

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA**

**ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE AGRONOMÍA**



**CAPTURA DE CARBONO EN UNA PLANTACIÓN DE *Pinus greggii* Engelm.,  
EN ARTEAGA, COAHUILA**

**Por:**

**JESÚS AGUILAR CERDA**

**TESIS**

**Presentada como requisito parcial para**

**obtener el título de:**

**INGENIERO FORESTAL**

**Saltillo, Coahuila, México**

**Mayo de 2009**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE AGRONOMÍA**

**DEPARTAMENTO FORESTAL**

**CAPTURA DE CARBONO EN UNA PLANTACIÓN DE *Pinus greggii* Engelm.,  
EN ARTEAGA, COAHUILA**

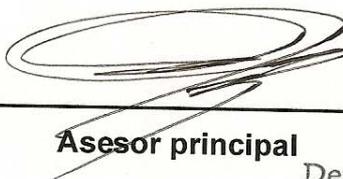
Por:

**JESÚS AGUILAR CERDA**

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

**APROBADA**

  
**Asesor principal**  
Departamento Forestal  
**Dr. Jorge Méndez González**

  
**Coordinador de la División de**  
**Agronomía**  
Coordinación División de Agronomía  
**Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo**

**Saltillo, Coahuila, México**

**Mayo de 2009**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE AGRONOMÍA**

**DEPARTAMENTO FORESTAL**

**CAPTURA DE CARBONO EN UNA PLANTACIÓN DE *Pinus greggii* Engelm.,  
EN ARTEAGA, COAHUILA**

**Por:**

**JESÚS AGUILAR CERDA**

**TESIS PROFESIONAL**

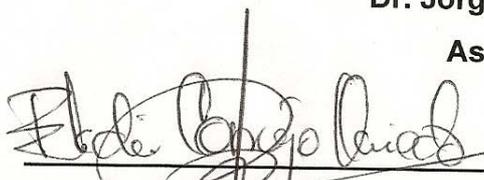
**Presentada como requisito parcial para obtener el título de:**

**INGENIERO FORESTAL**

**APROBADA**

  
**Dr. Jorge Méndez González**

**Asesor principal**



**Ph. D. Eladio H. Cornejo Oviedo**

**Asesor**



**Departamento  
Forestal**



**M.C. Salvador Valencia Manzo**

**Asesor**

**Saltillo, Coahuila, México**

**Mayo de 2009**

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación “Captura de carbono en pruebas genéticas de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila” de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con clave 02.03.0207.2364 a cargo del Ph. D. Eladio H. Cornejo Oviedo.

## DEDICATORIA

A Dios:

Por haberme dado la oportunidad de vivir y ser parte de este maravilloso mundo.

A mis padres:

Sra. Martha Cerda González

y

Sr. Silvio Aguilar López

Por ser las personas que me apoyaron durante mi formación profesional, a través de su cariño y apoyo incondicional con sus sabios consejos y por todas las cosas que me han enseñado y que me han ayudado a salir adelante.

A mi hermana:

María Guadalupe Aguilar Cerda

Con mucho cariño por todos los momentos que hemos compartido juntos y por que siempre permanezcamos unidos como hasta ahora.

A mi novia:

Amanda Jael Pedraza Reynoso

Que me apoya con su cariño y amistad incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi *Alma Mater* la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro porque a través de su cuerpo académico e instalaciones, cultivó en mí la semilla del conocimiento, que me ha permitido prepararme como profesionalista.

A todo el personal del Departamento Forestal, por brindarme su apoyo y servicio durante mi formación profesional.

De manera muy especial:

Al Dr. Jorge Méndez González, por el apoyo y amistad incondicional y por la disposición permanente de su extenso conocimiento en la dirección de este trabajo.

Al Ph. D. Eladio H. Cornejo Oviedo por su orientación inicial en el desarrollo de este trabajo, por su valiosa asesoría, por su amistad y consejos durante mi estancia en la Universidad.

Al M.C. Salvador Valencia Manzo por su valiosa amistad, sus consejos y por la revisión y aportaciones al documento.

Al Sr. Julián Charles, por el apoyo durante los trabajos de campo.

A todos mis compañeros de la generación CVI, por su gran amistad y apoyo durante mi estancia en la Universidad.

Y a todas aquellas personas que me ayudaron con su amistad, trabajo y orientación.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
RESUMEN .....	vi
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.    Objetivos .....	3
1.2.    Hipótesis .....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
2.1.    Servicios ambientales .....	5
2.2.    Fitomasa .....	5
2.3.    Captura y almacenes de carbono .....	6
2.4.    Dióxido de carbono equivalente .....	6
2.5.    Metros cúbicos de aire que limpiado por la vegetación ...	7
2.6.    Estudios de fitomasa en México .....	8
2.6.1.    Estudios de fitomasa en plantaciones forestales .....	8
2.6.2.    Estudios de fitomasa en bosques naturales .....	8
2.7.    Volumen comercial .....	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	13
3.1.    Descripción del área experimental .....	13
3.2.    Selección de la muestra y procedimiento de muestreo ...	15
3.3.    Variables evaluadas .....	16
3.3.1.    Estimación del peso seco de los componentes .....	16
3.3.2.    Estimación del volumen comercial .....	17

3.3.3.	Estimación de la fitomasa aérea y carbono almacenado .	18
3.3.4.	Selección de los modelos de volumen comercial y fitomasa por componente y total .....	20
3.3.5.	Estimación del dióxido de carbono y los metros cúbicos de aire limpiados .....	22
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	23
4.1.	Volumen comercial de <i>Pinus greggii</i> .....	23
4.2.	Fitomasa y carbono almacenado en <i>Pinus greggii</i> .....	27
4.2.1.	Fitomasa total .....	27
4.2.2.	Fitomasa de fuste comercial .....	29
4.2.3.	Fitomasa de ramas .....	31
4.2.4.	Fitomasa de hojas .....	33
4.3.	Dióxido de carbono equivalente y metros cúbicos de aire en <i>Pinus greggii</i> .....	39
5.	CONCLUSIONES .....	41
6.	RECOMENDACIONES .....	42
7.	LITERATURA CITADA .....	43
	APÉNDICE .....	49

## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Modelos probados para estimar el volumen comercial en <i>Pinus greggii</i> Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	20
Cuadro 2. Modelos probados para estimar fitomasa por componente y total en <i>Pinus greggii</i> Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ...	21
Cuadro 3. Características dasométricas de los árboles muestreados de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	23

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Localización del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	14
Figura 2. Relación diámetro normal y volumen comercial y el ajuste de los seis modelos probados, para <i>Pinus greggii</i> Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	25
Figura 3. Relación diámetro normal y volumen comercial, ajuste del modelo 6, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% M) y de los valores individuales (LC 95% I) para <i>Pinus greggii</i> Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	26
Figura 4. Relación diámetro normal y fitomasa total, ajuste del modelo 2, límites de confianza al 95% de la media (M) y de los valores individuales (I) para <i>Pinus greggii</i> Engelm. en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	28
Figura 5. Relación diámetro normal y fitomasa de fuste comercial, ajuste del modelo 4, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% M) y de los valores individuales (LC 95% I) para <i>Pinus greggii</i> Engelm. en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	30

Figura 6. Relación diámetro normal y fitomasa de ramas, ajuste del modelo 4, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% M) y de los valores individuales (LC 95% I) para <i>Pinus greggii</i> Engelm. en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	32
Figura 7. Relación entre las variables diámetro normal y altura con la fitomasa foliar observada y estimada con el modelo 9 de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	34
Figura 8. Proporción promedio de la fitomasa observada y estimada por componente de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	36
Figura 9. Relación entre Proporción de la fitomasa total (Ft) y el volumen comercial (Vc) con el diámetro normal de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	38
Figura 10. Relación entre el volumen comercial y la fitomasa total en <i>Pinus greggii</i> Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila. ....	39

## RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue determinar la fitomasa seca de los componentes hojas, ramas, fuste y total del árbol, en una plantación de 16 años de edad de *Pinus greggii* Engelm., establecida en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga, Arteaga, Coahuila.

Se seleccionaron 30 árboles que representaran todas las categorías diamétricas y de alturas existentes, libres de plagas y enfermedades y a través del muestreo destructivo se cosecharon y se separaron en todas sus partes. Para estimar la fitomasa se utilizó la relación peso seco: peso fresco, y para estimar el contenido de carbono se consideró el 50% de tejido vegetal. Se probaron y evaluaron diez modelos alométricos para estimar la fitomasa seca por componente y total del árbol y seis modelos para estimar el volumen comercial.

Se obtuvo una coeficiente de determinación ( $R^2$ ) promedio de 0.946 para el modelo de fitomasa total, de 0.9153 para el de la fitomasa del fuste comercial, de 0.890 para el de ramas, de 0.646 para el de hojas y de 0.972 para el volumen comercial. La fitomasa aérea y el carbono almacenado promedio por árbol fue de 22.84 y 11.42 kg, respectivamente, con una concentración de C promedio de 187.29 Kg por  $m^3$  de madera, del cual el 59.06% se ubica en la parte del fuste comercial, el 29.43% en las ramas, el 10.42% en las hojas y el 1.09% en los conos. Para la toda la plantación se estimó una fitomasa aérea  $30.06 t ha^{-1}$ , cuyo contenido de carbono fue de  $15.03 tC ha^{-1}$ . Se estimó un potencial de almacenamiento promedio por árbol de 45.05 Kg de  $CO_2e$ , lo que corresponde a  $55.16 t CO_2e ha^{-1}$  y cada árbol limpia en promedio  $69,351.75 m^3$  de aire, con un promedio de  $84, 908,442.93 m^3$  de aire  $ha^{-1}$ .

**Palabras clave:** *Pinus greggii*, fitomasa, ecuaciones alométricas, carbono.

## 1 INTRODUCCIÓN<sup>1</sup>

Actualmente el calentamiento global está tomando gran importancia en el mundo, debido a un aumento en la concentración de los gases conocidos como efecto invernadero (GEI), destacando el bióxido de carbono, el metano, el ozono, el óxido nitroso, el bióxido de azufre y los clorofluorocarbonos; de estos cinco gases, el dióxido de carbono es el más preocupante debido a que representa el 71.5% del efecto invernadero y que en los últimos 200 años se ha incrementado de 280 a 350 ppm en la atmósfera, aumentando a una tasa promedio de 1 ppm por año (Deans *et al.*, 1996; Rodríguez *et al.*, 2006), como producto principal de la producción de combustibles fósiles y el cambio de uso del suelo (Masera, 2000; Ordoñez *et al.*, 2001).

Los efectos de esta situación tan preocupante no es ajena a México, ya que el país se ubica dentro de las 20 naciones con mayor emisión de CO<sub>2</sub> (Masera, 2000), al contribuir con el 1.45% de las emisiones totales de C al planeta cada año (IPCC, 1995). Por lo tanto, se deben aprovechar los servicios de captura de carbono que se llevan a cabo en el proceso de la fotosíntesis que realizan las plantas dentro de los ecosistemas naturales, así como en las plantaciones forestales (Schlesinger, 1997), ya que estos actúan como secuestradores de carbono al fijar el CO<sub>2</sub> al tejido vegetal, permitiendo equilibrar las concentraciones de este elemento en la atmósfera.

Como respuesta a estas situaciones, gobiernos, empresas e individuos, han realizado diversos acuerdos desde 1992 con la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático al establecer un marco legal internacional para tratar el tema del cambio climático, acordando estabilizar las

---

<sup>1</sup> Esta tesis fue elaborada siguiendo la guía de autores de la Revista Fitotecnia Mexicana.

concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) de la atmósfera a los niveles de 1990, dando origen al Protocolo de Kioto (PK) en 1997. En él se compromete a los países industrializados a reducir sus emisiones de GEI en el período 2008 – 2012 en promedio un 5% bajo los niveles de 1990. Para lo cual el PK provee a los emisores de GEI varias alternativas para lograr la reducción de una manera económica a través de tres mecanismos de flexibilidad: Actividades de Implementación Conjunta (AIC), el Comercio de Emisiones y los Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), siendo este último el medio que financió los proyectos de desarrollo limpio y desarrollo sustentable que permite a países desarrollados y países con economías en transición cumplir ciertas metas de reducción de emisiones a través de compensaciones con países en desarrollo o “No Anexo”, como México, a cambio de créditos certificados de reducción (Ordoñez *et al.*, 2001; Calderón *et al.*, 2002; Flint, 2002; Torres y Guevara, 2002; Thorne, 2006).

A partir de este hecho, en México y en diversas partes del mundo se han desarrollado una serie de investigaciones para conocer el potencial de captura de carbono de los ecosistemas naturales y artificiales, para el desarrollo de proyectos forestales de carbono. Sin embargo, la mayoría de los estudios sobre fitomasa realizados en México se han enfocado preferentemente para ecosistemas naturales concentrándose en su mayoría en la región centro y sur del país, por tal razón, existe poca información sobre la estimación de la fitomasa en plantaciones forestales en el noreste de México, que permita inferir sobre el contenido de carbono que éstas almacenan.

El desarrollo de las plantaciones forestales comerciales ha sido la estrategia que han utilizado varios países, principalmente en los más desarrollados, para dar respuesta a la creciente demanda de productos forestales maderables, en virtud de que la población es cada vez mayor y la demanda de productos forestales se está incrementando (García *et al.*, 2005). Según la SEMARNAT (2001) en México se estima que existen 10.7 millones de hectáreas con

características de clima y suelo aptas para el establecimiento de plantaciones comerciales, de las cuáles en 1999 sólo 225 mil estaban reforestadas, motivo por el cual el presente estudio se enfoca a estudiar el papel de las plantaciones forestales en el ciclo global del carbono.

En México, *Pinus greggii* Engelm., es una especie endémica de reciente y amplio uso, por ser de rápido crecimiento, buena adaptación a varios ambientes y por su precocidad en su floración (Perry, 1991; López *et al.*, 1993). Esta especie ha mostrado una buena capacidad de sobrevivencia y desarrollo en condiciones de humedad limitada por lo cual tiene un gran potencial para ser utilizada en programas de plantaciones forestales de restauración de zonas degradadas (Vargas y Muñoz, 1988).

Actualmente se cuenta con una gran base de datos sobre estudios de volumen total, comercial, con y sin corteza, para una gran variedad de especies tanto de clima templado, de zonas áridas y de climas cálido húmedo; por que en el presente trabajo se evalúan seis modelos para estimar el volumen comercial para facilitar las operaciones de manejo y administración de los recursos con que cuenta el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), Los Lirios, Arteaga, Coahuila, de la UAAAN.

### **1.1 Objetivos**

Determinar la fitomasa aérea, carbono almacenado, el dióxido de carbono equivalente y los metros cúbicos de aire que limpian los componentes: hojas, ramas, fuste y total de la prueba de progenie de *Pinus greggii*, en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Evaluar diez modelos alométricos para estimar la fitomasa aérea, el dióxido de carbono equivalente y los metros cúbicos de aire que limpia los

componentes: hojas, ramas, fuste y total, de la prueba de progenie de *Pinus greggii*, en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Evaluar seis modelos para estimar el volumen comercial de *Pinus greggii*, en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

## **1.2 Hipótesis**

Ho: La fitomasa y el contenido de carbono es igual en los componentes hojas, ramas, fuste y total para *Pinus greggii*, en el CAESA, Arteaga. Coahuila.

Ho: La estimación de la fitomasa de los componentes: hojas, ramas, fuste y total de *Pinus greggii*, no es posible obtenerla a través de una sola ecuación alométrica.

## **2 REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Servicios ambientales**

Los servicios ambientales se pueden definir como el conjunto de condiciones y procesos naturales (incluyendo especies y genes) que la sociedad puede utilizar y que ofrecen las áreas naturales por su simple existencia. Dentro de este conglomerado de servicios se pueden señalar la biodiversidad, el mantenimiento de germoplasma con uso potencial para el beneficio humano, el mantenimiento de valores estéticos y filosóficos, la estabilidad climática, la contribución a ciclos básicos (agua, carbono y otros nutrientes) y la conservación de suelos, entre otros (Torres y Guevara, 2002).

#### **2.1.1 Fitomasa**

Muchos autores han definido a la fitomasa desde diferentes puntos de vista. Por ejemplo la fitomasa forestal es definida como el peso de materia orgánica existente en un determinado ecosistema, ya sea por encima o por debajo del suelo, se cuantifica en  $\text{ton ha}^{-1}$  de peso verde o seco y también en toneladas de peso a nivel de árbol (Brown, 1997). También la fitomasa ha sido definida como la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros), siendo las fuentes principales los campos forestales y agrícolas. Está es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego (BUN-CA, 2002).

Los estudios de la fitomasa están siendo utilizados para evaluar la productividad de los ecosistemas (Parresol, 1999), así como para observar el efecto de la vegetación en el ciclo global del  $\text{CO}_2$  (Brown, 1997). Su medición

tanto en ecosistemas naturales como en plantaciones requiere de un análisis destructivo directo (Brown *et al.*, 1989), o a través de estimaciones indirectas mediante funciones matemáticas basadas en relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo (Huxley, 1932).

### **2.1.2 Captura y almacenes de carbono**

El concepto captura de carbono es un servicio, resultado del proceso de la fotosíntesis que realizan las plantas en el que toman el CO<sub>2</sub> de la atmósfera y lo combinan con el H del agua y con ayuda de la energía solar producen los carbohidratos necesarios para crecer y reproducirse, fijando simultáneamente el C al tejido vegetal (Schlesinger, 1997; Torres y Guevara, 2002; Fragoso, 2003), con una proporción promedio del 50 % (Koch, 1989; Brown, 1997; Schlesinger, 1997; Husch, 2001).

Este servicio, normalmente integra la idea de conservar los inventarios de este elemento que se encuentran en suelos, bosques y otro tipo de vegetación y donde es inminente su desaparición así como el aumento de los sumideros de carbono a través del establecimiento de plantaciones, sistemas agroforestales y la rehabilitación de bosques degradados (Torres y Guevara, 2002).

Ordóñez *et al.* (2001) describen que esto es resultado del complejo ciclo biogeoquímico del carbono en los ecosistemas forestales, que en efecto, los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal se presentan en el follaje, las ramas, las raíces, el fuste, los desechos, los productos y el humus, mismos que se reincorporarán al ciclo por descomposición y/o quema de la fitomasa forestal.

### **2.1.3 Bióxido de carbono equivalente**

El CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) es la concentración de CO<sub>2</sub> que podría causar el mismo nivel de forzamiento radiativo de un determinado tipo y concentración de

gases de efecto invernadero. El CO<sub>2</sub>e se expresa en partes por millón por volumen, ppmv (Gohar y Shine, 2007); es decir, se trata de la unidad de medida utilizada para indicar y comparar el potencial de calentamiento global (PCG) de las emisiones de diversos gases de efecto invernadero. El dióxido de carbono es el gas de referencia con relación al cual se miden los demás gases de efecto invernadero. El CO<sub>2</sub> equivalente para un gas se calcula multiplicando las toneladas emitidas de dicho gas por su correspondiente PCG (IPCC, 2001).

Existen varios métodos para estimar la cantidad de CO<sub>2</sub> e por la vegetación; sin embargo, se ha empleado uno simple para evaluar este proceso, en el cual los datos existentes de fitomasa por hectárea (B) son multiplicados por un factor (F), que involucra el contenido de C (CC) en la fitomasa seca y la relación entre el peso de la molécula de CO<sub>2</sub> (44) y el peso del átomo de C (12) (Rojo *et al.*, 2003), de manera que se obtiene una expresión de la siguiente forma:

$$CO_2 = B * F$$

Donde:

$$F = CC * 44/12$$

#### **2.1.4 Metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de aire limpiado por la vegetación**

Los metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de aire son un beneficio que brindan las plantas como resultado del secuestro carbono, reduciendo así, las concentraciones de este gas en la atmósfera, causantes del calentamiento global (Montes y García, 2005).

Actualmente el desarrollo de estudios enfocados a estudiar los m<sup>3</sup> de aire que es capaz de limpiar un ecosistema forestal o a nivel de individuos son muy escasos, obteniéndose la metodología y las primeras estimaciones por la Fundación de Chile para el Ministerio de Educación (Montes y García, 2005).

### **2.1.5 Estudios de fitomasa en México**

#### **2.1.6 Estudios de fitomasa en plantaciones forestales**

En México ya se han realizado diversos estudios para determinar la fitomasa y carbono almacenado en plantaciones forestales. Por ejemplo, Návar *et al.* (2001) evaluaron seis modelos matemáticos analizando su bondad de ajuste, para estimar la biomasa total y por componentes, en cinco especies de pino de plantaciones forestales en Durango, México. Observando que las ecuaciones desarrolladas con modelos de regresión similar no relacionada proveen las estimaciones más eficientes y con menor sesgo para cada especie y para el grupo de especies. Alba *et al.* (2007) evaluaron el contenido de C en una plantación de *Pinus greggii* localizada en el municipio de Naolico, Veracruz, compuesta por la progenie cuya fuentes de origen son Querétaro, Hidalgo y Nuevo León, obteniendo un total de 4272.90 kg y un contenido de C promedio por árbol de 57.91, 70.65 y 90.95 para cada procedencia respectivamente. Pacheco *et al.* (2007) estimaron el potencial de almacenamiento de C en la biomasa aérea de una plantación de seis años de edad de *Pinus greggii* en el estado de Hidalgo, con una muestra de 20 árboles. La biomasa total fue de 35.2 t/ha y el carbono almacenado de 17.9 t/ha, lo que equivale a 65.8 t CO<sub>2</sub>e/ha. A nivel árbol, la biomasa aérea promedio fue de 8 Kg (4.1 Kg en fuste [51%], 2 Kg en follaje [25%] y 1.9 Kg en ramas [24%]) y la concentración de carbono en el tejido vegetal fue de 51%.

#### **2.1.7 Estudios de fitomasa en bosques naturales**

También se han realizado algunos estudios sobre fitomasa para bosques naturales en donde la dinámica de su establecimiento y desarrollo son muy diferentes a los de una plantación. Por ejemplo:

Díaz *et al.* (2007) determinaron la biomasa y carbono de *Pinus patula* Schl. et Cham., en un bosque en Tlaxcala, usando datos de 25 árboles; la

concentración de carbono se determinó a través de análisis de laboratorio, obteniendo así 52,21% de carbono en el follaje, 49,47% en las ramas y 49,26% en el fuste, con una concentración promedio por árbol fue de 50,31%. Para estimar la biomasa generaron la ecuación  $B = 0.0357 * DN^{2.6916}$ , y para estimar el carbono la ecuación fue  $CC=0.021*DN^{2.6451}$ , con coeficientes de determinación para ambas de 0.98.

Pimienta *et al.* (2007) estimaron la biomasa y contenido de carbono en bosques de *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México, obteniendo 98.128 t/ha y 51.12 t/ha, respectivamente; con datos de 633 árboles y cinco modelos propuestos por Sanquetta *et al.* (2002). Obtuvieron un ajuste de 0.99 y un error estándar de 11.69, con los resultados estimados se elaboraron tablas de predicción de biomasa y carbono almacenado.

Rodríguez *et al.* (2006) aplicaron el modelo alométrico  $B=a_0*DN^{a1}$ , para estimar el carbono almacenado en las especies principales del bosque de niebla en la reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas; empleando solamente la información dasométrica obtenida de los fustes, a través de un muestreo al azar con sitios de 0.1 ha; el modelo presentó una  $R^2$  de 0.95 y los resultados de biomasa seca y carbono almacenado fueron  $107.15 \text{ t ha}^{-1}$  y  $56.7 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente.

Méndez *et al.* (2005) reportan que el modelo de Meyer Modificado presentó el mejor ajuste para estimar biomasa fustal en *Pinus cooperi* var *ornelasi* / Mtz ( $R^2=0.9692$ ) y *P. leiophylla* Schl. & Cham. ( $R^2=0.9535$ ), en El Salto, Durango; el modelo Berkout y el de variable combinada logarítmica mostraron los menores ajustes. Así mismo, observaron que la densidad con corteza en estas especies fue de  $0.3985 \text{ g/cm}^3$  en *P. cooperi* y  $0.4734 \text{ g/cm}^3$  en *P. leiophylla* Schl. & Cham., registrándose variaciones entre árboles, especies y con la edad.

Fragoso (2003) con los datos de volumen en m<sup>3</sup> estimó el contenido de C en la biomasa aérea de un bosque natural en el predio “Cerro Grande” municipio de Tancítaro, Michoacán obteniendo para *Abies religiosa* (HBK) Schlecht. et Cham. 15, 800 tC, para *Pinus pseudostrobus* Lindl. 5, 433 tC, para *Quercus laurina* Humb. et Bonpl. 3,040 tC y para una agrupación de hojosas 367 tC, sumando una cantidad de 24, 640 tC en 388.750 ha.

Zamora (2003) en un bosque de pino del ejido “La Majada” Municipio de Peribán, Michoacán, estimó con los datos de vol ha<sup>-1</sup> y volumen total, el C almacenado en la biomasa aérea, reportando para el género *Pinus* un almacén de 22,355 tC, para el género *Abies* 25,304 tC, para *Quercus* 1,292 tC y para otras hojosas 6,379 tC, para una superficie de 1,010 ha.

Acosta *et al.* (2002) evaluaron diversos modelos de biomasa con la variable diámetro a la altura del pecho para determinar la biomasa aérea en seis especies en los bosques mesófilos de montaña de la Sierra Norte de Oaxaca, con el objetivo de ajustar un solo modelo a las especies. La tendencia de los valores de biomasa fue similar en todas las especies; sin embargo, tres tuvieron una tendencia menor a las otras, formándose dos subgrupos con características similares en los parámetros de regresión debido a su similitud en el potencial de crecimiento y arquitectura de copa.

Acosta *et al.* (2001) diseñaron una metodología para estimar el C orgánico del suelo y las raíces en 26 ecosistemas forestales y agrícolas naturales de terrenos con pendientes que van de 25-60%, en la región Mazateca, Mixe y Cuicateca en Oaxaca; el suelo mineral en sistemas agrícolas en las dos primeras regiones resultó ser el almacén más grande de C (50%) y en la tercera el C en raíces fue el mayor. La mayor concentración de C en las raíces se encuentra en los primeros 30 cm, con un aporte inferior al 5% del C total subterráneo.

Ordóñez *et al.* (2001) estimaron el potencial de captura de carbono en el bosque templado de Nuevo San Juan, Michoacán, a través del modelo de simulación CO<sub>2</sub>Fix y utilizando información dasométrica y las curvas de crecimiento. Resultado: 1.5 Mega toneladas de C a los 50 años en una superficie de 8,870 ha e incrementándose a 1.9 Mega toneladas de C ha<sup>-1</sup> a los 250 años, es decir, 217 tC ha<sup>-1</sup> de los cuales 94 tC ha<sup>-1</sup> provienen del suelo, 74 tC ha<sup>-1</sup> de la biomasa y 49 tC ha<sup>-1</sup> son de productos maderables.

Castellanos *et al.* (1996) en un rodal natural de *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región de Chignahuapan - Zacatlán, Puebla, estimaron la acumulación, distribución e incremento de biomasa aérea mediante modelos de la forma  $\ln Y = a + b \ln X$ . La biomasa aérea total fue de 165.9 Mega gramos ha<sup>-1</sup>, de la cual 72% se ubicó en madera del fuste; 16% en corteza del fuste; 9% en ramas; y 3% en follaje. El incremento anual de biomasa aérea total fue de 6.9 Mega gramos ha<sup>-1</sup>.

## 2.2 Volumen comercial

Una de las actividades más importantes en biometría forestal es la estimación de volumen de árboles, cuyo objetivo es el de cuantificar el recurso forestal; siendo estimado a través de muestreos que permiten estimar el volumen de árboles individuales a través de variables predictoras como diámetro normal y altura total (Keller *et al.*, 2006).

Las ecuaciones que predicen el volumen de árboles individuales con base en algunas variables dependientes de fácil medición en el campo (diámetro normal y altura total), son herramientas fundamentales en nuestros días para la estimación de existencias en bosques y plantaciones comerciales, a través de esto, se convierten en un punto básico en la toma de decisiones para la gestión forestal, debido a que mayormente los bosques y plantaciones forestales son

valorados económicamente en función de la cantidad (volumen) de madera que éstos producen (Salas *et al.*, 2005).

La necesidad de disponer de ecuaciones que permitan la estimación de valores precisos de las existencias del recurso forestal es de importancia en manejo forestal y constituyen una forma para conocer los valores de fitomasa seca y su correspondiente carbono almacenado para la elaboración de proyectos de servicios ambientales tales como captura de carbono y servicios hidrológicos (Méndez *et al.*, 2005).

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

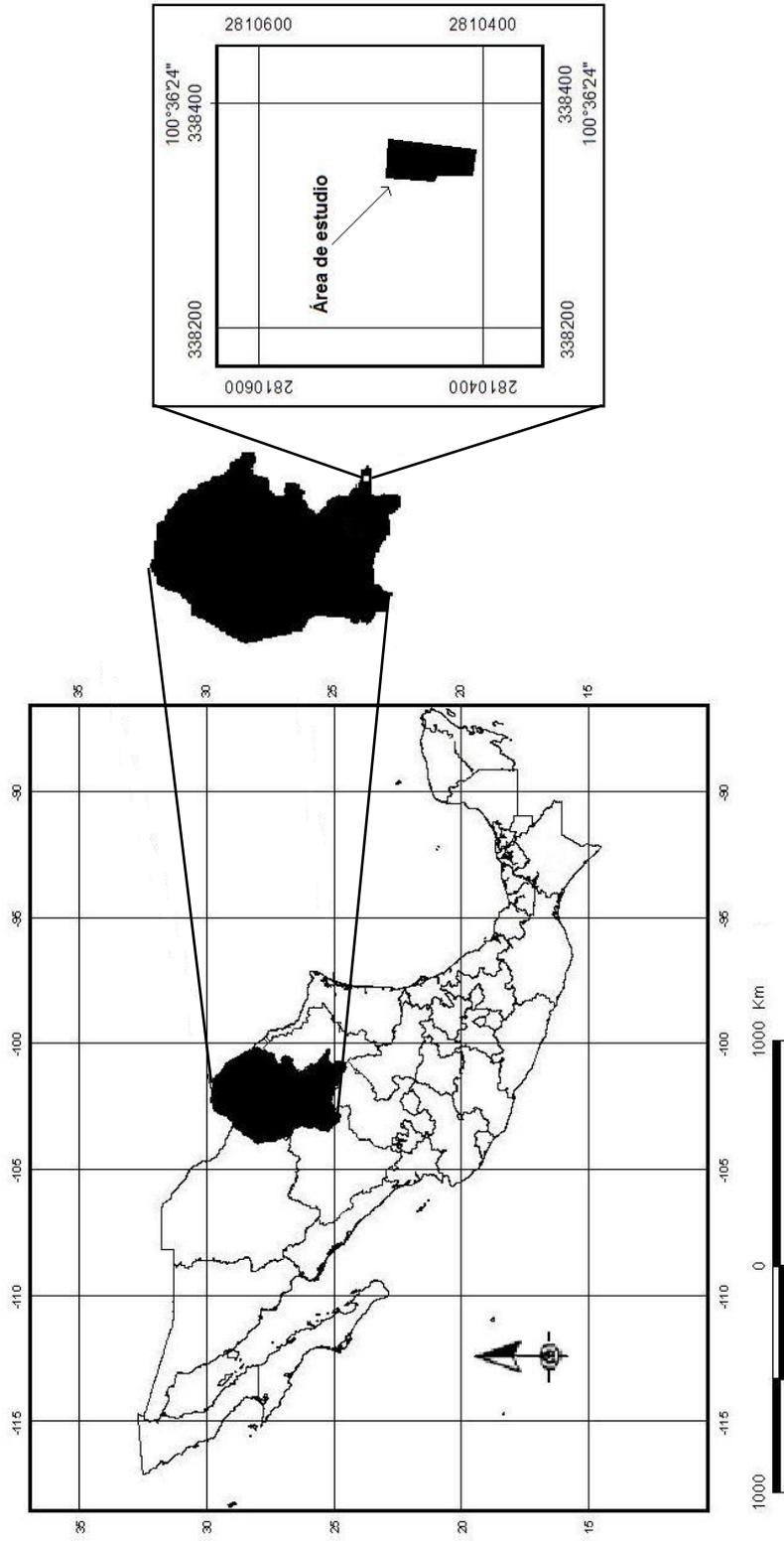
#### 3.1 Descripción del área experimental

El área de estudio se localiza en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Arteaga, Coahuila. México; a 45 km de Saltillo, entre las coordenadas geográficas 25° 23' – 25° 24' de latitud Norte y 100° 36' – 100° 37' de longitud Oeste, a una altitud de 2280 msnm (INEGI, 2000) (Figura 1).

El área se encuentra en la región hidrológica Bravo - Conchos (RH24) y la cuenca hidrológica Río Bravo - San Juan (24B) (SPP, 1983). Cuenta con la influencia de dos arroyos intermitentes, que nacen en la parte alta de la Sierra Rancho Nuevo (INEGI, 2000). La geología del área está constituida por rocas de origen sedimentario, con depósitos de aluvión (CETENAL, 1976). Los suelos predominantes son los feozem calcáricos y en menor proporción las rendzinas, con una textura fina, que se encuentran en fase petrocálcica (CETENAL, 1977).

El clima del área, de acuerdo con la estación meteorológica de San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Coahuila, ubicada a 12 km del CAESA, se clasifica como templado con verano fresco y largo, con una temperatura media anual de 13.6° C; la precipitación media anual es de 521.2 mm; siendo los meses de junio a septiembre los de mayor precipitación y los meses más secos son febrero y marzo (CONAGUA, 2000). La fórmula climática del área de estudio es Cb(X')(Wo)(e)g (García, 1987).

El área de estudio corresponde a un ensayo de progenies de 16 años de edad, en una superficie de 0.2208 hectáreas; cuyo propósito es la producción de semilla mejorada, en la que se encuentran presentes 22 familias de *Pinus greggii* procedentes de Los Lirios, Arteaga, Coahuila y un testigo cuyo origen geográfico es La Colorada, Arteaga, Coahuila (Vela, 2002).



**Figura 1. Localización del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila.**

### **3.2 Selección de la muestra y procedimiento de muestreo**

Para realizar la estimación de la captura de carbono en la plantación de *Pinus greggii*, del presente estudio, la selección de los árboles muestra se realizó considerando el plan de aclareos diseñado por Gutiérrez (2008), que describe los criterios, el número y los árboles a extraer en los aclareos que se aplicarán durante un periodo de dos a tres años para realizar la conversión paulatina del ensayo de progenie de *Pinus greggii* en el CAESA a huerto semillero para la producción de semilla mejorada.

Se seleccionaron un total de 30 árboles libres de plagas y enfermedades, y que representan todas las categorías de diámetro y de altura existentes. Desde el punto de vista genético, se descartó la posibilidad de analizar el desempeño de las 21 progenies existentes en el ensayo debido a limitantes en el número de muestras por familia. Los árboles muestra fueron extraídos durante dos sesiones en un periodo no mayor a tres meses para evitar variaciones por cambios en el follaje y contenido de humedad.

La metodología desarrollada siguió los procedimientos descritos por Nívar (2001) y Gayoso *et al.* (2002), que consistió en ubicar en campo los árboles seleccionados, los cuales fueron marcados con pintura de color verde para su fácil ubicación y separación de los que serán árboles semilleros. Posteriormente, se midió en pie a cada árbol el diámetro basal, el diámetro a 0.30 m, el diámetro normal (1.30 m) y el diámetro en donde inicia la copa utilizando cinta diamétrica, el diámetro de copa con flexómetro de 5 m y el número de verticilos a través del conteo visual, la altura total y la longitud del fuste comercial (considerándose éste hasta los 5 cm de diámetro) se midieron con cinta métrica de 20 m, después de haber sido derribados; toda la información se registró en el formatos previamente elaborados.

Con el uso de la motosierra los árboles fueron cortados mediante el método de derribo direccional para evitar daños al arbolado residual ya que serán futuras fuentes de semilla. Con el objeto de evitar la pérdida de los componentes vegetales durante el derribo, se colocó una lona sobre el suelo en donde se recostó el árbol para su posterior seccionado.

Una vez caído el árbol, fue separado en sus cuatro componentes: hojas, ramas, conos y fuste; cada componente se pesó en su totalidad en estado fresco con una báscula de 12 kilogramos con aproximación a 50 gramos. Del peso total de cada componente se colectó solamente una muestra aproximada al cinco por ciento tratando que fuese lo más representativa. Para el caso del fuste éste se dividió en secciones de 1 m de longitud y a cada uno se le midió el diámetro promedio de cada lado con cinta diamétrica, así como su peso verde. De cada árbol se colectó una muestra de tallo de 20 cm de longitud. Todas las muestras se empaquetaron en bolsas de papel No. 30 con una clave que identificaba al árbol y el nombre del componente, se sellaron con cinta adhesiva y se guardaron en bolsas de plástico para su manejo y traslado a laboratorio.

### **3.3 Variables evaluadas**

#### **3.3.1 Estimación del peso seco de los componentes**

El peso seco de cada componente se obtuvo en laboratorio secando por separado todas las muestras de cada componente en estufas de secado de tipo convencional, a una temperatura promedio de  $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar peso constante o anhidro, para lo cual se monitoreó el peso de cada muestra cada tercer día con una báscula de precisión al gramo marca Ohaio, con capacidad de 2610 gramos.

### 3.3.2 Estimación del volumen comercial

Para la estimación del volumen del fuste comercial se consideró la altura comercial. Es decir hasta donde el diámetro fuera igual a 5 cm. El volumen se obtuvo a través de la suma de los volúmenes individuales de cada sección del fuste en que fue dividido y que fueron estimados con la siguiente fórmula:

$$V = \left( \frac{D1 + 4*DM + D2}{6} \right) * L$$

Donde:

V= Volumen de Newton (m<sup>3</sup>)

D1= Área Basal del diámetro menor (m<sup>2</sup>)

DM= Área basal del diámetro medio (m<sup>2</sup>)

D2= Área basal del diámetro mayor (m<sup>2</sup>)

L= Longitud (m)

Como complemento de este estudio, para estimar más eficientemente el volumen comercial en campo, se estimó el coeficiente mórfico, mismo que se obtuvo con el volumen comercial y el volumen aparente utilizando la siguiente fórmula:

$$CM = \frac{Vc}{Va}$$

Donde:

CM= Coeficiente mórfico.

Vc= Volumen comercial (m<sup>3</sup>).

Va= Volumen aparente (m<sup>3</sup>).

Con la aplicación de este coeficiente mórfico es posible obtener el volumen comercial de un árbol a partir del diámetro normal y la altura total.

### 3.3.3 Estimación de la fitomasa aérea y carbono almacenado

La fitomasa seca de la parte aérea del árbol se estimó para los componentes hojas, ramas, fuste comercial y para el total. Para el caso del fuste comercial se consideró la altura comercial, es decir hasta donde el diámetro fuera igual a 5 cm, agregando la parte de desecho del tallo al componente ramas. Utilizando los valores de peso verde y peso seco registrados y con las ecuaciones propuestas por Schelegel *et al.* (2002) se estimó la fitomasa seca con las siguientes ecuaciones:

$$CH = \frac{(Phs - Pss)}{Pss} * 100$$

Donde:

CH= Contenido de humedad (%).

Phs= Peso húmedo submuestra (gr).

Pss= Peso seco submuestra (gr).

Con el contenido de humedad se calculó la proporción del peso húmedo que corresponde a fitomasa.

$$B = \frac{PhBt}{1 + (CH/100)}$$

Donde:

B= Fitomasa seca (gr).

PhBt= Peso húmedo total de fitomasa (gr).

CH= Contenido de humedad (%).

Con los valores de fitomasa por componente y total se calcularon los valores de carbono, multiplicando por el factor de conversión de carbono de 0.5, considerando una concentración de carbono en el tejido vegetal promedio del 50% (Koch, 1989; Brown, 1997; Schlesinger, 1997; Husch, 2001).

Con del peso seco en gramos y el volumen en cm<sup>3</sup> de las muestras de fuste, se obtuvo la densidad promedio para la especie, a través de la siguiente fórmula:

$$D = \frac{Ps}{V}$$

Donde:

D= Densidad básica (gr cm<sup>-3</sup>).

Ps= Peso seco (gr).

V= Volumen (cm<sup>3</sup>).

Utilizando la densidad básica de la madera y conociendo el volumen es posible conocer la proporción que fitomasa seca que existe en un determinado volumen (Ketterings *et al.*, 2001) y para extenderlo a fitomasa total se estimó la proporción que existe entre la fitomasa total y volumen comercial, con la siguiente fórmula:

$$P = \frac{Bt}{Vc}$$

Donde:

P= Es la proporción del volumen comercial con respecto a la fitomasa.

Bt= fitomasa total (ton).

Vc= Volumen comercial (m<sup>3</sup>).

### 3.3.4 Selección de los modelos de volumen comercial y fitomasa por componente y total

Con los volúmenes obtenidos de cada árbol se probaron seis modelos propuestos por Gayoso et al. (2002) y Sanquetta *et al.* (2002), para estimar el volumen comercial, empleando las variables diámetro normal y la altura total (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelos probados para estimar el volumen comercial en *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

No.	Modelos
1	$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 (D^2 + H)$
2	$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2 + \beta_3 (D^2 H)$
3	$Y = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 (D^2 H)$
4	$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 H$
5	$Y = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 H + \beta_3 (D^2 H)$
6	$Y = \beta_0 + \beta_1 D^2$

Donde: Y= Volumen comercial de *Pinus greggii* Engelm. (m<sup>3</sup>); D= Diámetro normal (cm); H= Altura total del árbol (m);  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$ = Parámetros de la regresión.

Para la estimación de la fitomasa seca por componente y total, se probaron diez ecuaciones alométricas propuestas por la FAO (1999), (Cuadro 2).

Cuadro 2. Modelos probados para estimar fitomasa por componente y total en *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

No.	Modelos
1	$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2$
2	$LnY = \beta_0 + \beta_1 D$
3	$LnY = \beta_0 + \beta_1 LnD$
4	$Y^{0.5} = \beta_0 + \beta_1 D$
5	$Y = \beta_0 + \beta_1 D^2 H$
6	$LnY = \beta_0 + \beta_1 D^2 H$
7	$Y^{0.5} = \beta_0 + \beta_1 D^2 H$
8	$LnY = \beta_0 + \beta_1 LnD + \beta_2 LnH$
9	$Y^{0.5} = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 H$
10	$Y^{0.5} = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 H + \beta_3 D^2 H$

Donde: Y= Fitomasa (Kg); D= Diámetro normal (cm); H= Altura total del árbol (m); Ln= Logaritmo natural;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$ = Parámetros de la regresión.

La selección y prueba de los modelos de volumen comercial y fitomasa por componente y total del árbol se realizaron utilizando el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión 9.1 (Apéndice 1, 2 y 3), a través del siguiente procedimiento:

- a) Primeramente se analizó cada modelo con los datos de los 30 árboles de la muestra.
- b) Se analizó la gráfica de los residuales estudentizados y todos aquellos datos que salieran de los límites establecidos se eliminaron de la base de datos hasta que mostraran una distribución uniforme en los residuales.

- c) Los parámetros del modelo definitivo se estimaron mediante el procedimiento Proc Reg del paquete estadístico SAS.
- d) La elección entre los modelos se fundamentó en los siguientes criterios:
  - a) el valor mínimo del cuadrado medio del error (C.M.E.), b) el valor máximo del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), c) análisis de los residuales estudentizados (r-Student), d) análisis de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk, e) el valor mínimo de los predichos residuales de la sumatoria de cuadrados (PRESS) y (ABSPRESS), f) el número de observaciones (n) y g) la simplicidad del modelo.

### **3.3.5 Estimación del dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) y los metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de aire limpiados**

El dióxido de carbono equivalente se estimó mediante la proporción entre el peso de la molécula de CO<sub>2</sub> y el peso del átomo de carbono que la compone, obteniendo la relación (44/12=3.67). De manera que multiplicándose los valores de kg de carbono por 3.67 se obtiene los valores de CO<sub>2</sub> acumulado en Kg por componente y total (Montero *et al.*, 2004).

Para estimar la cantidad de m<sup>3</sup> de aire que es capaz de limpiar cada árbol, se dividió la cantidad de carbono en gramos presente por metro cúbico de madera entre el peso del carbono en un metro cubico de aire (0.177), para el fuste y para el cálculo en las hojas, ramas y total se consideró la proporción que existe entre los kg de carbono y los m<sup>3</sup> de aire limpiados por el fuste y por regla de tres simple se obtuvo los valores en cada componente (Montes y García, 2005).

Considerando que el CO<sub>2</sub>e y los m<sup>3</sup> de aire limpiados son proporcionales a la fitomasa y al carbono almacenado se utilizaron los modelos de fitomasa que presentaron los mejores parámetros estadísticos y se ajustaron las ecuaciones para estimar los valores de CO<sub>2</sub>e y los m<sup>3</sup> de aire limpiados por componente y para el total.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con las características dasométricas generales y los estadísticos básicos de los 30 árboles de *Pinus greggii* que fueron analizados en el presente estudio, tuvieron un rango del diámetro normal comprende de 4.9 a 15.3 cm y la altura desde 4.2 – 8.71 m (Cuadro 3), es decir, se encuentran presentes todas las categorías diamétricas y de altura existentes en el ensayo de progenies.

Cuadro 3. Características dasométricas de los árboles muestreados de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Variable	Media	E.E.	C.V.	Mín.	Máx.
Altura total (m)	6.931	0.235	0.186	4.200	8.710
No. Entrenudos	18.567	0.600	0.177	13.000	25.000
Diámetro basal (cm)	14.877	0.715	0.263	8.000	21.200
Diámetro a 0.30 m (cm)	12.857	0.644	0.274	6.100	18.500
Diámetro normal (cm)	10.630	0.571	0.294	4.900	15.300
Diámetro de copa (m)	2.808	0.148	0.288	1.220	4.140
Volumen total (m <sup>3</sup> )	0.039	0.004	0.628	0.007	0.081
Volumen comercial (m <sup>3</sup> )	0.037	0.005	0.669	0.003	0.080
Densidad básica g/cm <sup>3</sup>	0.424	0.006	0.083	0.346	0.505
<b>Fitomasa ramas (kg)</b>	<b>6.384</b>	0.766	<b>0.657</b>	<b>1.408</b>	<b>16.012</b>
<b>Fitomasa hojas (kg)</b>	<b>2.192</b>	0.263	<b>0.657</b>	<b>0.376</b>	<b>5.831</b>
<b>Fitomasa conos (kg)</b>	<b>0.260</b>	0.072	<b>1.515</b>	<b>0.000</b>	<b>1.689</b>
<b>Fitomasa fuste comercial (kg)</b>	<b>14.006</b>	1.771	<b>0.693</b>	<b>1.245</b>	<b>34.117</b>
<b>Fitomasa total (kg)</b>	<b>22.842</b>	2.759	<b>0.661</b>	<b>3.159</b>	<b>54.040</b>

E.E. = Error estándar; C.V. = Coeficiente de Variación; Mín. = Mínimo; Max. = Máximo.

### 4.1 Volumen comercial de *Pinus greggii*

El mejor modelo que se ajustó al volumen comercial para *Pinus greggii* fue el 6, dado que presentó una  $R^2= 0.9578$ , C.M.E.= 0.000027, una  $n= 29$  y los valores de PRESS= 0.00085 y ABSPRESS= 0.1295. Así como la mejor distribución de los residuales estudentizados y el valor más alto en la prueba de normalidad (0.77) (Apéndice 4).

Otros modelos que también destacan son el 1 y el 2 por sus bajos valores del C.M.E. (0.000026 y 0.000006, respectivamente) y altos del  $R^2$  (0.9604 y 0.9897, respectivamente), el primero con un  $n= 29$  observaciones y el segundo con un  $n= 24$ , dichos valores son cercanos a los del modelo seleccionado, pero por diferencias pequeñas en los decimales de los estadísticos, se descartó el modelo 2 por presentar una distribución regular en los residuales estudentizados con un tamaño de muestra muy reducido, en tanto que el modelo 6 superó al modelo 1 debido a que cuenta con una estructura muy sencilla y sus estadísticos son casi idénticos con los obtenidos por el modelo 1 (Apéndice 4).

La curva de volumen comercial con los seis modelos probados presenta una tendencia ligeramente convexa en los modelos 1, y 6, lo cual concuerda con el análisis sobre sus estadísticos antes mencionados, siendo más pronunciada en los modelos 2, 3 y 5, en tanto que el modelo 4 muestra una tendencia a ser cóncava subestimando el volumen en la categoría diamétrica de 5 y de 15 (Figura 2).

Con el modelo 6, se estimó el volumen comercial del el ensayo de progenie de *Pinus greggii*, presentando a sus 16 años de edad de plantación un volumen comercial de  $10.732 \text{ m}^3$  lo que corresponde en promedio a  $48.61 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , es decir  $0.041 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1} \pm 0.0027 \text{ m}^3$ . Se puede apreciar que *Pinus greggii* es una especie con una gran capacidad para adaptarse a diversas condiciones debido a que existe una proporción similar al volumen obtenido en una plantación de seis años de edad de esta misma especie en una región de Puebla al obtener valores promedio de  $0.0191 \text{ m}^3$  (López *et al.*, 2004), correspondiente al 37.5% en relación a la edad con éste estudio.

Para las estimaciones del volumen comercial en campo, se determinó el coeficiente mórfico para esta especie y para esta región, con un valor promedio de 0.528, con un rango que va de 0.480 a 0.576 (Apéndice 5).

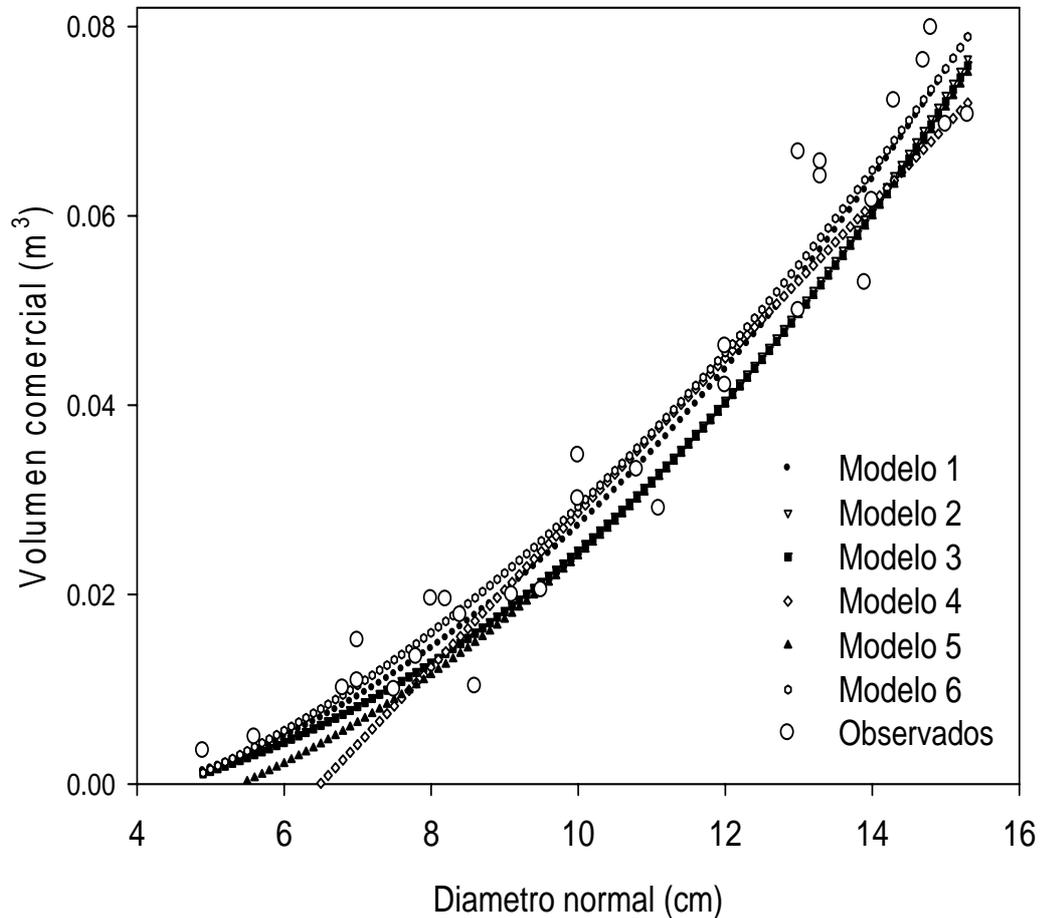


Figura 2. Relación diámetro normal y volumen comercial y el ajuste de los seis modelos probados, para *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

La curva de volumen comercial presenta una forma lineal con una ligera tendencia a ser cóncava, cuyos límites de confianza tanto de la media como los individuales muestra un rango mayor cuando en diámetro va de 4 hasta 10 cm, posteriormente, los límites se observan uniformes hasta los 13 cm de diámetro normal, después los límites de confianza para la media se vuelve a incrementar (Figura 3).

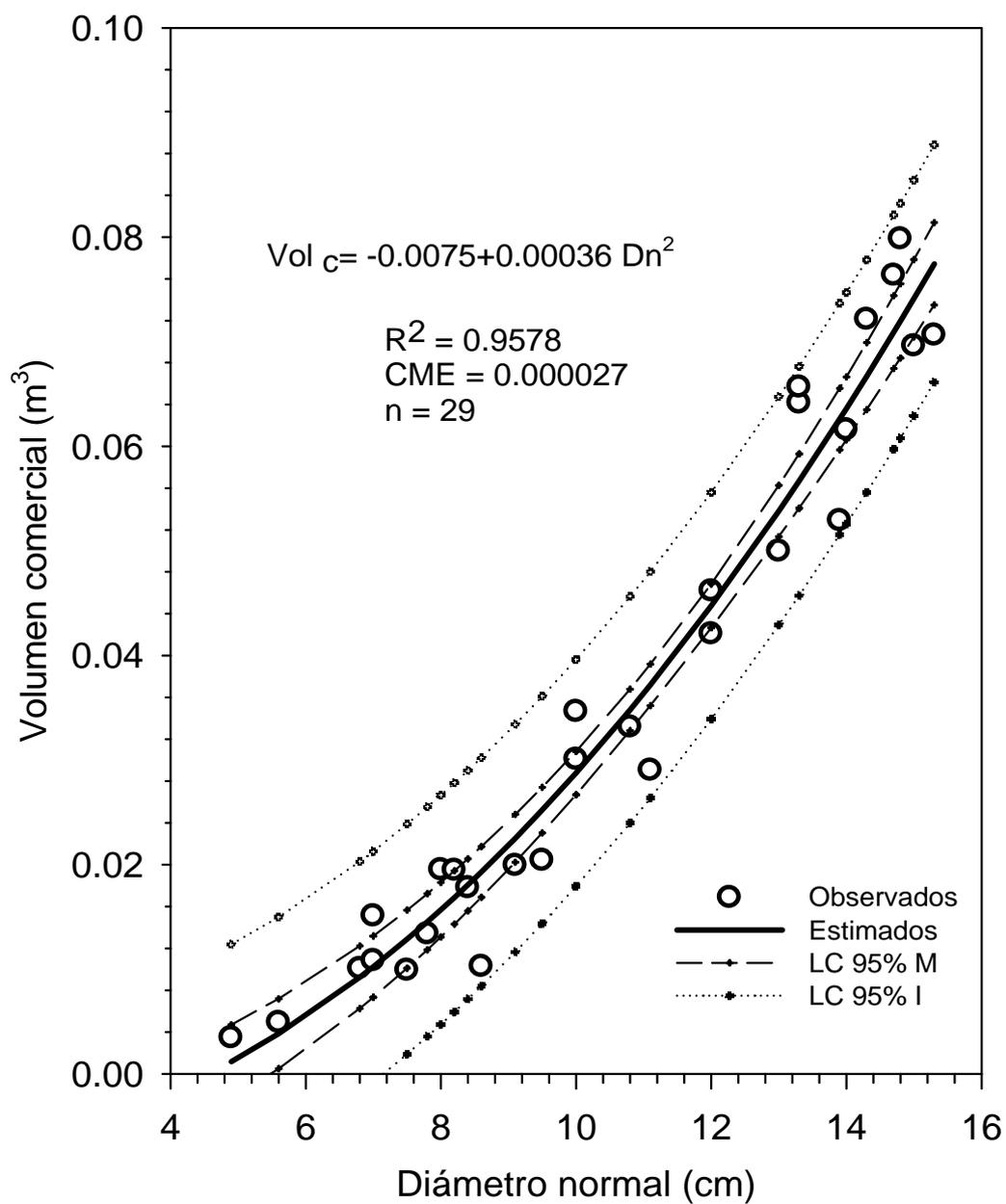


Figura 3. Relación diámetro normal y volumen comercial, ajuste del modelo 6, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% M) y de los valores individuales (LC 95% I) para *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

## 4.2 Fitomasa y carbono almacenado de *Pinus greggii*

### 4.2.1 Fitomasa total

El mejor modelo que se ajustó a la fitomasa total para *Pinus greggii* fue el 2, dado que presentó buenos estadísticos ( $R^2= 0.9493$ , C.M.E.= 11.8973, un  $n= 28$  y los valores más bajos de PRESS= 367.65 y ABSPRESS= 75.088). Además, los residuales estudentizados presentaron una buena distribución y cumple con la prueba de normalidad (0.6210) (Apéndice 6).

Otros modelos que también destacan son el 10 y el 4 por sus bajos valores del C.M.E. (10.8337 y 12.8891, respectivamente) y altos valores del  $R^2$  (0.9549 y 0.9464, respectivamente), ambos con un  $n= 29$  observaciones, dichos valores son cercanos a los del modelo seleccionado, pero por diferencias muy pequeñas en los decimales de los estadísticos, se eligió como el mejor modelo el 2 por ser más sencillo.

La curva de fitomasa total presenta una forma cóncava, con límites de confianza uniformes para la media durante los primeros 11 cm, posteriormente se observa una tendencia a incrementarse en tanto que los límites de confianza individuales incrementa con forme aumenta el diámetro normal (Figura 4).

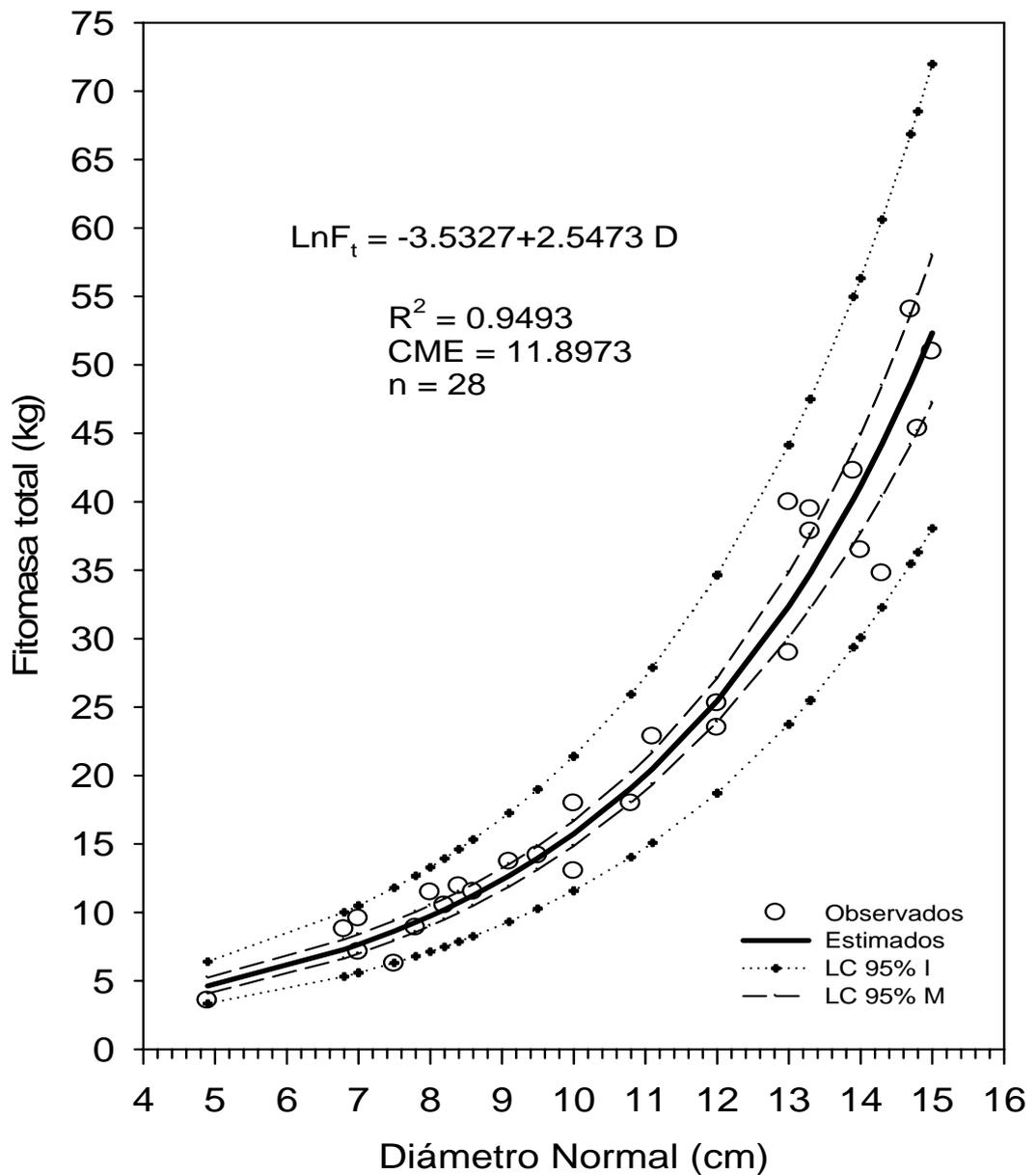


Figura 4. Relación diámetro normal y fitomasa total, ajuste del modelo 2, límites de confianza al 95% de la media (M) y de los valores individuales (I) para *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

#### 4.2.2 Fitomasa de fuste comercial

El análisis estadístico de los diez modelos para estimar la fitomasa del fuste comercial, muestra una disminución en el ajuste de los estadísticos al obtener una  $R^2$  promedio de 0.9153 pero con valores promedio más bajos de C.M.E., PRESS y ABSPRESS, comparado con la fitomasa total (Apéndice 6 y 7).

Se eligió el modelo 4, ya que presentó un C.M.E.= 6.8372 y una  $R^2= 0.9309$ . Además los residuales estudentizados presentaron una buena distribución, bajos valores de PRESS= 82.60 y ABSPRESS= 39.292, con una buena distribución normal (0.160) y con un n= 28 observaciones (Apéndice 7).

Los otros modelos que también sobresalen en el análisis son el 1 y el 9. El modelo 1 fue el más próximo al modelo 4 con el C.M.E.= 7.0042 y una  $R^2= 0.9319$  y con un ligero aumento en los valores de PRESS= 225.75 y ABSPRESS= 66.831, seguido por el modelo 9 con el C.M.E.= 4.6779 y  $R^2= 0.9480$ , con una buena distribución de residuales pero con una reducida base de datos (n= 27) y con una estructura más compleja al emplear las variables diámetro normal y altura total, por lo que fue descartado.

La curva de fitomasa de fuste comercial presenta una forma mas lineal comparada con la total, con límites de confianza de la media e individuales cambiantes con forme aumenta el diámetro normal (Figura 5).

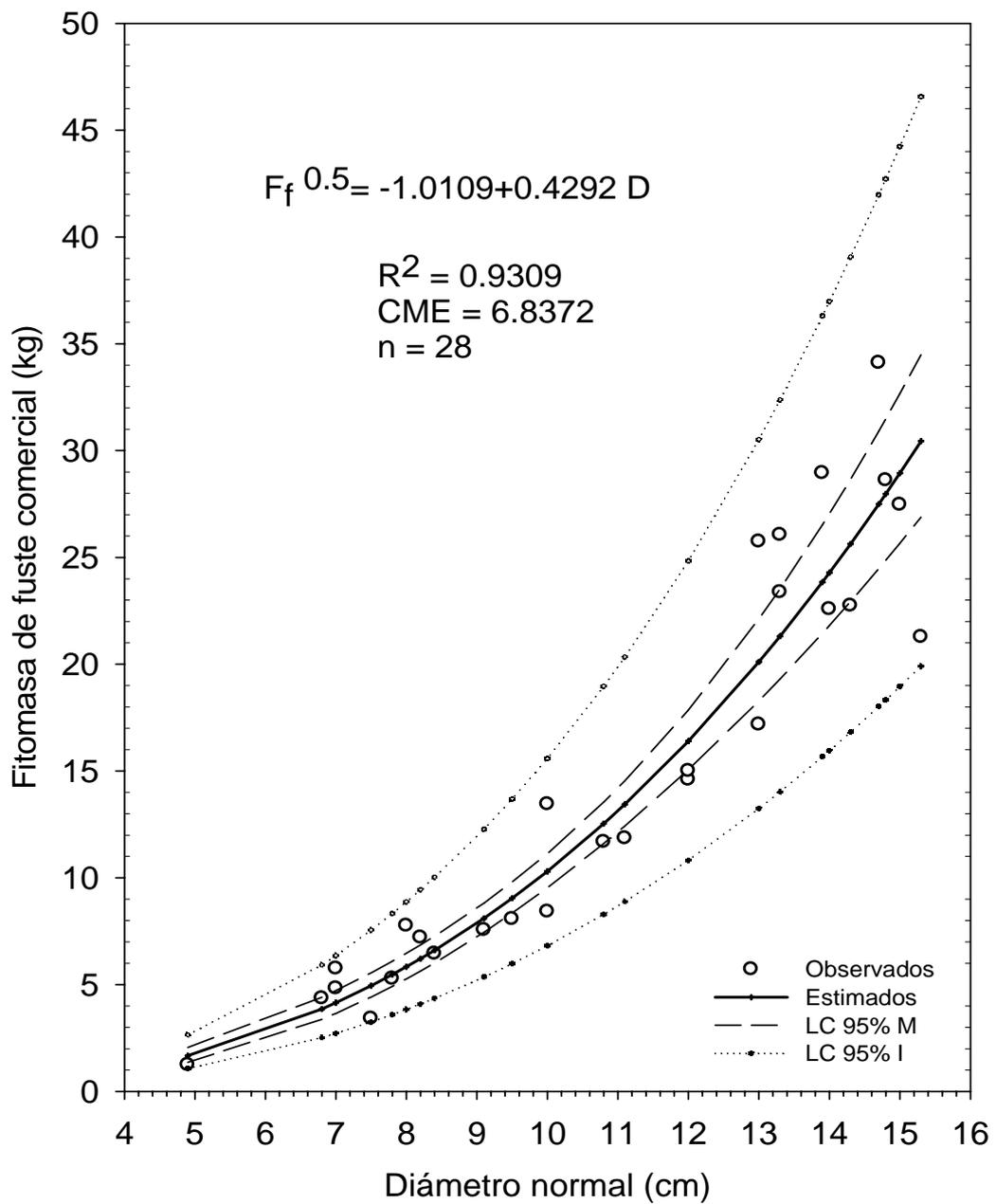


Figura 5. Relación diámetro normal y fitomasa de fuste comercial, ajuste del modelo 4, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% M) y de los valores individuales (LC 95% I) para *Pinus greggii* Engelm. en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

### 4.2.3 Fitomasa de ramas

El mejor modelo que se ajustó a la fitomasa de ramas para *Pinus greggii* fue el 2, dado que presentó buenos estadísticos ( $R^2= 0.8950$ , C.M.E.= 1.9859, una  $n= 29$  y los valores más bajos de PRESS= 64.03 y ABSPRESS= 30.671). Además, los residuales estudentizados presentaron una distribución normal y cumple con una regular prueba de normalidad (0.072) (Apéndice 8).

Otros modelos que también destacan son el 3 y el 5 por sus bajos valores del C.M.E. (2.0992 y 2.5694, respectivamente) y altos valores del  $R^2$  (0.8887 y 0.8592, respectivamente), con un  $n= 28$  y 30 observaciones, respectivamente; dichos valores son cercanos a los del modelo seleccionado, pero por diferencias muy pequeñas en los decimales de los estadísticos. Se eligió como el mejor modelo el 3 por ser más sencillo y por su ajuste que obtuvo al emplear solamente 29 observaciones de la base de datos.

La curva de fitomasa de ramas presenta una forma cóncava, con límites de confianza uniformes para la media durante los primeros 12 cm, posteriormente se observa una tendencia a incrementarse, en tanto que los límites de confianza individuales incrementan con forme aumente el diámetro normal (Figura 6).

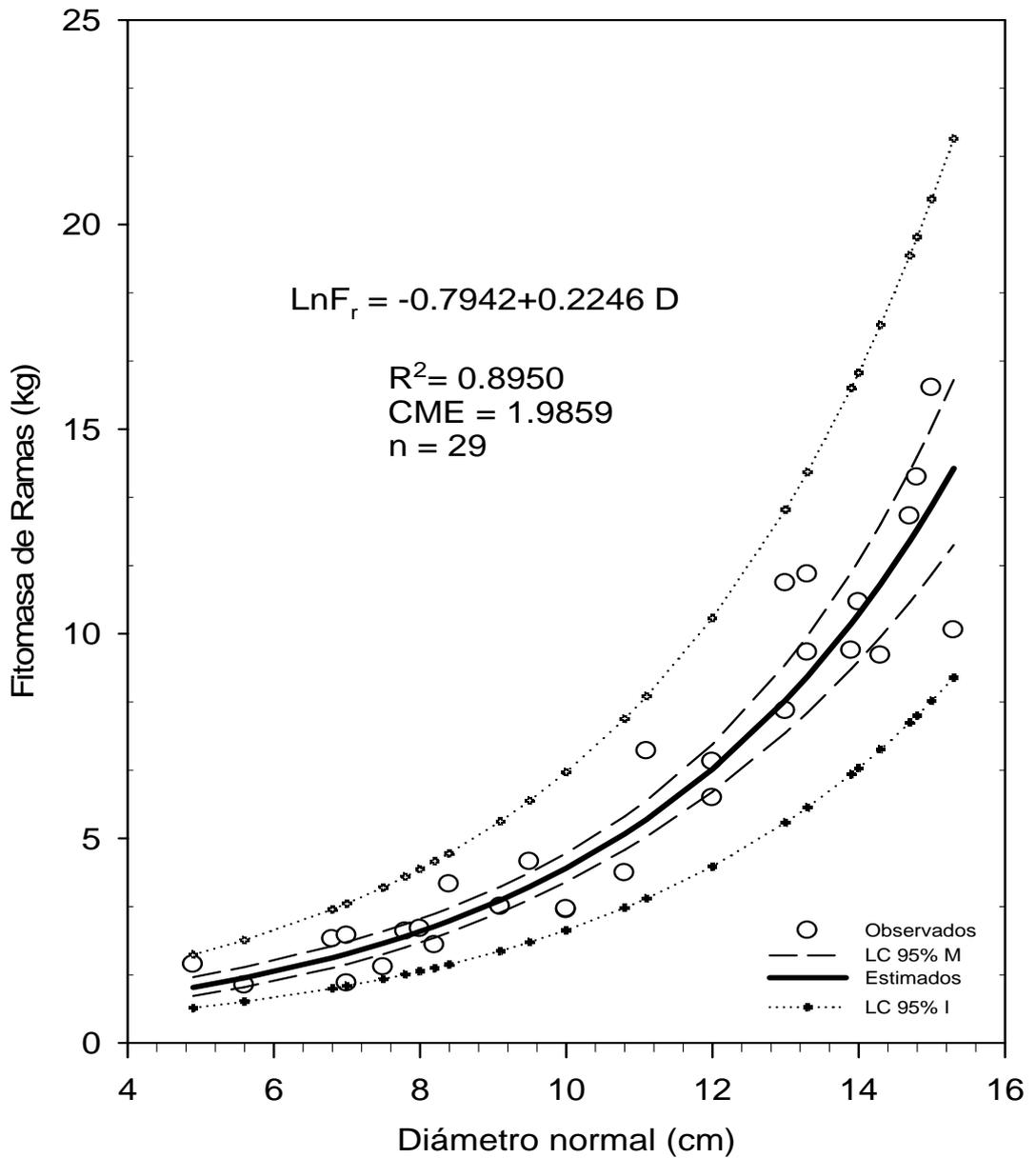


Figura 6. Relación diámetro normal y fitomasa de ramas, ajuste del modelo 4, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% M) y de los valores individuales (LC 95% I) para *Pinus greggii* Engelm. en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

#### 4.2.4 Fitomasa de hojas

El análisis estadístico de los diez modelos para estimar la fitomasa de la parte foliar de *Pinus greggii*, muestra una gran reducción en el ajuste de los estadísticos al obtener una  $R^2$  promedio de 0.6465, con un C.M.E. promedio de 0.7035 y con la normalidad promedio más alta comparada con la fitomasa de total, de fuste comercial y de ramas (Apéndice 6, 7, 8 y 9).

Para la fitomasa de las hojas se eligió como el mejor modelo el 9, ya que presentó un C.M.E.= 0.5413 y una  $R^2= 0.7657$ . Además los residuales estudentizados presentaron una buena distribución, bajos valores de PRESS= 18.04 y ABSPRESS= 16.572, con una buena distribución normal (0.5283) y con un  $n= 29$  observaciones (Apéndice 9).

Los otros modelos que también sobresalen en el análisis son el 10 y el 8. El modelo 10 fue el más próximo al modelo 9 con el C.M.E.= 0.3057 y una  $R^2= 0.8822$ , con valores de PRESS= 11.23 y ABSPRESS= 12.317, descartándose por presentar una transformación en la ordenada al origen y las variables diámetro normal al cuadrado, altura total y diámetro normal al cuadrado por altura total, seguido por el modelo 8 con el C.M.E.= 0.7389 y  $R^2= 0.6680$ , con una buena distribución de residuales pero con altos valores de PRESS y ABSPRESS (34.41 y 19.368, respectivamente) a pesar aun cuando considera un  $n= 30$ .

La fitomasa foliar de *Pinus greggii* muestra una gran variabilidad, lo que reduce el ajuste de los modelos probados (Figura 7).

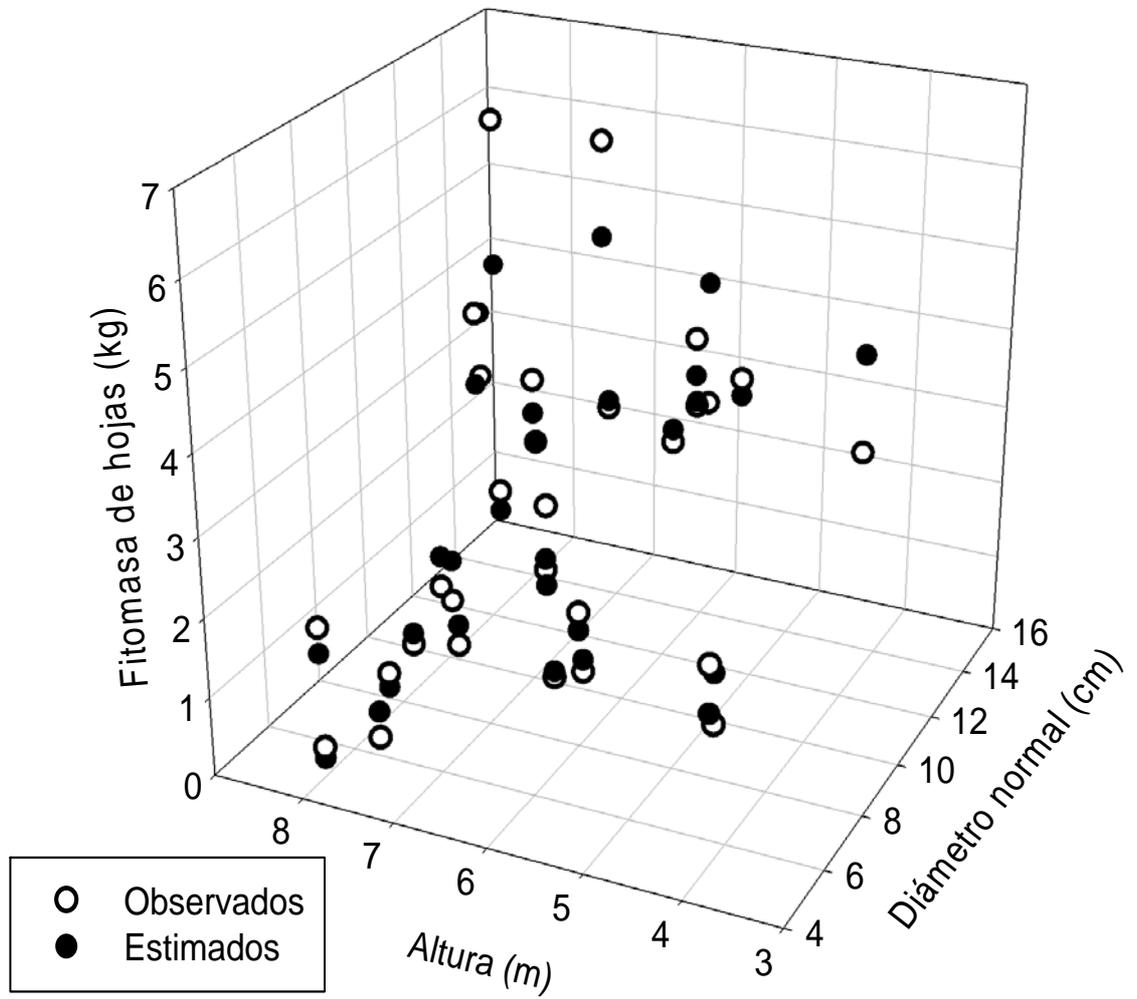


Figura 7. Relación entre las variables diámetro normal y altura con la fitomasa foliar observada y estimada con el modelo 9 de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Los bajos valores en del  $R^2$  para la fitomasa foliar, coinciden con los resultados obtenidos por Návar *et al.* (2001) quienes evaluaron modelos matemáticos lineales y no lineales para estimar la fitomasa por componentes y total en plantaciones forestales de *Pinus durangensis* y *P. cooperi* en Durango, obteniendo una  $R^2$  de 0.38 y error estándar de 1.21 en promedio para los modelos de fitomasa foliar, en el que utilizaron árboles con una edad promedio de 14 años, con una altura promedio de 5 m y diámetro basal de 13 cm, datos similares a las del presente estudio al contener alturas promedio de 6.9 m y diámetro basal de 14.88 cm con una edad de 16 años.

Con los mejores modelos obtenidos para estimar la fitomasa por componente y total y con la información dasométrica de todo el ensayo de progenie de *Pinus greggii*, se estimó una fitomasa aérea que corresponde a 30.06 t ha<sup>-1</sup>, equivalente a una productividad primaria neta de 1.88 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y a un almacén de carbono de 15.03 t C ha<sup>-1</sup>.

Estos resultados coinciden con otros estudios. Por ejemplo, Pacheco *et al.* (2007) encontraron una fitomasa aérea de 35.2 t ha<sup>-1</sup> para *Pinus greggii* para una plantación de 6 años de edad cuya productividad primaria es de 5.8 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y una concentración de carbono de 17.9 t ha<sup>-1</sup>. Esta variación conforme a la edad se debe en gran parte a que se trata de variedades diferentes, a la edad, a la densidad de plantación de cada estudio y a la calidad de estación.

A nivel de árbol, la fitomasa total y el carbono almacenado promedian 22.84 y 11.42 kg, respectivamente, del cual, el fuste comercial comprende el 59.06% (una concentración de C promedio de 187.287 Kg por m<sup>3</sup> de madera), seguido por las ramas con 29.43%, las hojas con el 10.42%, finalmente, en una pequeña proporción la fitomasa de conos (1.09%). Alba *et al.* (2007) reportan para una plantación de 13 años de edad de esta misma especie cuya fuente de semilla proceden de Querétaro, Hidalgo y Nuevo León, una captura de C promedio por árbol de 70.05 kg. Sin embargo, sus estimaciones muestran

valores mínimos de 20 hasta de 100 Kg, aproximadamente, con una desviación estándar promedio de 45. Se puede observar que *Pinus greggii*, en Veracruz obtiene una gran fitomasa comparada con el presente estudio. Esta diferencia se debe a las condiciones más favorables de temperatura y precipitación que tienen en Veracruz, además de tratarse de la variedad *australis* cuyo crecimiento es más rápido a la del presente estudio.

Con el uso de los mejores modelos para estimar la fitomasa por componente y total del árbol, se estima la fitomasa aérea total en 25.62 kg, lo que equivale a 12.81 kg de carbono almacenado en promedio por árbol, ocupando el fuste comercial el 61.20%, las ramas el 28.26% y hojas el 10.54% reportándose la mayor concentración de la fitomasa aérea en el fuste como ocurre en plantaciones jóvenes (Red y Tome, 1998; Helmisaari *et al.* 2002), con intervalos de confianza de 1.99 para la fitomasa del fuste comercial, 1.66 para la fitomasa de ramas y 1.01 para la fitomasa de hojas (Figura 8), Castellanos *et al.* (1996) reportan para un rodal natural de *Pinus patula* de 15 años de edad, en Puebla, que el 72% se encuentra en los fustes, el 16% en la corteza, el 9% en ramas y un 3% en el follaje.

Pacheco *et al.* (2007) evaluaron una plantación de seis años de edad de *Pinus greggii* en Hidalgo, reportando una fitomasa promedio por árbol de 8 Kg, proporcional al 35% y 37.5% con respecto a la fitomasa y a la edad encontrada en este estudio, con una distribución siguiente: 51% en fuste, 24% en la ramas y el 25% en el follaje. Se puede apreciar que estos valores resultan elevados a los obtenidos en este estudio debido a que la plantación maneja una densidad de 4425 árboles ha<sup>-1</sup>, lo que equivale a un 80% más alta a la manejada para nuestra área de estudio (920 árboles ha<sup>-1</sup>) y la gran similitud en la proporción para la fitomasa de hojas y ramas se debe a que es una plantación joven que no ha recibido ningún manejo como podas silvícolas considerando también las diferencias que existen en cuanto a la calidad de estación.

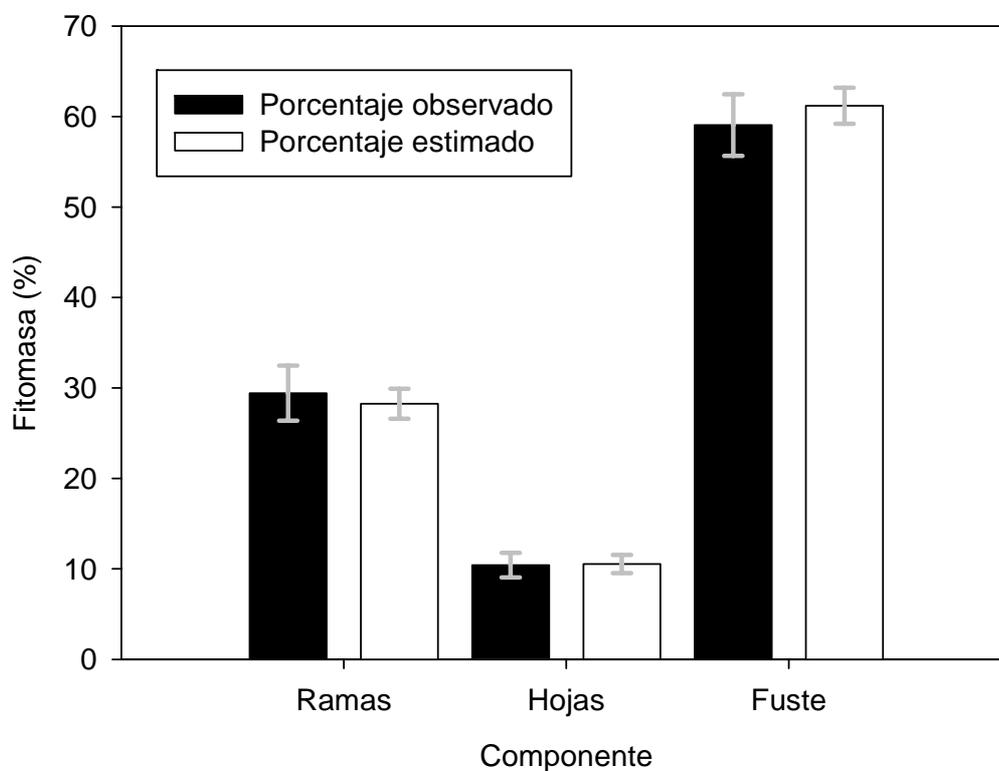


Figura 8. Proporción promedio de la fitomasa observada y estimada por componente de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Para el presente estudio, la relación promedio que existe entre el volumen del fuste comercial ( $m^3$ ) con respecto a la fitomasa total (t), en promedio es de 0.6530 (Figura 9), con esta información es posible estimar la fitomasa total de un árbol, multiplicando el volumen comercial en  $m^3$ , por la densidad básica de la madera que para este estudio fue determinada en  $0.4239 \text{ g cm}^{-3}$ , López y Valencia (2001) reportan una densidad de  $0.47 \text{ g cm}^{-3}$ , para poblaciones naturales de esta misma especie en los estados de Coahuila y Nuevo León.

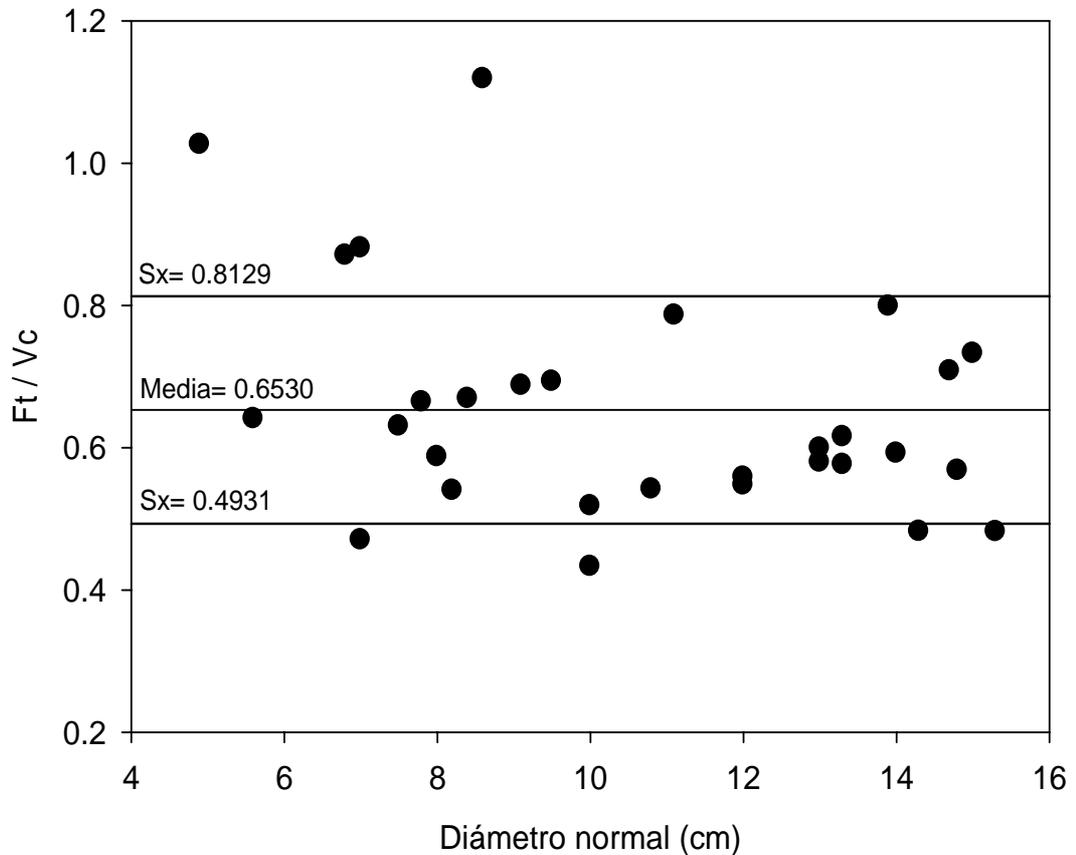


Figura 9. Relación entre Proporción de la fitomasa total ( $F_t$ ) y el volumen comercial ( $V_c$ ) con el diámetro normal de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

La estrecha relación que se observa entre el volumen comercial y la fitomasa total de *Pinus greggii* en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila, muestra un  $R^2$  de 0.9184 (Figura 10), con lo que se comprueba que los modelos utilizados para estimar el volumen se ajusten de igual forma para estimar la fitomasa, mediante regresión lineal simple (Méndez *et al.* 2005).

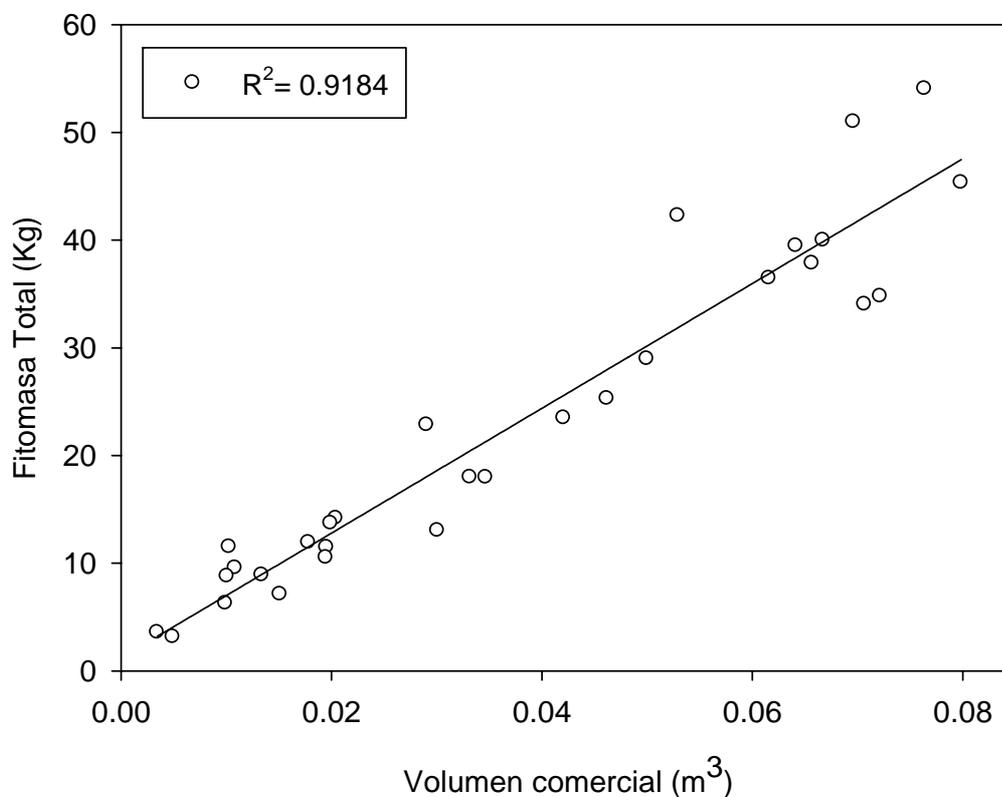


Figura 10. Relación entre el volumen comercial y la fitomasa total en *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

#### 4.3 Dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) y metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de aire

Los cuatro mejores modelos ajustados para estimar los valores de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) que se encuentra en el tejido vegetal para cada componente y para el total del árbol en *Pinus greggii* en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila, conservaron los mismos valores de R<sup>2</sup> y de la prueba de normalidad, obtenidos con los modelos de fitomasa, y los valores del C.M.E., PRESS y ABSPRESS cambiaron en función del tipo de unidades empleadas (Apéndice 10).

El potencial de almacenamiento promedio por árbol de 45.05 Kg de CO<sub>2</sub>e, mientras que para todo el ensayo de progenie de *Pinus greggii*, en el CAESA corresponde a 12.179 t CO<sub>2</sub>e ó su equivalente de 55.16 t CO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup>, estos estimados resultan bajos al compararlo con el estudio antes mencionado realizado por Pacheco *et al.* (2007), quienes estiman un almacén de 65.8 t CO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup>.

Los parámetros estadísticos para estimar la cantidad de metros cúbicos de aire que es capaz de limpiar cada componente y el total fueron ajustados a los cuatro mejores modelos de fitomasa por componente y total de *Pinus greggii*, del CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila (Apéndice 11).

En promedio cada árbol de *Pinus greggii*, a través del secuestro de carbono, limpia aproximadamente 69,351.75 m<sup>3</sup> de aire, es decir, 1, 058,120.06 m<sup>3</sup> aire por m<sup>3</sup> de madera, mientras que toda la plantación brinda un beneficio de 84'908,442.93 m<sup>3</sup> de aire ha<sup>-1</sup>. Montes y García (2005) estimaron los m<sup>3</sup> que limpia la regeneración natural de *Pinus durangensis* en la región de El Salto, Durango, observaron que a la edad de 3 años limpia un promedio total de 121.190 m<sup>3</sup> y a los 12 años de edad limpia un promedio de 10 318.67, del cual el 52.04% lo realiza el fuste, el 26.21% las ramas y el 21.75% las hojas. Se puede observar que *Pinus durangensis*, en ese estudio, limpia una menor cantidad de m<sup>3</sup> de aire, debido a que es una especie en estado natural y su tasa de crecimiento es menor con la de *P. greggii* Engelm., en tanto que la igualdad observada entre las hojas y ramas se debe a que aun no ha presentado la poda natural o algún manejo silvícola.

## 5 CONCLUSIONES

Las estimaciones del volumen y la fitomasa individual, es posible obtenerla con los mismos modelos debido a la estrecha relación que guardan ambos.

La fitomasa por componentes y total se ajusta a diferentes relaciones alométricas, con excepción de la fitomasa total y de ramas que presentan la misma relación alométrica.

La fitomasa de hojas es el componente con la mayor variabilidad, aportando los menores estadísticos para las relaciones alométricas.

En la fitomasa aérea de *Pinus greggii*, el fuste es el principal almacén de carbono seguido por las ramas y las hojas.

## 6 RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de los modelos probados para estimar tanto el volumen comercial y la fitomasa por componentes y para el total de plantaciones de *Pinus greggii*, en la Sierra de Arteaga, en el rango de las categorías diamétricas de 5 hasta 15 cm y con alturas de 4.2 a 8.7 m. Pero no se recomienda su utilización para otras especies de coníferas y de otras regiones, así como para individuos que estén fuera de los rangos indicados.

Se recomienda realizar otras investigaciones para conocer las reservas de carbono en las raíces y en el suelo para comprender el verdadero papel de las plantaciones de *Pinus greggii*, dentro del ciclo global del carbono en ésta región.

Debido a que *Pinus greggii*, mostró tener una buena importancia ambiental se recomienda, realizar proyectos para la venta de servicios ambientales sobre captura de carbono, retención de humedad y restauración de suelos.

## 7 LITERATURA CITADA

- Acosta M M, J D Etchevers, C Moreal, K Quednow, C. Hidalgo (2001)** Un método para la medición de carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) se sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. En: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de carbono en Ecosistemas Forestales. Octubre, 2001. Valdivia, Chile. 15 p.
- Alba L J, L C Mendizábal H, C Méndez M (2007)** Potencialidad diferencial de captura de carbono de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Naolinco, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 9: 57-60.
- Acosta M M, J Vargas, A Velázquez, J Etchevers (2002)** Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Brown S (1997)** Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a Primer. FAO Forestry Paper. Department of Natural Resources and Environmental Sciences, University of Illinois, Urbana, IL, USA. 134: 49 p.
- Brown S, J R Gillespe A, A E Lugo (1989)** Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35: 881-902.
- Biomass Users Network (BUN-CA) (2002)** Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Biomass Users Network. San José, Costa Rica. 56 p.
- Calderón S, J Gayoso, J Guerra, B Schlegel (2002)** Guía para la elaboración de proyectos forestales de Carbono. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 42 p.
- Castellanos F J, A Velázquez M, J J Vargas H, C Rodríguez F, A M Fierros G (1996)** Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Agrociencia* 30: 123-128.
- CETENAL (1976)** Carta Geológica. San Antonio de las Alazanas. G14 C35. Escala 1:50,000. México.
- CETENAL (1977)** Carta Edafológica. Arteaga G14 C34. Escala. 1:50,000. México.

- Comisión nacional del agua (CONAGUA) (2000).** Departamento de hidrología operativa. Precipitación y Temperaturas de la Estación Meteorológica de San Antonio de Las Alazanas, Arteaga, Coahuila. s/p.
- Díaz F R, M Acosta M, F Carrillo A, E Buendía R, E Flores A, J D Etchevers B (2007)** Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. Madera y Bosques 13: 25-34.
- Deans J D, J Mora, J Grace (1996)** Relaciones de biomasa para tres especies en la regeneración en bosques tropicales subcaducifolios en Camerún. Revista Ecología Forestal 88: 215-225.
- Flint S (2002)** Mecanismo de Desarrollo Limpio – Identificación de Proyecto. Alberta Research Council. Edmonton, Alberta, Canadá. 10 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (1999)** A statistical manual for forestry research. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Regional Office For Asia And The Pacific. Bangkok. 234 p.
- Fragoso L P I (2003)** Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio “Cerro Grande” municipio de Tancítaro Michoacán México. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana De San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán. 77 p.
- García E (1987)** Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. UNAM. México. 113 p.
- Gayoso J, J Guerra, D Alarcón (2002)** Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 157 p.
- Gohar L K, K P Shine (2007)** Equivalent CO<sub>2</sub> and its use in understanding the climate effects of increased greenhouse gas concentrations. Weather 62: 307-31.
- Gutiérrez V B N (2008)** Índice de selección en un ensayo de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Arteaga, Coahuila. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo. Coahuila. 44 p.

- Gutiérrez V V H, G J Lopera A (2001)** Metodología para cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. En: Simposio Internacional, Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Octubre, 2001. Valdivia, Chile. 18 p.
- Helmisaari H S, K Mälikonen, S Kellomäki, E Valtonen, E Mälikonen (2002)** Below – and – aboveground biomass, production and nitrogen use in scots pine stands in eastern Finland. *Forest Ecology Management* 165: 317-326.
- Husch B (2001)**. Estimación del contenido de carbono de los bosques. En: Simposio Internacional, Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Octubre, 2001. Valdivia, Chile. 9 p.
- Huxley J S (1932)** Problems of relative growth. The Dial Press. New York. USA. 276 p.
- INEGI (2000)** Carta topográfica. San Antonio de las Alazanas. G14 C35. Escala 1:50,000. México.
- Intergovernmental Panel on climate change (IPCC) (1995)** Climate change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. Cambridge. 64 p.
- Keller A, H Fassola, E Crechi, S Barth (2006)** Funciones de volumen individual con y sin corteza para *Pinus elliottii* Engelm., implantado en las zonas alta y norte de la provincia de Misiones, Argentina. En: 12 as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales – FCF, UNaM – EEA Montecarlo, INTA, Junio, 2006. Eldorado, Misiones. Argentina. 14 p.
- Ketterings Q M, R Coe, M Noordwijk, Y Ambagau, A Palm (2001)** Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology Management* 146: 199-209.
- Koch P (1989)** Estimates by Species Group and Region in the USA of: I Below-Ground Root Weight as a Percentage of Oven dry Complete-Tree Weight; and II Carbon Content of Tree Portions. Unpublished Consulting Report. Corvallis, Montana. 23 p.

- López L M, S Valencia M (2001)** Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del Norte de México. *Madera y Bosques* 7: 37-46.
- López U J, J Jasso M, J J Vargas H, J C Ayala S (1993)** Variación de características morfológicas en conos y semillas de *Pinus greggii* Engelm. *Agrociencia, Recursos Naturales Renovables* 3: 81-84.
- López U J, C Ramírez H, O Plascencia E, J Jasso M (2004)** Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 38: 457 - 464.
- Masera O (2000)** Mitigación de las emisiones de carbón mientras avanza el desarrollo de las prioridades nacionales: El caso de México. *Cambio climático* 47: 259-282.
- Méndez G J, F Morales C, V J Ruíz G, J A Nájera L, J J Graciano L, J J Nívar C (2005)** Ajuste de modelos para estimar biomasa fustal en *Pinus cooperi* y *P. leiophylla*, de la región de El Salto, Dgo. México. *Agrofaz* 5: 883-892.
- Montero G, M Muñoz, J Donés, A Rojo (2004)** Fijación de CO<sub>2</sub> por *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Willd. En los montes "Pinar de Valsaín" y "Matas de Valsaín". *Investigación Agraria* 13: 399-415.
- Montes O C, P García R (2005)** Flujos y asimilación de CO<sub>2</sub> en la regeneración natural de *Pinus durangensis* en la Región de El Salto, Durango. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico Forestal No. 1. El Salto Pueblo Nuevo, Durango. 94 p.
- Nívar J, N González, J Graciano (2001)** Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de carbono en Ecosistemas Forestales. Octubre, 2001. Valdivia- Chile. 12 p.
- Ordóñez B, H J De Jong, O Masera (2001)** Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7: 27-47.
- Pacheco E F C, A Aldrete, A Gómez, A M Fierro, V M Cetina, H Vaquera (2007)** Almacenamiento de Carbono en la Biomasa Aérea de una Plantación Joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 251-254.

- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) (2001)** Cambio Climático 2001, Grupo de Trabajo I: Bases Científicas. IPCC. Ginebra, Suiza. 184 p.
- Parresol B R (1999)** Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. For. Sci. 45: 573-593.
- Pimienta De la Torre T D J, G Domínguez C, O Aguirre C, F J Hernández, J Jiménez P (2007)** Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco en Pueblo Nuevo, Durango. Madera y Bosques 13: 35-46.
- Perry J P (1991)** The pines of Mexico and America central. Timber Press. Portland, Oregon, USA. 563 p.
- Red D, M Tome (1998)** Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globules* in response to irrigation. Forest Ecology Management. 103: 21-23.
- Rojo M G, J Jasso M, A Velásquez M (2003)** Las masas forestales como sumideros de co2 ante un cambio climático global. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente 9: 57-67.
- Rodríguez L R, J Jiménez P, O Aguirre C, E Treviño G (2006)** Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla de Tamaulipas, México. Ciencia UANL 9: 179-188.
- Salas C, L Nieto, A Irisarri (2005)** Modelos de volumen para *Pinus pinaster* Ait. en la Comarca del Baixo Miño, Galicia, España. Revista de Ciencias Forestales – Quebracho 12: 11 - 22.
- Sanquetta C R, L Farinha W, J E Arce (2002)** Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda* en el sur del estado de Paraná, Brasil. Patagónica Forestal. Revista Forestal del Sur Argentino. 13 p.
- SEMARNAT (2001)** Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2000. México. 154 p.
- Schlesinger W H (1997)** Biogeochemistry: an Analysis of global Change. Academic Press, San Diego, CA. USA. 588 p.

- Schelegel B, J Gayoso, J Guerra (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.
- Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP) (1983)** Carta hidrológica de aguas superficiales. G14-7. Escala 1:250000. México.
- Soares P, M Tomé (2004)** Analysis de effectiveness of biomass expansion factors to estimate stand biomass. In: Proceedings of the International Conference on Modeling Forest Production. April, 2004. Austria.
- Thorne S (2006)** El Mecanismo de Desarrollo Limpio. Oportunidades y amenazas para los países del Sur. Cuadernos Internacionales de Tecnología para el Desarrollo Humano. 2006. Número 5. España. 18 p.
- Torres R J M, A Guevara S (2002)** El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. Gaceta Ecológica-INE, No. 063. Distrito Federal, México. 40-59 .
- Vargas H J J, A Muñoz O (1988)** Crecimiento y Supervivencia en plántulas de cuatro especies de *Pinus*. Agrociencia 72: 197-208 p.
- Vela M R (2002)** Supervivencia, crecimiento y arquitectura de copa en una prueba de progenie de *Pinus greggii* Engelm. en el C.A.E.S.A., Arteaga, Coahuila. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo. Coahuila. 57 p.
- Zamora C J C (2003)** Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del Ejido "La Majada" Municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán. 59 p.

## APÉNDICE

## Apéndice 1. Programa para la evaluación de los modelos 1 y 5.

```
options ls=80 ps=60 pagenumber=1;
DATA FITOMASA;
INPUT DB D030M DN DBC DC AT ENTR VOL BR BH BF    FITOTOT;
DN2=DN*DN; AT2=AT*AT; DNAT=DN*AT; DN2AT=(DN*DN)*AT; LnDN=log(DN); LnAT=LOG(AT);
fito_05=FITOTOT**0.5;
LIST; CARDS;
Data= infile C:\Acceso publico\Programas SAS\fitomasa.dat;
proc reg data=FITOMASA;
title3 'modelo 1 Y 5';
model FITOTOT=DN DN2;
output out=pred1 p=fito_hat press=press r=rtm l95=l95 u95=u95 l95m=l95m u95m=u95m rstudent=rstu;
data reg1;
set pred1;
pres_sqh=press**2;
abspress=abs(press);
proc print;
var pres_sqh abspress;
sum pres_sqh abspress;
run;
proc univariate normal plot data=reg1;
var rtm;
run;
proc plot data=reg1;
plot rtm*fito_hat=*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
plot rstu*fito_hat=*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
run;
proc plot data=reg1;
plot fitotot*dn='O' fito_hat*dn='P' l95*dn='l' u95*dn='u' l95m*dn='m' u95m*dn='m' / HPOS=60 VPOS=40
OVERLAY;
run;
proc sort data=reg1;
by rstu rtm fitotot dn fito_hat;
proc print data=reg1;
var rstu rtm fitotot dn fito_hat; ;
run;
```

## Apéndice 2. Programa para la evaluación de los modelos 2, 3, 6 Y 8.

```
options ls=80 ps=60 pagenumber=1;
INPUT DB D030M DN DBC DC AT ENTR VOL BR BH BF    FITOTOT;
DN2=DN*DN; AT2=AT*AT; DNAT=DN*AT; DN2AT=(DN*DN)*AT; LnDN=log(DN); LnAT=LOG(AT);
Data= infile C:\Acceso publico\Programas SAS\fitomasa.dat;
proc reg data=FITOMASA;
title3 'modelo 2, 3, 6 Y 8';
model lnFITOTOT=LnDN LnAT;
output out=pred8 p=fito_hat press=press r=rtm l95=l95 u95=u95 l95m=l95m u95m=u95m rstudent=rstu;
data reg8; set pred8;
fito_hat2=2.718281828**fito_hat; l95or=2.718281828**l95;
u95or=2.718281828**u95;
l95mor=2.718281828**l95m;
u95mor=2.718281828**u95m;
orresid2=fitotot-fito_hat2;
pres_sqh=press**2;
absprsh=abs(press);
orphthat=2.718281828**(lnfitotot-press);
orpress=fitotot-orphthat;
orpresqh=orpress**2;
orabsprh=abs(orpress);
proc print;
var pres_sqh absprsh rtm orpresqh orabsprh;
sum pres_sqh absprsh rtm orpresqh orabsprh;
run;
proc univariate normal plot data=reg8;
var orresid2;
run;
proc plot data=reg8;
plot orresid2*fito_hat2=*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
plot rstu*fito_hat2=*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
run;
proc plot data=reg8;
plot fitotot*dn='O' fito_hat2*dn='P' l95or*dn='l' u95or*dn='u' l95mor*dn='m' u95mor*dn='m' / HPOS=60
VPOS=40 OVERLAY;
run;
proc sort data=reg8;
by rstu rtm fitotot dn fito_hat2;
proc print data=reg8;
var rstu rtm fitotot dn fito_hat2;
run;
proc means noprint data=reg8;
var fitotot orresid2;
output out=residsq2 css=y_css uss=y_uss sse n=nr_obs;
data;
set residsq2;
rsq=1-(sse/y_css);
mse=sse/(nr_obs-3);
proc print;
run;
```

### Apéndice 3. Programa para la evaluación de los modelos 4, 7, 9 Y 10.

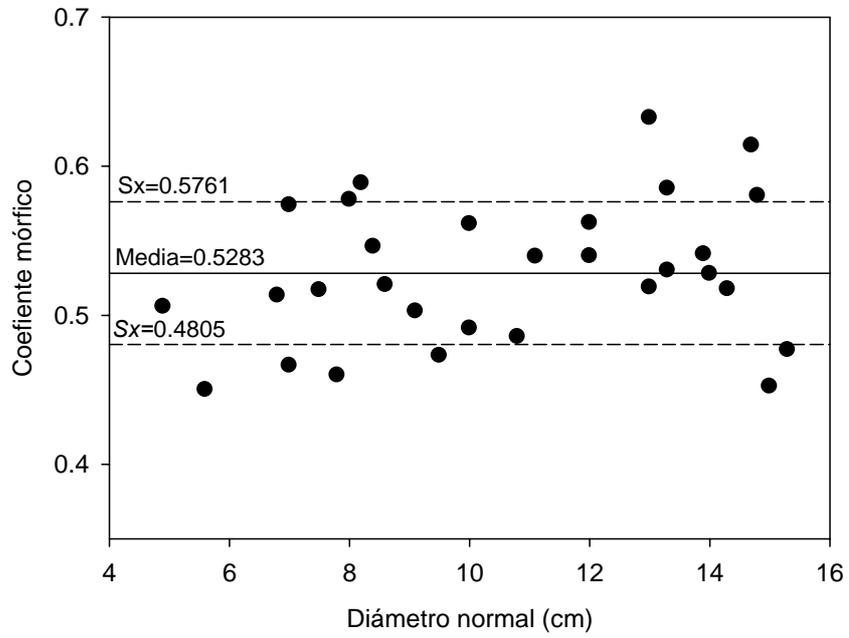
```
options ls=80 ps=60 pagenumber=1;
INPUT DB D030M DN DBC DC AT ENTR VOL BR BH BF    FITOTOT;
DN2=DN*DN; AT2=AT*AT; DNAT=DN*AT; DN2AT=(DN*DN)*AT; LnDN=log(DN); LnAT=LOG(AT);
Data= infile C: \Acceso publico\Programas SAS\fitomasa.dat;
proc reg data=FITOMASA;
title3 'modelo 4, 7, 9 Y 10';
model fito_05=DN2 AT DN2AT;
output out=pred4 p=fito_hat press=press r=rtm l95=l95 u95=u95 l95m=l95m u95m=u95m rstudent=rstu;
data reg4;
set pred4;
fitohat4=fito_hat**2;
l95or=l95**2; u95or=u95**2; l95mor=l95m**2; u95mor=u95m**2;
orresid4=FITOTOT-fitohat4;
pres_sqh=press**2;
abspress=abs(press);
orphthat=(fito_05-press)**2;
orpress=FITOTOT-orphthat;
orpresqh=orpress**2;
orabsprh=abs(orpress);
proc print;
var pres_sqh abspresh rtm orpresqh orabsprh;
sum pres_sqh abspresh rtm orpresqh orabsprh;
run;
proc univariate normal plot data=reg4;
var orresid4;
run;
proc plot data=reg4;
plot orresid4*fitohat4=* / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
plot rstu*fitohat4=* / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
run;
proc plot data=reg4;
plot FITOTOT*dn='O' fitohat4*dn='P' l95or*dn='l' u95or*dn='u' l95mor*dn='m' u95mor*dn='m' / HPOS=60
VPOS=40 OVERLAY;
run;
PROC SORT;
BY rstu FITOTOT fitohat4 orresid4;
proc print data=reg4;
var rstu FITOTOT fitohat4 orresid4;
run;
proc means noprint data=reg4;
var FITOTOT orresid4;
output out=residsq4 css=y_css uss=y_uss sse=nr_obs;
data;
set residsq4;
rsq=1-(sse/y_css);
mse=sse/(nr_obs-4);
proc print;
run;
```

**Apéndice 4. Parámetros y estadísticos de ecuaciones para estimar volumen comercial de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.**

M	CME	R <sup>2</sup>	B0	B1	B2	B3	ABSPRESS	PRESS	Normalidad	R-S	n
1	0.000026	0.9604	0.0020	-0.00245	0.00047		0.1243	0.00084	0.854	B	29
2	0.000006	0.9897	0.0027	0.00273	0.00011	0.00004	0.0557	0.00019	0.281	R	24
3	0.000003	0.9930	-0.0011	0.00005	0.00004		0.0360	0.00007	0.177	R	22
4	0.000038	0.9437	-0.0521	0.00679	0.00257		0.1536	0.00123	0.429	M	29
5	0.000006	0.9897	0.0014	0.00002	-0.00054	0.00004	0.0551	0.00018	0.277	R	24
6	0.000027	0.9578	-0.0075	0.00036			0.1295	0.00085	0.766	B	29
$\bar{X}$	0.000016	0.9724					0.0924	0.00056	0.464		26

Donde: M = Modelo; CME = Cuadrado Medio del Error; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; ABSPRESS = Sumatoria de PRESS; PRESS = Suma de Cuadrados de los predichos; R-S = Residuales estudentizados; B = Bueno; R = Regular; M = Malo; n = número de observaciones;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  y  $\beta_3$  = Parámetros de la regresión;  $\bar{X}$  = Promedio.

**Apéndice 5. Coeficiente mórfico para *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.**



**Apéndice 6. Parámetros y estadísticos de ecuaciones para estimar fitomasa de total de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.**

M	CME	R <sup>2</sup>	ABSPRESS	PRESS	Análisis Normalidad	Re-St	n	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	5.8156	0.9726	57.495	173.80	0.3881	B	26	14.360	-3.9364	0.4137	
2	11.8973	0.9493	75.088	367.65	0.6210	B	28	0.3544	0.2402		
3	20.1954	0.9146	96.165	665.19	0.0749	B	30	-2.6882	2.3995		
4	12.8891	0.9464	80.029	408.83	0.6871	B	29	-1.0107	0.5226		
5	1.79876	0.9923	25.325	42.59	0.3428	B	22	-0.3193	0.0256		
6	24.6428	0.8985	85.504	791.68	0.0036	M	25	1.8505	0.0012		
7	5.97131	0.9728	50.546	174.86	0.1654	B	26	1.9760	0.0028		
8	20.8641	0.9149	98.183	683.80	0.0695	B	30	-2.8441	2.3051	0.1953	
9	13.4175	0.9463	82.289	438.35	0.6626	B	29	-1.0555	0.5183	0.0130	
10	11.700	0.9549	83.589	407.90	0.9502	B	29	0.7799	0.0313	0.1107	-0.0009
$\bar{X}$	12.7083	0.9463	73.421	415.46	0.3965		27				

Donde: M = Modelo; CME = Cuadrado Medio del Error; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; ABSPRESS = Sumatoria de PRESS; PRESS = Suma de Cuadrados de los predichos; Re-St = Residuales estudentizados; B = Bueno; R = Regular; M = Malo; n = número de observaciones;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  y  $\beta_3$  = Parámetros de la regresión;  $\bar{X}$  = Promedio.

**Apéndice 7. Parámetros y estadísticos de ecuaciones para estimar fitomasa del fuste comercial de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.**

M	CME	R <sup>2</sup>	ABSPRESS	PRESS	Análisis Normalidad	Re-St	n	B0	B1	B2	B3
1	7.0042	0.9319	66.831	225.75	0.3183	B	29	6.1907	-2.036	0.2436	
2	7.5640	0.9162	55.771	205.62	0.0915	B	25	0.0027	0.2302		
3	10.3332	0.8901	67.934	315.84	0.0437	B	28	-3.532	2.5473		
4	6.8372	0.9309	39.292	82.60	0.1599	B	28	-1.010	0.4292		
5	2.7848	0.9662	34.960	80.06	0.6017	R	25	-0.177	0.0157		
6	16.3253	0.8191	66.987	508.59	0.0019	R	25	1.4473	0.0011		
7	10.2699	0.8964	48.636	179.66	0.0215	R	29	1.4538	0.0023		
8	8.0856	0.9143	56.003	219.74	0.0565	B	30	-3.475	2.2023	0.4119	
9	4.6779	0.9480	30.770	56.39	0.4444	B	27	-1.472	0.3591	0.1705	
10	6.5007	0.9394	40.279	92.38	0.3481	B	28	-0.466	0.0277	0.261	-0.001
$\bar{X}$	8.0383	0.9153	50.746	196.66	0.2088		27				

Donde: M = Modelo; CME = Cuadrado Medio del Error; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; ABSPRESS = Sumatoria de PRESS; PRESS = Suma de Cuadrados de los predichos; Re-St = Residuales estudentizados; B = Bueno; R = Regular; M = Malo; n = número de observaciones;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  y  $\beta_3$  = Parámetros de la regresión;  $\bar{X}$  = Promedio.

**Apéndice 8. Parámetros y estadísticos de ecuaciones para estimar fitomasa de ramas de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.**

M	CME	R <sup>2</sup>	ABSPRESS	PRESS	Análisis		n	B0	B1	B2	B3
					Normalidad	Re-St					
1	0.7333	0.9516	19.046	21.48	0.8752	M	25	6.738	-1.6049		
2	1.9859	0.8950	30.671	64.03	0.0716	B	29	-0.794	0.2246		
3	2.0992	0.8887	31.975	63.26	0.3509	B	28	-3.926	2.3706		
4	2.0723	0.8905	33.709	65.76	0.4643	B	29	-0.356	0.2561		
5	2.5694	0.8592	41.017	84.62	0.3682	B	30	0.401	0.0066		
6	2.9154	0.8498	34.245	90.52	0.0489	B	27	0.556	0.0011		
7	2.6164	0.8566	38.877	86.45	0.6353	B	30	1.190	0.0013		
8	2.2052	0.8875	30.740	65.97	0.0699	B	28	-3.598	2.6854	-0.557	
9	2.1252	0.8918	33.400	67.80	0.2939	B	29	-0.172	0.274	-0.054	
10	1.2705	0.9386	26.656	43.24	0.3641	B	28	1.446	0.0111	-0.112	0.0004
$\bar{X}$	2.0593	0.8909	32.033	65.31	0.3542		28				

Donde: M = Modelo; CME = Cuadrado Medio del Error; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; ABSPRESS = Sumatoria de PRESS; PRESS = Suma de Cuadrados de los predichos; Re-St = Residuales estudentizados; B = Bueno; R = Regular; M = Malo; n = número de observaciones;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  y  $\beta_3$  = Parámetros de la regresión;  $\bar{X}$  = Promedio.

**Apéndice 9. Parámetros y estadísticos de ecuaciones para estimar fitomasa de las hojas de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.**

M	CME	R <sup>2</sup>	ABSPRESS	PRESS	Análisis				B0	B1	B2	B3
					Normalidad	Re-St	n					
1	0.4512	0.6464	16.121	14.34	0.6210	B	28	-2.6689	0.6317			
2	0.8695	0.5948	21.715	29.22	0.6046	B	30	-1.5694	0.1994			
3	0.8116	0.6347	19.034	25.36	0.2771	B	29	-4.4024	2.1229			
4	0.8071	0.6239	20.406	26.72	0.4180	B	30	0.0294	0.1291			
5	0.4614	0.6039	16.274	13.68	0.5888	B	27	0.6391	0.0014			
6	1.0741	0.4995	24.493	35.96	0.6597	B	30	-0.3213	0.001			
7	0.974	0.5461	23.292	32.31	0.6157	B	30	0.8243	0.000623			
8	0.7389	0.6680	19.368	34.41	0.3574	B	30	-2.8949	2.697	-1.464		
9	0.5413	0.7657	16.572	18.04	0.5283	B	29	0.5063	0.1931	-0.164		
10	0.3057	0.8822	12.317	11.23	0.1869	B	27	1.0766	0.0149	-0.126	-6E-04	
$\bar{X}$	0.7035	0.6465	18.959	24.13	0.4858		29					

Donde: M = Modelo; CME = Cuadrado Medio del Error; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; ABSPRESS = Sumatoria de PRESS; PRESS = Suma de Cuadrados de los predichos; Re-St = Residuales estudentizados; B = Bueno; R = Regular; M = Malo; n = número de observaciones;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  y  $\beta_3$  = Parámetros de la regresión;  $\bar{X}$  = Promedio.

**Apéndice 10. Parámetros y estadísticos de ecuaciones para estimar CO2 equivalente por componente y total de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.**

M	CME	R <sup>2</sup>	B0	B1	B2	ABSPRESS	PRESS	Normalidad	Re-St	n
T	40.0611	0.9493	0.9615	0.2402		137.786	1237.96	0.6210	B	28
F	23.0222	0.9309	-1.3694	0.5814		111.474	694.90	0.160	B	28
R	6.687	0.8950	-0.1871	0.2246		56.281	215.61	0.072	B	29
H	1.82278	0.7657	0.7542	0.2402	-0.2033	35.790	84.92	0.5283	B	29

Donde: M = Modelos para estimar el dióxido de carbono equivalente; T= Total; F= Fuste comercial; R= Ramas; H= Hojas; CME = Cuadrado Medio del Error; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; ABSPRESS = Sumatoria de PRESS; PRESS = Suma de Cuadrados de los predichos; Re-St = Residuales estudentizados; B = Bueno; R = Regular; M = Malo; n = número de observaciones;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  y  $\beta_3$  = Parámetros de la regresión.

**Apéndice 11. Parámetros y estadísticos de ecuaciones para estimar los metros cúbicos de aire que limpian cada componente y el total de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Los Lirios, Arteaga, Coahuila.**

<b>M</b>	<b>CME</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>B0</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>ABSPRESS</b>	<b>PRESS</b>	<b>Normalidad</b>	<b>R-S</b>	<b>n</b>
T	94938941.2	0.9493	8.3006	0.2402		212112.22	2933788973.28	0.6210	B	28
F	54559418.2	0.9309	-53.7301	22.8124		171606.440	1646809522.64	0.160	B	28
R	15847229.4	0.8950	7.1520	0.2246		86640.800	510964965.43	0.072	B	29
H	4319715.3	0.7657	29.5915	9.4236	-7.97496	55095.860	201246891.87	0.4062	B	29

Donde: M = Modelos para estimar los metros cúbicos de aire que limpian; T= Total; F= Fuste comercial; R= Ramas; H= Hojas; CME = Cuadrado Medio del Error; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; ABSPRESS = Sumatoria de PRESS; PRESS = Suma de Cuadrados de los predichos; R-S = Residuales estudentizados; B = Bueno; R = Regular; M = Malo; n = número de observaciones;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  y  $\beta_3$  = Parámetros de la regresión.