

Consuelo Marisel Figueroa-Navarro ¹, Gregorio Ángeles-Pérez ²,
Alejandro Velázquez-Martínez ² y Héctor Manuel de los Santos-Posadas ²

RESUMEN

Con el objetivo de estimar la cantidad de biomasa en la vegetación arbórea de bosques manejados de *Pinus patula* se realizó el presente estudio en el Ejido La Mojonera, en Zacualtipán, Hidalgo, México. Este ejido cuenta con un plan de manejo forestal bajo el sistema silvícola de "Árboles padres". El bosque está dividido en áreas de corta señaladas con la anualidad en la que se ha efectuado la corta de regeneración. Para estimar la biomasa aérea de *P. patula* se ajustaron ecuaciones simultáneas de regresión tomando en cuenta los diferentes componentes de la estructura de un árbol (fuste, ramas, follaje y corteza). La cantidad de biomasa arbórea del bosque manejado se obtuvo aplicando las ecuaciones generadas y mediante datos de inventario. La biomasa contenida en el arbolado incrementó con una tasa de 6.7 Mg ha⁻¹ en 25 años. El rodal que había sido cortado en 1982 (rodal de mayor edad producto de la corta) presentó una acumulación de biomasa relativamente similar a la contenida en el arbolado de un área que aún no ha sido intervenida (166.6 y 184.03 Mg ha⁻¹, respectivamente). Por tanto, es posible aseverar que los bosques manejados funcionan eficientemente como fijadores y sumideros de carbono, considerando el esquema de manejo que se esté aplicando.

Palabras clave: Almacenamiento de carbono, biomasa, cronosecuencia, productividad primaria, secuestro de carbono, Zacualtipán.

ABSTRACT

This study was carried out to estimate the aboveground biomass in the tree layer of managed *Pinus patula* forests, at the Ejido La Mojonera, Hidalgo, Mexico. This Ejido has a forest management plan based on the "seed-tree" method as a silvicultural system. The forest is divided into stands identified with the year when the regeneration cutting was applied. To estimate the biomass of *P. patula* simultaneous regression equations were adjusted taking into account the different structural components of the trees (stem, branches, foliage, and bark). The amount of tree biomass of the managed forest was obtained using the fitted equations and data from a forest inventory. The aboveground biomass in the tree layer increased with a rate of 6.67 Mg ha⁻¹ in 25 years. The stand harvested in 1982 (the oldest stand originated after the regeneration cutting) showed a biomass accumulation relatively similar to that in the natural forest (166.6 and 184.03 Mg ha⁻¹, respectively). According to our results, it is possible to state that managed forests can efficiently fix CO₂ from the atmosphere and might become effective carbon sinks.

Key words: Carbon storage, biomass, chronosequence, primary production, carbon sequestration, Zacualtipan.

Fecha de recepción: 03 de diciembre de 2009.

Fecha de aceptación: 09 de junio de 2010.

INTRODUCCIÓN

El ciclo del carbono en los ecosistemas terrestres está determinado por la producción primaria neta (PPN), la producción primaria bruta (PPB), la tasa de respiración y los patrones de crecimiento (Waring y Schlesinger, 1985; Perry, 1994; Schulze, 2000; Schimel *et al.*, 2000). Los bosques a escala global fijan y almacenan grandes cantidades de carbono y llegan a controlar hasta 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 guardan grandes cantidades de carbono durante toda su vida, aun cuando también pudieran constituir 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 25% del CO₂ emitido a la atmósfera por combustibles fósiles; sin embargo Stuart y Moura-Costa (1998) mencionan que la deforestación contribuye con 20% de las emisiones anuales de este gas. El Instituto Nacional de Ecología 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 14% de la emisión neta de CO₂, por lo que su rol como sumidero de carbono requiere de mayor investigación INE (2006).

La estimación de las reservas de carbono en un ecosistema puede realizarse mediante el cálculo de la biomasa arbórea, el contenido de carbono en el suelo, en el mantillo, en la capa de fermentación y en hierbas y arbustos. La primera es un elemento importante en el manejo sustentable de los ecosistemas (Zianis y Mencuccini, 2003).

Los cambios en la acumulación de biomasa y, en consecuencia, en el contenido de carbono pueden ser resultado de actividades humanas, procesos de sucesión natural, calidad de sitio, exposición, condiciones climáticas y degradación; por ello, es posible comparar por medio de la biomasa la estructura y atributos funcionales de los ecosistemas forestales en un intervalo de condiciones climáticas similares (Schroeder *et al.*, 1997). Su distribución en los diferentes componentes de un árbol hace posible determinar

¹ Comisión Nacional Forestal. Correo-e: cfigueroa@conafor.gob.mx

² Programa Forestal, Colegio de Postgraduados.

los depósitos 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 en ecosistemas forestales es el de cronosecuencias, ya que además lo asocia con el desarrollo del bosque y analiza sus implicaciones con la etapa en que se encuentra al momento del estudio (Law *et al.*, 2003).

En México son pocos los trabajos diseñados para medir los reservorios de carbono, entre los cuales pueden citarse los que se han llevado a cabo en el sureste de México (de Jong, 2001; de Jong *et al.*, 1999); en la Sierra Norte de Oaxaca (Etchevers *et al.*, 2001; Acosta *et al.*, 2002); en el bosque tropical estacionalmente seco (Gómez, 2008) y en el centro occidente (Ordóñez *et al.*, 2001; 2008). Sin embargo, aún 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 total del ecosistema, situación que es debida en esencia al tiempo requerido para que un bosque se establezca, madure y se coseche.

Al respecto, Jandl *et al.* (2007) hicieron una síntesis relativa a la influencia de las prácticas silvícolas en el secuestro de carbono y concluyeron que los bosques manejados con turnos largos aseguran un menor disturbio debido a las operaciones de extracción. A pesar de ello, el efecto de la cosecha dependerá de si los residuos se contabilizan como aporte o pérdida de carbono al suelo. Por otro lado, Roxburgh *et al.* (2006) demostraron que bosques templados de Australia, en la fase posterior a su aprovechamiento, tienen el potencial para almacenar cantidades significativas de carbono, con acumulación de biomasa hasta de 60% aproximadamente.

El estudio que se describe a continuación se desarrolló en el Ejido La Mojenera, en el municipio de Zacualtipán, Hidalgo, con el objetivo de estimar la cantidad de biomasa aérea presente en el componente arbóreo de bosques manejados de *Pinus patula* Schltdl. et Cham., donde el rodal más joven tenía 5 años y el más viejo 24, producto de la corta de regeneración. La edad del bosque natural es de alrededor de 80 años.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en el Ejido La Mojenera, que está localizado en el municipio de Zacualtipán, Hidalgo (20° 34' y 20° 45' latitud norte y 98° 25' y 98° 42' longitud oeste) (Figura 1). La topografía es de 12% con exposición suroeste y zenital. Las rocas predominantes son las ígneas extrusivas de la Era Cenozoica (INEGI, 1996). Presenta principalmente suelos profundos, con un alto contenido de materia orgánica, de tipo Luvisol órtico - crómico y Cambisol eútrico (INEGI, 1996). El clima es templado húmedo con lluvias la mayor parte del año y el porcentaje de precipitación invernal >5. La temperatura media anual es de 12.7°C y la precipitación es de 1901 mm (García, 1988). La vegetación natural corresponde a bosque templado, que exhibe la asociación vegetal *Pinus patula* - *Quercus* spp. (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 o nulo valor comercial.

Estimación de biomasa

Con el fin de abarcar todas las categorías diamétricas que se incluyen en el plan de manejo de la zona, se estimó la biomasa aérea por componente estructural (fuste, ramas, follaje, corteza) a través de una selección aleatoria de 18 árboles, los cuales se derribaron, se midió su altura y se obtuvieron trozas de dimensiones comerciales. Las trozas se cortaron a 1.27 m en los árboles pequeños, mientras que en los grandes a 2.54 m; por esto, el número de muestras por árbol fue variable, dependiendo de la longitud del fuste. Desde donde inicia, la copa del árbol se dividió en tres partes iguales, por lo que la longitud de cada sección estuvo en función del tamaño de esta estructura.

Los árboles ya cosechados se separaron en sus componentes estructurales por sección de la copa. Se cortó una rodaja de 5 cm de grosor por cada dos trozos de fuste. Cuando el número de troza resultó impar se colectó una rodaja de la última troza. Las trozas se etiquetaron en secuencia consecutiva con el número del árbol y la sección del fuste correspondiente; se pesaron en campo en una báscula marca Token con plataforma con capacidad de 1,000 kg y una precisión de 1kg.

A las rodajas seleccionadas, se les removió la corteza y de igual manera, se determinó el peso fresco al momento de obtenerlas. El follaje se separó de las ramas en cada una de las secciones de la copa; se pesó en fresco y se obtuvo una muestra alícuota, a la que a su vez se le calculó el peso fresco. También se registró el correspondiente a las ramas, de lo que resultó una muestra compuesta de follaje y una de ramas de cada sección de la copa.

Las muestras del fuste principal (rodajas), follaje, corteza, y ramas se transportaron al laboratorio en donde se secaron en una estufa de circulación forzada marca Shel-lab, modelo FX14 a 70°C por 48 h hasta peso constante.



Figura 1. Localización del área de estudio.

Se registró el peso seco de cada una de las muestras por componente. Mediante la diferencia entre el peso fresco y el peso seco de las muestras se determinó el contenido de humedad; este valor se descontó al peso fresco de cada una de las secciones del fuste y de la copa, y de esta forma se obtuvo la biomasa por componente estructural de todo el árbol.

Análisis de regresión

Se ajustaron ecuaciones simultáneas de biomasa por regresión, relacionando el diámetro normal, la altura total la biomasa individual. Se generó una serie de ecuaciones en las que la estimación de la biomasa total es igual a la suma de la biomasa estimada por componente. Los estimadores D, E y WW representan la proporción que tiene cada componente (corteza, ramas y fuste) respecto a la biomasa total. Sin embargo, en el caso del follaje, al emplear la proporción de la biomasa total, ésta se sobrestimaba, por lo que se ajustó una ecuación particular para este componente de la forma:

$$BF = \beta O * (Exp^{-C/DAP})$$

Donde:

βO = Parámetros

C= Parámetros

DAP= Diámetro normal.

La biomasa de otras especies se obtuvo a través de las ecuaciones generadas por Acosta et al. (2002) (Cuadro 1).

Inventario

El Ejido cuenta con una superficie bajo manejo de 193 ha, que está segmentada en áreas que corresponden al año en que se realizó la corta de regeneración. En cada una se establecieron aleatoriamente tres sitios de muestreo de 400 m² (20 x 20 m), que se dividieron en cuatro cuadrantes. En cada cuadrante se marcaron los árboles con diámetro normal superior a 2 cm, los cuales fueron identificados y además del diámetro, se les midió la altura al fuste limpio y la altura total.

se incluyó la altura total del árbol en la ecuación de biomasa total, ya que tuvo un coeficiente de determinación alto (R²) y el más bajo Cuadrado Medio del Error (Cuadro 2). En la Figura 2 se ilustra la relación de la biomasa con el árboles individuales (fuste, follaje, ramas y corteza) así como las ecuaciones obtenidas. El alto valor de R² para todos los casos indica que existe una relación estrecha entre el diámetro y la biomasa de cada uno de los componentes estructurales, es decir, a mayor diámetro, se espera una mayor acumulación de biomasa; de ahí el concepto de alometría (Huxley, 1932).

La proporción de biomasa de los diferentes componentes estructurales varió de acuerdo al tamaño del árbol. Así, en aquellos árboles menores de 15 cm de DAP, el porcentaje de biomasa del fuste aumentó en relación directa al diámetro, con un valor máximo cercano al 80%. La biomasa del follaje representó entre 10 y 31% de la biomasa total, con un comportamiento decreciente con el tamaño del árbol, hasta alcanzar una proporción mínima, para después permanecer más o menos constante (alrededor de 10 cm de diámetro normal). Por su parte, la correspondiente a la biomasa en las ramas y en la corteza se mantiene relativamente constante en árboles independiente de su tamaño, estabilizándose en alrededor el 10%, aunque hasta los 15 a 20 cm de diámetro normal, se observó una disminución en dicha proporción.

Estimación de biomasa por rodal

La mayor densidad de individuos en el bosque manejado del Ejido La Mojenera corresponden a *Pinus patula*, seguida por *Quercus laurina* Humbert Bonpl., y en menor medida por *Clethra mexicana* DC y *Cornus excelsa* HBK. Estas especies son características del bosque mesófilo de montaña, asociadas frecuentemente con *Liquidambar styraciflua* L., *Alnus* spp., *Rapanea* spp. y otras especies de encino como son *Quercus microphylla* Née y *Q. excelsa* Liebm. (Rzedowski, 1981). En el Cuadro 3 se muestra la distribución de la biomasa de *Pinus patula* por componente estructural y por el año en el que se aplicó la corta de regeneración. Asimismo, se indica la biomasa contenida en especies latifoliadas.

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas de biomasa total de especies de bosque mesófilo de montaña.

Especie	Ecuación	R ²
<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., 2002

RESULTADOS

Estimación de la biomasa de árboles individuales de *Pinus patula*

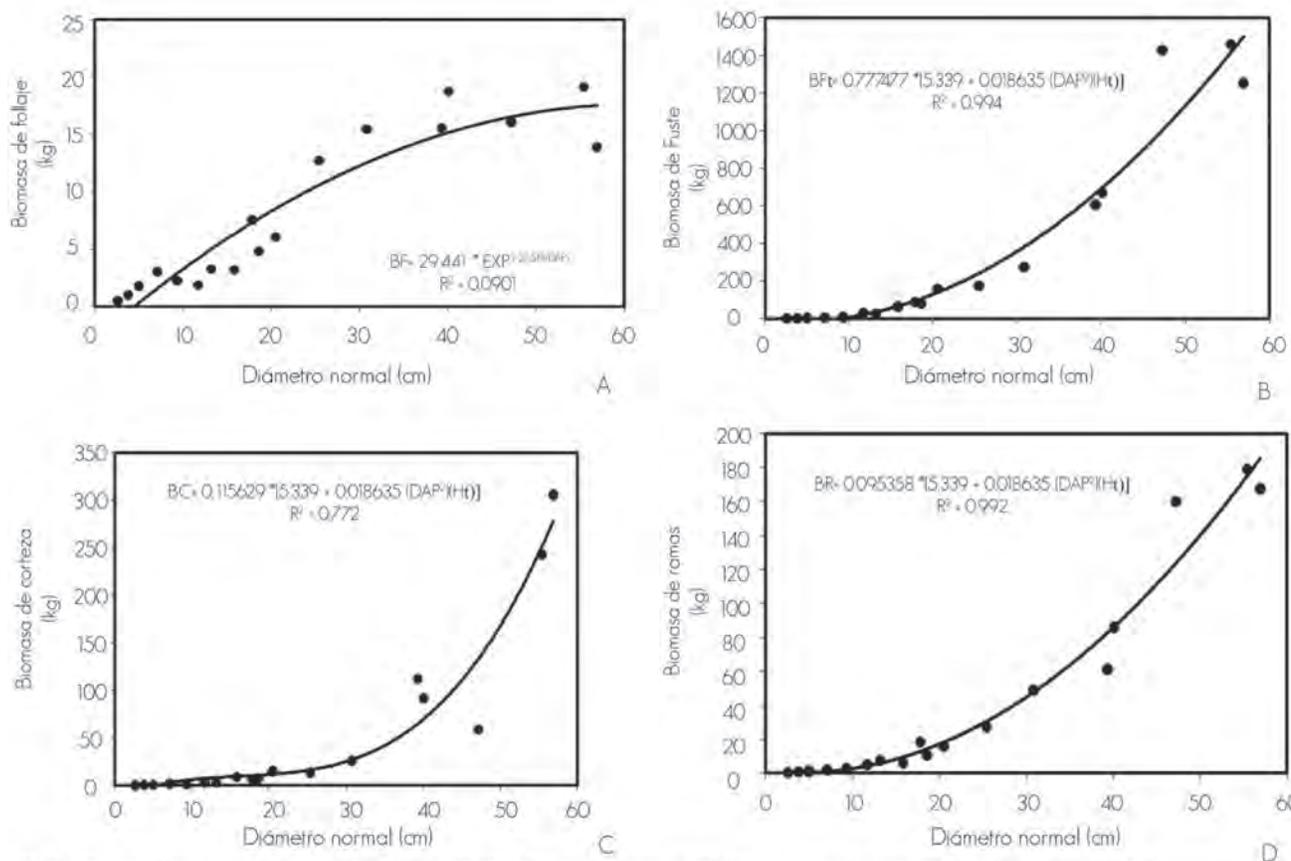
Los estimadores de regresión se muestran en el Cuadro 2. De los modelos probados, el que mejor ajuste presentó fue en el que

El área natural es la que reúne los valores de biomasa de componentes estructurales de *Pinus patula* más altos, ya que en esta porción del bosque es donde están los árboles con los diámetros y alturas más grandes (>25 cm de DAP y >20 m de altura), aunque su distribución es dispersa. También es aquí donde se registra la mayor biomasa en especies de latifoliadas asociadas a *Pinus patula*.

Cuadro 2. 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
Biomasa total BT = $\beta_0 + A * DAP^2 * Ht$					
β_0	5.338	31.363	0.170	0.8670	0.974
A	0.018635	0.755	24.660	0.0001	0.974
Follaje BF = $\beta_0 * (Exp^{-C/DAP})$					
β_0 (Follaje)	29.440	3.393	8.680	0.0001	0.901
C	26.519	3.821	6.940	0.0001	0.901
Ramas BR = (D (Biomasa total))					
D	0.095	0.002	55.790	0.0001	0.992
Fuste BFt = (E (Biomasa Total))					
E	0.777	0.012	62.440	0.0001	0.994
Corteza BC = (WW (Biomasa total))					
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.



IA) BF = Biomasa de follaje; (B) BFt = Biomasa de fuste; (C) BC = Biomasa de corteza; (D) BR = Biomasa de ramas. DAP = Diámetro normal; Ht = Altura total.

Figura 2. Relación de biomasa de componentes estructurales y diámetro normal de árboles *Pinus patula* en La Mojonera, Hidalgo

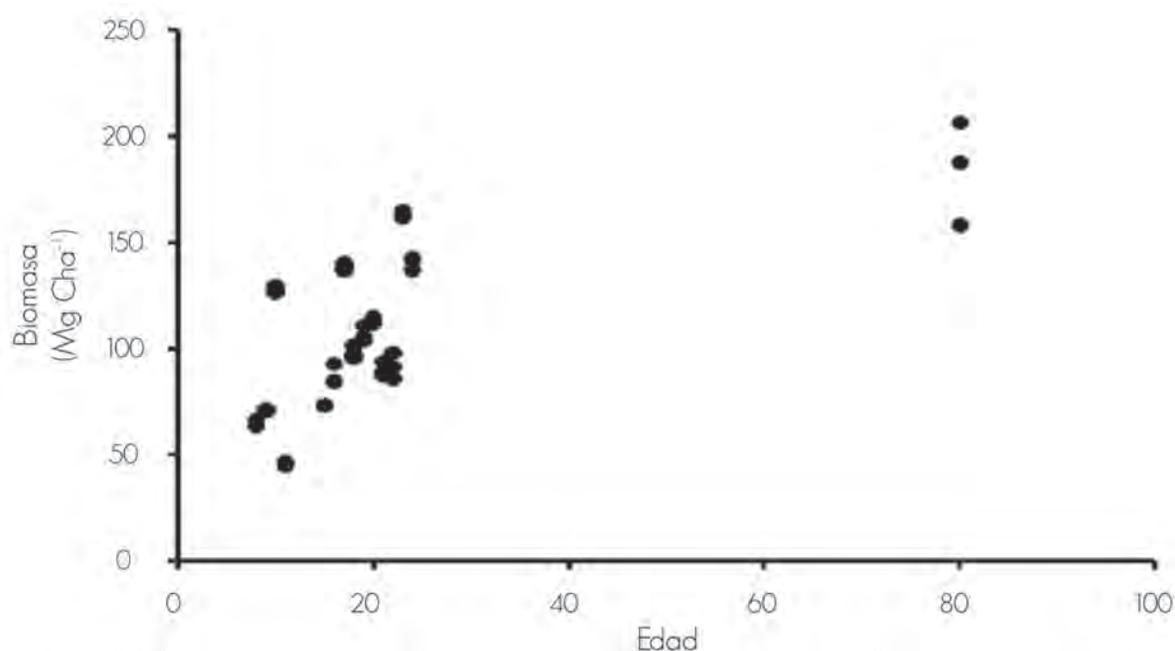
Además esta superficie sin tratamiento constituye la mayor parte del bosque del Ejido La Mojonera.

En general, la acumulación de biomasa siguió un patrón creciente respecto de la edad del rodal (Figura 3). Sin embargo, los valores de la primera correspondientes al área de corta de 1995

(11 años de edad) no siguen este patrón, en virtud de presentar el valor promedio de biomasa más bajo (45.9 Mg ha^{-1}). Lo anterior se debe a los aclareos en el año en que se realizó el muestreo, y en consecuencia, los árboles aún no respondían al tratamiento; sin embargo, es importante destacar el nivel de biomasa acumulado en el rodal de mayor edad producto de la corta de regeneración.

Cuadro 3. Biomasa de partes estructurales de *Pinus patula* y biomasa total de especies asociadas por área de corta, en bosques manejados de La Mojonera, Hidalgo.

Área de corta	Superficie	Biomasa de <i>Pinus patula</i> (Mg)					Otras especies (Mg)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)
		Fuste	Ramas	Corteza	Follaje	Total		
Área Natural	78.45	7884.99	967.10	1172.68	224.60	10249.37	4295.95	184.03
1982	5.01	615.98	75.55	91.61	30.05	813.19	55.83	166.60
1983	7.24	881.91	108.17	131.16	52.74	1173.98	46.66	163.18
1984	4.02	439.25	53.87	65.33	24.39	582.84	26.47	147.19
1985	3.95	261.14	32.03	38.84	18.57	350.58	19.26	89.98
1986	4.07	353.76	43.39	52.61	26.13	475.89	5.55	113.02
1987	4.72	376.76	46.21	56.03	27.97	506.97	19.30	106.78
1988	7.16	524.17	64.29	77.96	41.10	707.52	27.88	98.10
1989	5.37	569.00	69.79	84.62	32.46	755.87	16.60	139.34
1990	3.13	205.66	25.22	30.59	17.74	279.20	9.20	87.35
1991	1.64	93.26	11.44	13.87	7.50	126.07	0.24	73.25
1995	6.77	235.25	28.85	34.99	22.79	321.88	8.33	45.91
1996	6.31	621.91	76.28	92.49	41.79	832.47	3.34	127.36
1997	4.37	239.39	29.36	35.60	18.62	322.97	1.98	70.97
1998	11.2	549.52	67.40	81.73	50.36	749.01	26.10	65.42

Figura 3. Relación de la biomasa con la edad del rodal en bosques manejados de *Pinus patula* en La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.

Este rodal, con 25 años de edad reveló niveles de biomasa por hectárea similares a los del bosque natural (166 y 184 Mg ha⁻¹, respectivamente).

DISCUSIÓN

La estimación de la biomasa es fundamental para evaluar el almacenamiento de carbono y la dinámica de los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas forestales. Algunos 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.

El modelo de biomasa que mejor se ajustó a los datos fue el que consideró al diámetro normal y la altura total del árbol como variables independientes. Estos resultados concuerdan con lo que Jokela *et al.* (1981), Garcidueñas *et al.* (1988) y Zianis y Mencuccini (2003) reportaron, ya que al incorporar esta variable se reduce el error estándar, aunque en la práctica hace más complicado la toma de datos de campo.

La mayor parte de la biomasa del árbol se concentró en el fuste (36 a 85%), variando de acuerdo al tamaño del árbol. Castellanos *et al.* (1996), en un estudio en Chignahuapan, Puebla, concluyeron que 72% de la biomasa se concentra en los fustes de *Pinus patula*. A su vez, Díaz *et al.* (2007) registraron valores menores de biomasa

para árboles de esta especie en Tlaxco, Tlaxcala con diámetros normales (DAP) pequeños y para aquellos con DAP superiores a los 30 cm, las cifras fueron mayores. Estas diferencias se deben a que en el presente estudio se incluyó a la altura total como variable independiente, lo cual reduce la sobrestimación de la biomasa en árboles con diámetros grandes, tal y como se hace para garantizar la precisión en la estimación del volumen en el inventario forestal (Hush *et al.*, 1982; Avery y Burkhart, 1983). Sin embargo, se encontró que los resultados aquí generados son muy cercanos a los valores de biomasa para otras especies del género *Pinus* estimados con el mismo modelo y considerando sólo el DAP "como la variable independiente" (Garcidueñas *et al.*, 1988; Castellanos *et al.*, 1996; Díaz *et al.*, 2007; Navar, 2009).

Algunos valores de biomasa en otras especies, se ubican en un intervalo entre 67 y 93%, dependiendo de la localidad (Rapp *et al.*, 1999; Xiao *et al.*, 2003). A una edad determinada, en la cual la competencia por luz es un factor secundario, el crecimiento en diámetro es prioritario, por lo que la biomasa tiende a acumularse en el fuste (Santa Regina, 2000). En extensas superficies (Ordoñez *et al.*, 2008), la utilización de modelos basados en tarifas, seguramente llevó a sobrestimaciones de biomasa y carbono, en particular, en rodales maduros.

En diversos estudios de distribución de biomasa en árboles se ha identificado una disminución de la proporción de biomasa con el aumento del tamaño del árbol. Esto ocurre porque la producción de este componente se modifica con el tamaño del árbol, lo que es causado por el gasto fisiológico que supone mantener el follaje que no aporta ganancias netas positivas de fotosíntesis (Hiura, 2005). La biomasa en el follaje en árboles maduros de *Pinus patula* en la Sierra Norte de Puebla se reportó en 3% (Castellanos *et al.*, 1996), mientras que De los Santos *et al.* (1993) midieron hasta 5% de este componente para la misma especie en la misma zona, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Castellanos *et al.* (1996).

La cantidad de biomasa almacenada en los bosques dada a conocer por diferentes estudios a nivel mundial es muy variable. Entre ellos están, los de Xiao *et al.* (2003), en bosques templados de *Pinus sylvestris* L. y *Fagus* sp. que calcularon 176 Mg ha⁻¹, Son *et al.* (2004), en bosques mezclados de *Q. variabilis* Blume, *Q. mongólica* Fish. ex Turcz obtuvieron 137.8 g ha⁻¹ y Hoshizaki *et al.* (2004), para un bosque mesófilo en Malasia, quienes contabilizaron 403 Mg ha⁻¹. Sin embargo, estos datos no pueden ser comparables, en virtud de que corresponden a ecosistemas diferentes, así como a edades distintas al momento de hacer la evaluación de biomasa respectiva e incluso a la composición de especies. Por su parte Hashimoto *et al.* (2000) reportaron en bosques secundarios en Indonesia de 8 a 10 Mg ha⁻¹ en rodales de un año y hasta 45 a 56 Mg ha⁻¹ en rodales de 12 años. Este último valor es similar al encontrado en el presente estudio. Lo anterior resulta importante, ya que los dueños de los bosques deben tomar en cuenta, que mediante los planes de manejo que apliquen en sus predios, se aprecie que en realidad haya una proporción de carbono incremental, el cual estaría disponible para la venta en los mercados internacionales como bonos de carbono.

Estudios de acumulación de biomasa en otros ecosistemas indican valores de 110 Mg ha⁻¹ para bosques noruegos de *Picea abies* (L) H. Karst (Ingerslev y Hallbäck, 1999) y de 64 a 121 Mg ha⁻¹ en bosques europeos de *Quercus pireaica* Willd., *Q. lanuginosa* (Lam.) Thuil. y *Q. illex* L., referidos principalmente a biomasa de fustes y ramas (Rapp *et al.*, 1999). Esta variación ocurre en virtud de que tales valores representan diversas especies, edad de los rodales, localización geográfica y la metodología utilizada (Schroeder *et al.*, 1997; Colter *et al.*, 2003).

En el caso particular de la especie de interés, Gutiérrez y Lopera (2001) midieron 87.2 y 446 Mg ha⁻¹ en plantaciones comerciales de 6 y 29 años. En el presente estudio los valores 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. Lo anterior significa que en las plantaciones comerciales de rápido crecimiento el proceso de acumulación de biomasa es más acelerado en virtud de que se tienen prácticas de manejo intensivas que afectan las condiciones del suelo.

En el área que fue cortada en 1982, cuando se realizó la primera corta, los árboles contaban con 24 años, diámetros aproximados de 20 cm y alturas superiores a los 20 m, formando rodales con dosel semi-cerrado y sotobosque constituido por especies de latifoliadas, arbustos, hierbas y pastos; donde la biomasa acumulada era de 166.60 Mg ha⁻¹. A pesar de que en el área natural este valor era más alto (184.03 Mg ha⁻¹), la diferencia es de sólo 17.43 Mg ha⁻¹. A través del muestreo de árboles maduros de *Pinus patula* en el bosque natural se determinó una edad promedio de 80 años. Por lo tanto, se puede especular que la tasa de acumulación de biomasa fue de 6.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en el rodal de 24 años, contra la de 2.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en el bosque natural maduro. Es decir, con solo un tercio de la edad de rodales maduros, aquellos intensivamente manejados podrían ser más eficientes en la acumulación de biomasa y en consecuencia, en la captura de carbono, que los bosques maduros no intervenidos. Sin embargo, es necesario cuantificar esta concentración en rodales manejados de mayor antigüedad a los analizados en este estudio, ya que existen datos que permiten proyectar cómo sería la acumulación de biomasa y carbono en las etapas siguientes.

CONCLUSIONES

Se generaron ecuaciones simultáneas para estimar la biomasa de fuste, ramas, follaje y corteza de *Pinus patula* mediante las cuales se obtuvieron resultados que muestran que la inclusión de la altura total del árbol en la correspondiente a biomasa total, mejora el ajuste del modelo, ya que presentó el coeficiente de determinación más alto y el más bajo cuadrado medio del error.

La acumulación de biomasa siguió un patrón creciente con respecto a la edad de rodales manejados de *Pinus patula*. En el de 24 años, el más viejo producto de la corta de regeneración se registró una acumulación de biomasa arbórea similar al bosque natural no intervenido, lo que sugiere que el bosque manejado es más eficiente para la captura de carbono atmosférico. Sin embargo, es necesario determinar el balance neto de carbono, considerando la biomasa subterránea, a efecto de evaluar si se sigue la misma tendencia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Fondo Sectorial CONAFOR-CONACYT a través del proyecto 10825 / A-1 "Potencial de captura y almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo".

REFERENCIAS

- Acosta, M., J. Vargas, A. Velázquez M. y J. Etchevers. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca. México. *Agrociencia* 36 (6): 725-736.
- Aguilar, A. y R. Razo. 1995. Aviso de acción preliminar de la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal (UCODEFO) No. 2. Zacualtipán, Hgo. México. 12 p.
- Apps, M., W. Kurz, R. Luxmoore, L. Nilsson, R. Sedjo, R. Schmidt, L. Simpson and T. Vinson. 1993. Boreal forest and tundra. In: Wisniewski, J. and R. N. Sampson (Eds.). *Terrestrial biosphere carbon fluxes: quantification and sources of CO₂*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. pp. 39-53.
- Avery, T. E. and H. E. Burkhart. 1982. *Forest measurements*. McGraw-Hill Book Co. New York, NY. USA. 322 p.
- Brown, S., L. Burnham, M. Delaney, R. Vaca, M. Powell and 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.
- Castellanos, J., A. Velázquez, J. Vargas, C. Rodríguez y A. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30:123-128.
- Colter, R., E. Will, A. Barron, O. Teskey and B. Shiver. 2003. Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities. *Forest Science* 49(2):224-234.
- De Jong, 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. CD.
- De Jong, J., A. Cairns, P. Haggerty, N. Ramírez, S. Ochoa, J. Mendoza, M. González and I. March. 1999. Land-use change and carbon flux between 1970s and 1990s in central highlands of Chiapas, Mexico. *Environmental Management* 23(3):373-385.
- De los Santos, H., A. Velázquez y H. Ramírez M. 1993. Modelos de crecimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula* Schl. et Cham. aclareados a diferentes intensidades. In: *Memoria de Resúmenes del Congreso Mexicano sobre Recursos Forestales*. Saltillo, Coah. México. 44 p.
- Díaz, F. R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A. y J. D. Etchevers B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25-34.
- Dixon, R., S. Brown, R. Houghton, A. Solomon, M. Trexler and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190.
- Etchevers, J., M. Acosta, C. Monreal, K. Quednowy 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. CD.
- Fournier, R., J. Luther, L. Guindon, M. Lambert, D. Piercey, R. 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.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. México. 217 p.
- Garcidueñas, A., M. Keyes, G. Zárate y M. Martínez. 1988. Estimación de biomasa para árboles de *Pinus montezumae* Lamb. *Agrociencia* 72: 27-40.
- Gómez, 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, Edo. de Méx. México. 198 p.
- Gutiérrez, V. y G. Lopera A. 2001. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. 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. CD.
- Hashimoto, T., K. Kojima, T. Tange and S. Sasaki. 2000. Changes in carbon storage in fallow forests in the tropical lowlands of Borneo. *Forest Ecology and Management* 126:331-337.
- Hiura, T. 2005. Estimation of aboveground biomass and net biomass increment in a cool temperate forest on a landscape scale. *Ecological Research* 20:271-277.
- 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. *Ecological Research* 19: 357 - 363.
- Huxley J. S. 1932. *Problems of relative growth*. Methuen and Co, Ltd. London, UK. 276 p.
- Hush, B., Ch. I. Miller and T. W. Beers. *Forest mensuration*. (3^{ra} Ed.). John Wiley & Sons. New York, NY. USA. 402 p.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2006. Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero. 1990 - 2002 <http://www.inecologia.gob.mx/cclimatico/descargas/inegeirejecutivo.pdf> (18 de enero de 2008).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1996. Zacualtipán de Ángeles, estado de Hidalgo. Cuaderno Estadístico Municipal. Edición 1995. Aguascalientes, Ags. México. 105 p.
- Ingerslev, M. and L. Hallbäck. 1999. Aboveground biomass and nutrient distribution in a limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies*) plantation. Part II. Accumulation of biomass and nutrients. *Forest Ecology and Management* 119:21-38.
- Jandl, R., M. Linder, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Baritz, F. Hagedorn, D. W. Johnson, K. Minkinen and K. A. Byrne. 2007. How strongly can forest management influence carbon sequestration? *Geoderma* 137: 253-268.
- Jokela, E., C. Shannon and E. White. 1981. Biomass and nutrient equations for mature *Betula papyrifera* Marsh. *Can. J. For. Res.* 11:298-304.
- Law, B., O. Sun, J. Campbell, S. Van Tuyl and P. Thorton'. 2003. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of a ponderosa pine. *Global Change Biology* 9:510-524.
- Malhi, Y., D. Baldocchi and P. Jarvis. 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 56:715-740.
- Masera, O. 2002. Bosques y cambio climático en América Latina. Análisis y perspectivas. In: E. Leff, E. Ezcurra, I. Pisanty y P. Romero L. (Eds.). *La transición hacia el desarrollo sustentable. Perspectivas de América Latina y el Caribe*. SEMARNAT, Instituto de Ecología, Universidad Autónoma Metropolitana, Organización de las Naciones Unidas. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México, D. F. México. pp. 211 - 235.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of Northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257:427-434.
- Ordóñez, J. A., B. de Jong y O. Masera. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrabus* en San Juan Nuevo Michoacán. *Madera y Bosques* 7(2):27-47.
- Ordóñez, J. A., J. B. de Jong, F. García, F. L. Aviña, J. V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez and O. Masera. 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands

- of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management*. 255: 2074-2084.
- Perry, D. A. 1994. *Forest ecosystems*. Johns Hopkins University Press. Baltimore, MD. USA. pp. 187 - 193.
- Rapp, M., I. Santa Regina, M. Rico and H. Gallego. 1999. Biomass, nutrient content, litterfall and nutrient return to the soil in Mediterranean oak forests. *Forest Ecology and Management* 119:39-49.
- Roxburgh, S. H., S. W. Wood, B. G. Mackey, G. Woldendorp and P. Gibbons. 2006. *Journal of Applied Ecology* 43:1149-1159.
- Rzedowski, J. 1981. *Vegetación de México*. Editorial Limusa. México. D. F. México. 432 p.
- Santa Regina, I. 2000. Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata Mountains, Salamanca, Spain. *Forest Ecology and Management* 132:127-141.
- Schimel, D., J. Enting, M. Heimann, T. Wigley, D. Raynaud, D. Alves, and U. Siegenthaler. 2000. CO₂ and the carbon cycle. Extracted from IPCC report, *Climate Change, 1994*. In: T. M. L. Wigley and D. S. Schimel (Eds.), *The carbon cycle*. Cambridge University Press. New York, NY. USA. pp. 93-10.
- 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. *Forest Science* 43(3):424-434.
- Schulze, E., C. Wirth and M. Heimann. 2000. *Managing forests after Kyoto*. *Science* 289:2058-2059.
- Son, Y., H. Park, M. Yi, H. Jin, D. Y. Kim, R. Kim and J. Hwang. 2004. Biomass, production and nutrient distribution of a natural oak forest in central Korea. *Ecological Research* 19:21-28.
- Stuart, M. and P. Moura C. 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, UK. 81 p.
- Van Lear, D., J. Waide and M. Teuke. 1984. Biomass and nutrient content of a 41-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation on a poor site in South Carolina. *Forest Science* 30(2):395-404.
- Wang, R., T. Letchford, P. Corneau and J. 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. *Forest Ecology and Management* 130:17-26.
- Waring, R. and W. Schlesinger. 1985. *Forest ecosystems: concepts and management*. Academic Press. Orlando, FL. USA. 340 p.
- Xiao, C., J. Yuste, I. Janssens, P. Roskams, L. Nachtergale, A. Carrara, B. 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.
- 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.