

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Cuantificación de Biomasa Aérea, Carbono y Oxígeno en *Pinus halepensis* Mill., en Arteaga,

Coahuila, México

Por:

RODRIGO MONTOYA VÁZQUEZ

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 Aérea, Carbono y Oxígeno en *Pinushalepensis* Mill., en Arteaga,
Coahuila, México

Por:

RODRIGO MONTOYA VÁZQUEZ

TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL


Aprobada


Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal


Dr. Juan Abel Nájera Luna

Coasesor


M. C. José Armando Nájera Castro

Coasesor


Dr. Leobardo Bañuelos Herrera

Coordinador de la División de Agronomía


Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2014

AGRADECIMIENTOS

Gracias **Dios** por dejarme cumplir una etapa más de mí vida, te pido con el corazón me ayudes a tomar las mejores decisiones para formar un camino lleno de tus bendiciones.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por todo lo que me ha proporcionado para poder finalizar satisfactoriamente la carrera de Ingeniero Forestal.

Al **Dr. Jorge Méndez González**, por el entusiasmo y empeño que dedicó para fungir como asesor principal y por todo el apoyo que brindó para terminar el trabajo de tesis; por los consejos y conocimientos compartidos.

Al **M.C. José Armando Nájera Castro**, por haber aceptado formar parte del comité de asesores de este trabajo, por los conocimientos compartidos.

Al **Dr. Juan Abel Nájera Luna**, por aceptar el compromiso del comité de evaluadores de este trabajo, por la facilidad de transmitir conocimientos.

Al **M.C. Jorge David Flores Flores**, por aceptar la propuesta de suplente en el comité de evaluadores y formar parte del trabajo de tesis, gracias por todo el apoyo brindado.

A mis padres:

Por la confianza que me dan y por los esfuerzos realizados para verme triunfar una vez más.

La flor más bella que puedo ver sobre la tierra; mi madre, **Flor de María Vázquez Tamayo**.

A quien agradeceré infinitamente en la vida por sus cuidados, amor, comprensión, dedicación, consejos y demostrar que mediante sacrificios se cumplen los sueños.

El superhéroe que de grande quiero ser; mi padre, **Epifanio Montoya Jiménez**. Gracias por el amor y comprensión, por brindarme el apoyo incondicional, por esos consejos que me orientan siempre por el mejor camino de la vida.

A mis hermanos:

Forman parte del motivo de inspiración para terminar la carrera profesional gracias por compartir amor, risas, buenos y malos momentos, pero sobre todo gracias por compartirme sus experiencias de la vida. Te quiero **Elizabeth, José Bayardo y Francisco Javier**.

Mi familia son las personas más maravillosas, valiosas y están cuando más lo he necesitado. Por todos los momentos del ayer quiero dedicarles el mañana.

Amigos y compañeros:

Nuevamente gracias Dios por enviarme a la persona más encantadora que en mi vida ha llegado, me refiero a ti **Adriana Cardona Martínez** ya formas parte importante de mi vida y más ahora que estoy finalizando la carrera gracias por el amor incondicional que me das.

A las personas que la narro me dio la oportunidad de conocer, a los compañeros de generación así como también los amigos que he ganado en esta etapa de mi vida, pero en especial a los que con su ayuda forman parte de este trabajo y que sin ellos difícilmente se iba lograr: **Cecilia Guadalupe Ruiz González, Ilse Iturbide Andrés, Claudia Elizabeth López Moreno, Juan Carlos Montoya Jiménez, José Luis Pérez Díaz, José Luis de la Cruz, Alejandro García Martínez, Librado Sosa Díaz, José Luis Antonio Elías Rodríguez, Saúl Alejandro Salmerón Brávo y Luis Hernández**, con esto les dejo saber mi sincera gratitud por apoyarme en todo lo posible para finalizar este trabajo.

DEDICATORIA

Este trabajo va dirigido a las personas más importantes de mi vida familia Montoya Vázquez, ya que hemos sacrificado muchos momentos juntos para poder culminar con la tesis para obtener el título de Ingeniero Forestal. Por todo el amor, comprensión y apoyo que me brindan incondicionalmente en todos los momentos de mi vida. Con cariño a todas las personas que me rodean, quiero que sepan que las cosas buenas suceden en esta vida, solo tenemos que ponerle amor a lo que hacemos y siempre con la meta firme. Con el mayor esmero y dedicación que he puesto en este trabajo, quiero por sobre todas las cosas dedicarle todos mis esfuerzos a Dios que solamente él me va a recompensar con las mejores bendiciones.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CONTENIDO	PÁGINA
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	3
1.2. Importancia	3
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivos	4
2. REVISIÓN DE LIETRATURA	5
2.1. Taxonomía de la especie	5
2.2. Ciclo del carbono	5
2.3. Gases de efecto invernadero	6
2.4. Fotosíntesis	7
2.5. Biomasa forestal	8
2.6. Composición de la madera.....	8
2.7. Estudios afines de biomasa en especies arbóreas	8
3. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1. Localización del área de estudio	11
3.2. Descripción del área experimental.....	12
3.3. Estimación de biomasa aérea de <i>Pinus halepensis</i> Mill.	12
3.4. Separación de componentes de <i>Pinus halepensis</i> Mill.	13
3.5. Secado de muestras de <i>Pinus halepensis</i> Mill.	14
3.5.1. Contenido de humedad de las muestras de <i>Pinus halepensis</i> Mill.	14
3.5.2. Biomasa seca de componentes de <i>Pinus halepensis</i> Mill.	16
3.6. Modelo alométrico multivariado	16
3.7. Carbono y carbono equivalente en componentes de <i>Pinus halepensis</i> Mill.....	18
3.8. Estimación de volumen de fuste mediante análisis troncal de <i>Pinus halepensis</i> Mill....	19
3.9. Estimación de incremento en carbono del fuste de <i>Pinus halepensis</i> Mill.....	19
3.10. Producción de Oxígeno por <i>Pinus halepensis</i> Mill.	20
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21

4.1. Características dasométricas de <i>Pinus halepensis</i> Mill.	21
4.3. Distribución porcentual de biomasa en componentes de <i>Pinus halepensis</i> Mill.	25
4.4. Ajuste del modelo alométrico	26
4.5. Biomasa aérea, carbono y dióxido de carbono en <i>Pinus halepensis</i> Mill.....	28
4.6. Incrementos de carbono y predicción de oxígeno en <i>Pinus halepensis</i> Mill.....	32
5. CONCLUSIONES	34
6. LITERATURA	35

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables dasométricas y algunas características de componentes hojas, ramas y fuste de <i>Pinus halepensis</i> Mill., de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.	22
Cuadro 2. Estadísticos del modelo alométrico para la predicción de biomasa aérea por componentes de <i>Pinus halepensis</i> Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.....	27
Cuadro 3. Estadísticos del modelo para incremento de carbono y predicción de oxígeno en <i>Pinus halepensis</i> Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio de una plantación de <i>Pinus halepensis</i> Mill. en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.....	11
---	----

Figura 2. Porcentaje de biomasa aérea promedio por componentes hojas, ramas y fuste de *Pinus halepensis* Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.....25

Figura 3. Biomasa aérea, carbono y dióxido de carbono de los componentes hojas (A), ramas (B) y fuste (C) de *Pinus halepensis* Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.29

Figura 4. Residuales de componentes hojas, ramas y fuste de *Pinus halepensis* Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.....31

Figura 5. Biomasa de fuste (A), incremento en carbono (B) y producción de oxígeno (B) de *Pinus halepensis* Mill. en la plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.....33

RESUMEN

Debido a las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, resulta conveniente cuantificar mediante modelos alométricos, la estimación y almacenamiento de carbono y dióxido de carbono en la biomasa aérea de especies forestales principalmente porque es una forma de mitigar los gases contaminantes en la atmósfera. En la plantación de *Pinus halepensis* Mill. (3133 árboles ha⁻¹) se aplicó el método destructivo para cuantificar biomasa aérea y realizar análisis troncal a 30 individuos. Se pesó en verde el total de los componentes (hojas, ramas y fuste) y luego se pesó una muestra de cada componente del árbol para obtener el contenido de humedad; se transportaron, almacenaron y secaron en una estufa de para la deshidratación a 85 °C ± 5 °C hasta obtener el peso anhidro y con ello obtener el carbono almacenado así como también la producción de oxígeno. La biomasa porcentual por componente hojas, ramas y fuste, fue de 10.51, 28.49 y 61.00 % respectivamente. Mediante modelos de regresión multivariada se obtuvieron los parámetros que sirvieron para predecir biomasa aérea de cada componente obteniendo un coeficiente de asociación del Wilks de 0.98. Con el modelo de Schumacher se estimó el incremento en carbono y producción de O₂; a los 25 años un árbol produce 2.35 kg de C año⁻¹; 7.36 t de C ha⁻¹ año⁻¹; produciendo 6.14 kg de O₂ árbol⁻¹ representando 19.23 t O₂ ha⁻¹ año⁻¹.

Palabras clave: *Pinus halepensis* Mill., concentraciones, compensación, estimación, biomasa aérea.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales más severos al que nos enfrentamos en el presente siglo es el denominado cambio climático, derivado del incremento de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, entre los que destacan el Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido nitroso (N_2O), Hidrofluorcarbono (HFCs), Perfluorcarbono (PFCs) y Sulfuro hexafluorido (SF_6). El caso del dióxido de carbono se deriva de actividades tales como el uso de combustibles fósiles, cambios en el uso del suelo, deforestación, incendios forestales, entre las principales, mismas que provocan el incremento de la temperatura global de la atmósfera (Ordóñez y Masera, 2001).

El grupo de expertos del IPCC (2013) han observado los cambios climáticos desde hace décadas y reportan que entre los gases de efecto invernadero que aportan mayor porcentaje de concentración en la atmósfera se encuentran: CO_2 , CH_4 y N_2O ; todos han aumentado desde 1750 debido a la actividad humana. En 2011, las concentraciones de estos gases de efecto invernadero eran 391 ppm, 1803 ppb y 324 ppb, y superó los niveles pre-industriales en un 40 %, 150 % y 20 %, respectivamente [ppm (partes por millón) o ppb (partes por billón), 1 billón = 1 millón de millones], es la relación entre el número de moléculas de gas para el número total de moléculas de aire seco.

Para proponer estrategias viables y dirigidas a la mitigación del cambio climático es esencial, por un lado, conocer la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales, y por otra, las modificaciones a los flujos de carbono derivadas de los patrones de cambio de uso del suelo Yerena *et al.*, (2011).

En términos del grupo de expertos del IPCC (2005) se propone la ejecución de proyectos de reforestación en todo el mundo, esto permitiría una reducción del 20 al 50 % de las concentraciones netas de carbono en la atmósfera en los próximos cien años, las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico aumentaron aproximadamente 100 ppm desde sus niveles preindustriales, alcanzando 391 ppm en 2011. Por lo que se ha observado un aumento de temperatura del planeta de aproximadamente 0.8 °C desde que se realizan mediciones confiables, dos tercios de este aumento desde 1980. Hay una certeza del 90 % de que la causa del calentamiento es el aumento de gases de efecto invernadero.

Poco más del 0.03 % de los gases de la atmósfera es dióxido de carbono, pero aunque sea un porcentaje aparentemente muy bajo, se ha comprobado que este gas es el principal responsable del efecto invernadero, causante del cambio climático (Montero *et al.*, 2005).

Los bosques desempeñan un papel central muy importante en el ciclo del carbono, es decir, el balance entre el dióxido de carbono absorbido durante la fotosíntesis y el emitido en la respiración celular es positivo, logrando así, fijar carbono en la masa forestal y en el suelo (IPCC, 2013).

De Luis *et al.* (2007) mencionan que el *Pinus halepensis* Mill. es la especie más común y con grandes áreas de distribución en el Mediterráneo Occidental, y en México, Domínguez *et al.*, (1995), reconocen que *Pinus halepensis* Mill. se adapta a las condiciones del clima regional en el noreste de la república Mexicana y principalmente en la Sierra Madre Oriental.

López *et al.* (2011) mencionan que los bosques son parte fundamental del ciclo del carbono, como principales sumideros de dióxido de carbono, el cual es fijado en la biomasa de hojas, ramas, fuste y raíz. Durante el tiempo que el carbono se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol, se considera que se encuentra almacenado y esto ayuda a reducir la

concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, mitigando así, en el largo plazo el aumento de la temperatura del planeta (Ordóñez y Masera, 2001).

Los árboles ayudan a mantener nuestro aire limpio y nuestros ecosistemas saludables. Debido a que los seres humanos formamos un papel importante en las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, ya sea por actividades antropogénicas o por el proceso de inhalar oxígeno y exhalar dióxido de carbono. Los árboles inhalan dióxido de carbono y exhalan oxígeno. Es por eso que somos el equipo perfecto.

Uno de los servicios ambientales de los árboles en la producción de oxígeno, en este sentido cuantificarlo es de suma importancia para darle e valor agregado a los bosques del mundo.

1.1. Justificación

Por lo anterior, es necesario la adecuación de modelos para estimar el almacenamiento de dióxido de carbono en plantaciones de *Pinus halepensis* Mill., como alternativa para México y así, generar información para ofrecer compensación de emisiones de gases de efecto invernadero a entidades o empresas emisoras de dióxido de carbono y tener posibilidades de incursionar en los mercados de bonos de carbono a nivel nacional e internacional.

1.2. Importancia

Resulta importante conocer el contenido de carbono almacenado en biomasa aérea de *Pinus halepensis* Mill., ya que a partir de los cálculos de incrementos se estima el carbono capturado y oxígeno producido que se considera un servicio ambiental como alternativa de manejo de los recursos naturales encaminado al desarrollo sustentable.

1.3. Hipótesis

Es posible estimar el almacén de carbono en componentes de biomasa de *Pinus halepensis* Mill. usando modelo multivariado de biomasa y asegurando la aditividad.

1.4. Objetivos

- 1) Aplicar un método multivariado para estimar biomasa aérea de *Pinus halepensis* Mill.
- 2) Estimar el contenido de carbono y producción de oxígeno en la biomasa aérea de *Pinus halepensis* Mill. en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga Coahuila.

2. REVISIÓN DE LIETRATURA

2.1. Taxonomía de la especie

Se conoce con el nombre científico *Pinus halepensis* Mill. y de nombre más común tanto en su rango de distribución normal e introducida pino Carrasco y pino Alepo respectivamente; se distribuye naturalmente en la zona del mediterráneo desde África, Asia y Europa (De las Heras *et al.*, 2011) se encuentra desde los primeros metros sobre el nivel del mar hasta los 2200 msnm. Esta especie, *Pinus halepensis* Mill. se encuentra en estatus de preocupación menor (IUCN, 2013), puede alcanzar una altura de 15 a 20 m y un diámetro de 70 cm. produce semillas todos los años durante otoño; en México se puede encontrar en el noreste de la república donde se presentan suelos poco profundos arenosos, franco arenoso y con un buen drenaje (CONAFOR, 2014).

Pinus halepensis Mill. tiene una gran capacidad de adaptación a zonas secas (aún en sitios con solamente 250 mm de precipitación anual), donde hay hasta 8 meses de sequía. Esta especie tiene la capacidad de soportar altas temperaturas y a la vez ser resistente hasta cierto punto las heladas. Sirve para proteger suelos deficientes de humedad, se utiliza en la fijación de dunas, en terrenos erosionados, además de tener un potencial para cortina rompevientos de corta altura como ornamental en parques y jardines (CONAFOR, 2014).

2.2. Ciclo del carbono

Joseph Black, un físico y químico escocés, descubrió el dióxido de carbono alrededor de 1750. A temperatura ambiente (20 - 25 °C), el dióxido de carbono es un gas inodoro e incoloro, ligeramente ácido y no inflamable.

El dióxido de carbono es una molécula con la fórmula molecular CO_2 , está formada por un átomo de carbono que está ligado a dos átomos de oxígeno, $\text{O} = \text{C} = \text{O}$ (Lenntech, 2014).

Yerena et al. (2011) afirman que, en los ecosistemas terrestres, la vía más importante del flujo de carbono atmosférico a la vegetación y el suelo es biológica, por medio de la fotosíntesis y la descomposición, respectivamente. Este flujo involucra muchos procesos interactuantes, los cuales mantienen el equilibrio dinámico del intercambio de gases atmósfera planta suelo.

Ordóñez y Masera (2008) mencionan que este ciclo gira especialmente alrededor del dióxido de carbono (CO_2), ya que constituye la especie química predominante en la atmósfera. El ciclo funciona básicamente a través de la fotosíntesis, la respiración, las emisiones por quema de combustibles fósiles y fenómenos naturales como las erupciones volcánicas, así mismo afirman que, el ciclo del carbono es el responsable de la cantidad de CO_2 contenido en la atmósfera, ya que es el mecanismo que equilibra las cantidades de carbono presentes en los diferentes reservorios o almacenes de carbono en el planeta. Como consecuencia se establece todo un balance de carbono a través de procesos fijadores y/o almacenadores de carbono y otros que a su vez lo emiten.

2.3. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son: Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido nitroso (N_2O), Hidrofluorcarbono (HFCs), Perfluorcarbono (PFCs) y Sulfuro hexafluorido (SF_6). Entre los gases más importantes destaca el CO_2 cuya concentración anual de incremento en la atmósfera es alrededor de 1.8 partes por millón o 0.5 % por año (CICC, 2012).

La emisión de gases de efecto invernadero es relativamente constante desde hace miles de años, en cambio, las actividades del hombre están dando lugar a que aumente

considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero, entre las fuentes artificiales de estos gases se cuentan la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo, incendios forestales siendo estas las principales (Andrasko, 1990).

El IPCC (2013) concluye que para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero se logra con evitar lo más posible la deforestación y por consecuente en la asimilación del carbono es mediante la forestación, reforestación y un manejo mejorado del bosque, los cultivos y los pastizales.

2.4. Fotosíntesis

La fotosíntesis produce energía bioquímica para los procesos fisiológicos y de formación de materia biológica (biomasa) a partir del CO₂, energía radiante y nutriente. El CO₂ es tomado directamente de la atmósfera y su asimilación por la planta es conocida como fotosíntesis gruesa.

Pero no todo el CO₂ asimilado es transformado a biomasa, sino que una parte es regresada a la atmósfera por medio de la respiración que se lleva a cabo durante los procesos fisiológicos. Durante el crecimiento inicial de los arboles aumentaran rápidamente en altura y diámetro; que en términos de relación de la fotosíntesis a respiración tienden a fijar mayor cantidad de carbono, conforme el árbol envejece la proporción de tejido no fotosintético aumenta sin tener incremento del área foliar, por lo tanto la proporción disponible de carbono fijado fotosintéticamente para el crecimiento disminuye (Bidwell, 1993).

2.5. Biomasa forestal

Se define como el peso seco de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema de vegetación forestal por encima y por debajo del suelo, normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso seco, frecuentemente para determinar la biomasa es necesario separarla en componentes, donde los más típicos corresponden a la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta. La proporción de estos componentes tienen una variación tanto en el tamaño de los árboles como en las especies (Schlegel, 2001).

Para la estimación de biomasa, el procedimiento más común consiste en el muestreo destructivo de unos cuantos árboles para después modelar el contenido de biomasa en función de variables (altura, diámetro normal, entre otros) fáciles de medir, para ello se utilizan métodos de regresión (Díaz *et al.*, 2007).

2.6. Composición de la madera

Químicamente la madera tiene dos formas de composición a) composición elemental y b) composición química. Composición elemental: la madera está compuesta en valores aproximados de 50 % de carbono, 43 % de oxígeno, 6 % de hidrogeno, 0.8 % de nitrógeno, 0.2 % de sustancias minerales. Composición química: los compuestos principales son holocelulosas de 65 a 75 %, lignina de 20 a 30 %, y los compuestos extraíbles de 3 a 7 % (CONAFOR, 2011).

2.7. Estudios afines de biomasa en especies arbóreas

López *et al.* (2011) contribuyeron a la divulgación de la importancia de los bosques debido a la absorción de CO₂ atmosférico. Con la estimación adecuada de biomasa para la venta de

carbono en el mercado nacional e internacional, ese estudio tuvo como objetivo la evaluación de biomasa aérea y CO₂, en una plantación de *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapaliname, Coahuila, México.

El área es de aproximadamente 1000 ha, teniendo diferentes edades que varían de 21 a 34 años. La biomasa en *Pinus halepensis* Mill. por componente fue de 5.45, 10.46 y 13.93 t ha⁻¹ en hojas, ramas y fuste respectivamente, la cual fue estimada a partir de modelo de árboles individuales, en la plantación de 1000 hectáreas, todo esto representa 62,222.28 t de CO₂. Los resultados indican que en esta especie, el porcentaje de carbono es de 56 % en hojas y 57 % en ramas y fuste, valores que al transformarlos a CO₂ por la proporción de la molécula carbono y oxígeno en cada componente, corresponden a 11.20, 21.88 y 29.15 t de CO₂ ha⁻¹ en hojas ramas y fuste respectivamente.

En otras especies Méndez et al. (2011) encontraron 19.68 t C ha⁻¹ y 72.02 t CO₂ ha⁻¹ en una plantación mixta de *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* de 12 años de edad. El mercado de carbono es una vía alternativa y económicamente viable, proveedora de servicios ambientales como una medida de evitar emisiones de GEI, representando una fuente de ingresos para los poseedores del recurso forestal. Ordóñez y Masera (1995) reportaron precios desde 5-11 US/tCO₂ considerando el precio mínimo, esto representaría un valor de 311,111.40 dólares en toda la plantación de *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra Zapaliname.

Por otra parte Avendaño et al. (2007) realizaron un estudio de captura de carbono en *Abies religiosa* y determinaron que la forma $Y = b * X^k$, donde: Y es el contenido de biomasa o de carbono y X el diámetro normal (DN) y para estimar los parámetros b y k del modelo se utilizaron 26 árboles de un área bajo aprovechamiento forestal, con diámetro normal entre 6.5 y 79 cm; en el Municipio de Nanacamilpa, Tlaxcala.

En este estudio también se describe la metodología de los casos anteriores, por lo tanto, la concentración de carbono en el fuste fue de 46.57 %, el de las ramas fue de 46 % y el del follaje 46.07 % por lo que la concentración promedio de carbono por árbol fue de 46.48 %. Para estimar la biomasa se ajustó y generó la ecuación $B = 0.0714 \cdot DN^2 \cdot 0.5103$, donde: B = biomasa y DN = diámetro normal; para estimar el carbono, la ecuación ajustada fue $C = 0.0332 \cdot DN^2 \cdot 0.5103$, donde: C = carbono; DN = diámetro normal. Los parámetros para ambas ecuaciones fueron estimados con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99.

El gobierno federal de Tlaxcala promueve el pago por captura de carbono en los bosques para mitigar el calentamiento global. Por ello, existe la necesidad de estimar la biomasa y tasas de captura de carbono en los bosques de *Abies religiosa* y generar modelos para calcular la biomasa de fuste, de ramas y de acículas de árboles completos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del área de estudio

El presente estudio se desarrolló en la localidad “Los lirios” en el Municipio de Arteaga, Coahuila, México en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), propiedad de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), se encuentra a 42 km de la ciudad de Saltillo, por la carretera federal 57 en el tramo Saltillo-Matehuala, alcanzando los 25 km de recorrido, virar a la carretera 20 que conecta con el estado de Nuevo León, la plantación se localiza entre las coordenadas geográficas 25° 23” de latitud norte y 100° 37” de longitud oeste.

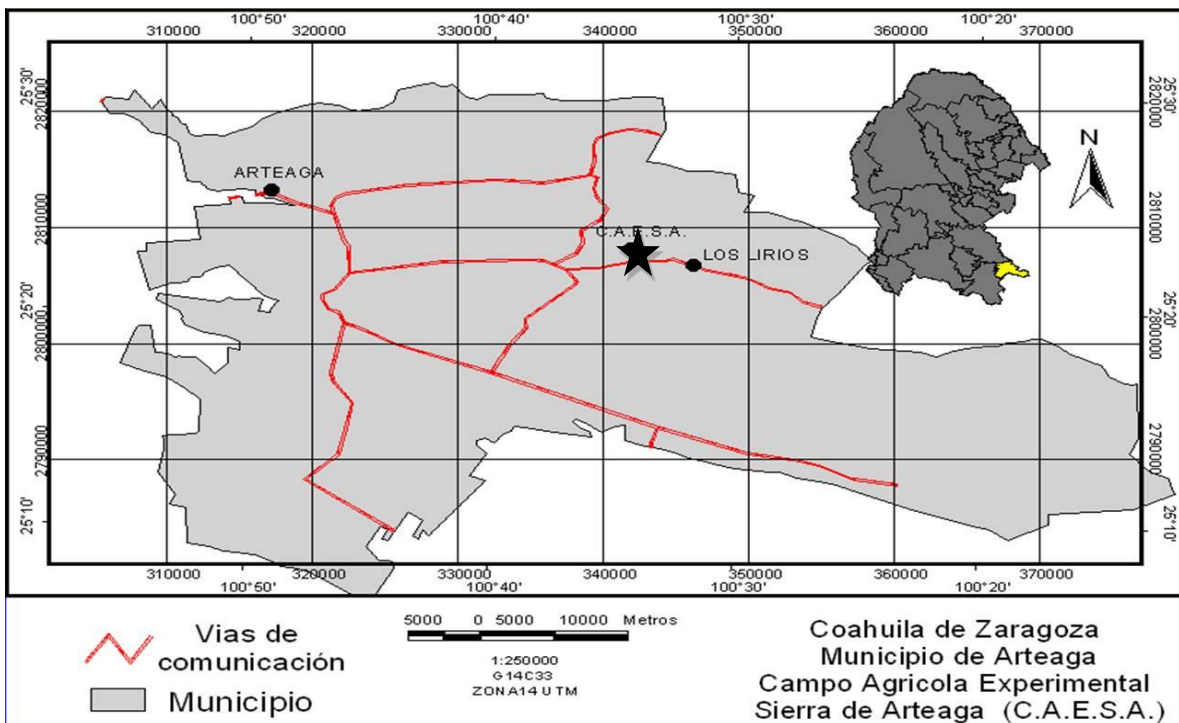


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio de una plantación de *Pinus halepensis* Mill. en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

3.2. Descripción del área experimental

El Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) tiene una superficie de 39.5 has. de la cual solamente 300 m² corresponde a la plantación de *Pinus halepensis* Mill., establecida a 2280 msnm., presenta un clima templado subhúmedo con clasificación Cb(X)(Wo)(e)g. con lluvias escasas todo el año, la precipitación pluvial es de 521 mm anuales con temperatura media anual de 13.8 °C, la del mes más frío -5 °C, y la del mes más cálido 22 °C y suelos de textura migajón arcillosa y con pH alcalino (García, 1973 y 1998).

El CAESA, está ubicado dentro de la provincia de la Sierra Madre Oriental y se encuentra dentro de la región hidrológica Bravo – Conchos (RH24) y la cuenca hidrológica Río Bravo – San Juan (24B) (INEGI, 2000).

3.3. Estimación de biomasa aérea de *Pinus halepensis* Mill.

Al momento de localizar la parcela se marcó el punto de referencia y se tomaron las coordenadas en UTM con ayuda del GPS Magellan Triton 2000, de los 94 árboles de la plantación y una vez instalados en la zona de estudio se marcaron los árboles próximos a derribar que en este caso el número fue de 30 individuos por lo que fue necesario utilizar pintura acrílica de color blanco para marcar al árbol a 1.50 m de altura y así distinguir con facilidad los árboles elegidos.

Todos los datos se anotaron en la hoja de campo previamente diseñada y adecuada para el levantamiento de información dasométrica.

Para cuantificar la biomasa aérea de *Pinus halepensis* Mill., se realizó por la metodología del tipo destructivo (Klinge y Herrera 1983; Araujo *et al.*, 1999). Esta decisión ha condicionado el

método de muestreo para la estimación de biomasa (apeo, medición y pesaje de árboles individuales) y la adopción de los mismos intervalos de clases diamétrica. Se seleccionaron 30 árboles, considerando el diámetro y altura. Se midió el diámetro del fuste a 1.30 metros con ayuda de la cinta diamétrica el árbol en pie. También se midió el diámetro de copa con ayuda de una cinta métrica.

Luego se derribó el árbol con ayuda de una motosierra marca Husqvarna, practicando el derribo direccionado, desrame y troceo. Posteriormente se colocó en una lona de plástico donde se midió la altura total del árbol (m) con una cinta métrica de 30 m.

Una vez que se acomoda el árbol sobre la lona se procede a separar por componentes hojas, ramas y fuste limpio con ayuda de la motosierra, machetes y tijeras podadoras según sea el caso. Para los componentes que pesan mayor a 5 kg se utilizó la báscula romana de marca Tecno Cour con capacidad de 120 kg con precisión de 0.5 kg. Para los componentes que no sobrepasaron el peso de 5 kg se utilizó la balanza analítica Torrey modelo LEQ-521 capacidad de 5 kg en verde, cada uno de los componentes del árbol. Posteriormente en bolsas de papel Kraft con etiqueta para cada muestra del componente hoja rama y fuste (número de árbol, tipo de muestra, fecha de captura de datos y peso de la muestra).

3.4. Separación de componentes de *Pinus halepensis* Mill.

Hojas: se separaron de las ramas con ayuda de tijeras podadoras y las ramillas que midieron alrededor de 2 mm de diámetro a la base de las ramas, también se consideraron para el peso total en verde del componente del árbol, así como también para la muestra de hojas.

Ramas: son todas aquellas que se desprendieron del fuste limpio y se pesaron en su totalidad y después se obtuvo una muestra representativa de 2 a 5 kg para facilitar su manejo en transporte

y almacenamiento para el secado en estufa, en este componente es donde se tomó en cuenta los conos.

Fuste: Para el caso del fuste limpio se realizó cortes del árbol a diferentes secciones para obtener una rodaja a diferentes alturas y de preferencia se debe comenzar por cortar desde la base del fuste y así obtener la primer rodaja de un grosor no mayor a 5 cm; luego se mide a 1.30 m para obtener la segunda rodaja; el resto de las secciones del fuste limpio se considera una medida de 1.50 m de separación hasta donde se encuentre un diámetro menor a 5 cm ya no se considera como rodaja.

El peso verde de cada una de las muestras de hojas, ramas y rodajas del fuste de *Pinus halepensis* Mill. se registró en una hoja de cálculo de Microsoft office Excel 2010. Estos datos sirvieron para determinar el contenido de humedad de las muestras.

3.5. Secado de muestras de *Pinus halepensis* Mill.

Las muestras de los componentes hojas, ramas y rodajas del fuste de *Pinus halepensis* Mill. se secaron en la estufa Blue, M. modelo 246F serial No. P6-800 a una temperatura constante de 85 ± 5 °C por 14 días consecutivos, dentro de los cuales se pesaron cada 3 días las 5 muestras de cada componente hojas, ramas y rodajas del fuste del árbol y cuando las lecturas de los pesos de las muestras llegaron a ser constantes se definió que ya se encontraban en peso anhidro (Acosta *et al.*, 2002; Méndez *et al.*, 2011).

3.5.1. Contenido de humedad de las muestras de *Pinus halepensis* Mill.

Se determina por medio de dos formas: a) higrómetro y b) por el método de deshidratación. El primero es por medio de un aparato que mide la conductividad eléctrica del agua contenida en

la madera a través de dos electrodos. Para *Pinus halepensis* Mill. se aplicó el segundo porque es uno de los métodos más exactos ya que la madera se seca totalmente y consiste en tomar una muestra de los componentes del árbol y se aplican los siguientes tres pasos:

1. Pesar en verde la muestra del componente (Pvm).
2. Secar la muestra del componente en una estufa de deshidratación. Se debe realizar lecturas y cuando el peso de la muestra varía muy poco con respecto del peso inmediato anterior, entonces se toma éste como el peso totalmente seco o peso anhidro (Psm).
3. Se aplica la siguiente fórmula propuesta por Schlegel et al. (2001).

$$CH = Pvm \frac{Psm}{Psm} * (100)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad en porcentaje (%).

Pvm = Peso verde la muestra (g).

Psm = Peso seco de la muestra (g).

De esta manera se obtiene el contenido de humedad de cualquier especie, tipo o pieza de madera. Al determinar el contenido de humedad de una parte del componente, esta se aplica para toda la pieza.

3.5.2. Biomasa seca de componentes de *Pinus halepensis* Mill.

Una vez terminado el cálculo del contenido de humedad de las muestras, se calculó la proporción del peso húmedo que corresponde a la biomasa, mediante la siguiente ecuación propuesta por Schlegel et al. (2001).

$$B = \frac{Pvtc}{1 + CH / 100}$$

Donde:

B = Biomasa seca (g).

Pvt = Peso verde total de componente (g).

CH = Contenido de humedad (%).

3.6. Modelo alométrico multivariado

El modelo alométrico propuesto para el análisis de los datos de biomasa de *Pinus halepensis* Mill. fue elegido porque es el más generalizado en investigaciones recientes y es confiable (Acosta *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2012), que en su forma no lineal se expresa de la siguiente manera:

$$y = a * x^b$$

Al ajustar el modelo en su forma lineal mediante transformación logarítmica para homogenizar la varianza de los datos se obtiene el modelo siguiente:

$$\log(y) = \log a + b \log (x)$$

Donde:

y = Biomasa seca del componente (kg).

x = Diámetro normal (cm).

a y b = Parámetros del modelo.

\log = Logaritmo natural.

El modelo se ajustó de forma multivariada usando el programa de análisis estadístico “R” (R Development Core Team (2008), la transformación logarítmica en la nueva ecuación corrige la heterogeneidad de la varianza de la variable independiente “ x ” con respecto a los datos en la variable dependiente “ y ”. Debido a que los valores grandes se homogenizan se crea un error el cual se corrige con el factor de corrección que proponen Brown *et al.*, (1989). Para corregir el sesgo se aplicó el factor de corrección ponderado, el cual se expresa por la fórmula tomada de Fonseca *et al.*, (2009):

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

Donde:

FC = Factor de corrección.

Exp = Exponencial.

SEE^2 = Error estándar de la estimación, en unidades logarítmicas, el cual se obtiene con:

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

Donde:

y obs = Biomasa observada (kg).

y est = Biomasa estimada (kg).

n = Número de observaciones.

3.7. Carbono y carbono equivalente en componentes de *Pinus halepensis* Mill.

Para estimar el contenido de carbono en la biomasa de los componentes de cada árbol se empleó la siguiente expresión tomada de Díaz *et al.*, (2007).

$$CC = Bt \times \% C$$

Donde:

CC = Contenido de Carbono por componente (hojas, ramas y fuste; expresado en kg).

Bt = Biomasa total del componente (kg).

% C = Porcentaje de carbono contenido en la biomasa del componente

El IPCC (2013) señala que el rango más citado para el contenido de C en la biomasa es 43 a 58% y para el género *Pinus* un porcentaje del 50 % en peso de carbono por cada fracción de biomasa seca.

Para *Pinus halepensis* Mill., el carbono equivalente (CO₂ eq.) almacenado en la biomasa seca se obtuvo con el producto del contenido y el coeficiente resultante de la relación del peso de la molécula de CO₂ (44) y el peso del átomo de C (12) (Pacheco *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2011).

3.8. Estimación de volumen de fuste mediante análisis troncal de *Pinus halepensis* Mill.

El fuste de cada árbol se dividió en secciones y la primer troza se cortó a 1.30 m y el resto de las trozas se cortaron a cada 1.50 m. Dependiendo de la altura total del árbol era el número de trozas y por lo tanto también el mismo número de rodajas de 5 cm de espesor.

Para realizar el método de análisis troncal con las rodajas obtenidas de cada fuste, primeramente con una lijadora eléctrica de banda, de marca Makita modelo 9404 se lijaron las rodajas y se contabilizaron los anillos de crecimiento, cada 5 anillos se marcaron con un lápiz de cera color rojo para resaltar el anillo de crecimiento. Se midieron los anillos de crecimiento con ayuda de una regla de 30 cm. Los datos obtenidos se vaciaron en una hoja de cálculo de Excel de los accesorios de la paquetería de Microsoft Office 2010.

Mediante el análisis troncal se determinó el incremento corriente anual en volumen de fuste el cual fue transformado a biomasa utilizando la densidad básica de la madera, en este caso corresponde a 0.535 g cm^{-3} , Oliveras *et al.*, (2013).

3.9. Estimación de incremento en carbono del fuste de *Pinus halepensis* Mill.

El carbono de fuste de *Pinus halepensis* Mill. se evaluó usando el modelo de Schumacher, tomado de Méndez *et al.* (2011) expresado en su forma integral:

$$Y = \exp (\beta_0 + \beta_1/E)$$

Donde: Y = carbono de fuste (kg); β_0 y β_1 = parámetros de la regresión; exp = base de los logaritmos neperianos; E = edad (años). El incremento corriente anual (ICA) de carbono de fuste, se obtuvo derivando la ecuación integral antes mencionada:

$$ICA: \frac{Y}{E} = - \frac{\beta_0}{E^2} \exp (\beta_0 + \beta_1 / E)$$

3.10. Producción de Oxígeno por *Pinus halepensis* Mill.

La cantidad de oxígeno producido se estima a partir de la captura de carbono basado en los pesos atómicos: la liberación neta de O₂ kg año⁻¹ = secuestro neto de C kg año⁻¹ * (32/12). El oxígeno producido por un árbol durante un año está directamente relacionado con la cantidad de carbono secuestrado por el árbol, que está vinculado a la acumulación de biomasa de los árboles (Nowak *et al.*, 2007).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características dasométricas de *Pinus halepensis* Mill.

La plantación tiene en promedio 23 años de edad; cuenta con una superficie de 300 m² con un total de 94 árboles; la plantación cuenta con diferente categoría diamétrica (**Cuadro 1**) que van desde los 5 cm hasta 25 cm, las alturas se encuentran desde 5.1 m hasta 11.30 m, y los diámetros de copa desde 2 m hasta 5 m, representado la cantidad de 3133 árboles ha⁻¹.

Comparando los valores del estudio de biomasa aérea que realizaron Méndez *et al.*, (2011) en una plantación de *P. devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl. Al año 2011 contaba con un total de 560 árboles ha⁻¹ es menor la densidad de árboles por hectárea en comparación con el presente estudio. A los 12 años de edad *P. devoniana* tuvo un diámetro mínimo de 13.0 cm y máximo de 23.0 cm, altura de 5.6 a 10 m, las diferencias fueron de 8 cm de diámetro menor en y 2 m mayor en altura en *P. halepensis* Mill. y en *P. pseudostrobus* 14.5 a 27.0 cm en diámetro y 7.4 a 12.6 m en altura comparado con *Pinus halepensis* Mill. estos valores son menores.

En otra especie, Díaz *et al.*, (2007) en Tlaxco, Tlaxcala, México, realizaron la determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham se seleccionaron 25 árboles de *P. patula*, con diámetros que varían de 6.7 a 64.1 cm comparado con *Pinus halepensis* Mill. esta variable diámetro es menor.

Ramírez *et al.* (2012) determinaron el potencial de captura y almacenamiento de CO₂ en el Valle de Perote, estudio de caso: *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* d.k. Bailey por lo que ocuparon árboles con dimensiones de 15 a 25 m de altura, la plantación fue establecida en 1994, y se evaluaron un total de 479 individuos distribuidos 1.5 m en una superficie total de

2945 m², el número de individuos por superficie es menor, así como también la variable altura en *Pinus halepensis* Mill.

Cuadro 1. Variables dasométricas y algunas características de componentes hojas, ramas y fuste de *Pinus halepensis* Mill., de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

	Características dasométricas						Componentes					
	DN	HT	DC	PVh	PVr	PVf	CHh	CHr	CHf	% h	% r	% f
Max	22.5	11.3	5.0	36.9	78.4	165.6	141.2	115.4	81.8	19.1	41.8	79.3
Min	4.0	5.1	1.2	0.5	1.8	6.1	3.6	40.1	58.7	3.7	15.6	49.9
Prom	10.1	8.3	2.6	9.1	22.8	42.4	97.5	95.9	71.2	10.5	28.5	61.0
Ran	18.5	6.2	3.8	36.3	76.6	159.5	137.6	75.3	23.1	15.5	26.2	29.4
D.E.	4.5	1.4	1.0	10.0	21.6	36.7	21.7	13.8	6.7	4.3	6.2	7.4

Donde: Max = máximo; Min = mínimo; Prom = promedio; Ran = rango; D.E. = desviación estándar; DN = diámetro normal (cm); HT = altura total (m); DC = diámetro de copa (m); PVh, PVr y PVf = peso verde de hojas, ramas y fuste (kg); CHh, CHr y CHf = contenido de humedad de hojas, ramas y fuste; (%) h, (%) r y (%) f = porcentaje del componente hojas, ramas y fuste.

4.2. Estimación de biomasa aérea de *Pinus halepensis* Mill.

Brown (2002) menciona que las estimaciones de biomasa aérea forestal son esenciales para evaluar el rendimiento de los ecosistemas; en este caso el rendimiento de la plantación de *Pinus halepensis* Mill. se estima mediante las variables dasométricas (diámetro normal (DN), diámetro de copa (DC), altura total (HT) (**Cuadro 1**), para cuantificar la biomasa aérea de los componentes y así poder predecir los almacenes de carbono y la producción de oxígeno en la misma.

La plantación de *Pinus halepensis* Mill. cuenta con dimensiones muy notorias tanto en la variable diámetro que va desde los 4 cm hasta 22.5 cm y en promedio 10.1 m, generando así una desviación estándar de 4.5 cm; en cuanto a la variable altura de los árboles de la plantación va desde 5.1 a 11.3 m y en promedio 8.3 m, generando así la desviación estándar de 1.4; aunado a esto se observa que el porcentaje de distribución de los componentes hojas, ramas y fuste de los árboles de la plantación en promedio se encuentran en 10.5, 28.5 y 61.0 % respectivamente (**Figura 2**).

El contenido de humedad del árbol inmediatamente después de que es cortado origina un proceso de secado de la madera y, dependiendo de la temperatura del medio ambiente, el agua sufre un proceso de evaporación, además que dependiendo de la cantidad y porcentaje de espacios y del espesor de la pared celular, será la cantidad de agua presente en la madera. Por ejemplo la madera balsa (*Ochroma pyramidale*) puede contener más de 600 % de humedad referido a su peso seco; y la madera de pino (*Pino spp.*) puede contener alrededor de 150 % (CONAFOR, 2011), y en este estudio *Pinus halepensis* Mill. mostro contenido de humedad

desde 3.6 hasta 141.2 %; 40.1 hasta 115.4 % y 57.8 hasta 81.8 % en hojas, ramas y fuste respectivamente.

López et al. (2011) calcularon que la proporción de biomasa aérea de los componentes hojas, ramas y fuste de la especie *Pinus halepensis* Mill., en una plantación en la Sierra de Zapaliname, Coahuila, México, se encuentra en 14, 32 y 54 % respectivamente menores en comparación con el promedio por componente presente estudio (**Figura 2**). En otras especies estudiadas, Méndez *et al.*, (2011) reportaron promedios de biomasa de hojas y ramas y biomasa de fuste; siendo 39.8 y 60.1 % en *Pinus devoniana* y 41.6 y 58.3 % en *Pinus pseudostrobus* en una plantación mixta en Guanajuato, México, y en este estudio la biomasa por componente es menor.

Gayoso y Guerra, (2005) estudiaron el contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile; se analizaron 2034 muestras provenientes de la madera del fuste, corteza, ramas y hojas de 409 árboles. El estudio señala los siguientes valores promedios para simular el conjunto de especies nativas: fuste 71.35 %, ramas 13.44 %, hojas 4.28 % y corteza 10.92 %, por lo que representa valores más altos por componente comparado con *Pinus halepensis* Mill. obtenidos en esta investigación.

4.3. Distribución porcentual de biomasa en componentes de *Pinus halepensis* Mill.

La cuantificación de biomasa aérea por componente representa proporciones muy notorias como es el caso del fuste que, ocupa el 61.00 % del total a comparación de las ramas y hojas que tienen 28.49 y 10.51 % respectivamente. Al calcular cada porcentaje de los componentes fuste, ramas y hojas con una confiabilidad del 95 % los valores obtenidos del intervalo de confianza se encuentran entre 2.65, 2.22 y 1.52 respectivamente.

Mediante el promedio del peso verde de los componentes hojas, ramas y fuste, se representa el porcentaje ocupado en la biomasa aérea del árbol, es por eso que resulta conveniente tener en cuenta la distribución porcentual de cada componente expresada en la siguiente figura:

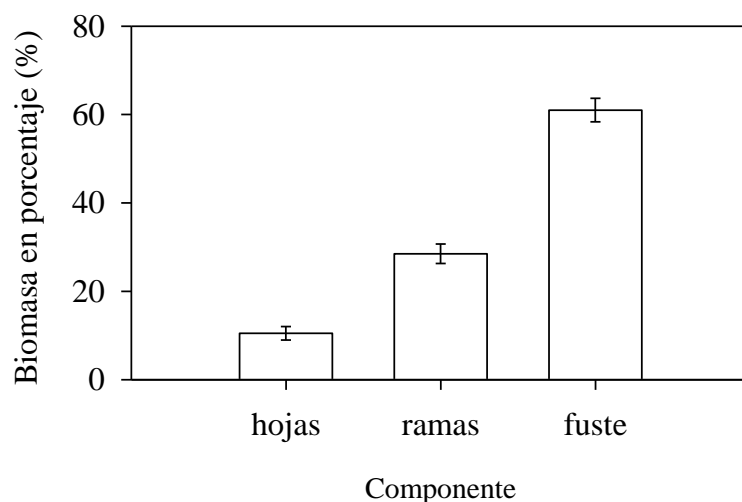


Figura 2 Porcentaje de biomasa aérea promedio por componentes hojas, ramas y fuste de *Pinus halepensis* Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

4.4. Ajuste del modelo alométrico

Los valores del parámetro b son similares en cada componente hojas, ramas y fuste 2.5804, 2.4025 y 1.8825 respectivamente y el parámetro a tiene valores muy bajos desde -4.8384 que corresponde a hojas, hasta -1.3114 en fuste, comparado con los parámetros $b = 0.0357$ y $k = 2.1962$ en el estudio realizado por Díaz *et al.*, (2007).

Generando los valores estadísticos, como el mayor error estándar que se encuentra en el componente hojas con 0.238 y el menor con 0.054 que corresponde al fuste, y para las ramas - 3.3764. El mayor CV corresponde a las hojas con 52.568, el menor CV está dado por el fuste, el FC para cada componente hojas, rama y fuste se encontraron los valores 1.183, 1.048 y 1.009 respectivamente (**Cuadro 2**).

Mediante una prueba de análisis multivariada se obtuvo el índice de asociación de Wilks el cual fue de 0.98 y sería el equivalente al coeficiente de determinación R^2 , por lo que los ajustes de la variable al modelo son similares a los resultados de Rodríguez *et al.*, (2009) quienes encontraron que el género *Pinus* obtuvo los coeficientes de determinación más alto R^2 de 0.99 para la estimación de biomasa aérea, considerando a las especies *Pinus teocote*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus montezumae*.

Méndez *et al.* (2011) reportaron que los estadísticos de ajuste de las ecuaciones alométricas indicaron que el componente mejor modelado fue el fuste en contraste con hojas y ramas. Los mejores ajustes se obtuvieron en *P. pseudostrobus* con R^2 promedio de 0.87 (en biomasa de hojas-ramas, biomasa de fuste y biomasa total), y 0.73 en *P. devoniana*.

Cuadro 2. Estadísticos del modelo alométrico para la predicción de biomasa aérea por componentes de *Pinus halepensis* Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

Componentes	Parámetros	Valor de P	E. E.	IC		t	Error	CV	FC	Wilks	Valor de P	Aprox. de F	Pr(>F)	
				-0.95	0.95									
Hojas	<i>a</i>	-4.8384	0.000	0.538	-5.940	-3.737	-8.996							
	<i>b</i>	2.5804	0.000	0.238	2.093	3.068	10.842	2.538	52.568	1.183				
Ramas	<i>a</i>	-3.3764	0.000	0.285	-3.960	-2.792	-11.841				0.9856	0.0053	592.20	0.0001
	<i>b</i>	2.4025	0.000	0.126	2.144	2.661	19.041	4.636	39.685	1.048				
Fuste	<i>a</i>	-1.3114	0.000	0.122	-1.561	-1.062	-10.761							
	<i>b</i>	1.8825	0.000	0.054	1.772	1.993	34.909	3.228	13.111	1.009				

Donde: Componentes = componentes del árbol; Parámetros = parámetros estadísticos (*a* y *b*); P = nivel de significancia; E. E. = error estándar; I. C. = intervalo de confianza; t = valor de “t”; E = error estándar (kg), CV = coeficiente de variación (%); FC = factor de corrección; Wilks = índice de asociación; P = valor de p; Aprox. de F = aproximación de F; Pr (>F) = probabilidad mayor que F.

4.5. Biomasa aérea, carbono y dióxido de carbono en *Pinus halepensis* Mill.

De acuerdo a la distribución de los valores observados de biomasa de componentes, el componente que mayor R^2 presenta con el diámetro normal es el fuste de *Pinus halepensis* Mill. con valor de 0.97 (**Figura 3C**) en comparación con las hojas y ramas 0.80 y 0.92 respectivamente (**Figura 3A y 3B**).

Para la predicción de biomasa en *Pinus halepensis* Mill. se tiene un árbol que tenga un diámetro normal de 20 cm va a tener 18.5 kg de biomasa de hojas, 48 kg en ramas y 78 kg en fuste; aunado a eso se calcularon los valores de carbono (C) acumulado que fue de 9.25 kg en hojas, 24 kg en ramas y 39 kg en fuste, así como la captura de dióxido de carbono (CO_2) que fue de 33.95 kg en hojas, 88.08 kg en ramas y 143.13 kg en fuste (**Figura 3A, 3B y 3C**).

En una hectárea el dióxido de carbono capturado representaría la cantidad de: 10.63, 27.59 y 44.84 t $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ en hojas, ramas y fuste respectivamente. Los valores obtenidos de dióxido de carbono son mayores en los componentes de ramas y fuste comparado con los que López *et al.*, (2011) cuantificaron en la misma especie, corresponden a 11.20, 21.88 y 29.15 t ha^{-1} CO_2 en hojas, ramas y fuste respectivamente.

Pacheco *et al.* (2007), realizaron la cuantificación del almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. con respecto a su potencial de acumulación de carbono, éste resultó ser de 17.9 t ha^{-1} a los seis años de edad, que corresponde a una acumulación de dióxido de carbono equivalente a 65.8 t ha^{-1} de CO_2 .

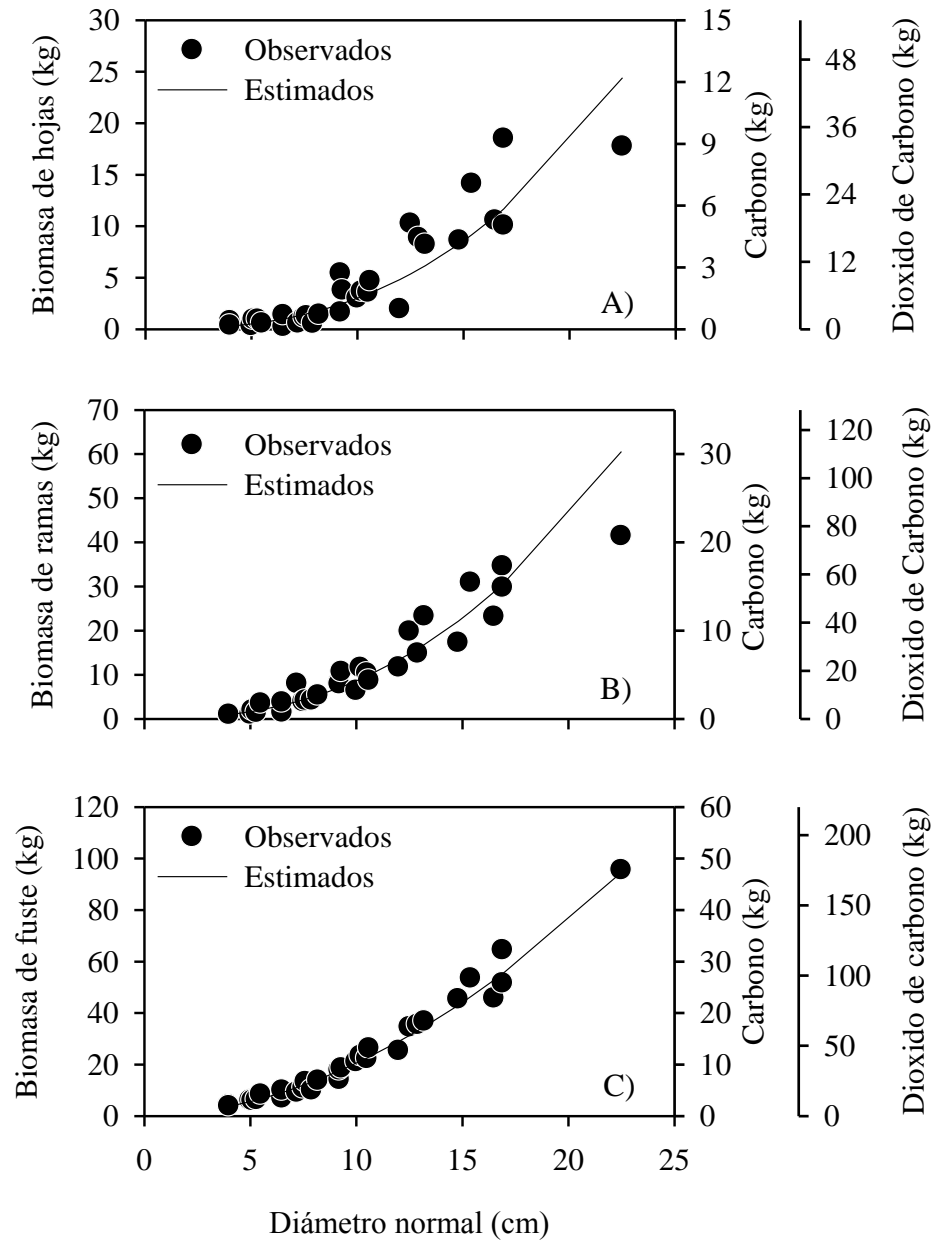


Figura 3. Biomasa aérea, carbono y dióxido de carbono de los componentes hojas (A), ramas (B) y fuste (C) de *Pinus halepensis* Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

La dispersión de los residuales en biomasa de hojas (**Figura 4A**), ramas (**Figura 4B**) y fuste (**Figura 4C**) no muestran tendencias que puedan invalidar los análisis (Acosta *et al.*, 2002), puesto que todas muestran buena distribución y no muestran heteroscedasticidad; la prueba de normalidad aceptó la H_0 .

La mayor dispersión de los residuales se presenta en el componente hojas con valores que van desde -1.48 a 0.99 kg; para los otros componentes ramas, y fuste, los residuales se encuentran entre -0.73 a 0.52 kg y 0.29 a 0.22 kg, respectivamente (**Figura 4A, 4B y 4C**).

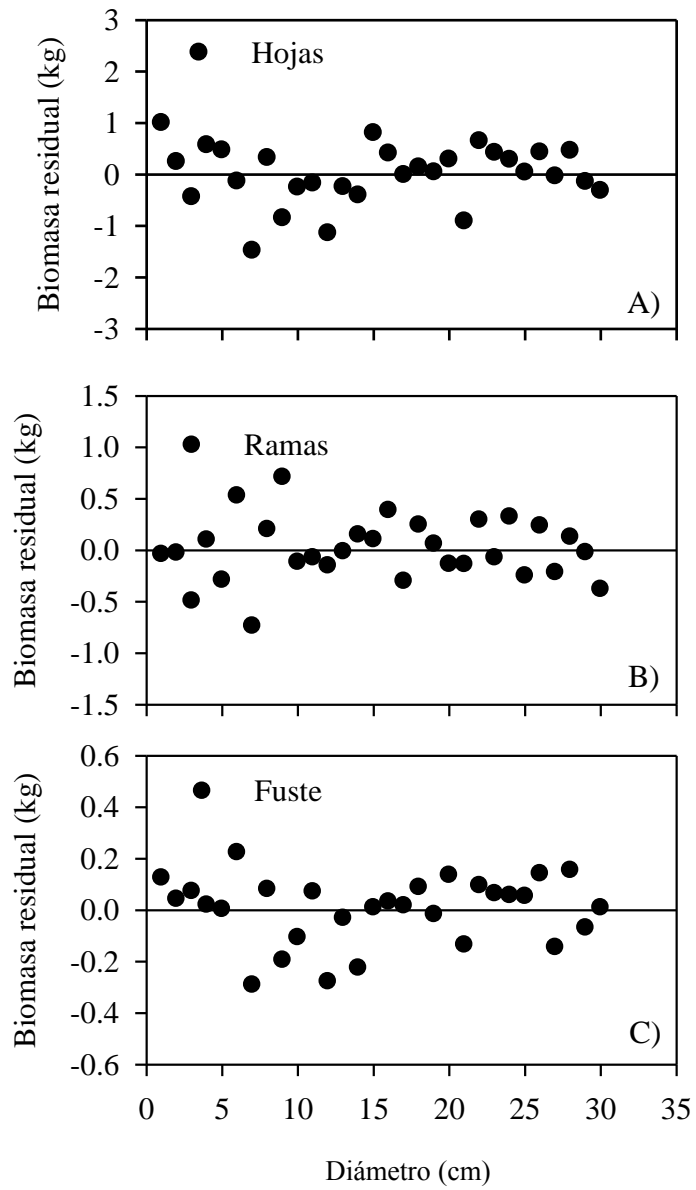


Figura 4. Residuales de componentes hojas, ramas y fuste de *Pinus halepensis* Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

4.6. Incrementos de carbono y predicción de oxígeno en *Pinus halepensis* Mill.

El modelo Schumacher se ajustó adecuadamente el cual tuvo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.75$, y 3.0817 de error estándar y alto nivel de significancia ($P < 0.0001$). En otras especies *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* (Méndez *et al.*, 2011) ajustaron el mismo modelo y obtuvieron R^2 de 0.82, pero con mayor error estándar 11.00 y el mismo nivel de significancia. Los parámetros de regresión son menores en comparación con los parámetros obtenidos en este trabajo con *Pinus halepensis* Mill. (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Estadísticos del modelo para incremento de carbono y predicción de oxígeno en *Pinus halepensis* Mill. de una plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

β_0	β_1	Sxy	CV	R^2	P
5.691	-63.7462	3.0817	98.7226	0.7514	<0.0001

Donde: β_0 y β_1 = parámetros; Sxy = error estándar; CV = coeficiente de variación (%); R^2 = coeficiente de determinación; P = significancia estadística.

La predicción del modelo de Schumacher a una edad de 25 años, la biomasa de fuste calculada sería de 23.105 kg, por lo tanto si realizamos el producto de biomasa 23.105 kg por 0.50 se tendría 11.55 kg de Carbono almacenado, en el fuste de *Pinus halepensis* Mill. (**Figura 5A**).

El mismo modelo de predicción calculó los incrementos anuales de carbono y a la edad de 25 años (**Figura 5B**) el ICA se encuentra en 2.30 kg por año, por lo que resultaría una predicción de oxígeno de 6.14 kg a esa edad, y a nivel de hectárea se tendría 19.23 t O₂ ha⁻¹ año⁻¹.

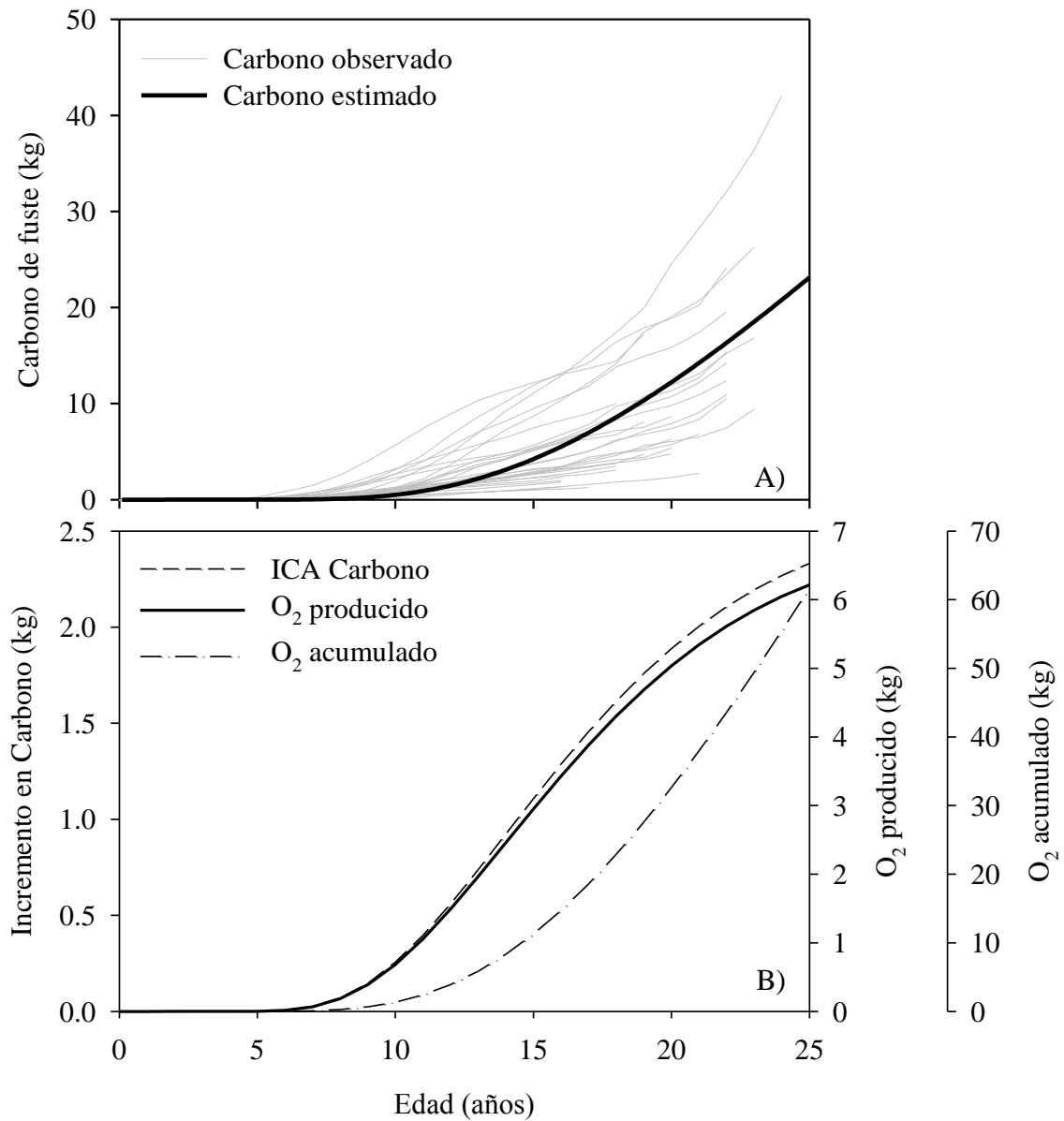


Figura 5. Carbono de fuste (A), incremento en carbono (B) y producción de oxígeno (B) de *Pinus halepensis* Mill. en la plantación del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

5. CONCLUSIONES

El ajuste del modelo alométrico multivariado es aceptable alcanzando el valor de Wilks de 0.98 equivalente a lo que se conoce como R^2 . El porcentaje de biomasa almacenado en *Pinus halepensis* Mill. se encuentra distribuido en los componentes hojas, ramas y fuste con valores de 10, 29 y 61 % respectivamente. El incremento en contenido de carbono de fuste de *Pinus halepensis* Mill. para la edad de 25 años es de 2.30 kg C año⁻¹ y produce 6.14 kg O₂ árbol⁻¹ año⁻¹, lo que representa 19.23 t O₂ ha⁻¹ año⁻¹. La producción de oxígeno está directamente relacionada con los incrementos en carbono, deduciendo que esta especie produce más oxígeno que *P. cembroides*.

6. LITERATURA

- Acosta-Mireles M., Vargas H. J., Velázquez M. A., y Etchevers B. D. J. (2002).** Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36 (6): 725-736.
- Andrasko K. (1990).** El renacimiento del globo terráqueo y los bosques: estado actual de los conocimientos. *Unasylva*. 163 (41): 3-11.
- Avenidaño H. Dulce; M. Acosta Mireles; F. Carrillo Anzures; J. D. Etchevers Barra (2007).** Estimación de la biomasa y carbono en árboles de *Abies religiosa*, mediante ecuaciones alométricas. Memoria del VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Morelia, Michoacán.
- Bidwell, R.G.S. (1993).** "Fisiología Vegetal". AGT Editor. México D.F.
- Brown S. (2002).** Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*. 116 (3): 363-372.
- 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.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) (2012).** Informe de Avances del Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Primera edición, SEMARNAT. México.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2011).** Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera. Zapopan, Jalisco; México. 53p.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2014). Fichas técnicas para la reforestación (en línea). Citado el 23 de Abril del 2014.

D. M. Alberto y J. A. Elvir. (2008). Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. 17: (1) 67-78.

De las Heras J., Alfaro-Sánchez R., Hernández-Tecles E. J., Hedo J. y Moya D. (2011). Restauración y manejo de pinares de pino carrasco tras incendio en el sureste de la península Ibérica. Albacete España. CIDEU 10: 63-79.

De Luis, M., Gricar, J., Cufar, K., Raventos, J. (2007). Seasonal dynamics of wood formation in *Pinus halepensis* Mill. from dry and semi-arid ecosystems in spainiawa. Journal International Association of Wood Anatomists. 28(4): 389-404.

Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y J.D. Etchevers-Barra. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. Madera y Bosques. 13(1):25-34.

Domínguez A., Návar J., Jiménez J., Aguirre O., (1995). *Pinus halepensis* Mill.: una alternativa para la recuperación de terrenos marginales en la sierra madre oriental del noreste de México. Investigación agraria: Sistema de Recursos Forestales. 4 (1): 32-42.

Fonseca G. W., Alice G. F., Rey 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. (1998).** Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), "Climas (Clasificación de Koppen, modificado por García)". Escala 1:1 000 000. México.
- Gayoso A, J. y Guerra C. J. (2005).** Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque (Valdivia)*. 26 (2): 33-38.
- INEGI (2000)** Carta topográfica San Antonio de las Alazanas. G14C35. Escala 1:250000. México.
- IPCC, (2013).** Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2005).** Expert meeting on emission scenarios [en línea]. Disponible en <http://www.ipcc.ch/meet/washington.pdf> [consulta: 20 Abril, 2014].
- IUCN 2013.** IUCN Red List of Threatened Species. Version (2013).2. <www.iucnredlist.org>.
- Lenntech. Citado en Abril de (2014).** Disponible en: <http://www.lenntech.es/dioxido-de-carbono.htm#ixzz2T1bdADss>.
- López O. A. L., Méndez G. J., Cornejo O. E. H., y Zermeño A. G. (2011).** Fijación de CO₂ en *Pinus halepensis* Mill en la Sierra de Zapaliname, México. *Ciencia tecnología e innovación para el desarrollo de México (PCTI). El sudcaliforniano*. La Paz B.C.S., 4. No. 94.

- 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.
- Méndez G. J., Turlan M. O. A., Ríos S. J. C. y Nájera 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.
- Montero G., Ruiz R. P., Muñoz M. (2005).** Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA: Serie forestal. 13. Madrid España.
- Nowak J. D., Hoehn R., Crane E. D. (2007).** Oxygen Production by Urban Trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry*. 33 (3):220–226.
- Oliveras I., Martínez-Vilalta J., Jimenez-Ortiz T., Lledó M. J., Escarré A. y Piñol J. (2013).** Hydraulic properties of *Pinus halepensis*, *Pinus pinea* and *Tetraclinis articulata* in a dune ecosystem of Eastern Spain. *Plant Ecology* 169: 131–141.
- Ordóñez J. A. B.; O. Masera, (2001).** Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*. Primavera, 3 (001): 3-12.
- Pacheco E F C. Aldrete A, Gómez 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.
- R Development Core Team (2008).** R: Un lenguaje y un entorno para el cálculo estadístico. R Fundación para la Computación de Estadística, Viena, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org> .

Ramírez F., Fátima N., Mendizábal H. L. C. y Alba J. L. (2012). Potencial de Captura y Almacenamiento de CO₂ en el Valle de Perote. Estudio de Caso: *Pinus cembroides* subsp. orizabensis D.K. Bailey. *Foresta Veracruzana*. 14(1):17-22.

Rodríguez L. R., Jiménez P. J., Aguirre C. Ó. A., Treviño G. J. E., Razo Z. R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México. *Revista de Sociedad y Desarrollo Sustentable*. Ra Ximhai. 5: (3) 317-327.

Sanz, J. M. H. (2000). Aspectos botánicos y ecológicos del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). Albacete. *Cuad. Soco Esp. Cien. For.* 10: 13-17.

Schlegel B. (2001). Estimación de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. 13p.

Schlegel B., Gayoso J., Guerra J. (2001). Manual de procedimientos de muestreo de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en los bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. 26 p.

Yerena-Yamallel J. L., Jiménez-Pérez J., Alanís-Rodríguez E., Aguirre-Calderón O. A. y Treviño-Garza E. J. (2011). Contenido de carbono en la biomasa aérea en diferentes sistemas de uso de suelo, en el matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 7 (2): 71-77.