

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE AGRONOMÍA**



Estimación de Biomasa de Ramas Mediante un Modelo Alométrico, en Una Plantación de

*Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila

Por:

**JUAN ESTEBAN TORRES VIVAR**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Saltillo, Coahuila, México

Mayo del 2013

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE AGRONOMÍA**

**DEPARTAMENTO FORESTAL**

Estimación de Biomasa de Ramas Mediante un Modelo Alométrico, en Una Plantación de  
*Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila

Por:

**JUAN ESTEBAN TORRES VIVAR**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

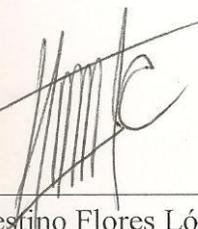
Aprobada



Dr. Jorge Méndez González  
Asesor Principal



M.C. José Aníseto Díaz Balderas  
Coasesor



M.C. Celestino Flores López  
Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera  
Coordinador de la División de Agronomía

Coordinación  
Saltillo, Coahuila, México

Mayo del 2013

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A mi Alma Terra Mater**

Por permitirme ser un Ingeniero Forestal más que culmina sus estudios profesionales, en esta máxima casa de estudios Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Por todo lo aprendido y vivido dentro y fuera de sus aulas.

### **Al Dr. Jorge Méndez González**

Por todo el apoyo recibido para la realización de este trabajo de investigación, también por las clases impartidas y los conocimientos brindados de su parte, por la motivación para sacar los trabajos lo mejor posible, y sobre todo por sus consejos dentro y fuera del aula de clases.

### **Al M.C. José Aniseto Díaz Balderas**

Por el tiempo dedicado a la revisión del presente trabajo, por las clases impartidas, por enseñarme que los trabajos se entregan a tiempo y con buena presentación.

### **Al M.C. Celestino Flores López**

Por el tiempo dedicado a la revisión del presente trabajo, por los conocimientos brindados, por inculcarme que los buenos trabajos llevan tiempo y mucha dedicación para su realización.

### **A mis amigos de la UAAAN**

Por su amistad y consejos en los momentos de alegría y de tristeza, por ser más que los mejores amigos y estar en los buenos y malos momentos: **Ilse Inturbide, César Rodríguez, Claudio Balbuena, Miguel García, Adarcilio Morales, Rodrigo Montoya, Gustavo Meneses y José Pérez.**

## **DEDICATORIA**

### **A mi padre**

#### **Sr. Juan Torres Hernández**

Por la dicha de llevar su nombre, por la enseñanza, los consejos, por su apoyo moral y económico que me ha brindado para llegar hasta donde he llegado, gracias por todo el apoyo que siempre me ha brindado para cumplir mis metas, mis objetivos y mis sueños porque gracias a su ejemplo y la educación que me inculcó este día culmino mi Carrera Profesional.

### **A mi abuelita**

#### **Sra. Agrícola Hernández Osorio**

A la mujer más increíble del mundo que me enseñó a caminar, hablar, comer, correr, reír, perdonar y sobre todo a ser feliz, a esa persona que corrigió mis rebeldías, perdonó mis errores, consoló mis tristezas, comparte mis sueños, saboreó mis logros, pero sobre todo por sus esfuerzos y sacrificios que me han permitido crecer como persona y superarme cada día. Porque nunca me dejó solo en aquella sombra que me cubrió en mi infancia y adolescencia. Sin su apoyo no hubiera llegado a ser la persona que soy hoy en día, ahora más que nunca expreso mi cariño, admiración y respeto. Gracias abuelita por ser más que la madre que nunca tuve. Por esto y mucho más, gracias, muchas gracias abuelita.

### **A mis hermanos**

A pesar de la distancia que nos separa, quiero que sepan que siempre estuvieron en mi mente y mi corazón, gracias por su apoyo y consejos que me motivaron el día a día para salir adelante, este gran logro no es solo mío es de todos, gracias por todo hermanos: **Diego Cesar, Gustavo Armando y José Javier**, los quiero mucho.

## RESUMEN

En el presente siglo, una de las principales problemáticas es el cambio climático, causado por actividades antropogénicas como la industria, transporte, incendios forestales, cambio y uso de suelo entre otras. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) generar una ecuación alométrica para cuantificar biomasa de ramas y sus componentes (hojas, ramas y fuste) de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., constituida de tres procedencias y establecida en Arteaga, Coahuila, México, 2) evaluar la alometría de ramas de tres procedencias de *Pinus cembroides* Zucc., y de árboles de una plantación joven de la misma especie. Para realizar este estudio, se seleccionaron 16 árboles por procedencia, se colectaron ocho ramas representativas de cada árbol, y de ellas se obtuvo la biomasa por el método directo con la relación entre el peso seco y peso verde, el modelo alométrico utilizado fue  $\ln(Y) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \ln X$ ; donde (Y) es biomasa seca y (X) el diámetro de la base. Los resultados indican que la acumulación de biomasa promedio de las tres procedencias es: 44.88, 17.09 y 38.03 % en hojas, ramas y fuste respectivamente. El mejor ajuste se obtuvo en fuste ( $R^2 = 0.941$ ). No es posible usar el modelo de ramas para estimar biomasa en árboles jóvenes de *Pinus cembroides* ya que presentaron diferencias dimensionales. La alometría (diámetro y altura) de la plantación y de la procedencia de Santa Victoria es positiva ( $\beta_1 = 1.0976$  y  $1.0396$  respectivamente) mientras que las procedencias de Mazapil y Concepción del Oro presentaron alometría negativa ( $\beta_1 = 0.9546$  y  $0.7374$  respectivamente). Se encontró que el tamaño óptimo de muestra para tener un buen ajuste está en aproximadamente 100 muestras.

**Palabras clave:** alometría, ramas, biomasa, carbono, piñonero, *Pinus cembroides*.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	3
Área de estudio .....	3
Generalidades de la especie <i>Pinus cembroides</i> .....	4
Método destructivo para obtener biomasa de ramas de <i>Pinus cembroides</i> .....	4
Determinación de biomasa seca de componente de ramas de <i>Pinus cembroides</i> .....	4
Análisis dimensional y de biomasa entre procedencias .....	5
Modelo alométrico para cuantificar biomasa.....	5
Obtención de carbono y carbono equivalente.....	7
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	9
Ajuste del modelo para biomasa en ramas de <i>Pinus cembroides</i> .....	11
Acumulación de biomasa, carbono y carbono equivalente en ramas <i>Pinus cembroides</i> .....	14
Alometría entre diámetro y altura de ramas y árboles jóvenes de <i>Pinus cembroides</i> .....	16
Análisis del tamaño de muestra en alometría de diámetro y altura .....	18
<b>CONCLUSIONES</b> .....	19
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	20

## TABLA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Características dasométricas (promedio $\pm$ desviación estándar) de árboles y ramas de <i>Pinus cembroides</i> , en Arteaga, Coahuila. ....	3
<b>Cuadro 2.</b> Prueba de Duncan en las variables dimensionales y biomasa en muestras de ramas de <i>Pinus cembroides</i> de diferentes procedencias en Arteaga, Coahuila. ....	10
<b>Cuadro 3.</b> Estadísticos del modelo alométrico para estimar biomasa de componentes de ramas de <i>Pinus cembroides</i> , en Arteaga, Coahuila, México. ....	13
<b>Cuadro 4.</b> Prueba de medias Duncan para los parámetros de regresión del modelo alométrico en ramas y árboles de <i>Pinus cembroides</i> . ....	17

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Aportación porcentual de biomasa por componentes de ramas en una plantación de <i>Pinus cembroides</i> , en Arteaga, Coahuila, México. ....	10
<b>Figura 2.</b> Biomasa de hojas (A), ramas (B), fuste (C) y total (D), en eje izquierdo, carbono (primer eje secundario) y carbono equivalente (segundo eje secundario) contenido en ramas de una plantación de <i>Pinus cembroides</i> en Arteaga, Coahuila. ....	15
<b>Figura 3.</b> Relación entre diámetro de la base y altura total, en ramas y árboles de <i>Pinus cembroides</i> , en Arteaga, Coahuila. ....	17
<b>Figura 4.</b> Error de $\beta_1$ (A) y tamaño de muestra (B) en ramas y árboles de <i>Pinus cembroides</i> . 18	

## INTRODUCCIÓN

Las concentraciones atmosféricas de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) (379 ppm y 1774 ppmm) en 2005 exceden con mucho el intervalo natural de valores de los últimos 650.000 años (IPCC, 2007). Las plantas absorben CO<sub>2</sub> y liberan oxígeno (O<sub>2</sub>) durante el proceso de la fotosíntesis, almacenando el carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, por lo que se les debe considerar como reservas naturales de carbono (Acosta *et al.*, 2002). La capacidad de fijación de CO<sub>2</sub> de algunos ecosistemas forestales a través de la fotosíntesis aún es desconocida, ya que no se cuenta con procedimientos definidos para su estimación, se sabe que ésta capacidad varía en función de la composición florística, edad y densidad de la población de cada estrato por comunidad vegetal (Díaz *et al.*, 2007).

Para la estimación adecuada de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema, es necesario un análisis destructivo (Brown *et al.*, 1989) o realizando estimaciones indirectas del material vegetal, para hacer las inferencias respectivas; el segundo caso es más práctico (pero menos preciso) cuando se desea estimar biomasa aérea de los árboles (Acosta *et al.*, 2002). Huxley (1932) citado por Acosta *et al.*, (2002) considera que para estimar biomasa indirectamente, se debe contar con modelos que estimen la biomasa total con base en el tamaño y dimensiones de los árboles (variables dependientes e independientes); es decir, funciones matemáticas basadas en las relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo. En la mayoría de los casos se logra una precisión satisfactoria cuando sólo se usa el diámetro de la base y diámetro normal como variable independiente (Brown *et al.*, 1989; Díaz *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2012).

Las relaciones alométricas se han utilizado en especies forestales de clima templado frío para estimar la biomasa aérea total, sin embargo, el uso de estos modelos alométricos aplicado en ramas es escaso o nulo en México. Para *Pinus patula* Schl., et Cham bajo aprovechamiento, las ramas representan 18 % de la biomasa aérea (Díaz *et al.*, 2007), mientras que en una plantación de *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus* la biomasa de las ramas representan el 39.8 y 41.6 % respectivamente (Méndez *et al.*, 2011). En una plantación de *Pinus greggii* Engelm de 6 años, la proporción de la biomasa de ramas es del 49.0 % (Pacheco *et al.*, 2007). La estimación de biomasa de ramas mediante modelos alométricos permitiría evaluar la alometría de ramas, conocer sus coeficientes alométricos, calcular la cantidad de CO<sub>2</sub>, y valorar el impacto de este componente en la mitigación de gases efecto invernadero (GEI). De igual forma, con estos modelos se podría conocer la cantidad de biomasa removida en podas o aclareos de saneamiento, la cual es una actividad muy común en plantaciones forestales; además, ayudaría a tomar decisiones óptimas en la política ambiental y gestión silvícola (Méndez *et al.*, 2011). Aunado a lo anterior, no existen modelos para estimar biomasa a nivel de ramas individuales.

Los objetivos de la presente investigación fueron: 1) generar una ecuación alométrica para cuantificar biomasa de ramas y sus componentes (hojas, ramas y fuste) de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., constituida de tres procedencias, establecida en Arteaga, Coahuila, México: 2) evaluar la alometría de ramas de tres procedencias de *Pinus cembroides* Zucc., y compararla contra una plantación joven de la misma especie: 3) determinar el posible tamaño óptimo de muestras para construir modelos alométricos en ramas y árboles jóvenes de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc. La hipótesis del presente trabajo fue que la biomasa de ramas entre procedencias y que la alometría entre árboles y ramas es similar.

# MATERIALES Y MÉTODOS

## Área de estudio

El presente trabajo se realizó en una plantación (0.17 ha) de *Pinus cembroides* Zucc. constituida de tres procedencias: Concepción del Oro (Co), Zacatecas, 24° 35' 25'' en latitud norte (LN) y 101° 11' 08'' de longitud oeste (LO) con 1690 msnm; Mazapil (Mz), Zacatecas, 24° 35' 08'' LN y 101° 27' 52'' LO con 2680 msnm; Santa Victoria (Sv), Coahuila, 25° 30' 36'' LN y 101° 10' 19'' LO, con 2360 msnm., presentando diferencias dasométricas entre procedencias (Cuadro 1). El área de estudio se encuentra en La Sierra de Arteaga, Coahuila, México (25° 24' 27.50" N y 100° 36' 24.54" W), una altitud de 2280 msnm; clima templado (Cb(X)(Wo)(e)g), temperatura media de 13.3 °C y precipitación anual de 521 mm (García, 1987). La plantación fue establecida en junio de 1992, a un espaciamiento de 1.8 m entre plantas, dando un total de 3,988 árboles/ha; a 21 años de haberse establecido, se realizó el presente estudio para cuantificar la cantidad de biomasa y CO<sub>2</sub> almacenado en sus componentes.

**Cuadro 1.** Características dasométricas (promedio ± desviación estándar) de árboles y ramas de *Pinus cembroides*, en Arteaga, Coahuila.

Proc	Árboles		Ramas			
	Db (cm)	Ht (m)	n	Bsh (g)	Bsr (g)	Bsf (g)
Mz	6.63 ± 1.66	2.77 ± 0.53	120	37.62 ± 27.92	14.32 ± 17.07	33.03 ± 33.61
Co	6.31 ± 1.12	2.61 ± 0.48	83	70.94 ± 55.35	35.07 ± 38.75	65.95 ± 53.76
Sv	6.67 ± 1.36	2.49 ± 0.42	123	88.92 ± 82.74	45.56 ± 62.40	89.49 ± 98.70

Donde: Proc = procedencia; Mz = Mazapil; Co = Concepción del Oro; Sv = Santa Victoria; Db = diámetro de la base (cm); Ht = altura total (m); n = número de muestras; *Bsh* = biomasa seca hojas (g); *Bsr* = biomasa seca ramas (g); *Bsf* = biomasa seca fuste (g).

### **Generalidades de la especie *Pinus cembroides***

*Pinus cembroides* se distribuye desde 18° hasta 32° de latitud norte y de 90° hasta 116° longitud oeste, el rango de distribución es de 1350 - 2700 msnm, precipitación media anual de 450 mm, temperatura media anual de 17.9 °C, clima templado-cálido subtropical (Eguiluz, 1982).

### **Método destructivo para obtener biomasa de ramas de *Pinus cembroides***

La metodología utilizada fue la propuesta por Schlegel *et al.* (2000), consistente en derribar el árbol (16 árboles por procedencia) y pesar en verde los componentes hojas, ramas y fuste. Del muestreo resultó un total de 128 ramas por procedencia, tomando las más representativas de la parte baja, media y alta del árbol. Las muestras se etiquetaron y almacenaron en bolsas de papel para facilitar su traslado al laboratorio, el pesado en verde (g) fue realizado con una báscula marca Torrey modelo L-EQ con una capacidad de 4 kg.

### **Determinación de biomasa seca de componente de ramas de *Pinus cembroides***

El secado de las muestras se realizó en estufa horno Blue M. modelo POM-246F a una temperatura constante de 75 °C por 8 días (Acosta *et al.*, 2002; Méndez *et al.*, 2011), la biomasa seca de hojas (*Bsh*), ramas (*Bsr*), fuste (*Bsf*) y total (*Bst*) se determinó con la relación de peso seco y peso fresco (Schlegel *et al.*, 2000).

## Análisis dimensional y de biomasa entre procedencias

Previo al ajuste del modelo alométrico, se realizó el análisis dimensional de las variables de diámetro (cm), altura (cm) y biomasa total (g) entre muestras (ramas) de las procedencias. Debido a la inexistencia de normalidad de los datos, estos fueron transformados usando logaritmo natural, previo al análisis de varianza (95 %) y pruebas de medias de Duncan. El análisis estadístico anterior se realizó para establecer posibles diferencias entre parámetros de alometría de la intercepta ( $\beta_0$ ) y de la pendiente ( $\beta_1$ ) entre procedencias.

### Modelo alométrico para cuantificar biomasa

La determinación de biomasa por componente fue con el modelo alométrico más generalizado (Acosta *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2012) el cual en su forma no lineal se expresa de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 * Db^{\beta_1} \quad (1)$$

Al ajustar el modelo en su forma lineal mediante transformación logarítmica para homogenizar la varianza de “X” y “Y” se obtiene el modelo siguiente (Sprugel, 1983):

$$\ln(Y) = \ln(\beta_0 + \beta_1 \ln Db) \quad (2)$$

Dónde:

$\beta_0 = \text{Exp}(\beta_0)$  en ecuación 2.

Y = Biomasa seca del componente (g).

Db = Diámetro de la base de la rama (cm).

$\beta_0$  y  $\beta_1$  = Parámetros del modelo.

ln = Logaritmo natural.

El modelo se ajustó usando el programa Statistical Analysis System (SAS, versión 9.1), utilizando ‘proc reg’ para la ecuación (2) resolviendo con cuadrados mínimos (Brown *et al.*, 1989; Acosta *et al.*, 2002). La transformación logarítmica en la ecuación 2 corrige la heterogeneidad de la varianza de la variable independiente “Db” con respecto a los datos en la variable dependiente “Y” (Sprugel, 1983; Brown *et al.*, 1989), cuando las unidades originales son re-transformadas en el modelo 2 los valores más grandes se homogenizan con los demás valores, volviéndose a una escala más pequeña (Brown *et al.*, 1989); para corregir el sesgo Sprugel (1983) propuso la aplicación de un factor de corrección ponderado, el cual se expresa por:

$$FC = \text{Exp}\left(\frac{SEE^2}{2}\right) \quad (3)$$

Dónde:

$FC$  = Factor de corrección.

$Exp$  = Exponencial.

$SEE$  = Error estándar de la estimación, en unidades transformadas.

$$SEE = \sqrt{\frac{(\text{Log } Y_{\text{obs}} - \text{Log } Y_{\text{est}})^2}{(n-2)}} \quad (4)$$

Dónde:

Y obs = Biomasa observada.

Y est = Biomasa estimada.

n = Número de observaciones.

### **Obtención de carbono y carbono equivalente**

Para obtener el contenido de carbono de componentes de ramas de *P. cembroides*, (hojas, ramas, fuste y total; este último obtenido con la suma de los anteriores) se multiplicó la biomasa del componente por el factor 0.5025 determinado por Yerena *et al.* (2012) para esta especie, correspondiente a la fracción de carbono (%) contenido en la biomasa. El carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq) fijado en la biomasa seca se obtuvo con el producto del contenido de carbono y el coeficiente resultante de la relación entre el peso de la molécula de CO<sub>2</sub> (44) y el peso del átomo de carbono (12) (Pacheco *et al.*, 2007; Ghosh *et al.*, 2010).

### **Alometría en ramas y árboles jóvenes de *Pinus cembroides***

Para evaluar la alometría entre diámetro basal (cm) y altura (cm) en ramas y árboles de dicha plantación de *P. cembroides*, y determinar el incremento de la altura (dado por  $\beta_I$  de la ecuación 2) en función del diámetro basal de ramas, se utilizó el modelo 2 ajustándose a diferentes tamaño de muestra (15, 30, 45, 60, 75, 90 y 100 %) obtenidos al azar con remplazo, empleando el programa SAS utilizando “proc surveyselect”. Si hacemos logaritmos, la ecuación 2 se convierte en una recta, lo que facilita la estima de  $\beta_I$  y su interpretación. Es necesario obtener  $\beta_I$  y su error estándar (SEb), de forma que podamos estimar cuál es la probabilidad (p) de que, siendo cierta la hipótesis de isometría ( $\beta_I = 1$ ), se obtenga por azar una pendiente tan alta ( $\beta_I > 1$ : alometría positiva) o tan baja ( $\beta_I < 1$ : alometría negativa). El

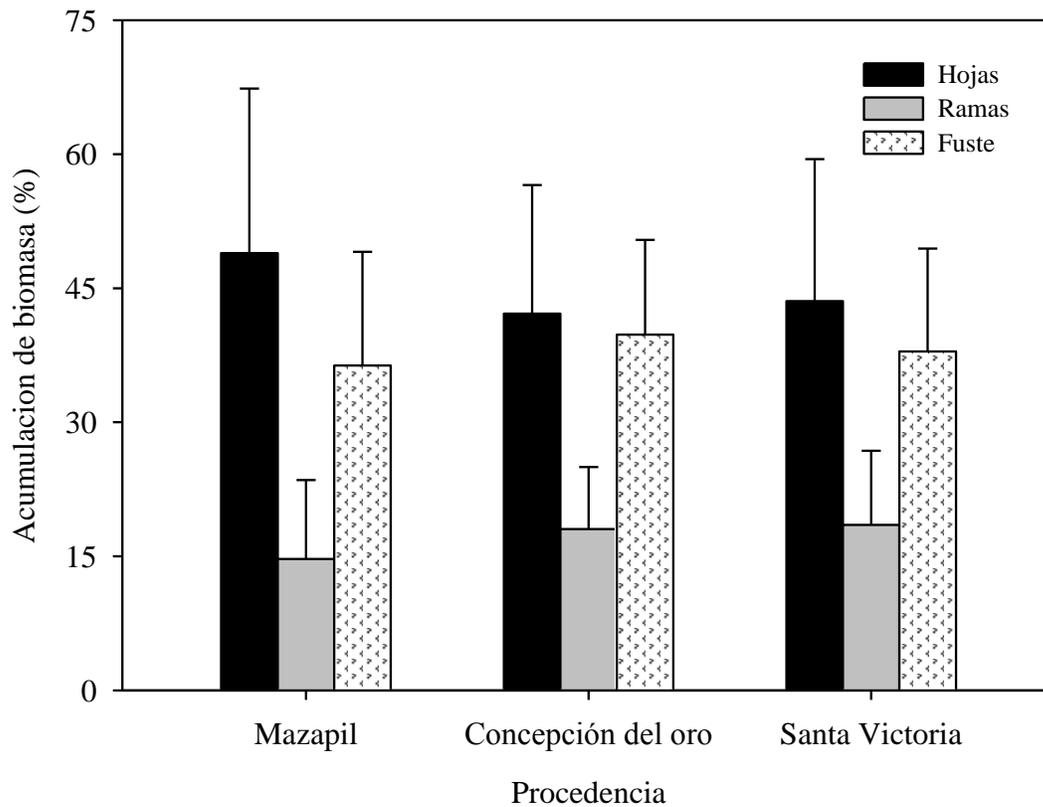
valor de “p” se aproxima a una distribución “t” de Student con n-2 grados de libertad, siendo n el número de ejemplares medidos.  $(t_{n-2} = (\beta_1 - 1) / SEb)$  (Pérez *et al.* (2009), los valores de  $\beta_1$  se evaluaron con un análisis de varianza (95 %) y pruebas de Duncan para saber si la alometría es similar entre procedencias y la plantación.

Los estadísticos: coeficiente de determinación ( $R^2$ ), parámetros del modelo ( $\beta_0$  y  $\beta_1$ ), error estándar de  $\beta_0$  y  $\beta_1$ , valor de F, probabilidad de F, se consideraron para determinar el ajuste del modelo para la estimación de biomasa de ramas de *P. cembroides*. Los resultados anteriores ( $\beta_0$  y  $\beta_1$  y error estándar de ellos) se utilizaron con la finalidad de saber hasta qué cantidad de muestras (Numero de ramas y/o árboles) serían necesarios para ajustar un modelo alométrico de la forma lineal con varianza mínima y con los mejores ajustes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A 21 años de edad, la plantación de *P. cembroides* tuvo un diámetro promedio a la base  $6.53 \pm 1.38$  cm y altura de  $2.62 \pm 0.47$  m; el promedio general de la biomasa de ramas considerada en este estudio fue de 65.82, 31.65, 62.82 y 166.28 g en hojas, ramas, fuste y total, variando significativamente entre procedencias, desde  $37.62 \pm 27.92$  (Mz) hasta  $88.92 \pm 62.40$  (Sv);  $84.93 \pm 70.53$  (Mz) hasta  $223.97 \pm 231.90$  (Sv) g en hojas y biomasa total, respectivamente. Los componentes hojas y fuste (de ramas) son los más representativos en la acumulación de biomasa y por ende de CO<sub>2</sub>, registrando 48.93 y 36.37 % (Mz); 43.56 y 37.93 % (Sv); y 42.15 y 39.80 % (Co) respectivamente (Figura 1). Las ramas representaron en promedio 14.70 (Mz), 18.05 (Co) y 18.30 % (Sv). Los resultados anteriores difieren a los reportados por Xiao y Ceulemans (2004) en árboles una plantación de *Pinus sylvestris* de 10 años, quienes encontraron que el 22.0 y 33.9 % se encuentra en estos mismos componentes. En otra plantación de *Pinus greggii* de 6 años Pacheco *et al.* (2007) indican que el 24 y 51 % es representado por hojas y fuste, mientras que Méndez *et al.* (2011) en árboles de *P. pseudrostobus* y *P. devoniana* reportaron 41.6 y 39.8 % en hojas y en fuste 58.3 y 60.1 %.

Encontrando en el análisis de varianza y las pruebas de Dunca que las muestras analizadas fueron estadísticamente diferentes entre procedencias ( $P < 0.1127$ ); en este sentido, la procedencia de Concepción del Oro obtuvo el diámetro mayor ( $1.60 \pm 0.66$  cm) y la menor Mazapil ( $1.38 \pm 0.44$  cm) (Cuadro 2). En cuanto a altura total de ramas, se observó similitud entre todas las procedencias ( $P > 0.8125$ ), promediando  $75.18 \pm 29.19$  cm; mientras que en biomasa total de ramas de *P. cembroides* se observó que la más alta se obtuvo en la procedencia Santa Victoria representando  $223.97 \pm 231.90$  g. y solo  $84.93 \pm 70.53$  g en la procedencia de Mazapil, siendo ellas estadísticamente diferentes ( $P < 0.0001$ ) (Cuadro 2).



**Figura 1.** Aportación porcentual de biomasa por componentes de ramas en una plantación de *Pinus cembroides*, en Arteaga, Coahuila, México.

**Cuadro 2.** Prueba de Duncan en las variables dimensionales y biomasa en muestras de ramas de *Pinus cembroides* de diferentes procedencias en Arteaga, Coahuila.

Procedencia	Db (*)	Ht (+)	Bst (***)
Mz	1.38 ± 0.44 b	73.92 ± 29.62 a	84.93 ± 70.53 b
Co	1.60 ± 0.66 a	75.66 ± 28.16 a	171.96 ± 134.44 a
Sv	1.48 ± 0.53 ba	75.97 ± 29.81 a	223.97 ± 231.90 a

Donde: \*\*\* =  $P < 0.0001$ ; \* =  $P < 0.1127$ ; + =  $P > 0.8125$ ; Mz = Mazapil; Co = Concepción del Oro; Sv = Santa Victoria; Db = diámetro a la base (cm); Ht = altura total (cm); Bst = Biomasa seca total (g).

Lo anterior indica que la selección de ramas muestreadas para estimar biomasa y construir modelos alométricos fue diferente entre procedencias, lo que determina que la biomasa, carbono y CO<sub>2</sub> entre procedencias, así como los coeficientes alométricos podrían ser diferentes entre sí.

### **Ajuste del modelo para biomasa en ramas de *Pinus cembroides***

Los estadísticos resultantes del modelo 2 indican que componente mejor modelado fue el fuste, el cual obtuvo  $R^2$  desde 0.584 (Co) hasta 0.941 (Sv); en contraste las hojas presentaron valor de  $R^2$  desde 0.375 (Sv) hasta 0.491 (Mz). El mejor ajuste fue en fuste para la procedencia de Santa Victoria, con una  $R^2$  de 0.941, error estándar de 11.704 g, coeficiente de variación de 26.55 % y sesgo de 1.320 g (Cuadro 3). Cabe mencionar que la  $R^2$  (Cuadro 3) es sin aplicar el FC propuesto por Sprugel (1983), si se aplicara el FC, la biomasa es sobreestimada dando como resultado una  $R^2$  mayor a la unidad en el componente fuste y total. Xiao y Ceulemans (2004), reportaron una  $R^2 > 0.97$  para sus diferentes componentes de *P. sylvestris*; mientras que Díaz *et al.* (2007) reportan  $R^2 > 0.98$  en *Pinus patula* Schl. *et* Cham., para todos sus componentes, estos diferentes ajustes se deben al clima el cual es un factor importante que regula la fenología, morfología, fisiología y la productividad de las especies (Grier *et al.*, 1992).

Individualmente, el mayor sesgo obtenido fue en el componente ramas con -18.654 % (Mz) y el menor en fuste 1.320 % (Sv). La procedencia de Mazapil registró el sesgo más alto,

promediando en todos sus componentes -12.6015 %, mientras que el sesgo más bajo se encuentra en Santa Victoria con 4.298 % (Cuadro 3). El sesgo por componente fue mayor en hojas (-18.654 % Mz) y el menor en fuste (1.320 % Sv). El FC varió desde 1.076 (fuste, Sv) hasta 1.329 (hojas, Mz), promediando por componente: 1.270 hojas, 1.204 ramas, 1.127 fuste y 1.108 total (Cuadro 3), deduciendo que el FC corrige la biomasa de componente de ramas con 27, 20, 12 y 10 % respectivamente. Se observó que los parámetros de regresión varían entre procedencias, en ramas  $\beta_0$  va desde 1.1754 (Mz) hasta 3.5792 (Sv) en total; mientras que  $\beta_1$  varía desde 1.3368 (Co) hasta 3.0645 (Mz) en fuste y ramas, presentando más variación  $\beta_0$  que  $\beta_1$ . El modelo 2 también se probó con el total de muestras (n = 326) de las ramas de las tres procedencias donde los parámetros de regresión obtenidos fueron:  $R^2$  de 0.559, similar a la obtenida en ramas de *Pinus devoniana* ( $R^2 = 0.57$ ), pero difiere a la obtenida en ramas de *Pinus pseudostrobus* ( $R^2 = 0.84$ ) por Méndez *et al.* (2011); mientras que el error fue de 10.354 g y coeficiente de variación de 11.00 %, siendo estos los mejores estadísticos obtenidos para el modelo. Se obtuvo un sesgo de 9.496 % y FC de 1.121, estando por debajo del promedio de las procedencias. El valor de  $\beta_0$  fue de 3.5310 y  $\beta_1$  (2.0376), es similar al de los modelos individuales, pero difiriendo para otros estudios realizados con el mismo modelo, como el de Méndez *et al.* (2011) donde reportan que  $\beta_0 = 0.044$  y  $\beta_1 = 2.117$  para *Pinus devoniana*, y  $\beta_0 = 0.001$  y  $\beta_1 =$  de 3.954 para *Pinus pseudostrobus* en el componente ramas. El valor de  $\beta_1$  obtenido en este estudio no se asemeja a los obtenidos por otros estudios realizados. Acosta *et al.* (2002) reportan valores para  $\beta_1$  de 2.23, 2.15, 2.26, 2.39, 2.45 y 2.26 en *Alnus*, *Clethra*, *Rapanea*, *Quercus*, *Liquidambar* e *Inga* respectivamente. Díaz *et al.* (2007) reportan un valor de  $\beta_1 = 2.6916$  para *Pinus patula* Schl. et Cham, otros investigadores reportan un valor de 2.0492 para *Prosopis laevigata* (Méndez *et al.*, 2012).

**Cuadro 3.** Estadísticos del modelo alométrico para estimar biomasa de componentes de ramas de *Pinus cembroides*, en Arteaga, Coahuila, México.

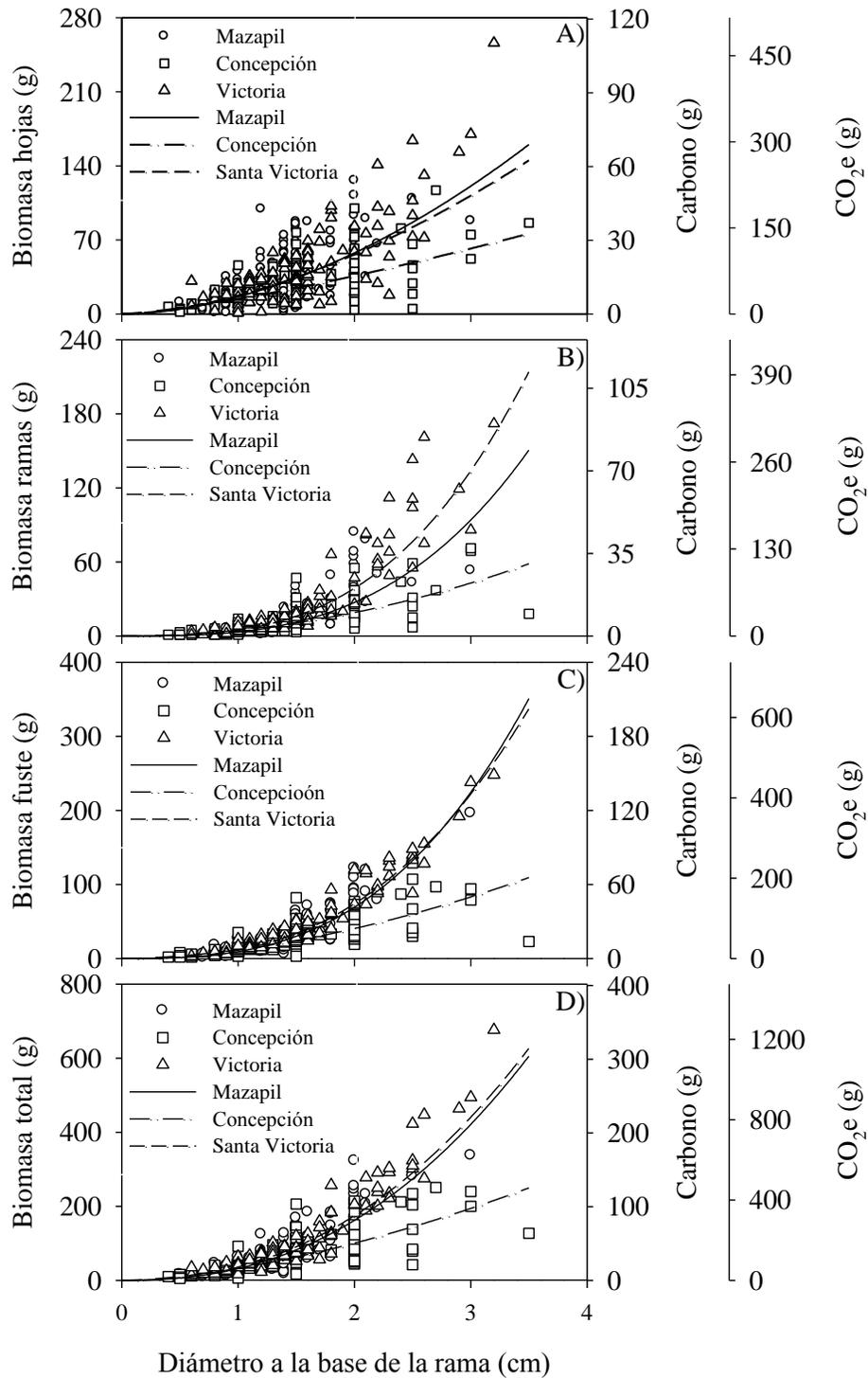
Proc.	Comp.	R <sup>2</sup>	Sxy	CV	Pr > F	$\beta_0$	$\beta_1$	S	FC
Mazapil	Hojas	0.491	22.999	61.14	<.0001	2.7878	1.8262	-16.439	1.329
	Ramas	0.542	11.999	83.79	<.0001	1.1754	3.0645	-18.654	1.240
	Fuste	0.794	14.048	46.13	<.0001	2.2249	2.9019	-7.814	1.125
	Total	0.755	36.827	43.36	<.0001	3.4541	2.3562	-7.499	1.105
Concepción	Hojas	0.390	20.052	61.46	<.0001	2.6549	1.3368	5.270	1.265
	Ramas	0.504	11.583	71.16	<.0001	1.5467	2.0129	2.460	1.239
	Fuste	0.585	20.395	61.05	<.0001	2.4651	1.7790	3.710	1.181
	Total	0.604	43.517	52.87	<.0001	3.4813	1.6272	7.760	1.138
Santa victoria	Hojas	0.375	24.206	57.30	<.0001	2.8539	1.6954	6.154	1.215
	Ramas	0.669	14.678	59.14	<.0001	1.5342	3.0585	2.650	1.133
	Fuste	0.941	11.704	26.55	<.0001	2.4214	2.7127	1.320	1.076
	Total	0.663	34.799	31.31	<.0001	3.5792	2.2833	7.070	1.082
	Global	0.559	10.354	11.00	<.0001	3.5310	2.0376	9.496	1.121

Donde: Proc. = procedencia; Comp. = componente de biomasa; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación; Sxy = error estándar (g); CV = coeficiente de variación (%); Pr > F = significancia del modelo;  $\beta_0$  y  $\beta_1$  = parámetros del modelo de regresión; S = sesgo (%); FC = factor de corrección.

### **Acumulación de biomasa, carbono y carbono equivalente en ramas *Pinus cembroides***

De acuerdo al modelo alométrico 2 de cada procedencia, se observa que según el diámetro promedio global (1.46 cm) se calcula una biomasa total de 77.15, 60.16, 85.16 g; 38.76, 30.23 y 42.73 g C que equivalen a 142.27, 110.95 y 156.84 g CO<sub>2</sub> eq, en la procedencia de Mazapil, Concepción del Oro y Santa Victoria, respectivamente (Figura 2), biomasa que a estas dimensiones de diámetro es muy similar entre procedencias. Sin embargo, a un diámetro de 3.5 cm (diámetro máximo entre procedencias), se observa que la biomasa total calculada (Figura 2D), en las procedencias Mazapil y Santa Victoria registran una biomasa de 605.38 y 626.13 g, las cuales llegan a ser hasta 534.6 g más que Concepción del Oro. Los resultados también demuestran que el modelo alométrico calcula una biomasa similar entre hojas (Figura 2A), fuste (Figura 2C) y total (Figura 2D), no así para el componente ramas (Figura 2B) en las procedencias de Mazapil y Santa Victoria.

De acuerdo a los alcances de este estudio, se realizó una simulación de una poda de ramas de *P. cembroides* en la plantación estudiada; a la altura de 1 metro, se estimó que el promedio de ramas a remover por árbol es de 12, dando un diámetro promedio de 1.49 cm, usando el modelo alométrico global (Cuadro 3) se estimó la biomasa a esa altura dando como resultado que se removería un total de 3,558.54 kg de biomasa ha<sup>-1</sup>, 1,788.16 kg de C ha<sup>-1</sup> y 6,562.57 kg CO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup>.



**Figura 2.** Biomasa de hojas (A), ramas (B), fuste (C) y total (D), en eje izquierdo, carbono (primer eje secundario) y carbono equivalente (segundo eje secundario) contenido en ramas de una plantación de *Pinus cembroides* en Arteaga, Coahuila.

### **Alometría entre diámetro y altura de ramas y árboles jóvenes de *Pinus cembroides***

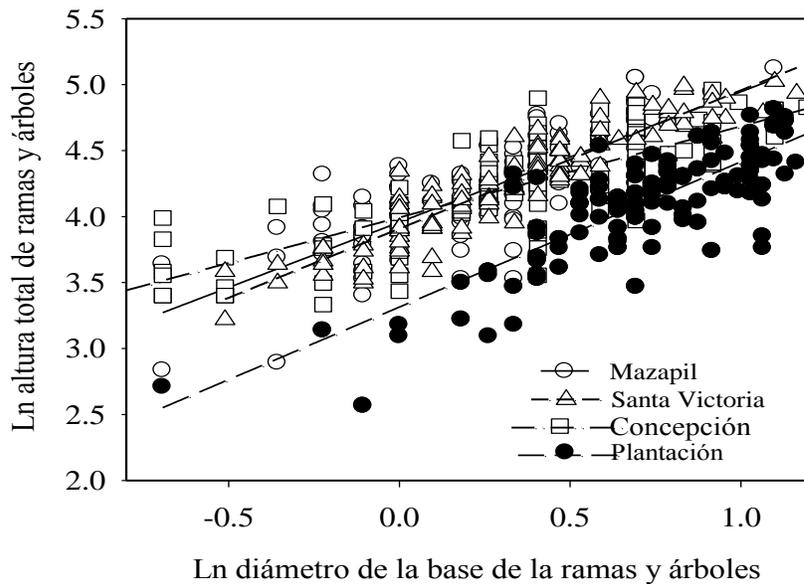
Los resultados del análisis de alometría entre diámetro a la base y altura total, entre ramas y árboles de *P. cembroides*, indican que el valor estimado de la ordenada al origen ( $\beta_0$ ) del modelo 2 varió desde 3.3149 en la plantación hasta 3.9769 en Concepción del Oro, mientras que el valor estimado de la pendiente ( $\beta_1$ ) varió desde 0.7374 en Concepción del Oro hasta 1.0976 en la plantación. De acuerdo a al análisis de varianza se observa que los valores promedio estimados de  $\beta_0$  (obtenidos de 7 grupos aleatorios) son similares en las procedencias de Mazapil y Concepción del Oro, siendo también los más altos, pero los errores estándar de  $\beta_0$  son casi iguales en todas las procedencias (Cuadro 4). Los valores de la pendiente  $\beta_1$  fueron diferentes ( $P < 0.0001$ ) entre las ramas y plantación, registrando el valor más alto la plantación (1.0976) y el más bajo Concepción del Oro (0.7374), lo anterior resulta en un incremento mayor en altura en árboles de una plantación que en ramas de árboles de la misma especie (Figura 3), deduciendo que los modelos alométricos en ramas y árboles de *P. cembroides* deben ser específicos, tanto para ramas, como de árboles.

**Cuadro 4.** Prueba de medias Duncan para los parámetros de regresión del modelo alométrico en ramas y árboles de *Pinus cembroides*.

Variable	Lugar	n	Media	Error	Pr > F
$\beta_0$	Plantación	7	3.3149 c	0.065 a	<.0001
	Mazapil	7	3.9720 a	0.044 b	<.0001
	Concepción del Oro	7	3.9769 a	0.038 b	<.0001
	Santa Victoria	7	3.9016 b	0.029 b	<.0001
$\beta_1$	Plantación	7	1.0976 a	0.085 ba	<.0001
	Mazapil	7	0.9546 c	0.098 a	<.0001
	Concepción del Oro	7	0.7374 d	0.064 b	<.0001
	Santa Victoria	7	1.0396 b	0.059 b	<.0001

Donde:  $\beta_0$  y  $\beta_1$ = parámetros de regresión; n = número de grupos; Pr > F = probabilidad de F;

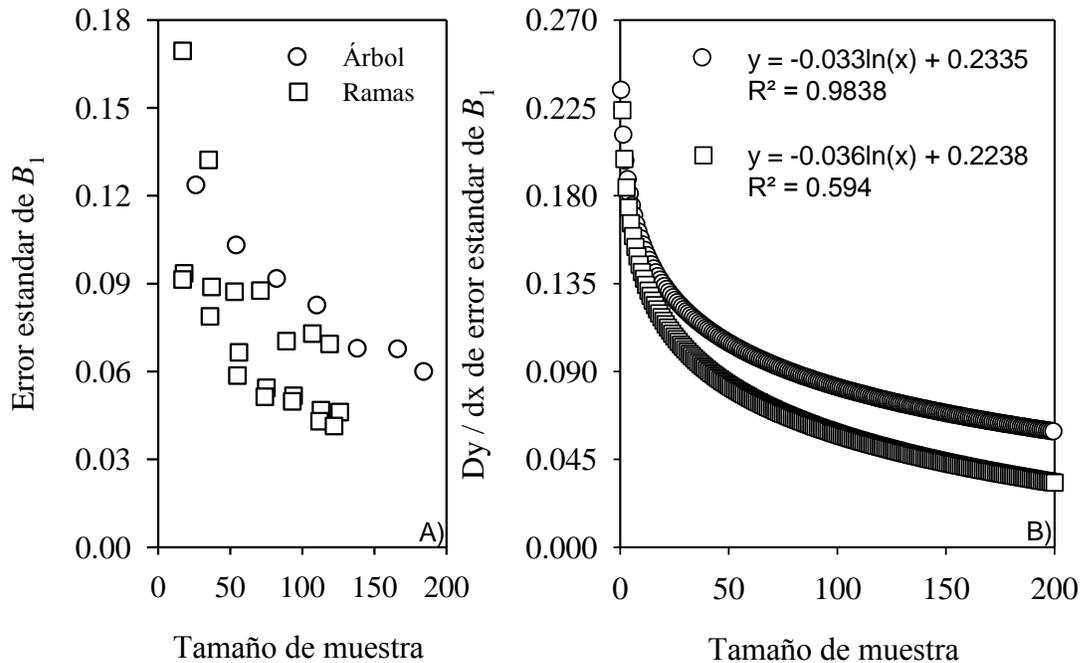
Letras iguales no son estadísticamente diferentes ( $\alpha = 0.05$ ) según la prueba de Duncan.



**Figura 3.** Relación entre diámetro de la base y altura total, en ramas y árboles de *Pinus cembroides*, en Arteaga, Coahuila.

## Análisis del tamaño de muestra en alometría de diámetro y altura

La aplicación del modelo alométrico 2 a los datos de altura (cm) y diámetro (cm) con diferentes tamaños de muestra, presentó en todos los casos alto grado de significancia ( $P < 0.0001$ ). El mejor ajuste se obtuvo con  $n = 18$  ( $R^2 = 0.8932$ ) y el ajuste más bajo con  $n = 36$  ( $R^2 = 0.5407$ ), similar al mejor ajuste realizado en *Prosopis spp.*, obtenido con  $n = 20$  ( $R^2 = 0.96$ ), pero difiere del tamaño del ajuste más bajo con  $n = 100$  (Méndez *et al.*, 2012). Los resultados indican que el error de  $\beta_0$  y  $\beta_1$  disminuye significativamente con el aumento de  $n$  (Figura 4). Nívar (2010) encontró que el tamaño mínimo para estimar biomasa es de 60 muestras para las especies de *P. arizonica*, *P. durangensis*, *P. cooperi*, *P. ayacahuite*, *P. leiophylla* y *Quercus spp.*, mientras que en el género *Prosopis spp.*, el tamaño de muestra óptimo es de 40 (Méndez *et al.*, 2012).



**Figura 4.** Error de  $\beta_1$  (A) y tamaño de muestra (B) en ramas y árboles de *Pinus cembroides*.

## CONCLUSIONES

El diámetro a la base de la rama está correlacionado directamente con la biomasa de los componentes de las ramas de *Pinus cembroides* Zucc, por lo tanto se puede utilizar para la estimación de almacenes de carbono en esta especie en ramas. El modelo alométrico presenta buen ajuste en biomasa total de ramas y su factor de corrección mejora la estimación hasta un 11 %. Existen diferencias dimensionales entre ramas de *Pinus cembroides* y en consecuencia en las curvas alométricas de biomasa, CO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> eq, debiendo ser modelos específicos para cada procedencia. La alometría entre diámetro basal y altura de ramas es similar entre procedencias, pero diferente a la alometría de árboles de *Pinus cembroides*. El tamaño de muestra óptimo para un buen ajuste del modelo de ramas (diámetro vs altura) se sugiere sea como mínimo 100 muestras. A pesar que el diámetro a la base de las ramas de la procedencia de Mazapil es el menor a las otras procedencias, el modelo alométrico calculó mayor biomasa en ramas procedentes de Concepción del Oro que tienen el mayor diámetro a la base en ramas.

## LITERATURA CITADA

- Acosta M. M., Vargas H. J., Velázquez M. A. y Etchevers B. J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36: 725-736. <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2002/nov-dic/art-10.pdf>
- Brown S., A. J. R. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*. 35(4): 881-902. [http://www.winrock.org/ecosystems/files/Brown\\_Gillespie\\_et\\_al\\_1989.pdf](http://www.winrock.org/ecosystems/files/Brown_Gillespie_et_al_1989.pdf)
- Díaz F. R., Acosta M. M., Carrillo A. F., Buendía R. E., Flores A. E. y Etchevers B. J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y bosque*. 13 (1): 25-34. <http://revistas.mes.edu.cu/greenstone/collect/repo/index/assoc/D1405047/113102.dir/1405047113102.pdf>
- Eguiluz P. T. (1982). Clima y distribución del género pinus en México. *Ciencia Forestal* Núm. 38. 7:30-44. <http://www.revistasinifap.org.mx/index.php/Forestales/article/view/1023/1021>
- García E. (1987). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. UNAM. México. 213 p.
- Ghosh T., Elvidge, C. D., Sutton, P. C., Baugh, K. E., Ziskin, D. and Tuttle B. T. (2010). Creating a Global Grid of Distributed Fossil Fuel CO<sub>2</sub> Emissions from Nighttime Satellite Imagery. *Energies*. 3: 1895-1913. <http://www.mdpi.com/1996-1073/3/12/1895>

- Grier C. C., Elliott K. J., and McCullough D. G. (1992). Biomass distribution and productivity of *Pinus edulis-Juniperus monosperma* woodlands of north-central Arizona. *Forest Ecology and Management*. 50: 331-320. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037811279290346B>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Pachauri, R. K., y A. Reisinger (eds). Ginebra, Suiza. 104 p. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)
- Méndez G. J., Luckie N. S. L., Capo A. M. A. y Nájera L. J. A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*. 45: 479-491. <http://scielo.unam.mx/pdf/agro/v45n4/v45n4a7.pdf>
- Méndez G. J., Turlan M. O. A., Ríos S. J. C. y Najera L. J. A. (2012). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de *Prosopis leavigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd) M.C. *Johnst. Rev. Mex. Cien. For.* 3(13): 57-72. <http://ibsa.mx/~inifap4/index.php/Forestales/article/view/2363/1968>
- Návar-Cháidez J.J. (2010). Biomass allometry for tree species of northwestern México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 12:507-519. <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1334/bio0201.pdf?sequence=1>
- Pacheco E. F. C., Aldrete A., Gómez G. A., Fierros G. A. M., Cetina-Alcala, V. M. y Vaquera H. H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven

- de *Pinus greggii* Engelm. Rev. Fitotec. Mex. 30(3): 251-254. <http://www.revista-fitotecniamexicana.org/documentos/30-3/5a.pdf>
- Pérez Z. J., Díaz J. A. y García M. A. (2009). Modelos adaptativos en Zoología (Manual de prácticas) 2. Tamaño, forma y alometría. Reduca (Biología), Serie Zoología. 2 (2): 20-30. <http://revistareduca.es/index.php/biologia/article/viewFile/784/800>
- Schlegel B., Gayoso J. y Guerra J. (2000). Manual de procedimientos muestreos biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosque de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF D98I1076. Valdivia Chile. 26 p. <http://www.umoar.edu.sv/biblio/agricultura/forestales/masa%20de%20biomasa.pdf>
- Sprugel D. G. (1983). Correcting for bias in log-transformed allometric equations. Ecology. 64 (1):209-210. [http://research.eeescience.utoledo.edu/lees/papers\\_PDF/Sprugel\\_1983\\_Ecology.pdf](http://research.eeescience.utoledo.edu/lees/papers_PDF/Sprugel_1983_Ecology.pdf)
- Xiao C-W. and Ceulemans R. (2004). Allometric relationships for below-and aboveground biomass of young Scots pines. Forest Ecology Management. 203:177-186. [ftp://195.37.229.5/pub/outgoing/athuille/Publications/2004/Xiao\\_FEaM\\_2004.pdf](ftp://195.37.229.5/pub/outgoing/athuille/Publications/2004/Xiao_FEaM_2004.pdf)
- Yerena Y. J. I., Jiménez P. J., Aguirre C. O. A., Treviño G. E. J. y Alanís R. E. (2012). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. Rev. Mex. Cien. For. 3(1): 49-56. <http://revistasinifap.org.mx/index.php/Forestales/article/view/2364/1969>