



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO FORESTAL

**Almacenamiento de carbono en bosques manejados
de *Pinus patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán,
Hidalgo.**

CONSUELO MARISEL FIGUEROA NAVARRO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2010

La presente tesis titulada: "**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN BOSQUES MANEJADOS DE *Pinus patula*: EN EL EJIDO LA MOJONERA, ZACUALTIPÁN, HIDALGO**" realizada por **Consuelo Marisel Figueroa Navarro**, bajo la dirección del **Consejo Particular** indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
FORESTAL**

CONSEJO PARTICULAR

Consejero:



Dr. Alejandro Velázquez Martínez

Asesor:



Dr. Gregorio Ángeles Pérez

Asesor:



Dr. Jorge Etchevers Barra

Asesor:



Dr. Miguel Acosta Mireles

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Enero de 2010.

El presente trabajo se llevó a cabo bajo el financiamiento del Fondo Sectorial CONAFOR-CONACYT de México, correspondiente al proyecto de investigación 10825/A-1 "Potencial de captura y almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo".

Gracias

Al Colegio de Posgraduados

Al Dr. Alejandro Velázquez Martínez, Dr. Gregorio Ángeles Pérez por su acertada dirección de este trabajo y además por su infinita paciencia.

Al Dr. Jorge Etchevers y al Dr. Miguel Acosta por sus valiosas aportaciones a este trabajo y también por ser excelentes maestros.

Al Dr. Benjamín Figueroa Sandoval por su gran apoyo y colaboración.

Al Dr. Héctor De Los Santos por su apoyo en la realización de los modelos.

Al Dr. Aurelio Baez, M.C. Juliana Padilla por su ayuda en el análisis de las muestras.

Al Ejido La Mojonera por darme la oportunidad de conocer y trabajar en sus hermosos bosques.

A todos los que colaboraron de una u otra manera en este proyecto, trataré de nombrarlos pero si olvido a alguien de todos modos MIL GRACIASiii ... M.C. Valetín Reyes Hernández, M.C. Adalberto González, M.C. Virginia Avilés, M.C. Joaquín Rincón, Ing. Enrique Romero, M.C. Roger Chi, Biol. César Anacleto, Biol. Odette Cadena, Lic. Karina Figueroa, Dra. Katia Figueroa, Sra. Yecenia y sus hijas Monse y Ana, Griselda.

A mi tío, muchas gracias por tu ayuda y tu paciencia.

A mi familia: mamá, papá, Kary, Marissa, Sr. Peña, Gerardo y Víctor

Al compañero en la aventura que fue nuestra vida juntos.

DEDICATORIAS

A Lía

A Ian

**Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el
Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo
Figueroa Navarro Consuelo Marisel, M.C.
Colegio de Postgraduados**

RESUMEN

La cantidad de biomasa se puede emplear para comparar la estructura y atributos funcionales de los ecosistemas forestales en condiciones climáticas similares. Con el objetivo de estimar la cantidad de biomasa y carbono (C) contenidos en rodales manejados de *Pinus patula*, se realizó este estudio en La Mojonera, Hidalgo. Este Ejido cuenta con programa de manejo en donde se aplica el método de regeneración de Árboles padres. El área está dividida en rodales señalados con la anualidad en la que se aplicó la corta. Para estimar la biomasa se ajustaron ecuaciones simultáneas para los componentes estructurales (fuste, ramas, follaje, corteza) a partir de la cosecha y pesaje de 18 individuos. Las ecuaciones obtenidas fueron: biomasa total, $B_t = 5338.610 + 18.634 \text{ DAP}^2 \text{ Ht}$; biomasa de ramas, $B_R = 0.095 B_t$; biomasa de fuste $B_{Ft} = 0.777 B_t$; biomasa de corteza $B_C = 0.115 B_t$; donde DAP es el diámetro normal y Ht es la altura total. Para la biomasa del follaje la ecuación ajustada fue $B_F = 29440.890 \exp^{-26.519/\text{DAP}}$. Se colectaron muestras por componente estructural para determinar la concentración de carbono. Para especies distintas a *Pinus patula* se empleó información sobre concentración de carbono reportadas por Figueroa *et al.* (2005). La cantidad de biomasa y carbono del bosque manejado se obtuvo aplicando las ecuaciones generadas y mediante datos de inventario. La cantidad de carbono almacenado se incrementó con el aumento de la edad del rodal. El rodal de 25 años de edad presentó una acumulación de carbono similar al contenido de un área que aún no ha sido intervenida ($86.40 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y $92.44 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectivamente). Por tanto, es posible señalar que los bosques manejados pueden funcionar eficientemente como fijadores y sumideros de carbono; sin embargo, aún es necesario determinar el balance neto.

Palabras clave: análisis de regresión, biomasa, bosque manejado, captura de carbono, ecuaciones alométricas, *Pinus patula*.

**Carbon storage in *Pinus patula* managed forest at the Ejido La Mojonera,
Zacualtipán, Hidalgo
Figueroa Navarro Consuelo Marisel, M. C.
Colegio de Postgraduados**

ABSTRACT

The forest biomass may be used to compare both structure and functional attributes of forest ecosystems over similar climatic conditions. This study was conducted to estimate the biomass and carbon content in managed stands of *Pinus patula* (red pine). The study area is located at La Mojonera, Hidalgo, Mexico. This Ejido has a forest management program under the Seed Tree Method with natural regeneration. The cutting areas are identified by the harvest year. To estimate biomass regression equations were fitted for each structural tree component (bole, branches, foliage, and bark) from 18 trees. The obtained equations were: Total Biomass, $B_t = 5338.610 + 18.634 \text{ DAP}^2 \text{ Ht}$; Branch Biomass, $BR = 0.095 B_t$; Bole Biomass, $B_{Ft} = 0.777 B_t$; and Bark Biomass, $BC = 0.115 B_t$; where DAP = Diameter at Breast Height, and Ht= Total Height. The fitted equation for foliage biomass was, $BF = 29440.890 \exp^{-26.519/\text{DAP}}$. To estimate carbon concentration, samples for each structural tree component were collected. Information about carbon concentration for other species, different to red pine, was obtained from Figueroa *et al.* (2005). Through a forest inventory and using the regression equations, biomass and carbon content of managed forest was estimated. Biomass and carbon storage increased with stand age. The 1982 stand (the oldest stand after harvesting) had a similar carbon content than the stand without cutting ($86.40 \text{ Mg C ha}^{-1}$ and $92.4 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectively). It is possible to establish that these managed forests can efficiently fix CO_2 from the atmosphere and might be effective carbon sinks. However, it is necessary to determine the net carbon balance in an ecosystem basis.

Keywords: allometric equations, biomass, carbon capture, managed forest, *Pinus patula*, regression analysis.

CONTENIDO

	Página
Resumen	III
Abstract	IV
Índice de Cuadros	VI
Índice de Figuras	VII
1. Introducción	1
2. Revisión de literatura	5
2.1 El carbono en los ecosistemas forestales	5
2.2 Estimación de biomasa	7
2.3 Métodos de estimación de biomasa	8
2.4 Alometría	11
3. Objetivos	16
3.1 Objetivo general	16
3.1.1 Objetivos específicos	16
3.2 Hipótesis	16
4. Materiales y Métodos	17
4.1 Área de estudio	17
4.2 Estimación de biomasa	19
4.3 Inventario	22
4.4 Estimación de la concentración de carbono	26
4.5 Análisis de regresión	28
5. Resultados	30
5.1 Estimación de biomasa en árboles individuales de <i>Pinus patula</i>	30
5.2 Estimación de carbono en árboles individuales de <i>Pinus patula</i>	40
5.3 Estimación de biomasa en las áreas de corta	44
5.4 Estimación de carbono en las áreas de corta	51
6. Discusión General	56
6.1 Biomasa	56
6.2 Carbono	60
7. Literatura citada	61

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Características dasométricas de los árboles analizados destructivamente provenientes de rodales manejados de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	20
2	Superficie por área de corta del Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	24
3	Ecuaciones alométricas de especies de bosque mesófilo de montaña	26
4	Concentración de carbono en especies de bosque mesófilo de montaña	27
5	Concentración media de carbono por componente en <i>Pinus patula</i>	27
6	Ecuaciones de regresión ajustadas por componente en árboles de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	28
7	Biomasa por componente y por árbol de <i>Pinus patula</i> de La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	31
8	Parámetros y estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para biomasa de árboles individuales de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	32
9	Concentración de carbono por componente en los árboles de <i>Pinus patula</i> del Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	41
10	Contenido de carbono por componente en los árboles de <i>Pinus patula</i> del Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	42
11	Composición de especies de bosques manejados de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo Composición de especies de bosques manejados de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	45
12	Biomasa de partes estructurales de <i>Pinus patula</i> y biomasa total de especies asociadas por área de corta, en bosques manejados de La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	47
13	Cantidad de biomasa y carbono almacenado en bosques manejados de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	48
14	Carbono por componente de <i>Pinus patula</i> y otras especies por área de corta	52

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización del área de estudio y las áreas de corta	18
2	Secciones en las que se dividieron los árboles	21
3	Localización de las áreas de corta dentro del Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	23
4	Representación esquemática de los sitios de muestreo	25
5	Relación entre biomasa total y el diámetro normal en <i>Pinus patula</i> en Zacualtipán, Hidalgo (Bt = Biomasa Total; DAP = Diámetro Normal; Ht = Altura Total)	33
6	Relación de biomasa de follaje y el diámetro normal en <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. (Bf = Biomasa de Follaje; DAP = Diámetro Normal).	34
7	Relación de biomasa del fuste y el diámetro normal en <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. (Btr = Biomasa de Fuste o Fuste; Bt = Biomasa Total).	35
8	Relación de biomasa de la corteza y el diámetro normal en <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. (Bc = Biomasa de Corteza; Bt = Biomasa Total)	36
9	Relación de biomasa de ramas y el diámetro normal en <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. (Br = Biomasa de Ramas; Bt = Biomasa Total)	37
10	Proporción de biomasa en A) Follaje, B) Ramas, C) Fuste y D) Corteza, respecto al diámetro normal en árboles de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	39
11	Relación entre el contenido de carbono y el diámetro normal en árboles de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	43
12	Relación de la biomasa con la edad del rodal en bosques manejados de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo	50
13	Relación de carbono total y edad del arbolado en bosques manejados de <i>Pinus patula</i> en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.	53

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global y su impacto sobre la vida del planeta, es un tema presente en la agenda de la mayor parte de los gobiernos (Gay y Martínez, 1995; Fundación Solar, 2000). El papel que el desarrollo tecnológico de la humanidad desempeña en el "efecto invernadero", así como la manera en la que el problema puede ser mitigado, han sido abordados en las agendas ambientales mundiales. La discusión se ha enfocado en definir qué mecanismos pueden ser adoptados para reducir el impacto negativo de este fenómeno (Fundación Solar, 2000). Uno de estos mecanismos es fomentar la captura del CO₂ atmosférico por los ecosistemas forestales, que de acuerdo con Gay y Martínez (1995) es el principal gas causante de este fenómeno.

En México, según reporta INE (2006) las emisiones de CO₂ equivalente para el periodo 1993 – 2002 son: 389,497 Gg aportados por el sector energía (61%); 89,854 Gg por la categoría uso del suelo, cambio en el uso de suelo y silvicultura (USCUSS) (14%), 65,584 Gg por la categoría desechos (10%), 52,102 Gg por la categoría procesos industriales (8%) y 46,146 Gg por la categoría agricultura (7%).

Con el propósito de contribuir a estabilizar las emisiones de CO₂, México ha elaborado el Programa Especial de Cambio Climático (PECC; Poder Ejecutivo Federal, 2009), el cual propone tanto estrategias de mitigación como de adaptación que contribuyan a aminorar el impacto que causa y seguirá causando en el futuro inmediato el aumento en la atmósfera de los gases de efecto invernadero. El bosque desempeña en esta estrategia un papel fundamental en lo concerniente a la mitigación.

El CO₂ atmosférico entra en la dinámica del ciclo terrestre del carbono con la producción primaria, resultado de la fotosíntesis, en la cual las plantas fijan del aire carbono inorgánico y lo convierten en azúcares y almidones que son la fuente de

energía necesaria para el crecimiento vegetal (Post *et al.*, 1990). De esta manera se integra a los ecosistemas terrestres. Posteriormente, a través de la respiración durante el proceso de descomposición y por incendios forestales, este carbono se libera a la atmósfera o bien se puede desplazar al océano donde entra en los procesos de intercambio gaseoso. En este punto el ciclo se reinicia o el carbono se acumula en los reservorios (Sedjo, 1990).

El ciclo del carbono en los ecosistemas terrestres se encuentra determinado por la producción primaria neta (NPP por sus siglas en inglés), la producción primaria bruta (GPP por sus siglas en inglés), la tasa de respiración y los patrones de crecimiento (Waring y Schlesinger, 1985; Perry, 1994; Schulze, 2000; Schimel *et al.*, 2000).

Los bosques a nivel global, fijan y almacenan grandes cantidades de carbono y pueden llegar a controlar hasta el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y la superficie terrestre (Apps *et al.*, 1993; Ordóñez *et al.*, 2001).

Los árboles en particular, almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida, aun cuando también pudieran representar una fuente neta de emisión de CO₂ (Dixon *et al.*, 1994; Maser, 2002). A este respecto, Malhi *et al.* (1999) reportan que los bosques fijan el 25% del CO₂ emitido a la atmósfera por combustibles fósiles; sin embargo, Stuart y Moura Costa (1998) mencionan que la deforestación contribuye con el 20% de las emisiones anuales de este gas; mientras que INE (2006) reporta que el uso del suelo, el cambio en el uso del suelo y la silvicultura (USCUSS) en México, durante el período 1993 a 2002 representaron el 14% (89, 854 Gg CO₂ equivalente) de la emisión neta de CO₂, por lo que su rol como sumidero de carbono requiere de mayor investigación.

La estimación de las reservas de carbono en un ecosistema puede realizarse conociendo la biomasa arbórea aérea y subterránea, del suelo, mantillo, capa de fermentación, hierbas y arbustos. La primera de éstas constituye un elemento

importante en el manejo sustentable de los ecosistemas (Zianis y Mencuccini, 2003). Con base en los flujos de NPP, la tasa de crecimiento y respiración, se ha determinado que la biosfera terrestre contiene aproximadamente 560 Pg C en biomasa y mantillo, y 1100 a 1400 Pg C en el sistema radical y en el suelo (Sampson *et al.*, 1993). En bosques boreales el cálculo es de 65 Pg C en biomasa viviente, 270 Pg C en el suelo y el detritus, y 3 Pg C almacenadas en productos maderables, mientras que en bosques templados los valores reportados son de 21 Pg C en biomasa aérea y de 70 a 100 Pg C en las primeras capas de suelo. Por otro lado, se estima que los bosques tropicales contienen 159 Pg C en la vegetación y 216 Pg C en el suelo y mantillo; y en los pastizales, sabanas y desiertos se han calculado 417 Pg C en el suelo (Sampson *et al.*, 1993).

La NPP, la GPP y los flujos arriba mencionados son afectados por las diferentes vías de la fotosíntesis (C_3 , C_4 y CAM), por la respiración, mortalidad y procesos de herbivoría, factores que según Schroeder *et al.* (1997) y Colter *et al.* (2003) también determinan la cantidad de biomasa presente en un bosque.

Los cambios en la acumulación de biomasa y, en consecuencia, en el contenido de carbono, se pueden dar como resultado de actividades humanas, procesos de sucesión natural, calidad de sitio, exposición, condiciones climáticas y degradación; por lo que la biomasa se puede emplear para comparar la estructura y atributos funcionales de los ecosistemas forestales en un rango de condiciones climáticas similares (Schroeder *et al.*, 1997). Su distribución en los diferentes componentes de un árbol permite conocer los reservorios de carbono y cómo es que algunos factores pueden modificarlos (Colter *et al.*, 2003; Van Lear *et al.*, 1984; Fournier *et al.*, 2003). Un enfoque que ha mostrado utilidad en la estimación del almacenamiento de carbono, es el de cronosecuencias, ya que permite cuantificar su flujo y almacenamiento asociados con el desarrollo del bosque y analizar sus implicaciones con la etapa de desarrollo al momento del estudio (Law *et al.*, 2003).

Las reservas de carbono almacenadas existentes en un ecosistema forestal constituyen un valor económico diferente al de su uso tradicional (madera, carbón, celulosa, etc.), al permitir el acceso a un mercado de bonos verdes (compra y venta de carbono incremental capturado en las partes estructurales de los árboles y los productos forestales) dentro de lo que el Protocolo de Kyoto denominó Mecanismo de Desarrollo Limpio (IPCC, 2000).

En México son pocos los proyectos diseñados para medir los reservorios de carbono, entre los cuales se encuentran los trabajos realizados en el sureste de México (Jong, 2001; Jong *et al.*, 1999), en la Sierra Norte de Oaxaca (Etchevers *et al.*, 2001; Acosta *et al.*, 2001; Acosta *et al.*, 2002), en el bosque tropical estacionalmente seco (Gómez Díaz, 2008) y en el centro occidente (Ordóñez *et al.*, 2001); sin embargo, se desconoce el flujo de carbono asociado con la etapa de desarrollo de los rodales, que influye de manera directa en la capacidad de almacenamiento de carbono del ecosistema.

El presente trabajo se llevó a cabo en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo, con el objetivo general de estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* con un enfoque de cronosecuencias.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El carbono en los ecosistemas forestales

A los ecosistemas forestales se les considera como sumideros de carbono a nivel global (Dixon *et al.*, 1994). Sin embargo, esto aún se considera incierto, ya que la relación entre fijación, almacenaje y emisión de CO₂ no está del todo explicada en virtud de que son múltiples los factores que la modifican.

Los componentes primarios de la dinámica del carbono en los bosques son la biomasa, producción y descomposición del mantillo en el piso forestal, y la materia orgánica del suelo mineral (Yarie y Billings, 2002). Los cambios en la dinámica de estos componentes es una función del clima, especies de plantas y la estructura de las capas de suelo orgánico y mineral (Houghton *et al.*, 2001). La relación entre producción y descomposición determina si un ecosistema es fuente o sumidero en relación al carbono atmosférico, aunque depende de las condiciones climáticas prevalecientes (Yarie y Billings, 2002). Actualmente existe la creencia de que se requiere un sumidero de carbono de 1.6 Pg/año para que pueda existir un balance en el ciclo global del carbono (Houghton *et al.*, 1998).

Se ha pensado que los bosques boreales podrían ser este sumidero, pero autores como Malhi *et al.* (1999) sugieren que otros ecosistemas como los bosques tropicales pueden secuestrar 0.78 Gt C/yr, bosques templados 0.18 Gt C/yr y los bosques boreales 0.63 Gt C/yr. Price *et al.* (1997) sugieren que el incremento de las actividades relacionadas con la reducción de incendios forestales y el manejo de las actividades de conservación de los bosques podría resultar en un incremento en la captura de carbono.

Las prácticas de manejo intensivo en bosques naturales y recientemente en las plantaciones comerciales, es una práctica usual de la industria maderera a nivel mundial (Laiho *et al.*, 2003). Existen estudios en los que se ha reportado el efecto de algunas de ellas sobre el crecimiento y la absorción de nutrientes, pero los relacionados con la dinámica del carbono recientemente están adquiriendo importancia al estar relacionados con el cambio climático (Houghton *et al.*, 1998).

Los cambios en el contenido del carbono aéreo de los bosques pueden ser evaluados a través de inventarios maderables; sin embargo, la evaluación de los cambios en los almacenes en el suelo después de una corta requiere de mayor inversión (Laiho *et al.*, 2003).

La relación que existe entre la fijación de carbono y la producción de biomasa son procesos importantes en el ciclo de este elemento en los ecosistemas forestales (Hiura, 2005). Existen varios métodos para estimar biomasa. Entre los más usados se encuentran los inventarios de campo para estimaciones de baja escala y el uso de sensores remotos para cálculos a gran escala (Hiura, 2005). Lefsky *et al.* (2002) señalan que estas técnicas también pueden emplearse para el manejo de información de áreas pequeñas o inclusive durante el desarrollo de rodales. Por lo que Fournier *et al.* (2003) y Hiura (2005) consideran que la biomasa forestal es factible de calcularse con la combinación de varias técnicas y métodos.

La modelación es un componente integral usado para estimar el desarrollo de los ecosistemas, el balance del carbono y predecir su almacenamiento en un periodo de tiempo. Los modelos de computadora pueden crear estimaciones de los efectos del cambio climático en diferentes clases de edades (Yarie y Billings, 2002).

2.2. Estimación de biomasa

La estimación de la biomasa forestal es una variable que se podría incluir dentro de la instrumentación de los planes de manejo, para el diseño de prácticas silvícolas, así como para el desarrollo de proyectos de investigación en los que se resalta la productividad del ecosistema, el flujo de energía, la acumulación y la dinámica de nutrientes (Parresol, 1999). Esta, representa la cantidad de material acumulado en las plantas, en un momento dado, por unidad de área dada en la parte aérea y subterránea del ecosistema (Garcidueñas, 1987; Castellanos, 1993).

La cantidad de biomasa en un bosque es el resultado de la diferencia entre la productividad primaria bruta que se obtiene a través de la fotosíntesis y la respiración, la mortalidad y los procesos de herbivoría (Schroeder *et al.*, 1997; Colter *et al.*, 2003). Los cambios en la acumulación de biomasa se pueden dar como resultado de las actividades humanas, los procesos de sucesión natural, la calidad de sitio, la exposición, las condiciones climáticas y la degradación; por lo que la estimación de la biomasa se puede emplear para comparar la estructura y atributos funcionales de los ecosistemas forestales en un intervalo similar de condiciones climáticas (Schroeder *et al.*, 1997).

La distribución de la biomasa en los componentes de un árbol permite conocer cómo se comporta la acumulación de nutrientes, los reservorios de carbono, la producción primaria neta y cómo es que algunos factores como la luz, el agua y la densidad influyen en el crecimiento (Van Lear *et al.*, 1984; Colter *et al.*, 2003; Fournier *et al.*; 2003). De igual manera permite analizar al individuo como un todo o en fracciones específicas presentes en cada componente (Hairiah *et al.*, 2001).

En especies arbóreas, sobre todo en especies caducifolias, la biomasa varía en cada componente como una respuesta a diversos factores como la edad, el sitio, la especie, las condiciones climáticas, el tratamiento silvícola, la pendiente, la altura

sobre el nivel del mar, la exposición, la densidad del rodal, la variación genética y el año en que se realiza el muestreo (Garcidueñas, *et al.*, 1988; Bown, 1992; Zianis y Mencuccini, 2003). Por otro lado, el aumento en la densidad de un rodal se refleja con el incremento en el uso de los recursos del sitio como el agua, la luz y los nutrientes, teniendo como resultado una competencia dentro del árbol en la distribución de la biomasa aérea y subterránea (Colter *et al.*, 2003). Oliver y Larson (1990) mencionan que en condiciones normales de densidad, la distribución de fotosintetizados se destina al crecimiento del follaje y las raíces finas, y tiene prioridad sobre el crecimiento en diámetro; mientras que en condiciones de densidad alta, la prioridad mas alta en la distribución de los fotosintetizados la tienen las raíces finas para proveer al árbol de agua y nutrientes en cantidades suficientes (Waring y Schlesinger, 1985).

La cantidad de la biomasa en los bosques está relacionada con el contenido de nutrientes y por consiguiente con el papel que éstos juegan como sumideros de carbono. La biomasa forestal se incrementa con la edad del arbolado y tiende a ser constante cuando estos alcanzan la madurez debido a la declinación natural en la producción primaria neta (PPN) (Whitmore, 1984). Sin embargo, algunos estudios han reportado un continuo incremento en biomasa en bosques maduros en la región Neotropical (Phillips *et al.*, 1998), por lo que se considera que la biomasa en éstas zonas ha sido subestimada y que el papel que juegan estos bosques como sumideros de carbono aún puede estar sujeto a discusión (Carey *et al.*, 2001; Hoshizaki *et al.*, 2004).

2.3. Métodos de estimación de biomasa

Los principales componentes en donde los árboles almacenan la biomasa son: a) fuste o tallo principal, b) ramas vivas, c) ramas muertas, d) follaje, e) corteza, f) estructuras reproductivas, y g) raíces, todas expresadas en términos de peso seco (Satoo y Medgwick, 1982; Garcidueñas, 1987; Castellanos *et al.*, 1996).

Para la determinación de la biomasa se puede utilizar métodos destructivos y no destructivos. Como su nombre lo indica, los métodos destructivos consisten en la extracción física de los árboles, proceso que consume gran cantidad de tiempo y recursos (Bown, 1992). Por otro lado, los métodos no destructivos, que no implican el derribo del árbol, son rápidos, por lo que se puede medir un mayor número de árboles, reduciendo así el error de muestreo, en comparación al muestreo destructivo (Hairiah *et al.*, 2001).

Los métodos destructivos para la determinación de la biomasa a nivel individuo, consisten en cosechar y pesar todo el árbol en básculas portátiles. Con los datos que se obtienen se desarrollan ecuaciones de regresión que permitan relacionar la biomasa con variables de fácil acceso como lo es el diámetro y la altura (Castellanos, 1993).

Otra de las técnicas es conocida como "del árbol medio" tiene algunas ventajas: es rápido, más preciso y no requiere de procesos de cómputo muy elaborados. Se calcula la biomasa de un individuo promedio por categoría y se hace la inferencia. Es la técnica más apropiada para usarse en rodales homogéneos y coetáneos. La precisión de esta técnica decrece en rodales mezclados e incoetáneos. Las plantaciones forestales con árboles espaciados uniformemente, de la misma edad y del mismo tamaño son claros candidatos en los que se puede aplicar esta técnica. La estimación de la biomasa del rodal usando esta técnica puede ser mejorada con la estimación del área basal proporcional y un muestreo estratificado (Parresol, 1999).

Cuando el número de individuos es grande, debe considerarse el muestreo estratificado. En los diseños estratificados se recomienda que aproximadamente cinco árboles de cada clase diamétrica sean muestreados. La biomasa de cada clase diamétrica se calcula por separado y después se hace la inferencia al rodal. Debido a que la intensidad del muestreo es baja se requiere el uso de ecuaciones alométricas.

La principal desventaja de esta técnica es que no estima el error, lo que trae como consecuencia dos problemas: primero sin réplica, no hay forma de detectar donde hay una sobre- o sub-estimación de los datos; segundo, no hay un método estadístico que compare muestras secuenciales. Otro inconveniente es que este método se ha usado en coníferas, por lo que su aplicación en latifoliadas requerirá de ajustes (Peng, 2000). La otra alternativa es que se genere una ecuación alométrica para cada especie y con este se reduce mucho la posibilidad del error porque el ajuste mediante un método de regresión se hace por separado para cada especie.

Para calcular la biomasa de un rodal, el método más empleado es la realización de inventarios; en los cuales se cosechan cierto número de árboles de dimensiones representativas de toda la masa, posteriormente los datos generados se extrapolan por medio de alometría (de Vries, 1986; Brown *et al.*, 1999; Castellanos, 1993).

Los inventarios toman un instante en el tiempo para proveer información sobre volúmenes maderables y estadísticas relacionadas por lo que Bebi *et al.* (2001) consideran un inconveniente que no puedan ser usados para áreas muy extensas y que solo permitan calcular la producción maderable de ese momento.

Otra forma que actualmente está adquiriendo importancia es el uso de sistemas de información geográfica y fotogrametría, empleando técnicas como maximización-expectación, algoritmo EM y sus extensiones, imputación múltiple, cadena de Markow, entre otras (Parresol, 1999). Sin embargo autores como Wu y Strahler (1994), Hall *et al.*, (2001) y Brown *et al.* (1999) señalan que se tienen limitantes por la heterogeneidad de los bosques, pero que cuando las masas son en su mayoría monocultivos o muy homogéneas como en las plantaciones forestales, o con una baja diversidad de especies se vuelven herramientas valiosas que ahorran tiempo y costos.

Los valores de biomasa más precisos se obtienen a través del derribo y pesado de los árboles usando las técnicas arriba descritas. Sin embargo, los análisis destructivos de la biomasa forestal consumen una gran cantidad de recursos y tiempo, además de que surgen problemas para extrapolar los datos a grandes áreas (Zianis y Mencuccini, 2003).

2.4. Alometría

La alometría es la técnica usada para relacionar elementos de un organismo como resultado del crecimiento (Baskerville 1972; Garcidueñas, 1987). Las variables más empleadas son altura, diámetro normal con y sin corteza, área de conducción (albura), longitud de copa, edad, incremento en los anillos de crecimiento, relacionándose para obtener valores de volumen, biomasa aérea, biomasa radical, área foliar, entre otras (Grier *et al.*, 1984; Garcidueñas, 1987).

Para el empleo de este procedimiento se separa el árbol en sus diferentes componentes, se pesan para obtener el peso fresco y se colocan en estufas de secado hasta obtener el peso seco. Esta técnica está basada en el uso de ecuaciones de regresión para relacionar variables empleando la función alométrica transformada de biomasa expresada como peso seco (Baskerville, 1972):

$$\mathbf{Ln Y = Ln \beta + \alpha (ln x + ln \epsilon) \dots\dots\dots(1)}$$

donde:

Ln - logaritmo natural o de base 10

Y - Peso seco (biomasa)

x - variable independiente (diámetro normal)

ϵ - error aleatorio

α y β - coeficientes de regresión

Parresol (1999) señala que además de esta ecuación, también se puede emplear alguna de las siguientes:

No lineal (error aditivo)..... $Y = \beta_0 (x^{\beta_1} x^{\beta_2} \dots x^{\beta_j}) + \epsilon \dots\dots\dots(2)$

No lineal..... $Y = \beta_0 (x^{\beta_1} x^{\beta_2} \dots x^{\beta_j}) \epsilon \dots\dots\dots(3)$

Donde:

Y - biomasa total o por componente

x - variable independiente

β_i (i=1 hasta j) - coeficientes de regresión

ϵ - error

Estas variables generan ecuaciones de regresión no lineales que requieren el uso de procedimientos iterativos para la estimación de parámetros. Para facilitar el manejo de los datos, se recurre a la transformación logarítmica de estas ecuaciones, sin embargo, existe evidencia que estas correcciones sobreestiman el valor real de la variable dependiente (Hepp y Brister, 1982; Parresol, 1999).

La ecuación (1) transformada logarítmicamente es de la forma:

Exponencialmente $Y = \alpha X^\beta \dots\dots\dots(4)$

Si $Y = \ln(Y)$, $\beta_0 = \ln \alpha$, $\beta_1 = \beta$ y $X = \ln(X)$

Sustituyendo $Y = \beta_0 + \beta_1 X$

Donde Y es la biomasa o variable dependiente, X es la variable independiente o diámetro, α y β son los parámetros a estimar o coeficientes de regresión (Garcidueñas *et al.* 1988; Acosta *et al.*, 2001).

La mejor ecuación ajustada es obtenida de la forma $y = ax^b$, donde "y" es biomasa y "x" es el diámetro normal del árbol. Esta ecuación ha sido utilizada exitosamente por diversos autores que señalan que permite proveer un simple pero confiable método para estimar la biomasa de los diferentes componentes de árboles de especies de pino (Canadell *et al.*, 1988; Santa Regina *et al.*, 1997; Acosta *et al.* 2001, Porté *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2003).

Pastor *et al.* (1984) desarrollaron ecuaciones alométricas generalizadas para diversas especies de Norteamérica y verificando con datos de campo encontraron que las ecuaciones generadas predicen la biomasa en un 85% sin usar métodos destructivos. Asimismo, Porté *et al.* (2002) sugieren que los parámetros de las ecuaciones alométricas dependen de la densidad del rodal y de la relación entre la altura y el diámetro de las especies.

Las relaciones alométricas han tenido su mayor uso en ecosistemas de clima templado-frío con la finalidad principal de obtener biomasa aérea total, área foliar, área de conducción y traslocación de agua y nutrientes en especies con valor económico (*Pseudotsuga menziesii*, *Pinus ponderosa*, *Pinus elliotii*, *Pinus palustris*, *Abies amabilis*, entre otras) (Espinosa y Perry, 1987).

Los cálculos de biomasa que se obtienen de ecuaciones alométricas son una extrapolación de datos obtenidos de cortar y pesar árboles representativos en campo, por lo que se debe resaltar la importancia de la correcta precisión en la estimación de la biomasa individual, ya que esta sirve de base en un momento dado para obtener el almacenamiento de carbono del rodal.

Los modelos de crecimiento describen la dinámica forestal (p. e. crecimiento, mortalidad, reproducción y cambios asociados con el rodal) en un periodo y han sido ampliamente usados en el manejo forestal debido a que los datos se obtienen fácilmente de un inventario y exploran alternativas de manejo y actividades silviculturales (Vanclay, 1995; Peng, 2000).

La alometría ha servido de base para generar modelos mecanicistas de crecimiento forestal (Causton, 1985) que han resultado útiles para predecir la captura de carbono por los árboles (Acosta *et al.*, 2002). Lopera y Gutierrez (2001) calcularon el efecto de diferentes tipos de manejo en el comportamiento de la acumulación de carbono en una plantación de *Pinus patula* en Colombia, a través de la generación de ecuaciones de rendimiento corriente y futuro, encontrando que el carbono en el bosque a 30 años sería de 295.4 Mg C/ha y el incremento medio anual sería de 8.6 Mg C/ha. Asimismo, establecieron una metodología para cuantificar las existencias y flujos de carbono en plantaciones forestales de la misma especie, encontrando que el carbono en esta especie fluctuó entre 48.6 y 223 Mg C/ha dependiendo del tratamiento intermedio que se le aplicó a la plantación.

Por su parte, Acosta *et al.* (2001) determinaron biomasa y carbono a través de ecuaciones alométricas en especies del bosque mesófilo de montaña, *Alnus* sp., *Quercus* sp., *Clethra* sp., *Rapanea myricoides*, *Liquidambar macrophylla*, *Inga* sp., y otras, encontrando que los sistemas de vegetación natural contienen más biomasa y carbono (Bosque de Liquidambar 103 Mg C/ha⁻¹, Bosque de encino 52 Mg C/ha⁻¹ y Acahual de 10 años 33 Mg C/ha⁻¹) que los sistemas de vegetación inducida (Pradera 7.5 Mg C/ha⁻¹ y Acahual de 2 años 14 Mg C/ha⁻¹).

El *Pinus patula* ha sido una especie ampliamente estudiada no solamente para obtener biomasa, sino también para observar los efectos de las podas (Borgo, 2000; Domínguez *et al.*, 1999, Díaz *et al.*, 2006), evaluación de áreas de regeneración (Ortega *et al.*, 1993; Aguilar *et al.*, 1992; Rejero, 2001), probar el índice de densidad de rodales de Reineke (Brosovich, 1998), estimar la calidad de estación y su efecto en el crecimiento (Arteaga *et al.*, 1988), generar tablas de volumen (De los Santos *et al.*, 1993; Hernández *et al.*, 1994) y predecir el crecimiento (Zepeda y Mendoza, 1992; De los Santos *et al.*, 1993).

Castellanos (1993) generó modelos para estimar biomasa de *Pinus patula* en la región de Chignahuapan, Puebla; separando en sus principales componentes (follaje, fuste con corteza y sin corteza y ramas). Las ecuaciones predijeron con una buena confiabilidad la biomasa con una ligera subestimación en el follaje. Sin embargo, al tratar de utilizar estas ecuaciones en Zacualtipán, Hidalgo, se observó una sobrestimación de la biomasa por componente, por lo que fue necesario generar nuevas ecuaciones alométricas.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* con un enfoque de cronosecuencias.

3.1.1 Objetivos específicos

- Estimar la biomasa aérea de árboles de *Pinus patula* por componentes principales (fuste, ramas, follaje y corteza)
- Estimar la concentración de carbono por componente de árboles de *Pinus patula*
- Calcular el contenido de carbono por componente y por área de corta de los bosques manejados de *Pinus patula* de La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

3.2. Hipótesis

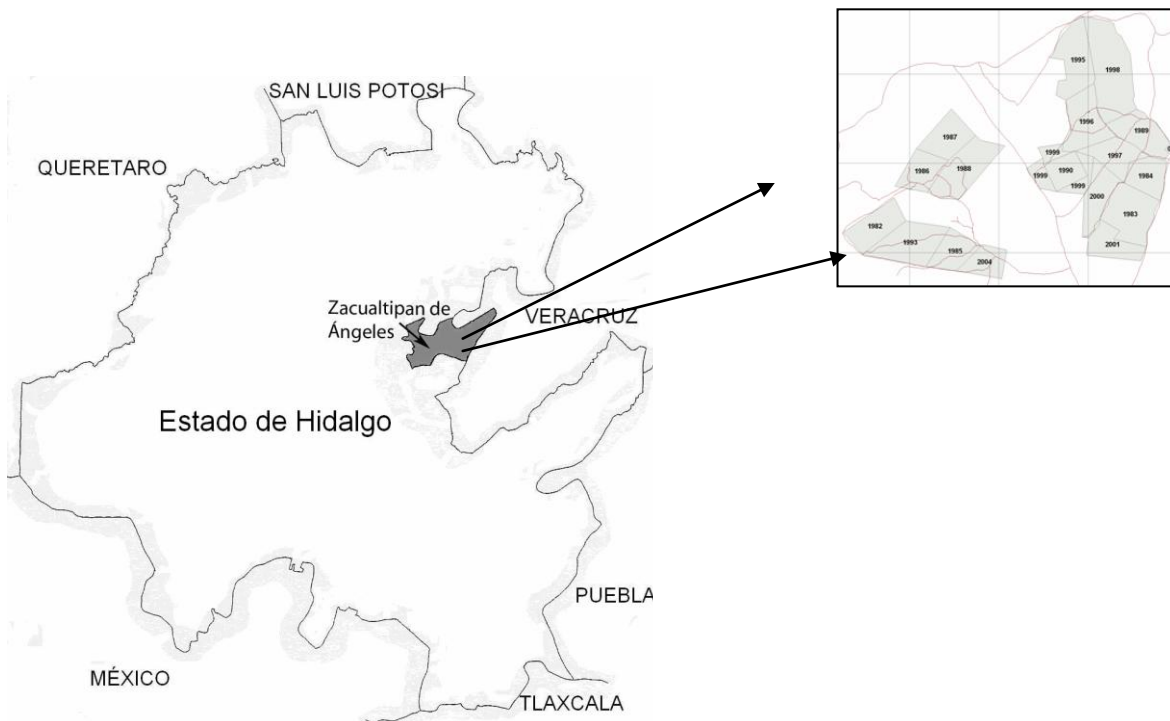
- La biomasa aérea de los árboles de *Pinus patula* en bosques manejados presenta un crecimiento lineal con respecto a la edad del arbolado.
- La concentración de carbono en los componentes de los árboles de *Pinus patula* varia con la edad del arbolado presentado un comportamiento creciente en relación a la edad del árbol.
- El contenido de carbono en los bosques manejados de Zacualtipán presenta un crecimiento lineal hasta alcanzar su punto máximo de almacenamiento en los 80 años.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el Ejido La Mojonera, localizado en el Municipio de Zacualtipán de Ángeles en el estado de Hidalgo. El municipio se encuentra localizado entre las coordenadas 20° 34' y 20° 45' de latitud norte, y 98° 25' y 98° 42' de longitud oeste (Figura 1). Limita al norte con el municipio de Tianguistengo y Veracruz, al este con el estado de Veracruz y al sur con los municipios de Mezquititlán y Meztitlán y con el estado de Veracruz (INEGI, 1996).

El Municipio tiene una extensión de 24,200 ha; de las cuales 986 están destinadas a la agricultura, 3,167 a pastos naturales, agostadero o enmotada, 6,924 están cubiertas por algún tipo de vegetación arbórea y arbustiva y 61.5 están dedicadas a uso no determinado, mientras que para uso urbano se han destinado 13,063 ha (INEGI, 1991).



Estado de Hidalgo

Figura 1. Localización del área de estudio.

La zona se localiza en la Provincia Fisiográfica "Sierra Madre Oriental" y sub-provincia localmente conocida como "Carso Huasteco" (Aguilar y Razo, 1995) que se caracteriza por una topografía accidentada con pequeñas mesetas.

El Ejido La Mojonera presenta una topografía ondulada, con una pendiente media del 12% y una exposición suroeste y zenital. Las rocas predominantes son las ígneas extrusivas de la Era Cenozoica (INEGI, 1996). La región corresponde a la Región Hidrológica del Río Pánuco, la cuenca del Río Moctezuma y la subcuenca del Río Calabozo (INEGI, 1996). Los suelos son, en general, profundos, con un alto contenido de materia orgánica, de tipo *Luvisol órtico - crómico* y *Cambisol eútrico* (Aguilar y Razo, 1995).

El clima es templado húmedo con lluvias la mayor parte del año y el porcentaje de precipitación invernal es mayor al 5%. La temperatura media anual es de 12.7 °C y la precipitación media anual es de 1901 mm (García, 1988).

La vegetación natural del área comercial del Ejido, corresponde a un bosque templado, donde se presenta la asociación vegetal *Pinus patula* – *Quercus* spp. con una extensión de 193 hectáreas (Aguilar y Razo, 1995). La presencia de humedad durante la mayor parte del año, propicia la proliferación de un gran número de especies arbóreas y arbustivas de poco valor comercial.

4.2. Estimación de biomasa

Para construir las ecuaciones de regresión para estimar la biomasa por componente estructural de los árboles (fuste, ramas, follaje, corteza) se realizó una selección de individuos, tratando de abarcar todas las categorías diamétricas de los árboles que se incluyen en el plan de manejo de la zona. Se seleccionaron, midieron y se les determinó la biomasa a 18 árboles (Cuadro 1).

Los árboles seleccionados fueron derribados y se midió su altura desde la base, hasta la punta de la copa, posteriormente se obtuvieron trozas de dimensiones comerciales como se muestra en la Figura 2. Las trozas se cortaron cada 1.27 m en los árboles pequeños, mientras que en los árboles más grandes, las trozas se dimensionaron a una longitud de 2.54 m; por lo que el número de trozas fue variable, dependiendo de la longitud del fuste principal. La copa se dividió entre tres partes iguales, por lo que la longitud de cada sección de copa estuvo determinada por el tamaño de la copa del árbol (Figura 2).

Cuadro 1. Características dasométricas de los árboles cosechados, provenientes de rodales manejados de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

NO. DE ÁRBOL	DIÁMETRO NORMAL (cm)	ALTURA (m)
1	2.6	2.60
2	3.8	3.56
3	5.0	4.14
4	7.1	5.64
5	9.3	7.51
6	11.7	12.85
7	13.2	13.61
8	15.8	17.10
9	17.8	16.33
10	18.6	18.59
11	20.5	20.91
12	25.4	19.44
13	30.8	20.71
14	39.3	32.20
15	40.1	30.40
16	47.2	30.80
17	55.4	33.50
18	56.9	31.10



Figura 2. Secciones en las que se dividieron los árboles.

Los árboles cosechados se separaron en sus componentes estructurales: fuste follaje, ramas vivas y ramas muertas por sección de la copa. Se colectó una rodaja de 5 cm de grosor por cada dos trozas del fuste, en el caso en que el número de trozas fuese impar se colectó una rodaja de la última troza no importando que provinieran de trozas consecutivas. Todas las trozas se etiquetaron consecutivamente con el número del árbol y sección de fuste correspondiente, para posteriormente pesarlas en una báscula con capacidad de 1000 kg y una precisión de 1 kg.

Para obtener el componente corteza, a las rodajas seleccionadas, se les separó la corteza y de igual manera se determinó el peso fresco. El follaje se separó de las ramas en cada una de las secciones de la copa, posteriormente se pesó en fresco y de ella se obtuvo una muestra alícuota, que a su vez se le determinó el peso fresco. También se registró el peso fresco de las ramas, obteniendo una muestra compuesta de follaje y una de ramas de cada sección de la copa. El mismo procedimiento se realizó para las ramas muertas, de tal manera que se obtuvo una muestra y se determinó su peso.

Las muestras del fuste principal (rodajas), follaje, corteza, ramas verdes y ramas muertas, se transportaron al laboratorio del Postgrado Forestal del Colegio de Postgraduados en donde se secaron en una estufa de circulación forzada a 70°C por 48 horas o hasta obtener el peso constante. Se registró el peso seco de cada una de las muestras por componente.

Utilizando el peso fresco obtenido en campo y el peso seco de las muestras, se determinó el contenido de humedad, el cual se aplicó para descontárselo al peso fresco de cada una de las secciones del fuste y de la copa, pesados en campo, de esta forma se determinó la biomasa por componente estructural de todo el árbol.

4.3. Inventario

El ejido tiene una superficie bajo manejo de 193 hectáreas, cuenta con un plan de manejo y como tratamiento silvícola emplea el método de repoblación de "Árboles padres", por lo que se encuentra dividida en áreas de corta señaladas con la anualidad en la que se ha aplicado el tratamiento silvícola (Figura 3). En el Cuadro 2 se presenta la superficie de cada rodal. Cabe señalar que las áreas marcadas con las anualidades 1999, 2000, 2001 y 2004, no se contabilizaron en el inventario por que la regeneración aún no se ha establecido satisfactoriamente y además era pequeña (< de 1 m de altura).

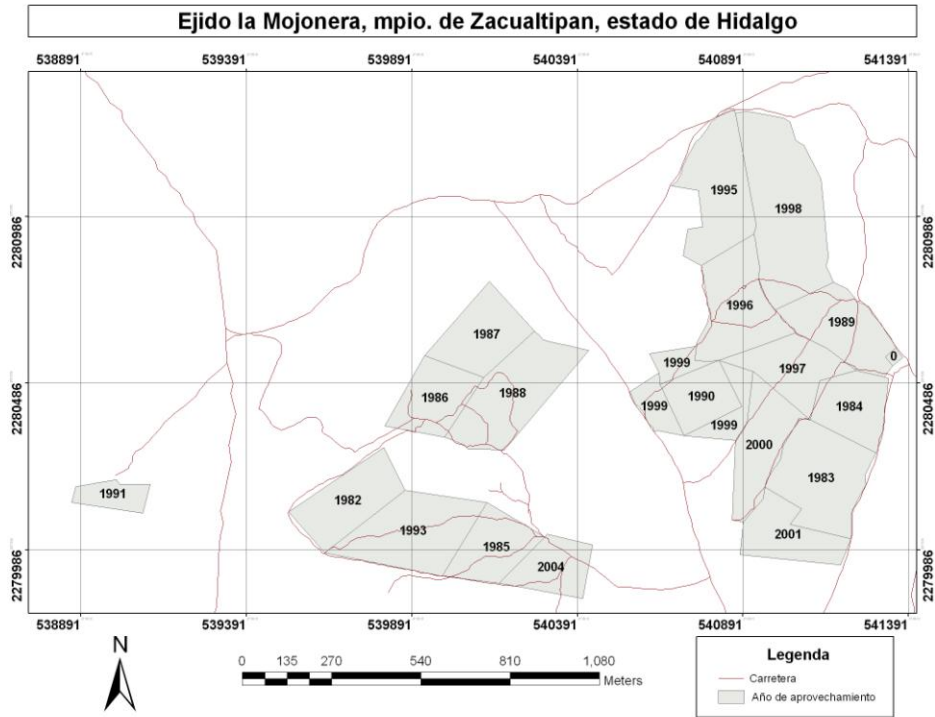


Figura 3. Localización de las áreas de corta dentro del ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

Cuadro 2. Superficie por área de corta del ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

Área de Corta	Superficie (ha)
Área Natural (AN)	78.45
1982	5.01
1983	7.24
1984	4.02
1985	3.95
1986	4.07
1987	4.72
1988	7.16
1989	5.37
1990	3.13
1991	1.64
1993	7.14
1995	6.77
1996	6.31
1997	4.37
1998	11.20
1999	4.23
2000	4.84
2001	4.14
2004	3.33
TOTAL	193.62

En cada área de corta se establecieron de manera aleatoria tres sitios cuadrados de muestreo de 400 m² (20 X 20 m) cada una. Cada sitio de muestreo se dividió en cuatro cuadrantes enumerados de acuerdo a las manecillas del reloj como se muestra en la Figura 4.

En cada cuadrante se marcaron las especies arbóreas con diámetro normal superior a 2 cm. Todos los individuos marcados fueron identificados y además del diámetro, se les midió la altura al fuste limpio y la altura total. De las especies que no fue posible identificar en campo se colectó una muestra botánica y su identificación se realizó en el herbario de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

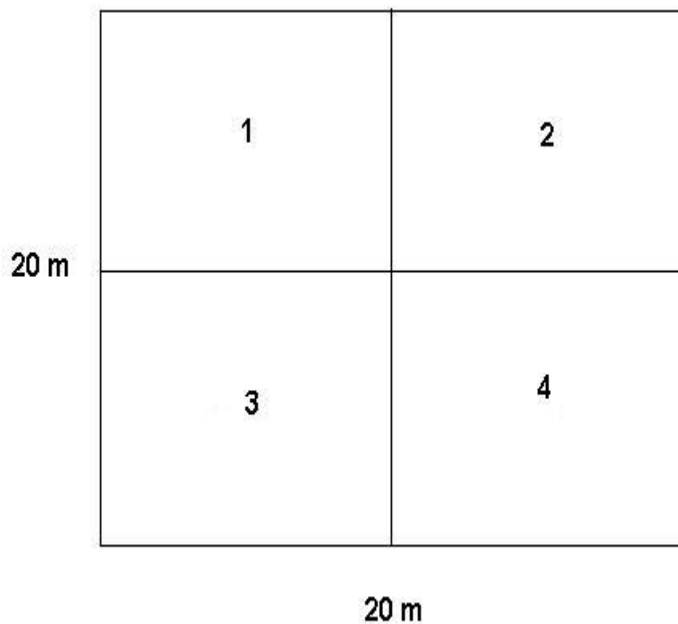


Figura 4. Representación esquemática de los sitios de muestreo

Para calcular la biomasa total de especies distintas a *Pinus patula* se emplearon las ecuaciones generadas por Acosta *et al.* (2001) que se muestran en el Cuadro 3. Para el caso del *P. patula* se emplearon las ecuaciones generadas en el presente trabajo.

Cuadro 3. Ecuaciones alométricas de biomasa total de especies de bosque mesófilo de montaña. DAP- Diámetro a la altura del pecho.

Especie	Ecuación	R²
<i>Alnus</i> spp	-2.4134 + 2.3290 (DAP)	0.97
<i>Quercus</i> spp	-2.2693 + 2.3897 (DAP)	0.99
<i>Clethra</i> spp	-1.9874 + 2.2599 (DAP)	0.99
Otras	-2.1942 + 2.3644 (DAP)	0.99

Fuente: Acosta *et al.*, 2001.

4.4. Estimación de la concentración de carbono

Una vez obtenido el peso seco de las muestras y con el fin de facilitar el manejo, se seleccionaron tres rodajas por árbol (de la base, a la mitad del fuste y una de la copa). Se preparó una muestra compuesta a partir de las tres muestras de follaje, tres muestras de corteza y tres muestras de las ramas.

Las muestras se picaron con tijeras y navajas finamente afiladas, molieron en un molino General Electric Mod. 5KH39QN5525 hasta pasar por malla 2 mm y nuevamente se secaron en la estufa de secado a 70 °C por 24 h. Permanecieron en la estufa hasta el momento de ser analizadas. La concentración de carbono se obtuvo por combustión seca empleando un analizador de carbono total TOC Analyser 5050-A en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados.

Para obtener el contenido de carbono de las especies distintas a *Pinus patula*, se empleó la información sobre concentración de carbono medida para otras especies por Figueroa *et al.* (2005) y que se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Concentración de carbono en especies de bosque mesófilo de montaña

Especie	Concentración de carbono
	%
<i>Alnus</i> sp	51.30
<i>Clethra</i> sp	49.63
<i>Quercus</i> sp	47.26
Otras	50.00

Fuente: Figueroa *et al.* (2005)

En el caso del *Pinus patula* para obtener el contenido de carbono en la totalidad de las áreas de corta se calculó una concentración media por componente a partir de los valores encontrados en este trabajo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Concentración media de carbono por componente en *Pinus patula*

Componente	Concentración media de carbono
	%
Follaje	51.18
Ramas	50.40
Corteza	51.87
Fuste	49.66

4.5. Análisis de regresión

Con los datos obtenidos de biomasa por cada componente se ajustaron por regresión ecuaciones que relacionan el diámetro normal y la biomasa individual. En el Cuadro 6 se presenta el modelo de las ecuaciones ajustadas para cada componente.

Cuadro 6. Ecuaciones de regresión ajustadas por componente en árboles de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

COMPONENTE	ECUACIÓN
Biomasa Total	$BT = \beta_0 + A * DAP^2 * Ht$
Fuste	$BFt = (E (BIOMASA TOTAL))$
Ramas	$BR = (D (BIOMASA TOTAL))$
Corteza	$BC = (WW (BIOMASA TOTAL))$
Follaje	$BF = \beta_0 * (EXP^{-C/DAP})$

BT = Biomasa total; β_0 , A, β_0 , C, D, E y WW = estimadores de regresión; DAP = Diámetro normal; Ht = Altura total; BF = Biomasa de follaje; Exp = exponencial; BR = Biomasa de ramas; BTr = Biomasa de fuste o fuste principal; y BC = Biomasa de corteza.

Los estimadores de regresión permiten calcular la relación que existe entre la variable dependiente y la variable independiente. En este caso los estimadores D, E y WW representan la proporción que tiene cada componente (corteza, ramas y fuste) respecto a la biomasa total. Por lo que se generó una serie de ecuaciones ajustadas donde la estimación de la biomasa total es igual a la suma de la biomasa estimada por componente. Sin embargo, en el caso del follaje, al emplear la proporción, se sobrestimaba, ya que la curva tuvo un comportamiento creciente. Ante tal comportamiento, se ajustó la ecuación que aparece en el Cuadro 6.

A pesar de que las especies arbóreas poseen diferentes patrones de desarrollo en altura, se ha encontrado que existen otros factores que influyen en este comportamiento como la fertilidad del suelo, el balance de humedad, la exposición al viento y la densidad de la madera, por lo que Garcidueñas *et al.* (1988) y Coomes *et al.* (2002) mencionan que al construir modelos de regresión no lineal, la altura es un factor importante que explica la variación en los ecosistemas forestales, razón por la cual se utiliza en la ecuación general de biomasa total en este estudio.

Con los datos de carbono se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de medias con el paquete estadístico SAS para determinar si la concentración de carbono variaba entre componentes estructurales dentro del árbol, y entre árboles.

5. RESULTADOS

5.1. Biomasa en árboles de *Pinus patula* y sus componentes estructurales

En el Cuadro 7 se muestran los datos de peso seco por componente para los árboles analizados, así como los parámetros dasométricos utilizados para el ajuste del modelo de regresión ($BT = \beta_0 + A * DAP^2 * Ht$).

La biomasa del follaje varió entre 0.5 y 19.1 kg/árbol, en las ramas el rango fue de 0.3 a 179.3 kg, la corteza se encontró entre 0.1 y 305.6 kg; y en el fuste presentó una amplia variación: de 0.5 a 1252.3 kg/árbol.

El Cuadro 8 presenta los estimadores de regresión, el error estándar y el coeficiente de determinación (R^2) como indicador del grado de ajuste del modelo de biomasa para cada componente en árboles individuales de *Pinus* .

De los modelos probados, incluyendo los no lineales asintóticos, el que mejor ajuste presentó fue aquel en el que se incluyó a la altura del árbol en la ecuación de biomasa total ya que presentó un coeficiente de ajuste alto (R^2) y el más bajo cuadrado medio del error (Cuadro 8). Los resultados concuerdan con lo que Jokela *et al.* (1986), Garcidueñas *et al.* (1988) y Zianis y Mencuccini (2003) reportaron; ya que al incluir esta variable se reduce el error estándar, aunque en la práctica hace más complicado la toma de datos de campo.

Cuadro 7. Biomasa por componente y por árbol de *Pinus patula* de La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

NO ARBOL	DIÁMETRO (cm)	EDAD (AÑOS)	ALTURA TOTAL (m)	LONG. COPA (m)	PESO SECO (Kg)				
					FOLLAJE	RAMAS	FUSTE	CORTEZA	TOTAL
1	2.6	3	2.6	2.4	0.5	0.3	0.5	0.1	1.4
2	3.8	5	3.6	3.4	1.0	0.8	1.1	0.2	3.1
3	5.0	4	4.1	3.5	1.8	1.1	2.4	0.4	5.6
4	7.1	5	5.6	4.5	3.0	1.7	5.4	1.6	11.8
5	9.3	6	7.5	6.8	2.2	2.9	8.0	1.1	14.2
6	11.7	10	12.9	6.3	1.8	5.0	28.1	2.7	37.6
7	13.2	9	13.6	6.1	3.3	7.5	26.0	3.0	39.8
8	15.8	11	17.1	4.8	3.2	5.8	63.7	8.9	81.6
9	17.8	12	16.3	7.7	7.5	18.4	86.7	6.2	118.8
10	18.6	15	18.6	6.5	4.8	10.6	78.9	6.9	101.1
11	20.5	14	20.9	7.2	6.0	15.6	156.3	14.9	192.8
12	25.4	18	19.4	6.2	12.7	27.3	173.9	13.4	227.4
13	30.8	20	20.7	8.6	15.4	48.9	274.2	25.9	364.5
14	39.3	70	32.2	14.4	15.6	61.1	605.5	111.9	794.2
15	40.1	72	30.4	9.3	18.7	85.9	668.2	91.7	864.6
16	47.2	76	30.8	6.0	16.0	160.1	1428.9	58.5	1663.5
17	55.4	65	33.5	18.7	19.1	179.3	1459.2	242.9	1900.6
18	56.9	76	31.1	8.0	13.9	167.6	1252.3	305.6	1739.3

Cuadro 8. Parámetros y estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para biomasa de árboles individuales de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

PARÁMETRO	ESTIMADOR	ERROR ESTÁNDAR	VALOR T	PR > T	R ²
<u>BIOMASA TOTAL BT = $\beta_0 + A * DAP^2 * Ht$</u>					
β_0	5.338	31.363	0.170	0.8670	0.974
A	18.634	0.755	24.660	0.0001	0.974
<u>COMPONENTE FOLLAJE BF = $\beta_0 * (EXP^{-C/DAP})$</u>					
β_0 (Follaje)	29.440	3.393	8.680	0.0001	0.901
C	26.519	3.821	6.940	0.0001	0.901
<u>COMPONENTE RAMAS BR = (D (BIOMASA TOTAL))</u>					
D	0.095	0.002	55.790	0.0001	0.992
<u>COMPONENTE FUSTE BFt = (E (BIOMASA TOTAL))</u>					
E	0.777	0.012	62.440	0.0001	0.994
<u>COMPONENTE CORTEZA BC = (WW (BIOMASA TOTAL))</u>					
WW	0.115	0.013	9.080	0.0001	0.772

β_0 , A, β_0 (follaje), C, D, E y WW = estimadores de regresión.

Las Figuras 5, 6, 7, 8 y 9 muestran la relación de la biomasa con el diámetro normal para los siguientes componentes: *c* para follaje, *d* para ramas, *e* para fuste y *ww* para corteza respectivamente, así como las ecuaciones obtenidas en este trabajo. El alto R² para todos los casos indica que existe una relación estrecha entre el diámetro y la biomasa de cada uno de los componentes estructurales. A mayor diámetro mayor acumulación de biomasa en cualquiera de los componentes considerados.

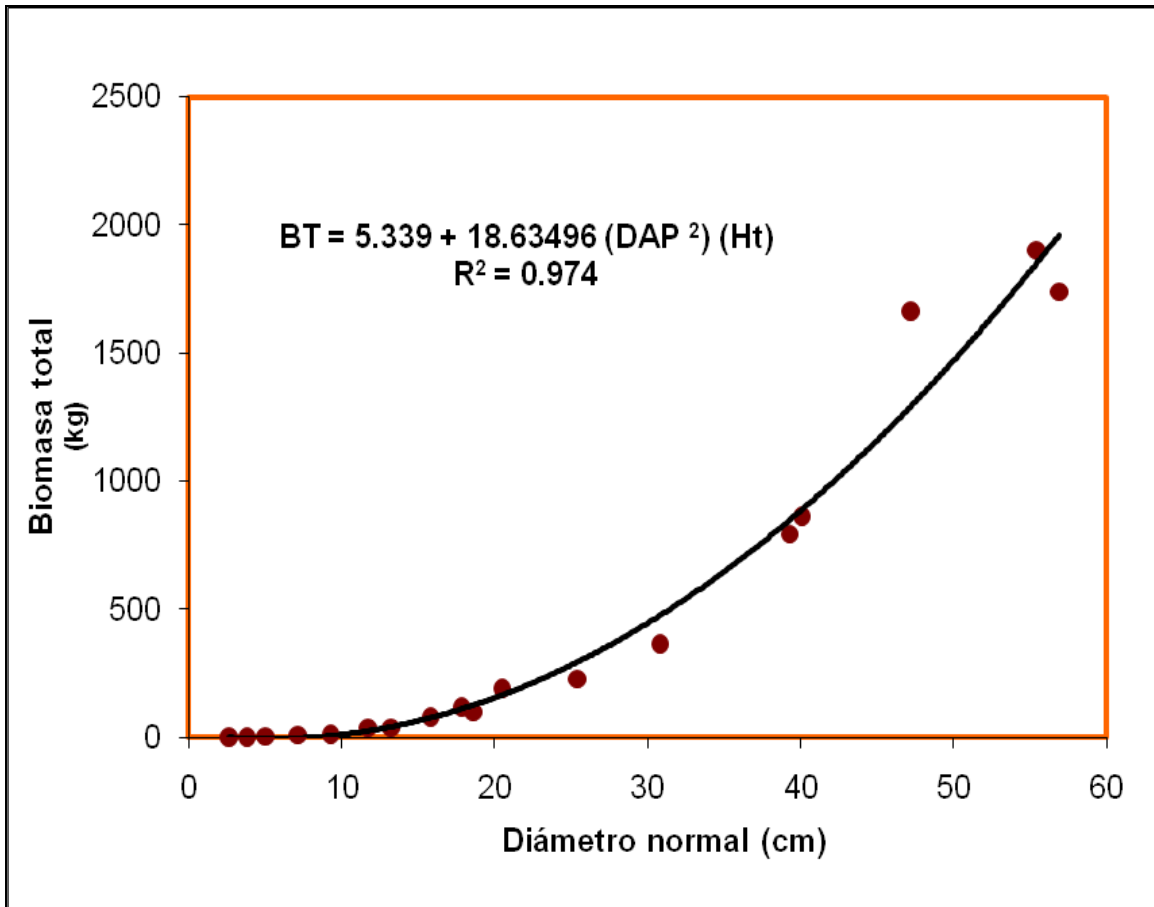


Figura 5. Relación entre biomasa total y el diámetro normal en *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo (BT = Biomasa total; DAP = Diámetro normal; Ht = Altura total).

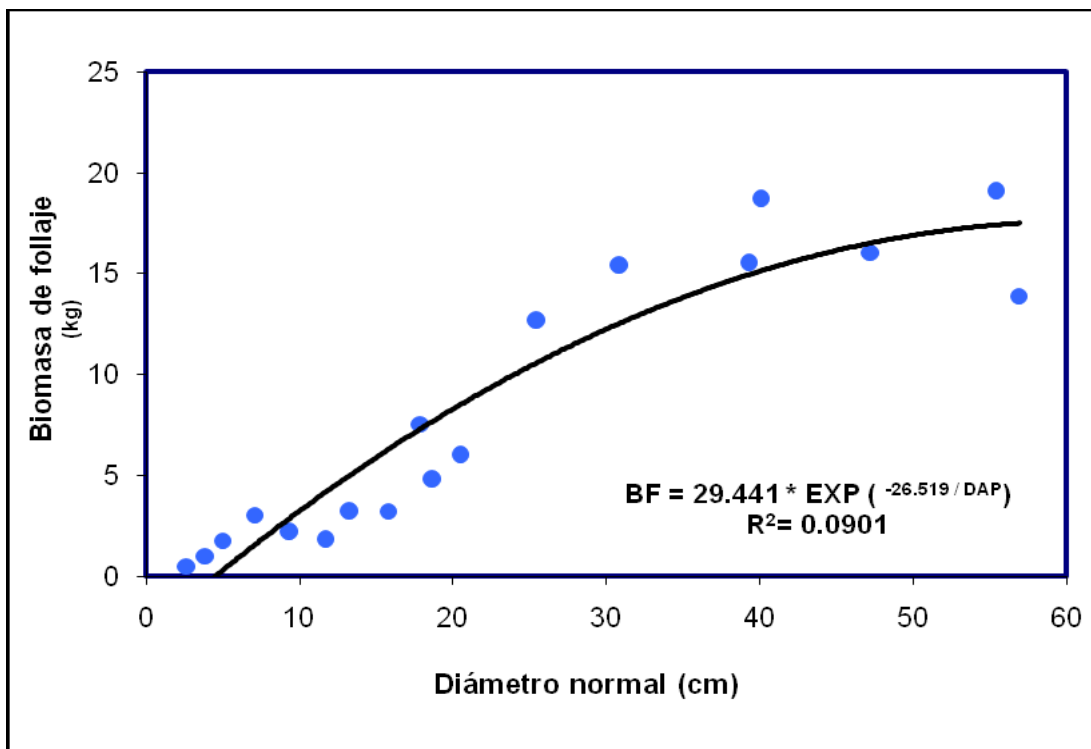


Figura 6. Relación de biomasa de follaje y el diámetro normal en *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo (BF = Biomasa de follaje; DAP = Diámetro normal).

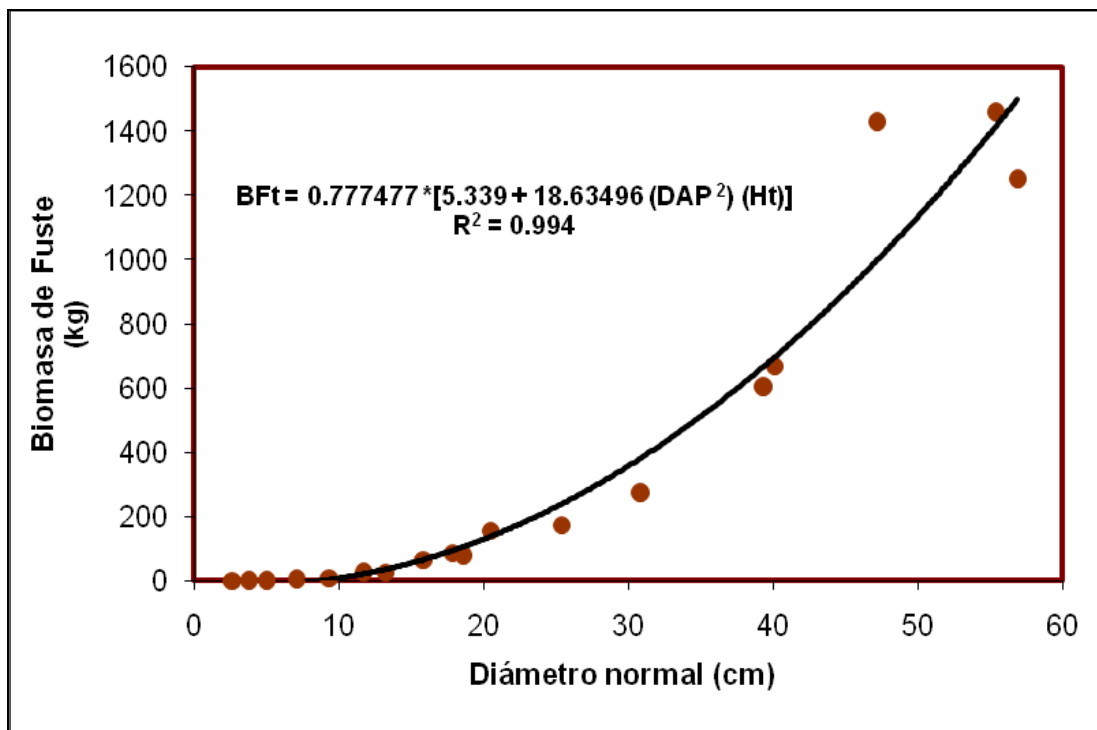


Figura 7. Relación de biomasa del fuste y el diámetro normal en *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. (BTr = Biomasa de fuste o fuste; BT = Biomasa total).

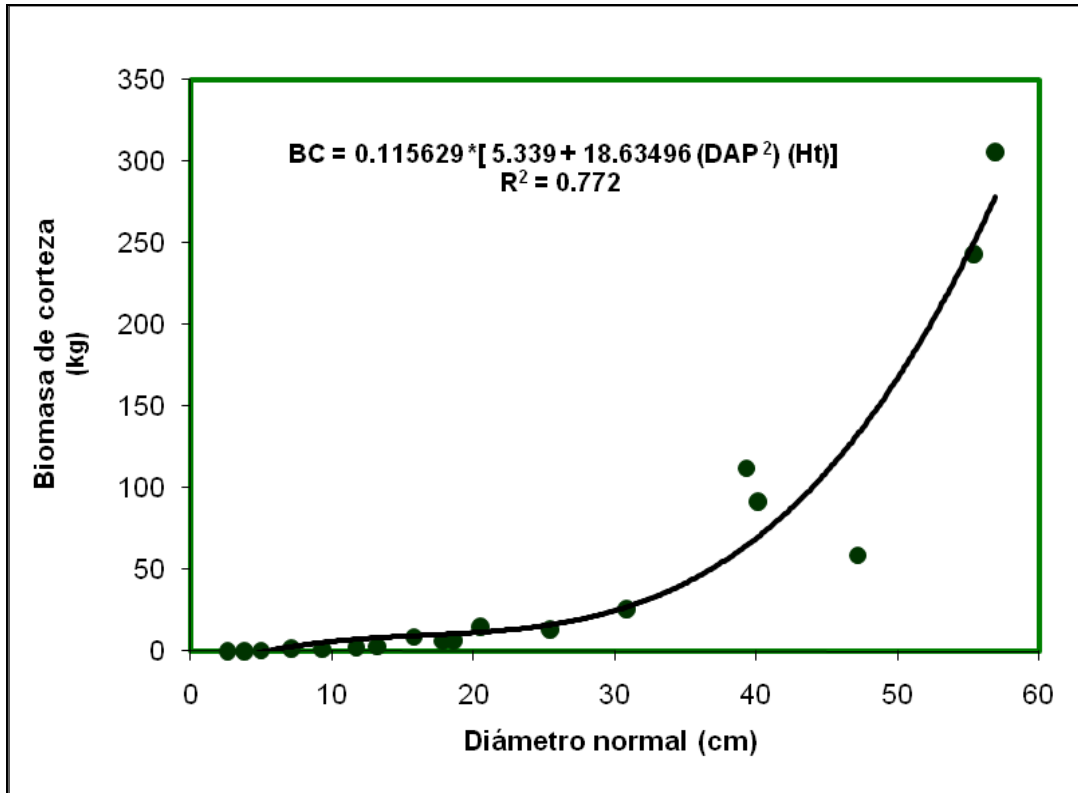


Figura 8. Relación de biomasa de la corteza y el diámetro normal en *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. (BC = Biomasa de corteza; BT = Biomasa total).

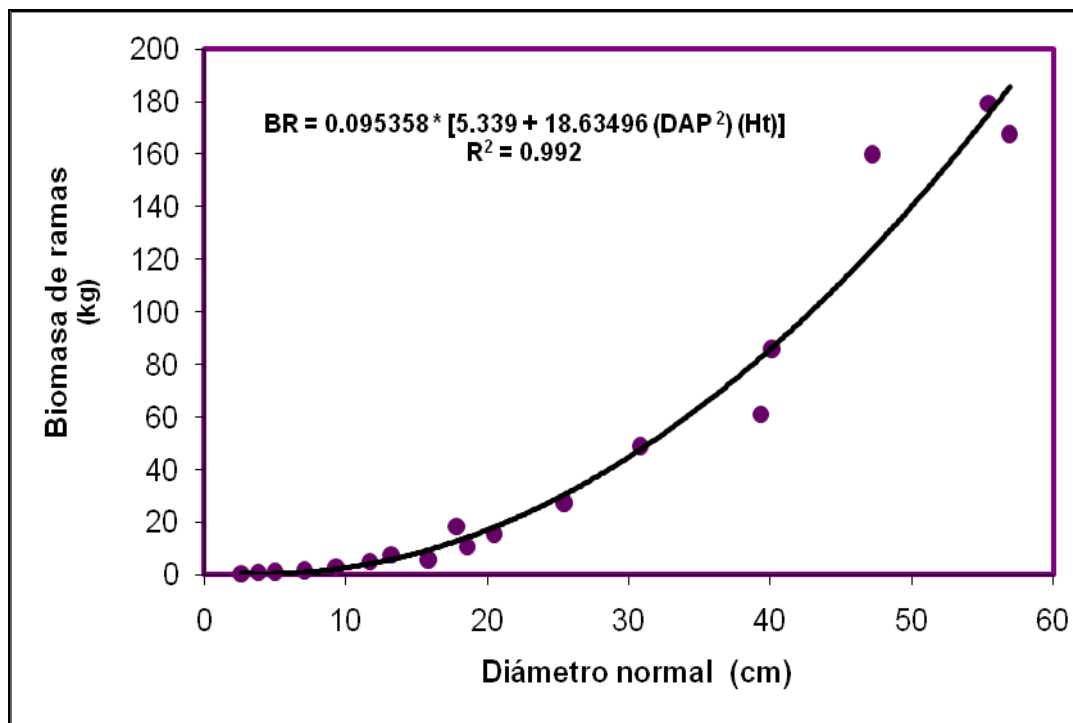


Figura 9. Relación de biomasa de ramas y el diámetro normal en *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. (BR = Biomasa de ramas; BT = Biomasa total).

En las figuras anteriores se observa que hubo un comportamiento similar en la relación entre biomasa total de los diferentes componentes y el diámetro normal, excepto en la relación con el follaje total.

La mayor parte de la biomasa del árbol se concentró en el fuste o fuste principal (36 a 85%) variando de acuerdo al tamaño del árbol. En los árboles menores de 15 cm de diámetro, el porcentaje de biomasa acumulada en el fuste aumenta conforme aumenta el diámetro normal, alcanzando un valor máximo cercano al 80% (Figura 6). Castellanos *et al.* (1996) reportan que el 72% de la biomasa se concentra en los fustes de *Pinus patula*. Algunos valores de biomasa reportados en otras especies, se encuentran en un rango entre el 67% y 93%, dependiendo de la localidad (Rapp *et al.*, 1999; Xiao *et al.*, 2003). Se ha encontrado que a una edad

determinada, en donde la competencia por luz es un factor secundario, el crecimiento en diámetro es prioritario, por lo que la biomasa tiende a acumularse en mayor cantidad en el fuste (Santa Regina, 2000).

La biomasa del follaje representó del 10 al 31 % de la biomasa total, con un comportamiento decreciente de este porcentaje con la edad del árbol, hasta alcanzar una proporción mínima de ésta, donde se hace constante (alrededor de 10 años de edad). Este patrón se presenta por que la productividad de este componente se modifica con el tamaño del árbol, lo que es causado por el gasto fisiológico que supone mantener el follaje fotosintéticamente inactivo (Hiura, 2005). La biomasa en el follaje en árboles maduros de *Pinus patula* en la Sierra Norte de Puebla se reporta en 3% (Castellanos *et al.*, 1996), mientras que De los Santos (1993) midió hasta un 5% de este componente para esta misma especie en la misma zona.

La proporción de biomasa en las ramas y en la corteza permanece relativamente constante en árboles adultos, estabilizándose en alrededor del 10%, aunque hasta los 15 a 20 cm de diámetro normal, se observó una disminución en dicha proporción (Figura 10). Resultados similares han sido reportados por Castellanos *et al.* (1996), Rapp *et al.* (1999) y Chen y Klinka (2003).

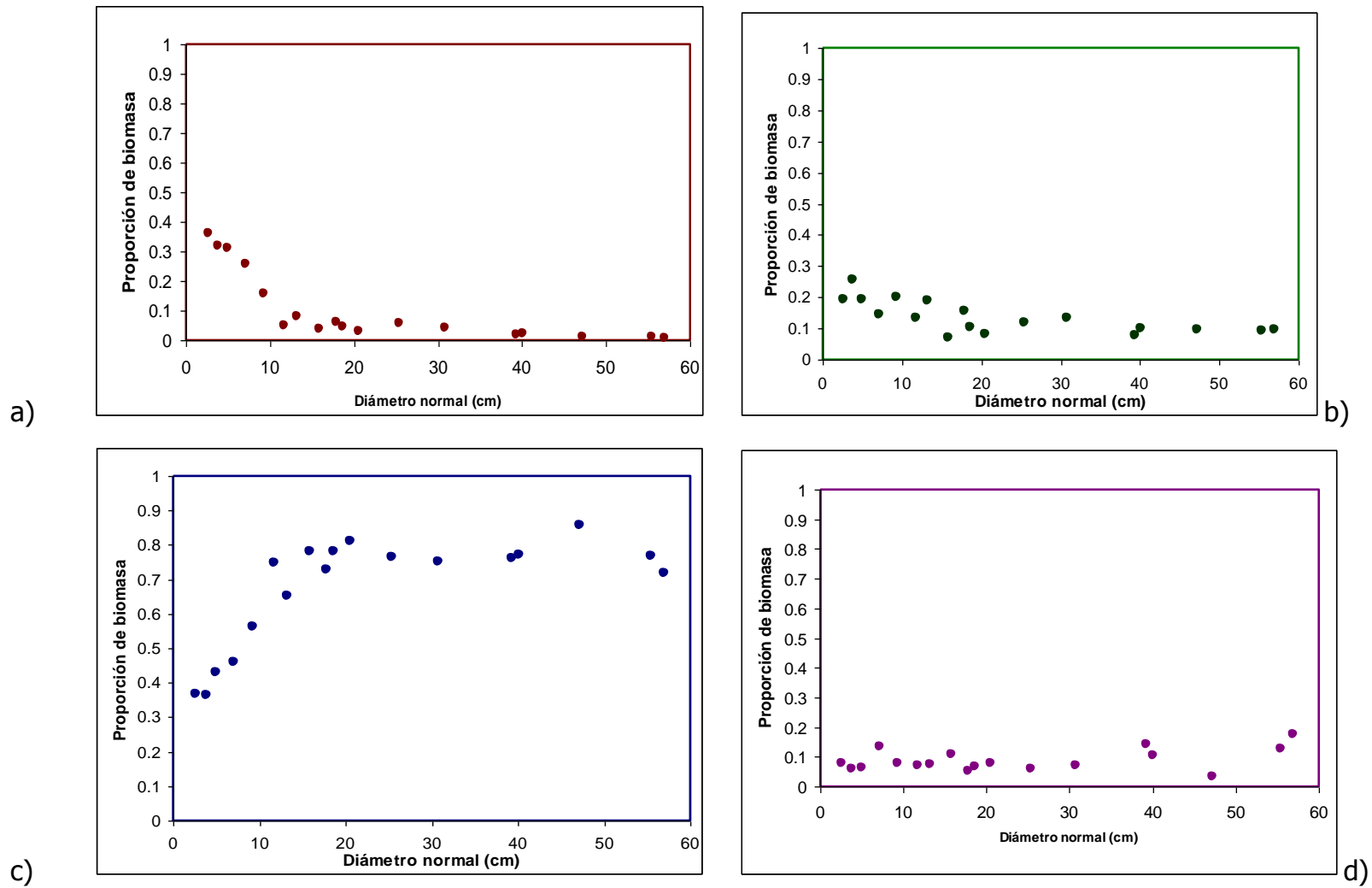


Figura 10. Proporción de biomasa en a) Follaje, b) Ramas, c) Fuste y d) Corteza, respecto al diámetro normal en árboles de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

5.2. Concentración de carbono y su distribución en los componentes en árboles de *Pinus patula*

El Cuadro 9 presenta los porcentajes de carbono por árbol y por componente. No se detectaron diferencias significativas entre árboles, ni entre componentes, por lo que se puede afirmar que la concentración de carbono permanece constante desde la etapa inicial de desarrollo hasta alcanzar la etapa adulta. La concentración media fue de 51.83%. Valores similares han sido reportados para algunas coníferas (50 a 53%) por Brown *et al.*, (1986), Acosta *et al.* (2001) y Gutiérrez y Lopera (2001).

Cuadro 9. Concentración de carbono por componente en los árboles de *Pinus patula* del Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

ÁRBOL	DIÁMETRO (cm)	CONCENTRACIÓN DE CARBONO (%)			
		FOLLAJE	RAMAS	CORTEZA	FUSTE
1	2.6	50.64	50.98	52.59	49.91
2	3.8	50.56	50.71	51.26	50.05
3	5.0	50.81	50.79	52.33	49.40
4	7.1	51.34	50.63	51.57	50.42
5	9.3	53.14	50.32	52.30	50.19
6	11.7	51.87	50.16	52.60	49.67
7	13.2	52.37	50.19	51.10	49.24
8	15.8	52.25	50.13	51.05	49.11
9	17.8	50.87	50.50	52.81	48.50
10	18.6	51.84	50.04	52.94	49.73
11	20.5	49.87	49.98	51.43	49.65
12	25.4	53.25	50.54	52.94	49.52
13	30.8	50.94	50.07	50.99	49.27
14	39.3	49.95	50.02	51.85	49.89
15	40.1	50.34	50.37	51.42	49.45
16	47.2	50.83	50.94	51.85	50.24
17	55.4	50.77	50.05	50.77	49.15
18	56.9	49.70	50.86	51.87	50.45
Promedio		51.18	50.40	51.87	49.66
Desviación estándar		1.06	0.35	0.72	0.51

El Cuadro 10 se muestra el contenido de carbono por componente en los árboles muestreados. En este caso se aprecia una tendencia similar a la del modelo de biomasa, ya que conforme aumenta el diámetro normal del arbolado, se presenta mayor acumulación de biomasa, y por lo tanto, un contenido de carbono más elevado. Este patrón no se presentó en el árbol 18, situación que se puede atribuir a las condiciones específicas de crecimiento, sin embargo no se cuenta con suficiente información para demostrarlo.

Cuadro 10. Contenido de carbono por componente en los árboles de *Pinus patula* del Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo

ÁRBOL	DIÁMETRO (cm)	CONTENIDO DE CARBONO (kg)				CARBONO POR ÁRBOL (kg)
		FOLLAJE	RAMAS	CORTEZA	FUSTE	
1	2.6	0.25	0.13	0.05	0.25	0.69
2	3.8	0.50	0.40	0.10	0.57	1.57
3	5.0	0.89	0.55	0.19	1.20	2.84
4	7.1	1.56	0.87	0.82	2.73	5.98
5	9.3	1.19	1.44	0.57	4.02	7.22
6	11.7	0.96	2.49	1.41	13.98	18.84
7	13.2	1.71	3.76	1.55	12.79	19.81
8	15.8	1.67	2.93	4.53	31.26	40.39
9	17.8	3.83	9.28	3.26	42.06	58.44
10	18.6	2.50	5.29	3.63	39.22	50.65
11	20.5	3.01	7.80	7.65	77.61	96.07
12	25.4	6.77	13.81	7.10	86.13	113.81
13	30.8	7.87	24.50	13.21	135.11	180.69
14	39.3	7.77	30.57	58.03	302.11	398.49
15	40.1	9.43	43.29	47.13	330.43	430.28
16	47.2	8.15	81.53	30.33	717.88	837.89
17	55.4	9.71	89.74	123.34	717.22	940.01
18	56.9	6.90	85.23	158.49	631.78	882.39

De igual forma la Figura 11 ilustra el contenido de carbono por árbol; se observa que éste se ajusta a un modelo exponencial con el aumento en el tamaño de los árboles.

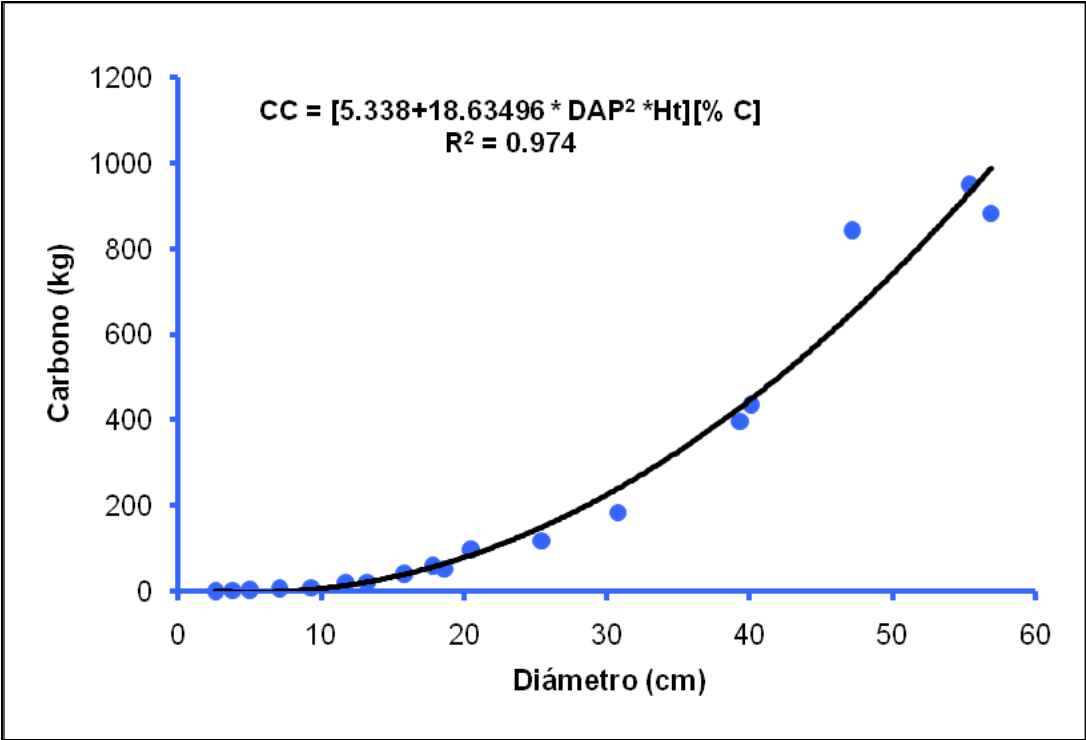


Figura 11. Relación entre el contenido de carbono y el diámetro normal en árboles de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

5.3. Estimación de biomasa en las áreas de corta

En el Cuadro 11 se enlistan las especies presentes en el área de estudio, así como el número de individuos. La mayor densidad corresponde a *Pinus patula*, seguida por *Quercus laurina*, y en menor medida por *Clethra mexicana* y *Cornus excelsa*. Estas especies son de distribución natural en el bosque mesófilo de montaña, asociadas frecuentemente con *Liquidambar styraciflua*, *Alnus* spp., *Rapanea* spp., y otras de encino como son *Quercus microphylla* y *Q. excelsa* (Rzedowski, 1981; Gómez y Vázquez, 1981).

En el Cuadro 12 se muestra la distribución de la biomasa de *Pinus patula* por componente y por año en que se realizó el último corte. El fuste es la parte estructural de los árboles con la mayor acumulación de biomasa, mientras que el follaje presenta la menor cantidad de biomasa.

Cuadro 11. Composición de especies promedio de bosques manejados de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

ESPECIE	ÁREA BASAL		DENSIDAD	
	m ² /ha	%	No./ha	%
<i>Pinus patula</i>	43.897	91.51	1436.1	65.08
<i>Quercus laurina</i>	2.702	5.63	273.8	12.41
<i>Clethra mexicana</i>	0.275	0.57	47.2	2.14
<i>Cornus excelsa</i>	0.195	0.40	48.3	2.19
<i>Vaccinium leucanthum</i>	0.154	0.32	27.8	1.26
<i>Quercus rugosa</i>	0.145	0.30	50.0	2.26
<i>Alnus jorullensis</i>	0.115	0.24	43.7	1.98
<i>Ternstroemia sylvatica</i>	0.098	0.20	75.0	3.40
<i>Prunus serotina</i>	0.076	0.15	16.6	0.75
<i>Quercus excelsa</i>	0.064	0.13	20.0	0.91
<i>Quercus</i> spp.	0.053	0.11	30.5	1.38
<i>Symplocos</i> aff. <i>speciosa</i>	0.050	0.11	29.2	1.32
<i>Arbutus xalapensis</i>	0.031	0.06	12.5	0.56
<i>Rhamnus capraeifolia</i>	0.014	0.03	8.3	0.38
<i>Cleyera</i> spp	0.010	0.02	8.3	0.38
<i>Crataegus</i> spp	0.010	0.02	7.2	0.33
<i>Viburnum tiliaefolium</i>	0.009	0.02	33.6	1.52
<i>Ilex discolor</i>	0.004	0.007	9.0	0.41
<i>Buddleia cordata</i>	0.002	0.003	8.3	0.38
Otras	0.068	0.14	20.8	0.94
TOTAL	47.972		2206.2	

El área natural es la que presenta los valores de biomasa de fuste y ramas más altos (7884.99 y 967.10 Mg) ya que en esta zona es donde se encuentran los árboles con los diámetros y alturas más grandes (>25 cm de DAP y >20 m de altura), aunque su distribución es más dispersa dentro de la zona.

La razón por la que el área natural presenta los más altos valores de biomasa de fuste y ramas (de hecho no sólo en estas partes estructurales, sino en todas, es decir, también en follaje y corteza) posiblemente no se deba al mayor tamaño de los árboles, sino a la presencia de un grupo numeroso de especies asociadas con diámetros pequeños (>10 cm), además de que la superficie sin tratamiento representa la mayor parte de la totalidad del área de estudio.

Cuadro 12. Biomasa de partes estructurales de *Pinus patula* y biomasa total de especies asociadas por área de corta, en bosques manejados de La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

ÁREA DE CORTA	SUPERFICIE	BIOMASA DE <i>Pinus patula</i> (Mg)					OTRAS ESPECIES (Mg)	TOTAL POR ÁREA DE CORTA (Mg)
		FUSTE	RAMAS	CORTEZA	FOLLAJE	TOTAL		
Área Natural	78.45	7884.99	967.10	1172.68	224.60	10249.37	4295.95	14545.33
1982	5.01	615.98	75.55	91.61	30.05	813.19	55.83	869.02
1983	7.24	881.91	108.17	131.16	52.74	1173.98	46.66	1220.64
1984	4.02	439.25	53.87	65.33	24.39	582.84	26.47	609.31
1985	3.95	261.14	32.03	38.84	18.57	350.58	19.26	369.84
1986	4.07	353.76	43.39	52.61	26.13	475.89	5.55	481.44
1987	4.72	376.76	46.21	56.03	27.97	506.97	19.30	526.27
1988	7.16	524.17	64.29	77.96	41.10	707.52	27.88	735.40
1989	5.37	569.00	69.79	84.62	32.46	755.87	16.60	772.46
1990	3.13	205.66	25.22	30.59	17.74	279.20	9.20	288.40
1991	1.64	93.26	11.44	13.87	7.50	126.07	0.24	126.31
1995	6.77	235.25	28.85	34.99	22.79	321.88	8.33	330.21
1996	6.31	621.91	76.28	92.49	41.79	832.47	3.34	835.81
1997	4.37	239.39	29.36	35.60	18.62	322.97	1.98	324.95
1998	11.2	549.52	67.40	81.73	50.36	749.01	26.10	775.11

En el Cuadro 13 se presenta la biomasa y carbono por hectárea y año de corta en el área de estudio.

Cuadro 13. Cantidad de biomasa y carbono almacenado en bosques manejados de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

AREA DE CORTA	SUPERFICIE (ha)	DENSIDAD No./ha	EDAD	BIOMASA (Mg/ha)	CARBONO TOTAL (Mg/ha)	CARBONO POR ÁREA DE CORTA (Mg)
Área Natural	78.45	1250	80	184.03	92.44	7252.06
1982	5.01	1633	24	166.60	86.40	432.87
1983	7.24	1808	23	163.18	85.42	618.23
1984	4.02	975	22	147.19	76.77	308.49
1985	3.95	1692	21	89.98	47.41	187.12
1986	4.07	1008	20	113.02	59.95	244.28
1987	4.72	1200	19	106.78	56.48	266.53
1988	7.16	1117	18	98.10	52.05	372.50
1989	5.37	1017	17	139.34	73.01	392.13
1990	3.13	3242	16	87.35	46.67	146.25
1991	1.64	733	15	73.25	39.09	64.14
1995	6.77	2267	11	45.91	24.71	167.35
1996	6.31	1025	10	127.36	67.29	424.42
1997	4.37	5742	9	70.97	37.78	164.96
1998	11.20	4575	8	65.42	35.05	392.70
TOTAL	168.18					11433.96
PROMEDIO		1952.26				

La cantidad de carbono almacenada en los bosques reportada en diferentes estudios a nivel mundial es muy variable, sin embargo, los reportados en el presente no pueden ser directamente comparables, en virtud de que los datos corresponden a edades diferentes al momento de hacer la evaluación de biomasa respectiva. Entre ellos se encuentran los de Xiao *et al.* (2003) en bosques templados de *Pinus sylvestris* y *Fagus* sp. (176 Mg/ha⁻¹), Son *et al.* (2004) en bosques mezclados de *Q. variabilis* – *Q. mongolica* (137.8 Mg/ha⁻¹) y Hoshizaki *et al.* (2004) para un bosque mesófilo en Malasia (403 Mg ha⁻¹).

Algunas estimaciones de biomasa son los de Shutou y Nakane (2004) para *Cryptomeria japonica* (13.9 a 228 Mg ha⁻¹), los de Hashimoto *et al.* (2000) en bosques secundarios en Indonesia (8 – 10 Mg ha⁻¹ al año de establecimiento hasta los 45 – 56 Mg ha⁻¹ a los 12 años), Wang *et al.* (2000) para *Betula papyrifera* (83.2 Mg ha⁻¹) y *Abies lasiocarpa* (26.7 Mg ha⁻¹).

Por otro lado, estudios globales en otros ecosistemas indican valores de 110 Mg/ha para bosques noruegos de *Picea abies* (Ingerslev y Hallbäck, 1999) y de 64 a 121 Mg/ha en bosques europeos de *Quercus pyrenaica*, *Q. lanuginosa* y *Q. illex* referidos principalmente a biomasa de fustes y ramas (Rapp *et al.*, 1999). Como se aprecia, esta variación ocurre en virtud de que tales valores representan diversas especies, edad de los rodales, localización geográfica y la metodología que se emplea (Schroeder *et al.*, 1997; Colter *et al.*, 2003).

En el caso particular de la especie en estudio, Gutiérrez y Lopera (2001) midieron 87.2 Mg ha⁻¹ y 446 Mg ha⁻¹ en plantaciones comerciales de 6 y 29 años, respectivamente. En el presente estudio los valores encontrados en rodales con edades similares fueron de 65.4 Mg ha⁻¹ (8 años) y de 166.6 Mg ha⁻¹ a los 24 años de edad. Lo anterior indica que en las plantaciones comerciales de rápido crecimiento el proceso de acumulación de biomasa es más acelerado.

La Figura 12 muestra como la acumulación de biomasa aumenta conforme el rodal adquiere mayor edad; sin embargo, los valores de biomasa correspondientes al área de corta de 1995 (11 años de edad) no sigue este patrón, en virtud de presentar el valor promedio de biomasa más bajos (45. Mg ha⁻¹). Sin embargo, lo anterior se debe a la aplicación de aclareos en el año en que se realizó el muestreo, y en consecuencia, los árboles aún no respondían al tratamiento.

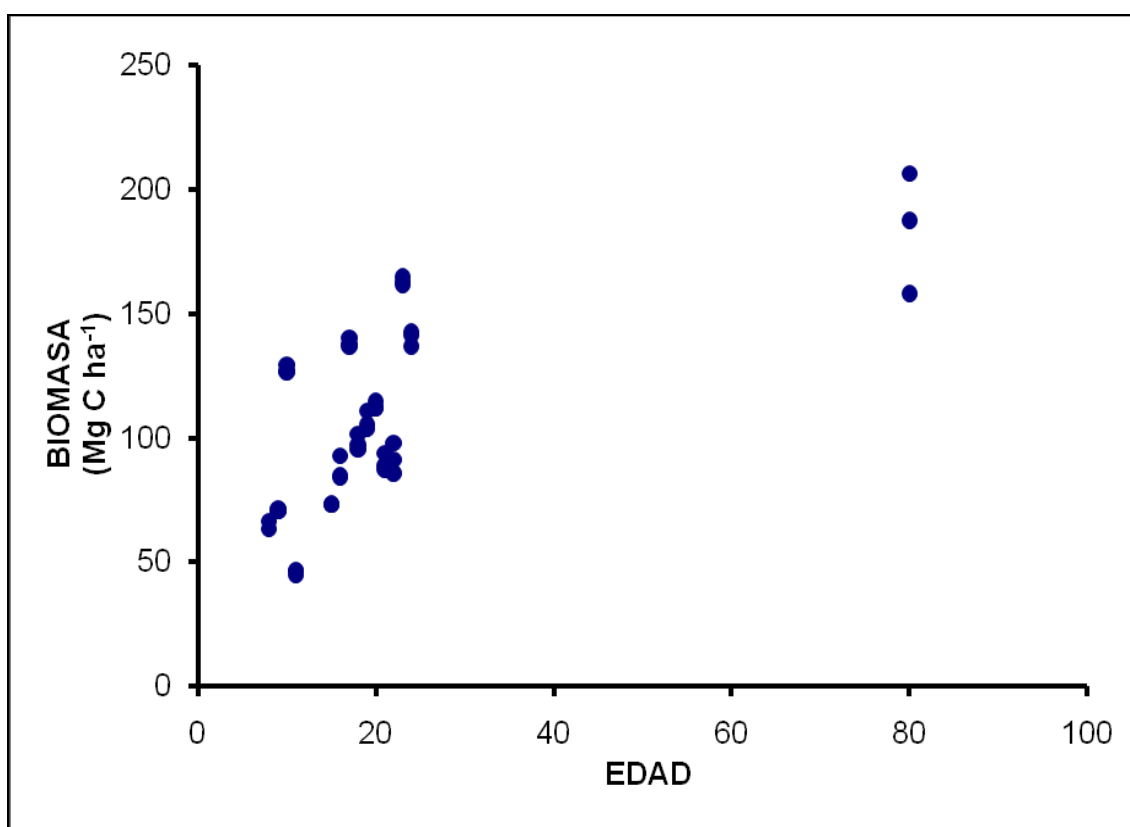


Figura 12. Relación de la biomasa con la edad del rodal en bosques manejados de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

El área que se cortó en 1997 fue la que presentó el mayor número de individuos (5742), sin embargo, la biomasa representa sólo el 38% del valor encontrado para las áreas naturales (Cuadro 13), esto probablemente se deba a que la aplicación de la corta final ocurrió 9 años previo al muestreo, por lo que la etapa de desarrollo (bajo latizal) no presenta mayor acumulación de biomasa.

5.4. Estimación de carbono en las áreas de corta

En el Cuadro 14 se muestran los valores de carbono por componente de *Pinus patula* y de otras especies presentes en cada área de corta. Se enfatiza que los valores más altos se encuentran en el área natural, ya que es en estas zonas es donde se encuentran los árboles más grandes favoreciendo la dinámica del carbono (Post *et al.*, 1990; Schlesinger *et al.*, 2000; Houghton, 2005).

El área de corta 1991 es la que presenta menores valores en todos los componentes, lo cual pudiera explicarse por su menor superficie (1.64 ha) (Cuadro 14), asimismo, la falta de tratamiento silvícola (aclareos) se refleja en árboles de fustes delgados con copas concentradas en la parte superior ligeramente extendidas que modifican el contenido de biomasa total.

Cuadro 14. Carbono por componente de *Pinus patula* y otras especies por área de corta.

ÁREA DE CORTA	SUPERFICIE (Has)	CARBONO DE <i>Pinus patula</i> (Mg)					OTRAS ESPECIES (Mg)	TOTAL POR ÁREA DE CORTA (Mg)
		FUSTE	RAMAS	CORTEZA	FOLLAJE	TOTAL		
Área Natural	78.45	3992.17	488.88	611.87	113.07	5205.99	2046.4	7252.06
1982	5.01	311.87	38.19	47.80	15.13	412.99	26.65	439.64
1983	7.24	446.51	54.68	68.44	26.55	596.18	22.05	618.23
1984	4.02	222.39	27.23	34.09	12.28	295.99	12.5	308.49
1985	3.95	132.22	16.19	20.26	9.35	178.02	9.1	187.12
1986	4.07	179.11	21.93	27.45	13.16	241.65	2.63	244.28
1987	4.72	190.75	23.36	29.24	14.08	257.43	9.1	266.53
1988	7.16	265.39	32.50	40.68	20.69	359.26	13.24	372.50
1989	5.37	288.08	35.28	44.15	16.34	383.86	8.28	392.13
1990	3.13	104.12	12.75	15.96	8.93	141.76	4.49	146.25
1991	1.64	47.22	5.78	7.24	3.78	64.01	0.12	64.14
1995	6.77	119.11	14.59	18.26	11.47	163.42	3.93	167.35
1996	6.31	314.87	38.56	48.26	21.04	422.73	1.69	424.42
1997	4.37	121.20	14.84	18.58	9.38	164.00	0.96	164.96
1998	11.20	278.22	34.07	42.64	25.35	380.29	12.41	392.70

En la Figura 13 se observa la relación del contenido del de carbono con la edad del rodal. El área natural (≈ 80 años) es la que presenta el contenido más alto (92.44 Mg ha^{-1}), mientras que a la edad de 11 años (área 1995) tiene el más bajo (24.71 Mg ha^{-1}). Es importante señalar que el rodal de 24 años presenta valores similares que el área natural, 86.40 y 92.44 Mg ha^{-1} , respectivamente.

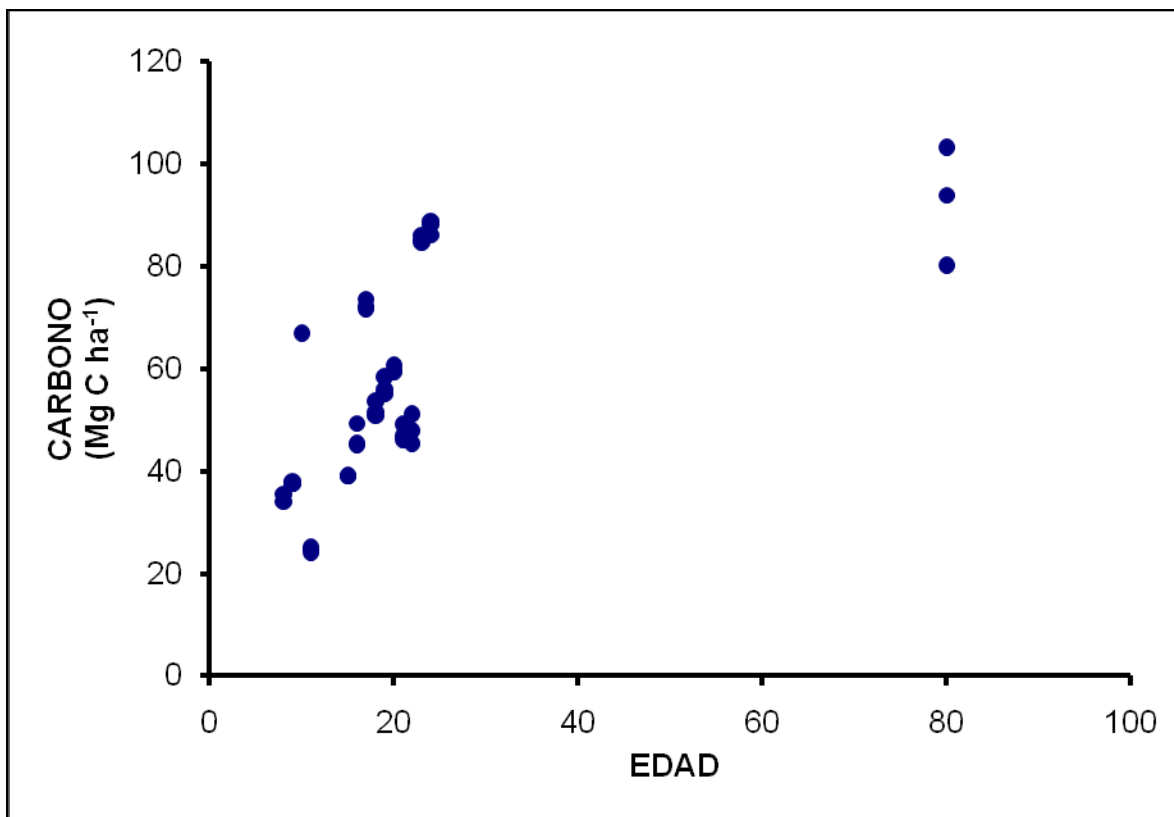


Figura 13. Relación de carbono total y edad del arbolado en bosques manejados de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

En Medellín, Colombia, Gutiérrez y Lopera (2001) encontraron $48.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en plantaciones de *Pinus patula* de 6 años de edad y 223 Mg C ha^{-1} a los 29 años. Dichos valores contrastan con los obtenidos en este estudio ya que para 8 años se encontró $35.05 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y para 20 años fue $59.95 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Cuadro 13).

Posiblemente estas diferencias se deban a que la semilla utilizada para producir la planta en las plantaciones de Medellín es material genéticamente mejorado para mayor crecimiento.

En las plantaciones de *Pinus patula* en Tanzania, Lundgren (1979) reportó 153.1 y 273.9 Mg C ha⁻¹ para edades de 10 y 20 años respectivamente, caso contrario sucede con las plantaciones de esta especie en la India ya que a los 10 años se tienen 10 Mg C ha⁻¹ y 60.6 Mg C ha⁻¹ a los 14 años (Bhartari, 1986). Estas diferencias son probablemente atribuidas a las diferentes tasas de crecimiento que hay entre las zonas tropicales y subtropicales además de que en las plantaciones el material parental fue seleccionado lo que no ocurre en los bosques de Zacualtipán. Ordoñez *et al.* (2001) estimaron que el contenido de carbono en la biomasa aérea de un bosque de *Pinus pseudostrabus* es a los 10 años de 4 Mg C ha⁻¹, a los 30 años 16 Mg C ha⁻¹ y a los 80 años 75 Mg C ha⁻¹, estos valores son inferiores a los valores encontrados en este estudio y se puede atribuir a que se trata de otra especie de pino de un bosque templado, sin embargo, se hace la comparación por tratarse de uno de los pocos estudios realizados en México. Los autores reportan que para *Pinus pseudostrabus* la tasa máxima de almacenamiento de carbono se alcanza a los 80 años que es la mayor edad analizada en este trabajo.

De Jong *et al.* (1999) estimaron el flujo del carbono en la región central de Chiapas. Estos autores reportan que el contenido de carbono en los bosques de encino y mesófilos de montaña era de 504 Mg C ha⁻¹, mientras que en los pastizales era de 147 Mg C ha⁻¹. Aunque los valores de C en los bosques mesófilos de Chiapas son mayores que los de este estudio (Cuadro 13), los autores incluyeron el reservorio del suelo, en el cual se encuentra contenido la mayor parte del carbono que se puede almacenar en un ecosistema (Schulze, 2000; Sampson *et al.* 1993; Schlesinger *et al.*, 2000).

Estudios realizados por Monreal *et al.* (2005), en ecosistemas de ladera en el estado de Oaxaca, indican que los almacenes de carbono se presentaron en mayor cuantía en suelos agrícolas, que en suelos forestales, con el 70% de este carbono distribuido en el perfil del suelo entre 0 a 45 cm de profundidad.

A pesar de que el contenido de carbono en el área natural fue mayor que el contenido de carbono del área explotada en 1982 (86.40 Mg ha^{-1}) la diferencia es de sólo 6.04 Mg/ha , si consideramos que la edad promedio de las áreas naturales es de 80 años y la edad del rodal 1982 es de 24 años, se podría argumentar que la acumulación por año (0.109 Mg ha^{-1}) es muy baja comparada con la acumulación que se da entre el año 1982 y 1983 (3.42 Mg ha^{-1}), por lo que el manejo que se les da a estas áreas promueve la acumulación de este elemento en el bosque.

6. DISCUSIÓN GENERAL

6.1. Biomasa

La estimación de la biomasa es fundamental para evaluar el almacenaje de carbono y la dinámica de los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas forestales. Varios autores (Brown *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2000) han usado los datos de los inventarios forestales para calcular los reservorios tanto de biomasa como de carbono en muchas regiones del mundo para diferentes especies.

A pesar de que las especies arbóreas poseen diferentes patrones de desarrollo en altura, ésta se encuentra relacionada con la fertilidad del suelo, balance de humedad, exposición al viento y densidad de la madera por lo que Garcidueñas *et al.* (1988) y Coomes *et al.* (2002) mencionaron que al construir modelos de regresión no lineal, la altura es un importante factor que ejemplifica bien la variación en los ecosistemas forestales.

Ensayando con varios modelos se decidió que este parámetro debía incluirse en la ecuación de biomasa total, ya que mejoraba la R^2 y reducía el error estándar (ver Cuadro 9). Los resultados concuerdan con lo que Jokela *et al.* (1986), Garcidueñas *et al.* (1988) y Zianis y Mencuccini (2003) quienes reportan que al incluir este parámetro, se redujo el error estándar.

La mayor parte de la biomasa del árbol se concentró en el fuste o fuste principal (36 a 85%) variando de acuerdo al tamaño del árbol. En los árboles menores de 15 cm de diámetro, el porcentaje de biomasa acumulada en el fuste es menor que la que se acumula en los otros componentes.

La proporción de biomasa del follaje respecto a la biomasa total del árbol presentó un comportamiento decreciente hasta que alcanzó un mínimo donde se volvió constante (alrededor de los 10 años de edad del árbol). Este resultado concuerda con los datos reportados por diversos autores (Castellanos *et al.*, 1996; De los Santos, 1993; Hiura, 2005; Tatsuhara y Kurashige, 2001) que mencionan que en los bosques naturales de coníferas, la biomasa del follaje por unidad de área incrementa hasta que el dosel se cierra, decrece un poco y permanece constante mientras el dosel continúe en esa condición debido al gasto fisiológico de mantener follaje fotosintéticamente inactivo.

En la región de La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo el *Pinus patula* crece naturalmente formado masas de bosque mesófilo, asociado con *Quercus laurina*, *Clethra mexicana* y *Cornus sp.* Rendowski (1981) y Gómez y Vázquez (1981) reportan a estas especies como propias del bosque mesófilo de montaña, asociadas frecuentemente con *Liquidambar styraciflua*, *Alnus sp.*, *Rapanea sp.*, y otras especies de encino como son *Q. microphylla* y *Q. excelsa*.

Estas masas (Áreas Naturales) dentro del estudio son las más representativas, ya que cuentan con la mayor superficie (78.45 ha), además de la diversidad más alta y los individuos más grandes (dn >20 cm y alturas >15 m) pero dispersos.

El dosel es cerrado pero se pueden distinguir dos estratos. En el dominante o superior se encuentran árboles de *Pinus patula*, *Quercus laurina* y en menor grado *Quercus rugosa*, con copas compactadas en la parte superior y fustes limpios en el caso de *P. patula*, mientras que los encinos presentan fustes casi rectos, con pocas ramas y copas compactas.

El segundo estrato está formado por varias especies de latifoliadas como son *Quercus excelsa*, *Clethra mexicana*, *Cornus sp*, y *Vaccinium sp* entre otras. Estos son árboles pequeños, poco ramificados, con copas escasas, la mayoría con bifurcaciones desde la base o a pocos centímetros del piso. Estos individuos están aglomerados en los claros que dejan las copas de los árboles del estrato superior, llegando incluso a que, en unas parcelas, la densidad de árboles pequeños (>2 cm de Dn) sea tan alta que no permiten el acceso.

Aguilar *et al.* (1992) mencionaron que este tipo de estratificación es propio de los bosques donde las coníferas predominan ya que la competencia por luz es el factor limitante del crecimiento. Por otro lado, Wang *et al.* (2000) reportan que en un bosque de coníferas con bajas condiciones de luminosidad existe una modificación a los patrones de ramificación y de estructura de las copas ya que se busca evitar al máximo el efecto del auto-sombreado, haciendo que el follaje fotosintéticamente activo se concentre en la parte superior que es donde hay más disponibilidad de luz.

Según Tatsuha y Kurashige (2001), el índice de área foliar, la biomasa y la producción primaria neta (NPP) están correlacionadas con las condiciones ambientales tales como el balance hídrico en la estación de crecimiento y temperatura en el mes más frío, modificando la estructura y composición de los bosques. Por lo que la distribución de la biomasa total hacia las ramas, fuste o follaje en bosques de coníferas va a ser el resultado de la adaptación de las especies a ambientes con bajas intensidades de luz, sequías y climas extremos.

En las áreas naturales es donde se presenta la mayor cantidad de biomasa y por consiguiente carbono (184.03 y 92.44 Mg ha⁻¹), producto de la diversidad de especies, la superficie del área de corta y de la presencia de los individuos dominantes del estrato superior.

La acumulación de biomasa y de carbono de *Pinus patula* aumenta gradualmente conforme el rodal adquiere mayor edad lo que concuerda con los resultados obtenidos por Wang *et al.* (2000), para un bosque mezclado de *Abies lasiocarpa* y *Betula papyrifera* y por Law *et al.* (2003) para un bosque maduro de *Pinus ponderosa*. Estos autores mencionan que la tasa de acumulación de carbono más alta se presenta en los rodales maduros y se mantiene constante hasta que el rodal supera los 200 años de edad.

El método "árboles padres" tiene como objetivo imitar los efectos de un fuerte disturbio natural permitiendo la regeneración que proviene de los mejores individuos que se dejan en pie. De este método se obtienen masas coetáneas que facilitan el manejo que se les da a los bosques naturales, como serían el control de malezas y plagas, aclareos, etc. Sin embargo, en el momento de efectuar la corta, el ecosistema sufre una grave alteración que trae como consecuencia un modificación en la estructura y composición florística (Axxelson y Östlund, 2001)

En el área cortada en 1982, año que correspondió a la primera corta, los árboles contaban con 24 años, diámetros de aproximadamente 20 cm y alturas superiores a los 15 m, formando rodales casi cerrados con sotobosque constituido por pastos, herbáceas y árboles de diversas especies de latifoliadas. En estos rodales la biomasa existente es de $166.60 \text{ Mg C ha}^{-1}$ mientras que el carbono es de $86.40 \text{ Mg C ha}^{-1}$. A pesar de que el contenido de biomasa y carbono en el área natural sea mayor (184.03 y $92.44 \text{ Mg C ha}^{-1}$), que en los árboles cortados en 1982, la diferencia es de 17.43 y $6.04 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Si consideramos que la edad promedio de las áreas naturales es de 80 años y la edad del rodal 1982 es de 24 años, se podría argumentar que la acumulación de carbono por año ($0.111 \text{ Mg C ha}^{-1}$) es muy baja o casi nula comparada con la acumulación que se da entre el año 1982 y 1983 ($3.42 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Sin embargo, es necesario resaltar que se debe cuantificar

la acumulación en edades superiores ya que no se cuenta con suficientes datos que permitan medir como es la acumulación en las etapas siguientes de estos bosques manejados.

6.2. Carbono

Los porcentajes de carbono por árbol y por componente no presentaron diferencias significativas entre árboles, ni entre componentes; por lo que se puede afirmar que la concentración de este elemento permanece constante desde que los árboles son brinzales hasta alcanzar el estado adulto. La concentración media de carbono fue de 51.825%, ° valor concuerda con los reportados para las coníferas arbóreas (50 a 53%) por Brown *et. al.* (1986), Acosta *et al.* (2001) y Gutiérrez y Lopera (2001).

7. LITERATURA CITADA

1. Acosta M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca. México. *Agrociencia* 36(6):725–736.
2. Acosta M., K. Quednow, J. Etchevers y C. Monreal. 2001. Un método para la medición de captura del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. **En:** Memoria del Congreso Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18 al 20 de Octubre. Valdivia, Chile. Resumen No. 11.
3. Aguilar A. A., y R. Razo Z. 1995. Aviso de acción preliminar de la UCODEFO No. 2 Zacualtipán, Hidalgo. México. 12 p.
4. Aguilar M., J. C., L. Cruz M., A. Velázquez M. y J. J. Vargas H. 1992. Relación ecológico-silvícola entre la regeneración natural de *Pinus patula* y *Baccharis conferta*. *Agrociencia* 2(1):27–39.
5. Apps, M. J., W. A. Kurz, R. J. Luxmoore, L. O. Nilsson, R. A. Sedjo, R. Schmidt, L. G. Simpson and T. S. Vinson. 1993. Boreal forest and tundra. *In:* Wisniewski, J. & R. N. Sampson (eds.) *Terrestrial biosphere carbon fluxes: quantification and sources of CO₂*. Kluwer Academic Pub. pp. 39-53.
6. Arteaga M. B., M. A. Musálem S. y A. Trinidad S. 1988. Índice de sitio para *Pinus patula* Schl. Et Cham., en la región Chignahuapan –Zacatlan, Puebla. *Agrociencia* 72:133-141.
7. Axelsson, A. L. and L. Östlund. 2001. Retrospective gap analysis in a Swedish boreal forest landscape using historical data. *For. Ecol. Manage.* 147:109–122.
8. Barskerville, G. L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. For. Res.* 2:49–53.

9. Bhartari, S. K. 1986. Biological productivity and nutrient cycling in *Pinus patula* plantations of Darjeeling Hills. *The Indian Forester* 112: 187 – 201.
10. Bebi, P., F. Kienast and W. Schönenberger. 2001. Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests dynamics and protective function. *For. Ecol. Manage.* 145:3–14.
11. Borgo G. 2000. El pino patula en la región de Sabie, Noreste de la República de Sudáfrica. *Forestal XXI* 3(4):20–21.
12. Bown, H. 1992. Biomasa en bosques de Lengua (*Nothofagus pumilio* Krasser) en la provincia de Ultima Esperanza, XII región. Tesis Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 63 p.
13. Brosovich G., M. M. 1998. Determinación del rendimiento para *Pinus patula* Schl. *et* Cham., en la región de Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis. Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 95 p.
14. Brown, S. 1999. Land–Use and Forestry Carbon–Offset Projects. Win rock International Institute for Agricultural Development. USAID Environment Officers. Training Workshop. Arlington, Virginia. 41 p.
15. Brown, S. L, M. Burnham, M. Delaney, R. Vaca, M. Powell y A. Moreno. 2000. Issues and challenges for forest-based carbon offset projects: A case study of the Noel Kempff climate action project in Bolivia. *Mitigation and adaptation strategies for global change* 5:99–121.
16. Brown, S. L., P. Schroeder and J. S. Kern. 1999. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *For. Ecol. Manage.* 123:81–90.
17. Brown, S., Lugo A. and Chapman, J. 1986. Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Can. J. For. Res.* 16: 390-394.
18. Brown, S., M. Burnham, M. Delaney, R. Vaca, M. Powell y A. Moreno. 2000. Issues and challenges for forest-based carbon offset projects: A case study of the Noel Kempff climate action project in Bolivia. *Mitigation and adaptation strategies for global change* 5:99–121.

19. Canadell, J., M. Riba y P. Andrés. 1988. Biomass equations for *Quercus ilex* L. in the Montseny Massif, Northeastern Spain. *Forestry* 61:137–147.
20. Carey, E. V., A. Sala, R. Keane and R.M. Callaway. 2001. Are old forests underestimated as global carbon sinks? *Global Change Biology* 7:339–344.
21. Castellanos B., J. F. 1993. Producción de biomasa y eficiencia de crecimiento en rodales coetáneos de *Pinus patula*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 75 p.
22. Castellanos B., J.F., A. Velázquez M., J. Vargas H, C. Rodríguez F. y A. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30:123-128.
23. 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). Institute of Terrestrial Ecology, Huntingdon. pp. 137–159.
24. Colter B., E., R. E. Will, G. A. Barron-Gafford, R. O. Teskey and B. Shiver. 2003. Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities. *For. Sci.* 49(2):224–234.
25. Comisión para la Cooperación Ambiental. 2001. México y el incipiente mercado de emisiones de carbono. Oportunidades de inversión para pequeñas y medianas empresas en la agenda sobre cambio climático mundial. Comisión para la Cooperación Ambiental. Québec, Canadá. 150 p.
26. Coomes, D. A., R. B. Allen, N. A. Scott, C. Goulding and P. Beets. 2002. Designing systems to monitor carbon stocks in forests and shrublands. *Forest Ecology and Management* 164:89–108.
27. Chen, H. Y. and K. Klinka. 2003. Aboveground productivity of western hemlock and western redcedar mixed-species stands in southern coastal British Columbia. *Forest Ecology and Management* 184:55–64.
28. De Jong H. J., B. 2001. Cambio de uso de suelo y flujos de carbono en Los Altos de Chiapas, México. ***In*** Memorias del Simposio Internacional

Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18 al 20 de Octubre del 2001. Valdivia, Chile. Resumen No. 2.

29. De Jong, H. J. B, M. A. Cairns, P. K. Haggerty, N. Ramírez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, M. González-Espinosa and I. March-Mifsut. 1999. Land-Use change and carbon flux between 1970s and 1990s in central highlands of Chiapas, Mexico. *Environmental Management* 23(3):373-385.
30. De los Santos P., H. M., A. Velázquez M. y H. Ramírez M. 1993. Modelos de crecimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula* Schl. et Cham. aclareados a diferentes intensidades. **In:** Resúmenes del I Congreso Mexicano sobre Recursos Forestales. Saltillo, Coahuila. pp 44.
31. De Vries, P. 1986. Sampling theory for Forest inventory. Springer Verlag. Berlin-Heidelberg. 399 p.
32. Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler, and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185–190.
33. Domínguez A., F. A., M. Rodríguez A. y C. Mallén R. 1997. Evaluación de 4 intensidades de poda en una plantación de *Pinus patula* en la Región de Huayacocotla, Veracruz. *Ciencia Forestal* 22(82):45–32.
34. Espinosa-Bancalari, M. A. and D. A. Perry. 1987. Distribution and increment of biomass in adjacent young Douglas-fir stands with different early growth rates. *Canadian J. For. Res.* 17:722–730.
35. Etchevers J., M. Acosta, C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. **In** Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18 al 20 de Octubre del 2001. Valdivia, Chile. Resumen No. 9. IUFRO.
36. Figueroa N.C., J. D. Etchevers B., A. Velázquez M. y M. Acosta M. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra* 23:57–64.

37. Fournier, R.A., J.E. Luther, L. Guindon, M.C. Lambert, D. Piercey, R.J. Hall and M.A. Wulder. 2003. Mapping aboveground tree biomass at the stand level from inventory information: test cases in Newfoundland and Quebec. *Can. J. For. Res.* 33:1846–1863.
38. Fundación Solar. 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. L. Márquez, A. Roy y E. Castellanos. (eds). Fundación Solar. Guatemala, Guatemala. 36 p.
39. García E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía de la UNAM. México. 217 p.
40. Garcidueñas M., A. R. 1987. Producción de biomasa y acumulación de nutrientes en un rodal de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 243 p.
41. Garcidueñas M., A. R., M. R. Keyes, G. P. Zarate de Lara y M. R. Martínez Menes. 1988. Estimación de Biomasa para árboles de *Pinus montezumae* Lamb. Sistemas de Producción Forestal en Bosques Templados. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. *Agrociencia*. 72: 27-40 .
42. Gay, C. and J. Martinez. 1995. Mitigation of emissions of greenhouse gases in México. *Interciencia* 20(6):336-342.
43. Gómez D., J.D. 2008. Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo de dos tipos de vegetación en la Reserva de la Biosfera "Sierra de Huautla", Morelos, México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 194 p.
44. Gómez-Pompa, A. and C. Vázquez-Yanes. 1981. Successional studies of a rain forest in Mexico. *In*: Forest succession. Concepts and application. D. C. West, H. H. Shugart and D. B. Botkin (eds.). Springer-Verlag. New York, U.S.A. pp. 246 - 266.
45. Grier, C. C., Lee, K. M. and Archibald, R. M. 1984. Effect of urea fertilization on allometric relations in young Douglas-fir trees. *Can. J. F. Res.* 14: 900-904.

46. Gutiérrez V, V.H. y G.J. Lopera A. 2001. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. **En:** Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales.18 al 20 de Octubre del 2001. Valdivia-Chile. Resumen No. 10.
47. Hairiah, K., Sitompul, S. M., Van Noodwick My Palm C. 2001. Methods for sampling carbon stocks above and below ground. International Centre for Research in Agroforestry. Southeast Asian Regional Research Programme Bogor, Indonesia.
48. Hall, G. M. J., S. K. Wiser, R. B. Allen, P. N. Beets and C. J. Goulding. 2001. Strategies to estimate national carbon stocks from inventory data: the 1990 New Zealand baseline. *Global Change Biology* 7:389–403.
49. Hashimoto, T., K. Kojima, T. Tange and S. Sasaki. 2000. Changes in carbon storage in fallow forests in the tropical lowlands of Borneo. *For. Ecol. Manage.* 126:331–337.
50. Hepp, T. E. and G. H. Brister. 1982. Estimated crown biomass in loblolly pine plantations in the Carolina Flatwoods. *For. Sci.* 28:115–127.
51. Hernández L., A. M. Martínez R., J. Vargas H., A. Velázquez Martínez y G. Angeles P. 1994. Influencia de aclareos sobre la relación madera temprana/madera tardía a diferentes alturas del fuste en *Pinus patula*. In: Simposio y II Reunión Nacional de Silvicultura y Manejo de Recursos Forestales. Resúmenes de Ponencias. Montecillo, México. p.36.
52. Hiura, T. 2005. Estimation of aboveground biomass and net biomass increment in a cool temperate forest on a landscape scale. *Ecol. Res.* 20:271–277.
53. Hoshizaki, K., K. Niyama, K. Kimura, T. Yamashita, Y. Bekku, T. Okuda. E. S. Quah and N. Supardi. 2004. Temporal and spatial variation of forest biomass in relation to stand dynamics in a mature, lowland tropical rainforest, Malaysia. *Ecol. Res.* 19: 357 – 363.
54. Houghton, J.T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Nogueira, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson (eds.). 2001. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment* Cambridge University Press, Cambridge, UK. 94 p.

55. Houghton, R. A. 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology* 11:945–958.
56. Houghton, R. A., E. A. Davidson and G. M. Woodwell. 1998. Missing sinks, feedbacks and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. *Global Biogeochemistry Cycles* 12:25–34.
57. INE (Instituto Nacional de Ecología. 2006. Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero. 1990 – 2002. http://www.ine.gob.mx/cclimatico/descargas/inegei_res_ejecutivo.pdf
Consulta: 18 de Enero de 2008.
58. INEGI. 1991. VII Censo ejidal. Ejidos y comunidades agrarias. Superficie y actividad principal. <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/hidalgo/municipios/13081a.htm>
Consulta: 11 de Julio del 2006.
59. INEGI. 1996. Zacualtipán de Ángeles, estado de Hidalgo. Cuaderno Estadístico Municipal. Edición 1995. Aguascalientes, Méx. 105 p.
60. Ingerslev, M. 1999. Above ground biomass and nutrient distribution in a limed and fertilized norway spruce (*Picea abies*) plantation. Part I. Nutrient concentrations. *For. Ecol. Manage.* 119:13–20.
61. Ingerslev, M. and L. Hallbäck. 1999. Above ground biomass and nutrient distribution in a limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies*) plantation. Part II. Accumulation of biomass and nutrients *For. Ecol. Manage.* 119:21–38.
62. Intergovernmental Panel of Climate Change. 2000. Summary for policymakers. A special report of Working Group III. Ginebra, Sw.
63. IPCC. 2001. Summary for policymakers. A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (<http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01pdf>. Julio 31, 2001)

64. Jokela, E.J., C.A. Shannon and E.H. White. 1981. Biomass and nutrient equations for mature *Betula papyrifera* Marsh. Can. J. For. Res. 11:298–304.
65. Laiho, R., F. Sánchez, A. Tiarks, P. M. Dougherty and C. C. Trettin. 2003. Impacts of intensive forestry on early rotation trends in site carbon pools in the southeastern US. For. Ecol. Manage 174:177–189.
66. Law, B. E., O. J. Sun, J. Campbell, S. Van Tuyl and P. E. Thorton†. 2003. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of a ponderosa pine. Global Change Biology 9:510–524.
67. Lefsky, M. A., W. B. Cohen, D. J. Harding, G. G. Parker, S. A. Acker and S. T. Gower. 2002. Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes. Global Ecology Biogeography 11:393–399.
68. Lopera A, G.J. y V.H. Gutiérrez V. 2001. Flujo de carbono y respuesta a diferentes estrategias de manejo en plantaciones tropicales de *Pinus patula*. **En:** Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18 al 20 de Octubre del 2001. Valdivia-Chile. Resumen No. 8.
69. Lundgren, B. 1979. Soil conditions and nutrient cycling under natural and plantation forest in Tanzania highlands. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Soil. 429 p.
70. Malhi, Y., D. D. Baldocchi and P. G. Jarvis. 1999. The Carbon Balance of Tropical, Temperate and Boreal Forests. Plant, Cell and Environment 56:715-740.
71. Masera O. 2002. Bosques y cambio climático en América Latina. Análisis y perspectivas. En: La transición hacia el desarrollo sustentable. Perspectivas de América Latina y el Caribe. E. Leff, E. Ezcurra, I. Pisanty y P. Romero L. (Eds). SEMARNAT, Instituto de Ecología, Universidad Autónoma Metropolitana, Organización de las Naciones Unidas. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. pp 211 – 235.
72. Monreal C.M., J. Etchevers B., M. Acosta M., C. Hidalgo M., J. Padilla, R.M. López, L. Jimenez S. y A. Velázquez M. 2005. A method for measuring

above- and below-ground C stocks in hillsides landscapes. *Can. J. Soil Sci.* 85:523-530.

73. Poder Ejecutivo Federal. 2009. Programa estratégico de cambio climático. SEMARNAT.
74. Oliver, C. D. and B. C. Larson. 1990. *Forest Stand Dynamics*. McGraw-Hill, New York, 467 p.
75. Ordóñez J. A., B. H. J. De Jong y O. Masera. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en San Juan Nuevo Michoacán. *Madera y Bosques* 7(2):27-47.
76. Ortega P., N., B. Arteaga M. y A. Velázquez M. 1993. Evaluación de áreas de regeneración de pino en la sierra norte de Puebla. *Agrociencia* 3(1):47 –59.
77. Parresol, B.R. 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45:573–593.
78. Pastor, J., J.D. Aber, C.A. McLaugherty, and J.M. Melillo. 1984. Aboveground production and N and P cycling along a nitrogen mineralization gradient on Blackhawk Island, Wisconsin. *Ecology* 65:256–258.
79. Peng, C. 2000. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. *For. Ecol. Manage.* 132:259–279.
80. Perry, D. A. 1994. *Forest ecosystems*. Johns Hopkins University Press. Baltimore, U. S. A. pp 187 - 193.
81. Perry, J. S. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press, Inc. New York, USA. 231 p.
82. Phillips O. L., Y. Malhi, N. Higuchi, W.F. Laurance, P.V. Nunez, R.M. Vasquez, S.G. Laurance, L.V. Ferreira, M. Stern, S. Brown and J. Grace. 1998 Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science* 282:439–442.

83. Porté, A., P. Trichet, D. Bert and D. Loustau. 2002. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *For. Ecol. Manage.* 158:71–83.
84. Post, W.M., T.H. Peng, W.R. Emanuel, A.W. King, V.H. Dale, and D.L. De Angelis. 1990. The global carbon cycle. *Am. Sci.* 78:310–326.
85. Price, D.T., D. H. Halliwell, M. J. Apps, W. A. Kurz, and S. R. Curry. 1997. Comprehensive assessment of carbon stocks and fluxes in a Boreal–Cordilleran Forest management unit. *Can. J. For. Res.* 27:2005–2016.
86. Rapp, M., I. Santa Regina, M. Rico and H. A. Gallego. 1999. Biomass, nutrient content, litterfall and nutrient return to the soil in Mediterranean oak forests. *For. Ecol. Manage.* 119:39–49.
87. Reyero H. V. del P. 2001. Efecto de la vegetación competidora en la regeneración natural y plantación de *Pinus patula* Schl. Et Cham. Tesis de Maestría en Ciencia. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 62 p.
88. Rzedowski, J. 1981. Vegetación de México. Editorial Limusa. México. D.F. 432 p.
89. Sampson N., R., M. Apps, S. Brown, C. V. Cole, J. Downing, L. S. Heath, D. S. Ojima, T. M. Smith, A. M. Solomon and J. Winsniewski. 1993. Workshop summary statement: Terrestrial biosphere carbon fluxes -- Quantification of sinks and sources of CO₂. *Water, air and soil pollution* 70 (1 – 4):3 – 15.
90. Santa Regina, I. 2000. Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata Mountains, Salamanca, Spain. *For. Ecol. Manage* 132:127–141.
91. Santa Regina, I. S., T. Tarazona and R. Calvo. 1997. Aboveground biomass in a beech forest and a Scots pine plantation in the Sierra de la Demanda area of northern Spain. *Annual Forest Science* 54:261–269.
92. Satoo, T. and H. A. I. Madgwick. 1982. Forest biomass. The Hague: Martinus Nijhoff. Dr. W. Junk, Publishers.152 p.

93. Schimel, D., J. G. Enting, M. Heimann, T. M. L. Wigley, D. Raynaud, D. Alves, and U. Siegenthaler. 2000. CO₂ and the carbon cycle. Extracted from IPCC report, "climate change, 1994". *In*: The carbon cycle. T. M. L. Wigley y D. S. Schimel (eds). Cambridge University Press. New York, USA. pp. 93–10.
94. Schlesinger, W. H. 2000 Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 82:121 – 127.
95. Schroeder, P., S. Brown, J. Mo, R. Birdsey, and C. Cieszewski. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States. using inventory data. *For. Sci.* 43(3):424–434.
96. Schulze, E.D., C. Wirth, and M. Heimann. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* 289:2058–2059.
97. Sedjo A., R. 1990. The global carbon cycle. Are forests the missing sink? *J. For.* 88(10):33-34.
98. Shutou, K. and K. Nakane. 2004. Change in soil carbon cycling for stand development of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations following clear – cutting. *Ecol. Res.* 19(2):233 – 244.
99. Son, Y., H. Park, M. J. Yi, H. O Jin, D. Y. Kim, R. H. Kim and J. O. Hwang. 2004. Biomass, production and nutrient distribution of a natural oak forest in central Korea. *Ecol. Res.* 19:21–28.
100. Stuart, M. D. and Moura Costa, P. 1998. Climate Change Mitigation by Forestry: a Review of International Initiatives. Policy that works for forests and people series no. 8 Discussion paper. International Institute for Environment and Development, London. 81 p.
101. Tatsuhara, S. and H. Kurashige. 2001. Estimating foliage biomass in a natural deciduous broad-leaved forest area in a mountainous district. *For. Ecol. Manage.* 152:141–148.
102. Van Lear, D. H., J. B. Waide and M. J. Teuke. 1984. Biomass and nutrient content of a 41 – year – old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation on a poor site in South Carolina. *For. Sci.* 30(2):395–404.

103. Vanclay, J.K., 1995. Growth models for tropical forests: a synthesis of models and methods. *For. Sci.* 41:7–42.
104. Wang R. J., T. Letchford, P. Corneau and J. P. Kimmins. 2000. Above- and below- ground biomass and nutrient distribution of a paper birch and subalpine fir mixed – species stand in the sub-boreal spruce zone of British Columbia. *For. Ecol. Manage.* 130:17–26.
105. Waring, R. H. and W. H. Schlesinger. 1985. *Forest ecosystems: Concepts and management.* Academic Press. Orlando, Fl. 340 p.
106. Whitmore, T. C. 1984. *Tropical rain forests in the far East.* Clarendon press, Oxford, United Kingdom, 2nd ed, 352 pp.
107. Wu, Y. and A. H. Strahler. 1994. Remote estimation of crown size, stand density and biomass on the Oregon transect *Ecol. App.* 4(2): 299 – 312.
108. Xiao, C. W., J. C. Yuste, I. A. Janssens, P. Roskams, L. Nachtergale, A. Carrara, B. Y. Sanchez and R. Ceulemans. 2003. Above- and belowground biomass and net primary production in a 73-year-old Scots pine forest. *Tree Physiology* 23:505–516.
109. Yarie, J. and S. Billings. 2002. Carbon balance of the taiga forest within Alaska: present and future. *Can. J. For. Res.* 32:757–767.
110. Zepeda B., E. M. y M. A. Mendoza B. 1992. Predictor de rendimientos probables de madera para *Pinus patula* en Veracruz, México. *Agrociencia* 2(3):23–4.
111. Zianis, D. and M. Mencuccini. 2003. Aboveground biomass relationships for beech (*Fagus moesiaca* Cz.) trees in Vermio Mountain, Northern Greece, and generalized equations for *Fagus* sp. *Annual Forest Science* 60:439–448.