

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Cuantificación de Biomasa y Carbono en *P. cembroides* Zucc., Mediante un Modelo
Alométrico en Los Lirios Arteaga, Coahuila, México

Por:

ILSE ITURBIDE ANDRÉS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Cuantificación de Biomasa y Carbono en *P. cembroides* Zucc., Mediante un Modelo
Alométrico en Los Lirios Arteaga, Coahuila, México

Por:

ILSE ITURBIDE ANDRÉS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada

Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal

M.C. José Aniceto Díaz Balderas

Coasesor

Dra. Gabriela Ramírez Fuentes

Coasesor

Dr. Leobardo Bañuelos Herrera

Coordinador de la División de Agronomía

División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Junio 2014

AGRADECIMIENTOS:

Le agradezco a mi Dios quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento y le pido que con su luz me guíe y me acompañe siempre a lo largo de mi vida.

A mi Alma Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por todo lo que me proporcionó en el transcurso de mi carrera.

Al Dr. Jorge Méndez González, por todo el apoyo que me brindó para la realización de esta tesis, por sus consejos, conocimientos y paciencia, es un ejemplo de admiración para mí.

A la Dra. Gabriela Ramírez Fuentes, por el apoyo, conocimientos y tiempo que me ha otorgado.

Al M.C. Aniceto Díaz Balderas, muchas gracias maestro por todos los conocimientos compartidos y sus enseñanzas.

Agradezco a mis padres:

Sra. Guillermina Andrés Bautista, mami gracias por darme la vida, por ser siempre mi mayor ejemplo y admiración, por nunca dejarme tirar mis sueños y por levantarme en mis caídas, a ti mamita más que a nadie agradezco todos mis logros.

Sr. Donaldo Iturbide Andrés, gracias papá por todo el apoyo que me has dado; por la educación que me inculcaste desde pequeña y por todo el amor que nos has brindado a Biany y a mí.

A mi hija

Biany Daniela Montejo Iturbide, gracias mi pequeña niña por estar conmigo toda la carrera, por aguantar mi humor y seguir amándome, TE AMO más que a nadie en este mundo mi nena hermosa.

A mis hermanos:

Lash Adriana Iturbide Andrés, Donald Iturbide Andrés y Lorenzo Iturbide Andrés.

Muchísimas gracias hermanitos por brindarme su apoyo incondicional, gracias por sus consejos y por todo el amor que nos han brindado a la nena y a mí; de todo corazón agradezco cada cosa que han hecho por nosotras.

A mis amigos (as):

Patricia Fernández Guzmán, Lili Yaneth Ramón Mendoza, Viridiana Ramón Mendoza, Sergio Cruz García, Evelio Camilo Castro, Juan Esteban Torres Vivar, Rodrigo Montoya Vázquez, José Luis Pérez Díaz, muchas gracias por esta amistad tan sincera que me han dado, es un privilegio para mí tenerlos como amigos. Así mismo agradezco a Alejandro García Martínez, Juan Carlos, Cecilia, Esteban, Rodrigo y José Luis (Paco) por ayudarme en la realización de esta tesis.

A José Luis de la Cruz García

Muchísimas gracias J.L de la Veracruz por estar a mi lado en las buenas y en las malas; por tu comprensión y paciencia, dándome ánimos de fuerza y valor para seguir adelante.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a la maravillosa familia que Dios me otorgó, a mis padres (Guillermina Y Donald) de los cuales he recibido toda la paciencia, amor y apoyo. A mis hermanos (Adriana, Donald y Lorenzo) por todo el amor que me han dado y por sobre todas las cosas por ser unos amigos para mí, a mi pequeña hija por ser el amor de mi vida. A mis abuelos: Sra. Rosalina y Sr. Erasmo por ser el mayor ejemplo que Dios me pudo haber dado, y a la Sra. Trinidad (Q.E.P.D) y Sr. Lorenzo (Q.E.P.D), porque sin ellos esta familia hoy no estaría, a mi pequeña Lulu (Liovigilda Andrés Hernández) por haberme permitido tenerla en mi vida y amarme de la misma forma en que yo la amo. Pero sobre todo a Dios y a mi Virgencita de Juquila porque a pesar de mis errores han permitido que yo cumpla un objetivo más en mi vida.

El presente estudio se realizó con el apoyo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, dentro del proyecto 3613-2260 Métodos directos e indirectos para estimar biomasa de ramas y árboles completos en una plantación de *P. cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
RESUMEN	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
El calentamiento global y el efecto invernadero.....	4
Pago por servicios ambientales.....	5
Los bosques y el cambio climático	6
Importancia de la biomasa y el carbono presente en la vegetación	7
Estudios afines	8
Generalidades de la especie <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
Área de estudio	12
Método directo para obtener biomasa de árboles de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	12
Determinación de biomasa seca de árboles de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	13
Análisis dimensional entre procedencias	14
Modelo alométrico para cuantificar biomasa de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	14
Obtención de carbono y carbono equivalente.....	15
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17

Características dasométricas de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	18
Contribución porcentual de biomasa en componentes de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	20
Análisis dimensional de los árboles muestra	22
Ajustes del modelo para estimar biomasa de árboles de <i>Pinus cembroides</i> Zucc	23
Tendencias lineales del porcentaje de biomasa	26
Acumulación de biomasa, carbono y carbono equivalente en <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	27
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
6. BIBLIOGRAFÍA	32

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estadísticos básicos de las características dasométricas de árboles utilizados para construir modelos alométricos para cuantificar biomasa de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.....	19
Cuadro 2. Estadísticos básicos de las características dendrométricas de árboles de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.....	22
Cuadro 3. Parámetros y estadísticos del modelo alométrico para estimar biomasa por componente en tres procedencias de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.	25
Cuadro 4. Tendencia del porcentaje de biomasa entre componentes de árboles de tres procedencias de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., de una plantación establecida en Arteaga, Coahuila, México.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contribución porcentual de biomasa por componentes de árboles de tres procedencias en una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc. en Arteaga, Coahuila, México....	21
Figura 2. Estimación de biomasa, contenido de carbono y CO ₂ en hojas (A), ramas (B), en componentes de árboles de tres procedencias en una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila México.....	28
Figura 3. Estimación de biomasa, contenido de carbono y CO ₂ en fuste (C) y total (D), en componentes de árboles de tres procedencias en una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila México.....	30

RESUMEN

Una alternativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es mediante el almacenamiento de CO₂ en la vegetación. El siguiente estudio tuvo como objetivo la generación de ecuaciones alométricas para cuantificar la acumulación de biomasa en componentes de árboles de tres procedencias de *Pinus cembroides* Zucc. plantadas en Coahuila, México. Dichos árboles fueron obtenidos de una plantación establecida en el año de 1992, donde se seleccionaron 16 por procedencia: Mazapil, Zacatecas (Mz), Concepción del Oro, Zacatecas (Co) y Santa Victoria, Coahuila (Sv). Para la obtención de biomasa se utilizó el método directo. La biomasa de cada componente fue calculada con el modelo alométrico de la forma lineal: $\log y = \log a + b \log x$; donde (y) es biomasa seca de cada componente; (x) el diámetro de la base, además se obtuvo un factor de corrección (FC) de los datos transformados para corregir el sesgo. Dicha plantación cuenta con una edad de 21 años. Los resultados indican que la acumulación porcentual de biomasa promedio es: 21.38, 35.81 y 42.80 % en hojas, ramas y fuste. El mejor ajuste se obtuvo con datos totales ($R^2 = 0.80$) y el más bajo con biomasa de ramas ($R^2 = 0.57$).

Palabras clave: Ecuaciones alométricas, biomasa, plantación, procedencia, *P. cembroides* Zucc.

1. INTRODUCCIÓN

En el pasado, los bosques de coníferas nativas tenían una amplia diversidad de bienes. El crecimiento demográfico y la creciente demanda de alimentos llevaron a la deforestación de grandes áreas forestales (Návar *et al.*, 2013).

La preocupación sobre las consecuencias del cambio climático global, generado por un eventual aumento de la temperatura del planeta y su relación con el incremento en los niveles de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, en particular de CO₂, ha motivado múltiples estudios en las últimas décadas (Yerena *et al.*, 2011).

El sector forestal en nuestro país, y a nivel internacional, es la segunda fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono), debido a procesos como deforestación, tala ilegal, cambio en el uso de suelo e incendios forestales (Ordóñez *et al.*, 2008).

Una alternativa biótica para reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera es absorber parte de este gas por la vegetación, mediante el proceso de fotosíntesis; ya que además las plantas funcionan como almacén de Carbono (C) en forma de biomasa vegetal y que después se convierte parcialmente en materia orgánica. Para conocer la biomasa de las especies arbóreas es necesario estimar la cantidad de carbono que captura un bosque, proceso que representa actualmente un servicio ambiental y por tanto, constituye una alternativa para el manejo de recursos naturales encaminada al desarrollo sustentable, y también para la obtención de algún bien para los propietarios de tales recursos (Avendaño *et al.*, 2009).

El análisis dimensional o alometría es el estudio del cambio de proporción de varias partes de un organismo como resultado de su crecimiento, en que árboles requieren contar con

funciones matemáticas que estimen la biomasa total con base a las dimensiones de los órganos del árbol (Huxley, 1932).

Los modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono (VBC) ayudan a estimar el almacenamiento de carbono en sistemas forestales y agroforestales (Segura *et al.*, 2008).

La fijación de carbono por bacterias y animales, es otra manera de disminuir la cantidad de bióxido (o dióxido) de carbono disponible, aunque cuantitativamente menos importante que la fijación de carbono que realizan las plantas y el intercambio gaseoso de los océanos (Ordóñez *et al.*, 2008).

Generar ecuaciones de biomasa es importante ya que permiten evaluar la estructura y condición de un bosque, cuantificar su productividad, determinar la cantidad de carbono fijado, la tasa de fijación de CO₂, y con ello valorar el impacto en la mitigación de gases efecto invernadero (Méndez *et al.*, 2011).

La biomasa es un parámetro que caracteriza la capacidad de los ecosistemas para acumular materia orgánica a lo largo del tiempo (Brown, 1997; Eamus *et al.*, 2000) y está compuesta por el peso de la materia orgánica aérea y subterránea que existe en un ecosistema forestal (Schlegel *et al.*, 2000).

Existen dos métodos comúnmente usados para estimar la biomasa: el método directo y el indirecto, dentro del primero está el destructivo, que consiste en cortar el árbol y determinar la biomasa pesando directamente cada componente (Araujo *et al.*, 1999).

En general, los modelos desarrollados en bosque natural y en plantaciones permiten estimar la biomasa aérea total, mientras los modelos para estimar la biomasa de la raíz son muy escasos por su dificultad y costo (Schlegel *et al.*, 2001).

El objetivo del siguiente estudio fue generar ecuaciones alométricas para cuantificar la biomasa aérea existente de hojas, ramas, fuste y total en tres procedencias: Mazapil, Concepción del Oro y Santa Victoria; en una plantación establecida en Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

La hipótesis establecida indica que la acumulación de biomasa, es similar entre procedencias, en función del diámetro a la base.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

El calentamiento global y el efecto invernadero

En los últimos 800 000 años, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso han aumentado a niveles sin precedentes. Las concentraciones de dióxido de carbono han aumentado en un 40 % desde la era preindustrial debido, en primer lugar, a las emisiones derivadas de los combustibles fósiles y, en segundo lugar, a las emisiones netas derivadas del cambio de uso del suelo (IPCC, 2013).

Las actividades humanas, tales como el uso de combustibles fósiles para la producción de energía y los procesos derivados del cambio de uso de suelo, están generando grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), clorofluorocarbonados (CFC's), óxidos de nitrógeno (NO_x) y metano (CH_4), principalmente, siendo el CO_2 uno de los GEI más importantes por las grandes cantidades en las que se emite (Ordóñez, 2001).

Las sustancias y los procesos naturales y antropógenos que alteran el balance energético de la tierra son impulsores del cambio climático. El forzamiento radiactivo permite cuantificar las modificaciones en los flujos de energía provocados por los cambios producidos en estos impulsores en 2011, en relación con 1750, a menos que se indique otra cosa. Cuando el forzamiento radiactivo es positivo, se produce un calentamiento en superficie, y cuando es negativo, un enfriamiento. El forzamiento radiactivo se calcula a partir de observaciones obtenidas *in situ* y por teledetección de las propiedades de los gases de efecto invernadero y los aerosoles y de estimaciones que utilizan modelos numéricos para representar los procesos observados. Algunos de los compuestos emitidos afectan a la concentración atmosférica de

otras sustancias. El forzamiento radiactivo puede señalarse mediante cambios en la concentración de cada sustancia, o también puede señalarse por la emisión de un componente, lo que ofrece una relación más directa con la actividad humana. Este incluye las contribuciones de todas las sustancias afectadas por esa emisión (IPCC, 2013).

A nivel mundial existe la preocupación por el calentamiento de la atmósfera como consecuencia del aumento de la concentración de los gases de tipo invernadero de origen antropogénico. El principal de estos gases, es el CO₂; los bosques, los sistemas agroforestales y las áreas de cultivo en laderas, juegan un papel preponderante en el ciclo global del carbono, porque en ellos intervienen de los procesos biogeoquímicos que regulan el intercambio de carbono que existe entre la atmósfera y biomasa aérea (Acosta *et al.*, 2001).

Pago por servicios ambientales

Existe un mercado incipiente en el pago por los servicios ambientales y el precio por fijación de carbono es variable y dependerá de las oportunidades del mercado que rige la oferta y la demanda o de las estrategias gubernamentales que se han desarrollado para este fin. El precio anteriormente se pagaba por tonelada de carbono fijado por hectárea, y existían cuotas mínimas de fijación para el mercado establecido por el mecanismo de desarrollo limpio, así como un mercado voluntario de los posibles proyectos de carbono y donde muchas empresas emisoras y comunidades poseedoras de áreas con vegetación que pueden ofrecer el servicio ambiental necesitan de un esquema regulatorio, con monitoreo, evaluación, certificación de la captura o fijación de carbono (Ordóñez *et al.*, 2008).

Los bosques y el cambio climático

La silvicultura es hoy considerada como una ciencia mediante la cual se crean y conservan no sólo los bosques, sino cualquier masa forestal, aprovechándola de un modo continuo con la mayor utilidad posible y teniendo especial cuidado en su regeneración, ya sea de tipo natural o artificial; el manejo forestal implica la manipulación de las masas forestales con el propósito de obtener una serie de productos tales como madera, tablas, pilotes, morillos, leña, resina, celulosa, mejores semillas, entre otros, los cuales se utilizan directamente o se transforman y permiten un beneficio mediano (los productos que se obtienen son a largo plazo, ya que el aprovechamiento de los árboles va desde los cinco a los sesenta años, por ello es necesario tomar en cuenta el ciclo de vida de la especie o especies que se pretenda manejar); aunado a esto, las masas forestales también ofrecen otros beneficios, como protección del suelo, regulación micro climática, cortina de vientos, mitigación de la movilidad en sustratos arenosos, hacen la función de pulmón en áreas urbanas, permiten la conservación de la biodiversidad y la captación y almacenamiento de agua, además de la fijación o captación de carbono (Ordóñez *et al.*, 2008).

Existe una gran riqueza de especies forestales en los distintos tipos de vegetación, las cuales contribuyen a la producción de oxígeno y captura de carbono (Yerena *et al.*, 2012).

El uso de los ecosistemas forestales como sumideros y reservorios de carbono es cada día más aceptado. Aun así, la información fidedigna sobre su crecimiento en biomasa y la capacidad de captura y de almacenamiento de CO₂ es insuficiente para proponer formas de compensación a los propietarios de bosques (Fonseca *et al.*, 2009).

El dióxido de carbono presente en la atmósfera es absorbido por las plantas, a través del proceso de fotosíntesis. Por este medio, las plantas convierten la energía de la luz solar en

energía química aprovechable para los organismos vivos. Así, los bosques almacenan grandes cantidades de carbono (C) en la vegetación y el suelo, e intercambian C con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración. En general, se acepta que el contenido de C corresponde al 50 % de la biomasa. Sin embargo, diferentes estudios denotan la variabilidad del contenido de C según especie y tejido del árbol (Gayoso *et al.*, 2005).

Dentro de este panorama, una de las tareas prioritarias es llevar a cabo estudios de emisión-captura de carbono a nivel regional en ecosistemas forestales que presenten procesos muy dinámicos de cambio de uso de suelo (Ordóñez, 2001).

Un reto ambiental actual es reducir los gases de efecto invernadero (GEI) a través de la reforestación. Las plantaciones forestales con las especies y manejo adecuados secuestran carbono y recuperan áreas degradadas simultáneamente, pero es necesario refinar los métodos para estimar su biomasa (Douterlungne *et al.*, 2013).

Importancia de la biomasa y el carbono presente en la vegetación

La biomasa es importante para cuantificar la cantidad de nutrientes en diferentes partes de las plantas y estratos de la vegetación, permite comparar distintos tipos de especies o vegetación o comparar especies y tipo de vegetación similares en diferentes sitios. Para estimar la biomasa se usan diferentes tipos de modelos de regresión y combinación de variables. En general, y así se demuestra en muchas investigaciones, el diámetro es la variable que mejor se correlaciona y predice la biomasa. Además, el diámetro es una variable fácil de medir y que se registra en la mayoría de los inventarios forestales (Fonseca *et al.*, 2009).

Carbono en la vegetación. El carbono en vegetación es la suma del carbono contenido en la biomasa aérea y el carbono contenido en la biomasa de las raíces. La biomasa aérea

comprende el tronco, hojas, ramas y follaje; mientras que el carbono contenido en raíces es definido como la biomasa de raíces (Ordóñez, 2001).

El conocimiento del contenido de carbono en la biomasa es de utilidad para la determinación del balance nacional de Gases de Efecto Invernadero, la construcción de los indicadores nacionales respectivos del Proceso de Montreal y el levantamiento de líneas de base para futuros proyectos negociables en el mercado del carbono (Gayoso *et al.*, 2005).

Estudios afines

Fonseca *et al.* (2009) en el estudio realizado en un bosque secundario en la zona Caribe de Costa Rica para construir modelos para estimar la biomasa del árbol en plantaciones de *Hieronyma alchorneoides*, *Vochysia guatemalensis* y para un grupo de 35 especies. En cada plantación se extrajo un árbol de diámetro promedio a la altura del pecho (d) y en bosque secundario un árbol de d promedio de la especie de mayor índice de valor de importancia por clase diamétrica, utilizando un muestreo destructivo, se separó cada componente del árbol y se tomó una muestra de campo para determinar la materia seca.

Todos los modelos seleccionados tuvieron un R^2_{aj} superior al 82.6 %. Las especies arbóreas de bosque secundario mostraron R^2_{aj} inferiores. El fuste, raíz y biomasa total del árbol mostraron $R^2_{aj} > 91.3$ %, y las hojas y ramas, entre 82.6 y 94.1 %. El factor de expansión de biomasa en bosque secundario fue de 1.44 y en plantaciones de 1.56. Se estimó que la relación de biomasa radical respecto a biomasa aérea total y biomasa del fuste fue 0.25 y 0.37, respectivamente, en bosques secundarios; 0.26 y 0.39 en *V. guatemalensis*, y 0.3 y 0.52 en *H. alchorneoides*.

Méndez et al. (2011) en el estudio realizado en Jerécuaro, Guanajuato, México, donde el objetivo fue ajustar ecuaciones alométricas para cuantificar la acumulación de biomasa (B), carbono (C) y carbono equivalente (CO₂e) en una plantación mixta de 12 años de edad de *Pinus devoniana* Lindl. y *Pinus pseudostrobus* Lindl., la biomasa de cada árbol, hojas más ramas (*Bhr*), fuste (*Bf*) y total (*Bt*), fue calculada usando la relación entre el peso seco y peso fresco, en 20 árboles de cada especie. Mediante análisis troncales y el modelo de Schumacher, obteniendo la tasa de incremento anual de B, C y CO₂e. Los resultados indican que las ecuaciones alométricas cuantifican eficientemente los componentes de biomasa, especialmente de *Bf* ($R^2 > 0.85$) en *P. pseudostrobus*, esta especie mostró los mayores incrementos en biomasa aérea. El 60.2 y 58.4 % de la biomasa aérea total fue registrada en el fuste; 39.8 y 41.6 % en las hojas y ramas de *P. devoniana* y *P. pseudostrobus*. Los valores calculados fueron 39.36 t B ha⁻¹, 19.68 t C ha⁻¹ y 72.02 t CO₂e ha⁻¹, después de 12 años de establecida la plantación. Según el modelo de Schumacher, la máxima productividad de biomasa aérea (*Bf* y *Bhr*) se alcanza a los 20 años de edad, lo que representa 3.96, 1.98 y 7.27 t ha⁻¹ año⁻¹ de B, C y CO₂e.

Rojó et al. (2005) la investigación se realizó en la región huletera del Papaloapan, Estado de Oaxaca, México. El objetivo fue obtener ecuaciones para estimar la biomasa total aérea del clon IAN-710 de *Hevea brasiliensis* Müll. Arg., con base en el diámetro normal (DN). Se utilizó una muestra de 28 árboles de esta especie con DN 10 a 40 cm. El peso seco de los árboles varió de 89.74 kg a 807.06 kg. El peso seco del follaje representó 5.4 % del peso seco total en árboles pequeños (DN 10 cm), pero sólo 1.7 % en árboles de mayor tamaño (DN 40 cm). La proporción de biomasa contenida en el tallo se correlacionó positivamente con el tamaño del árbol y, por tanto, se incrementó en los árboles grandes. Los valores oscilaron de

87.3 % en árboles de 10 cm DN a 88.9 % en árboles de 40 cm. La ecuación logarítmica ($\log P = \beta_0 + \beta_1 \log d$) tuvo un mejor ajuste ($R^2 = 0.98$) y una dispersión normal de los residuales. Con la biomasa estimada se puede calcular el carbono acumulado en los árboles en cada uno de sus componentes a diferentes edades.

Gayoso et al. (2005) determinó el contenido de carbono (C) en fuste, ramas, hojas y corteza para 16 especies del bosque nativo en Chile. Los contenidos promedio de C orgánico en las especies fluctuaron entre 34.9 y 48.3 %, y el promedio simple alcanzó a 43.7 ± 0.16 %. Mientras, el C total mostró ser en promedio 5.5 ± 0.76 % mayor que el contenido de C orgánico. Se encontraron diferencias significativas en el contenido de C orgánico entre grupos de especies y entre componentes del árbol. El carbono del fuste (44.4 ± 0.16 %), en general, para todas las especies resultó ligeramente mayor que en las ramas, hojas y corteza (43.5 ± 0.21 %), siendo mayor la variabilidad en estos últimos.

La especie con el mayor contenido de C orgánico en la biomasa del fuste resultó *Saxegothaea conspicua* (mañío hembra) con 47.8 ± 0.38 %. Por su parte, *Weinmannia trichosperma* (tineo) mostró el menor porcentaje, 42.6 ± 0.54 %.

Generalidades de la especie *Pinus cembroides* Zucc.

En México existen entre ocho y 15 especies de pinos piñoneros, las cuales están distribuidas en los estados del norte y centro del país (Eguiluz, 1987; Perry, 1991 y Farjon *et al.*, 1997).

El área de distribución de *Pinus cembroides* abarca desde el oeste de Estados Unidos de América hasta México, donde está presente en Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo (Perry, 1991).

Malusa (1992); Romero et al. (1996) señalan para el área de *Pinus cembroides*, una temperatura media anual de 12 a 18 °C, donde el mes más caliente es junio y el mes más frío es diciembre o enero, con precipitaciones anuales entre 300 y 700 mm; *Pinus cembroides* tolera un clima más seco y más cálido en la sierra madre oriental que en la sierra madre occidental.

Las comunidades de piñoneros, a pesar de su limitada capacidad productiva, aportan varios tipos de materiales y servicios ambientales que tienen impacto decisivo en la supervivencia de los poblados rurales. De ellas se obtienen semillas comestibles o piñones, leña, postes, madera para construcción de vivienda y muebles rústicos, árboles de navidad, resina, además de servir de abrigo a la fauna silvestre y en algunos casos como áreas de recreo (Villareal *et al.*, 2009).

El bosque de *Pinus cembroides* desempeña una función importante en el ecosistema y en el ciclo hidrológico, al evitar la erosión, favorecer la infiltración del agua y restablecer los mantos acuíferos subterráneos. Al mismo tiempo es hábitat natural de la fauna silvestre, dado que 90 % del volumen de su semilla producida, constituye el alimento básico de muchas aves y mamíferos (Constante *et al.*, 2009).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área experimental se localiza a 25° 23' latitud norte y 100° 36' longitud oeste, 2280 msnm, a 45 km de Saltillo, Coahuila; su clima es templado con verano fresco y largo, con temperatura media anual de 13.6 °C y una precipitación media anual de 521.2 mm. Su fórmula climática es Cb(X')(Wo)(e)g (García, 1987; Cornejo *et al.*, 2009).

El presente trabajo se realizó en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., (0.17 ha), la cual se encuentra constituida por tres procedencias: Mazapil, Zacatecas (MZ), Concepción del Oro, Zacatecas (CO) y Santa Victoria, Coahuila (SV). El ensayo de procedencias se estableció en 1992 con semilla a granel, la distribución de las plantas se realizó en “tresbolillo” con un distanciamiento de 1.8 m con un total de 3988 árboles/ha.

Método directo para obtener biomasa de árboles de *Pinus cembroides* Zucc.

Para realizar este estudio se utilizó el método directo según la metodología propuesta por Schlegel *et al.* (2000). se seleccionaron 48 árboles (16 por procedencia) y se midieron algunas de las características dimensionales (diámetro de la base, diámetro de copa, altura total y altura del fuste limpio); se continuó derribando y desramando los árboles con la motosierra marca Truper con espada de 20”, las hojas fueron separadas con tijeras podadoras marca Truper; se separaron los componentes (hojas, ramas y fuste), se tomó una muestra de cada componente y se almacenó en bolsas de papel para pesarlas con báscula marca Torrey modelo L-EQ con capacidad del 4 kg, y posteriormente se trasladaron al laboratorio para su secado y pesado diario hasta obtener un peso constante.

Determinación de biomasa seca de árboles de *Pinus cembroides* Zucc.

Las muestras (hojas, ramas y fuste) se secaron en estufa-horno marca Blue M a una temperatura constante de 70 °C por 15 días aproximadamente hasta obtener un peso constante; una vez con los datos de peso en seco se prosiguió a la cuantificación de biomasa de los componentes (hojas, ramas, fuste y total); este último como producto de la sumas de los tres componentes anteriores, a través de los datos del peso seco y el peso verde se determinó el contenido de humedad existente en dichos componentes y posteriormente se obtuvo la biomasa total por componente (Schlegel *et al.*, 2000).

$$CH = Pvm - \frac{Psm}{Psm} * 100$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%).

Pvm = Peso verde de la muestra (kg).

Psm = Peso seco de la muestra (kg).

Para la determinación de biomasa de cada componente se utilizó una relación entre el peso seco, el fresco (Schlegel *et al.*, 2000) y el contenido de humedad de las muestras.

$$B = \frac{Pvtc}{1 + (ch/100)}$$

Donde:

B = Biomasa seca total del componente (kg).

$Pvtc$ = Peso verde total del componente (kg).

ch = Contenido de humedad de la muestra (%).

Para la determinación de la biomasa aérea total se cuantificaron los tres componentes (hojas, ramas y fuste).

Análisis dimensional entre procedencias

Para efectuar el análisis dimensional de variables dendrométricas, se realizó un análisis de varianza a un nivel de confianza del 95 % y pruebas de medias de Duncan, para obtener: a) diferencias dimensionales en diámetro (cm) y altura (m) de los árboles muestreados, el análisis estadístico anterior se realizó para establecer posibles diferencias en los valores de los parámetros: intercepto (a) y pendiente (b) del modelo alométrico, entre procedencias. Todos los análisis estadísticos fueron realizados en SAS versión 9.1.

Modelo alométrico para cuantificar biomasa de *Pinus cembroides* Zucc.

La biomasa de los diferentes componentes (hojas, ramas y fuste), se estimó con el modelo alométrico exponencial, el cual en su forma no lineal se expresa como:

$$Y = a * x^b \tag{1}$$

Y en su forma lineal se expresa como:

$$(\log y = \log a + b * \log x) \tag{2}$$

Donde

y = Biomasa seca del componente (kg).

a y b = Parámetros del modelo.

x = Diámetro de la base del árbol (cm).

\log = Logaritmo natural.

Con la ayuda del programa Statistical Analysis System (SAS, versión 9.1) se realizó el ajuste del modelo. Con la finalidad de corregir el sesgo en los datos de cada componente, se les aplicó el factor de corrección para modelos con logaritmos (Sprugel, 1983), el cual se calculó con la fórmula:

$$FC = Exp \frac{SEE^2}{2}$$

Donde:

FC = factor de corrección.

Exp = exponencial.

SEE² = error estándar de la estimación, en unidades logarítmicas, el cual se obtiene con:

$$SEE = \frac{\overline{(\log y_{obs} - \log y_{est})^2}}{(n - 2)}$$

Donde:

y *obs*= biomasa observada (kg).

y *est*= biomasa estimada (kg).

n = número de observaciones.

Obtención de carbono y carbono equivalente

Obtenida la biomasa por componente (hojas, ramas, fuste y total) se calculó el carbono contenido en los componentes de árboles de *P. cembroides* Zucc., a través del producto de la biomasa del componente por la fracción de carbono (50.25 %) contenido en la biomasa de esta especie (Yerena *et al.*, 2012). El carbono equivalente (CO₂ 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 CO₂ (44) y el peso del átomo de carbono (12) (Pacheco *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2011).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la finalidad de obtener la biomasa aérea de la plantación establecida en el año de 1992, donde se desarrollan tres procedencias de *P. cembroides* Zucc., se seleccionaron 16 árboles por procedencia ya que según la literatura, no existe un número de árboles para construir modelos alométricos, la muestra de árboles utilizada en el presente estudio es inferior a la muestra utilizada por Avedaño et al. (2009) en el estudio realizado en el estado de Tlaxcala, México utilizando 26 arboles de *Abies religiosa* para estimar biomasa y carbono; Méndez et al. (2011) en el predio El Clarín, municipio de Jerécuaro, estado de Guanajuato, México; evaluaron modelos alométricos para cuantificar la biomasa aérea, carbono y carbono equivalente en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *Pinus pseudostrobus* Lindl., utilizando 40 árboles.

Yerena et al. (2012) en el estudio denominado concentración de carbono en la biomasa aérea del matorral espinoso tamaulipeco utilizaron 45 árboles de 15 especies diferentes; Fonseca et al. (2009) informan en el estudio que se desarrolló en la zona Caribe de Costa Rica, se seleccionaron nueve sitios con plantaciones forestales de *Hieronyma alchorneoides* Fr. Allem. y de *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm. y siete con bosque secundario para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona de Caribe de Costa Rica; Rojo et al. (2005) mencionan que la muestra consistió de 28 árboles del clon IAN-710 de *H. brasiliensis* con la finalidad de evaluar la biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule; Gayoso et al. (2005) analizaron 409 árboles de 16 procedencias para conocer el contenido de carbono en la biomasa aérea en bosques nativos de Chile.

Gómez et al. (2011) en el estudio denominado ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, en el estado de Morelos reportan que se utilizaron 12 árboles representativos, una muestra inferior a la utilizada en este estudio.

Características dasométricas de *Pinus cembroides* Zucc.

Los árboles analizados en el presente estudio tienen una altura total de 2.62 ± 0.5 ; Méndez et al. (2011) reportan que a los 12 años de edad *P. devoniana* tienen una altura de 5.6 a 10.0 m, mientras que en *P. pseudostrobus* 7.4 a 12.6 m en altura; Gómez et al. (2011) comentan que para la vegetación dominante de *Quercus magnoliaefolia* Née, en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla en los terrenos correspondiente al ejido El Zapote, la altura varió de 5.0 a 16.4 m, dichas alturas son mayores a las reportadas en este trabajo.

Las procedencias utilizadas en este estudio presentaron las siguientes características dasométricas: Mazapil (MZ) tuvo un diámetro promedio a la base de 6.63 ± 1.66 cm, Concepción del Oro (CO) 6.31 ± 1.12 cm y Santa Victoria (SV) 6.67 ± 1.36 cm. Los promedios para diámetros de copa fueron MZ = 1.69 ± 0.92 m, CO = 1.21 ± 0.24 m y SV = 1.34 ± 0.37 m; mientras que para la altura total se obtuvieron promedios de 2.77 ± 0.53 m para MZ, 2.61 ± 0.48 m para CO y 2.49 ± 0.42 m para SV; los promedios de altura de fuste limpio fueron de 2.64 ± 0.60 para Mazapil, y $2.25 \pm .5$, 2.15 ± 0.34 para Concepcion del Oro y Santa Victoria respectivamente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estadísticos básicos de las características dasométricas de árboles utilizados para construir modelos alométricos para cuantificar biomasa de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.

Proc.	Estadísticos	Db	Dc	Ht	Hfl	Bh	Br	Bf
MZ	Media	6.63	1.69	2.77	2.64	1.15	1.68	2.17
	Desviación estándar	1.66	0.92	0.53	0.60	0.70	1.12	1.69
	Varianza de la muestra	2.74	0.85	0.28	0.35	0.49	1.25	2.84
	Mínimo	3.80	0.80	1.93	1.87	0.14	0.35	0.53
	Máximo	9.30	3.86	4.05	4.20	2.34	4.54	7.03
	CV	24.97	54.60	19.08	22.55	60.99	66.58	77.57
CO	Media	6.31	1.21	2.61	2.25	0.84	1.54	1.64
	Desviación estándar	1.12	0.24	0.48	0.53	0.44	0.63	0.83
	Varianza de la muestra	1.24	0.06	0.23	0.28	0.19	0.40	0.69
	Mínimo	4.50	0.83	1.73	1.16	0.19	0.64	0.15
	Máximo	8.50	1.62	3.30	3.04	1.71	2.59	3.48
	C.V	17.69	19.77	18.31	23.53	52.36	40.98	50.45
SV	Media	6.67	1.34	2.49	2.15	0.96	1.67	2.23
	Desviación estándar	1.36	0.37	0.42	0.34	0.52	1.31	1.66
	Varianza de la muestra	1.85	0.14	0.18	0.12	0.28	1.73	2.75
	Mínimo	4.60	0.93	1.63	1.53	0.27	0.30	0.53
	Máximo	9.00	2.44	3.08	2.71	2.39	5.66	7.03
	C.V	20.41	27.61	16.90	15.90	54.84	78.63	74.34

Donde: Proc. = Procedencia; Db = diámetro de la base (cm); Dc = diámetro de copa (m); Ht = altura total (m); Hfl = altura del fuste limpio (m); Bh = biomasa de hojas (kg); Br = biomasa de ramas (kg); Bf = biomasa de fuste (kg); MZ = mazapil; CO = concepción del oro; SV = santa victoria.

Contribución porcentual de biomasa en componentes de *Pinus cembroides* Zucc.

La contribución porcentual de biomasa en hojas, ramas, fuste de las tres procedencias presentan los siguientes porcentajes promedios: 23.19, 33.62 y 43.19 % en hojas, ramas y fuste respectivamente en MZ; 20.48, 40.21 y 39.31 % en CO y 20.49, 33.61; y 45.89 % en SV. Para conocer si existen diferencias entre procedencias en cuanto a por ciento de biomasa se construyeron intervalos de confianza ($\alpha = 0.05$) los cuales muestran que hay una igualdad estadística en cuanto a la contribución porcentual de biomasa entre componentes por procedencia (Figura 1).

Fonseca et al. (2005) hacen mención que el peso seco de los árboles de *Hieronyma alchorneoides* Fr. Allem. y de *Vochysia guatemalensis* Donn, varió de 89.7 kg en árboles de 10 cm diámetro normal a 807 kg en árboles de 40 cm diámetro normal, el peso seco del follaje representó 5.4 % del peso seco total en árboles de 10 cm diámetro normal, pero sólo 1.7 % en los árboles con 40 cm diámetro normal. Proporcionalmente, la biomasa del follaje fue mayor en los árboles con diámetros menores y disminuyó progresivamente al aumentar el diámetro y tamaño del árbol; Pacheco et al. (2007) señalan que el estudio realizado en la plantación de *Pinus greggi*, con una edad de 7 años presenta un promedio de biomasa aérea por árbol de 8.0 kg distribuidos como sigue: 4.1 kg en fuste, 2.0 kg en follaje y 1.9 kg en ramas. El estimado de biomasa aérea total en el área de la plantación fue de 1.4 t, lo que equivale a 35.2 t ha⁻¹.

Avendaño et al. (2009) encontraron que en un bosque de *Abies religiosa*, la distribución relativa de la biomasa entre los componentes de los árboles, fueron de 64.6 a 88.3 %, con un promedio de 81.3 % para el fuste; en el tocón el porcentaje varió de 1.7 a 7.9 %, con un promedio de 3.3 %; en las ramas la variación fue 0 a 11.3 %, con un promedio de 6.9 %; la variación del follaje fue de 3.5 a 20.2 % con un promedio de 8.6 %; Por otro lado Méndez et al. (2011) reportan que los valores promedio de biomasa hojas, ramas y fuste fueron 39.8 y 60.1 % en *P. devoniana* y 41.6 y 58.3 % en *P. pseudostrobus*, diferentes a los encontrados en este estudio; Gómez et al. (2011) mencionan que el porcentaje promedio de carbono en los árboles de *Q. magnoliaefolia* fue de 47.14 con valores de 46.29 % para el fuste, 46.83 % para las ramas y 48.31 % para el follaje.

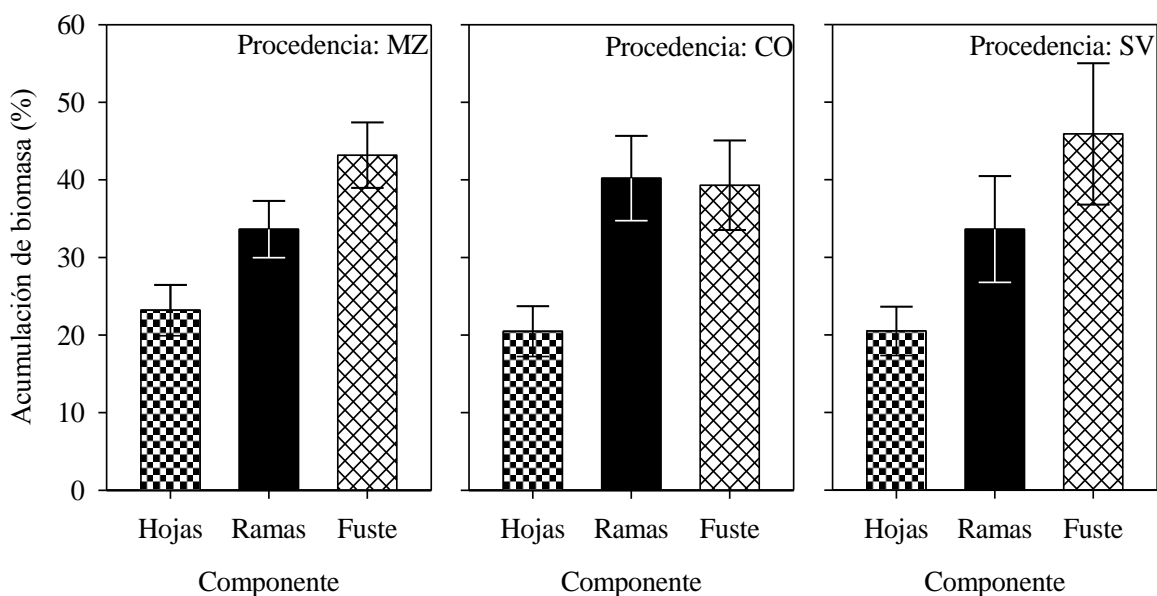


Figura 1. Contribución porcentual de biomasa por componentes de árboles de tres procedencias en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc. en Arteaga, Coahuila, México.

Análisis dimensional de los árboles muestra

Las características dimensionales de diámetro de la base, altura y área de copa y de acuerdo al análisis de varianza con un nivel de significancia de ($\alpha = 0.05$), muestran que las variables estadísticamente son iguales entre procedencias (Valor de F = 0.3316 y P = 0.7230; Valor de F = 1.3626 y P = 0.2675, Valor de F = 2.9912 y P = 0.0602) esto significa que los árboles muestreados tienen las mismas dimensiones y las posibles diferencias en la acumulación de biomasa es dependiente de la procedencia (Cuadro 2).

Westman y Whittaker (1975) en los estudios realizados sobre la biomasa y la productividad primaria de la región del bosque enano del norte de California, mencionan que el uso de los datos para el análisis dimensional de los sistemas completos de plantas se han utilizado para calcular las características de las dos especies (*Pinus contorta* ssp. *bolanderi* y *Cupressus pygmaea*) de árboles, por lo que los resultados muestran que son similares en muchos aspectos, pero *Cupressus* tiene un porcentaje más alto de biomasa en la madera del tronco y la corteza, el crecimiento de la hoja no puede ser evaluada en *Cupressus*, ya que cualquiera que sea el crecimiento que ocurre en esta especie se convierte en parte del crecimiento de la madera de la rama.

Cuadro 2. Estadísticos básicos de las características dendrométricas de árboles de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.

Proc	Árboles				Estadísticos del ANOVA			
	N	Db	Ht	Ác		Db	Ht	Ác
MZ	16	6.63 ± 1.7	2.77 ± 0.5	2.87 ± 3.4	Pr > F	0.7230¶	0.2675¶	0.0602¶
CO	16	6.31 ± 1.1	2.61 ± 0.5	1.20 ± 0.5	Valor de F	0.3316	1.3626	2.9912

SV	16	6.67 ± 1.4	2.49 ± 0.4	1.50 ± 0.9	CME	1.9466	0.2282	4.2281
Tot	48	6.54 ± 1.4	2.62 ± 0.5	1.86 ± 2.4	GL	47	47	47

Donde: Proc = procedencia; MZ = mazapil; CO = concepción del Oro; SV = santa victoria; Tot = incluye todos los árboles, sin importar la procedencia; N = número de muestras; Db = diámetro de la base (cm); Ht = altura total (m); Ác = área de copa (m²); Pr > F = significancia estadística; CME = cuadrado medio del error; GL = grados de libertad. Símbolo ‘¶’ indica que no existen diferencias estadísticas ($\alpha = 0.05$) entre procedencias en la variable indicada.

Ajustes del modelo para estimar biomasa de árboles de *Pinus cembroides* Zucc

Los estadísticos de regresión en este estudio muestran que para la procedencia MZ, los parámetros del modelo en *a* indican que el máximo valor se tuvo en hojas con un valor de -5.28 y el mínimo valor se obtuvo en el total con un valor de -3.32; por otro lado en la procedencia de CO presentó el máximo valor en fuste -6.18 y el mínimo en ramas -2.25; mientras que para SV las ramas presentaron el mayor valor con -5.77 y el total de -2.37 siendo este el mínimo valor de esta procedencia (Tabla 3). Los valores del parámetro *b* indican que en MZ se presentó 2.79 como máximo en hojas y 2.42 en fuste como mínimo, la procedencia de CO muestra que el fuste obtuvo el máximo valor 3.55 y ramas el mínimo valor 1.43; en SV las ramas obtuvieron 3.22 como máximo y 2.04 como mínimo (Tabla 3).

Gómez et al. (2011) comentan que en *Quercus magnoliaefolia* los valores de los parámetros en el ajuste del modelo en su forma lineal $\ln(Y) = b_0 + b_1 \ln(X)$ fueron los siguientes: la ordenada al origen (b_0) = -3.367; la pendiente (b_1) = 2.9334, con niveles de significancia aceptables para ambos parámetros ($P < 0.001$).

El mejor ajuste del modelo por componentes se obtuvo en la biomasa total de ($R^2 = 0.94$) y el más bajo en ramas ($R^2 = 0.35$) ambos datos de la procedencia de CO; así mismo, las hojas en la procedencia MZ y el fuste en CO no se ajustaron al modelo, debido a que presentan R^2 mayores a 1 (Tabla 3), estos valores son inferiores a los encontrados por Avendaño et al. (2009) al estimar biomasa y carbono por componentes (fuste, ramas y follaje) de *Abies religiosa* obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99, en función del diámetro normal; Méndez et al. (2011) reportan que los mejores ajustes se obtuvieron en *P. pseudostrobus* con R^2 promedio de 0.87 y 0.73 en *P. devoniana* en biomasa de hojas, ramas, fuste y total.

Pacheco et al. (2007) mencionan que en *Pinus greggi* el peso de la biomasa y de carbono en función del diámetro y altura mostró una alta correlación ($R^2 = 0.89$); Gómez et al. (2011) reportan que la ecuación de regresión generada para estimar biomasa y carbono para *Quercus magnoliaefolia* Née predice satisfactoriamente la biomasa a partir del diámetro a la altura de pecho, dado que presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.98 ($P < 0.001$).

El Coeficiente de variación (CV) permite comparar la dispersión que existe en los datos de las muestras, el máximo valor en el CV se presentó en la procedencia de MZ en el componente fuste con 50.02 y el mínimo en el fuste pero de la procedencia con SV 19.37 (Cuadro 3).

El FC muestra el porcentaje de la corrección que es multiplicativo por la biomasa estimada, para este caso el FC mas alto se obtuvo en CO con un valor de 1.24 y el mínimo se registró en MZ con 1.04 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Parámetros y estadísticos del modelo alométrico para estimar biomasa por componente en tres procedencias de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.

Proc	Componente	a	Sxy de a	B	Sxy de b	R^2	Sxy	C.V	F Value	FC
MZ	Hojas	-5.28	0.61	2.79	0.2	1.13	0.41	35.73	74.05	1.18
	Ramas	-4.35	0.56	2.50	0.31	0.74	0.56	33.43	63.83	1.17
	Fuste	-3.95	0.48	2.42	0.25	0.50	1.09	50.02	91.50	1.07
	Total	-3.32	0.33	2.54	0.17	0.90	1.22	24.35	214.06	1.04
CO	Hojas	-5.48	0.95	2.82	0.52	0.82	0.29	34.70	29.61	1.20
	Ramas	-2.25	0.94	1.43	0.51	0.35	0.53	34.31	45.13	1.20
	Fuste	-6.18	1.13	3.55	0.62	1.47	0.54	32.63	33.02	1.24
	Total	-3.03	0.65	2.37	0.35	0.94	0.91	22.64	45.14	1.13
SV	Hojas	-5.02	0.42	2.58	0.22	0.88	0.21	22.29	134.57	1.09
	Ramas	-5.77	0.65	3.22	0.35	0.62	0.68	40.55	86.90	1.15
	Fuste	-3.97	0.39	2.37	0.21	0.90	0.35	19.37	130.88	1.09
	Total	-2.37	0.79	2.04	0.42	0.60	1.54	31.71	23.97	1.18

Donde: Proc. = Procedencia; Comp. = componente de biomasa; a y b = estadísticos de regresión; Sxy de a y b = error de a y b ; R^2 = coeficiente de determinación ajustado; Sxy = error estándar; CV = coeficiente de variación; F value = valor de f; FC = factor de corrección de Sprugel.

Tendencias lineales del porcentaje de biomasa

De acuerdo a la regresión lineal se observa que existe una tendencia a disminuir el porcentaje de biomasa en ramas con respecto al diámetro basal ya que el valor de b (-6.4081) es negativo para la procedencia de CO, a diferencia de SV que muestra un aumento en la biomasa de ramas, debido a que el valor de b (5.6625) es positivo; el fuste presenta una disminución con un valor de b (-6.8850) para esta misma procedencia (Cuadro 4).

Cuadro 4. Tendencia del porcentaje de biomasa entre componentes de árboles de tres procedencias de *Pinus cembroides* Zucc., de una plantación establecida en Arteaga, Coahuila, México.

Proc.	Comp.	A	B	R	F	Valor de P
MZ	Hojas	19.8633	0.5014	0.1240	0.2186	0.6473
	Ramas	34.2190	-0.0898	0.0199	0.0055	0.9417
	Fuste	45.9177	-0.4116	0.0791	0.0881	0.7709
CO	Hojas	12.6702	1.2387	0.2085	0.6361	0.4384
	Ramas	80.6206	-6.4081	0.6411	9.7684	0.0074
	Fuste	6.7092	5.1694	0.4905	4.4350	0.0537
SV	Hojas	12.3406	1.2225	0.2590	1.0070	0.3327
	Ramas	-4.1477	5.6625	0.5520	6.1353	0.0266
	Fuste	91.8070	-6.8850	0.5038	4.7614	0.0466

Donde: Proc. = procedencia; Comp. = componente de biomasa; a y b = estadísticos de regresión; R = coeficiente de correlación; F = valor de f; Valor de P= probabilidad de F.

Acumulación de biomasa, carbono y carbono equivalente en *Pinus cembroides* Zucc.

La predicción de biomasa en hojas muestra que utilizando un diámetro de la base de 8 cm se estima que un árbol captura 1.42 kg árbol⁻¹ de biomasa, 0.71 kg árbol⁻¹ de carbono y 2.59 kg árbol⁻¹ de CO₂ para la procedencia de SV; la procedencia de CO contienen 1.50 kg árbol⁻¹ de biomasa, 0.76 kg árbol⁻¹ de carbono y 2.67 kg árbol⁻¹ de CO₂; mientras que la procedencia de MZ presenta una acumulación de biomasa de 1.71 kg árbol⁻¹, 0.86 kg árbol⁻¹ de carbono y 3.15 kg árbol⁻¹ de CO₂. Siendo esta última procedencia la que presenta mayor contenido de biomasa, carbono y CO₂ (Figura 2A).

Según el modelo alométrico utilizado para estimar biomasa en ramas predice que un árbol de 8 cm de diámetro de la base captura alrededor de 2.55 kg árbol⁻¹ de biomasa, conteniendo 1.28 kg árbol⁻¹ de carbono y 4.51 kg árbol⁻¹ de CO₂ para la procedencia de SV. CO almacena 2.04 kg árbol⁻¹ de biomasa, contiene 1.03 kg árbol⁻¹ de carbono, mientras que el contenido de CO₂ es de 3.72 kg árbol⁻¹, para MZ, tomando en cuenta el mismo diámetro de la base se obtuvieron 2.33 kg árbol⁻¹ de biomasa, 1.18 kg árbol⁻¹ de carbono y 4.30 kg árbol⁻¹ de CO₂. Cabe mencionar que las tres procedencias cuando se encuentran con un diámetro de 7 cm presentan el mismo contenido de biomasa (1.76 kg árbol⁻¹), carbono (0.85 kg árbol⁻¹) y CO₂ (3.01 kg árbol⁻¹) (Figura 2B).

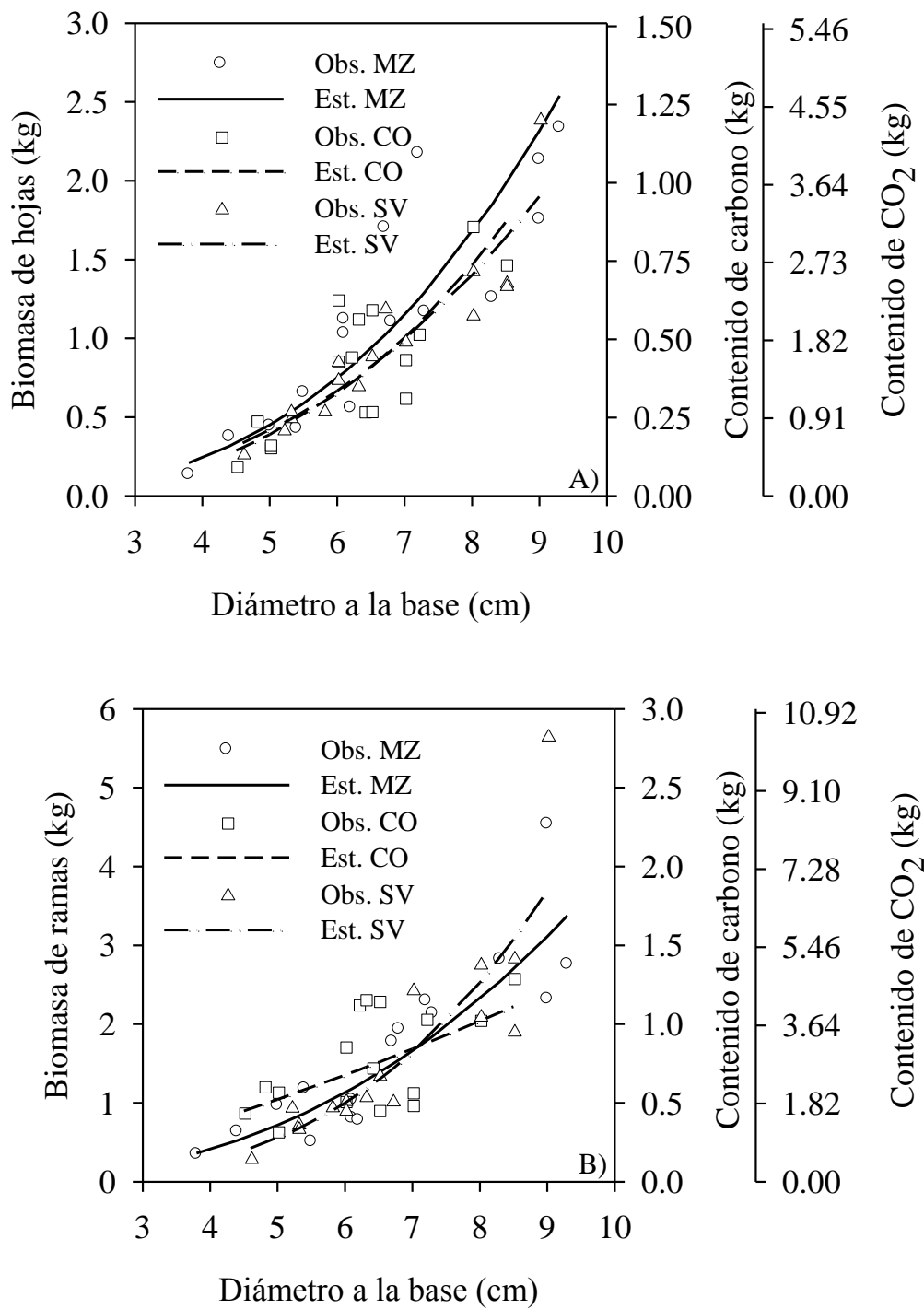


Figura 2. Estimación de biomasa, contenido de carbono y CO₂ en hojas (A), ramas (B), en componentes de árboles de tres procedencias en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila México.

En cuanto a biomasa de fuste se refiere tomando en cuenta que para las tres procedencias se utiliza 8 cm de diámetro de la base con fines de comparación, un árbol acumula 2.98 kg árbol⁻¹ de biomasa, 1.48 kg árbol⁻¹ de carbono y 5.66 kg árbol⁻¹ de CO₂ en la procedencia de MZ; en CO la biomasa existente equivale a 3.30 kg árbol⁻¹, 1.60 kg árbol⁻¹ de carbono y 6.21 kg árbol⁻¹ de CO₂, siendo esta procedencia la que presenta mayor acumulación de biomasa, carbono y CO₂ para fuste; SV presenta una biomasa de 2.62 kg árbol⁻¹, 1.29 kg de carbono y 4.33 kg de CO₂ (Figura 3C).

Los valores estimados mediante el modelo alométrico para biomasa total, indican que MZ acumula 7.18 kg árbol⁻¹ de biomasa, 3.57 kg árbol⁻¹ de carbono y 7.09 kg árbol⁻¹ de CO₂; mientras que CO presenta una biomasa de 6.80 kg árbol⁻¹, 3.29 kg árbol⁻¹ de carbono y 6.65 kg árbol⁻¹ de CO₂. y SV muestra que la acumulación de biomasa equivalente a 6.39 kg árbol⁻¹, conteniendo 3.24 kg árbol⁻¹ de carbono y 6.44 kg árbol⁻¹ de CO₂ (Figura 3D).

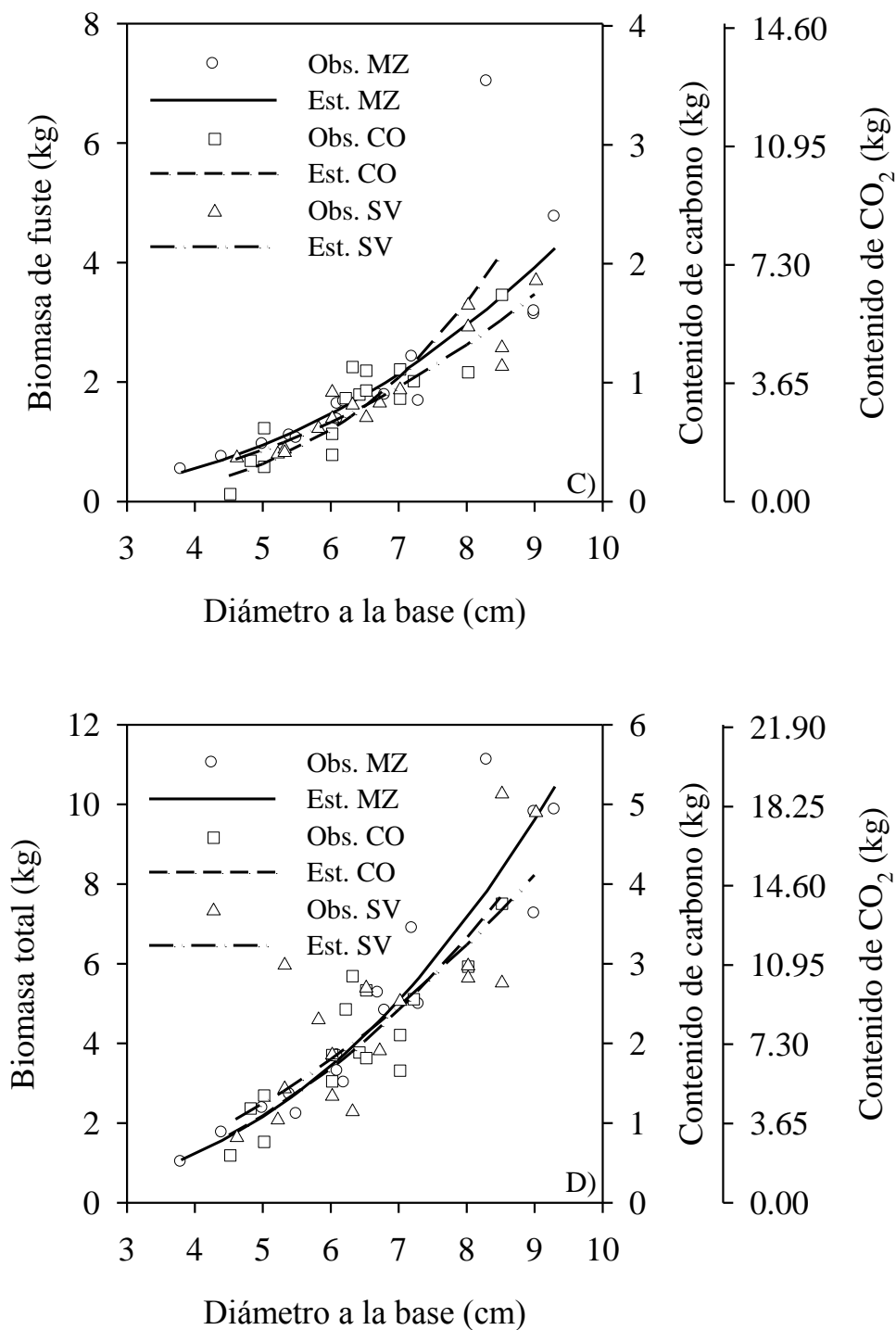


Figura 3. Estimación de biomasa, contenido de carbono y CO₂ en fuste (C) y total (D), en componentes de árboles de tres procedencias en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila México.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo alométrico no se ajustó a todos los componentes (hojas y fuste).

Los estadísticos de regresión nos muestran que en este estudio se recomienda estimar la biomasa total (la suma de hojas, ramas y fuste) por procedencia, debido a que el modelo no se ajusta por componentes, ya que tanto en la procedencia de Mazapil como en Concepción del Oro se reportan valores de R^2 mayores a 1.

El modelo alométrico se ajusta adecuadamente a la biomasa total en todas las procedencias.

El fuste representa el 43 % de la biomasa total, mientras que las ramas y hojas representan solo el 36 y 21 % respectivamente, considerando todas las procedencias.

El porcentaje de biomasa de hojas, ramas y fuste fue estadísticamente igual entre procedencias.

Existe una tendencia a disminuir el porcentaje de biomasa de ramas en Concepción del Oro, y de fuste en Santa Victoria con respecto al incremento del diámetro basal, pero aumenta el porcentaje de biomasa de ramas en Santa Victoria.

La biomasa de los diferentes componentes es diferente entre procedencias; marcándose diferencias especialmente conforme aumenta el tamaño del árbol.

Para estimar biomasa por componentes es necesario utilizar modelos específicos, es decir por procedencia.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Araujo T M, N Higuchi, JA de Carvalho Junior (1999).** Comparison of formula for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Par. Brazil. *Forest Ecology and Management*. 117: 43-52.
- Avedaño H D M, Acosta M M, Carrillo A F, Etchevers B J D (2009).** Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotecnia Mexicana*. 32(3): 232-238.
- 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.
- Brown S. (1997).** Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. Roma, Italia. FAO. 55 p. (Informe Montes N°134).
- Constante G V, Villanueva D J, Cerano PJ, Cornejo O E H, Valencia M S (2009).** Dendrocronología de *Pinus Cembroides* Zucc. y reconstrucción de la precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia forestal en México*. 34(106): 17-39.
- Cornejo O E H, Bucio Z E, Gutiérrez V B, Valencia M S, Flores L C. (2009).** Selección de árboles y conversión de un ensayo de procedencias a un rodal semillero. *Fitotecnia Mexicana*. 32(2): 87-92.
- Douterlungne D, Herrera G A M, Ferguson B G, Siddique I, Soto P L (2013).** Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia*. 47: 385-397.

- Eamus, K McGuinness, W Burrows, (2000).** Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and western Australia. National Carbon accounting system. 56 p. (Technical report N° 5).
- Eguiluz, T. (1987).** Evolución de los pinos piñoneros mexicanos. In: Passini, M. F., D. Cibrián y T. Eguiluz (comp.). II Simposio Nacional Sobre Pinos Piñoneros. Centre de Études Mexicaines et Centraméricaines - Centro de Genética Forestal A.C. – Universidad Autónoma de Chapingo. México, D.F. pp. 83-89.
- Farjon, A., J. A. Pérez de la Rosa y B. Styles. (1997).** A field guide to the pines of Mexico and Central America. The Royal Botanical Garden, Kew and the University of Oxford. Oxford, UK. 146 pp.
- Fonseca G W, Alice G F, Rey B J M (2009).** Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. Bosque. 30(1): 36-47.
- García E (1987).** Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, para Adaptarla a las Condiciones de la República Mexicana. UNAM. México. 245 p.
- Gayoso, J. y Guerra, J., (2005).** Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. Bosque. 26: 33-38.
- Gómez D J D; Etchevers B J D; Monterrosos R A I; Campo A J; Tinoco R J A (2011).** Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia* . Revista chapingo. 17(2): 261-272.
- Huxley J S (1932).** Problems of Relative Growth. The Dial Press, New York. 276.

IPCC, (2013) Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M.Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Malusa J., (1992). Phylogeny and biogeography of the pinyon pine (*Pinus* subsect. *cembroides*). *Syst. Biol.*, 17 (1), 42-66.

Méndez G J, S L Luckie N, M A Capó A. y J A Nájera L (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.

Návar J., F. de Jesús Rodríguez-Flores, Domínguez-Calleros P.A., (2013). Taper functions and merchantable timber for temperate forests of northern Mexico. *Ann. For. Res.* 56(1): 165-178, 2013.

Ordóñez D J A B (2001). Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Madera y bosques*. 90: 37-42.

Ordóñez D J A B, Masera O (2008). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y bosques*. 7(1): 3-12.

Pacheco E F C, Aldretel A, Gomez G A, Fierros G A M, Cetina A V M y Vaquera H H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30(3): 251-254

- Perry, J. (1991).** The pines of Mexico and Central America. Timber Press. Portland, Oregon. 231 pp.
- Rojo M G E, Jasso M, Vargas H J J, Palma L D J y Velázquez M A (2005).** Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Müll. arg.) en el estado de Oaxaca. Agrociencia. 39: 449-456.
- Romero M A, García M E y Françoise P M (1996).** *Pinus cembroides* s. l. y *Pinus johannis* del Altiplano Mexicano: una síntesis, Acta Botanica Gallica. 143:7, 681-693.
- SAS® Software Inc (1989).** Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. Version 9.1, Cary, N.C.
- Schelegel B, J Gayoso, J Guerra (2000).** Manual de procedimientos de muestreos de biomasa forestal. Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques en Chile y promoción en el mercado mundial. FONDEF- UACH- INFOR. Valdivia, Chile, 20p.
- Schlegel B. (2001).** Estimaciones de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde. In Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. 18 al 20 de octubre del 2001. 13 p.
- Segura M, Andrade H (2008).** ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes. Agroforestería en las Américas. 46:89-96.
- Villarreal Q J A, Mares A O, Cornejo O E y Capó A M A (2009).** Estudio florístico de los piñonares de *Pinus pinceana* Gordon. Acta Botanica Mexicana. 89: 87-124.
- Westman W. E., Whittaker R. H. (1975).** The pygm forest region of northern California: studies on biomass and primary productivity. J. Ecol. 63: 493-520.

Yerena Y J I, J Jiménez P, O A Aguirre C, E J Treviño G (2012). Contenido de carbono total en los componentes de especies arbóreas y arbustivas en áreas con diferente uso, en el matorral espinoso tamaulipeco, en México. *Redalyc.* 33(2): 145-152.

Yerena Y J I, J Jiménez P, O A Aguirre C, E J Treviño G y E Alanís R (2011). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Rev. Mex. Cien. For.* 3(1):49-56.