtenidos para cada verticilo, se obtiene un estimado total para la copa del árbol.

En resumen, se tiene que para obtener la biomasa de copa, la principal estrategia es obtener el valor por pesaje de la totalidad de la copa, y posteriormente determinar alguna relación con otro valor fácilmente obtenible; o bien, como estrategia opcional aplicar ecuaciones alométricas a ramas de cada verticilo y sumar el resultado para obtener la biomasa total de copa. Monserud y Marshall (1999) no encontraron diferencias significativas entre ambos métodos,

concluyendo que el método de muestreo de ramas consume menos tiempo, e implica un esfuerzo menor. Por otro lado, estos autores también concluyen que las reducciones en precisión son mínimas cuando se comparan con los modelos que utilizan toda la copa.

### ***3.3.2. Estimación de biomasa para árboles mayores de 10 años.***

Con la información existente en la literatura, se estimó el crecimiento en biomasa de las especies consideradas para edades mayores de 10 años. Esta actividad se complementó con la obtención de cilindros de madera de árboles en pie para determinar el diámetro a 30 años de edad por medio del conteo de los anillos de crecimiento. Asimismo se obtuvo la densidad de la madera o peso específico por revisión bibliográfica. Con este dato es posible convertir los datos de volumen de madera a biomasa del fuste, de tal manera que se puedan utilizar las tablas de volúmenes existentes para las especies reforestadas. En algunos casos fue posible obtener en la literatura un modelo matemático para estimar la biomasa directamente.

## 4. RESULTADOS

### *4.1. Análisis de plántulas producidas en el Vivero San Luis Tlaxialtemalco.*

Los resultados del análisis de las plántulas de las especies producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco en el 2003 se presenta en esta sección. Es preciso señalar que debido a que no todas las especies que se han plantado desde el inicio del proyecto se tenían en existencia, solo se pudo realizar el análisis para 11 de ellas.

El tamaño tanto del diámetro basal como en altura, se presentan en el Cuadro 2. Las plántulas producidas en vivero han sido clasificadas en diferentes grados de calidad atendiendo a variables tanto morfológicas (altura, diámetro) como fisiológicas (Duryea, 1984). A este respecto Bautista (2003) clasificó las plántulas de *Pinus montezumae* producidas en el mismo vivero en tres calidades atendiendo a variables morfológicas, siendo el diámetro una de las principales con una media de 9.12, 6.00 y 5.06 mm para las calidades alta, media y baja respectivamente. Aun cuando la calidad de las plántulas está en función del terreno de plantación, en general se prefieren plántulas con un buen desarrollo del diámetro basal, debido a que ha demostrado tener una correlación positiva con la supervivencia en el sitio de plantación (Venator, 1983). Esta característica morfológica refleja la resistencia de la plántula contra el doblamiento. Las plántulas con mayor diámetro toleran mejor el daño por animales incluyendo mamíferos e insectos, y son mejores aislando el calor que aquellas con diámetros pequeños (Bautista, 2003).

Asimismo, el índice de esbeltez, conocido como la relación existente entre la altura de la plántula en cm y su diámetro basal en mm, se presenta en el Cuadro 2. Este índice nos indica que tan robustas o que tan esbeltas son las plántulas, y

es un buen indicador de su habilidad para resistir daños físicos tanto en el vivero como posterior a la plantación. Esta característica cobra más importancia particularmente en plántulas crecidas en sistemas de producción en contenedor (Duryea, 1985), caso del vivero San Luis Tlaxialtemalco. Un valor más bajo de índice de esbeltez indica que la planta es robusta o “gorda y chaparra”, característica que es deseable en terrenos con alta probabilidad de daño físico. En general, este índice puede ser comparado con el diámetro basal para predecir la supervivencia y crecimiento en campo. A este respecto, se ha observado que las plántulas con valores de dicho índice mayores a 6 tienen ciertas desventajas para resistir a sequías, viento o incluso heladas. Se observa que las plántulas producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco, presentan valores de índice de esbeltez menores a 6 y solo *Cupressus lindleyi* superó este valor, por lo que podríamos decir que presentan una buena calidad; sin embargo, es necesario realizar la evaluación en campo para determinar el desempeño de cada especie.

Cuadro 2. Diámetro basal, altura e índice de esbeltez de las plántulas producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco, previo a su salida a la plantación. La desviación estándar se presenta entre paréntesis.

Especie	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Índice de esbeltez (cm/mm)
<i>Pinus rudis</i>	4.9 (0.5)	12.1 (2.8)	2.4 (0.6)
<i>P. pseudostrobus</i>	4.7 (0.6)	18.6 (2.6)	4.1 (0.9)
<i>P. hartwegii</i>	7.1 (1.1)	3.5 (1.4)	0.5 (0.2)
<i>P. ayacahuite</i>	5.3 (0.5)	19.3 (0.7)	3.6 (0.4)
<i>P. montezumae</i>	7.7 (1.6)	2.7 (0.8)	0.4 (0.1)
<i>P. leiophylla</i>	12.7 (1.8)	24.2 (0.9)	1.9 (0.3)
<i>P. teocote</i>	5.4 (1.3)	23.6 (3.9)	4.5 (0.7)
<i>Alnus firmifolia</i>	8.5 (1.8)	33.9 (2.1)	4.2 (0.9)
<i>Cupressus lindleyi</i>	6.0 (1.0)	36.7 (7.6)	6.4 (2.3)
<i>Salix bonplandiana</i>	8.2 (1.7)	34.7 (2.6)	4.1 (1.0)
<i>Quercus spp.</i>	5.3 (1.1)	24.1 (1.9)	4.8 (1.3)

En el Cuadro 3 se presentan los valores de la distribución de biomasa en componentes estructurales tallo, hoja y raíz. Con estos datos es posible calcular un índice conocido como relación parte aérea/raíz. Este es un atributo morfológico usado comúnmente para la evaluación de plántulas producidas tanto en sistemas a raíz desnuda como en contenedor. Se obtiene dividiendo el peso seco de la parte aérea (tallo y hojas) por el peso seco de la raíz (Bautista, 2003).

Cuadro 3. Distribución de biomasa en componentes estructurales de plántulas de las especies producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco, previo a su salida a la plantación. La desviación estándar se presenta entre paréntesis.

Especie	Biomasa por componente estructural (g)			Biomasa total (g)	Relación parte aérea/raíz
	Tallo	Hoja	Raíz		
<i>Pinus rudis</i>	0.34 (0.09)	1.93 (0.48)	1.13 (0.33)	3.40 (0.76)	2.08 (0.43)
<i>P. pseudostrobus</i>	0.75 (0.15)	2.93 (0.67)	1.24 (0.50)	4.91 (1.22)	3.19 (0.80)
<i>P. hartwegii</i>	0.19 (0.06)	2.27 (0.61)	1.18 (0.31)	3.63 (0.92)	2.11 (0.32)
<i>P. ayacahuite</i>	0.93 (0.21)	2.37 (0.55)	1.94 (0.56)	5.24 (1.18)	1.78 (0.37)
<i>P. montezumae</i>	0.35 (0.13)	2.75 (0.81)	1.03 (0.31)	4.12 (1.15)	3.13 (0.72)
<i>P. leiophylla</i>	2.05 (0.52)	4.51 (0.94)	4.46 (2.10)	11.02 (3.08)	1.71 (0.65)
<i>P. teocote</i>	0.68 (0.28)	2.16 (0.85)	0.93 (0.36)	3.72 (1.39)	3.17 (0.88)
<i>Alnus firmifolia</i>	2.95 (1.37)	3.21 (1.40)	2.26 (1.09)	8.42 (3.76)	2.82 (0.70)
<i>Cupressus lindleyi</i>	2.12 (0.73)	4.55 (1.70)	3.56 (1.71)	10.22 (3.94)	2.02 (0.40)
<i>Salix bonplandiana</i>	5.11 (1.13)	1.37 (0.44)	9.27 (2.99)	15.74 (4.24)	0.70 (0.19)
<i>Quercus spp.</i>	1.66 (0.92)	1.52 (0.97)	2.06 (1.32)	5.24 (2.84)	1.91 (0.93)

El fundamento para el uso de este atributo se deriva de una perspectiva de balance, es decir la relación existente entre una cantidad de masa foliar que necesita ser abastecida de agua y nutrimentos por una masa radical o cantidad de raíces. Un valor bajo indica que las raíces son abundantes en relación a la cantidad de área foliar y por tanto las plántulas tienen garantizado, al menos en teoría, un buen abastecimiento de agua y nutrimentos y de esta forma pueden evitar el estrés hídrico (Bello, 1998).

Si tomamos en cuenta que la mayoría de las reforestaciones en el suelo de conservación del D.F. se realizan en condiciones donde la disponibilidad de humedad es el principal factor que limita la supervivencia en campo, son preferibles valores de esta relación muy cercanos a uno. Excepto para *Salix bonplandiana*, los valores de todas las especies son mayores de 1.5; sin embargo, existen reportes para *Pinus greggii* que con valores promedio del índice de 3.57 se obtuvo buena supervivencia en campo. Por su parte Acosta (2000) reporta que con valores de este índice de 2.5 a 4 se obtienen altas supervivencias en campo para *Pinus patula*. Aunque es necesario realizar evaluaciones en campo para todas las especies producidas en el vivero de San Luis Tlaxialtemalco, se puede considerar que las plántulas poseen valores que se encuentran en el intervalo promedio para un grupo grande de especies.

Así como la relación parte aérea:raíz obtenida a través de datos de peso seco es un indicador del balance de la planta, la relación entre el volumen de la parte aérea y el volumen de raíz también aporta datos de la superficie transpiratoria de la planta y su superficie de absorción. Estos datos se presentan en el Cuadro 4.

En general, dentro de las especies evaluadas las de latifoliadas destinan menos biomasa a las hojas que las especies de coníferas (Figura 3). El grupo de pinos que durante las primeras etapas de desarrollo presentan un estado cespitoso

(*Pinus rudis*, *P. hartwegii* y *P. montezumae*) destinan más biomasa a hojas que el resto de las especies.

Cuadro 4. Volumen aéreo y radical de las plántulas producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco, previo a su salida a la plantación. La desviación estándar se presenta entre paréntesis.

Especie	Volumen (cm <sup>3</sup> )	
	Tallo	Raíz
<i>Pinus rudis</i>	9.60 (1.93)	8.45 (2.20)
<i>P. pseudostrobus</i>	13.67 (2.18)	7.93 (1.84)
<i>P. hartwegii</i>	10.60 (2.79)	9.30 (2.02)
<i>P. ayacahuite</i>	14.77 (4.18)	12.63 (2.76)
<i>P. montezumae</i>	13.83 (4.52)	8.60 (1.98)
<i>P. leiophylla</i>	31.87 (5.88)	29.77 (10.96)
<i>P. teocote</i>	13.30 (4.75)	7.57 (2.17)
<i>Alnus firmifolia</i>	28.00 (11.94)	19.13 (7.26)
<i>Cupressus lindleyi</i>	32.20 (12.80)	29.17 (11.92)
<i>Salix bonplandiana</i>	20.50 (5.46)	74.76 (40.62)
<i>Quercus spp.</i>	8.80 (5.06)	12.33 (6.61)

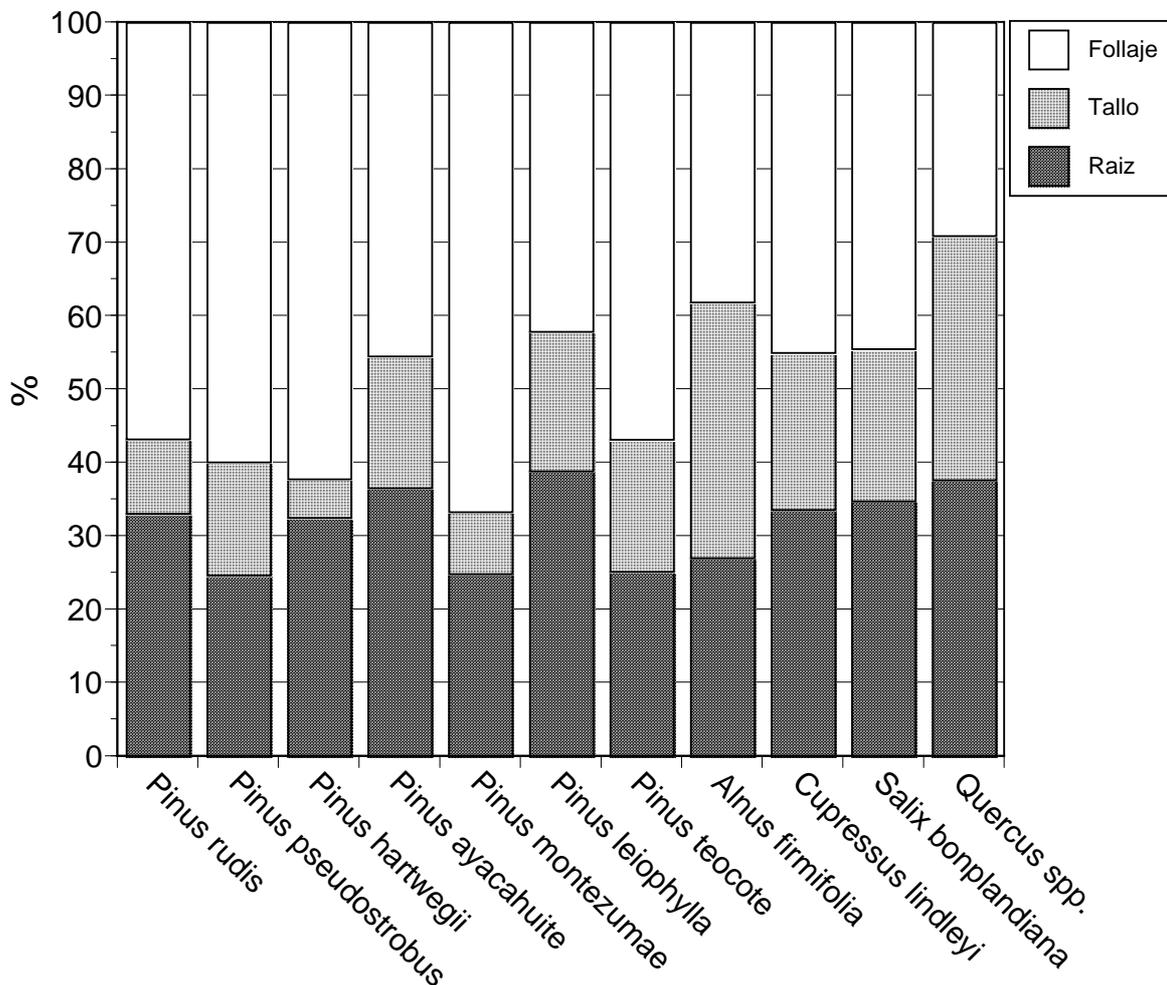


Figura 3. Distribución de biomasa en plántulas de especies arbóreas producidas en el vivero San Luis Tlaxialtemalco.

#### 4.2. Ajuste de modelos de biomasa para las especies utilizadas en las plantaciones.

Las ecuaciones de regresión generadas para cada especie o grupo de especies presentan coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores a 0.93, excepto para el peso total de *Cupressus lindleyi* con una  $R^2$  de 0.83 (Cuadros 5, 6, 7, 8, 9 y 10). En la mayoría de los casos los parámetros estimados fueron altamente significativos ( $\alpha \leq 0.01$ ) y solo la  $\beta_0$  de *Cupressus lindleyi* presento una  $\alpha \leq 0.05$ .

En general, se consideran que los ajustes del modelo son adecuados y permiten predecir la biomasa total o por componente en forma precisa.

En la Figura 4 se presenta la dispersión y la línea de regresión para *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyi* y el grupo 1 compuesto por las especies *Pinus gregii*, *P. patula*, *P. leiophylla*, *P. teocote* y *P. ayacahuite*. Es preciso señalar que por razones de espacio sólo se presenta la línea para el peso seco total de la planta.

Cuadro 5. Ajuste del modelo para *Abies religiosa*.

Componente	Grados de Libertad del Modelo	Grados de Libertad del Error	Suma de Cuadrados del Error	Cuadrado medio del error	Error estándar aproximado	R <sup>2</sup>
PStotal	2	33	18284.9	554.1	23.539	0.978
PSTallo	1	34	2252.3	66.2	8.139	0.983
PSRamas	1	34	1828.2	53.8	7.333	0.975
PSHojas	1	34	1371.0	40.3	6.350	0.982

Parámetro	Valor Estimado	Error estándar	Valor de t	Valor de Rechazo ( Pr >  t  )
$\beta_0$	0.25347	0.0836	3.03	0.0047
$\beta_1$	2.13846	0.0913	23.42	<0.0001
$\phi_F$	0.39479	0.0081	48.69	<0.0001
$\phi_R$	0.29331	0.0073	40.15	<0.0001
$\phi_H$	0.31189	0.0063	49.30	<0.0001

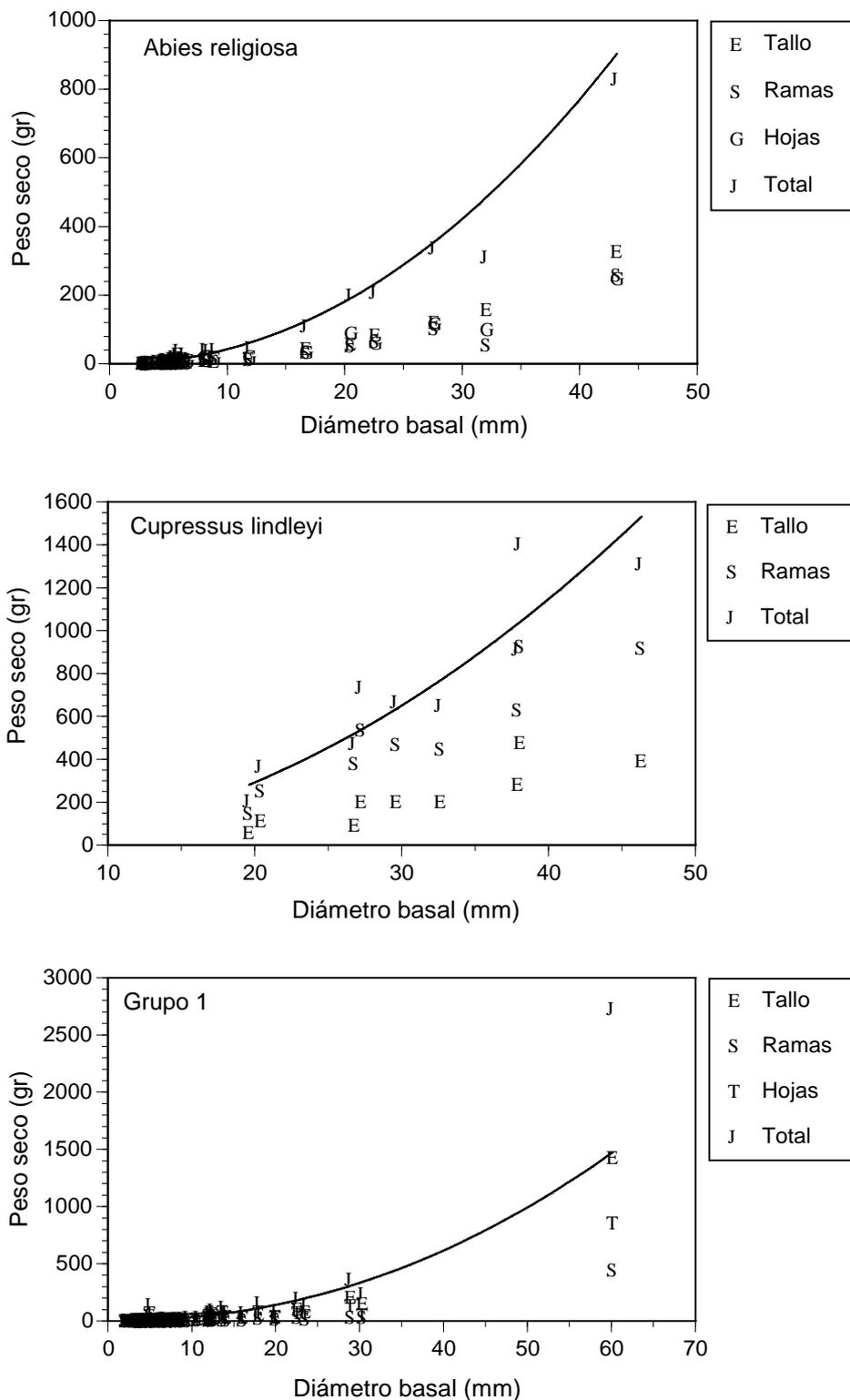


Figura 4. Dispersión de datos y curva de ajuste de biomasa total de *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyi* y especies incluidas en el grupo 1 (*Pinus greggii*, *P. patula*, *P. leiophylla*, *P. teocote* y *P. ayacahuite*).

Cuadro 6. Ajuste del modelo para *Cupressus lindleyi*. Para el  $PS_T$  se usó el modelo lineal  $PS_T = \beta_0 + \beta_1 D$ .

Componente	Grados de Libertad del Modelo	Grados de Libertad del Error	Suma de Cuadrados del Error	Cuadrado medio del error	Error estándar aproximado	R <sup>2</sup>
PS <sub>total</sub>	2	7	220423	31489	177.45	0.8309
PS <sub>Tallos</sub>	1	8	5650.6	706.3	26.5767	0.9634
PS <sub>Ramas</sub>	1	8	5650.6	706.3	26.5767	0.9901
PS <sub>Hojas</sub>	1	-	-	-	-	-

Parámetro	Valor Estimado	Error estándar	Valor de t	Valor de Rechazo (Pr >  t )
$\beta_0$	-555.873	230.0244	-2.42	0.0463
$\beta_1$	42.089	7.1768	5.86	0.0006
$\phi_F$	0.309	0.0106	29.24	<0.0001
$\phi_R$	0.691	0.0106	65.47	<0.0001
$\phi_H$	-	-	-	-

Si se obtienen valores negativos al momento de predecir con el modelo lineal propuesto, los valores de biomasa total se pueden estimar con el modelo no-lineal de la forma  $PS_T = \beta_0 D^{\beta_1}$ . Los parámetros estimados se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Ajuste del modelo no lineal para *Cupressus lindleyi*.

Suma de Cuadrados del Error	Cuadrado medio del error	Error estándar aproximado	R <sup>2</sup>
238927	34132.4	184.7	0.8167

Parámetro	Valor Estimado	Error estándar	Valor de t	Valor de Rechazo (Pr >  t )
$\beta_0$	2.214815	2.737	0.81	0.445
$\beta_1$	1.686026	0.3419	4.93	0.0017

Cuadro 8. Ajuste del modelo para *Pinus pseudostrobus*.

Componente	Grados de Libertad del Modelo	Grados de Libertad del Error	Suma de Cuadrados del Error	Cuadrado medio del error	Error estandar aproximado	R <sup>2</sup>
PStotal	2	47	39597.9	842.5	29.026	0.9811
PSTallo	1	48	3824	79.6662	8.9256	0.9906
PSRamas	1	48	1426.5	29.7182	5.4514	0.9878
PSHojas	1	48	4609	96.0216	9.7991	0.9795

Parámetro	Valor Estimado	Error estándar	Valor de t	Valor de Rechazo ( Pr >  t  )
$\beta_0$	0.108385	0.0358	3.03	0.0040
$\beta_1$	2.312196	0.0869	26.61	<0.0001
$\phi_F$	0.434997	0.0056	77.7	<0.0001
$\phi_R$	0.229744	0.00342	67.19	<0.0001
$\phi_H$	0.335259	0.0062	54.55	<0.0001

Cuadro 9. Ajuste del modelo para el grupo 1 (*Pinus gregii*, *P. patula*, *P. leiophylla*, *P. teocote* y *P. ayacahuite*).

Componente	Grados de Libertad del Modelo	Grados de Libertad del Error	Suma de Cuadrados del Error	Cuadrado medio del error	Error estandar aproximado	R <sup>2</sup>
PStotal	2	69	72404.20	1049.300	32.394	0.990
PSTallo	1	70	4932.90	70.470	8.395	0.998
PSRamas	1	70	1760.90	25.156	5.016	0.991
PSHojas	1	70	7740.60	110.600	10.516	0.989

Parámetro	Valor Estimado	Error estándar	Valor de t	Valor de Rechazo ( Pr >  t  )
$\beta_0$	0.01868	0.00526	3.55	0.0007
$\beta_1$	2.90138	0.06920	41.92	<0.0001
$\phi_F$	0.52042	0.00300	173.19	<0.0001
$\phi_R$	0.16096	0.00180	89.66	<0.0001
$\phi_H$	0.31862	0.00376	84.65	<0.0001

Para el grupo 2 se tuvo una heterogeneidad notable debido tanto a las diferencias entre especies como a las diferencias intra-específicas (*P. hartwegii*). En la

Figura 5 se muestra el comportamiento de los valores de biomasa respecto al diámetro basal.

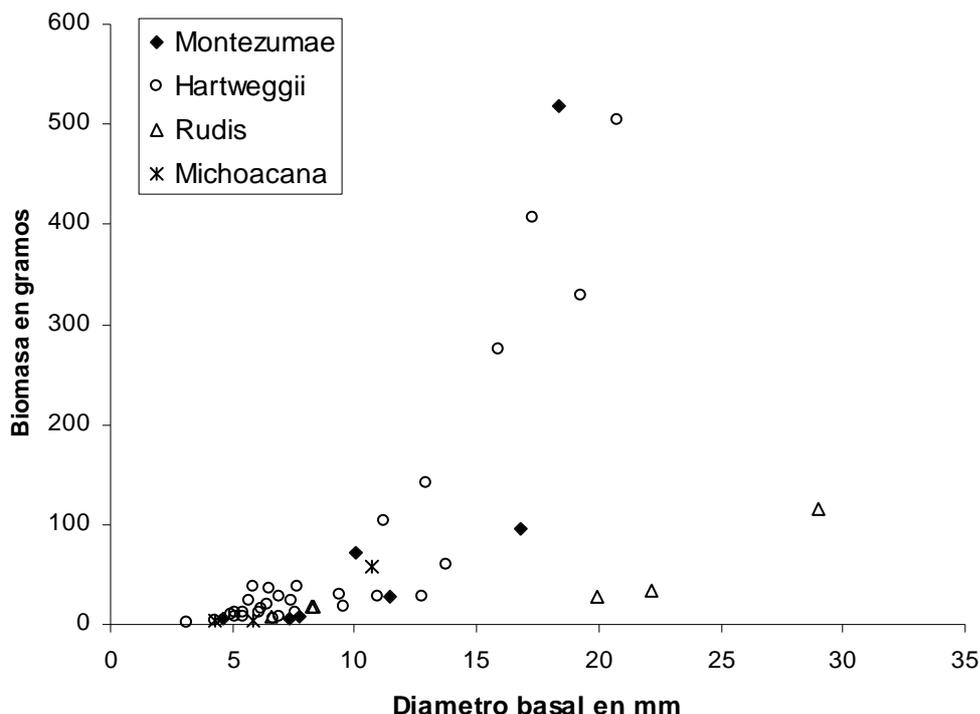


Figura 5. Valores observados de biomasa para *Pinus hartwegii*, *P. rudis*, *P. montezumae* y *P. michoacana*.

La especie *Pinus rudis* es la única atípica dentro del grupo y *P. michoacana* tiene muy pocos individuos. La estructura  $y = \beta_0 x^{\beta_1}$  aunque eficiente en sus características totales produce resultados no deseados como errores estándar muy grandes para  $\beta_0$ . Para corregir esto, se linealizó el modelo y se incluyó una variable indicadora para corregir el efecto de *P. rudis* en el grupo.

$$\ln(PS_T) = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_{1Rudis} D * I_{Rudis}$$

donde:

$\beta_{IRudis}$  es el parámetro que ajusta a  $\beta_I$  cuando se estima la biomasa total en *Pinus rudis*.

$I_{Rudis}$  es la variable indicadora = 1 si el árbol a estimar es *Pinus rudis*, 0 de otra forma.

Así es posible calcular  $PS_T = \exp(\beta_0 + \beta_1 D + \beta_{IRudis} D * I_{Rudis})$  y después obtener los valores de biomasa para fuste, ramas y hojas

Cuadro 10. Ajuste del modelo para el grupo 2 (*Pinus hartwegii*, *P. rudis*, *P. montezumae* y *P. michoacana*).

Componente	Grados de Libertad del Modelo	Grados de Libertad del Error	Suma de Cuadrados del Error	Cuadrado medio del error	Error estandar aproximado	R <sup>2</sup>
ln(PStotal)	3	43	20.092	0.4673	0.6836	0.766
PSTallos	1	45	819.900	18.2206	4.2686	0.993
PSRamas	1	45	1017.400	22.6083	4.7548	0.939
PSHojas	1	45	2353.900	52.3081	7.2324	0.983

Parámetro	Valor Estimado	Error estandar	Valor de t	Valor de Rechazo (Pr >  t )
$\beta_0$	-2.12963	0.46260	-4.6	<0.0001
$\beta_I$	2.56196	0.21630	11.85	<0.0001
$\beta_{IRudis}$	-0.53394	0.12320	-4.33	<0.0001
$\phi_F$	0.40746	0.00438	93.09	<0.0001
$\phi_R$	0.13817	0.00488	28.34	<0.0001
$\phi_H$	0.45437	0.00742	61.26	<0.0001

En la Figura 6 se presentan la dispersión de los datos y la línea ajustada con el modelo propuesto para las especies incluidas en el grupo 2 (*Pinus hartwegii*, *P. rudis*, *P. montezumae* y *P. michoacana*) y para *Pinus pseudostrabus*.

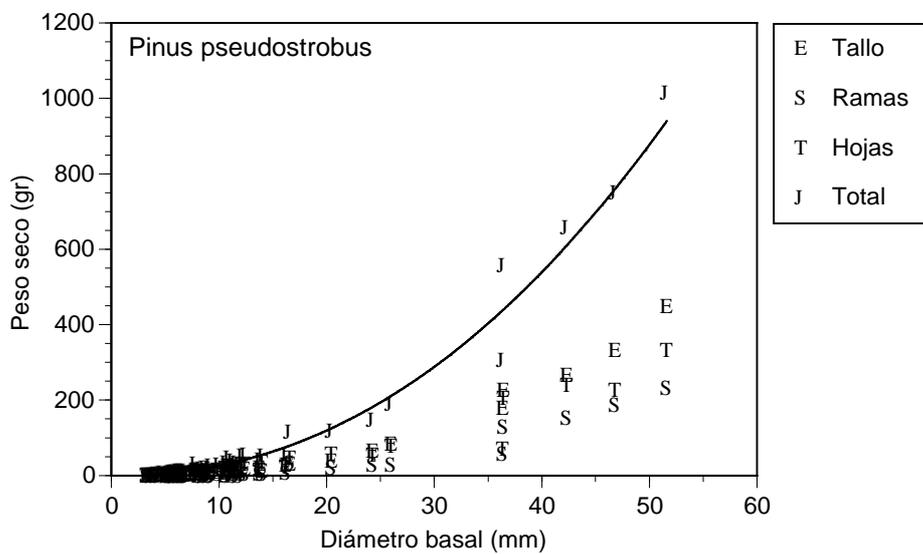
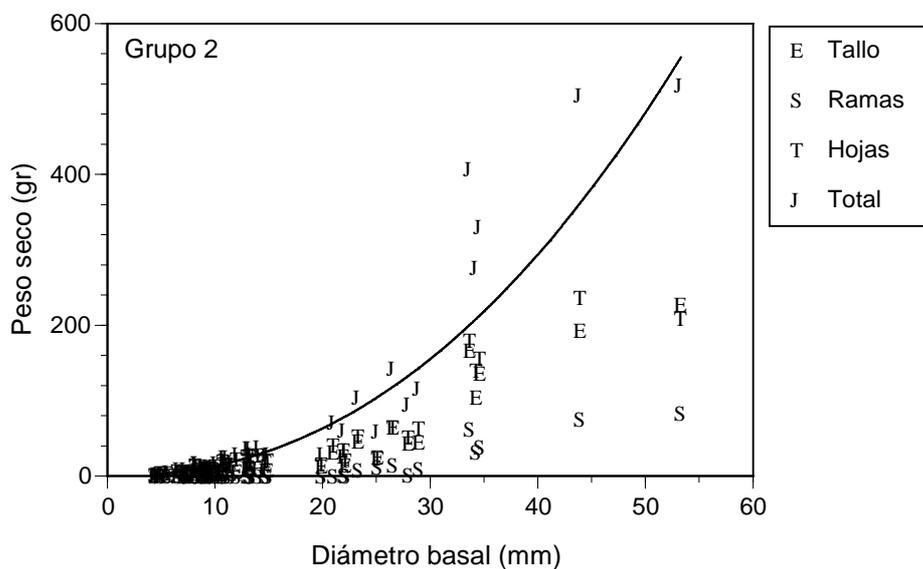


Figura 6. Dispersión de datos y curva de ajuste de biomasa total del grupo 2 (*Pinus hartwegii*, *P. rudis*, *P. montezumae* y *P. michoacana*) y de *Pinus pseudostrobus*.

Al extraer *P. rudis* del grupo, el ajuste del modelo para PST es para el modelo

$$\ln(PST) = \beta_0 + \beta_1 D.$$

Cuadro 11. Ajuste para el modelo  $\ln(PST) = \beta_0 + \beta_1 D$ .

Suma de Cuadrados del Error	Cuadrado medio del error	Error estándar aproximado	R <sup>2</sup>
18.09459	0.47617	184.7	0.779

Parámetro	Valor Estimado	Error estándar	Valor de t	Valor de Rechazo (Pr >  t )
$\beta_0$	2.4221	0.50016	4.84	<0.0001
$\beta_1$	2.69497	0.23299	11.57	<0.0001

Pero para el modelo  $PST = \beta_0 D^{\beta_1}$  el ajuste es

Cuadro 12. Ajuste para el modelo  $PST = \beta_0 D^{\beta_1}$ .

Suma de Cuadrados del Error	Cuadrado medio del error	Error estándar aproximado	R <sup>2</sup>
18.09459	2638.1	51.3621	0.858

Parámetro	Valor Estimado	Error estándar	Valor de t	Valor de Rechazo (Pr >  t )
$\beta_0$	0.016377	0.0179	0.91	<0.3662
$\beta_1$	3.426588	0.3752	9.13	<0.0001

El uso de ramas individuales de cada árbol colectado permitió aumentar el número de observaciones (pares de datos compuestos por el diámetro basal y el peso seco de cada componente estructural) con lo que se considera que se pudo salvar la restricción de la utilización de un número reducido de árboles cosechados. Es decir, las ramas individuales fueron considerados como árboles individuales de menor tamaño con base en el principio modular descrito por Causton (1985). El peso seco de cada rama individual de un árbol dado se sumó para obtener el peso seco total del árbol, lo cual permitió considerarlo como otro individuo.

### 4.3. Inventario de biomasa acumulada

Los valores promedio de las variables dasométricas, diámetro basal y altura total de las diferentes especies utilizadas en las reforestaciones, se presentan en los Cuadros 13, 14 y 15 para la Regional 1, 2 y 3, respectivamente, y para los diferentes años de plantación. Para algunas especies se presentan valores similares a pesar de ser plantaciones de diferente año, o inclusive algunos valores en las plantaciones más jóvenes son mayores. Lo anterior se debe a la variación de tamaños que tienen las plantas resultados de los replantes que año con año se han venido realizando. Es decir, aun en áreas marcadas como plantadas en 1998, que corresponde al inicio de las reforestaciones objeto del presente estudio, es posible encontrar brinzales que fueron plantados en el año inmediato anterior a la fecha de muestreo.

Para realizar el inventario cada Regional se definió como una población y en cada una se determinó como un estrato el año de plantación. Como se careció de información previa para definir el tamaño de muestra, se definió una muestra del 0.1 % y con él se generaron los intervalos de confianza.

Con estos datos es posible generar los datos de inventario de biomasa total. Con los datos de partición de biomasa y la proporción de especies se asignó de manera aproximada la biomasa respectiva de cada especie por Regional por año de plantación. Se utilizaron los modelos de biomasa generados para predecir el peso seco individual con base en el diámetro basal.

Para estimar el inventario se usaron las fórmulas para estimar la media de biomasa por parcela y por año de plantación.

$$\bar{y} = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} y_i$$

donde:

$y_i = \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}$  es la suma de la biomasa de cada j-esimo árbol en el i-esimo sitio

$\bar{y}$  - Media muestral de biomasa por sitio en kg/ha.

$n_k$  - Tamaño de muestra de la k-esima regional en el m-esimo año

La varianza de la media por regional por año se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$S_{\bar{y}_j}^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_j} y_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_j} y_i \right)^2}{n_k}}{n_k - 1} \right) \frac{1}{n_k} \left( 1 - \frac{n_k}{N_k} \right)$$

donde:

$N_k$  – Es el tamaño del marco de muestreo de la k-esima regional en el m-esimo año (numero total de unidades maestras posibles en la regional).

Para estimar los totales por Regional y por año de plantación se expandieron con la fórmula:

$$\hat{T}_k = N_k \bar{y}$$

donde:

$\hat{T}_k$  - Biomasa total de la Regional k

Cuadro 13. Diámetro y altura promedio de las especies de la Regional 1. La desviación estándar se presenta entre paréntesis.

Especie	1998		1999		2000		2001	
	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Altura (cm)
<i>Abies religiosa</i>	10.28 (1.6)	52.00 (13.3)	11.52 (8.7)	52.4 (17.5)	9.18 (2.9)	51.98 (22.6)		
<i>Cupressus lindleyi</i>	19.09 (4.2)	115.23 (29.8)	20.73 (8.7)	154.5 (47.9)	24.20 (7.5)	104.59 (31.9)		
<i>P. ayacahuite</i>	16.51 (5.7)	67.01 (25.2)	16.39 (7.0)	55.09 (26.3)	10.97 (5.7)	43.21 (16.8)	9.84 (2.5)	31.97 (14.9)
<i>P. gregii</i>			9.91 (5.5)	28.40 (24.3)	10.40 (2.8)	20.59 (9.6)		
<i>P. hartwegii</i>	15.73 (6.9)	32.35 (25.6)	15.26 (9.9)	33.42 (20.7)	14.17 (4.9)	19.33 (13.0)	19.58 (5.5)	29.87 (20.6)
<i>P. leiophylla</i>			14.37 (5.5)	61.39 (27.2)	15.68 (6.9)	48.00 (11.3)		
<i>P. montezumae</i>	13.58 (1.3)	6.00 (2.7)	15.94 (6.4)	18.16 (17.7)	19.70 (3.9)	31.13 (19.8)		
<i>P. patula</i>			23.90 (8.7)	151.42 (60.9)				
<i>P. pseudostrabus</i>			15.65 (4.2)	91.50 (41.5)	5.87 (0.0)	50.00 (0.0)		
<i>P. rudis</i>			15.90 (6.5)	47.56 (17.5)	10.24 (2.0)	30.00 (7.5)		
<i>P. teocote</i>			7.65 (0.8)	48.62 (6.9)				
<i>Quercus spp.</i>			8.26 (2.2)	51.24 (10.8)				

Cuadro 14. Diámetro y altura promedio de las especies de la Regional 2. La desviación estándar se presenta entre paréntesis.

Especie	1998		1999		2000		2001	
	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Altura (cm)
<i>Abies religiosa</i>	13.58 (9.5)	94.20 (68.0)	11.45 (3.4)	86.71 (24.6)				
<i>Alnus firmifolia</i>			15.69 (8.7)	100.25 (43.6)	12.67 (5.2)	92.05 (31.6)	7.62 (2.3)	74.6 (15.0)
<i>Cupressus lindleyi</i>	31.95 (18.6)	200.82 (87.6)			7.53 (2.7)	75.00 (14.1)	10.33 (1.6)	69.57 (13.0)
<i>P. ayacahuite</i>	19.77 (6.9)	106.18 (38.7)	13.85 (10.6)	54.11 (24.5)	21.51 (4.5)	93.92 (30.3)		
<i>P. gregii</i>	9.39 (4.1)	54.69 (20.2)	6.33 (1.35)	22.19 (3.4)	24.40 (10.3)	74.86 (40.1)		
<i>P. hartwegii</i>	30.34 (14.9)	77.60 (43.5)	21.90 (14.6)	49.84 (41.7)	19.40 (10.2)	33.90 (23.8)	7.65 (0.9)	18.45 (5.2)
<i>P. leiophylla</i>	9.31 (3.8)	62.29 (16.1)	24.05 (15.1)	75.00 (33.9)	20.27 (11.8)	77.22 (35.1)		
<i>P. michoacana</i>					29.26 (19.9)	43.86 (43.9)		
<i>P. montezumae</i>	28.67 (14.5)	64.54 (48.0)	27.24 (10.3)	49.79 (29.7)	24.04 (14.3)	76.46 (54.1)		
<i>P. patula</i>	21.48 (9.8)	100.60 (54.6)	8.17 (3.5)	36.82 (17.9)	17.20 (7.0)	104.32 (40.4)		
<i>P. pseudostrobus</i>	28.28 (5.7)	105.87 (54.6)	26.89 (9.8)	85.09 (41.7)	21.28 (9.9)	44.00 (20.0)		
<i>P. rudis</i>			17.10 (5.4)	98.79 (29.5)	14.39 (5.6)	53.40 (18.9)		
<i>P. teocote</i>	16.84 (6.2)	119.60 (43.3)	4.68 (0.9)	25.38 (3.2)				
<i>Quercus</i> spp.					8.45 (0.0)	68.0 (0.0)		
<i>Salix bonplandiana</i>					7.43 (1.2)	57.70 (3.8)		

Cuadro 15. Diámetro y altura promedio de las especies de la Regional 3. La desviación estándar se presente entre paréntesis.

Especie	1998		1999		2000	
	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Altura (cm)
<i>Abies religiosa</i>	11.95 (3.7)	77.71 (31.7)				
<i>Alnus firmifolia</i>	19.80 (7.2)	163.50 (98.4)	23.61 (2.0)	138.0 (2.8)		
<i>Cupressus lindleyi</i>	23.69 (12.8)	176.68 (71.4)			6.6 (0.0)	11.0 (0.0)
<i>P. ayacahuite</i>	20.21 (7.0)	82.38 (28.4)	18.41 (4.4)	45.08 (19.6)		
<i>P. hartwegii</i>	19.93 (10.5)	34.04 (35.2)	14.53 (6.0)	9.09 (15.6)	13.83 (6.0)	13.78 (12.7)
<i>P. leiophylla</i>	15.19 (8.1)	71.60 (39.8)	19.96 (16.4)	69.83 (43.3)	12.05 (4.7)	16.25 (8.0)
<i>P. michoacana</i>	22.73 (9.4)	57.91 (42.2)	23.96 (9.5)	41.89 (27.6)	40.60 (17.9)	60.73 (32.2)
<i>P. montezumae</i>	24.07 (11.9)	36.51 (34.4)	19.90 (9.0)	24.29 (28.1)	13.98 (4.8)	9.3 (11.0)
<i>P. patula</i>	17.85 (9.6)	114.75 (51.4)	21.55 (9.1)	134.0 (40.4)		
<i>P. pseudostrobus</i>	17.33 (7.4)	74.66 (29.8)	10.76 (2.0)	69.0 (24.0)	8.9 (6.7)	12.3 (6.2)
<i>P. rudis</i>	14.44 (6.7)	59.50 (45.1)	15.96 (3.4)	60.3 (11.6)		
<i>P. teocote</i>	13.49 (4.6)	37.57 (29.5)				
<i>Quercus</i> spp.	9.35 (9.8)	56.33 (66.4)	9.74 (1.9)	46.29 (13.3)		

Los intervalos aproximados de confianza al 95% se obtuvieron con la siguiente fórmula simplificada para el valor de t:

$$\hat{T}_k \pm 2\sqrt{N_k^2 S_{\bar{y}_i}^2}$$

Los valores de biomasa estimados por Regional y por año de plantación hasta el mes de enero de 2004 se presentan en los Cuadros 16, 17 y 18 para la Regional 1, 2 y 3, respectivamente. También se presenta la estimación total por Regional con su respectivo intervalo de confianza al 95 %.

Cuadro 16. Biomasa de las especies reforestadas en la Regional 1 por año de plantación.

Año	Biomasa Promedio (Kg/ha)	Superficie (ha)	Biomasa Total (t)	Intervalo de Confianza del 95%	
				Límite superior (t)	Límite inferior (t)
1998	84.5	718.6	60.7	83.7	37.8
1999	84.8	1569.7	133.1	172.4	93.9
2000	58.0	2255.4	130.9	173.8	87.9
<b>Total</b>		2543.7	324.7	387.3	262.2

La Regional 2 es la que mayor cantidad de biomasa ha acumulado hasta el mes de enero de 2004 a partir de las reforestaciones de 1998. Asimismo, las plantaciones de esta Regional son las que tienen mayor cantidad de biomasa acumulada por unidad de superficie. A pesar de que la Regional 3 es la que posee la mayor superficie de plantación, ha acumulado una cantidad intermedia de biomasa (Cuadro 18).

Cuadro 17. Biomasa de las especies reforestadas en la Regional 2 por año de plantación.

Año	Biomasa Promedio (Kg/ha)	Superficie (ha)	Biomasa Total (t)	Intervalo de Confianza del 95%	
				Límite superior (t)	Límite inferior (t)
1998	229.7	1921.2	441.2	622.9	259.6
1999	128.0	1507.7	193.0	294.2	91.7
2000	220.1	1153.1	253.7	411.5	96.0
<b>Total</b>		4582.0	887.9	1148.9	626.9

Cuadro 18. Biomasa de las especies reforestadas en la Regional 3 por año de plantación.

Año	Biomasa Promedio (Kg/ha)	Superficie (ha)	Biomasa Total (t)	Intervalo de Confianza del 95%	
				Límite superior (t)	Límite inferior (t)
1998	183.4	2293.1	420.6	568.3	272.8
1999	78.1	2246.3	175.3	306.4	44.3
2000	15.3	2449.9	37.4	56.0	18.8
<b>Total</b>		6989.3	633.3	831.7	434.9

Como se tienen datos por especie en cada sitio de muestreo, es posible conocer la distribución de especies en cada Regional por año de plantación. Las Figuras 7, 8 y 9 presentan las proporciones de las especies por Regional por año. Es posible extrapolar dicha proporción al total de la biomasa estimada en cada caso. Asimismo si se quisiera conocer la proporción de biomasa para cada uno de los componentes estructurales (tallos, ramas y hojas) de las especies plantadas, se requiere únicamente calcular la proporción correspondiente a la especie y luego distribuirla en cada una de ellas.

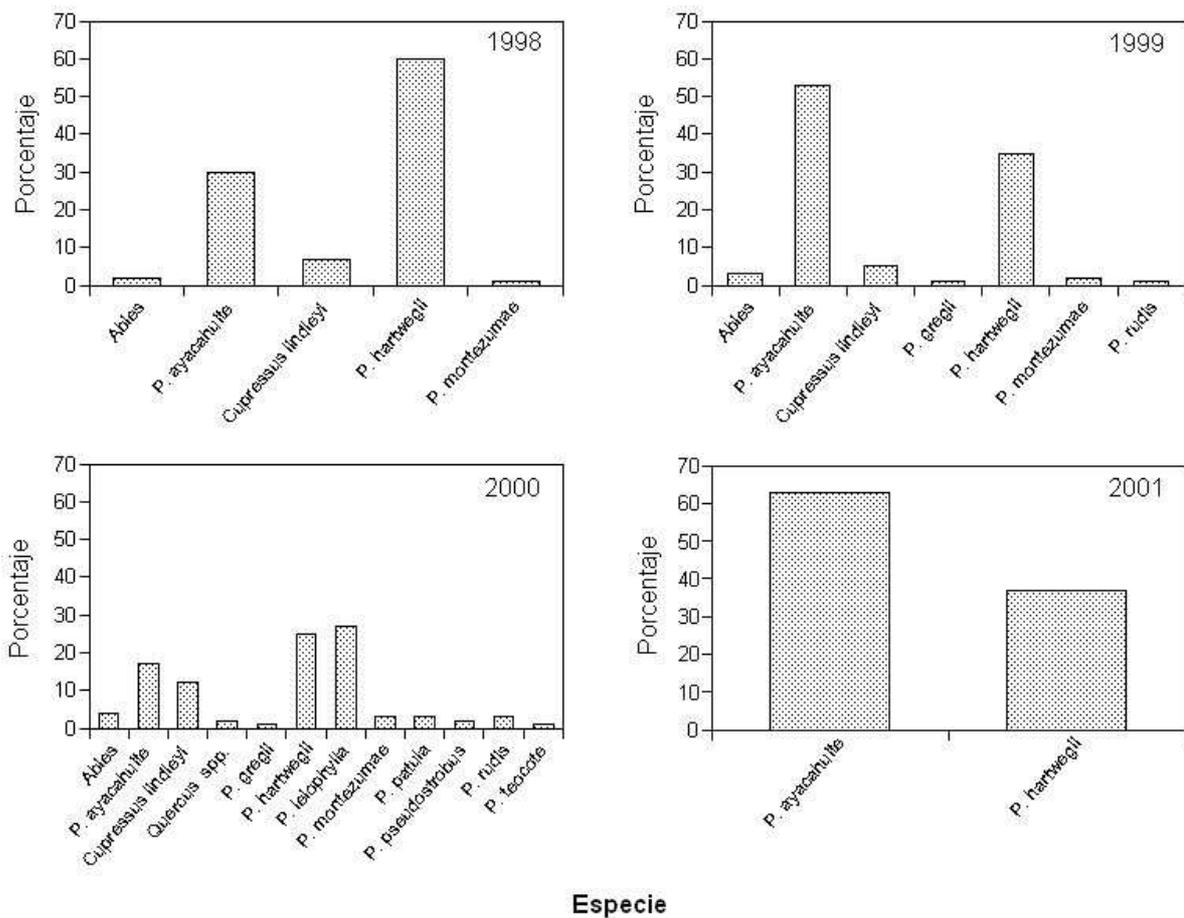


Figura 7. Proporción (%) de especies plantadas en la Regional 1 por año de plantación.

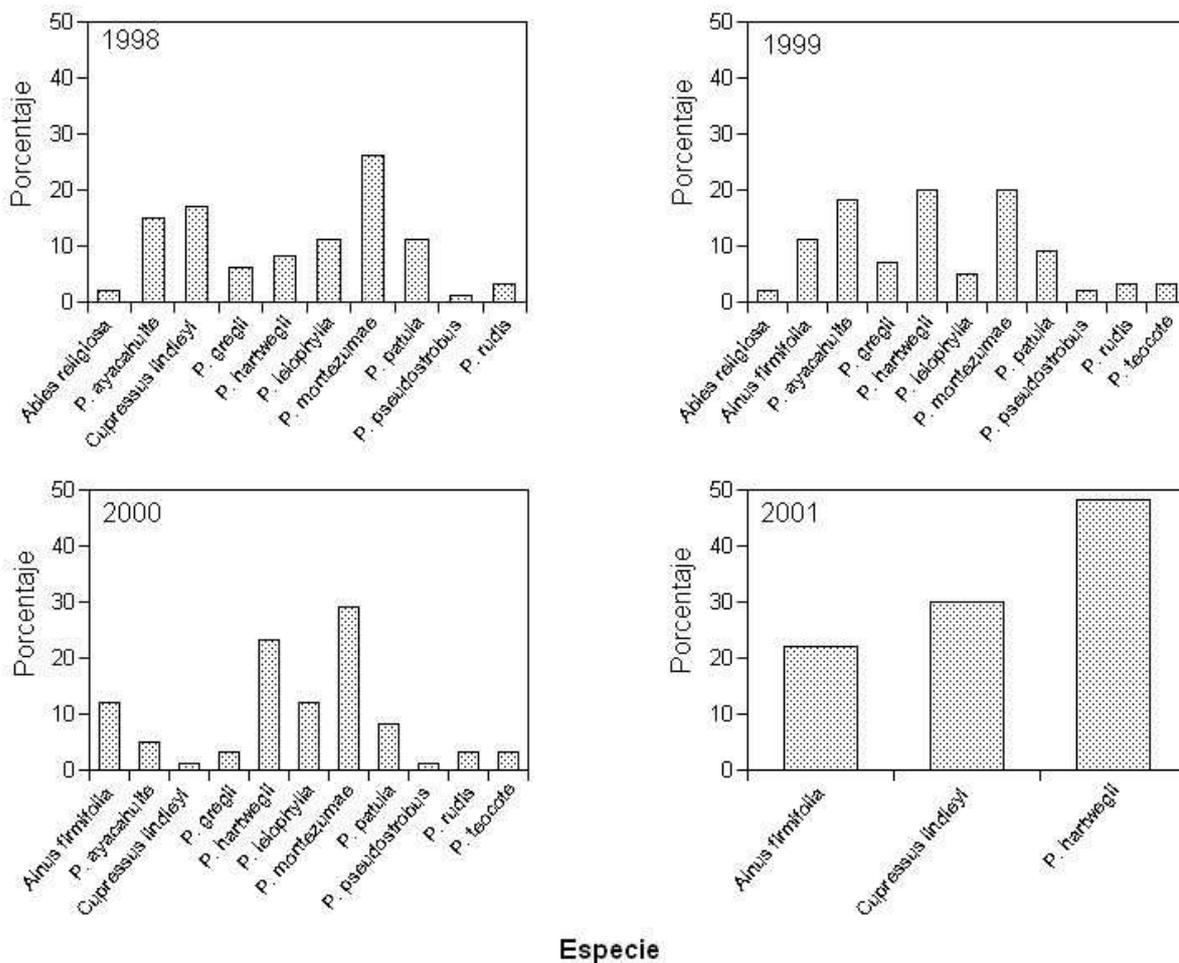


Figura 8. Proporción (%) de especies plantadas en la Regional 2 por año de plantación.

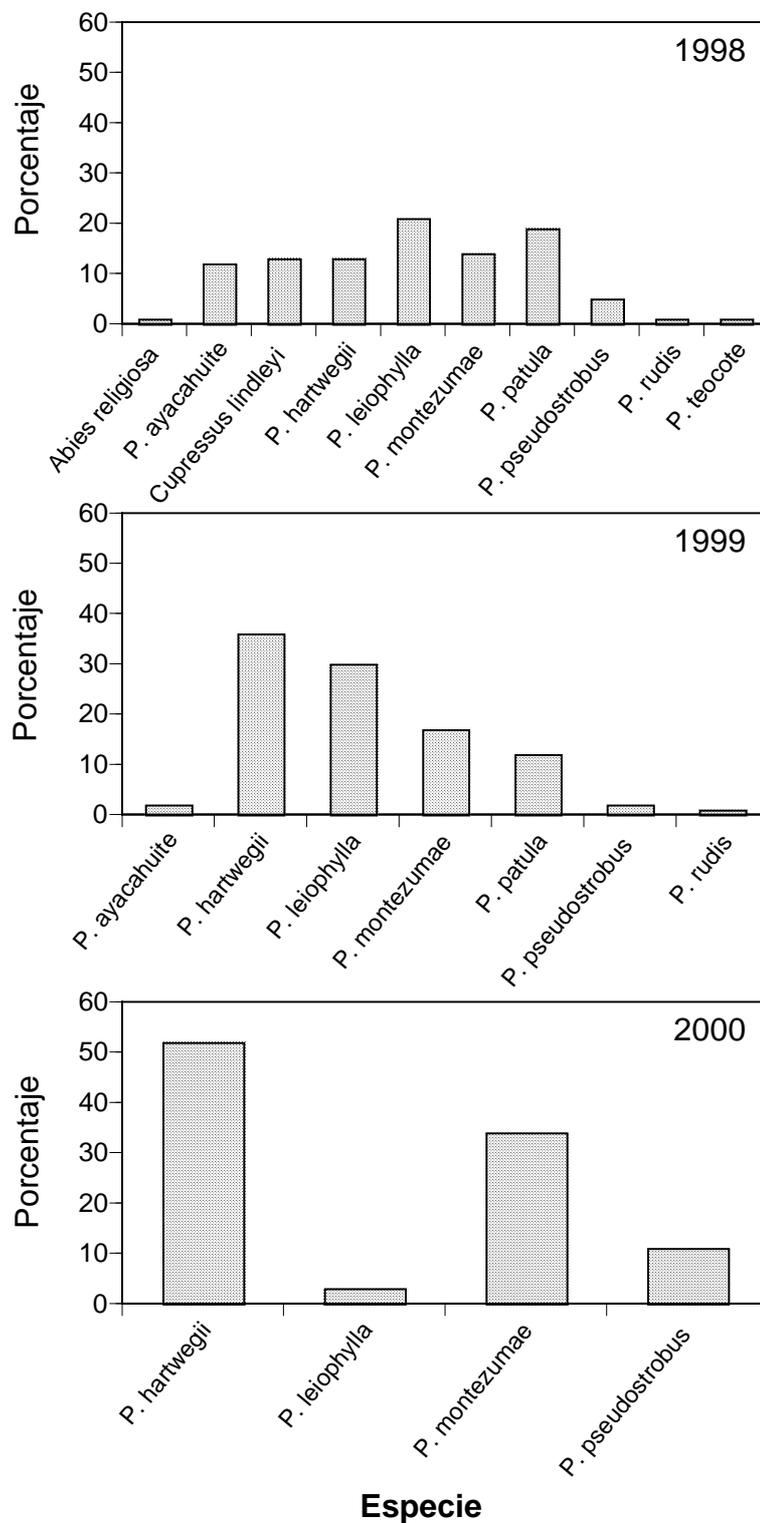


Figura 9. Proporción (%) de especies plantadas en la Regional 3 por año de plantación.

En el Cuadro 19 se presenta la concentración de carbono por componente estructural de las especies utilizadas en la reforestación del suelo de conservación del D.F. El valor promedio general para todas las especies es de 51.76% base pesos seco. Es decir, si se requiere conocer la cantidad de carbono contenida en un árbol plantado, lo que se necesita hacer es medir su diámetro basal y utilizar la ecuación que predice la biomasa en peso seco, y posteriormente multiplicar ese valor por 0.5176; el resultado será la cantidad de carbono en una unidad de peso capturada en los componentes estructurales de ese individuo.

Tabla 19. Concentración de carbono (%) en las especies utilizadas en la reforestación del suelo de conservación del Distrito federal.

Especie	Componente estructural			Media
	Follaje	Ramas	Fuste	
<i>Abies religiosa</i>	52.98	51.22	49.99	51.40
<i>Cupressus lindleyii</i>	50.20		49.91	50.06
<i>Pinus ayacahuite</i>	52.21	51.61	52.21	52.01
<i>Pinus hartwegii</i>	52.16	53.40	52.57	52.71
<i>Pinus michoacana</i>	52.04	52.24	52.32	52.20
<i>Pinus montezumae</i>	51.44	52.48	52.33	51.96
<i>Pinus patula</i>	52.14	52.89	50.61	51.88
<i>Pinus pseudostrobus</i>	51.55	51.10	50.96	51.20
<i>Pinus rudis</i>	52.45	53.32	51.59	52.45
Media	51.91	52.28	51.39	51.76

Utilizando el factor de conversión de biomasa a carbono acumulado, se tiene que en la Regional 1 hasta el mes de enero de 2004 hay capturadas 168.1 t C en la biomasa aérea de las plantas reforestadas en una superficie de 2534.7 ha. En la Regional 2 la cantidad de carbono acumulado en la biomasa aérea de las plantaciones es de 459.57 t C en 4582 ha. Asimismo, en la Regional 3 se tienen

capturadas 327.80 t C en 6989.3 ha. Es necesario señalar que la cantidad de carbono aquí reportada se encuentra secuestrada en los componentes estructurales de las especies utilizadas en las plantaciones sólo en la parte aérea. Asimismo el carbono reportado se restringe sólo a las plantas producto de las reforestaciones. En la mayoría de los casos las plantaciones se han realizado bajo un dosel ocupado por árboles maduros de diferentes especies. Sería necesario cuantificar la biomasa acumulada en dichos individuos para poder estimar el carbono real por unidad de superficie que se tiene.

#### ***4.4. Proyección del crecimiento y acumulación de biomasa.***

Debido a que los árboles que se muestrearon en las plantaciones del suelo de conservación del D.F. se encuentran en etapas juveniles y presentan características dasométricas pequeñas, no es recomendable utilizar los mismos modelos para predecir la acumulación de biomasa en edades superiores a 10 años.

Una alternativa temporal, es utilizar ecuaciones que se han ajustado para predecir biomasa en otros sitios para algunas de las especies individuales o grupos de especies, incluyendo las utilizadas en las plantaciones evaluadas. Es importante resaltar que el utilizar ecuaciones ajustadas con datos de sitios diferentes, podrían resultar en estimaciones sesgadas. Sin embargo, partiendo de la premisa de que la relación alométrica es constante y depende directamente de la relación existente ente los componentes estructurales de cada individuo de acuerdo al modelo de bombeo o “pipe model” (Shinozaki *et al.* 1964, Whittaker y Woodwell, 1968; Grier y Waring, 1974; Snell y Brown, 1978; Whitehead, 1978; White, 1979, Rogers y Hinckley, 1979; Kauffmann y Troendle, 1981; Waring *et*

al., 1982; Albrekston, 1984) se podría tener una estimación de la biomasa que potencialmente podrían alcanzar los individuos plantados en edades futuras.

En el Cuadro 20 se presentan los modelos de biomasa existentes en la literatura. Estos potencialmente podrían utilizarse en la estimación de la biomasa para árboles adultos de las especies utilizadas en la reforestación del suelo de conservación del D.F.

Cuadro 20. Modelos de biomasa reportados en la literatura.

Especie	Modelo	Autor
(1) <i>Pinus ayacahuite</i> , <i>P. montezumae</i> , <i>P.</i> <i>pseudostrobus</i> , <i>P.</i> <i>oocarpa</i> y <i>P. oaxacana</i> entre otros	$Y=0.084D^{2.475}$	Ayala, 1998
(2) <i>Pinus patula</i>	$Y=\text{Exp}(-1.8621 + 2.2768 \ln(DN))$	Castellanos <i>et al.</i> , 1996
(4) <i>Quercus</i> spp.	$Y=1.91D^{1.782}$	Ayala, 1998
(5) <i>Alnus</i> spp.	$Y=\text{Exp}(-2.14 + 2.23 \ln(DN))$	Acosta <i>et al.</i> , 2002

Se realizó un intento por estimar la biomasa de árboles individuales mediante el uso de los modelos del Cuadro 20. Para ello se utilizó el modelo propuesto por Castellanos *et al.* (1996) para estimar la biomasa de *Pinus patula*, *P. teocote*, *P. greggii*, *P. leiophylla* y *P. ayacahuite*, todas ellas pertenecen al grupo 1 definido en este estudio. El modelo propuesto por Ayala (1998), para el grupo de especies de pinos, se utilizó para estimar la biomasa de *Pinus montezumae*, *P. rudis*, *P. hartwegii* y *P. michoacana*. Se midió el diámetro promedio que alcanzan las especies a la edad de 30 años en árboles maduros mediante la extracción de cilindros de madera (virutas de incremento) (Cuadro 21).

Finalmente se definió una población residual de 500 árboles por hectárea a los 30 años de edad.

Tanto el diámetro promedio y el número árboles por hectárea son datos muy conservadores. Estos valores en condiciones naturales dependen de la densidad y por tanto de las actividades de manejo que se realicen en las plantaciones en el futuro. De igual forma, la biomasa de árboles individuales y biomasa por hectárea es solamente una aproximación que deberá tomarse con reservas, debido a que los modelos utilizados para su estimación provienen de otros sitios y fueron ajustados con datos provenientes de rodales naturales. Los resultados de la biomasa estimada se presentan en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Diámetro normal, biomasa individual y biomasa por hectárea estimada a la edad de 30 años de las especies utilizadas en la reforestación del suelo de conservación del D.F.

Especie	Diámetro normal (cm)	Biomasa individual (kg) <sup>1</sup>	Bioma estimada (t/ha) <sup>2</sup>
<i>Pinus michoacana</i>	9.7	23.25	11.63
<i>Pinus montezumae</i>	12.0	39.37	19.69
<i>Pinus rudis</i>	9.9	24.46	12.23
<i>Pinus hartwegii</i>	11.0	31.75	15.88
<i>Pinus teocote</i>	8.9	18.79	9.39
<i>Pinus greggii</i>	28.8	220.40	110.20
<i>Pinus leiophylla</i>	16.0	89.24	44.62
<i>Pinus patula</i>	25.0	236.66	118.33
<i>Pinus ayacahuite</i>	21.0	157.31	78.65

<sup>1</sup> Biomasa estimada utilizando los modelos del Cuadro 20.

<sup>2</sup> Biomasa estimada (t/ha) asumiendo una densidad residual de 500 árboles/ha.

Otra posibilidad de estimar la biomasa de árboles individuales lo constituye el uso de tablas o ecuaciones de volumen y el peso específico de la madera de la

especie en cuestión. Si el volumen de madera de un individuo se multiplica por el peso específico en  $\text{kg/m}^3$ , el resultado es el peso seco en kg de madera de dicho individuo. Valores de peso específico para algunas especies forestales se presentan en el Cuadro 22, adicionalmente se presentan ejemplos de cómo se puede realizar este cálculo para tres especies.

1. *Pinus ayacahuite*: Musálem y Martínez (2003) reportan que a los 20 años de edad una plantación de *Pinus ayacahuite* var *veitchii* tiene en promedio un volumen de  $150.46 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Si el peso específico de la madera de esta especie es de  $412 \text{ kg/m}^3$  (Candelario, 1980) entonces la biomasa calculada es de  $61.99 \text{ t/ha}$  ( $150.46 \text{ m}^3/\text{ha} * 412 \text{ kg/m}^3 = 61,999 \text{ kg/ha}$  ó  $61.99 \text{ t/ha}$ ).

Cuadro 22. Peso específico reportado en la literatura para algunas especies forestales.

Especie	Peso específico ( $\text{kg m}^{-3}$ )
<i>Abies religiosa</i>	260 <sup>1</sup>
<i>Cupressus lindleyi</i>	460 (género) <sup>2</sup>
<i>Pinus michoacana</i>	510 <sup>12</sup>
<i>Pinus ayacahuite</i>	412 <sup>11</sup>
<i>Pinus cembroides</i>	530 <sup>3</sup> ; 650 <sup>4</sup>
<i>Pinus greggii</i>	460 (juvenil); 520 (madura) <sup>5</sup>
<i>Pinus hartwegii</i>	440 – 510 <sup>6</sup>
<i>Pinus montezumae</i>	520 <sup>7</sup> (604 - Borja, 1983)
<i>Pinus patula</i>	497 <sup>2</sup>
<i>Pinus pseudostrabus</i>	480 (0.33-0.60) <sup>8</sup>
<i>Quercus</i> spp.	560 (490-590) SD = 0.365 <sup>9</sup>
<i>Salix bonplandiana</i>	440 (género) <sup>10</sup>

<sup>1</sup> Ortega (1962), citado por Manzanilla (1974); <sup>2</sup> Wormald (1975); <sup>3</sup> Martínez (1948), Preston (1976) y Wolf (1985), citados por Benavides (1987); <sup>4</sup> Martínez (1992); <sup>5</sup> Linares (1990); <sup>6</sup> Dvorak *et al.*, (2000); <sup>7</sup> Murillo (1988), citado por Dvorak, y Donahue (1992); <sup>8</sup> Bermejo (1986); <sup>9</sup> Guerrero (1989); <sup>10</sup> FAO (1980); <sup>11</sup> Candelario (1980); <sup>12</sup> Echenique y Díaz (1969).

2. *Pinus hartwegii*: Torres (1984) reporta un volumen de 66.27 m<sup>3</sup>/ha a 30 años de edad para rodales naturales de esta especie en el Parque Nacional Zoquiapan. Mediante el empleo de un valor de 475 kg/m<sup>3</sup> de peso específico, la biomasa acumulada es de 31.48 t/ha.

3. *Pinus michoacana*: En una plantación de esta especie en la Cuenca de Cointzio, Michoacán, a la edad de 27 años se observó un volumen de 77.6 m<sup>3</sup>/ha (Musalem y Sánchez, 2003). El peso específico reportado para esta especie es de 510 kg/m<sup>3</sup>, por lo que la biomasa acumulada corresponde a 39.58 t/ha.

Estas estimaciones son una aproximación y deben de tomarse con reservas. La forma más adecuada para poder proyectar el crecimiento en biomasa de las especies empleadas en la reforestación del suelo de conservación, es ajustar modelos de biomasa incluyendo arbolado de la edad a la que se requiera estimar.

## 5. LITERATURA CITADA

- Acosta H., C.C. 2000. Efecto de tres prácticas culturales en la calidad de brinzales de *Pinus patula* Schl. et Cham., producido en vivero. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana. Xalapa, México. 177 p.
- Acosta M., M., J. Vargas H., A. Velázquez M. y J.D. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6):725-736.
- Albrekston, A. 1984. Sapwood basal area and needle mass of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees in central Sweden. *Forestry* 57:35-43.
- Ayala L., S. 1998. Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 70 p.
- Bailian, L., H.L. Allen and S.E. McKeand. 1991. Nitrogen and family effects on biomass allocation of loblolly pine seedlings. *For. Sci.* 37(1):271-283.
- Baskerville, G.L. 1972. Use of logarithmic regressions in the estimation of plant biomass. *Can. J. For. Res.* 2:49-53.
- Bautista Z., N. 2003. Determinación de la calidad de brinzales de *Pinus montezumae* Lamb., producidos en el vivero de San Luis Tlaxialtemalco, D.F. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa Forestal, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 91 p.
- Bello L., A. 1998. Calidad de planta. *In*: Segunda Reunión Nacional sobre Producción de Planta en Contenedores. 27-30 de octubre. Guadalajara, México.

- Benavides M., H.M. 1987. Conductancia y resistencia estomática en dos especies de piñoneros (*Pinus cembroides* Zucc. y *P. discolor* Bailey y Hawks.). Tesis M.C. Centro de Botánica. Colegio de Postgraduados. 219 p.
- Bermejo V., B. 1986. Variación natural de caracteres de acículas, conos, semillas, plántulas y madera en seis poblaciones de *Pinus pseudostrobus* Lindl. de la región central de México. Tesis M.C. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. 108 p.
- Binkley, D. 1984. Douglas-fir stem growth per unit of leaf area increased by interplanted Sitka alder and red alder. *For. Sci.* 30:259-263.
- Bloom, A.J., F. S. Chapin III and H.A. Mooney. 1985. Resource limitation in plants -an economic analogy. *Ann. Rew. Ecol. Syst.* 16:363-392.
- Brix, H. and A.K. Mitchell. 1983. Thinning and nitrogen fertilization effects on sapwood development and relationships of foliage quantity to sapwood area and basal area in Douglas-fir. *Can. J. For. Sci.* 15:189-196.
- Brown, S. 1996. Mitigation potential of carbon dioxide emissions by management of forests in Asia. *Ambio* 25:273-278.
- Brown, S., J.R. Gillespe A. and A.E. Lugo. 1989. Biomass estimation for tropical forests with application to forest inventory data. *Forest Science* 35:881-902.
- Candelario R., M.M. 1980. Estudio de la variación de algunas características físicas y mecánicas de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* y *Pinus patula*. Tesis Profesional. Departamento de Bosques, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 156 p.
- Cano P., A. 1998. Tamaño y calidad de plántula de *Pinus greggii* Engelm., en dos sistemas de producción en vivero. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 80 p.

- Castellanos B., J.F., A. Velázquez M. y J.J. Vargas H. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30(1):123-128.
- Causton, D.R. 1985. Biometrical, structural and physiological relationships among tree parts. *In: Attributes of trees as crop plants*. Cannell, M.G.R. and J.E. Jackson (eds.). Inst. Terrestrial Ecology, Huntingdon. Pp. 137-159.
- Comision de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENA). 2000. Programa de reforestación rural. 33 p.
- Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural. 2000. Programa general de ordenamiento ecológico del Distrito Federal, presentación. Gobierno del Distrito Federal. 15 p.
- Duryea, M.L. 1984. Nursery cultural practices. Impacts on seedling quality. *In: Duryea, M.L. and T.D. Landis (eds.). Forest Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings*. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. Oregon State University. Corvallis, OR, USA. Pp: 143-164.
- Dvorak, W.S. and J.K. Donahue. 1992. CAMCORE Cooperative research review. 1980 – 1992. College of Forest Resources. North Carolina State University. Raleigh, NC. 93 p.
- Dvorak, W.S., J.E. Kietzka, J.K. Donahue, G.R. Hodge, and T.K. Stanger. 2000. *Pinus greggii*-overview. *In: Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative*. College of Natural Resources, NCSU, Raleigh, NC. pp : 53-72.
- Echenique M., R. y V. Díaz G. 1969. Algunas características tecnológicas de la madera de once especies mexicanas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Boletín Técnico No. 27. 61 p.

- Espinosa B., M.A. and D.A. Perry. 1987. Leaf area-sapwood area relationships in adjacent young Douglas-fir stands with different early growth rates. *Can. J. For. Res.* 17:174-180.
- FAO. 1980. Los álamos y los sauces en la producción de madera y la utilización de las tierras. Roma, Italia. 349 p.
- Fliervoet L.M., and M.J.A. Werger. 1984. Canopy structure and microclimate of two wet grassland communities. *New Phytol.* 96:115-130.
- Garcidueñas M., A.R. 1987. Producción de biomasa y acumulación de nutrientes en un rodal de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa Forestal, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 243 p.
- Gower, S.T., B.E. Haynes and K.S. Fasnacht. 1993. Influence of fertilization on the allometric relations for two pines in contrasting environments. *Can. J. For. Res.* 23:1704-1711.
- Grier, C.C., and R.H. Waring. 1974. Conifer foliage mass related to sapwood area. *For. Sci.* 20:205-206.
- Guerrero O., L. 1989. Relación de la estructura de la madera de *Quercus* spp L. con algunas propiedades físicas y mecánicas. Tesis M.C. Centro de Botánica. Colegio de Postgraduados. 134 p.
- IPCC. 2001. Summary for policymakers. A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (<http://www.ipcc.ch/>).
- IPCC. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Documento Técnico V. 93 p.
- Jurik, T.W., G.M. Briggs and D.M. Gates. 1985. A comparison of four methods for determining leaf area index in successional hardwood forests. *Can. J. For. Res.* 15:1154-1158.

- Kauffmann, M.R. and C.A. Troendle. 1981. The relationship of leaf area and foliage biomass to sapwood conducting area in four subalpine forest tree species. *For. Sci.* 27:477-482.
- Kolb, T.E. and K.C. Steiner. 1990. Growth and biomass partitioning response of northern red oak genotypes to shading and grass root competition. *For. Sci.* 36(2):293-303.
- Korner, Ch. 1991. Some often overlooked plant characteristics as determinants of plant growth: a reconsideration. *Func. Ecol.* 5:162-173.
- Larcher, W. 1969. Physiological approaches to the measurement of photosynthesis in relation to dry matter production by trees. *Photosynthetica* 3(2):150-166.
- Ledig, F.T. 1974. Concepts of growth analysis. *In: Proc. Third North American Forest Biology Workshop.* pp:166-182.
- Linares H., A. 1990. Comparación de características anatómicas y de propiedades físicas de la madera de compresión y madera normal de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis Profesional. DCF. UACH. Chapingo, México. 52 p.
- Long, J.N., F.W. Smith and D.R.M. Scot. 1981. The role of Douglas-fir stem sapwood and heartwood in the mechanical and physiological support of crowns and development of stem form. *Can. J. For. Res.* 11:459-464.
- Madgwick, H.A.I, and D.F. Olson. 1974. Leaf area index and volume growth in thinned stands of *Liriodendron tulipifera* L.J. *Appl. Ecol.* 11:575-579.
- Manzanilla, H. 1974. Investigaciones epidométricas y silvícolas en bosques mexicanos de *Abies religiosa*. SAG. México. D.F. 165 p.
- Martínez, M. 1992. Los pinos mexicanos. 3a ed. Ed. Botas. México, D.F. 361 p.
- Monserud, R.A., and J.D. Marshall. 1999. Allometric crown relations in three northern Idaho conifer species. *Can. J. For. Res.* 29:521-535.

- Musálem S., M.A. y G. Martínez C. 2003. Monografía de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* Shaw. INIFAP, Chapingo, México. 364 p.
- Musálem S., M.A. y G. Martínez C. 2003. Monografía de *Pinus greggii* Engelm. INIFAP, Chapingo, México. 341 p.
- Musálem S., M.A. y M.A. Solís P. 2000. Monografía de *Pinus hatwegii*. INIFAP, Chapingo, México. 74 p.
- Musálem S., M.A. y O. Sánchez C. 2003. Monografía de *Pinus michoacana* Martínez. INIFAP, Chapingo, México. 230 p.
- Poorter, H. 1989. Interspecific variation in relative growth rate: On ecological causes and physiological consequences. *In: Causes and consequences of variation in growth rate and productivity of higher plants.* Lambers, H., *et al.* (eds.). SPB Academic Publishing. The Hague. Pp. 45-48
- Rogers, R., and T.M. Hinckley. 1979. Foliar weight and area related to current sapwood area in oak. *For. Sci.* 25:298-303.
- Schonenberger, W. 1984. Above-ground biomass of mountain beech (*Nothofagus solandri* (Hook. f.) Oerst. var. *cliffortioides* (Hook. f.) Poole), in different stand types near timberline in New Zealand. *Forestry* 57:59-73.
- Shinozaki K., K. Yoda, K. Hozumi and T. Kira. 1964. A quantitative analysis of plant form-the pipe model theory. I. Basic analyses. *Jpn. J. Ecol.* 14:97-105.
- Snell, J.A. and J. Brown. 1978. Comparison of tree bio-estimators – DBH and sapwood area. *For. Sci.* 24:455-457.
- Torres R., J.M. 1984. Tablas de rendimiento de densidad variable para *Pinus hartwegii* Lindl. en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, Edo. de México. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 278 p.

- Venator, C.R. 1983. First-year survival of morphologically graded loblolly pine seedlings in Central Louisiana. *Tree Planter's Notes* 34:34-36.
- Waring, R.H. and S.W. Running. 1978. Sapwood water storage and its contribution to transpiration and effect upon water conductance through the stems of old-growth Douglas-fir. *Plant Cell Environ.* 1:131-140.
- Waring, R.H., P.E. Schroeder and R. Oren. 1982. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Can. J. For. Sci.* 12:556-560.
- White, J. 1979. The plant as a metapopulation. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 10:109-145.
- Whitehead, D. 1978. The estimation of foliage area from sapwood basal area in Scots pine. *Forestry* 51:137-149.
- Whitehead, D., W.R.N. Edwards and P.G. Harvis. 1984. Conducting sapwood area, foliage area, and permeability in mature trees of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. *Can. J. For. Res.* 940-947.
- Whittaker, R.H. and Woodwell G.M. 1968. Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven Forest, New York. *J. Ecol.* 56:1-25.
- Wormald, T.J. 1975. *Pinus patula*. Tropical Forestry Papers No. 7. Unit of Tropical Silviculture. Department of Forestry. Oxford. England. 172 p.
- Zar, J.H. 1968. Calculation and miscalculation of the allometric equation as a model in biological data. *BioScience* 18(12):1118-1120.
- Zhang, J., J. D. Marshall and L. Fins. 1996. Correlated population differences in dry matter accumulation, allocation, and water-use efficiency in three sympatric conifer species. *Forest Science* 42(2)242-249.

## **6. ANEXOS**



