

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN BOSQUES DEL SUR DE NUEVO LEÓN

CARBON CONTENT EVALUATION IN SOUTHERN FORESTS OF NUEVO LEON

Oscar Alberto Aguirre-Calderón¹ y Javier Jiménez-Pérez¹

RESUMEN

El reconocimiento de la importancia de los servicios ambientales que proporcionan los bosques y la necesidad de contar con métodos confiables para su evaluación constituyen la justificación del presente trabajo, cuyos objetivos fueron desarrollar métodos e instrumentos prácticos para realizar estimaciones del contenido de carbono en bosques del sur del estado de Nuevo León. Se diseñaron ecuaciones de biomasa en función del diámetro normal de la forma para *Pinus pseudostrobus*, *P. teocote* y *Quercus* spp. en bosques templados del sur de Nuevo León. Además, se determinó el contenido de carbono de las especies objeto de estudio, mediante un analizador de carbono orgánico. Los resultados permitieron la construcción de tarifas y tablas de biomasa así como del contenido de carbono; a partir de ellos se evaluó el carbono en el componente arbóreo de bosques mixtos de pino-encino, encino-pino y rodales puros de pino. El porcentaje de carbono en los individuos de *P. pseudostrobus* fue 50.35, en *P. teocote* 47.78 y en *Quercus* spp. 48.43. Las tablas de contenido de carbono para rodales puros de pino se construyeron considerando diferentes índices de sitio. Las estimaciones del contenido de carbono fueron: pino-encino 45.24 Mg ha⁻¹, encino-pino 64.20 Mg ha⁻¹, de *P. pseudostrobus* 73.18 Mg ha⁻¹ y de *P. teocote* 47.01 Mg ha⁻¹.

Palabras clave: Índice de sitio, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote*, secuestro de carbono, servicios ambientales, *Quercus* spp.

ABSTRACT

The acknowledgement of the importance of environmental services that forests provide and the need to count on reliable methods to assess them are the reasons to accomplish the actual study, whose objectives were to develop methods and practical tools to estimate the carbon content of some forests at the South of Nuevo León State. Biomass equations based on the normal diameter (called DBH at height 1.30m) of the tree form for *Pinus pseudostrobus*, *P. teocote* and *Quercus* spp. were developed in temperate forests of Southern Nuevo Leon (NL). Likewise, it was estimated the carbon content of the tree species under study, using an organic carbon analyzer. Results allowed the construction of rates, biomass and carbon content tables, which were assessed by the amount of carbon in the tree component of mixed forests of pine-oak, oak-pine and pure pine stands. The carbon per cent content in dry weight in *Pinus pseudostrobus* trees was 50.35, in *P. teocote* 47.78 and in *Quercus* spp. 48.43. Carbon content site index tables were constructed for pure three pine species stands. Results of carbon content evaluation in different forest types were: pine-oak 45.24 Mg ha⁻¹, oak-pine 64.20 Mg ha⁻¹ of *P. pseudostrobus* 73.18 Mg ha⁻¹ and *P. teocote* 47.01 Mg ha⁻¹.

Key words: Site index, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote*, carbon sequestration, environmental services, *Quercus* spp.

Fecha de recepción: 22 de junio de 2011

Fecha de aceptación: 20 de julio de 2011

INTRODUCCIÓN

Actualmente se reconoce la importancia de los bosques como un medio para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), causantes del cambio climático, en particular el bióxido de carbono (CO₂). Así, para contrarrestar, las múltiples instituciones nacionales y organizaciones globales desarrollan planes para preservar áreas naturales, mejorar el manejo forestal y establecer plantaciones que propicien el

INTRODUCTION

The important role to mitigate greenhouse gas emissions (GHG) that forests play is now recognized; the increment of those GHG is considered as the main cause of climate change, particularly carbon dioxide (CO₂). Thus, to counteract this process, the various national institutions and global organizations carry out plans to preserve natural areas, improve forest management and establish plantations

¹Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Correo-e: oscar.aguirrecl@uanledu.mx

almacenamiento de carbono por periodos prolongados. De manera complementaria, se han presentado diversos métodos para la evaluación de la capacidad de captura de carbono en ecosistemas forestales, con objeto de valorar este servicio ambiental con procedimientos confiables y costo eficientes (Husch *et al.*, 2003; Ravindranath y Ostwald, 2007; Van Laar y Akça, 2007; Hoover, 2008; Bigsby, 2009; Pretzsch, 2009). En este contexto, en México se han aplicado diversos métodos para estimar la biomasa y el carbono contenido en diversos ecosistemas forestales (De Jong *et al.* 1995; Ordóñez *et al.*, 2001; Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Pimienta *et al.*, 2007; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008; Balderrama *et al.*, 2008; Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Návar, 2009; Figueroa-Navarro *et al.*, 2010).

El reconocimiento de la importancia de los servicios ambientales de los bosques y la necesidad de contar con métodos confiables para su evaluación constituye la justificación del presente trabajo, cuyos objetivos fueron desarrollar métodos e instrumentos prácticos para realizar estimaciones del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León, para contribuir a su valoración y a la ejecución de proyectos que beneficien a las comunidades del área y, que a su vez, permitan un aprovechamiento diversificado y sustentable de los recursos forestales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de investigación

El trabajo de campo se llevó a cabo en bosques puros de *Pinus pseudostrabus* Lindl. y *P. teocote* Schied. ex Schltdl. et Cham, así como en bosques mixtos de pino-encino o encino-pino de la Sierra Madre Oriental del sur de Nuevo León. El área se localiza entre 24°27'23" y 24°32'51" de latitud norte y 99°53'54" y 100°01'34" de longitud oeste, en el municipio de Galeana, NL; la precipitación media anual es de 430.3 mm y la altitud promedio es de 2,000 m.

Estimación de biomasa y contenido de carbono

En una primera fase se estimó la biomasa del componente aéreo de los árboles de *Pinus pseudostrabus*, *P. teocote* y *Quercus* spp., mediante el derribo de 32 individuos de diferentes categorías diamétricas, en áreas con programas de manejo forestal autorizados. Cada uno se separó en sus componentes: fuste, ramas y follaje; se determinó el peso húmedo de estos últimos, el fuste fue seccionado en cuatro a ocho fragmentos de acuerdo al diámetro, con un peso máximo de 100 kg.

De las ramas y hojas se extrajeron tres muestras. En todos los casos se le determinó el peso húmedo. Posteriormente se

to encourage carbon storage for extended periods. In a complementary way, several methods have been proposed to assess the ability of carbon sequestration of forest ecosystems, in order to evaluate this environmental service with reliable procedures and cost efficient benefits (Husch *et al.*, 2003; Ravindranath and Ostwald, 2007; Van Laar and Akca, 2007; Hoover, 2008; Bigsby, 2009; Pretzsch, 2009). In this context, Mexico has implemented several assessment methods for estimating biomass and carbon in different forest ecosystems (De Jong *et al.*, 1995; Ordóñez *et al.*, 2001; Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Pepper *et al.*, 2007; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008; Balderrama *et al.*, 2008; Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Návar, 2009; Figueroa-Navarro *et al.*, 2010).

The recognition of the importance of forests environmental services and the need for reliable evaluation methods is the reason to do the actual work, whose main objectives were to develop a practical method and identify tools for estimating the carbon content in Southern forests of Nuevo Leon State, to assist in the assessment of this service and to promote projects that help communities in the area and allow a diversified and sustainable harvest of forest resources.

MATERIALS AND METHODS

Study area

Field work was made in pure stands of *Pinus pseudostrabus* Lindl. and *P. teocote* Schied. ex Schltdl. et Cham forests, as well as in mixed forests of pine-oak or oak-pine of Sierra Madre Oriental in Southern Nuevo Leon. The area is located between 24°27'23" and 24°32'51" North and 99°53'54" and 100°01'34" West, with an annual average precipitation of 430 mm and an average altitude of 2,000 m.

Biomass and carbon content estimation

As a first stage, the aerial biomass was estimated in trees of *P. pseudostrabus*, *P. teocote* and *Quercus* spp. with 32 felled individuals of different diameter categories from areas with approved management programs. Stem, branches and foliage were separated from each tree; the wet weight of branches and leaves was determined and the stem was cut into 4 to 8 pieces according to diameter, with a maximum weight of 100 kg.

Three samples of branches and leaves were taken. In all cases, wet weight was determined. Afterwards, they were placed in a stove at 105° C until a constant dry weight was obtained. With these data was calculated the total dry weight of trees, by the dry weight / wet weight ratio for each component. The total sum of all dry weights of the components made up the total biomass of the tree.

colocaron en una estufa marca VWR modelo 1305U a una temperatura de 105°C, hasta alcanzar un peso seco constante. Con esos datos se calculó el peso seco total de los árboles, mediante la relación peso seco/ peso húmedo de cada componente. La suma de todos los pesos secos de los componentes constituyó la biomasa total del árbol.

Para formular las ecuaciones de biomasa se analizaron varios modelos de regresión que relacionan la biomasa con el diámetro normal. Con base en las ecuaciones de mejor ajuste se elaboraron tarifas de biomasa y contenido de carbono para árboles individuales de las especies investigadas, la variable independiente fue el diámetro normal.

El material vegetal se procesó con un equipo analizador de carbono (Solids TOC Analyzer) para calcular el contenido de carbono por especie, en el caso de los pinos y un valor promedio para los encinos.

Con los datos obtenidos de biomasa y carbono, en función del diámetro normal, se construyeron las tablas correspondientes para *Pinus pseudostrabus* y *P. teocote*, a partir de los modelos de crecimiento para rodales de densidad completa desarrollados por Aguirre (1991, 2010) para diferentes índices de sitio, los cuales incluyen los valores de edad, diámetro normal, altura dominante y media, área basal ha⁻¹ y volumen en pie, entre otras variables, para índices de sitio expresados por la altura dominante en metros a la edad base de 50 años.

Evaluación del contenido de carbono en ecosistemas forestales

Para evaluar el contenido de carbono en el área de estudio se establecieron sitios circulares de 400 m², distribuidos en áreas de bosques mixtos de pino-encino y encino-pino, así como en rodales puros de las dos especies de pino investigadas.

Se desarrollaron dos métodos, el primero se basó en la obtención de un registro diamétrico de cada uno de los individuos presentes en áreas con diversidad estructural y mezcla de especies, en rodales de *Pinus pseudostrabus*, *P. teocote* y *Quercus spp.* La estimación de la biomasa de árboles individuales se hizo con la ecuación de biomasa generada para cada especie, o las tarifas elaboradas a partir de éstas, que incluyen los datos de biomasa y carbono en función del diámetro. Se calculó la biomasa y contenido de carbono de individuos de diferentes categorías diamétricas y se sumaron los valores individuales para estimar los montos correspondientes por unidad de superficie.

El segundo método consistió en la estimación de los parámetros de interés mediante la aplicación de tablas de biomasa y contenido de carbono para rodales puros y coetáneos de *Pinus pseudostrabus* y *P. teocote*, las cuales incluyen

In order to formulate biomass equations, several regression models which relate the biomass with the normal diameter (DBH) were analyzed. Based on the best-fit equations, rates and carbon biomass for individual trees species were designed, considering DBH as the independent variable.

The vegetal material was processed by a carbon analyzer (Solids TOC Analyzer) to calculate the carbon content of each species in the case of pines, and an average value for oaks.

With the data obtained from biomass and carbon as a function of normal diameter, tables for *Pinus pseudostrabus* and *P. teocote* were built from growth models of full density stands developed by Aguirre (1991; 2010), for different site which include age, normal diameter, dominant height, basal area average ha⁻¹ and current increment volume, among other variables, site indexes expressed by the dominant height in meters at the base age of 50 years.

Carbon evaluation in forest ecosystems

To assess carbon content in the study area, 400 m² circular sites were established and distributed in mixed, pine-oak and oak-pine forest areas, as well as in pure stands of both pine species.

Two methods were tested, the first was based on obtaining a diameter record of each of the individuals in areas with structural diversity and mixture of species in stands composed by *Pinus pseudostrabus*, *P. teocote* and *Quercus spp.* To estimate the individual tree biomass used the equation developed for each species or the rates made from them, including the biomass and carbon data in terms of diameter. Biomass and carbon content of trees of different diameter categories were calculated and individual values to estimate the appropriate total amount per unit area were added.

The second method consisted on estimating the interest parameters through the use of biomass and carbon content tables of pure and even-aged stands of *Pinus pseudostrabus* and *P. teocote*, which include data on age, number of trees per ha⁻¹ in ecosystems of full density, DBH, basal area ha⁻¹, biomass ha⁻¹ and carbon ha⁻¹. The data in the tables correspond to a 1.0 density degree and at different levels of site (IS). Thus, carbon content of a given area is first evaluated according to Aguirre (1989, 2010) IS models by estimating the average age and dominant height. The real density degree (GD) of the stands is calculated by the following equation:

$$GD = \frac{\text{Real basal area}}{\text{Reference basal area}} \quad (1)$$

Where:

GD = Density degree

Real basal area = field work value

datos de edad, número de árboles ha⁻¹ en ecosistemas de densidad completa, diámetro normal, área basal ha⁻¹, biomasa ha⁻¹ y contenido de carbono ha⁻¹, además corresponden a un grado de densidad 1.0 y a diferentes índices de sitio (IS). Por lo anterior, el contenido de carbono de un área determinada se determinó por el IS, de acuerdo con los modelos de Aguirre (1989; 2010), a partir de la estimación de la edad promedio y la altura dominante. El grado de densidad (GD) real de los rodales inventariados se calculó con la ecuación:

$$GD = \frac{\text{Área basal real}}{\text{Área basal de la tabla}} \quad (1)$$

Donde:

GD = grado de densidad

Área basal real = valor obtenido en campo

Área basal de la tabla = valor de área basal de la tabla de biomasa y contenido de carbono para el índice de sitio correspondiente.

Dado que existe una relación lineal entre el área basal y el volumen, y también lo hay, entre el área basal y la biomasa, así como con el contenido de carbono de un rodal, basta multiplicar el grado de densidad por el dato de carbono de la tabla, a una edad determinada para conocer el carbono de cualquier área pura y coetánea de *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote*.

RESULTADOS

Estimación de biomasa y carbono

La función que mejor ajuste presentó para la estimación de la biomasa en función del diámetro normal fue:

$$b = \beta_1 * d^2$$

Donde:

b = biomasa (kg)

d = diámetro normal (cm)

β_1 = parámetro del modelo (Cuadro 1).

Los parámetros y estadísticos de ajuste de la ecuación se muestran en el Cuadro 1. En este se observa que la función es adecuada para estimar la biomasa a partir del diámetro normal, lo anterior se corroboró con el ajuste gráfico de la ecuación.

Respecto al contenido de carbono determinado con el analizador de carbono los resultados fueron *Pinus pseudostrobus* 50.35%, *P. teocote* 47.78% y *Quercus* spp. 48.43 %.

Tarifa de biomasa y contenido de carbono

Reference basal area = biomass and carbon content at the basal area from each reference site estimated

As a linear relationship exists between basal area and volume, and also between basal area and biomass, as well as with the carbon content of each stand, it is enough to multiply the carbon density degree values by the carbon value of the table at a certain age to obtain the total carbon of any pure and peer stand of *Pinus pseudostrobus* and *P. teocote*.

RESULTS

Biomass and carbon estimation

The function with best fit presented for estimation of biomass as a function of the normal diameter was:

$$b = \beta_1 * d^2$$

Where:

b = biomass in kg

d = DBH in cm

β_1 = model value (see Table 1).

The parameters and fit statistics of the equation are shown in Table 1, where it can be observed that the function is suitable for estimating biomass from the normal diameter, which is confirmed by the graphic of the equation set.

Cuadro 1. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste para la ecuación de biomasa.

Table 1. Parameter estimates and goodness of fit statistics for the biomass equation.

Especie	β_1	Error estándar	Valor de t	Pr> t	REMC	R ² ajustada
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.35179	0.03102	11.34	<.0001	64.202	0.941
<i>P. teocote</i>	0.40196	0.03320	12.11	<.0001	77.838	0.948
<i>Quercus</i> spp.	0.45534	0.02683	16.97	<.0001	92.095	0.947

β_1 = parámetro del modelo; Pr Nivel de significancia de β ; REMC = Raíz del error medio cuadrático.

β_1 = parameter of the model; Pr Level of significance; REMC = Root mean square error

In regard to the carbon content determined by the analyzer, results were as follows: 50.35% for *Pinus pseudostrobus*, 47.78% for *P. teocote* and 48.43% for *Quercus* spp.

Biomass and carbon content rate

La tarifa de biomasa y contenido de carbono se construyó empleando la ecuación 2, de igual manera se obtuvieron los porcentajes de carbono en la biomasa de las especies estudiadas (Cuadro 2).

The biomass and carbon content rate was created by using equation 2, and in the same way carbon per cent in biomass of the studied species (Table 2).

Tablas de biomasa y contenido de carbono

Cuadro 2. Tarifa para la estimación de biomasa y contenido de carbono.

Table 2. Biomass and carbon content estimating rate.

Categoría Diamétrica (cm)	<i>Pinus pseudostrabus</i>		<i>P. teocote</i>		<i>Quercus spp.</i>	
	Biomasa (kg)	Carbono (kg)	Biomasa (kg)	Carbono (kg)	Biomasa (kg)	Carbono(kg)
5	8.79	4.43	10.05	4.80	11.38	5.51
10	35.18	17.71	40.20	19.21	45.53	22.05
15	79.15	39.85	90.44	43.21	102.45	49.62
20	140.72	70.85	160.78	76.82	182.14	88.21
25	219.87	110.70	251.23	120.04	284.59	137.83
30	316.61	159.41	361.76	172.85	409.81	198.47
35	430.94	216.98	492.40	235.27	557.79	270.14
40	562.86	283.40	643.14	307.29	728.54	352.83
45	712.37	358.68	813.97	388.91	922.06	446.56
50	879.48	442.82	1004.90	480.14	1138.35	551.30
55	1064.16	535.81	1215.93	580.97	1377.40	667.08
60	1266.44	637.65	1447.06	691.40	1639.22	793.88

Biomass and carbon content tables

Las tablas de biomasa y contenido de carbono se generaron para los índices de sitio (IS) 21, 16 y 11, para la especie *Pinus pseudostrabus* (Cuadros 3, 4 y 5), y para los IS 21, 15 y 9 en el caso de *P. teocote* (cuadros 6, 7 y 8). En ambos taxa se observan diferencias en el carbono contenido en los rodales de grado de densidad 1.0, con distintos índices de sitio. A la edad de 50 años, rodales puros de *P. pseudostrabus* tienen valores de 109.47 Mg ha⁻¹, para el IS 21, mientras que en el IS 11, el carbono capturado es 66.14 Mg ha⁻¹. Los valores correspondientes para *P. teocote* son: 77.69 Mg ha⁻¹ en el IS 21 y de 29.81 Mg ha⁻¹ para el IS 9. Las diferencias entre las especies para un mismo índice de sitio (IS 21) se explican por el número de árboles y los diámetros normales, a la edad base de 50 años.

Tables of biomass and carbon content is built for the site index (SI) 21, 16 and 11 for the species: *Pinus pseudostrabus* (Tables 3, 4 and 5) and for IS 21, 15 and 9 for *P. teocote* (Tables 6, 7 and 8). In both species there are observed carbon content differences in stands of 1.0 density levels, with different site indexes. At the age of 50, *P. pseudostrabus* pure stands showed carbon contents of 109.47 Mg ha⁻¹ for the IS 21, while the IS 11 carbon stock is 66.14 Mg ha⁻¹. For *P. teocote*, the corresponding figures are 77.69 Mg ha⁻¹ in the IS 21 and 29.81 Mg ha⁻¹ for the IS 9. The differences between species for the same site index (IS 21) are explained by the number of trees and DBH to the base age 50.

Cuadro 3. Tabla de biomasa y contenido de carbono para *Pinus pseudostrabus*, IS 21.

Table 3. Biomass and carbon content table for *Pinus pseudostrabus*, IS 21.

Edad (años)	N ha ⁻¹	Diámetro (cm)	Área basal (m ²)	Biomasa (ton ha ⁻¹)	Carbono (ton ha ⁻¹)
10	4240	6.5	13.9	63.02	31.73
15	1929	12.4	23.1	104.34	52.54
20	1233	17.6	30	134.36	67.65
25	915	22.2	35.1	158.64	79.87
30	738	26	39.1	175.50	88.37
35	625	29.3	42.3	188.76	95.04
40	548	32.2	44.8	199.88	100.64
45	491	34.9	46.9	210.39	105.93
50	449	37.1	48.6	217.41	109.47
55	415	39.2	50.1	224.34	112.95
60	387	41.1	51.3	229.97	115.79
65	365	42.7	52.4	234.12	117.88

Cuadro 5. Tabla de biomasa y contenido de carbono para *Pinus pseudostrabus*, IS 11.

Table 5. Biomass and carbon content table for *Pinus pseudostrabus*, IS 11.

Edad (años)	N ha ⁻¹	Diámetro (cm)	Área basal (m ²)	Biomasa (ton ha ⁻¹)	Carbono (ton ha ⁻¹)
19	4693	6	12.9	59.43	29.93
20	4240	6.4	13.9	61.10	30.76
25	2995	8.6	17.5	77.93	39.24
30	2321	10.6	20.6	91.74	46.19
35	1911	12.4	23.3	103.37	52.05
40	1636	14.1	25.5	114.42	57.61
45	1439	15.6	27.5	123.20	62.03
50	1292	17	29.2	131.35	66.14
55	1178	18.2	30.7	137.27	69.11
60	1088	19.4	32.1	144.05	72.53
65	1013	20.5	33.3	149.76	75.40
70	952	21.5	34.4	154.81	77.95
75	899	22.4	35.4	158.69	79.90
80	855	23.3	36.4	163.29	82.22
85	816	24.1	37.2	166.73	83.95
90	780	24.9	38.1	170.13	85.66
95	752	25.6	38.7	173.37	87.29
100	726	26.3	39.4	176.66	88.95

Cuadro 4. Tabla de biomasa y contenido de carbono para *Pinus pseudostrabus*, IS 16.

Table 4. Biomass and carbon content table for *Pinus pseudostrabus*, IS 16.

Edad (años)	N ha ⁻¹	Diámetro (cm)	Área basal (m ²)	Biomasa (ton ha ⁻¹)	Carbono (ton ha ⁻¹)
13	4415	6.2	13.5	59.70	30.06
15	3354	7.9	16.3	73.64	37.08
20	2073	11.7	22.1	99.83	50.26
25	1507	15	26.7	119.28	60.06
30	1196	18	30.4	136.32	68.64
35	1001	20.7	33.5	150.89	75.97
40	868	23	36.1	161.53	81.33
45	772	25.1	38.3	171.10	86.15
50	700	27	40.1	179.52	90.39
55	643	28.7	41.7	186.32	93.81
60	597	30.3	43.1	192.82	97.08
65	560	31.8	44.4	199.22	100.31
70	529	33.1	45.5	203.89	102.66
75	503	34.3	46.5	208.18	104.82
80	480	35.4	47.3	211.61	106.54
85	460	36.5	48.2	215.59	108.55
90	443	37.5	48.9	219.15	110.34
95	427	38.4	49.5	221.50	111.53
100	413	39.3	50.2	224.40	112.98

Cuadro 6. Tabla de biomasa y contenido de carbono para *Pinus teocote*, IS 21.

Table 6. Biomass and carbon content table for *Pinus teocote*, IS 21.

Edad (años)	N ha ⁻¹	Diámetro (cm)	Área basal (m ²)	Biomasa (ton ha ⁻¹)	Carbono (ton ha ⁻¹)
7	2885	6.6	9.7	50.51	24.14
10	1922	8.5	11	55.82	26.67
15	1235	11.8	13.6	69.12	33.03
20	914	15.1	16.3	83.77	40.02
25	728	18.3	19.1	98.00	46.82
30	608	21.4	21.9	111.92	53.48
35	524	24.4	24.5	125.40	59.92
40	461	27.3	27.1	138.10	65.99
45	414	30.1	29.5	150.77	72.04
50	376	32.8	31.8	162.60	77.69
55	346	35.4	34	174.29	83.27
60	321	37.8	36	184.36	88.09
65	300	40.1	37.9	193.91	92.65

Cuadro 7. Tabla de biomasa y contenido de carbono para *Pinus teocote*, IS 15.Table 7. Biomass and carbon content table for *Pinus teocote*, IS 15.

Edad (años)	N ha ⁻¹	Diámetro (cm)	Área basal (m ²)	Biomasa (ton ha ⁻¹)	Carbono (ton ha ⁻¹)
10	3332	6	9.5	48.22	23.04
15	2121	8	10.6	54.56	26.07
20	1564	9.9	12	61.62	29.44
25	1248	11.7	13.5	68.67	32.81
30	1044	13.5	15	76.48	36.54
35	903	15.2	16.5	83.86	40.07
40	799	16.9	17.9	91.73	43.83
45	720	18.5	19.3	99.05	47.33
50	658	20	20.6	105.80	50.55
55	608	21.4	21.8	111.92	53.48
60	567	22.7	23	117.44	56.11
65	533	24	24.2	123.40	58.96
70	504	25.2	25.2	128.65	61.47
75	480	26.4	26.3	134.47	64.25
80	458	27.5	27.2	139.22	66.52
85	440	28.5	28.1	143.66	68.64
90	424	29.5	29	148.32	70.87
95	409	30.4	29.7	151.93	72.59
100	397	31.3	30.5	156.34	74.70

Evaluación del contenido de carbono en bosques

En los bosques mixtos se usaron los datos de árboles individuales y las tarifas de carbono construidas; para *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote* se emplearon las tablas de contenido de carbono.

Bosque de pino-encino. Los resultados corresponden a un bosque mixto de *Pinus pseudostrobus*, *P. teocote* y *Quercus spp.* con 275 individuos ha⁻¹. La distribución de las especies por categorías diamétricas se muestra en la Figura 1. Se presentan los valores de biomasa y contenido de carbono por categoría diamétrica y totales calculados con la ecuación 2 y los valores de porcentaje de carbono de cada especie (Cuadro 9). El total de biomasa fue de 93.91 Mg ha⁻¹ y el de carbono de 45.24 Mg ha⁻¹.

Cuadro 8. Tabla de biomasa y contenido de carbono para *Pinus teocote*, IS 9.Table 8. Biomass and carbon content table for *Pinus teocote*, IS 9.

Edad (años)	N ha ⁻¹	Diámetro (cm)	Área basal (m ²)	Biomasa (ton ha ⁻¹)	Carbono (ton ha ⁻¹)
19	3802	5.6	9.3	47.93	22.90
20	3598	5.8	9.4	48.65	23.25
25	2848	6.6	9.8	49.87	23.83
30	2373	7.4	10.2	52.23	24.96
35	2047	8.2	10.7	55.33	26.43
40	1810	8.9	11.3	57.63	27.54
45	1632	9.6	11.8	60.46	28.89
50	1492	10.2	12.3	62.40	29.81
55	1380	10.9	12.8	65.90	31.49
60	1289	11.4	13.2	67.34	32.17
65	1214	12	13.7	70.27	33.57
70	1150	12.5	14.1	72.23	34.51
75	1096	13	14.5	74.45	35.57
80	1050	13.5	14.9	76.92	36.75
85	1009	13.9	15.3	78.36	37.44
90	974	14.3	15.7	80.06	38.25
95	943	14.7	16	81.91	39.14
100	916	15	16.3	82.84	39.58

Assessment of carbon content in forests

For mixed forests data from individual trees and the rates of carbon were used; for *Pinus pseudostrobus* and *P. teocote*, the carbon content tables.

Pine-oak forest. Results are corresponding to a *Pinus pseudostrobus*, *P. teocote* and *Quercus spp.* mixed forest with 275 individuals per ha⁻¹. The distribution of species by diameter class is shown in Figure 1. Biomass and carbon content values by diametric category and total calculated number of trees, by equation 2 as well as carbon per cent of each species are shown in Table 9. The total biomass was 93.91 Mg ha⁻¹ and 45.24 Mg ha⁻¹ of carbon.

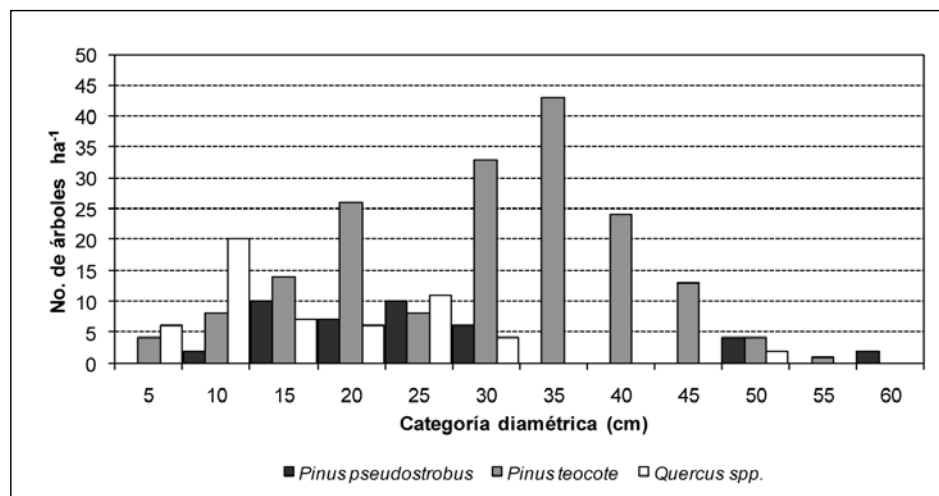


Figura 1: Estructura del bosque mixto de pino-encino.
 Figure 1: Pine-oak mixed forest structure.

Cuadro 9. Contenido de carbono en un bosque mixto de pino-encino.

Table 9. Carbon content in a pine-oak mixed forest.

Categoría Diamétrica (cm)	<i>Pinus teocote</i>			<i>P. pseudostrobus</i>			<i>Quercus spp.</i>		
	N ha ⁻¹	Biomasa (ton)	Carbono (ton)	N ha ⁻¹	Biomasa (ton)	Carbono (ton)	N ha ⁻¹	Biomasa (ton)	Carbono (ton)
5	4						6		
10	8	0.32	0.15	2	0.07	0.04	20	0.91	0.44
15	14	1.27	0.60	10	0.79	0.40	7	0.72	0.35
20	26	4.18	2.00	7	0.99	0.50	6	1.09	0.53
25	8	2.01	0.96	10	2.20	1.11	11	3.13	1.52
30	33	11.94	5.70	6	1.90	0.96	4	1.64	0.79
35	43	21.17	10.12						
40	24	15.44	7.37						
45	13	10.58	5.06						
50	4	4.02	1.92	4	3.52	1.77	2	2.28	1.10
55	1	1.22	0.58			0.00			
60				2	2.53	1.28			
Total	178	72.14	34.47	41	12.00	6.04	56	9.77	4.73

Bosque de encino-pino. En el bosque mixto de *Quercus spp.* y *Pinus teocote* se registraron 395 individuos ha⁻¹. La estructura diamétrica se presenta en la Figura 2. Los valores de biomasa y contenido de carbono por categoría diamétrica y totales que se obtuvieron mediante la suma de los valores de los árboles individuales se consignan en el Cuadro 10. El total de biomasa fue de 132.85 Mg ha⁻¹ y el de carbono 64.20 Mg ha⁻¹.

Oak-pine forest. This mixed forest by *Quercus spp.* and *Pinus teocote* registered 395 trees per ha⁻¹. Diameter class structure is shown in Figure 2. Biomass and carbon content values by diameter class, and the total stand values that were obtained from the sum of individual tree values are gathered in Table 10. Total biomass was 132.85 Mg ha⁻¹ and carbon content, 64.20 Mg ha⁻¹.

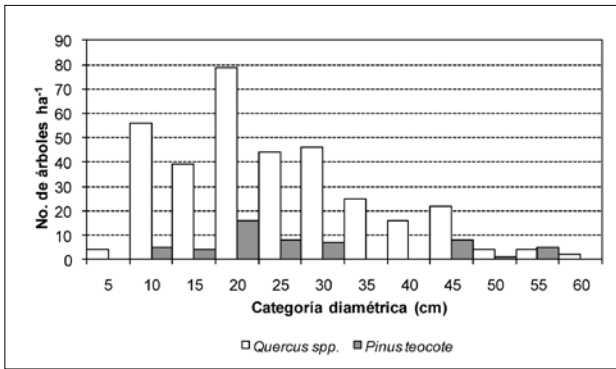


Figura 2. Estructura del bosque mixto de encino-pino.
Figure 2. Oak-pine mixed forest structure.

Rodales puros de pino. Los resultados dasométricos de la evaluación de un rodal coetáneo de *Pinus pseudostrabus* fueron: edad promedio 35 años, altura dominante 16.5 m y área basal 32.6 m² ha⁻¹, con un índice de sitio 21 (Aguirre, 1991). Esta primera determinación fue la base para el cálculo del contenido de carbono con base en la tabla de biomasa y almacén de carbono para *Pinus pseudostrabus*, IS 21 (Cuadro 3). Un rodal de densidad completa tiene a la edad de 35 años, un área basal de 42.3 m² ha⁻¹ y el valor estimado para el ecosistema inventariado fue de 32.6 m² ha⁻¹. El grado de densidad se determinó en 0.77 de acuerdo a la ecuación 1, de lo que resulta:

$$\text{Biomasa} = 188.76 \times 0.77 = 145.35 \text{ Mg ha}^{-1}$$

$$\text{Contenido de carbono} = 95.04 \times 0.77 = 73.18 \text{ Mg ha}^{-1}$$

Para *Pinus teocote*, los registros que se obtuvieron fueron: edad promedio 50 años, altura dominante 15.9 m y área basal 19.1 m² ha⁻¹. Se determinó un valor de IS de 15 (Aguirre, 2010). Se observa que un rodal de densidad completa tiene a la edad de 50 años, un área basal de 20.6 m² ha⁻¹ y un valor real en campo de 19.1 m² ha⁻¹, por lo que el grado de densidad fue 0.93 (Cuadro 7). De la multiplicación de los valores de biomasa y carbono de la tabla a la edad de 50 años, por el grado de densidad, se obtiene:

$$\text{Biomasa} = 105.80 \times 0.93 = 98.39 \text{ Mg ha}^{-1}$$

$$\text{Contenido de carbono} = 50.55 \times 0.93 = 47.01 \text{ Mg ha}^{-1}$$

DISCUSIÓN

La ecuación de biomasa formulada es adecuada para la estimación de dicha variable en términos de ajuste, y constituye una simplificación del modelo frecuentemente empleado para este fin (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Gayoso, 2002; West, 2004; Díaz-Franco *et al.*, 2007; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008; Navar, 2009), ya que sólo incluye un parámetro, lo que facilita su aplicación a los datos de inventarios forestales convencionales.

Cuadro 10. Contenido de carbono en un bosque mixto encino-pino.

Table 10. Carbon content in an oak-pine mixed forest.

Categoría Diamétrica (cm)	<i>Quercus</i> spp.			<i>Pinus teocote</i>		
	N ha ⁻¹	Biomasa (ton)	Carbono (ton)	N ha ⁻¹	Biomasa (ton)	Carbono (ton)
5	4	0.05	0.02			
10	56	2.55	1.23	5	0.20	0.10
15	39	4.00	1.94	4	0.36	0.17
20	79	14.39	6.97	16	2.57	1.23
25	44	12.52	6.06	8	2.01	0.96
30	46	18.85	9.13	7	2.53	1.21
35	25	13.94	6.75			
40	16	11.66	5.65			
45	22	20.29	9.82	8	6.51	3.11
50	4	4.55	2.21	1	1.00	0.48
55	4	5.51	2.67	5	6.08	2.90
60	2	3.28	1.59			
Total	341	111.58	54.04	54	21.27	10.16

Pure pine stands. Mensuration results calculated for the evaluation of a pure *Pinus pseudostrabus* stand were: average age, 35; dominant height, 16.5 m and basal area, 32.6 m² ha⁻¹ with 21 as site index. This first assessment was the basis for calculating carbon content using the table of biomass and carbon stock for *Pinus pseudostrabus*, IS 21 (Table 3). A stand of full density is at age 35, a basal area of 42.3 m² ha⁻¹ and the estimated value for the stand inventory is 32.6 m² ha⁻¹. The degree of density is 0.77 according to equation 1, which is:

$$\text{Biomass} = 188.76 \times 0.77 = 145.35 \text{ Mg ha}^{-1}$$

$$\text{Carbon content} = 95.04 \times 0.77 = 73.18 \text{ Mg ha}^{-1}$$

For *Pinus teocote*, the records obtained were: average age, 50 years; dominant height 15.9 m and basal area, 19.1 m² ha⁻¹. The IS value was 15 (Aguirre, 2010). It can be observed that a full density stand of 50 years old has a basal area of 20.6 m² ha⁻¹ and the actual value obtained in the field is 19.1 m² ha⁻¹, so that the degree of density was 0.93 (Table 7). From the multiplication of the biomass and carbon values from the table at 50 years old by density degree, are obtained:

$$\text{Biomass} = 105.80 \times 0.93 = 98.39 \text{ Mg ha}^{-1}$$

$$\text{Carbon content} = 50.55 \times 0.93 = 47.01 \text{ Mg ha}^{-1}$$

DISCUSSION

The biomass equation is suitable for the estimation of this variable in terms of fitness and is a simplification of the model, often used for this kind of estimation (Acosta-Mireles *et*

Los valores más altos de biomasa y contenido de carbono para una categoría diamétrica determinada correspondieron a *Quercus* spp., seguido de *Pinus teocote* y *P. pseudostrabus* (198.48 kg, 172.85 kg y 159.41 kg de carbono para un árbol de 30 cm, respectivamente); lo anterior denota la importancia de realizar determinaciones de biomasa y carbono a nivel de especie. Individuos de 30 cm de diámetro de *Pinus cooperi* en Durango, por ejemplo, contienen 208.16 kg de carbono (Pimienta *et al.*, 2007). En el caso de la biomasa, ejemplares de *Pinus pseudostrabus* y *P. teocote* con 20 cm de diámetro tienen 140.72 kg y 160.78 kg, respectivamente; para un árbol de *Pinus patula* Schied. ex Schltdl. et Cham. del mismo diámetro, Díaz-Franco *et al.* (2007) obtuvieron 113.38 kg.

La evaluación de la biomasa en los ecosistemas presentó, como se esperaba, diferencias importantes. En el área de estudio el bosque con mayor contenido de biomasa es el mixto, constituido por *Quercus* spp. y *Pinus teocote*, con 132.85 Mg ha⁻¹, cifra cercana a la obtenida por Rodríguez-Laguna *et al.* (2007) en un bosque tropical subcaducifolio ubicado en Tamaulipas (136.9 Mg de biomasa ha⁻¹); en bosques mediterráneos del género *Quercus* citan valores de biomasa de 64 a 121 Mg ha⁻¹ (Rapp *et al.*, 1999). El bosque de pino-encino inventariado tiene 93.91 Mg de biomasa ha⁻¹, cercano al consignado en un bosque de composición similar en el norte de Durango, en el cual, en promedio, se obtuvieron 99.84 Mg de biomasa ha⁻¹ (Silva-Arredondo y Navar-Cháidez, 2010).

Los valores de incremento medio anual de biomasa para *Pinus pseudostrabus* y *P. teocote* son diferentes a la edad base de 50 años, para igual índice de sitio, con valores de 4.35 Mg ha⁻¹ y 3.25 Mg ha⁻¹, respectivamente. En comparación, *Pinus patula* muestra tasas de incremento de 6.7 Mg ha⁻¹, en Hidalgo (Figuroa-Navarro *et al.*, 2010), las cuales sólo se observan para *P. pseudostrabus* a una edad de 22 años y en la mejor condición de productividad en el área de estudio (IS 21); en todos los índices de sitio *P. teocote* tiene incrementos medios anuales en biomasa menores a 6 Mg ha⁻¹.

Las diferencias de productividad de biomasa entre especies de pino o para la misma especie en México son notables. En este trabajo la máxima producción de biomasa a la edad de 25 años en el IS 21 es de 158.64 Mg ha⁻¹ para *Pinus pseudostrabus*, el dato correspondiente para un rodal de productividad promedio de *P. patula* documentada es de 166.6 Mg ha⁻¹ (Figuroa-Navarro *et al.*, 2010). El valor de biomasa ha⁻¹ obtenido para *Pinus pseudostrabus*, índice de sitio 21, edad promedio de 35 años (73.18 Mg), es equivalente al de 74 Mg ha⁻¹ citado por Ordóñez *et al.* (2001), para esta especie en bosques de Michoacán.

al., 2002; Gayoso, 2002; West, 2004; Díaz-Franco *et al.*, 2007; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008; Navar, 2009), since it includes only one parameter, which makes its application easier for conventional forest inventory data.

The highest biomass and carbon content values to a given diameter category were for *Quercus* spp. followed by *Pinus pseudostrabus* and *P. teocote* (198.48 kg, 172.85 kg and 159.41 kg of carbon for a tree of 30 cm, respectively). This indicates the importance of biomass and carbon determinations by species. For example, *Pinus cooperi* trees of 30 cm in diameter in Durango State, have 208.16 kg of carbon (Pimienta *et al.*, 2007). In the case of biomass, *Pinus pseudostrabus* and *P. teocote* trees with 20 cm of diameter had 140.72 kg and 160.78 kg, respectively and for a *Pinus patula* Schied. ex Schltdl. et Cham tree of the same diameter, Díaz-Franco *et al.* (2007) determined 113.38 kg.

The assessment of biomass in the ecosystems showed important differences as expected. In the study area the forest with the highest biomass is the mixed one, with *Quercus* spp. and *Pinus teocote*, with 132.85 Mg ha⁻¹, which is close to that obtained by Rodríguez-Laguna *et al.* (2007), in a deciduous tropical forest in Tamaulipas State (biomass 136.9 Mg ha⁻¹); in Mediterranean *Quercus* forests biomass values of 64 to 121 Mg ha⁻¹ are reported (Rapp *et al.*, 1999). The pine-oak forest has an inventory biomass of 93.91 Mg ha⁻¹, which is a rather close number to that of the forest with a similar composition in the north of Durango State, where the average biomass was 99.84 Mg ha⁻¹ (Silva-Arredondo and Navar-Cháidez, 2010).

The values of annual average biomass increment of *Pinus pseudostrabus* and *P. teocote* are different from the base age 50 for the same site index, showing values of 4.35 Mg ha⁻¹ and 3.25 Mg ha⁻¹, respectively. In contrast, *Pinus patula* shows increment rates of 6.7 Mg ha⁻¹ in Hidalgo State (Figuroa-Navarro *et al.*, 2010), which are only observed for *P. pseudostrabus* at the age of 22 years and at its best shape of productivity in the study area (IS 21); in all site indexes, *P. teocote* has average annual increments in biomass below 6 Mg ha⁻¹.

The differences of biomass productivity among pine species for the same species in Mexico are remarkable. In this study, the maximum biomass production at the age of 25 years in the IS 21 is 158.64 Mg ha⁻¹ for *Pinus pseudostrabus*; the corresponding data for an average stand productivity of *P. patula* reported by Figuroa-Navarro *et al.* (2010) is 166.6 Mg ha⁻¹. The value of biomass per ha⁻¹ obtained for *Pinus pseudostrabus*, site index 21, average age of 35 years (73.18 Mg) is equivalent to 74 Mg ha⁻¹, as reported by Ordóñez *et al.* (2001) for this species in the forests of Michoacán State.

CONCLUSIONES

Los métodos desarrollados constituyen opciones prácticas para la evaluación del contenido de carbono en ecosistemas forestales puros y coetáneos de *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote*, así como para bosques mixtos de estas especies y cuando conforman mezclas con taxa del género *Quercus*. Los datos de biomasa y contenido de carbono pueden derivarse de los inventarios convencionales de sitios temporales de muestreo, mediante tarifas basadas en las categorías diamétricas de los árboles individuales, o bien a partir de la obtención de valores promedio en bosques puros y coetáneos, empleando los valores de referencia de las tablas elaboradas para las diferentes condiciones de productividad. 🌱

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión Nacional Forestal y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento otorgado a través del Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal, Proyecto CONAFOR-2002-C01-6054 Estructura, diversidad y contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León.

REFERENCIAS

- Acosta-Mireles, 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.
- Aguirre C., O. A. 1989. Aufstellung von Ertragstafeln auf der Basis einmaliger Waldaufnahmen am Beispiel von *Pinus pseudostrobus* Lindl. im Nordosten Mexikos. Dissertation. Universität Göttingen. Göttingen, Deutschland. 107 p.
- Aguirre C., O. A. 1991. Elaboración de tablas de producción en base a parcelas temporales de muestreo. *Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales* 1(5): 61-67.
- Balderrama, S., C. Luján A., G. Hernández y L. U. Castruita 2008. Captura de carbono en bosque de coníferas de la Sioerra Tarahumara en Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 4(2): 203-214.
- Bigsby, H. 2009. Carbon banking: creating flexibility for forest owners. *Forest Ecology and Management* 257(1): 378-383.
- De Jong, B. H. J., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto-Pinto and R. Tipper 1995. Community forest management and carbon sequestration: A feasibility study from Chiapas, Mexico. *Interciencia* 20(6): 409-416.
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y J. D. Etchevers-Barra 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13 (1): 25-34.
- Domínguez-Cabrera, G., O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, R. Rodríguez-Laguna y J. A. Díaz-Balderas 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 59-64.
- Figueroa-Navarro, C. M., G. Ángeles-Pérez, A. Velázquez-Martínez, H. M. de los Santos-Posadas 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipan, Hidalgo. *Revista ...* 1(1): 95-105
- Gayoso, J. 2002. Medición de la captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 53 p.

CONCLUSIONS

The methods here developed are practical options for assessing carbon content in pure and even-aged *Pinus pseudostrobus* and *P. teocote* forest ecosystems as well as for mixed forests of these species and when they mix with species of the *Quercus* genus. The of biomass and carbon stocks data may be inferred from conventional sampling of temporary sites, using rates based on diametric class of individual trees, or by obtaining average values in pure stands and even-aged, by using the reference values from the tables prepared for different productivity conditions. 🌱

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) and the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for sponsoring this study Project (CONAFOR-2002-C01-6054).

End of the English version

- Husch, B., T. W. Beers and J. A. Kershaw, JR. 2003. *Forest Mensuration*. Fourth Ed. John Wiley & Sons. New York, NY. USA. 443 p.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257(2): 427-434.
- Ordóñez, J. A., B. H. J. de Jong, O. Maser 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7 (2): 27-47.
- Pimienta de la T. D. J., G. Domínguez C., O. Aguirre C., F. J. Hernández y J. Jiménez P. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1): 35-46.
- Pretzsch, H. 2009. *Forest dynamics, growth and yield*. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 664 p.
- 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(1-3):39-49.
- Ravindranath, N. H. and M. Ostwald 2007. *Carbon inventory methods*. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 308 p.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, J. Meza- Rangel, O. Aguirre-Calderón y R. Razo-Zárate 2008. Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 4(2): 215-222.
- Silva-Arredondo, F. M., J. J. Návar-Cháidez 2010. Factores de expansión en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1): 55-62.
- Van Laar, A. and A. Akça 2007. *Forest Mensuration. Series: Managing Forest Ecosystems, No. 13*. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 383 p.
- West, P. W. 2004. *Tree and forest measurements*. Springer-Verlag. Berlin, Germany. 167 p.



José Villanueva Díaz (2010). Paraje de bosque mixto con árbol incendiado al centro. El árbol muerto está rodeado por especímenes de *Pinus jeffreyi*, *Pinus lambertiana* y *Abies discolor*. Parque Nacional de San Pedro Martir, Ensenada, Baja California.