

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



ESTIMACIÓN DE FACTORES DE EXPANSIÓN DE VOLUMEN A
BIOMASA Y CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES EN
CHIHUAHUA, MÉXICO

Por
ARMANDO LÓPEZ TELLES

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Linares, N.L. México

Agosto 2006

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

**ESTIMACIÓN DE FACTORES DE EXPANSIÓN DE VOLUMEN A BIOMASA Y
CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES EN CHIHUAHUA, MÉXICO**

TESIS DE MAESTRÍA

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

**Por
ARMANDO LÓPEZ TELLES**

COMITÉ DE TESIS

**Dr. José de Jesús Návar Cháidez
Presidente**

**Dr. Javier Jiménez Pérez
Secretario**

**Dr. César Cantú Ayala
Vocal**

Linares, N.L., México

Agosto 2006

Dedicatoria

*A mis padres Arturo López Arias e Irma Téllez Morales
A mi esposa Martha Mendoza García
A mi hija Arlen López Mendoza
A mis hijas Ana Karen, Yaritza Isabel, y Martha Viridiana
A mis hermanos Mario, Adriana, Mayra y Ulises
A toda mi familia*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León a través de la Facultad de Ciencias Forestales por aceptarme en su programa de maestría.

Al CONACYT por el apoyo otorgado a través del programa de becas.

Al Ph. Dr. José de Jesús Nívar Cháidez por su excelente dirección de esta tesis, por compartir sus conocimientos, consejos y observaciones.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez, por su valiosa contribución para el mejoramiento de este trabajo de investigación.

Al Dr. César Cantú Ayala, por su gran disponibilidad y por sus valiosas observaciones y comentarios hacia este trabajo de investigación.

A todos los catedráticos de la Facultad de Ciencias Forestales, por transmitirme sus conocimientos y ser parte de mi preparación profesional.

Al Dr. José Santos Flores Laureano por su disponibilidad y apoyo académico.

Al Ing. José Amador Heredia Huerta por su amistad y por ser excelente compañero laboral.

A mi amigo y compañero T.F. Abel López por su sincera amistad y apoyo en obtención de información.

A mi amigo y compañero de generación Ing. Heriberto Méndez Cortés, por brindarme su amistad y apoyo en todo momento.

A mis compañeros de laboratorio: MC María de Jesús Rodríguez, MC Eduardo de los Ríos (†), MC José Dueñez, MC Jorge Méndez, MC Raúl Espinoza, MC Humberto Hernández, MC Julio Ríos, MC María Arreola, MC Flor Ma. Silva, MC Ana Estrada, M.C. Rolando Orozco, Ing. Patricia Cisneros, Ing. Rafael Cruz, Ing. Antonio Conde, Manuel Unzueta y Chencho Reyna.

A mis compañeros de la facultad: MC Eliud Morales, Ing. José A. Díaz, MC Rodrigo Rodríguez, MC Dorian Pimienta, MC Gabriel Domínguez, Ing. Maritza Gutiérrez, Ing. Juan Rodríguez, Ing. Rebeca Aldana, Ing. Ignacio Tovar, Ing. Raúl Fernández e Ing. Jesús de León, Alejandro y a las secretarías de postgrado Sandra Cano, Diana e Isabel.

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS	i
LISTA DE FIGURAS	ii

Capítulo I

ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD BÁSICA EN MADERA DE *Pinus* y *Quercus* EN ECOSISTEMAS FORESTALES EN CHIHUAHUA, MÉXICO.

	Página
I.1 RESUMEN	1
ABSTRACT	2
I.2. INTRODUCCIÓN	3
Objetivos	4
I.3 MATERIAL Y MÉTODOS	4
I.3.1 Características del área de estudio	4
I.3.2 Metodología	6
I.3.3 Procedimiento estadístico	7
I.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
I.4.1 Densidad para <i>Pinus</i>	9
I.4.2 Densidad para <i>Quercus</i>	11
I.5 CONCLUSIONES	13
I.6 RECONOCIMIENTOS	13
I.7 LITERATURA CITADA	14

Capítulo II

ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y FACTOR DE EXPANSIÓN DE BIOMASA EN ECOSISTEMAS FORESTALES EN CHIHUAHUA, MÉXICO.

	Página
II.1 RESUMEN	16
ABSTRACT	17
II.2 INTRODUCCIÓN	18
Objetivos	19
II.3 MATERIAL Y MÉTODOS	20
II.3.1 Características del área de estudio	20
II.3.2 Metodología	21
II.3.2.1 Selección de los árboles muestra	21
II.3.2.2 Medición de los árboles muestra	22
II.3.2.3 Trabajo de laboratorio	22
II.3.2.4 Estimación de la biomasa	23
II.3.2.5 Estimación de los factores de expansión de biomasa	23
II.3.2.6 Características dasométricas del arbolado	24
II.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
II.4.1 Biomasa	25
II.4.1.1 <i>Pinus</i>	25
II.4.1.2 <i>Quercus</i>	26
II.4.2 Factores de expansión de biomasa	28
II.4.2.1 <i>Pinus</i>	28
II.4.2.2 <i>Quercus</i>	30
II.5 CONCLUSIONES	33
II.6 RECONOCIMIENTOS	33
II.7 LITERATURA CITADA	34

Capítulo III

ESTIMACIÓN DE CARBONO Y FACTOR DE EXPANSIÓN DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES EN CHIHUAHUA, MÉXICO.

	Página
III.1 RESUMEN	38
ABSTRACT	39
III.2 INTRODUCCIÓN	40
Objetivos	40
III.3 METODOLOGÍA	42
III.3.1 Características del área de estudio	42
III.3.2 Selección de árboles muestra	43
III.3.3 Trabajo de laboratorio	44
III.3.4 Análisis de los datos	44
III.3.4.1 Estimación del contenido de carbono	45
III.3.4.2 Estimación de los factores de expansión de carbono	45
III.3.4.3 Caracterización dasométrica del arbolado	46
III.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
III.4.1 Carbono	47
III.4.1.1 <i>Pinus</i>	47
III.4.1.2 <i>Quercus</i>	48
III.4.2 Factores de expansión de carbono	49
III.4.2.1 <i>Pinus</i>	49
III.4.2.2 <i>Quercus</i>	53
III.5 CONCLUSIONES	56
III.6 RECONOCIMIENTOS	56
III.7 LITERATURA CITADA	57

LISTA DE CUADROS

	Página
Capítulo I	
1. Coordenadas geográficas de los ejidos en estudio	4
2. Densidad básica en albura y duramen en <i>Quercus</i>	12
 Capítulo II	
1. Ecuaciones para la estimación de la biomasa fustal y de ramas	23
2. Ecuaciones para estimar densidad básica y volumen total	23
3. Caracterización dasométrica del arbolado de pino	24
4. Caracterización dasométrica del arbolado de encino	24
5. Valores de biomasa para pino	25
6. Biomasa de pino estimada empleando densidad básica y volumen fustal	26
7. Biomasa total de encino	26
8. Biomasa de encino estimada empleando densidad básica y vol. Fustal	27
 Capítulo III	
1. Ecuaciones para la estimación de biomasa fustal y de ramas	45
2. Ecuaciones para estimar densidad básica y volumen total	45
3. Caracterización dasométrica del arbolado de pino	46
4. Caracterización dasométrica del arbolado de encino	46
5. Contenido de carbono total para pino estimado mediante el primer procedimiento	47
6. Contenido de carbono para pino estimado mediante el segundo procedimiento	48
7. Contenido de carbono para encino estimado mediante el primer procedimiento	48
8. Contenido de carbono para encino estimado mediante el segundo procedimiento	49
9. Factores de expansión de carbono para pino estimados mediante el primer procedimiento	50
10. Factores de expansión de carbono para pino estimados mediante el segundo procedimiento	50
11. Factores de expansión de carbono para encino estimados mediante el primer procedimiento	54
12. Factores de expansión para encino estimados mediante el segundo procedimiento	54

LISTA DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO I	
1. Ubicación geográfica del municipio de Guachochi, Chihuahua	5
2. Relación de la densidad básica con la altura relativa en <i>Pinus</i>	11
3. Relación de la densidad básica de albura y duramen a nivel de especies	12
 CAPÍTULO II	
1. Ubicación geográfica del municipio de Guachochi, Chihuahua	21
2. Relación lineal de los factores de expansión de biomasa y la altura en el género <i>Pinus</i>	29
3. La distribución de los factores de expansión de biomasa en el género <i>Pinus</i> con el ajuste de la distribución normal	30
4. Relación entre los factores de expansión de biomasa y la altura en el género <i>Quercus</i>	31
5. La distribución de los factores de expansión en el género <i>Pinus</i> con el ajuste de la distribución normal	32
 CAPÍTULO III	
1. Ubicación geográfica del municipio de Guachochi, Chihuahua	43
2. Relación entre los factores de expansión de carbono y la altura en el género <i>Pinus</i>	51
3. Relación entre los factores de expansión de carbono y la densidad básica de la madera de pino	52
4. La distribución de los factores de expansión en pino con el ajuste de la distribución normal para el género <i>Pinus</i>	53
5. La distribución de los factores de expansión en encino con el ajuste de la distribución normal para el género <i>Quercus</i>	55

CAPITULO I

ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD EN MADERA DE *Pinus* y *Quercus* EN ECOSISTEMAS FORESTALES EN CHIHUAHUA, MÉXICO.

1. RESUMEN

La densidad es una propiedad que influye en varias características de la madera y es considerada para la utilización final de los productos derivados de la trocería. En este reporte de investigación se presenta el análisis de la densidad básica empleando probetas de madera de albura y duramen de 105 árboles de las especies *Pinus arizonica*, *Pinus durangensis*, *Quercus rugosa* y *Quercus sideroxylla* extraídos durante el aprovechamiento forestal en tres ejidos del Municipio de Guachochi, Chihuahua. El objetivo de este trabajo es la determinación de la densidad de la madera para los géneros *Pinus* y *Quercus*, observar cambios en la densidad de albura y duramen a diferentes alturas del fuste, emplear los valores obtenidos como una vía para estimar la biomasa en compartimientos del árbol. Para el género *Pinus* no se encontraron diferencias significativas en la densidad en albura y duramen pero existe una relación de la densidad con la altura del árbol y se estima de la relación que la muestra para estimar este parámetro debe de tomarse a 0.23 de la altura relativa del árbol. El promedio de la densidad básica para *Pinus* fue de 0.46 g cm^{-3} (± 0.03). Para el género *Quercus* no se encontró relación de la densidad anhidra con la altura del árbol, sin embargo, sí se encontraron diferencias altamente significativas entre la albura y el duramen ($P \geq 0.0001$). La densidad anhidra promedio para *Quercus* resultó ser alta (0.89 g cm^{-3}) en comparación con otros reportes de este parámetro y se recomienda precaución en su uso posterior.

Palabras clave: Densidad, albura y duramen, altura relativa.

ABSTRACT

The density is a property that influences in several characteristics of the wood and is considered for the final use of wood. In recent works of biomass estimation it has been using the density for the determination of the dry weight of the wood. In this report of investigation the analysis of the basic density appears using test tubes sapwood and heartwood of 105 trees of the species the *Pinus arizonica*, *Pinus durangensis*, *Quercus rugosa* and *Quercus sideroxylla* extracted during the forest advantage in three ejidos of the Municipality of Guachochi, Chihuahua. The objective of this work is the determination of the density of the wood for *Pinus* and *Quercus*, to observe changes in the density of sapwood and heartwood to different heights from the bole. To use the values obtained like a route to consider the fustal biomass. For the *Pinus* sort were not significant differences in the density in whiteness and heartwood; a relation of the density with the height exists, thus was considered the relative height (0.23) to which it is recommended to take the samples from wood to determine the density. The average of the density for *Pinus* was of 0.46 g cm^{-3} (± 0.03). For the *Quercus* sort was not relation of the density with the height of the tree, in whiteness and heartwood yes were significant differences highly ($P \geq 0.0001$). The density average for *Quercus* turned out to be very high (0.89 g cm^{-3}).

Key words: Density, sapwood and heartwood, relative height.

2. INTRODUCCIÓN

Las diferencias en las propiedades de la madera tienen un efecto importante sobre las características y el rendimiento de la pulpa y los productos del papel, así como también en la resistencia y utilidad de sus productos sólidos (Sparnochia, 1990; Downes *et al.*, 1997). Entre esas propiedades se destaca la densidad, que presenta una gran complejidad, ya que es consecuencia de diferentes factores como son la cantidad de madera de verano, el espesor de las paredes de las fibras, el tamaño de las células y su proporción relativa, y la composición química de la madera (Bonavía, 1981; Bonavía y Piussan, 1987; Yang *et al.*, 1994).

Zobel y Talbert (1984) mencionan que la densidad de la madera es el peso de la madera expresado por volumen cúbico y es una forma de expresar qué cantidad de sustancia de la madera está presente. La densidad relativa o básica (peso anhidro/volumen verde) es un parámetro de la madera, que puede obtenerse fácil y económicamente y tiene relación con las propiedades mecánicas de la madera. Generalmente se expresa en ton m^{-3} , kg m^{-3} o g cm^{-3} . (Fernández y Echenique, 1989; Ortega y Ángeles, 1999).

Monteoliva *et al.*, (2002) señalan que en términos generales es factible encontrar madera juvenil en los primeros anillos junto a la médula, asociada a una menor densidad y menor longitud de fibras. La madera madura se encuentra distanciada de la médula y en ella se espera encontrar una estabilización de la densidad, de la longitud de fibras y de otras características asociadas.

Zobel (1988) en trabajos de investigación concluyó que la variación de la densidad con la altura está ligada a la cantidad de madera juvenil que recorre el árbol axialmente como un cilindro interno desde la base hasta el ápice. El resultado es que las trozas de la copa constan principalmente de madera juvenil, mientras que las de la base del mismo árbol poseen más madera madura con una mayor densidad.

Monteoliva *et al.*, (2002) indican que si se desea caracterizar la densidad de un árbol a través de muestras, resulta entonces imprescindible conocer como varía la propiedad dentro del ejemplar, para ubicar el ó los puntos de donde extraer el material con el cual se realizarán las determinaciones.

Schlegel (2001), Schlegel *et al.*, (2000) y Návar *et al.*, (2005) consideran con el uso de la ecuación física de masa = volumen x densidad, un método indirecto para estimar la biomasa fustal, a través del volumen del fuste y la densidad básica para determinar el peso seco.

Los objetivos de este trabajo son: a) determinar la densidad de la madera para los géneros *Pinus* y *Quercus*, b) observar cambios en la densidad de albura y duramen a diferentes alturas del fuste, y c) emplear los valores obtenidos como una vía para estimar los componentes de biomasa del árbol.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Características del área de estudio

Localización:

El estudio se realizó en los ejidos Caborachi, Guachochi y Papajichi, ubicados en el municipio de Guachochi, Chihuahua. Estos ejidos se encuentran enclavados en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental, esta área se le conoce como Sierra Tarahumara y se localizan en las coordenadas:

Cuadro 1. Coordenadas geográficas de los ejidos en estudio.

Ejido	Coordenadas	
Caborachi	26 ⁰ 45' 33.37" N	-106 ⁰ 48' 48.58" W
	26 ⁰ 50' 43.84" N	-107 ⁰ 02' 31.25" W
Guachochi	26 ⁰ 51' 01.78" N	-107 ⁰ 51' 03.42" W
	26 ⁰ 36' 38.30" N	-106 ⁰ 55' 05.78" W
Papajichi	27 ⁰ 14' 03.32" N	-107 ⁰ 09' 57.64" W
	26 ⁰ 59' 20.00" N	-107 ⁰ 02' 36.63" W



Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Guachochi, Chihuahua.

Orografía:

Los terrenos son bastante accidentados, localizándose elevaciones y depresiones muy irregulares. A pesar de sus variadas serranías abruptas, frecuentemente se localizan cordones y áreas rocosas, que separan los pequeños valles y hondonadas (EDF, 1975).

Clima:

De acuerdo con la clasificación de Koppen modificado por García (1973) el tipo de clima es designado como templado moderado lluvioso (Cfwb), con precipitaciones distribuidas en el verano y en el invierno, esta última en forma de nieve (EDF, 1975).

Hidrología:

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de las Regiones Hidrológicas No. RH10 y RH24. Las cuencas son las RH10G y RH24L. Las principales

corrientes de agua se depositan en los ríos Urique y Fuerte los cuales llegan al Océano Pacífico, y al río Balleza depositando las aguas en el Golfo de México (EDF, 1975).

Suelo:

El origen del suelo proviene del periodo cenozoico, existen rocas sedimentarias pero predominan las rocas volcánicas (ígneas extrusivas), tales como las Andesitas, Riolitas, Lutitas, Pizarras, Margas, Basaltos. Los suelos son del tipo Luvisol, Regosol y Podzólicos, este último denominado como suelos cafés forestales. En general la textura es del tipo arcillo-arenosa (DETENAL, 1988; INEGI, 2003).

Vegetación:

La vegetación corresponde a bosque de coníferas. Se presentan masas puras de pino, mezcla de especies conformando el bosque de pino-encino y bosque de encino (INEGI, 2003).

Las especies de pino más comunes son *Pinus durangensis*, *P. arizonica*, *P. leiophylla*, *P. engelmannii*, *P. herrerae* y *P. chihuahuana*. Las especies de encino más frecuentes son *Quercus rugosa* y *Q. sideroxyla*.

3.2. Metodología

Se seleccionaron 105 árboles de cuatro especies, siendo 30 de *Pinus arizonica*, 30 de *Pinus durangensis*, 30 de *Quercus sideroxyla* y 15 de *Quercus rugosa*, en actividades simultáneas de extracción como parte de los aprovechamientos forestales autorizados mediante programas de manejo en los ejidos de estudio.

Cada árbol fue derribado y seccionado cada 2.5 m a lo largo del fuste a partir del tocón hasta la punta del árbol, obteniéndose de cada sección una rodaja de 5 cm de espesor aproximadamente. En laboratorio, de cada rodaja se obtuvo una probeta de albura y otra de duramen con dimensiones de 2.5 cm x 2.5 cm x 2.5 cm. Cada probeta se pesó y cubió en verde y fueron secadas en una

estufa a temperatura de 105⁰ C hasta peso constante, ya secas se pesaron y cubicaron.

3.3. Procedimiento estadístico

Para estimar la densidad básica de cada una de las probetas se utilizó la siguiente fórmula:

$$D = Ps/Vv$$

Donde: D= Densidad básica, Ps= peso seco de la probeta, Vv= volumen en verde de la probeta.

Se obtuvieron y analizaron 1080 probetas de los árboles indicados.

Con los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico para identificar diferencias entre la densidad con la altura relativa del fuste y la densidad con los componentes albura y duramen. Para lo anterior se utilizó el paquete estadístico SAS.

El modelo lineal para ajustar la relación de la densidad promedio con la altura relativa del árbol fue el siguiente:

$$\rho = \alpha' + \beta \left(\frac{h}{H} \right)$$

Donde:

α = parámetro que representa la intercepta de la relación ρ contra (h/H) .

β = parámetro que representa la pendiente de la relación ρ contra (h/H) .

h = altura i del fuste.

H = altura total del fuste.

Los parámetros fueron estimados con la técnica de cuadrados mínimos, expresada en Návar (2006b).

El punto de la altura en el cual se debe de tomar una muestra para estimar la densidad básica, se determina, de acuerdo con Nívar (2006a) por medio de la ecuación siguiente:

$$E(X) = \int_{h/H=0}^{h/H=1} [\alpha + \beta(h/H)] (h/H) \delta(h/H)$$

$$E(X) = \bar{X} = \int_{h/H=0}^{h/H=1} [\alpha + \beta(X)] (X) \delta X$$

$$= \int_0^{1.0} \alpha X + \beta X^2 \delta X$$

$$= \frac{\alpha}{2} X^2 + \frac{\beta}{3} X^3$$

Donde:

ρ = Densidad básica promedio

α y β = Parámetros estadísticos a estimar

h/H = Altura relativa del árbol

La desviación estándar y el intervalo de confianza del área del fuste donde se puede obtener la muestra para determinar la densidad básica de la madera se determinaron, de acuerdo con Nívar (2006a) de la siguiente manera:

$$S(X) = S = \sqrt{E(X^2) - [E(X)]^2}$$

$$E(X^2) = \int_{x=0}^{x=1} X^2 (\alpha + \beta X) \delta X$$

$$= \int_{x=0}^{x=1} \alpha x^2 + \beta x^3 \delta x$$

$$= \frac{\alpha}{3} x^3 + \frac{\beta}{4} x^4$$

$$= \sqrt{\left[\frac{\alpha}{3}x^3 + \frac{\beta}{4}x^4 \right] - \left[\frac{\alpha}{2}x^2 + \frac{\beta}{3}x^3 \right]^2}$$

Donde:

S = Desviación estándar

X = Altura relativa

α y β = Parámetros estadísticos a estimar

$$I.C. \equiv \bar{X} \pm \frac{SD}{\sqrt{n}} * t_{\alpha, n-2} = E(X) \pm \frac{SD}{\sqrt{n}} * t_{\alpha, n-2}$$

Donde:

I.C. = Intervalo de confianza

α = 0.05

SD = Desviación estándar

n = Número de datos

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Densidad básica para Pinus

La densidad básica promedio estimada para la madera de árboles del género *Pinus* fue de 0.46 g cm⁻³ con valores mínimo y máximo de 0.41 y 0.54 g cm⁻³, intervalo de confianza de ± 0.03 y una desviación estándar de 0.05. Se considera como una madera de densidad media. Este valor está muy cercano a lo reportado por Sotomayor (2005) para *Pinus arizonica* de 0.43 g cm⁻³ y 0.46 g cm⁻³ para *Pinus durangensis*.

En el análisis de varianza realizado para la variable densidad básica en muestras de madera de albura y duramen, no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.4322$), lo anterior nos indica que para la determinación de la

densidad, la muestra de madera a analizar se puede obtener sin considerar el contenido de albura y/o duramen.

Se encontraron diferencias altamente significativas de la densidad con respecto a la altura del fuste ($P \geq 0.0001$), entonces la densidad varía de acuerdo a la altura del árbol. Esta relación ha sido reportada por López y Valencia (2001) en *Pinus greggii* con un coeficiente de correlación, $r=0.36$ ($P \geq 0.05$). Se considera que la variación de la densidad de la madera con la altura se debe a la relación de la producción de madera juvenil en las secciones superiores, presentándose una densidad menor a diferencia de las secciones a partir de la base de los árboles que contienen mayor proporción de madera madura y en la cual la densidad se considera que se estabiliza siendo esta mayor.

Por lo anterior, si se desea caracterizar la densidad de un árbol a través de muestras, resulta entonces imprescindible determinar la ubicación del ó los puntos de donde se debe extraer el material con el cual se realizarán las determinaciones. Para ello se consideró estimar la altura relativa (h/H) del árbol en la cual se recomienda extraer la muestra de madera para determinar su densidad.

La relación entre la densidad básica promedio de la madera y la altura relativa del fuste en las especies de *Pinus* (*P. arizonica* y *P. durangensis*) se presenta en la Figura 2 observándose en ella una relación negativa de la densidad básica con la altura relativa, mostrando que la densidad es mayor en las secciones inferiores del fuste dado que en estas la proporción de madera madura es mayor y por ello la densidad resulta más alta y en cambio en las secciones superiores se presenta una mayor proporción de madera juvenil dando como resultado una densidad menor. La densidad básica cambia con la altura relativa en las especies de pino estudiadas ($P > F = 0.0001$) y se ajusta la tendencia a una línea recta con pendiente negativa ($r^2=0.26$ y $C.V.= 12.51$). La ecuación que describe la línea recta de la tendencia, cuando se integra, de acuerdo con la metodología descrita, para estimar el promedio, la desviación estándar e intervalo de confianza resultan en: $0.23 H$, $0.043 H$ y $0.008 H$,

respectivamente. Esta información indica que la densidad básica se puede determinar a alturas relativas con un intervalo de $0.23H \pm 0.008 H$.

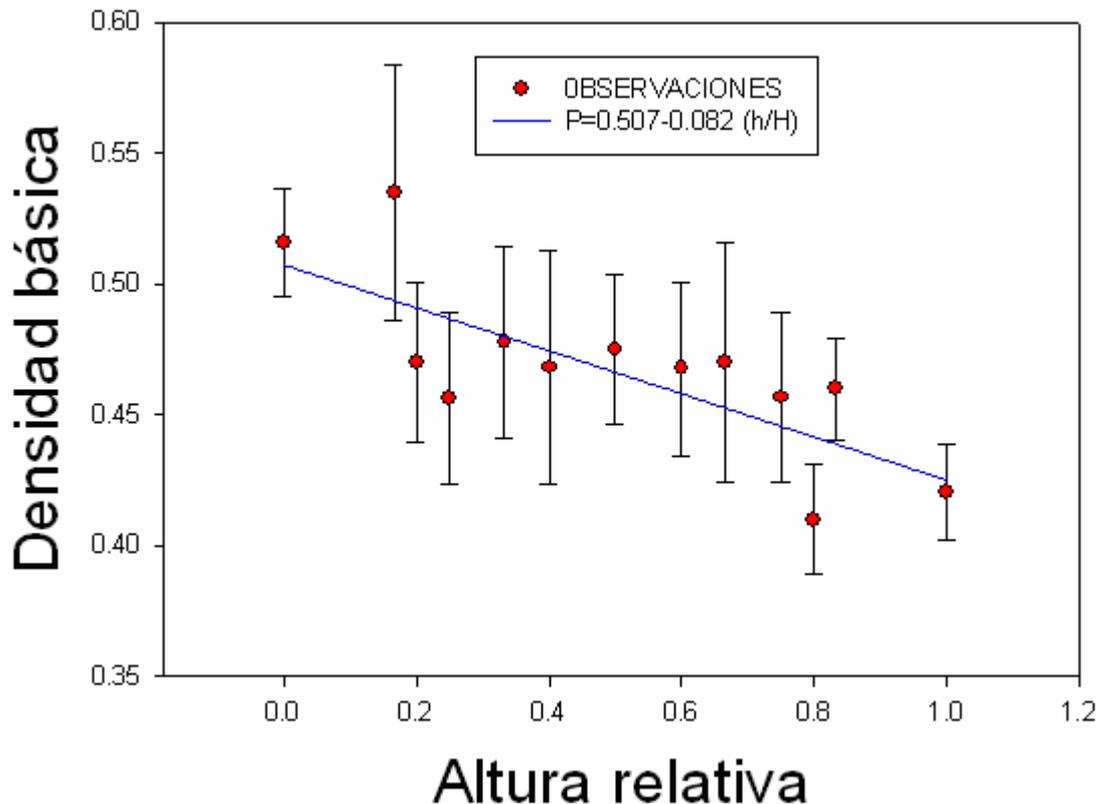


Figura 2. Relación de la densidad básica con la altura relativa (h/H) en *Pinus*

4.2. Densidad para Quercus

En el análisis de varianza no se encontraron diferencias significativas de la densidad anhidra a diversas alturas ($P \geq 0.9788$), por lo tanto no se presentan cambios en la densidad anhidra de la madera de albura y duramen a medida que aumenta la altura del árbol. Lo anterior nos indica que la extracción de muestras de madera de encino de estas especies puede ser tomada en cualquier sección del fuste para la determinación de la densidad.

Se encontraron diferencias altamente significativas en la densidad anhidra para los componentes albura y duramen ($P \geq 0.0001$) ($r^2 = 0.35$; C.V=7.91). En ambas especies la densidad anhidra del duramen resultó más alta que la de albura,

esto se debe a la proporción de madera madura y juvenil en ambos componentes.

Cuadro 2. Densidad anhidra en albura y duramen en *Quercus*

Especie	Componente	Densidad anhidra	Desviación. Estándar	Intervalo Confianza
Q. r	Albura	0.80	0.0961	0.0769
Q. r	Duramen	0.89	0.0902	0.0625
Q. s	Albura	0.85	0.0743	0.0326
Q. s	Duramen	0.94	0.0494	0.0183

Donde: Q. r= *Quercus rugosa*; Q. s= *Quercus sideroxylla*

A nivel de especies se encontraron diferencias significativas ($P \geq 0.0236$), siendo mayor la densidad anhidra para *Quercus sideroxylla* que en *Quercus rugosa*. En la figura 3 se aprecia que la densidad anhidra para *Quercus rugosa* es de 0.80 g cm^{-3} (albura) y 0.89 g cm^{-3} (duramen), para *Quercus sideroxylla* 0.85 g cm^{-3} (albura) y 0.94 g cm^{-3} (duramen).

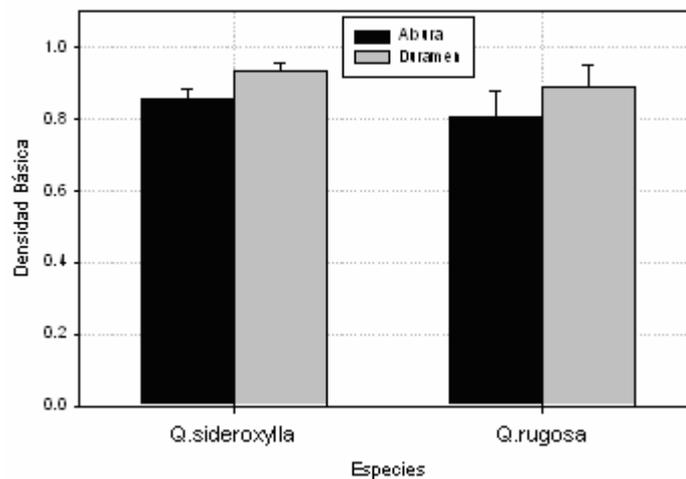


Figura 3. Relación de la densidad anhidra de albura y duramen a nivel de especies de *Quercus*

El promedio estimado de la densidad anhidra para *Quercus* es de 0.89 g cm^{-3} con un intervalo de confianza de ± 0.05 y una desviación estándar de 0.08 . Becerra (1977) reporta en una investigación realizada en el estado de Durango una densidad anhidra de 0.74 g cm^{-3} para *Q. sideroxylla* y para *Q. convallata* de 0.89 g cm^{-3} . Elguero *et al.*, (1995) estimaron una densidad anhidra de 0.83 g cm^{-3} en *Quercus rugosa*.

5. CONCLUSIONES

En el género *Pinus* no se encontraron diferencias significativas en la densidad básica de albura y duramen, por lo cual las muestras se pueden tomar sin considerar su proporción.

Se encontraron diferencias altamente significativas en la densidad básica de la madera de *Pinus* a diversas alturas por lo cual se estimó la altura relativa (0.23) recomendable para tomar las muestras para estimar la densidad de la madera.

La densidad básica promedio para *Pinus* fue de 0.46 g cm^{-3} . La densidad anhidra promedio para *Quercus* resultó ser alta (0.89 g cm^{-3}) en comparación con otros reportes de este parámetro y se recomienda precaución en su uso posterior.

La densidad anhidra en albura y duramen en *Quercus* no cambia conforme aumenta la altura.

Se encontraron diferencias altamente significativas en la densidad anhidra de albura y duramen en *Quercus*.

La densidad anhidra resultó ser más alta en el duramen en *Quercus rugosa* y *Quercus sideroxylla*.

6. RECONOCIMIENTOS

Este proyecto de investigación fue financiado por el CONACYT a través del proyecto CONACYT-CONAFOR 2002-CO1-6230 "Almacenes y tasa de secuestro de bióxido de carbono en plantaciones forestales del norte de México".

7. LITERATURA CITADA

Becerra, M. J. 1977. Usos probables de la madera de dos encinos en el estado de Durango. Ciencia Forestal. Revista del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. No. 5. Vol. 2. 3-13 p.

Bonavia de Guth, E. 1981. Características del leño de varias especies e híbridos de *Salix* en apoyo a la obtención de buenos clones papeleros. Trabajos Técnicos ATIPCA, Buenos Aires. Tomo 1. pp. 23-32.

Bonavia de Guth, E. y Piussan, C. M. 1987. Variación de las características del leño del individuo en *Salix nigra* cultivado en el Delta del Paraná. Simposio sobre Silvicultura y Mejoramiento genético de especies forestales. Centro de Investigaciones y Experiencias Forestales. Buenos Aires. Tomo IV pp. 219-235.

DETENAL. 1988. Carta Geología. Escala 1:25,000. Guachochi G13-4. Editada 1988. Impresa 1991.

Downes, G. M., Hudson, I. L., Raymond, C. A., Dean, A. J., Michell, A. J., Schimleck, L. R., Evans, R. & Muneri, A. 1997. Sampling Eucalyptus for wood and fibre properties. CSIRO Publishing, Australia. 132 pp.

EDF. 1975. Estudio Dasonómico Fotogramétrico de los Ejidos Guachochi, Caborachi y Rocheachi municipio de Guachochi, Chihuahua. Productos Forestales de la Tarahumara. 120 p.

Elguero, P. M., Raya, G. D., Valdez, C. H., Castro, V. M. y Zizumbo, C. F. 1995. Ensayo sobre contracción e hinchamiento de las maderas. Ciencia y Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 7-14 p.

Fernández V. R. y Echenique M. R. 1989. Estructuras de madera. Editorial LIMUSA. México. 367 p.)

INEGI. 2003. Carta Estatal Edafológica. Chihuahua. Escala 1:1,000,000. Edición 2002. Impresión 2003.

INEGI. 2003. Carta Estatal Vegetación. Chihuahua. Escala 1:250,000. Edición 2002. Impresión 2003.

López L., M. y S. Valencia. 2001. Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. Del norte de México. Madera y Bosques 7 (1): 37-46.)

Monteoliva, S., Senisterra, G., Marquina, J., Marlats, R. y Villegas, S. 2002. Estudio de la variación de la densidad básica de la madera de ocho clones de sauce (*Salix spp.*) Facultad de ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina. 6 Pág.

Návar, J., González, N., and Graciano, J. 2005. Carbon sequestration by forest plantations of Durango Mexico. Madera y Bosques 11: 15-34.

Návar, C. J. 2006a Probabilidades y estadísticas aplicadas al manejo de recursos naturales y medio ambiente. En revisión.

Návar, C. J. 2006b. Manual de métodos estadísticos. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Linares, N.L. México.

Ortega, E. F. y Ángeles, G. 1999. Relación entre la densidad relativa y el cortante paralelo al grano en maderas latinoamericanas. Foresta veracruzana. Vol. 1. No. 3. 33-36 p.

Sapornochia, L. 1990. Mejora genética de las características tecnológicas de la madera. Seminario sobre calidad de la madera en la producción forestal. Centro de Investigaciones y Experiencias Forestales, Buenos Aires. pp. 36-53.

Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, Valdivia, Chile. 13 p.

Schlegel, B., Gayoso, J. y Guerra, J. 2000. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Universidad Austral de Chile. 23 p.

Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa en bosques del tipo forestal siempreverde. Universidad Austral de Chile. 13 p.

Sotomayor, C. J. 2005. Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. Investigación e Ingeniería de la Madera. Volumen 1, Número 1. 20 p.

Vicente A. Pérez Galaz, Alberto Campos Barrer, Víctor Carvalho Aceituno, Leonardo Frigerio Moreau, Fernando Morales Venegas y Alejandro Pastene Sarmiento. Manual de cálculo de construcciones en madera. 1990. Manual No. 13, Vol. 1. Instituto Forestal Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 355 p.).

Yang, K. C., Chen, Y. C. & Chiu, c. 1994. Formation and vertical distribution of juvenile and mature wood in a single stem of *Criptomeria japonica*. Canadian Journal Forestry Research. 24: 969-975.

Zobel, B. and Talbert J. 1984. Tree Improvement. Applied forest. John Wiley & Sons, Inc. 505 p.

Zobel, B. 1988. Eucalyptus in the forest industry. TAPPI 71 (12): 42-46.

CAPITULO II

ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y FACTOR DE EXPANSIÓN DE BIOMASA EN ECOSISTEMAS FORESTALES EN CHIHUAHUA, MÉXICO.

1. RESUMEN

La estimación adecuada de la biomasa de un bosque es un elemento de gran importancia, debido a que ésta permite determinar la productividad del sitio, la cantidad de carbono y otros de sus componentes, etc. En este estudio se estima la biomasa total a través de ecuaciones de biomasa, volumen y de densidad básica, y se generaron factores de expansión mediante la relación biomasa total y volumen fustal para arbolado de pino y encino en el Ejido Guachochi, Municipio de Guachochi, Chihuahua, México. Los promedios de biomasa al nivel del rodal para los géneros pino y encino fueron de 73.73 Mg ha⁻¹ (± 5.396) y 12.010 Mg ha⁻¹ (± 1.878), respectivamente. La densidad básica estimada para pino fue de 0.48 g cm⁻³ (± 0.0002) y 0.78 g cm⁻³ (± 0.0003) para el encino. Los factores de expansión de biomasa (FEB) resultaron con un promedio de 0.63 (± 0.013) para el pino y 1.186 (± 0.058) para el encino. Para ambos géneros se encontró una relación lineal negativa entre los factores de expansión y la altura del arbolado.

Palabras clave: Biomasa, densidad básica, Factores de expansión.

ABSTRACT

The suitable estimation of the biomass of a forest is an element of great importance, because this one allows determining the productivity of the site, the amounts of carbon and others of its components, etc. In this study the total biomass through biomass equations is considered, volume and of basic density, were generated factors of expansion by means of the relation total biomass and bole volume for tree of pine and oak in the Ejido Guachochi, Municipality of Guachochi, Chihuahua, Mexico. The averages of biomass for the pine and the oak were of 73.73 (± 5.396) and 12,010 Mg ha⁻¹ (± 1.878) respectively. The basic density considered for pine was of 0.48 g cm⁻³ (± 0.0002) and 78 g cm⁻³ (± 0.0003) for the oak. The factors of expansion of biomass (FEB) were with an average of 0.63 (± 0.013) for pine and 1.186 (± 0.058) for the oak. For both genres was a negative linear relation between the factors of expansion and the height of tree.

Key words: Biomass, basic density, Factors of expansion.

2. INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda de la sociedad por productos de madera, los crecientes costos de estos productos, y la preocupación mundial de las fuentes de energía y el calentamiento global ha interesado la utilización de la biomasa forestal total (Cost y McClure, 1982). Gradualmente las demandas ha incrementado para los manejadores del bosque y científicos para informar sobre la biomasa de la copa para estudios del ciclo de nutrientes, evaluación de la vida silvestre, determinación de la productividad del sitio, la predicción del peligro de incendios forestales y para evaluar la contribución de los cambios en los bosques en el ciclo del carbono (Phillips y Cost, 1979; Gillespie et al., 1992).

La determinación adecuada de la biomasa de un bosque es un elemento de gran importancia, debido a que ésta permite determinar los montos de carbono y otros de sus componentes (Brown et al., 1996; Monroy y Návar, 2004; Návar et al., 2004; 2005a; 2005b).

Schlegel *et al.*, (2001) define a la biomasa forestal como el peso (o estimación equivalente) de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo y que normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco. La biomasa es frecuente separada en componentes, donde los más típicos corresponden a la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta (Schlegel *et al.*, 2000; Southwood y Henderson, 2000).

Brown (1997) menciona que existen métodos directos e indirectos para estimar la biomasa de un bosque. El método directo consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa directamente, determinando luego su peso seco. Una forma de estimar la biomasa con el método indirecto es a través de ecuaciones y modelos matemáticos calculados por medio de análisis de regresión entre las variables colectadas en terreno y en inventarios forestales.

Návar et al., (2004) consideran que el método destructivo en conjunto con el desarrollo de ecuaciones alométricas locales es el más preciso para estimar el

volumen de biomasa aérea. De acuerdo con Campbell *et al.*, (1985) este procedimiento resulta muy costoso. La estimación alométrica es en muchos casos preferible sobre los métodos destructibles, por los disturbios que se ocasionan y por lo costos altos en su realización (Gehring *et al.*, 2004).

Existe un sin número de ecuaciones alométricas que han sido desarrolladas en diversas investigaciones para: estimar la biomasa aérea o los almacenes de carbono en los bosques (Brown *et al.*, 1989; Campbell *et al.*, 1985; Gehring *et al.*, 2004; Grundy, 1995; Karmacharya y Singh, 1992; Prado y Alarcón, 1991; Segura y Kanninen, 2005; Navar *et al.*, 2004; 2005), estimar la productividad (Ludhiyal y Ludhiyal, 1997), y determinar los combustibles en los bosques (Tietema, T. 1993).

También se puede estimar la biomasa a través del volumen del fuste, utilizando la densidad básica para determinar el peso seco (Campbell *et al.*, 1985; Deans *et al.*, 1996 Schleger, 2001; Navar *et al.*, 2005) y un factor de expansión para determinar el peso seco total (biomasa total del árbol) (Schleger, 2001).

Brown *et al.*, (2001) define el factor de expansión de biomasa (F_{eb}), como el cociente de la biomasa aérea total y el volumen fustal ($F_{eb} = B_t/V_f$). Mediante este factor se puede calcular la biomasa aérea total a partir del volumen de los fustes, dato que proviene de los inventarios forestales convencionales. Los factores de expansión pueden ser una herramienta muy útil para estimar la biomasa y el carbono en los bosques, contando sólo con información de inventarios forestales (Dauber *et al.* 2000; Schleger, 2001).

Los factores de expansión varían dependiendo de las especies, la edad del bosque, el diámetro a la altura del pecho promedio del rodal, la estructura del rodal y la estación y son aplicables factores diferentes a las existencias, el crecimiento y la extracción (Husch, 2001; Schoene, 2001).

Los objetivos del presente estudio son: a) determinar la biomasa total mediante el uso de estimación del peso por medio de: (i) ecuaciones alométricas y (ii) el empleo de la densidad básica, b) estimar factores de expansión de biomasa a

través de la biomasa total y el volumen fustal, c) relacionar los factores de expansión con variables dasométricas y d) definir la distribución madre de los factores de expansión.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Características del área de estudio

El estudio se realizó en el ejido Guachochi ubicado en el municipio de Guachochi, Chihuahua. Este ejido se encuentra enclavado en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental, en el área conocida como Sierra Tarahumara. Los terrenos son bastante accidentados, localizándose elevaciones y depresiones muy irregulares (EDF, 1975). El clima es designado como templado moderado lluvioso (Cfwb), con precipitaciones distribuidas en el verano y en el invierno (esta última en forma de nieve). El origen del suelo proviene del periodo cenozoico, los suelos son del tipo Luvisol, Regosol y Podzólicos (DETENAL, 1988). La vegetación corresponde a bosque de coníferas, presentándose masas puras de pino, mezcla de especies conformando el bosque de pino-encino y bosque de encino. Las especies de pino más comunes son *Pinus durangensis*, *P. arizonica*, *P. leiophylla*, *P. engelmannii*, *P. herrerae* y *P. chihuahuana*. Las especies de encino más frecuentes son *Quercus rugosa* y *Q. sideroxylla*. (INEGI, 2002).



Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Guachochi, Chihuahua.

3.2. Metodología

3.2.1 Selección de los árboles muestra

La evaluación de los componentes de la biomasa aérea es un procedimiento que implica el derribo de los árboles a evaluar. No se consideró un diseño de muestreo específico, sino la realización de mediciones en árboles derribados como parte de los aprovechamientos autorizados en los programas de manejo forestal vigentes para los ejidos mencionados. De acuerdo a la distribución diamétrica de los árboles reportados en la relación de marqueo se definió el número de árboles a medir para el presente estudio, incluyendo árboles de todas las categorías diámetricas. Se derribaron 105 árboles en total, de los cuales 30 fueron de *Pinus arizonica*, 30 de *Pinus durangensis*, 15 de *Quercus rugosa* y 30 de *Q. sideroxylla*.

3.2.2. Medición de los árboles muestra

Antes del derribo de los árboles seleccionados, se midió su diámetro a la altura del pecho (DAP) para identificar a la categoría diamétrica a la que pertenecen.

Los árboles derribados se separaron en sus componentes fuste y ramas.

Se midieron las variables altura total del árbol; altura, diámetro superior y a la base del tocón; del fuste se midió el diámetro a 0.50 m y a 1.0 m, a partir de ahí a cada metro hasta los 20 m, posteriormente cada 2 m hasta la punta del fuste.

La biomasa en verde de las ramas se obtuvo pesándola en una balanza y se obtuvo una submuestra de ella registrando su peso; se extrajeron rodajas de aproximadamente 5 cm de grosor cada 2.5 m a partir de la base del fuste y se pesaron en una balanza, anotando en ellas el número de árbol, especie y la altura a la que se cortó; las trozas quedaron de una dimensión de 2.5 m y se pesaron en la báscula.

3.2.3. Trabajo de laboratorio

En el laboratorio se midieron los diámetros (con y sin corteza) de las rodajas y se secaron en una estufa al igual que las submuestras de ramas hasta peso constante a temperatura de 105 grados centígrados.

Para cada componente se calculó una razón promedio de Ps/Ph y éste se multiplicó por su peso húmedo total para obtener el peso seco total de cada componente.

Se suman los pesos de todos los componentes del árbol lo que da su peso seco, expresándose en kg.

3.2.4. Estimación de la biomasa

La estimación de la biomasa para pino y encino se realizó por medio de dos procedimientos: (1) la biomasa fustal y la biomasa de ramas se estimó mediante ecuaciones generadas por Návar y de los Ríos, 2006; Návar, 2006, reportadas en el cuadro 1 y la biomasa total fue dada por la sumatoria de ambas biomásas. (2) la biomasa total se estimó empleando ecuaciones para la densidad básica y el volumen del arbolado (Cuadro 2).

Cuadro 1. Ecuaciones para la estimación de biomasa fustal y de ramas

Género	Biomasa fustal (Bf)	Biomasa ramas (Br)	Biomasa total (Bt)
<i>Pinus</i>	$Bf = 0.1192 * Dq^{2.3231}$	$Br = 0.0173 * Dq^{2.3824}$	$Bt = Bf + Br$
<i>Quercus</i>	$Bf = 0.0706 * Dq^{2.4077}$	$Br = 0.004 * Dq^{3.0799}$	$Bt = Bf + Br$

Donde: Dq= Diámetro cuadrático

Cuadro 2. Ecuaciones para estimar densidad básica y volumen total

Género	Densidad Básica	Volumen total	Biomasa total
<i>Pinus</i>	$\rho = 0.5 - 0.075 * (1.3/H) + 0.47 - 0.06 * (1.3/H)^2$	$V = 0.075 + 0.3436 * Dq + 0.3669 * Dq^2 * H + 2.4563 * Dq^2 - 0.00032 * Dq^2 * H^2$	$Bt = \rho * V$
<i>Quercus</i>	$\rho = 0.77 + 0.026 * (1.3/H)$	$V = 0.000333 * Dq^{2.3768} * H^{0.1225}$	$Bt = \rho * V$

Donde: Dq= Diámetro cuadrático; H=Altura.

3.2.5. Estimación de Factores de Expansión de Biomasa (FEB).

La estimación de los factores de expansión de biomasa para pino y encino se obtuvieron mediante la relación de la biomasa total (Bt), obtenida por los dos procedimientos, y el volumen fustal total (Vft) por rodal.

$$FEB = Bt/Vft$$

Los factores de expansión (FEB) para un número "x" de rodales se ajustaron a la distribución probabilísticas de la forma Normal, utilizando los equipos de cómputo Microsoft Excel y Sigma Plot 8.0.

Los FEB se relacionaron con los datos dasométricos al nivel de rodal de la siguiente forma $B = f(\bar{H}, \text{Densidad})$. Esta relación se realizó para estimar los FEC adecuados a partir de los datos provenientes de los rodales. Para esto se utilizaron los programas de cómputo Microsoft Excel y Sigma Plot 8.0 y SAS para determinar las ecuaciones correspondientes.

3.2.6. Caracterización dasométrica del arbolado

Del ejido Guachochi se analizaron 126 rodales de pino con 30,217 árboles y una superficie de 1,585 has. De encino se analizaron 102 rodales con una cantidad de 4,607 árboles y una superficie de 1,403 has. Las características dasométricas se observan en los Cuadros 3 y 4.

Cuadro 3. Caracterización dasométrica del arbolado de pino

Ejido	Rango	Dq (cm)	H (m)	N (arb ha ⁻¹)	Edad (años)	V(m ³ ha ⁻¹)
Guachochi	Mínimo	19.5	8.2	105	38	40.2
	Máximo	40.6	18.2	518	172	317.7
	Promedio	27.3	12.3	240	78.5	120.9
	D. E.	4.0	2.0	73.455	16.9	57.9
	I. C.	0.70	0.353	12.826	3.0	0.11

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza; Dq= Diámetro cuadrático; H= Altura; N= Densidad (árboles por hectárea); V= Volumen.

Cuadro 4. Caracterización dasométrica de arbolado de encino.

Ejido	Rango	Dq (cm)	H (m)	N	V (m ³ ha ⁻¹)
Guachochi	Mínimo	10.0	3.0	2	0.20
	Máximo	41.5	30.0	180	42.5
	Promedio	25.1	6.6	45.167	10.0
	D. E.	5.244	2.976	31.556	8.004
	I. C.	1.017	0.578	6.124	1.553

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza; Dq= Diámetro cuadrático; H= Altura; N= Densidad (árboles por hectárea); V= Volumen.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Biomasa

4.1.1. *Pinus*

Procedimiento 1:

La biomasa aérea total (fuste y ramas) de pino se reporta en el Cuadro 5, siendo el promedio de 73.73 Mg ha⁻¹, con una desviación estándar de 30.904 y un intervalo de confianza de ± 5.396 . La FAO (2001) reporta para México un promedio de 54 Mg ha⁻¹ de biomasa en bosques de coníferas.

Cuadro 5. Valores de biomasa para pino

Ejido	Rango	Biomasa fustal (Mg ha ⁻¹)	Biomasa ramas (Mg ha ⁻¹)	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)
Guachochi	Mínimo	24.192	4.193	28.385
	Máximo	154.02	27.609	181.62
	Promedio	62.648	11.081	73.73
	D. E	26.197	4.705	30.904
	I. C.	4.574	0.822	5.396

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza; Mg ha⁻¹= Megagramos por hectárea (1Mg= 1 Tonelada).

Procedimiento 2

El promedio de la biomasa total (fuste y ramas) de pino fue de 61 Mg ha⁻¹, con una desviación estándar de 28.785 y un intervalo de confianza de ± 5.026 . Este promedio resultó menor que el estimado por el primer procedimiento (73.73 Mg ha⁻¹). El empleo de la densidad para estimar la biomasa es algo complejo dado que la densidad es muy variable dentro del mismo árbol.

Cuadro 6. Biomasa de pino estimada empleando densidad básica y volumen fustal

Ejido	Rango	Densidad (g cm ⁻³)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)
Guachochi	Mínimo	0.47	45.284	21.573
	Máximo	0.48	339.200	162.59
	Promedio	0.48	128.420	61.391
	D. E.	0.0012	59.974	28.785
	I. C.	0.0002	10.472	5.026

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza.

4.1.2. *Quercus*

Procedimiento 1

En el encino el promedio de la biomasa total fue de 12.010 Mg ha⁻¹, con una desviación estándar de 9.677 y un intervalo de confianza de ±1.878. Resulta baja la biomasa del encino dado que en los rodales analizados las existencias volumétricas son bajas y por que las especies de pino son las que dominan esta área.

Cuadro 7. Biomasa total de encino

Ejido	Rango	Biomasa fustal (Mg ha ⁻¹)	Biomasa ramas (Mg ha ⁻¹)	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)
Guachochi	Mínimo	0.090	0.024	0.114
	Máximo	30.775	19.463	50.238
	Promedio	7.907	4.103	12.010
	D. E	6.145	3.570	9.677
	I. C.	1.193	0.693	1.878

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza.

Procedimiento 2

El promedio de la biomasa total de encino fue de 20.900 Mg ha⁻¹, con una desviación estándar de 16.032 y un intervalo de confianza de ± 3.111 (cuadro 8). El promedio de la biomasa estimada dista mucho de la estimada en el primer procedimiento. Lo anterior nos da la pauta a decir que hay una sobreestimación y que el uso de la densidad de la madera para estimar la

biomasa debe hacerse de manera muy cuidadosa dado que esta variable varía dentro del árbol y de un componente a otro.

Cuadro 8. Biomasa de encino estimada empleando la densidad básica y volumen fustal

Ejido	Rango	Densidad (g cm ⁻³)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)
Guachochi	Mínimo	0.77	0.347	0.271
	Máximo	0.78	99.397	76.913
	Promedio	0.78	26.945	20.900
	D. E.	0.0015	20.674	16.032
	I. C.	0.0003	4.012	3.111

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza.

En el procedimiento 2 la biomasa estimada para *Pinus* fue menor (73.73 Mg ha⁻¹) a la del primer procedimiento (61.39 Mg ha⁻¹). En contraste, en los resultados con *Quercus* se observó que la biomasa calculada a través del segundo procedimiento aumentó notoriamente (20.9 Mg ha⁻¹). Lo anterior se suscitó posiblemente a que en el procedimiento 2 se generaliza la densidad básica en todo el árbol para la estimación de la biomasa total, siendo esto inapropiado dado que ésta varía dentro y entre los componentes, pudiendo originar sub o sobreestimaciones (Cuadros 5 al 8). En *Pinus*, el 85% de la biomasa total lo representa el fuste, mientras que el 15% restante está representado en las ramas. Por otro lado el mayor porcentaje (66%) de la biomasa total en *Quercus* se encuentra en el fuste y el 34% restante en las ramas.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante los dos procedimientos en los géneros *Pinus* y *Quercus*, se considera que el empleo de las ecuaciones de biomasa estiman de manera confiable y consistente los valores de biomasa.

4.2. Factores de expansión de biomasa

4.2.1. *Pinus*

Los factores de expansión de biomasa para pino, estimados a partir de las ecuaciones de biomasa y el volumen fustal (procedimiento 1), variaron de 0,47 a 0,85 siendo el promedio de 0,63, con una desviación estándar de 0.074 y un intervalo de confianza de ± 0.013 . Estos factores de expansión se expresan en Mg m^{-3} . De acuerdo con Brown y Lugo (1984) y Husch (2001), los FEB varían de 1.3 a 3.6, con un promedio de 2.5 para bosques naturales, pero estos factores convierten de volumen fustal a biomasa total. En este estudio el FEB está dado por la relación de volumen fustal a biomasa total. Gracia *et al.* (2004) reportan en España para *Pinus halepensis* en FEB de 0.70 para convertir el volumen del fuste con corteza a biomasa aérea total.

La estimación de la biomasa empleando la densidad y el volumen (procedimiento 2), arrojó factores de expansión de 0.439 a 0.588 con un promedio de 0.51, con una desviación estándar de 0.033 y un intervalo de confianza de ± 0.006 . Este promedio resulta ser menor que el estimado en el primer procedimiento.

En el género *Pinus*, al disminuir la biomasa estimada mediante el segundo procedimiento, el factor de expansión de biomasa disminuyó con respecto al calculado en el primer procedimiento.

La densidad básica calculada fue de 0.48 g cm^{-3} con una desviación estándar de 0.0012 y un intervalo de confianza de ± 0.0002 . Este valor de densidad es muy similar al estimado en el capítulo de densidad cuyo promedio resultó de 0.46 g cm^{-3} .

De acuerdo a los resultados obtenidos, se considera que la estimación de los factores de expansión mediante el empleo de las ecuaciones de biomasa y el volumen fustal, proporciona información confiable y consistente, por lo cual los

análisis siguientes se referirán a los valores obtenidos mediante el primer procedimiento.

En el análisis de regresión se encontró una relación lineal negativa de los factores de expansión de biomasa de pino con la altura de los árboles ($P < 0.0001$). En la figura 2 se observa que al aumentar la altura el factor de expansión disminuye. Se puede generar un FEB para cada rodal considerando como variable independiente a la altura media del rodal, y su estimación es mediante el modelo generado:

$$\text{FEB} = 0.953879 - 0.027072 H$$

Donde: FEB= Factor de expansión de carbono; H= Altura media del rodal.

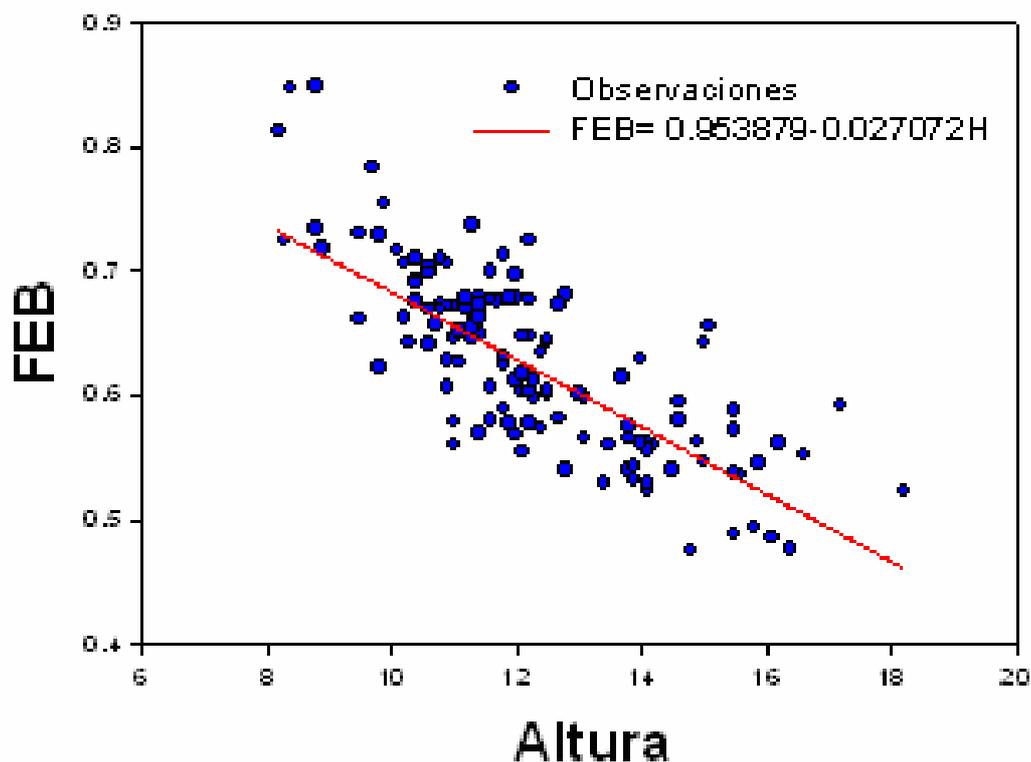


Figura 2. Relación lineal de los factores de expansión de biomasa y la altura en el género *Pinus*

De acuerdo con la prueba de normalidad ($P \geq \chi^2 = 0.008$) los factores de expansión de biomasa para el género *Pinus*, no se distribuyen normalmente porque la probabilidad ≤ 0.05 . Se presenta un sesgo hacia la derecha (figura 3).

Los factores requieren del ajuste de otra distribución, pero una revisión somera de los intervalos es que lo que se requieren son mayores fuentes de datos para poder describir la verdadera distribución probabilística madre.

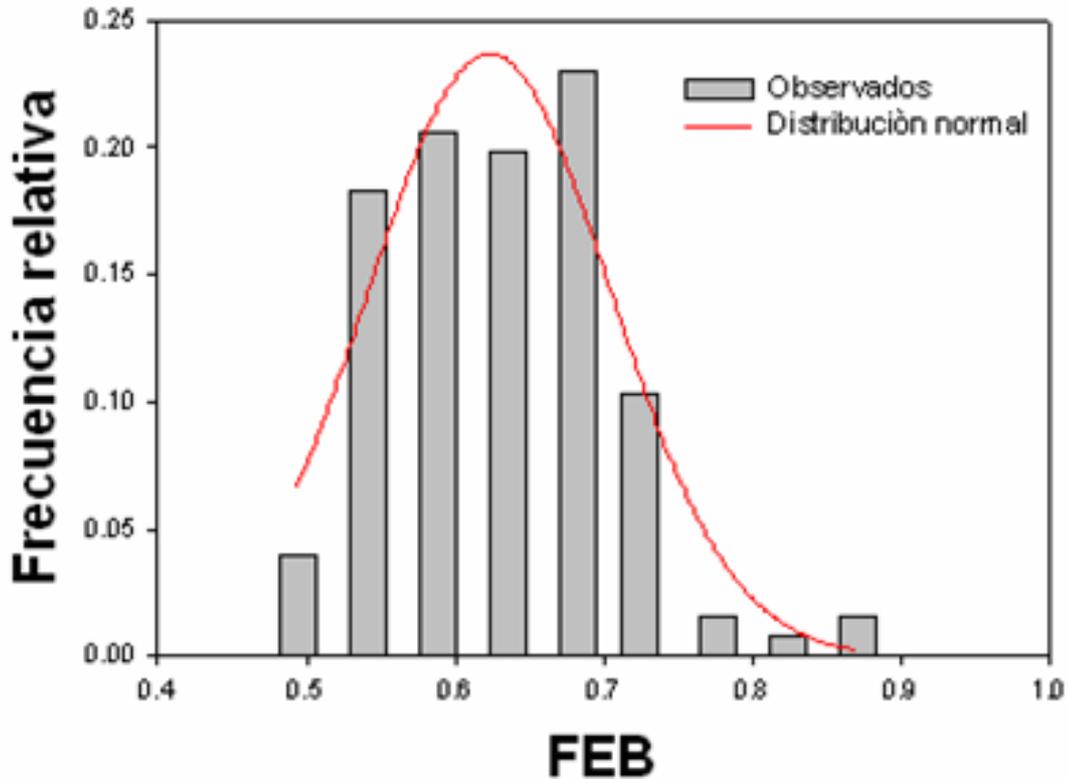


Figura 3. La distribución de los factores de expansión de biomasa en el género *Pinus* con el ajuste de la distribución normal

4.2.2. *Quercus*

Los factores de expansión de biomasa para encino, estimados a partir de las ecuaciones de biomasa y el volumen fustal (procedimiento 1), variaron de 0.25 a 1.927 siendo el promedio de 1.186, con una desviación estándar de 0.297 y un intervalo de confianza ± 0.058 . Estos factores de expansión se expresan en Mg m^{-3} . Gracia *et al.* (2004) reportan en España para *Quercus ilex* un FEB de 1.25 para convertir el volumen del fuste con corteza a biomasa aérea total.

La estimación de la biomasa empleando la densidad y el volumen (procedimiento 2), arrojó factores de expansión de 0.375 a 3.29 con un

promedio de 2.118, con una desviación estándar de 0.548 y un intervalo de confianza de ± 0.106 .

En el género *Quercus*, al aumentar la biomasa estimada mediante el segundo procedimiento, el factor de expansión de biomasa aumentó con respecto al calculado en el primer procedimiento.

La densidad básica estimada es de 0.78 g cm^{-3} con una desviación estándar de 0.0015 y un intervalo de confianza de ± 0.0003 .

Los análisis siguientes se referirán a los valores obtenidos mediante el primer procedimiento, al considerar que se estiman confiablemente y de forma consistente los factores de expansión de biomasa.

Se encontró una relación lineal negativa de los factores de expansión (primer procedimiento) y la altura (figura 4), lo cual indica que a medida que aumenta la altura del arbolado el factor de expansión de biomasa disminuye.

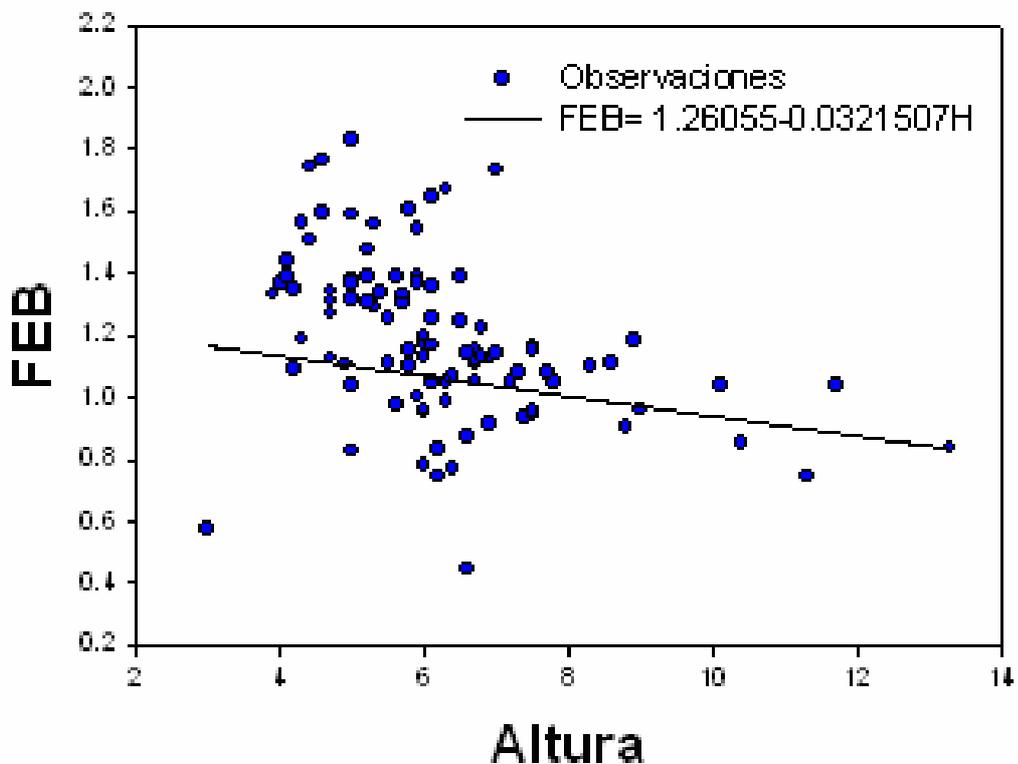


Figura 4. Relación entre los factores de expansión de biomasa y la altura en el género *Quercus*

De acuerdo con la prueba de normalidad ($P \geq \chi^2 = 0.0272$) los factores de expansión de biomasa para el género *Quercus* (Figura 5), no se distribuyen normalmente porque la probabilidad ≤ 0.05 .

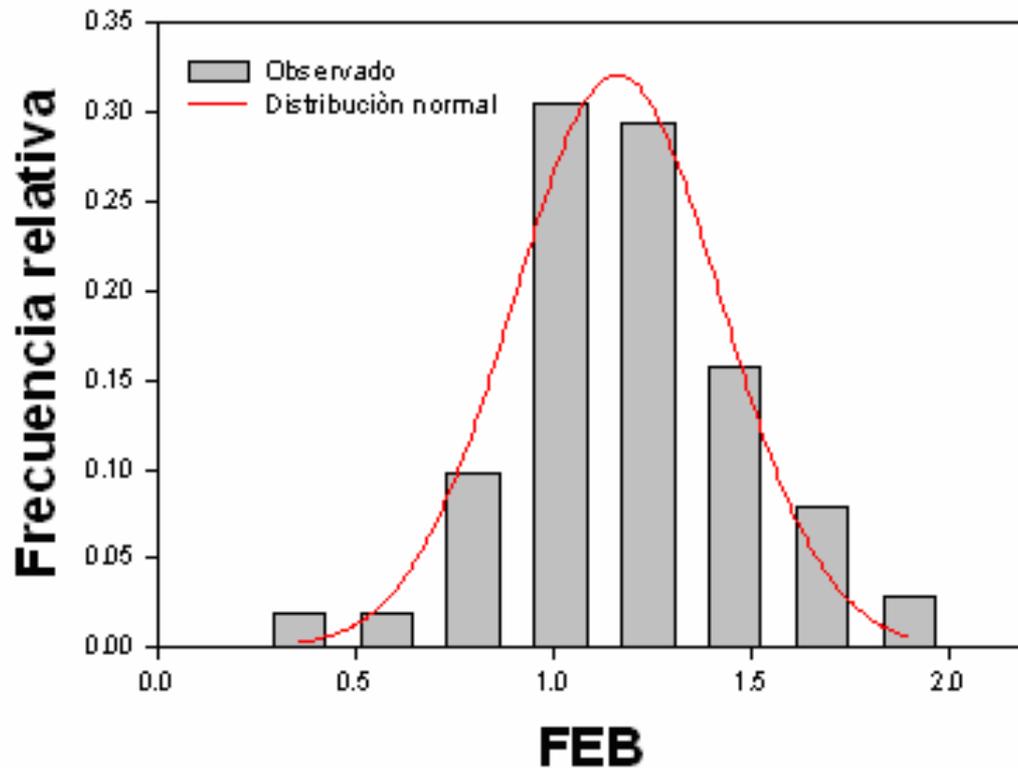


Figura 5. La distribución de los factores de expansión en el género *Pinus* con el ajuste de la distribución normal

5. CONCLUSIONES

En el presente reporte de investigación la estimación de la biomasa a través de ecuaciones de biomasa es de mayor confiabilidad que empleando la densidad básica para su cálculo, dado que la densidad es muy variable dentro del árbol. La biomasa promedio para los géneros *Pinus* y *Quercus* resultó de 73.73 Mg ha⁻¹ y 12.010 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Los factores de expansión de biomasa (FEB) resultaron con un promedio de 0.63 y 1.186 para los géneros *Pinus* y *Quercus*, respectivamente, y se expresan en Mg m⁻³. Para ambos géneros se encontró una relación lineal negativa entre los factores de expansión y la altura del arbolado, indicando lo anterior que a medida que aumenta la altura el factor de expansión disminuye.

Los factores de expansión de biomasa para los géneros *Pinus* y *Quercus* no presentan una distribución normal.

6. RECONOCIMIENTOS

Este proyecto de investigación fue financiado por el CONACYT a través del proyecto CONACYT-CONAFOR 2002-CO1-6230 "Almacenes y tasa de secuestro de bióxido de carbono en plantaciones forestales del norte de México".

7. LITERATURA CITADA

Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. FAO Roma. Forestry Paper 135.

Brown, S.; Lugo, A. 1984. Biomass of tropical forest: a new estimate based on forest volumes. *Science* 223: 1290-1293.

Brown, S., Gillespie, A. J. R., and Lugo, A. E. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35: 881-902.

Brown, S. 2001. Measuring carbon in forest: current status and future challenges. *Environmental pollution* 116. 363-372 p.

Campbell, J. S., Lieffers, V. J. and Pielou, E. C. 1985. Regression equations for estimating single tree biomass of trembling aspen: assessing their applicability to more than one population. *Forest Ecology and Management*. Vol. 11. No. 4. 283-295.

Cost, N. D. and McClure, J. P. Multiresource inventories: Techniques for estimating biomass on a statewide basis. USDA. For. Serv., Southeastern For. Sta. Res. Pap. SE-228. 31 pp.

Dauber, E., Terán, J. y Guzmán, R. Estimaciones de biomasa y carbono en los bosques naturales de Bolivia. 2000. IUFRO. *Revista Forestal Iberoamericana* Vol. 1 No. 1. 10 p.

Deans, J. D., J. Moran y J. Grace. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameroon. *For. Ecol. Management* 88:215-225.

DETENAL. 1988. Carta Geología. Escala 1:25,000. Guachochi G13-4. Editada 1988. Impresa 1991.

EDF. 1975. Estudio Dasonómico Fotogramétrico de los Ejidos Guachochi, Caborachi y Rocheachi municipio de Guachochi, Chihuahua. Productos Forestales de la Tarahumara. 120 p.

Gehring, C., Park, S. and Denich, M. 2004. Liana allometric biomass equations for Amazonian primary and secondary forest. *Forest Ecology and Management*. Vol. 195. 69-83.

Gillespie, A. J. R., Brown, S. and Lugo, A.E. 1992. Tropical forest biomass estimation from truncated stand tables. *Forest Ecology and Management*. Vol. 48. No. 1-2. 69-87 p.

Gracia, C., Gil, L. y Montero, G. 2004. Impactos del cambio climático en España: Impactos en el sector forestal. 399- 435 p.

Grundy, I. M. 1995. Wood biomass estimation in dry biombo woodland in Zimbabwe. *Forest Ecology and Management*. Vol. 72. No. 2-3. 109-117 p.

Hall, D. O. 1997. Biomass energy in industrialized countries- a view of the future. *Forest ecology and Management*. Vol. 91. No.1. 17-45 p.

Husch, B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. Simposio Internacional sobre Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 9 p.

INEGI. 2003. Carta Estatal Edafológica. Chihuahua. Escala 1:1,000,000. Edición 2002. Impresión 2003.

INEGI. 2003. Carta Estatal Vegetación. Chihuahua. Escala 1:250,000. Edición 2002. Impresión 2003.

Karmacharya, S. B. and Singh, K. P. 1992. Biomass and net production of teak plantations in a dry tropical region in India. *Forest Ecology and Management*. Vol.55. No. 1-4. 233-247 p.

Ludhiyal, L. S. y Ludhiyal, N. 1997. Variation in biomass and net primary productivity in short rotation high density central Himalayan-poplar plantations. *Forest Ecology and Management*. Vol. 98. No. 2. 167-179 p.

Monroy, R. C. y Návar C., J. J. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10(2):29-43.

Návar, J., González, N., Maldonado, D., Graciano, J., Dale, V., and Parresol, B. 2004. Biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 10(2): 17-28.

Návar, C. J. y De Los Ríos, E. 2006. Ecuaciones de volumen, biomasa y ahusamiento para especies de bosques templados de las Sierras Madre del Norte de México. En Preparación.

Návar, J., González, N., and Graciano, J. 2005. Carbon sequestration by forest plantations of Durango México. *Madera y Bosques* 11: 15-34.

Návar, J. and Rodríguez, MF. 2005. Carbon sequestration in reforested sites of Durango, Mexico. Resúmenes en Extenso. ICDC7 Seventh International Carbon Dioxide Conference. Boulder Colorado, USA. Septiembre 25-30 de 2005.

Návar, J. 2006. Los servicios ambientales de ecosistemas forestales: las potencialidades climáticas e hidrológicas. Boletín Divulgativo IPN. En Prensa.

Phillips, D. R. and Cost, N. D. 1979. Estimating the volume of hardwood crowns, stems and the total tree. USDA For. Serv., Southeast. For. Exp. Sta., Res. Note SE-276. 6 pp.

Prado, D. J. A. y Alarcón A. C. 1991. Funciones de biomasa de *Eucaliptos globulus* en la región costera central. *Ciencia e investigación Forestal*. Instituto Forestal de Chile. Vol. 5 Num. 1. 59-70 p.

Segura, M. y Kanninen, M. 2005. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. Abstract. *Biotropica The journal of tropical biology and conservation*. Volume 37. Pág.

Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, Valdivia, Chile. 13 p.

Schlegel, B., Gayoso, J. y Guerra, J. 2000. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Universidad Austral de Chile. 23 p.

Southwood, T. R.E. and Henderson P. A. 2000. *Ecological methods*. Blackwell Science. USA. 575 p.

Schoene, D. 2001. Evaluación y notificación de las variaciones de las existencias de carbono: ¿una iniciativa concertada?. *Unasylva* No. 210. Evaluación y vigilancia de los bosques. FAO Roma. 10 p.

Tietema, T. 1993. Biomass determination of fuelwood trees and bushes of Botswana, Southern Africa. Vol. 60. No. 3-4. 257-269 p.

CAPITULO III

ESTIMACIÓN DE CARBONO Y FACTOR DE EXPANSIÓN DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES EN CHIHUAHUA, MÉXICO.

1. RESUMEN

El dióxido de carbono es considerado el gas efecto de invernadero más importante por las grandes cantidades en que se emite. Se ha demostrado la relación de este gas con la vegetación, especialmente por la capacidad de ésta para fijar carbono en sus estructuras y de manera particular en una forma estable en la parte leñosa debido a su permanencia en el tiempo. Es por esta razón que los bosques son importantes sumideros de carbono. La investigación científica sobre el papel de los ecosistemas forestales en la mitigación, requiere estimaciones precisas del carbono almacenado y su potencial de captura a corto, mediano y largo plazos. En este estudio se estima el contenido de carbono en un bosque de pino-encino en el Ejido Guachochi, municipio de Guachochi, Chihuahua, utilizando muestras de biomasa sometidas a un analizador de carbono orgánico total de sólidos (Solids TOC Analyzer) para determinar la concentración de carbono contenido en la biomasa total. Se estimaron Factores de Expansión de Carbono (FEC) para pino y encino mediante la relación del contenido de carbono total de la biomasa aérea y el volumen fustal. El contenido de carbono promedio resultó de 42.026 Mg ha⁻¹ (± 3.076) y 6.485 Mg ha⁻¹ (± 1.014), en la biomasa de pino y encino respectivamente. Los FEC obtenidos fueron de 0.36 (± 0.0073) para el pino y 0.62 (± 0.31) para el encino.

Palabras clave: carbono, factor de expansión de carbono

ABSTRACT

Carbon dioxide is considered the gas effect of more important conservatory by the great amounts in which it is emitted. The relation of this gas with the vegetation has been demonstrated, especially by the capacity of this one to fix carbon to its structures and of particular way to a stable form to the ligneous part due to its permanence to the time. It is therefore that the forests are important carbon drains. The scientific research on the paper of the forest ecosystems in the mitigation requires precise estimations of stored carbon and their potential of short, medium and long capture to terms. In this study the carbon content is considered in a forest of pine-oak in the Ejido Guachochi, municipality of Guachochi, Chihuahua, using samples of biomass submissive total organic a solid carbon analyzer (Solids TOC Analyzer).for to determine the carbon concentration contained in the total biomass. Factors of Expansion of Carbon (FEC) for pine and oak by means of the relation of the total carbon content of the aerial biomass and the bole volume were considered. The carbon content average was from 42,026 (± 3.076) and 6,485 Mg ha⁻¹ (± 1.014), in the biomass of pine and oak respectively. The obtained FEC were of 0.36 (± 0.0073) for pine and 0.62 (± 0.31) for the oak.

Key words: carbon, factor of carbon expansion

2. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas del siglo XX la actividad de los hombres ha agravado uno de los problemas más grandes que ha tenido que enfrentar el planeta, “el cambio climático” (IPCC, 2001). Los avances en su comprensión y las crecientes evidencias de sus potenciales implicaciones ambientales, sociales y económicas, a escala nacional, regional y global, ha hecho que los gobiernos del mundo lo incorporen en sus diferentes agendas en los últimos años (ONU, 1992; ONU, 2002; IPCC, 2001).

Una de las manifestaciones del cambio climático es el calentamiento global, producido por un incremento importante y rápido en la concentraciones de diversos gases en la atmósfera, reconocidos como de efecto invernadero, la mayoría de origen antropogénico (IPCC, 1995; 2001). Las actividades humanas, tales como el uso de combustibles fósiles para la producción de energía, los procesos derivados del cambio en el uso del suelo, la silvicultura, la producción de cemento, entre otros, están generando grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), clorofluorcarbonados (CFC's), óxidos de nitrógeno (NO_x), y metano (CH_4) (Schlegel, 2001). El CO_2 es uno de los GEI más importantes por las grandes cantidades en las que se emite antropogénicamente (IPCC, 2001; Schlegel, 2001).

En los ecosistemas terrestres el carbono queda retenido en la biomasa viva, en la materia orgánica en descomposición y en el suelo, por lo tanto estos ecosistemas desempeñan un rol importante en el ciclo global del carbono (Brown, 1997). El carbono es intercambiado de manera natural entre estos sistemas y la atmósfera mediante los procesos de fotosíntesis, la respiración, la oxidación y la combustión. Los ecosistemas de bosques se destacan por su gran capacidad de fijar carbono en sus estructuras y de manera particular en una forma estable en la parte leñosa debido a su permanencia en el tiempo (Nakama *et al.*, 2003).

La estimación adecuada de la biomasa de un bosque, es un elemento de gran importancia debido a que éste permite determinar los montos de carbono y otros elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes y, representa la cantidad potencial de carbono que puede ser liberado a la atmósfera, o conservando y fijado en una determinada superficie cuando los bosques son manejados para alcanzar los compromisos de mitigación de gases de efecto invernadero (Brown *et al.*, 1996).

Husch (2001) considera que una estimación de la cantidad de carbono en un bosque requiere que inicialmente se estime el peso seco de la biomasa. Se estima el peso de carbono multiplicando el peso de la biomasa por un factor que varía entre 0.45 y 0.55. La cifra indica la proporción de carbono en el material vegetativo. En la ausencia de información específica, generalmente se usa un valor de 0.50.

Los factores de expansión son una herramienta muy útil para estimar la biomasa y el carbono en los bosques, contando sólo con información de inventarios forestales (Schleger, 2001; Schoene, 2001). En la revisión de literatura no se encontró información sobre factores de expansión de carbono y se derivan para facilitar su cálculo en ecosistemas forestales. Los objetivos de este reporte de investigación son: a) estimar el contenido de carbono en los componentes de la biomasa total, b) estimar factores de expansión de carbono de la biomasa total derivados de las existencias reales totales fustales, c) observar y modelar la distribución de factores de expansión de carbono aplicados a datos de un conjunto de rodales, d) observar y modelar la dependencia de los factores de expansión de carbono en función de las características de los árboles.

3. METODOLOGÍA

3.1. Características del área de estudio

El estudio se realizó en el ejido Guachochi ubicado en el municipio de Guachochi, Chihuahua. Este ejido se encuentra enclavado en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental. Los terrenos son bastante accidentados, localizándose elevaciones y depresiones muy irregulares (EDF, 1975). El clima es designado como templado moderado lluvioso (Cfwb), con precipitaciones distribuidas en el verano y en el invierno (esta última en forma de nieve). El suelo predominante es del tipo Podzólico (DETENAL, 1988). La vegetación corresponde a bosque de coníferas, presentándose masas puras de pino, mezcla de especies conformando el bosque de pino-encino y bosque de encino. Las especies de pino más comunes son *Pinus durangensis*, *P. arizonica*, *P. leiophylla*, *P. engelmannii*, *P. herrerae* y *P. chihuahuana*. Las especies de encino más frecuentes son *Quercus rugosa* y *Q. sideroxyla*. (INEGI, 2002).

Localización del área de estudio

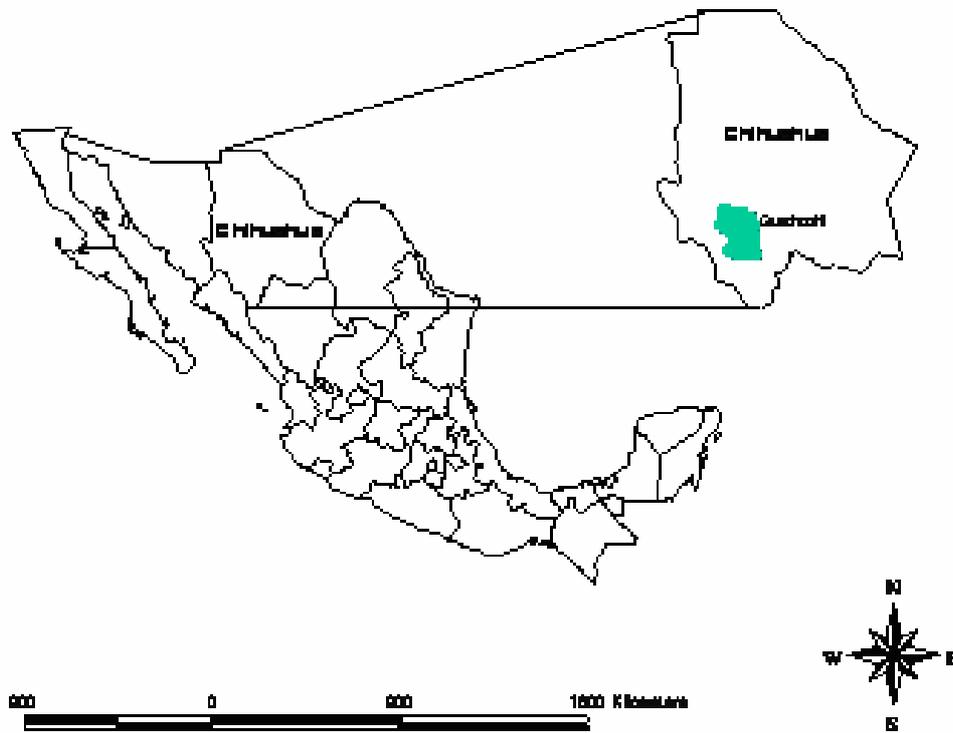


Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Guachochi, Chihuahua.

3.2 Selección de árboles muestra.

Para la estimación de volumen y biomasa se eligieron los árboles que reunían características dasométricas representativas de los sitios, se derribaron 105 árboles en total, de los cuales 30 fueron de *Pinus arizonica*, 30 de *Pinus durangensis*, 15 de *Quercus rugosa* y 30 de *Q. sideroxylla*.

Para la estimación del contenido de carbono se analizaron 5 árboles muestra representativos del total de árboles derribados de cada una de las siguientes especies mencionadas.

3.3. Trabajo de laboratorio

De las submuestras por componentes (fuste y ramas) secadas a peso constante, se prepararon muestras finamente cortadas para ser molidas en el pulverizador, en una balanza analítica se pesó una cantidad de 30 mg para ser sometidas al analizador de carbono orgánico total de sólidos (Solids TOC Analyzer) para cuantificar la concentración del carbono contenido en dicha submuestra.

El valor promedio obtenido de los resultados arrojados por el equipo analítico Solids TOC Analyzer de los árboles analizados se multiplicó por el peso de la biomasa total para obtener el contenido de carbono expresado en kilogramos.

3.4. Análisis de los datos

Una vez que se ha determinado el contenido de carbono de todos los árboles seleccionados, se desarrolló una función de regresión de carbono de la forma:

$$C_{ci} = \alpha_{ci} D^{\beta_{ci}}$$

Donde: C_{ci} = carbono del componente i ; α_{ci} y β_{ci} = estimadores estadísticos del componente i ; D = diámetro normal.

Se estima un factor de expansión de carbono (FEC) mediante la forma:

$$FEC = C_{cci} / ERTf$$

Donde: FEC = factor de expansión de carbono; C_{cci} = contenido de carbono de la biomasa i ; $ERTf$ = existencias reales totales fustales.

Los factores de expansión (FEC) para un número "x" de rodales se ajustaron a la distribución probabilísticas de la forma Normal, utilizando los equipos de cómputo Microsoft Excel y Sigma Plot 8.0.

Los FE se relacionaron con los datos dasométricos al nivel de rodal de la siguiente forma $B = f(\bar{H}, \text{Densidad})$. Esta relación se realizó para estimar los FEC adecuados a partir de los datos provenientes de los rodales. Para esto se

utilizaron los programas de cómputo Microsoft Excel y Sigma Plot 8.0 y SAS para determinar las ecuaciones correspondientes.

3.4.1. Estimación del contenido de carbono

La estimación del contenido de carbono para pino y encino se realizó por medio de dos procedimientos: (1) los promedios estimados del contenido de carbono total para pino y encino , 0.57 y 0.54 respectivamente, se multiplicaron por la biomasa total estimada mediante ecuaciones generadas y reportadas por Návar y de los Ríos, 2006; Návar, 2006 en el cuadro uno, (2) los promedios del contenido de carbono se multiplicaron por la biomasa total estimada empleando ecuaciones para la densidad básica y el volumen del arbolado (Cuadro 2).

Cuadro 1. Ecuaciones para la estimación de biomasa fustal y de ramas

Género	Biomasa fustal (Bf)	Biomasa ramas (Br)	Biomasa total (Bt)
<i>Pinus</i>	$Bf = 0.1192 * Dq^{2.3231}$	$Br = 0.0173 * Dq^{2.3824}$	$Bt = Bf + Br$
<i>Quercus</i>	$Bf = 0.0706 * Dq^{2.4077}$	$Br = 0.004 * Dq^{3.0799}$	$Bt = Bf + Br$

Donde: Dq= Diámetro cuadrático

Cuadro 2. Ecuaciones para estimar densidad básica y volumen total

Género	Densidad Básica	Volumen total	Biomasa total
<i>Pinus</i>	$\rho = 0.5 - 0.075 * (1.3/H) + 0.47 - 0.06 * (1.3/H)/2$	$V = 0.075 + 0.3436 * Dq + 0.3669 * Dq^2 * H + 2.4563 * Dq^2 - 0.00032 * Dq^2 * H^2$	$Bt = \rho * V$
<i>Quercus</i>	$\rho = 0.77 + 0.026(1.3/H)$	$V = 0.000333 * Dq^{2.3768} * H^{0.1225}$	$Bt = \rho * V$

Donde: Dq= Diámetro cuadrático.

3.4.2. Estimación de Factores de Expansión de Carbono (FEC).

La estimación de los factores de expansión de carbono para pino y encino se obtuvieron mediante la relación del contenido de carbono total (CCt), obtenido por los dos procedimientos señalados anteriormente, y el volumen fustal total por rodal (Vft).

$$FEC = CCt / ERTf$$

Donde: CCt= contenido de carbono total; ERTf= existencias reales totales fustales.

3.4.3. Caracterización dasométrica del arbolado

Del ejido Guachochi se analizaron 126 rodales de pino con 30,217 árboles y una superficie de 1,585 has. De encino se analizaron 102 rodales con una cantidad de 4,607 árboles y una superficie de 1,403 has. Las características dasométricas se observan en los Cuadros 3 y 4.

Cuadro 3. Caracterización dasométrica del arbolado de pino

Ejido	Rango	Dq (cm)	H (m)	N (arb ha ⁻¹)	Edad (años)	V(m ³ ha ⁻¹)
Guachochi	Mínimo	19.5	8.2	105	38	40.2
	Máximo	40.6	18.2	518	172	317.7
	Promedio	27.3	12.3	240	78.5	120.9
	D. E.	4.0	2.0	73.455	16.9	57.9
	I. C.	0.70	0.353	12.826	3.0	0.11

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza; Dq= Diámetro cuadrático; H= Altura; N= Densidad (árboles por hectárea); V= Volumen.

Cuadro 4. Caracterización dasométrica de arbolado de encino.

Ejido	Rango	Dq (cm)	H (m)	N	V (m ³ ha ⁻¹)
Guachochi	Mínimo	10.0	3.0	2	0.20
	Máximo	41.5	30.0	180	42.5
	Promedio	25.1	6.6	45.167	10.0
	D. E.	5.244	2.976	31.556	8.004
	I. C.	1.017	0.578	6.124	1.553

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza; Dq= Diámetro cuadrático; H= Altura; N= Densidad (árboles por hectárea); V= Volumen.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Carbono

4.1.1. *Pinus*

Procedimiento 1:

El contenido de carbono en la biomasa presentó un promedio de 42.026 Mg C ha⁻¹, con una desviación estándar de 17.615 y un intervalo de confianza de \pm 3.076. Este promedio resulta mayor a 27 Mg C ha⁻¹ reportado por la FAO (2001) para los bosques en México. Hall y Uhlig (1991) para bosques en manejo en México reporta una biomasa de carbono de 35.1, 44.4 y 53.8 Mg C ha⁻¹, como valores bajo, medio y alto respectivamente, empleando un factor de 1.9. Fragoso (2003) en un estudio realizado en un bosque de *Abies-Pinus-Quercus* en Michoacán, encontró un promedio de 19 Mg C ha⁻¹ para *Pinus pseudostrobus* y Zamora (2003) reporta 28.86 Mg C ha⁻¹ en un bosque de pino en Michoacán. Estos dos últimos autores utilizan un coeficiente de 0.45 para la estimación del contenido de carbono, y en este trabajo se emplea el promedio de 0.57 como el contenido de carbono estimado en pino.

Cuadro 5. Contenido de carbono total para pino estimado mediante el primer procedimiento.

	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)	Contenido de carbono total (Mg C ha ⁻¹)
Mínimo	28.385	16.179
Máximo	181.62	103.53
Promedio	73.73	42.026
D. E.	30.904	17.615
I. C.	5.396	3.076

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza. Promedio de carbono=0.57; Mg ha⁻¹= Megagramos por hectárea (1 Mg= 1 tonelada).

Procedimiento 2.

El promedio del contenido de carbono total de la biomasa resultó de 34.993 Mg C ha⁻¹, con una desviación estándar de 16.408 y un intervalo de confianza de \pm 2.865. Este valor es 17% menor al estimado mediante el primer procedimiento.

Cuadro 6. Contenido de carbono para pino estimado mediante el segundo procedimiento

	Densidad (g cm ⁻³)	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)	Contenido de carbono total (Mg C ha ⁻¹)
Mínimo	0.47	21.573	12.297
Máximo	0.48	162.59	92.676
Promedio	0.48	61.391	34.993
D. E.	0.001	28.785	16.408
I. C.	0.0002	5.026	2.865

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza.
Promedio de carbono= 0.57

4.1.2. *Quercus*

Procedimiento 1:

El contenido de carbono promedio en la biomasa de encino resultó de 6.485 Mg ha⁻¹, con una desviación estándar de 5.225 y un intervalo de confianza de \pm 1.014. Fragoso (2003) en un estudio realizado en un bosque de *Abies-Pinus-Quercus*, encontró un promedio de 22 Mg C ha⁻¹ en *Quercus laurina*. La diferencia entre estos valores se debe principalmente a la densidad de la masa forestal, especie en estudio y el tipo de manejo forestal.

Cuadro 7. Contenido de carbono para encino estimado mediante el primer procedimiento

	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)	Contenido de carbono total (Mg C ha ⁻¹)
Mínimo	0.114	0.062
Máximo	50.238	27.129
Promedio	12.01	6.485
D. E.	9.677	5.225
I. C.	1.878	1.014

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza.
Promedio de carbono=0.54

Procedimiento 2

La estimación del contenido de carbono en este procedimiento resultó de 11.286 Mg C ha⁻¹, con una desviación estándar de 8.657 y un intervalo de confianza de ± 1.680 . El promedio estimado en este procedimiento es mayor que el estimado en el primero.

Cuadro 8. Contenido de carbono para encino estimado mediante el segundo procedimiento

	Densidad (g cm ⁻³)	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)	Contenido de carbono total (Mg C ha ⁻¹)
Mínimo	0.77	0.271	0.146
Máximo	0.78	76.913	41.533
Promedio	0.78	20.9	11.286
D. E.	0.0015	16.032	8.657
I. C.	0.0003	3.111	1.680

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.= Intervalo de confianza.
Promedio de carbono=0.54

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante los dos procedimientos, se considera que el empleo del contenido de carbono promedio y las ecuaciones de biomasa estiman de manera confiable y consistente los valores del contenido de carbono en la biomasa para los géneros *Pinus* y *Quercus*.

4.2. Factores de expansión de carbono (FEC)

4.2.1. *Pinus*

Procedimiento 1

El factor de expansión promedio resultó de 0.36, con una desviación estándar de 0.0419 y un intervalo de confianza de ± 0.0073 . El FEC se expresa en megagramos por metro cúbico (Mg C m⁻³). Para estimar el contenido de carbono de un rodal basta con multiplicar las existencias fustales totales por este FEC, expresándose el resultado en Mg C m⁻³.

Cuadro 9. Factor de expansión de carbono para pino estimado mediante el primer procedimiento

	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Contenido de carbono (Mg C ha ⁻¹)	FEC
Mínimo	40.2	16.179	0.27
Máximo	317.7	103.530	0.48
Promedio	120.9	42.026	0.36
D. E.	57.901	17.615	0.0419
I. C.	10.110	3.076	0.0073

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.=Intervalo de confianza; FEC=Factor de Expansión de Carbono

Procedimiento 2

El factor de expansión de carbono promedio estimado para el género *Pinus* es de 0.29, con una desviación estándar de 0.29 y un intervalo de confianza de \pm 0.0185. El promedio estimado en este procedimiento resultó ser menor al estimado en el primero.

Cuadro 10. Factor de expansión de carbono para pino estimado mediante el segundo procedimiento

	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Contenido de carbono (Mg C ha ⁻¹)	FEC
Mínimo	40.2	12.297	0.25
Máximo	317.7	92.676	0.34
Promedio	120.9	34.993	0.29
D. E.	57.901	16.408	0.0185
I. C.	10.110	2.865	0.0032

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.=Intervalo de confianza; FEC=Factor de Expansión de Carbono

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante los dos procedimientos, se considera que el empleo del contenido de carbono promedio y las ecuaciones de biomasa (primer procedimiento) estiman de manera confiable y consistente los valores de los factores de expansión de carbono para el género *Pinus*. Por lo anterior los análisis siguientes se realizaron considerando los resultados obtenidos mediante el procedimiento 1.

En el análisis de regresión se encontraron relaciones lineales negativas de los factores de expansión de carbono para el género *Pinus* con la altura de los árboles y la densidad básica de la madera. En las figuras 2 y 3 se observa que al aumentar la altura y la densidad básica el factor de expansión disminuye. Independientemente de la densidad del rodal (árboles ha⁻¹), la altura media del rodal es una variable que se relaciona ($P < 0.0001$) con el FEC. Se puede generar un FEC para cada rodal considerando como variable independiente a la altura media del rodal, y su estimación es mediante el modelo generado:

$$\text{FEC} = 0.54311 - 0.015431 H$$

Donde: FEB= Factor de expansión de carbono; H= Altura media del rodal.

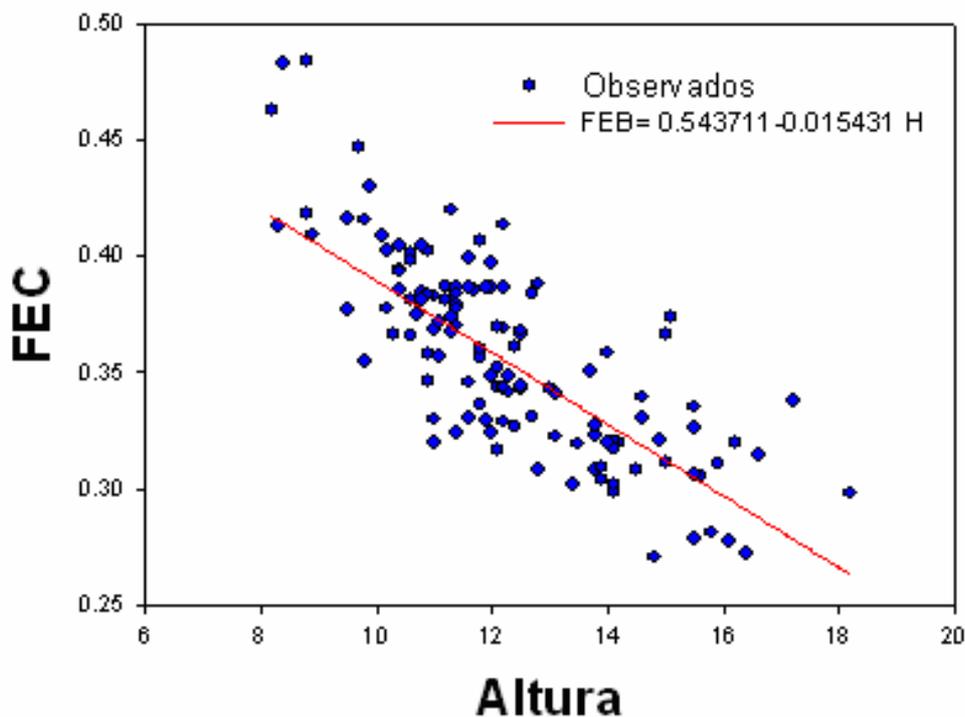


Figura 2. Relación entre los factores de expansión de carbono y la altura en el género *Pinus*

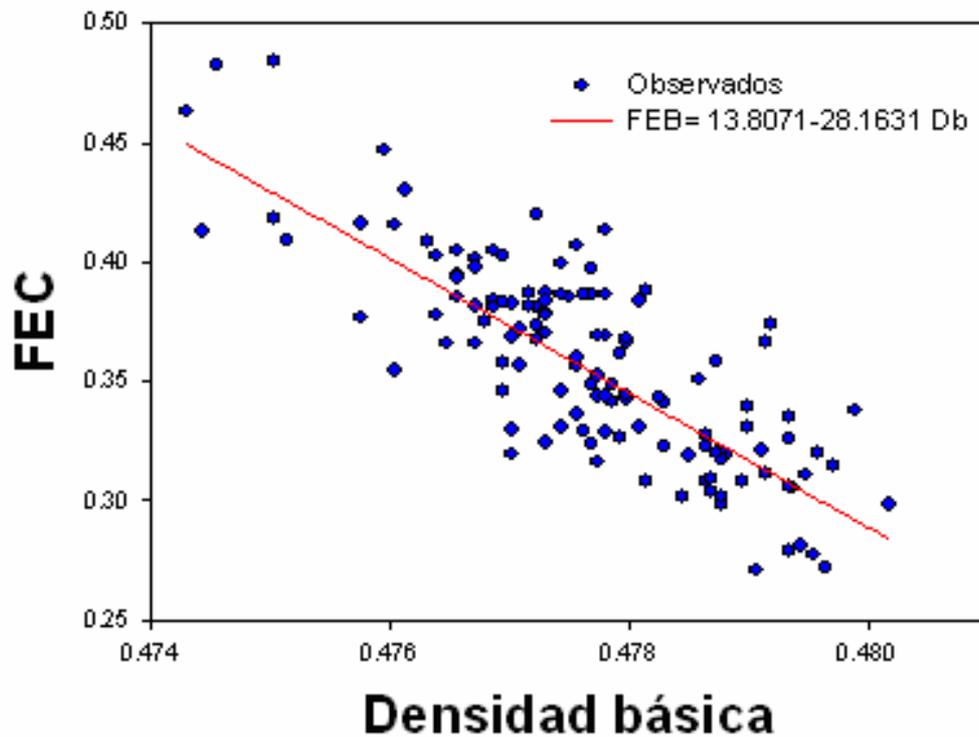


Figura 3. Relación entre los factores de expansión de carbono y la densidad básica de la madera de pino

De acuerdo con la prueba de normalidad ($P \geq \chi^2 = 0.0115$) los factores de expansión de carbono para el género *Pinus*, no se distribuyen normalmente porque la probabilidad ≤ 0.05 . Se presenta un sesgo hacia la derecha (figura 4). Los factores requieren del ajuste de otra distribución, pero una revisión somera de los intervalos es que lo que se requieren son mayores fuentes de datos para poder describir la verdadera distribución probabilística madre.

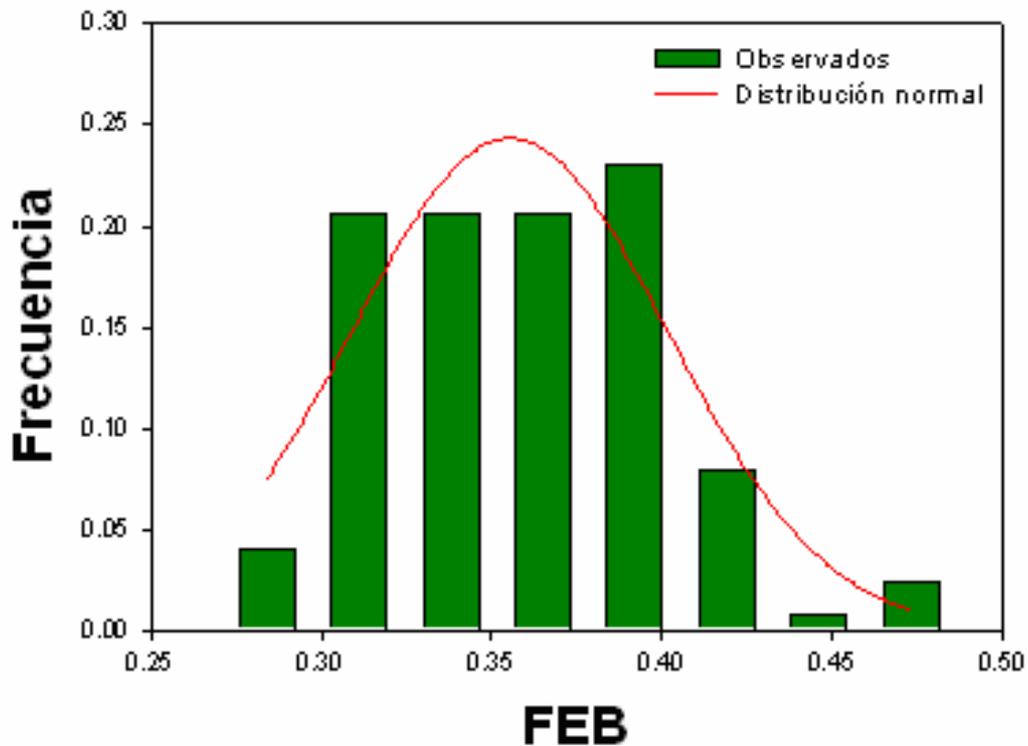


Figura 4. La distribución de los factores de expansión en pino con el ajuste de la distribución normal para el genero *Pinus*

4.2.2. *Quercus*

Procedimiento 1

El factor de expansión de carbono promedio para el encino es de 0.62, con una desviación estándar de 0.076 y un intervalo de confianza de ± 0.031 . Resulta más alto que el estimado para el pino debido a la conformación física del arbolado, la relación entre el volumen fustal y el volumen de ramas y hojas. El contenido de carbono de un rodal de encino se obtiene multiplicando el volumen fustal total por este FEC.

Cuadro 11. Factor de expansión de carbono para encino estimado mediante el primer procedimiento

	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Contenido de carbono (Mg C ha ⁻¹)	FEC
Mínimo	0.2	0.062	0.31
Máximo	42.5	27.129	0.72
Promedio	10.0	6.485	0.62
D. E.	8.004	5.225	0.076
I. C.	1.553	1.014	0.031

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.=Intervalo de confianza; FEC=Factor de Expansión de Carbono

Procedimiento 2

El factor de expansión de carbono promedio para el encino estimado mediante el segundo procedimiento resulto en 1.14, con una desviación estándar de 0.296 y un intervalo de confianza de ± 0.057 . Este promedio resultó ser superior al estimado por el primer procedimiento.

Cuadro 12. Factor de expansión de carbono para encino estimado mediante el segundo procedimiento

	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Contenido de carbono (Mg C ha ⁻¹)	FEC
Mínimo	0.2	0.146	0.20
Máximo	42.5	41.533	1.18
Promedio	10.0	11.286	1.14
D. E.	8.004	8.657	0.296
I. C.	1.553	1.680	0.057

Donde: D.E.= Desviación estándar; I.C.=Intervalo de confianza; FEC=Factor de Expansión de Carbono

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante los dos procedimientos, se considera que el empleo del contenido de carbono promedio y las ecuaciones de biomasa (primer procedimiento) estiman de manera confiable y consistente los valores de los factores de expansión de carbono para el género *Quercus*, por lo cual los análisis siguientes se referirán a los valores obtenidos mediante el primer procedimiento.

En el análisis de regresión no se encontraron relaciones lineales de los factores de expansión de carbono para el encino con las variables altura, la densidad básica de la madera, diámetro cuadrático.

De acuerdo con la prueba de normalidad ($P \geq \chi^2 = 3E-18$) para el género *Quercus*, los factores de expansión de carbono no presentan una distribución normal. Al igual que los factores de expansión de carbono del género *Pinus*, la probabilidad ≤ 0.05 , y se requiere el ajuste a otro tipo de distribución. Se observa un sesgo muy pronunciado hacia la izquierda (figura 5).

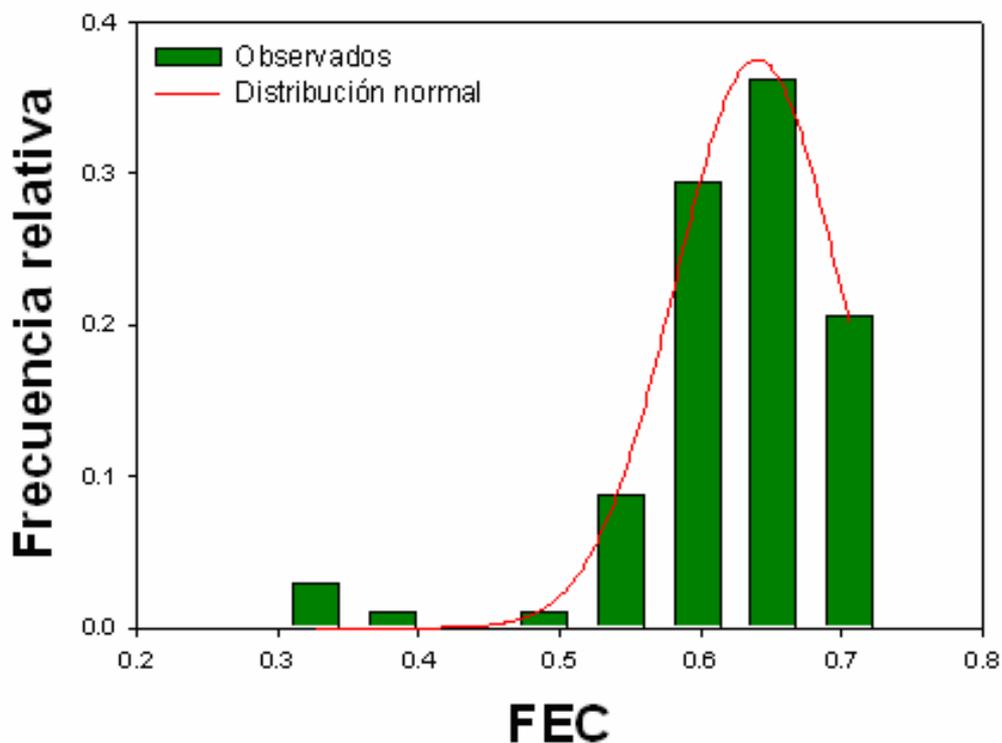


Figura 5. La distribución de los factores de expansión en encino con el ajuste de la distribución normal para el género *Quercus*

5. CONCLUSIONES

Consideramos en base a los resultados que la estimación del contenido de carbono y el factor de expansión de carbono es más consistente por el primer procedimiento, dado que los resultados obtenidos mediante el empleo de la densidad básica en estas estimaciones resultan incongruentes debido a la alta variación que se presenta esta variable en la madera.

Para el pino se obtuvo un promedio de 42.026 Mg ha⁻¹ de carbono y un factor de expansión de 0.36. En el encino el promedio del contenido de carbono fue de 6.485 Mg ha⁻¹ y el factor de expansión de carbono es de 0.62.

Para estimar el contenido de carbono en un rodal basta con multiplicar el volumen fustal por el factor de expansión de carbono, expresándose el resultado en megagramos de carbono por hectárea (Mg C ha⁻¹).

Los factores de expansión de carbono para los géneros *Pinus* y *Quercus* no presentan una distribución normal.

6. RECONOCIMIENTOS

Este proyecto de investigación fue financiado por el CONACYT a través del proyecto CONACYT-CONAFOR 2002-CO1-6230 "Almacenes y tasa de secuestro de bióxido de carbono en plantaciones forestales del norte de México".

7. LITERATURA CITADA

Acosta, M. M. 2003. Diseño de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis. Colegio de Postgraduados. México. 89 p.

Brown, S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. Ankara, Turquía: Congreso Forestal Mundial. 107-121 pp.

Brown, S.; J. Sathaye; M. Cannell; P. Kauppi. 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. Commonwealth forestry Review. 75 (1): 80-91.

Dale, V. H., Houghton, R. A. & Hall, C. A. 1991. Estimating the effects of land-use change on global atmospheric CO₂ concentrations. Canadian Journal of Forest Research. 21: 87-90.

DETENAL. 1988. Carta Geología. Escala 1:25,000. Guachochi G13-4. Editada 1988. Impresa 1991.

EDF. 1975. Estudio Dasonómico Fotogramétrico de los Ejidos Guachochi, Caborachi y Rocheachi municipio de Guachochi, Chihuahua. Productos de la Tarahumara. 120 p.

FAO .2001. Situación de los bosques en el mundo. FAO. Roma Italia. 175 p.

Fragoso, L. P. I. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio "Cerro Grande" municipio de Tancítaro, Michoacán, México. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 65 p.

Freedman, B., Meth, F. & Hickman, C. 1992. Temperate forest as a carbon-storage reservoir for carbon dioxide emitted by coal-fired generating stations. A

case study for New Brunswick, Canada. *Forest Ecology and Management*, 55: 15-29.

Hall, C. A. S. and Uhlig, J. 1991. Refining estimates of carbon released from tropical land-use change. *Canadian Journal Forest Research*. 21: 118-131.

Husch, B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. Simposio Internacional sobre Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 9 p.

INEGI. 2003. Carta Estatal Edafológica. Chihuahua. Escala 1:1,000,000. Edición 2002. Impresión 2003.

INEGI. 2003. Carta Estatal Vegetación. Chihuahua. Escala 1:250,000. Edición 2002. Impresión 2003.

IPCC. 1995. *Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC. 2001. *Climate change. Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. UK. 1005 pp.

Nakama, V., Alfieri, A., Casas, R., Lupi, A., López, G., y Pathauer, P. 2003. Secuestro de carbono en plantaciones forestales de la Región Centro oeste de la Provincia de Buenos Aires. Propuesta preliminar de trabajo. 11 p.

Návar, C. J. y De Los Ríos, E. 2006. Ecuaciones de volumen, biomasa y ahusamiento para especies de bosques templados de las Sierras Madre del Norte de México. En Preparación.

Návar, J. 2006. Los servicios ambientales de ecosistemas forestales: las potencialidades climáticas e hidrológicas. *Boletín Divulgativo IPN*. En Prensa.

ONU. 1992. Informe de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el desarrollo global. Cumbre de Río de Janeiro.

ONU. 2002. Cumbre mundial sobre desarrollo sostenible (Río + 10), Johannesburgo.

Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, Valdivia, Chile. 13 p.

Schoene, D. 2001. Evaluación y notificación de las variaciones de las existencias de carbono: ¿una iniciativa concertada?. Unasylva No. 210. Evaluación y vigilancia de los bosques. FAO Roma. 10 p.

Zamora, C. J. C. 2003. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino en el Ejido "La Majada" municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis de licenciatura. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". UMSNH. Uruapan, Michoacán. 59 p.