

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA



**CARBONO ALMACENADO EN LA FITOMASA AÉREA EN UNA
PLANTACIÓN DE *Pinus greggii* Engelm., EN ARTEAGA, COAHUILA**

Por:

EMANUEL MORA CASTAÑEDA

T E S I S

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

INGENIERO FORESTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Febrero de 2010

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

**CARBONO ALMACENADO EN LA FITOMASA AÉREA EN UNA
PLANTACIÓN DE *Pinus greggii* Engelm., EN ARTEAGA, COAHUILA**

Por:

EMANUEL MORA CASTAÑEDA

T E S I S

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

APROBADA:


ASESOR PRINCIPAL

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE
AGRONOMÍA**


DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ




DR. MARIO ERNESTO VÁZQUEZ BADILLO


Coordinación
División de Agronomía

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Febrero de 2010

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

**CARBONO ALMACENADO EN LA FITOMASA AÉREA EN UNA
PLANTACIÓN DE *Pinus greggii* Engelm., EN ARTEAGA, COAHUILA**

Por:

EMANUEL MORA CASTAÑEDA

T E S I S

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

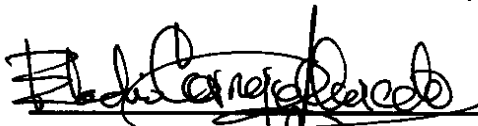
INGENIERO FORESTAL

APROBADA



DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ

ASESOR PRINCIPAL



DR. ELADIO H. CORNEJO OVIEDO

ASESOR



**Departamento
Forestal**



DR. JORGE DAVID FLORES FLORES

ASESOR

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Febrero de 2010

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 Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo.

DEDICATORIAS

A Dios

Por iluminar mí camino de vida en armonía y felicidad y saber valorarlo en momentos buenos y malos y sobre todo por extender su mano para levantarme de cada caída y permitirme lograr una meta más en mi vida.

A mis Padres

Ramón Mora Juárez y Reynalda Castañeda Vázquez

Por el amor, cariño, confianza y consejos que me han dado, el apoyo incondicional que me han brindado, porque en realidad siempre me han alentado para lograr cada uno de mis metas de mi vida, mil gracias por esto y más cosas.

A mis Hermanos

Roberto, Maribel, Ramón y Gabriela.

Con mucho amor y cariño por todos esos momentos compartidos e inolvidables desde niños, porque han confiando en mí y me han apoyado en mis estudios y porque siempre permanezcamos unidos como hasta ahora.

A mis Tíos

Aniceto, Amelia, Flora, Florencia, Julia, Juan, Dionisio, Eustaquio, Inés, Florentina, Catalina, Brígida, Mary, Francisco, Mijares, Leonora, Laura.

Por brindarme su cariño y motivación en el transcurso de mi carrera.

A mi Novia

Valentina Ramos Perfecto

Por ser mí amiga, compañera y hacer feliz cada momento de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi "Alma Mater". Por abrirme las puertas y darme la oportunidad de realizar mis estudios de Ingeniero Forestal y brindarme las bases necesarias de conocimientos que ahora forman parte de mi profesión.

Al Dr. Jorge Méndez González. Por la dirección del trabajo, por su apoyo, consejos, confianza, paciencia y sobre todo gracias por su amistad e interés en mi superación.

Al Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo. Por la oportunidad de haberme integrado a su equipo de trabajo, así como la dirección, su buen apoyo y consejos para la realización de este trabajo.

Al M.C. Jorge David Flores Flores. Por su valiosa asesoría y aportaciones al contenido del trabajo y sus buenos consejos que siempre me ayudaron.

Al M.C. José Armando Nájera Castro. Por brindarme su apoyo, consejos y amabilidad.

A todos los Profesores del Departamento Forestal. Por su comprensión y amabilidad en transmitir sus conocimientos para contribuir a mi formación como profesionista.

A mis amigos y compañeros. Isaac, Armando, Ricardo, Jesús, María Antonia por su amistad y apoyo en la toma de datos de campo.

A todos mis compañeros de la Carrera de Ingeniero Forestal Generación CVI.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	v
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Hipótesis	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Calentamiento global: causas y consecuencias	5
2.2. Gases de efecto invernadero	5
2.3. El efecto invernadero	6
2.4. La convención sobre el cambio climático	7
2.4.1. El Protocolo de Kyoto.....	7
2.5. Fotosíntesis.....	9
2.6. Los sumideros de CO ₂	10
2.7. Ciclo del carbono	10
2.8. Principales almacenes de carbono en los ecosistemas forestales.....	11
2.9. Formas de capturar carbono	12
2.10. Servicios Ambientales	13
2.11. Fitomasa	14
2.12. Estimación de crecimiento	15
2.13. El carbono acumulado en la vegetación terrestre	16
2.14. Estudios realizados de fitomasa en plantaciones forestales de México.....	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Descripción del área experimental	18
3.2. Descripción de la plantación	20
3.3. Características de la especie estudiada.....	20
3.3.1. <i>Pinus greggii</i> Engelm	20
3.4. Método de muestreo	21

3.4.1. Selección de árboles.....	21
3.4.2. Variables evaluadas.....	22
3.4.3. Pesaje de componentes y obtención de muestras.....	22
3.5. Procedimiento de laboratorio	24
3.5.1. Obtención del peso seco de las muestras	24
3.5.2. Determinación del volumen fustal y edad de <i>Pinus greggii</i> Engelm.....	24
3.5.3. Estimación de la fitomasa aérea y carbono almacenado a nivel árbol.....	25
3.5.4. Ajuste de modelos para la fitomasa por componente y total.....	27
3.5.5. Ajuste de modelos de crecimiento a la fitomasa de fuste	28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1. Características dendrométricas y estadísticos básicos.....	30
4.2. Porcentaje de fitomasa por componente en <i>Pinus greggii</i> Engelm	31
4.3. Fitomasa aérea de <i>Pinus greggii</i> Engelm.....	32
4.3.1. Modelo para la estimar la fitomasa de hojas.....	32
4.3.2. Modelo para estimar la fitomasa de ramas	34
4.3.3. Modelo para estimar la fitomasa de fuste	36
4.3.4. Modelo para estimar la fitomasa total	38
4.4. Fitomasa aérea y carbono almacenado en <i>Pinus greggii</i> Engelm	40
4.5. Crecimiento e incremento en fitomasa fustal de <i>Pinus greggii</i> Engelm.....	43
4.5.1. Incremento en fitomasa de fuste.....	45
5. CONCLUSIONES	48
6. RECOMENDACIONES.....	49
7. LITERATURA CITADA	50
APÉNDICES	57

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Modelos probados para estimar la fitomasa por componente y total en <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.....	27
Cuadro 2. Modelos probados para estimar el crecimiento e incremento fustal de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.....	29
Cuadro 3. Características dendrométricas y estadísticos básicos de los árboles muestreados de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	30

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Localización del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	19
Figura 2. Croquis y árboles seleccionados en la plantación de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	21
Figura 3. Troceo y obtención de rodajas de los árboles muestreados de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	23
Figura 4. Porcentaje promedio de la fitomasa observada por componente de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	31
Figura 5. Diagrama de dispersión de la relación diámetro normal-fitomasa de hojas y el ajuste del modelo 2, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% Media) y de los valores individuales (LC 95% Individuales) para <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	33
Figura 6. Diagrama de dispersión de la relación diámetro normal-fitomasa de ramas y el ajuste del modelo 4, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% Media) y de los valores individuales (LC 95% Individuales) para <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	35
Figura 7. Relación entre las variables diámetro normal y altura con la fitomasa de fuste de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	37
Figura 8. Relación entre las variables diámetro normal y altura con la fitomasa total de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	39
Figura 9. Relación edad y fitomasa de fuste y ajuste del modelo de Gompertz, para <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	44
Figura 10. Relación edad y curvas de incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA), para <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	46

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar modelos alométricos para estimar la fitomasa por componentes (hojas, ramas, fuste y total) y ajustar modelos de crecimiento a la fitomasa de fuste de *Pinus greggii* Engelm. El área de estudio comprendió una plantación de 16 años de edad con una densidad de 1246 árboles ha⁻¹, establecida en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), Arteaga, Coahuila.

Se utilizaron 20 árboles vigorosos, sin deformidades ni plagas o enfermedades, incluyendo todas las categorías diamétricas (7.1-11.8 cm) y altura (4.93-7.92 m) existentes en dicha plantación.

Los resultados de los modelos alométricos seleccionados muestran un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9039 para el modelo de fitomasa de hojas; 0.9526 para el de ramas; 0.9802 para el de fuste y 0.9669 para la fitomasa total. La fitomasa aérea y el carbono almacenado promedio por árbol fue de 19.46 y 9.73 kg, respectivamente. La fitomasa aérea comprende 24.24 t ha⁻¹ distribuida en los fustes (61.48%), ramas (22.94%) y hojas (15.58%) y un almacén de carbono de 12.12 t ha⁻¹ representado 0.76 t C ha⁻¹ año⁻¹.

El modelo que mejor describe el crecimiento e incremento en fitomasa y carbono de fuste, fue el de Gompertz ($R^2 = 0.7810$). El incremento corriente anual (ICA) máximo en fitomasa de fuste ocurre a los 14 años con una producción de 1.429 kg año⁻¹ y una captura de carbono de 0.715 kg año⁻¹. Mientras que el incremento medio anual (IMA) máximo es alcanzado a los 21 años, con una producción en fitomasa de fuste de 0.720 kg año⁻¹ y una captura de carbono de 0.360 kg año⁻¹.

Palabras clave: *Pinus greggii*, fitomasa, carbono, modelos, alométricos, crecimiento, incremento.

1. INTRODUCCIÓN¹

El calentamiento global del planeta, es un problema ambiental que preocupa cada vez más a todos los países del mundo y a la comunidad científica internacional; se acentúa al rápido aumento de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera como; el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), óxido de nitrógeno (NO_x), vapor de agua (H₂O), ozono troposférico (O₃) (Andrasko,1990; Centeno, 1992; IPCC, 1995). El CO₂ es el GEI que más contribuye al calentamiento global, se ha calculado entre el 60 a 80%; la concentración de este gas en la atmósfera ha aumentado de 280 ppm (partes por millón) en el año 1750, a 379 ppm en el 2005, y continúa incrementándose a una tasa anual promedio de 1.9 ppm (IPCC, 2007), debido a actividades humanas como; la quema de combustibles fósiles, cambio de uso de suelo (deforestación) y la agricultura (Andrasko,1990; IPCC, 1995).

En México, esta situación también es de gran importancia, se estima que en el 2002 generó 643,183 millones de t CO₂, volumen que lo sitúa dentro de los 15 principales países emisores, con una contribución del 1.5% de las emisiones totales, las fuentes son: con el 61% al sector energético (combustibles fósiles), el 14% cambio de uso de suelo (deforestación), el 10% desechos (residuos), el 8% procesos industriales y el 7% la agricultura (INE, 2006; SEMARNAT, 2007).

Esta problemática ambiental, ha llevado a varios países a buscar acuerdos y opciones para mitigarlo, ejemplo, en 1992 en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), adoptaron el tema de cambio climático, el cual, acordaron lograr la estabilización de las concentraciones de los GEI en la atmósfera, a nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático (IPCC, 2001), dando origen al Protocolo de Kyoto (PK) en 1997, el cual obliga a los países industrializados a reducir sus emisiones GEI, pero también proporciona mecanismos flexibles

¹Esta tesis fue elaborada con apego a la guía de autores de la Revista Fitotecnia Mexicana.

tales como el Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL) que permite a los países desarrollados y en vías de desarrollo (México) financiar o cobrar créditos por proyectos que eviten emisiones de GEI, a través de un mercado internacional de emisiones certificadas que les permita cumplir los compromisos ante la CMNUCC (Protocolo de Kyoto, 1998; Estrada, 2003).

El tema de captura de carbono en la vegetación terrestre, cobra importancia a nivel mundial, por ser signo de ayuda para mitigar los GEI, entre ellos el dióxido de carbono (CO_2) y representa una oportunidad a países desarrollados y en vías de desarrollo, para financiarlo o acceder al cobro de créditos por medio del MDL (Ordóñez y Masera, 2001).

Los ecosistemas forestales cumplen un papel fundamental en el ciclo del CO_2 , al capturar y fijar el carbono atmosférico como biomasa, por medio del proceso de fotosíntesis y por consiguiente liberando oxígeno a la atmósfera a través de la respiración, además, contribuyen al flujo anual de carbono de la atmósfera y a la superficie de la tierra (Ordóñez y Masera, 2001). De la biomasa que acumulan estos ecosistemas gran parte está conformada por carbono (aproximadamente el 50%) (Schlesinger, 1997; Brown, 1997), retenida principalmente en la madera de los árboles, misma que al quemarse esta (la madera) el proceso se revierte usando oxígeno del aire y el carbono almacenado en la madera para liberar al final CO_2 (FWPRDC 1996). Por lo que es necesario conservar los ecosistemas forestales y manejarlos adecuadamente, ya que pueden afectar el equilibrio dinámico de intercambio de gases (Ordóñez, 1999).

De esta manera en los últimos años se ha comenzado a estimar la biomasa, así como el incremento y rendimiento de su volumen, mediante ecuaciones que relacionan la biomasa a sus componentes (raíces, fuste, ramas y hojas) y las características dasométricas de los árboles, con el fin de evaluar la productividad de los ecosistemas y observar el efecto y los flujos del CO_2 entre la vegetación, suelo y atmósfera (Brown, 1997; Makela, 1997).

En México, ya se están realizando diversos estudios para determinar la capacidad de fijación y almacén de carbono en ecosistemas naturales, para el desarrollo de proyectos forestales de carbono, realizándose en su mayoría en el centro y sur del país. Sin embargo, existe carencia de información científica en México con respecto al conocimiento de estimación de biomasa en las plantaciones forestales que permitan evaluar su productividad y el contenido de carbono que almacenan (Návar *et al.*, 2001; Pacheco *et al.*, 2007).

Las plantaciones forestales ya sean para la producción de madera, protección de áreas seleccionadas o de restauración en zonas degradadas, también juegan un papel importante en el ciclo del CO₂, dado que gran parte de la biomasa está conformada por carbono (aproximadamente el 50%), además si son sometidas a manejos silvícolas desde jóvenes, se maximiza el volumen en madera, obteniendo mayor almacén y fijación de carbono, y contribuyen a mitigar los GEI (Centeno, 1992; Brown, 1997; Schlesinger, 1997).

Pinus greggii Engelm., es una especie endémica de México, presenta rápido crecimiento y precocidad en su floración fuera de su ambiente natural, en la región norte de México ha mostrado una buena sobrevivencia y desarrollo en sitios secos (400-600 mm) (Dvorak y Donahue, 1993), características importantes para ser utilizada en plantaciones forestales de restauración en zonas degradadas (Vargas y Muñoz, 1988) y para la venta de servicios ambientales por concepto de captura de carbono (Pacheco *et al.*, 2007).

El presente estudio, tuvo como objetivo estimar la cantidad de carbono que esta almacenada en la fitomasa aérea (hojas, ramas y fuste) y evaluar la tasa de crecimiento e incremento en fitomasa de fuste, en una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), Los Lirios, Arteaga, Coahuila, mediante modelos alométricos y de crecimiento.

1.1. Objetivos

Evaluar siete modelos alométricos para estimar la fitomasa aérea, en una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Estimar el carbono almacenado en la fitomasa aérea, en una plantación de *Pinus greggii* Engelm., en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Evaluar nueve modelos para describir el incremento en la fitomasa fustal y captura de carbono de *Pinus greggii* Engelm. en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Resaltar la especie en términos ambientales, para el fomento de pago de servicios ambientales por captura de carbono.

1.2. Hipótesis

Ho: No existe diferencia de fitomasa y carbono almacenado en los componentes hojas, ramas, fuste y total de *Pinus greggii*.

Ho: La tasa de crecimiento e incremento en fitomasa de fuste es igual en las diferentes edades de *Pinus greggii*, en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Calentamiento global: causas y consecuencias

El calentamiento global es un problema ambiental, debido al rápido aumento de concentración de gases en la atmósfera llamados gases de efecto invernadero (GEI), causado por las actividades humanas como; la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), el cambio de uso de suelo (deforestación) y la agricultura, emisiones que alteran de manera sustancial la temperatura de la tierra y generan preocupaciones relacionadas con estos cambios en el ámbito mundial (IPCC, 1995; IPCC, 2001; IPCC, 2007).

Esté fenómeno podría provocar repercusiones particularmente en los patrones climatológicos de la tierra, trayendo consecuencias negativas, en lo social, ambiental y económico (Decanio, 1997) como: efectos a la salud humana a nivel global por mayor frecuencia de tormentas severas (Martens *et al.*, 1998), aumento en el nivel del mar inundando ciudades costeras (expansión de los océanos y derretimiento de los glaciares), contaminación de mantos acuíferos, desaparición de ecosistemas naturales o plantados y sus respectivas especies nativas, erosión de los suelos (IPCC, 2001), sequías (ausencia prolongada o insuficiencia acentuada de precipitación) en áreas afectadas, trayendo consigo problemas en la disponibilidad de agua, alimento y aumento de enfermedades (IPCC, 1995; Martens *et al.*, 1998).

2.2. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero se les denomina así por su capacidad de dar paso a las radiaciones solares de onda corta, calentando la superficie de la tierra y atrapar en la atmósfera terrestre la radiación infrarroja de mayor longitud de onda, que la tierra emite ascendentemente de regreso al espacio (Shand, 1996; IPCC, 2001). Las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero, y entre ellos, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), óxido

nitroso (N₂O) han aumentado considerablemente desde la época industrial (1750), por efecto de las actividades humanas (Centeno, 1992; IPCC, 1995).

El CO₂ es uno de los elementos más importantes en los GEI y es el que más contribuye al calentamiento global (IPCC, 2007). Los principales almacenes de CO₂ son; la atmósfera, los océanos, depósitos de combustibles fósiles, el suelo y la vegetación terrestre (Joos, 2003; IPCC, 2007).

2.3. El efecto invernadero

El efecto invernadero es un fenómeno natural que ha permitido el desarrollo de la vida en el planeta (Centeno, 1992). Es causado por la presencia de gases en la atmósfera que dejan entrar energía solar en forma de radiación de onda corta, la cual calienta la superficie de la Tierra, ésta se desprende de dicha energía enviándola nuevamente al espacio en forma de radiación infrarroja de onda larga (Andrasko,1990). Algunos de los gases en la atmósfera (GEI) como; el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros que existen en forma natural en la atmósfera absorben gran parte de la radiación infrarroja ascendente que el planeta emite de regreso, impidiendo que esta energía pase al espacio exterior, de tal manera que los procesos de acción recíproca como: la radiación, corrientes de aire, formación de nubes, la evaporación y las precipitaciones transportan dicha energía a altas esferas de la atmósfera y de ahí se libera al espacio (Andrasko,1990; IPCC, 2001). Este, es un efecto natural que mantiene la tierra a una temperatura promedio arriba del punto de congelación del agua y permite la vida tal como la conocemos (Centeno, 1992).

Pero cuanto mayor es la concentración de los GEI, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta emite libremente al espacio exterior. De esta manera, al aumentar la concentración de GEI, se incrementa la cantidad de energía atrapado en la atmósfera y dado que la energía no puede acumularse, porque el clima deberá adaptarse de alguna manera para deshacerse de ese excedente, dando origen a que se eleve la temperatura superficial del planeta al comienzo del próximo siglo (Salati, 1990).

2.4. La convención sobre el cambio climático

En 1992, en la conferencia para el Medio Ambiente y Desarrollo de la ONU en Rio de Janeiro, Brasil, fue presentada la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, la Agenda 21 incluyó varios compromisos: lograr el desarrollo sostenible (recursos forestales y naturales entre otros), afrontar las cuestiones ambientales y de desarrollo de forma integrada a escala mundial, nacional y local. En dicha convención, los países participantes adoptaron la creación de tres convenciones: la convención sobre el cambio climático, la convención sobre la biodiversidad y la convención sobre el combate a la desertificación (IPCC, 1996).

La Convención sobre el Cambio Climático, se enfocó principalmente a un objetivo; lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático (IPCC, 1996; IPCC, 2001). Sin embargo, en Rio de Janeiro no se concretó la CMCC, por lo que decidieron reunirse nuevamente los países asistentes, quedando como acuerdo que cada país debe desarrollar estrategias nacionales para la reducción de emisiones de CO₂, estrategias que deben estar basadas al tema tratado y al conocimiento preciso del inventario de las emisiones de cada país (IPCC, 1995).

En Berlín en 1995 y Ginebra en 1996 se celebraron la primera y segunda conferencias de las partes de la Convención sobre el Cambio Climático y debido a que no era un documento completo, sino una serie de protocolos, decidieron reunirse nuevamente en Kyoto, Japón en 1997, para completarla con un Protocolo en donde la mayoría de los países establezcan compromisos para reducir sus emisiones de GEI con plazos definidos (Brand, 1998).

2.4.1. El Protocolo de Kyoto

En 1997 se celebró en Kyoto, Japón, la tercera conferencia de las partes de la Convención sobre Cambio Climático, donde distintos países mostraron sus

propuestas en relación con el compromiso de reducción de emisiones, tomando como año base 1990, sin embargo, las propuestas apuntaban hacia reducciones del 5 al 15 % para el periodo de 2008–2012 y algunos países no tendrían ninguna reducción y debido a las diferencias entre países, se concluyó la tercera parte, firmándose el llamado “Protocolo de Kyoto” siendo el más importante hasta la fecha y que compromete a países industrializados (países incluidos en el Anexo B) a reducir sus emisiones de GEI en un 5% bajo de los niveles del 1990, en el período de 2008 a 2012 y los países que estén en vías de desarrollo (países no incluidos en el Anexo B) no están obligados por el protocolo a comprometerse con límites de emisiones (Alatorre, 1997; Protocolo de Kyoto, 1998).

Además, del dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), el Protocolo de Kyoto contemplo otros GEI, que deben ser reducidos como son; los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF_6) y estableció tres mecanismos para el logro de los objetivos de la CMCC y ayudar a países industrializados alcanzar sus límites, éstos conjuntamente se llaman “mecanismos flexibles”, estos son: Un Sistema de Comercio de Emisiones, La Implementación Conjunta y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) (Protocolo de Kyoto, 1998; Estrada, 2003).

El MDL, es un procedimiento donde países industrializados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de GEI, dentro de países en vías de desarrollo (desarrollo sustentable y cumplir el objetivo de la CMCC) y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones aplicables a cumplir con su compromiso de reducción propio. Así mismo los países en vías desarrollo por ejemplo México, por medio del MDL pueden acceder al cobro de créditos (captura de carbono) y así ayudar a los países industrializados a dar cumplimiento a sus compromisos sobre la limitación y reducción de las emisiones de GEI (IPCC, 2001; Estrada, 2003).

2.5. Fotosíntesis

Es el proceso fundamental por medio del cual se producen los compuestos orgánicos (carbohidratos), a partir del agua y el CO_2 y por la acción de la energía solar, lo que convierte a este proceso como una de las principales síntesis químicas de la naturaleza, pues gracias a ella existen las plantas, bacterias y además toda la vida en la Tierra (Steinlin, 1984).

En el proceso de la fotosíntesis, las plantas verdes a través de los estomas de las hojas absorben los gases que contiene la atmósfera como el CO_2 y estos se combinan con el agua que hay dentro de las células de la planta, produciendo azúcar, almidón (glucosa) y celulosa, nutritivos para la misma planta y estas liberan hacia el exterior (atmósfera) el oxígeno, por esto se llaman organismos autotróficos, y todos los demás seres vivientes son heterotróficos, pues viven a expensas de plantas o de comerse los unos a los otros (Gaffron 1974; Steinlin, 1984). En otras palabras, las plantas que son autótrofos, o son verdes, la fotosíntesis toma lugar en los cloroplastos, misma que contiene al pigmento verde llamado clorofila, que es en donde se lleva a cabo la reacción en la cual se usa la luz para recombinar el agua y el dióxido de carbono en alimento digerible (carbohidratos), proceso en el cual las plantas se van desarrollando y creciendo (Gaffron, 1974).

Por ello, la vegetación a través de la fotosíntesis tiene la capacidad de asimilar el carbono e incorporarlo a su estructura (follaje, ramas, raíces y fuste), es decir, lo fija y lo mantiene almacenado por largos periodos (Ordóñez y Maser, 2001). Otro ejemplo de la fotosíntesis, es que al utilizar la energía solar, la formación de una tonelada de madera equivale a la absorción de aproximadamente 4.3 millones de Kilocalorías, que de otra forma resultarían en calentamiento de la atmósfera (Stamm, 1964).

2.6. Los sumideros de CO₂

El término sumidero de carbono se aplica al área donde el rango de captura de carbono por los organismos exceden el rango de liberación, acumulándose en formas orgánicas e inorgánicas (Brown *et al.*, 1993), es decir, el CO₂ atmosférico es absorbido por las plantas fijándose en la biomasa y otros organismos fotosintéticos que absorben este GEI, (UN, 1992). Algunos sumideros eficientes del CO₂ son: los bosques naturales, zonas tropicales, plantaciones forestales (Alfaro, 1997).

2.7. Ciclo del carbono

El ciclo del carbono es considerado como un conjunto de cuatro depósitos interconectados: la atmósfera, la biósfera terrestre (incluyendo los sistemas de aguas frescas), los océanos y los sedimentos (incluso los combustibles fósiles). Estos depósitos son fuentes que pueden liberar el carbono, o sumideros que son los que absorben carbono de otra parte del ciclo. Los mecanismos principales del intercambio del carbono son la fotosíntesis, la respiración y la oxidación (Ciesla 1996).

En general, las plantas verdes absorben el CO₂ de la atmósfera a través del proceso de la fotosíntesis. El carbono se deposita en el follaje, ramas, tallos, tronco y raíces del árbol (Ordóñez, 1999). Por ello, los árboles actúan como almacenadores al absorber el CO₂ y por consiguiente liberando oxígeno (O₂) y reteniendo el carbono en la biomasa, principalmente en forma de madera, sin embargo, al quemarse esta (la madera) el proceso se revierte usando O₂ del aire y el carbono almacenado en la madera para liberar al final CO₂ (FWPRDC 1996). Por esta razón, los bosques son importantes sumideros de carbono atmosférico, que se están perdiendo por la deforestación y degradación de los ecosistemas forestales y que pueden afectar el equilibrio dinámico de intercambio de gases (Ordóñez, 1999; Ordóñez y Masera, 2001).

2.8. Principales almacenes de carbono en los ecosistemas forestales

Los principales almacenes de carbono en los ecosistemas forestales son la vegetación, el suelo y el mantillo. La vegetación es la encargada de incorporar el carbono atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis (Ordóñez, y Masera, 2001). Algunos tipos de vegetación son los bosques (tropicales y templados), las plantaciones forestales que almacenan carbono mediante el proceso de la fotosíntesis (Ordóñez, 1999; Ordóñez y Masera, 2001).

Los bosques del mundo (templados y tropicales) capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Brown *et al.*, 1993; Ordóñez y Masera, 2001) por ello, al ser jóvenes son capaces de capturar CO₂, (biomasa) pero si son maduros, crecen poco, retienen el carbono ya fijado, pero son incapaces de almacenar más CO₂ (Brown *et al.*, 1993). Sin embargo, los bosques también tienen el papel contrario de ser fuentes de GEI, entre ellos el CO₂, cuando estos son destruidos por la deforestación, cambio de uso de suelo, conversión de praderas y a cultivos agrícolas, mal manejo, plagas, incendios forestales y la tala irracional (Ordóñez, 1999).

Las plantaciones forestales con fines de producción de madera industrial y leña, protección en áreas seleccionadas, restauración en zonas degradadas o el fortalecimiento prácticas agroforestales (Centeno, 1992) también juegan un papel importante en el ciclo del CO₂, ya que por medio del proceso de la fotosíntesis, las plantas absorben el CO₂ y lo transforman en carbohidratos que se incorpora en el tejido vegetal (biomasa) en forma de follaje, ramas, fuste, tronco y raíces (Schlesinger, 1997; Ordóñez y Masera, 2001). Por otra parte, estos ecosistemas, si son sometidos a manejos silvícolas desde jóvenes se maximiza el volumen en madera por unidad de área, dando como resultado un mayor almacén y fijación de carbono, debido a que no han alcanzado su punto máximo de crecimiento, además contribuyen a mitigar los GEI (Centeno, 1992; Schlesinger, 1997).

El suelo juega un papel muy importante en el ciclaje y almacén del carbono en los ecosistemas forestales. Los suelos de los bosques u otros ecosistemas, tienden a acumular altos niveles de carbono orgánico del suelo próximos a la superficie y tienen niveles de carbono más bajos en el subsuelo. Esta estratificación del suelo, es principalmente a la acumulación de residuo de hojas y madera en descomposición proveniente de las ramas y de los árboles que se acumulan en la superficie del suelo, además de la descomposición subterránea como las raíces. La erosión, lluvias, mal manejo y operaciones de labranza, reducen los niveles de secuestro de carbono, por la pérdida de la capa superficial del suelo (Ordóñez y Maser, 2001; Kent y Charles, 2002).

Sin embargo, la capacidad de fijación de carbono a través de procesos bióticos por los ecosistemas forestales aun es desconocida, ya que no se cuenta con procedimientos definidos para su estimación, se sabe que esta capacidad varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de la población de cada estrato por comunidad vegetal (Schulze *et al.*, 2000).

2.9. Formas de capturar carbono

Captura de carbono consiste en la idea de almacenar carbono en los suelos y en la vegetación, siendo este último el que asimila el CO₂ atmosférico, forma carbohidratos y gana volumen (Montoya *et al.*, 1995). Los bosques son sumideros eficientes del CO₂, capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema (Ordóñez y Maser, 2001). Los sistemas de uso de suelo como; agrícolas y ganaderos consumen menos CO₂, en comparación a los bosques, debido a la menor superficie total foliar (índice foliar) (Panwar, 1996).

Ordóñez (1999) describe que con el manejo forestal en México, es posible mitigar las crecientes emisiones de CO₂ en dos formas:

- a) Conservación: consiste en conservar y crear áreas naturales protegidas y suelo y el manejo de bosques naturales (manejo forestal sostenible) para

evitar la liberación del carbono que tienen ya fijado. Con la destrucción de un bosque se pueden liberar a la atmósfera de 50 a 400 t C ha⁻¹.

- b) Reforestación: Consiste en reforestar en áreas seleccionadas o zonas degradadas por medio de plantaciones y/o regeneración natural con tratamientos silvícolas para aumentar el crecimiento, volumen y la extracción de madera de los arboles, esto con el fin de almacenar y aumentar la fijación de carbono.

2.10. Servicios Ambientales

Aquéllos que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio de su manejo sustentable, como: la provisión del agua en calidad y cantidad; la protección de la biodiversidad, ecosistemas y formas de vida; la protección y recuperación de suelos; la captura de carbono, de contaminantes y componentes naturales; generación de oxígeno; la modulación o regulación climática; el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales; el paisaje y la recreación, entre otros (LGDFS, 2003).

Los ecosistemas forestales proveen una serie de valiosos servicios ambientales que debido a un deficiente conocimiento rara vez son verdaderamente valorados y apreciados, hasta que los efectos de la deforestación se hacen notables en forma de inundaciones, pérdida de calidad de agua entre otros (Pagiola *et al.*, 2003). Por otra parte día a día se ven amenazadas por los incendios forestales, tala ilegal, actividades de tipo antropogénica para la agricultura y la ganadería y por el uso de prácticas no sostenibles con el manejo de recursos forestales (SEMARNAT, 2007).

Desde el año 2003, en México la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) ha diseñado e implementado un conjunto de programas nacionales de pago de servicios ambientales (PSA), que incluyen pagos por servicios hidrológicos, conservación de la biodiversidad, captura de carbono y agro-forestaría, con el objetivo de proteger los ecosistemas forestales y ofrecer alternativas a los gestores del bosque (Phillips *et al.*, 2007).

De igual forma, México sigue implementando nuevas políticas y acciones para proteger más a nuestro patrimonio natural e impulsar la conservación y el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas terrestres y sus recursos naturales (SEMARNAT, 2007).

2.11. Fitomasa

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, normalmente es cuantificada en ton ha^{-1} de peso verde o seco y también se expresa en toneladas de peso a nivel árbol (Brown, 1997). Aunque también la fitomasa ha sido definida como cualquier materia orgánica de origen reciente que se derive de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la fitomasa deriva del material vegetal y animal, tal como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o de animales (López *et al.*, 2003).

La fitomasa forestal es un elemento muy importante para realizar estudios de investigación, ya que al estimarla nos permite evaluar la productividad de un ecosistema y se puede determinar la cantidad de carbono almacenado y/o fijado por el mismo (Andrasko, 1990; Brown, 1997). Además permite observar cual ha sido el efecto y los flujos del CO_2 entre la vegetación, suelo y la atmósfera (Brown, 1997; Makela, 1997).

Existen dos métodos para estimar el contenido de fitomasa en ecosistemas naturales, como en plantaciones; el directo y el indirecto. El directo consiste de un análisis destructivo, cortar el árbol, pesar la fitomasa por componente (raíces, fuste, ramas, follaje) en verde y determinar luego su peso seco y se extrapolan los resultados a grandes áreas. El indirecto este se utiliza cuando las dimensiones de los árboles son grandes o cuando no hay necesidad de derribar árboles pero se quiere conocer el carbono, se obtiene por medio de ecuaciones y modelos matemáticos calculados y a través de análisis de regresión entre las variables colectadas en terreno y en inventarios forestales (Brown, 1997;

Gayoso *et al.*, 2002). También a través del volumen del fuste, utilizando la densidad básica y un factor de expansión para determinar el peso seco total (fitomasa total del árbol) (Schlegel *et al.*, 2000).

2.12. Estimación de crecimiento

El crecimiento e incremento de los árboles en altura, diámetro, área basal y volumen se origina de la elongación y engrosamiento de las raíces, troncos y ramas, que causan un cambio en el peso, tamaño y forma del árbol, además estos crecimientos e incrementos dependen de distintos factores como son los climáticos, edáficos, fisiográficos y otros, como la composición del bosque o plantación, edad, densidad, además de los tratamientos silvícolas aplicados al mismo (Husch *et al.*, 1972).

El conocimiento de la edad, el ritmo de crecimiento e incremento de los bosques, plantaciones y árboles, son esenciales para planificar el manejo silvícola actual y futuro, así como la forma en que deberá desarrollarse dicho manejo (Eckstein *et al.*, 1980; Prodan *et al.*, 1997).

Para estimar la edad de un árbol existen diferentes métodos algunos de ellos son, conteo de verticilos, análisis del tronco, conteo de anillos de crecimiento (Imaña y Encinas, 2008), éste último corresponde a capas de tejido que forma el árbol en los meristemos secundarios. En el xilema o leño, ese tejido se acumula y forma los anillos o capas de crecimiento, lo cual son más notables en árboles de zonas templadas en comparación de las regiones tropicales o zonas áridas (Eckstein *et al.*, 1980; Giménez y Moglia, 1992).

El ritmo de crecimiento de los árboles puede ser estimado mediante modelos matemáticos, que predicen el crecimiento de una especie o conjunto de especies de interés en un periodo dado, a través de curvas obtenidas por el ajuste de dichos modelos, las cuales son de modo general, en forma sigmoideal (Prodan *et al.*, 1997)

2.13. El carbono acumulado en la vegetación terrestre

En la vegetación terrestre, el carbono está almacenado en forma de carbohidratos y otros compuestos químicos orgánicos (Brown, 1997). Tipper (1996) y Schlesinger (1997) reportan que la proporción de carbono, contenido en cualquier especie vegetal representa aproximadamente el 50 %. Así mismo, Brown (1997) estimó que la cantidad de carbono almacenado para diversos tipos de bosques naturales, secundarios y en plantaciones forestales, casi en su totalidad asume el valor de la fracción de carbono en materia seca en un 50% para todas las especies en general.

Por otra parte, el IPCC (1996) recomienda que para estimar el carbono almacenado en cualquier especie vegetal, se realice partir de los datos de su biomasa (seca) multiplicado por el factor de conversión ($FC= 0.5$), misma que representa el porcentaje de carbono presente en dicha biomasa.

2.14. Estudios realizados de fitomasa en plantaciones forestales de México

En México existen escasos estudios sobre fitomasa y carbono almacenado en plantaciones forestales, el cual se destacan los siguientes.

Návar *et al.* (2001) realizaron una investigación para estimar la biomasa por componente y total, con datos de 56 árboles de cinco especies de pino, típicas en plantaciones forestales de Durango, México. En ese trabajo se evaluaron seis modelos matemáticos por medio de los estadísticos de bondad de ajuste y se observó que para cada especie y para el grupo de especies, la aplicabilidad de las ecuaciones desarrolladas en modelos de regresión similar no relacionada proveen las estimaciones más eficientes y con menor sesgo.

Alba *et al.* (2007) evaluaron el carbono almacenado en la biomasa aérea de una plantación con edad de 13 años de *Pinus greggii* de tres procedencias (Hidalgo, Querétaro y Nuevo León) establecida en Naolinco, Veracruz, obteniendo un total de 4,272.90 kg de carbono almacenado en la biomasa

aérea de la plantación, mientras que a nivel árbol por procedencia captura un promedio de carbono de 57.91, 70.65 y 90.95 kg, respectivamente.

Pacheco *et al.* (2007), realizaron un estudio en una plantación de *Pinus greggii* Engelm. establecida en Acaxochitlan, Hidalgo, México, con una edad de seis años, quienes estimaron el potencial de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, utilizando una muestra de 20 árboles. La biomasa aérea promedio por árbol fue de 8 kg distribuidos de la siguiente manera: 51% en el fuste, 24% en ramas y 25% en follaje, la biomasa aérea total de la plantación fue de 1.4 t, lo que equivale a 35.2 t ha⁻¹. La concentración del carbono en el tejido vegetal fue de 51%, el potencial de carbono almacenado es de 17.9 t ha⁻¹, lo que representa a CO₂ equivalente a 65.8 t CO₂ ha⁻¹.

Aguilar (2009) determinó la fitomasa aérea, el carbono almacenado y el CO₂ equivalente en una plantación de *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila, con una edad de 16 años. Mediante un análisis destructivo de 30 árboles, obtuvo información dasométrica, peso fresco y muestras de componentes (fuste, ramas, hojas y conos) de cada árbol, mismos que utilizó para estimar su fitomasa y por medio de modelos alométricos obtuvo un resultado en fitomasa aérea de la plantación de 30.06 t ha⁻¹ con un almacén de carbono de 15.03 t C ha⁻¹, el cual corresponde a 55.16 t CO₂e ha⁻¹. A nivel árbol el promedio de fitomasa aérea y carbono almacenado fue de 22.84 y 11.42 kg, respectivamente, este último se concentra en el fuste comercial con el 59.06%, en las ramas el 29.43%, en las hojas el 10.42% y en los conos el 1.09%.

Si bien en México existen diversos estudios que se han concentrado en determinar la fitomasa aérea y el carbono almacenado en ecosistemas naturales, tales como los trabajos de Castellanos *et al.* (1996), Zamora (2003), Rodríguez *et al.* (2006), Díaz *et al.* (2007) y González (2008), existiendo solo algunos los que estiman y describen su crecimiento e incremento como Nájera (1999) y Montes de Oca y García (2005), por lo que hace necesario desarrollar trabajos de estimación de fitomasa y carbono almacenado en plantaciones forestales de *Pinus* y describir su crecimiento e incremento en la misma.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del área experimental

El área experimental se localiza en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. El CAESA se encuentra dentro de la Sierra Madre Oriental en Los Lirios, Arteaga, Coah., a una distancia aproximada de 45 km de Saltillo, Coah., entre las coordenadas geográficas 25° 23' a 25° 24' Norte y 100° 36' a 100° 37' Oeste, a una altitud de 2280 msnm (Figura 1) (INEGI, 2000).

El área se encuentra dentro de la región hidrológica Bravo - Conchos (RH24) y la cuenca hidrológica Rio Bravo - San Juan (24B) (SPP, 1983). Están presentes dos arroyos intermitentes uno en la parte Norte y otro en parte Oeste, que nacen en la parte alta de la Sierra Rancho Nuevo (INEGI, 2000). La geología del CAESA está constituida de 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 petrocálica (CETENAL, 1977).

De acuerdo con la estación meteorológica de San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Coah., ubicada a 12 km del CAESA, el clima es templado con verano fresco y largo, con una temperatura media anual de 14.8°C; la temperatura media del mes más frío es de 9°C y del mes más caliente de 19.7°C; siendo los meses de mayo a julio con temperaturas más altas y las más bajas de diciembre a febrero; la precipitación media anual es de 521.2 mm; los meses de mayor precipitación son de junio a septiembre y los más secos son diciembre y enero (CONAGUA, 2001). La fórmula climática del área de estudio es Cb (X')(Wo)(e)g (García, 1987).

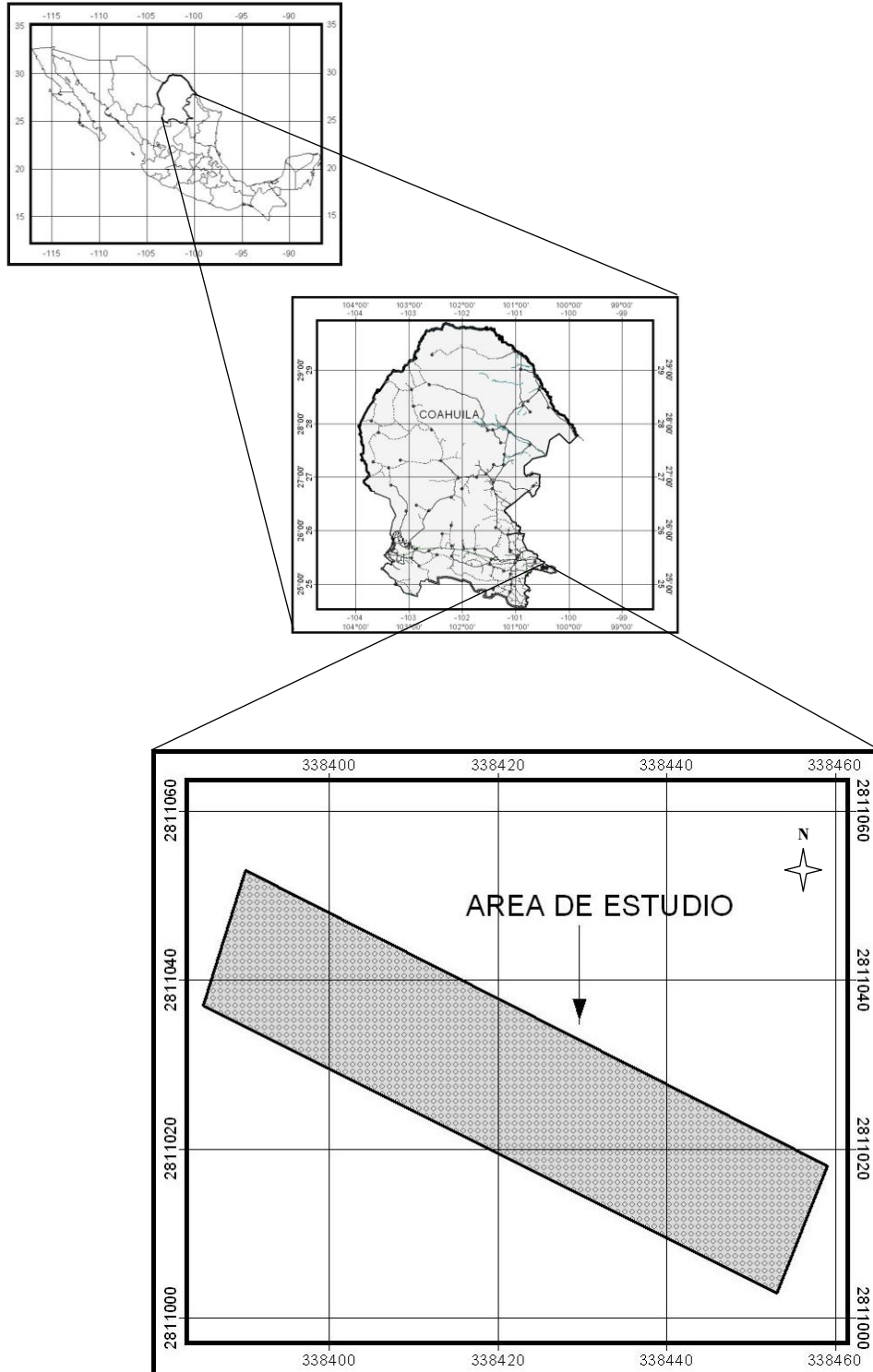


Figura 1. Localización del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

3.2. Descripción de la plantación

La plantación o el ensayo de procedencias se estableció en junio de 1992, en una superficie de 1428 m², con plántulas de *Pinus greggii* Engelm. de tres procedencias (Cañón de Jamé, Los Lirios de Arteaga, Coah. y Cuauhtémoc, Saltillo, Coah), mediante un diseño experimental de tres bloques completos al azar, perpendiculares a la pendiente en exposición sur, con 39 plantas por parcela como unidad experimental, 117 plantas por procedencia y 351 plantas útiles en total; se utilizaron 98 plantas de borde. La distribución de la planta se hizo en “tresbolillo” con espaciamiento de 1.8 m (Figura 2).

3.3. Características de la especie estudiada

3.3.1. *Pinus greggii* Engelm

Árbol de 10 a 15 m de altura y hasta 40 cm de diámetro, de joven la corteza es lisa y grisácea, y obscura, áspera y dividida por profundas fisuras verticales después; ramillas flexibles, de color rojizo, con tinte grisáceo. El follaje denso, erguido, verde brillante a grisáceo, las hojas en fascículos de tres, los conos son oblicuos-cónicos lustrosos, ocre amarillentos, seróticos (Martínez, 1948).

Pinus greggii es una especie endémica de México, se distribuye sobre la Sierra Madre Oriental y se ha reportado en los estados de Coahuila, Hidalgo, Nuevo León, Puebla, Querétaro, San Luís Potosí y Veracruz, es uno de los principales recursos forestales por su gran variación presenta rápido crecimiento y precocidad en su floración fuera de su ambiente natural, en la región norte de México ha mostrado una buena sobrevivencia y desarrollo en sitios secos (400-600 mm) (Dvorak y Donahue, 1993), características importantes para ser utilizada en plantaciones forestales de restauración en zonas degradadas (Vargas y Muñoz, 1988) y para la venta de servicios ambientales por concepto de captura de carbono (Pacheco *et al.*, 2007).

3.4. Método de muestreo

3.4.1. Selección de árboles

Para realizar la estimación de la fitomasa y de la captura de carbono en la plantación de 16 años de edad de *Pinus greggii*, del presente estudio, la selección de los árboles muestra se realizó considerando la simulación de aclareos para el diseño de un área semillera del ensayo de tres procedencias de *Pinus greggii* Engelm. diseñado por Bucio (2006), mismo que describe, el número y los árboles a extraer (primero y segundo aclareo).

Se seleccionó un total de 20 árboles, considerando su vigorosidad, sin deformidades ni plagas o enfermedades y que incluyeran todas las categorías de diámetro y de altura existente según lo descrito por Schlegel *et al.* (2000), así mismo, se descarto la posibilidad de ser analizados por procedencia debido a que fue muy pequeño el número de árboles seleccionados por procedencia (Figura 2) lo que haría difícil compararlo estadísticamente. Cabe destacar que la plantación solo cuenta con dos categorías diamétricas existentes de 5 y 10 cm.

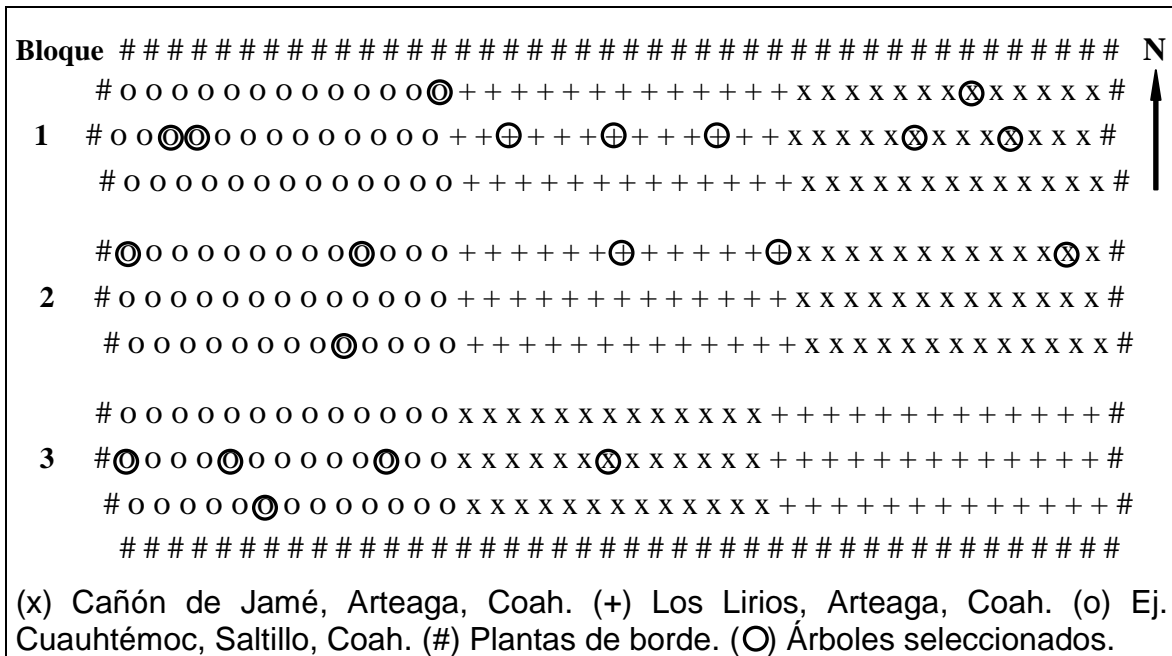


Figura 2. Croquis y árboles seleccionados en la plantación de *Pinus greggii* Engelm., establecido en (CAESA) Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

3.4.2. Variables evaluadas

Una vez elegidos los 20 árboles en el área de estudio, se procedió a medir y registrar cada una de las variables de los árboles muestra, para lo cual las medidas fueron de dos formas, la primera con el árbol en pie y la segunda después de derribado el árbol; este procedimiento ha sido recomendado por Schlegel *et al.* (2000).

A cada árbol en pie se le midió, el diámetro basal (0.05 m), el diámetro a 0.30 m, el diámetro normal (1.30 m) y el diámetro en donde inicia la copa, utilizando la cinta diamétrica con la posición más correcta; se midió también el diámetro de copa con flexómetro, así mismo se contó el número de verticilos a través del conteo visual.

Con el uso de motosierras (Husqvarna), los árboles fueron derribados mediante el método direccional con el fin de evitar daños a la plantación. Además se utilizaron lonas colocadas en el suelo con el objetivo de evitar la pérdida de los componentes vegetales al momento del derribo del árbol. Una vez derribado, a cada árbol se le midió la altura total desde la base del tallo hasta el ápice, utilizando la cinta métrica de 20 m. El derribo y la extracción de los árboles muestra fue realizado en dos sesiones (la primera el 12 y la segunda el 19 del mes de junio del 2008), en un periodo no mayor a un mes para que la fitomasa foliar no presentara variaciones.

3.4.3. Pesaje de componentes y obtención de muestras

Con el árbol derribado se procedió a seguir la metodología propuesta por Brown (1997) y Gayoso *et al.* (2002) la cual consistió en separar cada componente: hojas, ramas y fuste, éste último fue seccionado (trozas) a partir de la base del tallo hasta 1.30 m y las siguientes a cada metro hasta llegar a un diámetro no menor de 0.03 m.

Cada componente (hojas, ramas y fuste) se pesó en su totalidad en estado fresco con una báscula con capacidad de 12 kg, del peso total de los componentes hojas y ramas se obtuvo y peso una muestra representativa la cual fue empaquetada en bolsas de papel etiquetadas con una clave de identificación (nombre del componente, peso de la muestra, número de árbol y fecha).

A cada árbol se le extrajeron en promedio seis rodajas de 5 cm de espesor, la primera en la parte baja al diámetro mayor (0.05 m), la segunda en la parte alta al diámetro menor (1.30 m) y las demás rodajas se obtuvieron siguiendo las medidas de las trozas en los diámetros menores (2.30, 3.30, 4.30, 5,30 m) (Figura 3) (Méndez *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2007). Cada rodaja se etiquetó con una clave de identificación (número de rodaja, altura, número de árbol) así como la bolsa de papel (número de árbol) donde fueron empaquetadas para un fácil manejo en su traslado al laboratorio para análisis complementarios.

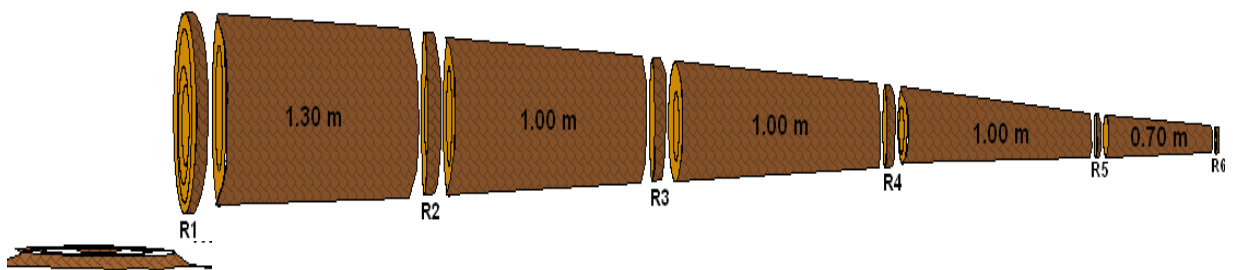


Figura 3. Troceo y obtención de rodajas de los árboles muestreados de *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

3.5. Procedimiento de laboratorio

3.5.1. Obtención del peso seco de las muestras

Las muestras de cada componente fueron introducidas en estufas de secado (FELISA ESTUFAS) de tipo convencional pertenecientes al laboratorio de Ingeniera Forestal de la UAAAN, con el fin de obtener el peso constante o anhidro. Las muestras de follaje fueron secadas a una temperatura promedio de 75°C, y las ramas y rodajas a temperaturas promedio de 80°C (Nájera, 1999; Méndez *et al.*, 2005; Pacheco *et al.*, 2007). Para identificar el peso constante o anhidro de cada muestra se realizó un monitoreo cada tercer día, el cual consistió en pesar cada muestra con una báscula (OHAUS) de gran precisión (0.001 gr) y capacidad de 2610 gr.

3.5.2. Determinación del volumen fustal y edad de *Pinus greggii* Engelm

Con base en las medidas registradas de cada árbol como: la altura total, longitud y diámetro (mayor y menor) de cada troza, se estimó el volumen del fuste total de cada árbol con la fórmula de Smalian (González, 2008).

Por otra parte, las rodajas de cada árbol fueron pulidas y barnizadas con el fin de facilitar el conteo de anillos de crecimiento y para resaltar el contorno de los mismos.

Las rodajas de cada árbol fueron escaneadas, usando el escáner (EPSON TWAIN PRO), así mismo, se utilizó el programa WinDENDRO™ Reg 2005c y XLSTEM™ para contabilizar y medir los anillos de cada árbol; realizando análisis trocales, se obtuvo la edad, el volumen de fuste anual y total de cada árbol.

Los volúmenes del fuste, obtenidos con la fórmula de Smalian y el obtenido con WinDENDRO™ y XLSTEM™ fueron comparados para verificación de

resultados, utilizando éste último por mayor precisión y debido a que la fórmula de Smalian sobrestimaba algunas cifras de volumen.

3.5.3. Estimación de la fitomasa aérea y carbono almacenado a nivel árbol

Para obtener la fitomasa seca aérea del árbol de *Pinus greggii*, se obtuvo, primeramente, el contenido de humedad para cada componente; hojas, ramas y fuste y posteriormente obtener su fitomasa seca. Con los valores de fitomasa seca de cada uno de los componentes (hojas, ramas y fuste) se realizó una sumatoria obteniéndose así la fitomasa seca total del árbol. Para mejor comprensión se muestra los procedimientos seguidos.

- a) Estimación del contenido de humedad de hojas ramas y fuste; utilizando los valores de peso fresco y peso seco con base a la siguiente ecuación propuesta por Schlegel *et al.* (2001).

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

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 total a nivel componente (hojas, ramas y fuste) y árbol, acorde a la siguiente fórmula:

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

Donde:

B= Fitomasa seca (gr).

PhBt= Peso húmedo total de fitomasa (gr).

CH= Contenido de humedad (%).

b) La fitomasa seca de fuste fue obtenida con dos finalidades:

- 1) Incorporarla a la fitomasa seca aérea del árbol y ajustar modelos alométricos para estimar la fitomasa de cada componente y total.
- 2) Obtener la fitomasa seca de fuste a cada edad (años); utilizando el volumen anual obtenido con WinDENDRO™ y XLSTEM™ y la densidad básica (0.4636 g cm³) de *Pinus greggii* determinada por López y Valencia (2000), posteriormente, determinar el crecimiento e incremento de la misma. Se utilizó la siguiente fórmula para el segundo procedimiento.

$$Bf = V * Dm$$

Donde:

Bf = Fitomasa de fuste (ton).

V= Volumen (total o anual) de fuste (m³).

Dm= Densidad de la madera (gr cm³).

Las estimaciones de fitomasa seca de fuste, se realizaron de acuerdo, a Ketterings *et al.* (2001) los cuales mencionan que el conocer el valor de densidad básica y el volumen de madera verde nos permite conocer la proporción que fitomasa seca que existe en un determinado volumen.

c) La estimación de la fitomasa seca total se estimó sumando los tres componentes de fitomasa; hojas, ramas y fuste total.

$$Bt = Bh + Br + Bf$$

Donde:

Bt= Fitomasa total (gr).

Bh= Fitomasa de hojas (gr).

Br= Fitomasa de ramas (gr).

Bf= Fitomasa del fuste total (gr).

Con los valores obtenidos de fitomasa por componente y total se estimaron los valores de carbono por componente, multiplicado por el factor de conversión FC= 0.5 recomendado por el IPCC (1996), misma que representa el porcentaje promedio de carbono concentrado en el tejido vegetal (Tipper, 1996; Brown, 1997; Schlesinger, 1997).

3.5.4. Ajuste de modelos para la fitomasa por componente y total

Se probaron siete modelos alométricos propuestos por la FAO (1999) y Gayoso *et al.* (2002) (Cuadro 1) para estimar la fitomasa por componente (hojas, ramas, fuste) y total de *Pinus greggii* Engelm., en función de sus variables diámetro normal y altura total, utilizando el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión 9.1.

Cuadro 1. Modelos probados para estimar la fitomasa por componente y total en *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

No.	Modelos
1	$LnY = \beta_0 + \beta_1 LnD$
2	$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2$
3	$Y = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 H + \beta_3 D^2 H$
4	$Y = \beta_0 + \beta_1 D^2$
5	$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2 H$
6	$LnY = \beta_0 + \beta_1 D$
7	$LnY = \beta_0 + \beta_1 LnD^2 H$

Donde: Y= Fitomasa en hojas, ramas, fuste y total (gr); β_0 , β_1 , β_2 y β_3 = Parámetros estadísticos; Ln= Logaritmos natural; D= Diámetro normal (cm) y H= Altura total del árbol (cm).

La prueba y selección de los modelos de fitomasa por componente y total del árbol, se realizaron en el programa de SAS (Apéndice 1 al 5 y 7) por medio del siguiente procedimiento.

- a) Los parámetros de los modelos se estimaron mediante el procedimiento PROC REG del paquete estadístico SAS.
- b) Después se analizó cada modelo con los datos de los 20 árboles de la muestra.
- c) 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.
- d) La elección de los modelos se fundamentó en los siguientes criterios: 1) el valor más bajo del cuadrado medio del error (CME), 2) el valor más alto del coeficiente de determinación (R^2), 3) análisis de los residuales estudentizados (r-Student), 4) análisis de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk, 5) el valor más bajo de los predichos residuales de la sumatoria de cuadrados (PRESS) y (ABSPRESS), 6) el número de observaciones (n) y 7) el análisis de simplicidad del modelo.

3.5.5. Ajuste de modelos de crecimiento a la fitomasa de fuste

Se probaron nueve modelos para estimar y describir el crecimiento e incremento en fitomasa de fuste de *Pinus greggii* Engelm., (Cuadro 2), utilizando los valores de fitomasa de fuste anual de cada árbol obtenidos con WinDENDRO™ y XLSTEM™.

Cuadro 2. Modelos probados para estimar el crecimiento e incremento fustal de *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

No.	Nombre del modelo	Ecuación
1	Gompertz	$Y = \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 E}}$
2	Schumacher	$Y = e^{\beta_0 + \beta_1 / E}$
3	Parábola	$Y = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2$
4	Polinomial	$Y = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2 + \beta_3 E^3$
5	Logístico	$Y = \beta_0 / (1 + e^{\beta_1 - \beta_2 E})$
6	Logístico de tres parámetros	$Y = \beta_0 / ((1 + \beta_1) * e^{-(\beta_2 * E)})$
7	Logístico de cuatro parámetros	$Y = \beta_3 + (\beta_0 - \beta_3) / ((1 + \beta_1) * e^{-(\beta_2 * E)})$
8	Exponencial	$Y = \beta_0 e^{\beta_1 E}$
9	Exponencial de cuatro parámetros	$Y = \beta_0 e^{(-\beta_1 * E)} + \beta_2 e^{(-\beta_3 * E)}$

Donde: Y= Fitomasa de fuste (kg); β_0 , β_1 , β_2 y β_3 = Parámetros estadísticos; e= Base de los logaritmos neperianos; E= edad (años).

El ajuste de los modelos de crecimiento en fitomasa de fuste, se realizaron utilizando el programa estadístico SPSS 8.0 for Windows. La elección del mejor modelo se fundamentó en los siguientes criterios: a) el valor mayor de coeficiente de determinación (R^2), b) el valor menor del cuadrado medio del error (CME), c) el valor menor del error estándar (Syx), d) el valor menor de coeficiente de variación (CV) y e) el valor mayor de la F calculada (F cal) (Apéndice 6).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características dendrométricas y estadísticos básicos

Los 20 árboles de *Pinus greggii* analizados en el presente estudio, comprendieron un diámetro normal entre 7.1 y 11.8 cm y una altura de 4.93 a 7.92 m, es decir, se incluyen las dos categorías diámetricas (5-10 cm) y de altura existentes en la plantación. Con respecto a los valores obtenidos de fitomasa seca de hojas osciló entre 816.16 y 7680.22 gr, mientras que para la fitomasa seca de ramas osciló de 1370.46 a 11394.23 gr, en el caso de la fitomasa seca de fuste osciló entre 6139.48 a 18745.87 gr y la fitomasa seca total de 8903.25 a 36519.03 gr (Cuadro 3). Existen estudios de estimación de fitomasa aérea, los cuales incluyen la mayoría de las categorías diamétricas y de alturas existentes de su área de estudio, como el que reporta Návar *et al.* (2001) en plantaciones forestales de *Pinus durangensis* y *P. cooperi* en Durango y el de Aguilar (2009) en una plantación de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila.

Cuadro 3. Características dendrométricas y estadísticos básicos de los árboles muestreados de *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Variable	Media	D.E.	C.V.	Min.	Max.
Diámetro basal (cm)	13.575	2.238	16.489	10.000	18.000
Diámetro a 0.30 m (cm)	11.685	1.890	16.174	9.000	15.000
Diámetro normal (cm)	9.350	1.570	16.787	7.100	11.800
Diámetro de copa (m)	2.823	0.586	20.749	1.890	4.050
Altura total (m)	6.360	0.825	12.973	4.930	7.920
Volumen total de fuste (m ³)	0.023	0.009	38.791	0.013	0.040
Fitomasa seca de hojas (gr)	2518.402	1656.500	65.776	816.158	7680.224
Fitomasa seca de ramas (gr)	4494.855	2535.946	56.419	1370.457	11394.230
Fitomasa seca de fuste (gr)	10666.739	4136.193	38.777	6139.485	18745.870
Fitomasa seca de total (gr)	17679.996	7946.891	44.948	8903.254	36519.030

D.E.= Desviación Estándar; C.V.= Coeficiente de Variación; Min.= Mínimo; Max.= Máximo.

4.2. Porcentaje de fitomasa por componente en *Pinus greggii* Engelm

En el fuste el porcentaje de fitomasa promedio fue de 61.8%, variando desde 47.8% a un máximo de 75.9%. En las ramas se presenta un porcentaje promedio de 24.7% de fitomasa, variando desde un mínimo de 14.5% a un máximo de 31.2%. El porcentaje promedio de fitomasa de hojas es de 13.5%, variando desde 9.2% a un máximo de 21.0% (Figura 4).

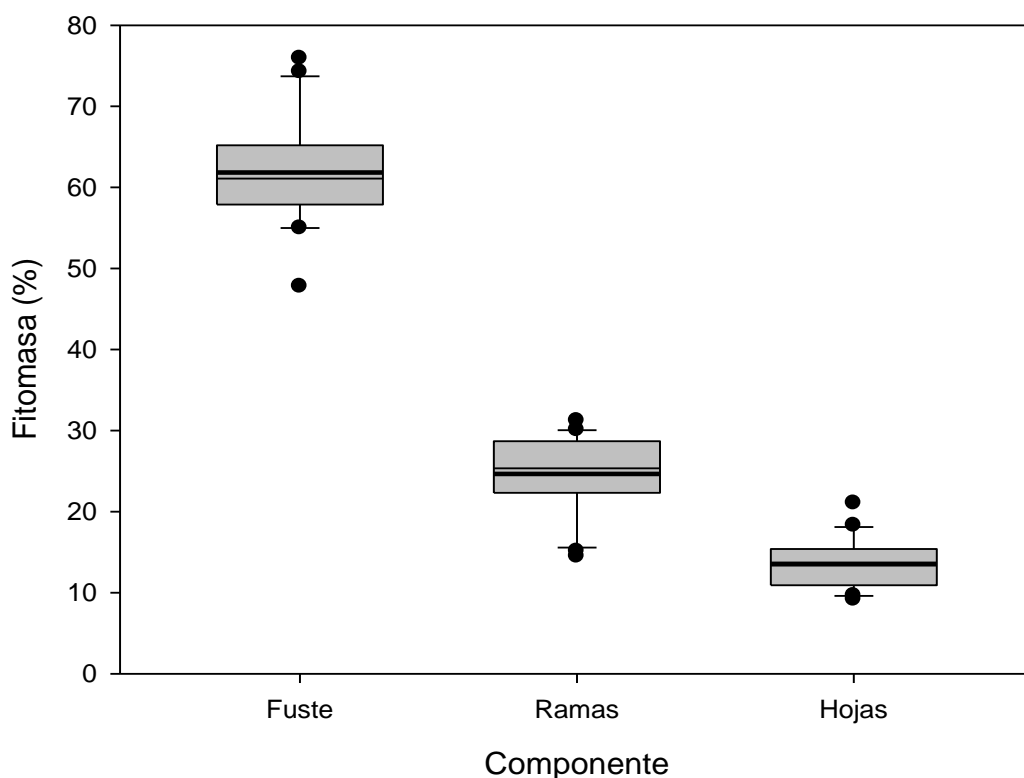


Figura 4. Porcentaje promedio de la fitomasa observada por componente de *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Algunos estudios referentes a porcentaje promedio de fitomasa por componente en pinos, muestran valores cercanos a los encontrados en este estudio. Tal es el caso de Nívar *et al.* (2001) quienes reportan que la fitomasa en plantaciones forestales de *P.durangensis* y *P. cooperi*, los fustes, ramas y hojas representaron el 64 y 67%; 22.5 y 22.4% y el 13.5 y 10.6%,

respectivamente. Gayoso (2001) reporta que en plantaciones de *Pinus radiata* con edades comprendidas entre 3 y 23 años, la fitomasa promedio de fuste alcanza el 73.62%, seguido por las ramas con el 14.95% y por último las hojas con el 11.42%. Pacheco *et al.* (2007) reportan el 51% en el fuste, 24% en las ramas y 25% en el follaje en *Pinus greggii* Engelm., de una plantación de 6 años de edad. Aguilar (2009) en una plantación de *Pinus greggii* Engelm., de 16 años de edad, reporta que el fuste aporta el 59.06% de fitomasa, seguido por las ramas con 29.43%, las hojas con el 10.42%, finalmente, en una pequeña proporción la fitomasa de conos (1.09%).

4.3. Fitomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm

4.3.1. Modelo para la estimar la fitomasa de hojas

Para la estimación de la fitomasa de hojas de *Pinus greggii* Engelm., se probaron siete modelos alométricos (Cuadro 1). El modelo seleccionado fue el 2, por presentar un $R^2= 0.9039$ y un C.M.E.= 121472.0 y con valores de PRESS= 2906845.3 y ABSPRESS= 6087.8, además obtuvo una buena distribución de los residuales estudentizados y cumple con la prueba de normalidad (0.248) (Apéndice 2 y 7).

También destacan los modelos 3 y 1, dichos modelos presentaron valores cercanos al modelo seleccionado. El modelo 6, fue el que menos ajuste presento, reportando una $R^2= 0.7462$ y un mayor C.M.E.= 735219.4 (Apéndice 2). Los siete modelos probados para estimar la fitomasa de hojas, presentaron menor precisión ($R^2= 0.8196$), comparada con la fitomasa de ramas ($R^2= 0.9324$), fuste ($R^2= 0.9277$) y total ($R^2= 0.9278$) (Apéndice 2 al 5).

La curva ajustada de fitomasa de hojas (Figura 5) presenta una parte cóncava durante los primeros 10 cm de diámetro normal, cuyo incremento de fitomasa de hojas es lento, después el incremento es más rápido alcanzado un diámetro de 11.8 cm, posteriormente muestra una tendencia a incrementarse la fitomasa de hojas conforme aumente el diámetro normal.

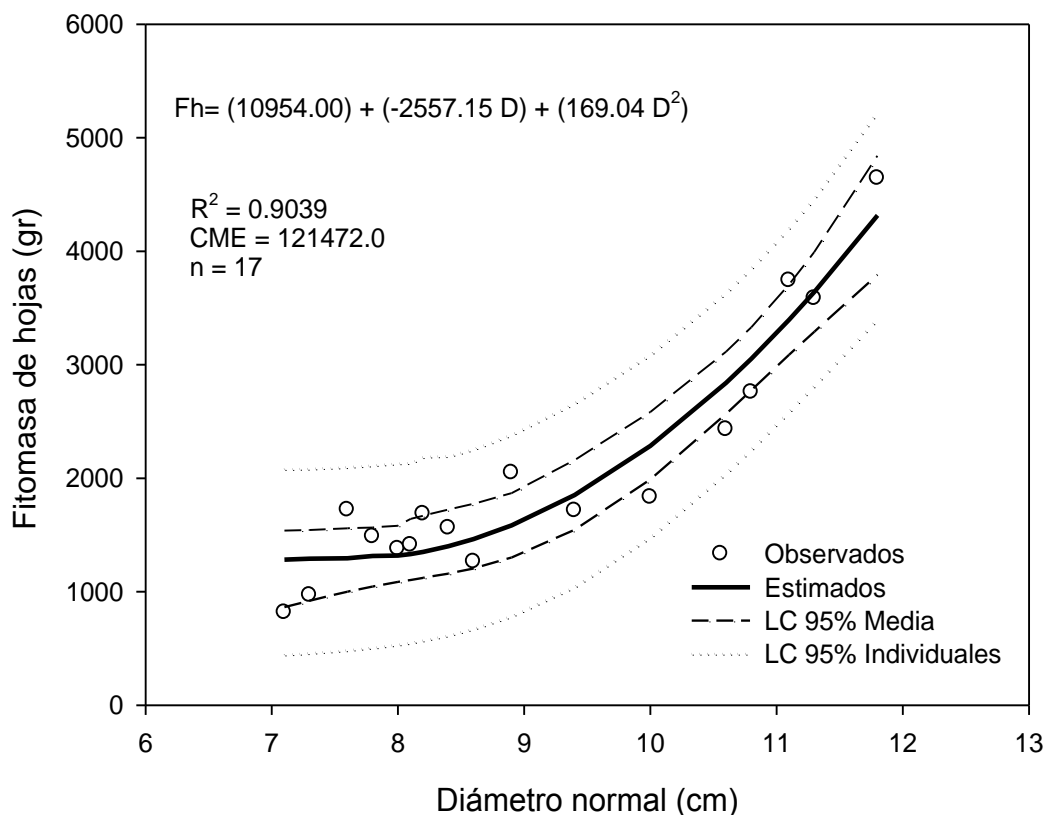


Figura 5. Diagrama de dispersión de la relación diámetro normal-fitomasa de hojas y el ajuste del modelo 2, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% Media) y de los valores individuales (LC 95% Individuales) para *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Návar *et al.* (2001) evaluaron modelos matemáticos lineales y no lineales para estimar la fitomasa por componente y total en plantaciones forestales de *Pinus durangensis* y *P. cooperi* en Durango, el cual reportan valores promedios menores en los estadísticos ($R^2 = 0.38$ y un error estándar de 1.21 kg.) de los modelos para estimar fitomasa de hojas al del presente estudio.

Merino *et al.* (2003) estimaron la cantidad de fitomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia, España. En su estudio utilizaron modelos alométricos para estimar la fitomasa total (arbórea) y las diferentes fracciones arbóreas (madera, corteza, ramas y hojas), mismos que seleccionaron un modelo de la forma $LnY = \beta_0 + \beta_1 LnD$ para estimar

la fitomasa de hojas, obteniendo un valor de $R^2= 0.73$. Al comparar los resultados obtenidos por estos autores al del presente estudio, se encontró que son diferentes, debido a que reportan un modelo que se descarto en el presente estudio (Modelo 1) al no presentar buen ajuste para estimar la fitomasa de hojas; además reportan un valor de R^2 menor al del presente estudio.

Aguilar (2009) estimó la fitomasa por componente y total de *Pinus greggii* Engelm., de una plantación de 16 años de edad en Arteaga, Coah., mediante modelos alométricos. El modelo que el autor seleccionó para estimar la fitomasa de hojas presento un buen ajuste con un $R^2= 0.7657$ y un C.M.E.= 0.5413. Al comparar los resultados obtenidos por Aguilar (2009) con respecto al presente estudio, Aguilar (2009) reporta un valor de R^2 menor que en el presente estudio; sin embargo, existe similitud al haber realizado su estudio de la misma especie y en una plantación de la misma edad.

4.3.2. Modelo para estimar la fitomasa de ramas

Los modelos alométricos para estimar la fitomasa de ramas de *Pinus greggii* Engelm. (Cuadro 1) presentaron mejor ajuste en comparación con la fitomasa total, fuste y hojas, con coeficientes de determinación y C.M.E. promedio de 0.9324 y 250162.1, respectivamente, con valores promedios más bajos de PRESS y ABSPRESS (Apéndice 3).

El modelo 4 fue el que mostró mejor ajuste para estimar la fitomasa de ramas al presentar buenos estadísticos ($R^2= 0.9526$, C.M.E.= 140093.0 y con valores de PRESS= 2539951.5 y ABSPRESS= 5678.9). Además, los residuales estudentizados presentaron una buena distribución, cumpliendo con la prueba de normalidad (0.176) y simplicidad (Apéndice 3 y 7).

Los modelos 3 y 1 también presentaron valores cercanos al modelo seleccionado con R^2 de 0.9684 y 0.9547, respectivamente, pero se descartaron por diferencias muy pequeñas en los decimales de los estadísticos y

simplicidad, por lo que se eligió como mejor modelo el 4. El modelo 7 fue el que menos ajuste mostró para la estimación de fitomasa de ramas (Apéndice 3).

La curva de fitomasa de ramas (Figura 6) muestra un incremento rápido desde los 7.1 hasta 11.8 cm de diámetro normal, así mismo se observa que tiende a incrementarse cuando mayor sea el diámetro normal.

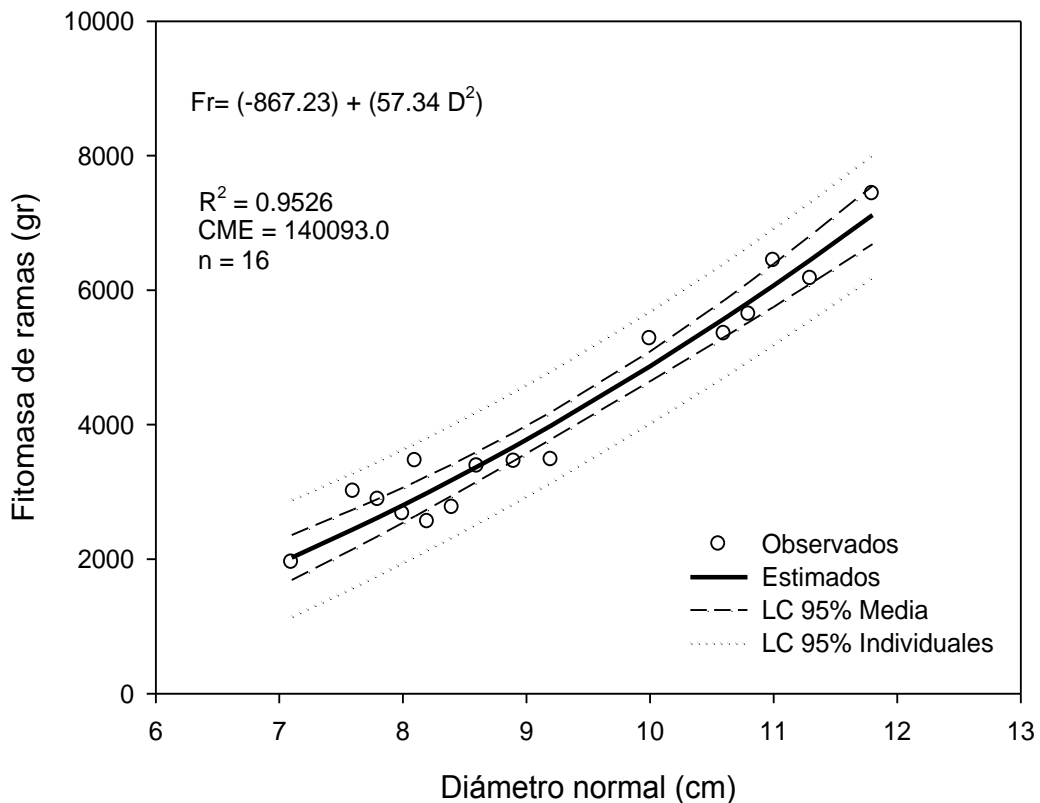


Figura 6. Diagrama de dispersión de la relación diámetro normal-fitomasa de ramas y el ajuste del modelo 4, límites de confianza al 95% de la media (LC 95% Media) y de los valores individuales (LC 95% Individuales) para *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Návar *et al.* (2001) reportan para la fitomasa de ramas en plantaciones forestales de *Pinus durangensis* y *P. cooperi* en Durango, valores promedios de coeficiente de determinación ($R^2 = 0.66$) menores al presente estudio. Benítez *et al.* (2002) determinaron la fitomasa de ramas en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea* de la Empresa Forestal Integral (E.F.I.) Viñales, Cuba, mediante

un modelo matemático logarítmico, el cual reportan un valor de coeficiente de determinación ($R^2= 0.94$) semejante con respecto al presente estudio.

Así mismo, Aguilar (2009) estimó la fitomasa de las ramas de *Pinus greggii* Engelm. de una plantación en Arteaga, Coah., utilizando un modelo de la forma $LnY = \beta_0 + \beta_1 D$, el cual presentó un valor de $R^2= 0.8950$ y un C.M.E.= 1.9859. Comparando los resultados obtenidos por Aguilar (2009) al del presente estudio, se encontró que son diferentes, debido a que el modelo seleccionado por Aguilar (2009) se descartó en el presente estudio (Modelo 6) al no presentar buen ajuste en la estimación de la fitomasa de ramas; así mismo, reporta un valor de R^2 menor al del presente estudio.

4.3.3. Modelo para estimar la fitomasa de fuste

El modelo seleccionado para estimar la fitomasa de fuste de *Pinus greggii* Engelm., fue el 5 dado que presentó buenos estadísticos ($R^2= 0.9802$, C.M.E.= 426869.0, y con valores de PRESS= 8806434.7 y ABSPRESS= 9923.2), además, de que obtuvo una buena distribución de los residuales estudentizados, cumpliendo con la prueba de normalidad (0.864) y fue elegido por su gran simplicidad (Apéndice 4 y 7).

Los otros modelos que también sobresalen en el análisis son el 7 y 3. El modelo 7 fue el más próximo al modelo 5 con un R^2 de 0.9821 y un C.M.E.= 363442.8, con una buena distribución en los residuales estudentizados pero con una reducida base de datos ($n= 17$) y con una estructura más compleja y emplear las variables diámetro normal y altura total, así mismo el modelo 3 presentó un $R^2= 0.9804$ y un C.M.E.= 451955.0, con un ligero aumento en los valores de PRESS= 10923556.9 y ABSPRESS= 11021.4, circunstancias por las que ambos modelos fueron descartados quedando como mejor modelo el 5, además, por su simplicidad. El modelo que menos ajuste registró para la estimación de fitomasa en fuste de *Pinus greggii* Engelm. fue el 1 (Apéndice 4).

Los siete modelos probados para estimar la fitomasa fustal, total y de ramas de *Pinus greggii* Engelm., presentaron valores promedios similares de R^2 (0.9277, 0.9278 y 0.9324 respectivamente), pero la fitomasa de fuste presenta la normalidad promedio más alta (0.710) en comparación de la fitomasa total (0.661), de ramas (0.445) y hojas (0.484) (Apéndice 2 al 5).

La fitomasa de fuste (Figura 7) presenta variabilidad, a razón de los diferentes diámetros y alturas comprendidos de los árboles analizados en el presente estudio, lo cual explica que mientras más aumente el diámetro normal y altura, la fitomasa de fuste también se incrementa.

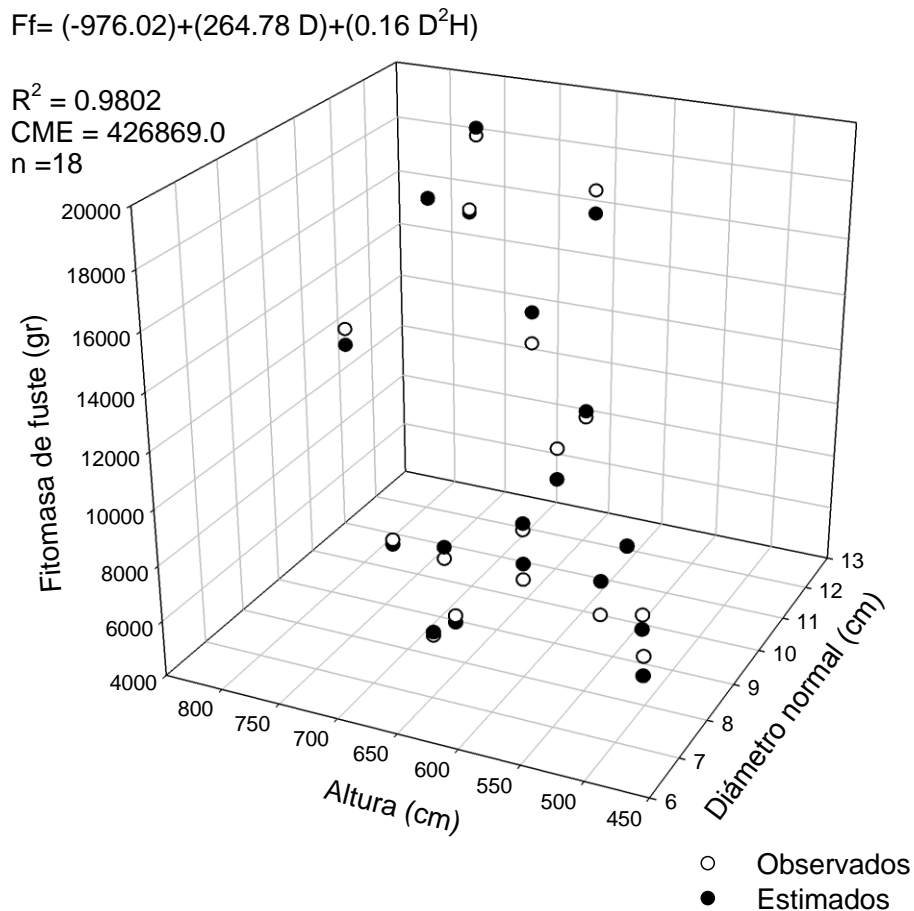


Figura 7. Relación entre las variables diámetro normal y altura con la fitomasa de fuste de *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Návar *et al.* (2001) evaluaron modelos matemáticos lineales y no lineales para estimar fitomasa de fustes en plantaciones forestales de *Pinus durangensis* y *P. cooperi* en Durango, el cual reportan valores promedios de R^2 de 0.83 y error estándar de 3.12 kg en el que utilizaron árboles con una edad promedio de 14 años, con un diámetro basal promedio de 13 cm y una altura de 6 m, datos similares con respecto al presente estudio, ya que se utilizó un diámetro basal promedio de 13.6 cm y una altura de 6.4 m con una edad de 16 años; sin embargo, el resultado de R^2 reportado por estos autores es menor que en el presente estudio.

En un estudio realizado para estimar fitomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda*, en el sur de Paraná Brasil, Sanquetta *et al.* (2001) estimaron la fitomasa de fuste de 18 árboles apeados con edades de 17 a 21 años mediante modelos alométricos. Los resultados mostraron que los modelos que mejor estiman la fitomasa de fuste son aquellos que presentaban variables de fácil medición, diámetro normal (D) y altura total (H), así mismo, el modelo que mostro mejor ajuste presento un $R^2= 0.97$. Comparando los resultados obtenidos por estos autores, se puede observar que existe similitud en cuanto al modelo seleccionado en el presente estudio, al utilizarse las variables de fácil medición (D y H); además de que el valor de R^2 es muy semejante.

4.3.4. Modelo para estimar la fitomasa total

Los siete modelos para estimar la fitomasa total de *Pinus greggii* Engelm., (Cuadro 1) presentaron coeficientes de determinación promedio de 0.9278 y con valores promedios más altos en PRESS (101150461.5) y ABSPRESS (31628.2) en comparación de la fitomasa de hojas, de ramas y de fuste (Apéndice 2, 3, 4 y 5).

El modelo 3 es el que mejor estima la fitomasa total presentando el valor más alto de R^2 (0.9669) y el menor valor de C.M.E. (1822812.0), presenta también una buena distribución de los residuales estudentizados y cumple con la prueba de normalidad (0.230) (Apéndice 5 y 7).

Otros modelos que también sobresalen son el 7 y 2, ya que presentaron valores cercanos al modelo seleccionado. El modelo que menor ajuste presentó para estimar la fitomasa total de *Pinus greggii* fue el 1, con un R^2 de 0.8781 y C.M.E. de 8127806.0 (Apéndice 5).

La fitomasa total (Figura 8) presenta variabilidad, esto se debe a que los arboles analizados en el presente estudio incluyeron los diámetros y alturas existentes de la plantación, así mismo, muestra que a medida que el árbol crece la fitomasa total tiende a incrementarse concentrándose en los diferentes componentes del árbol.

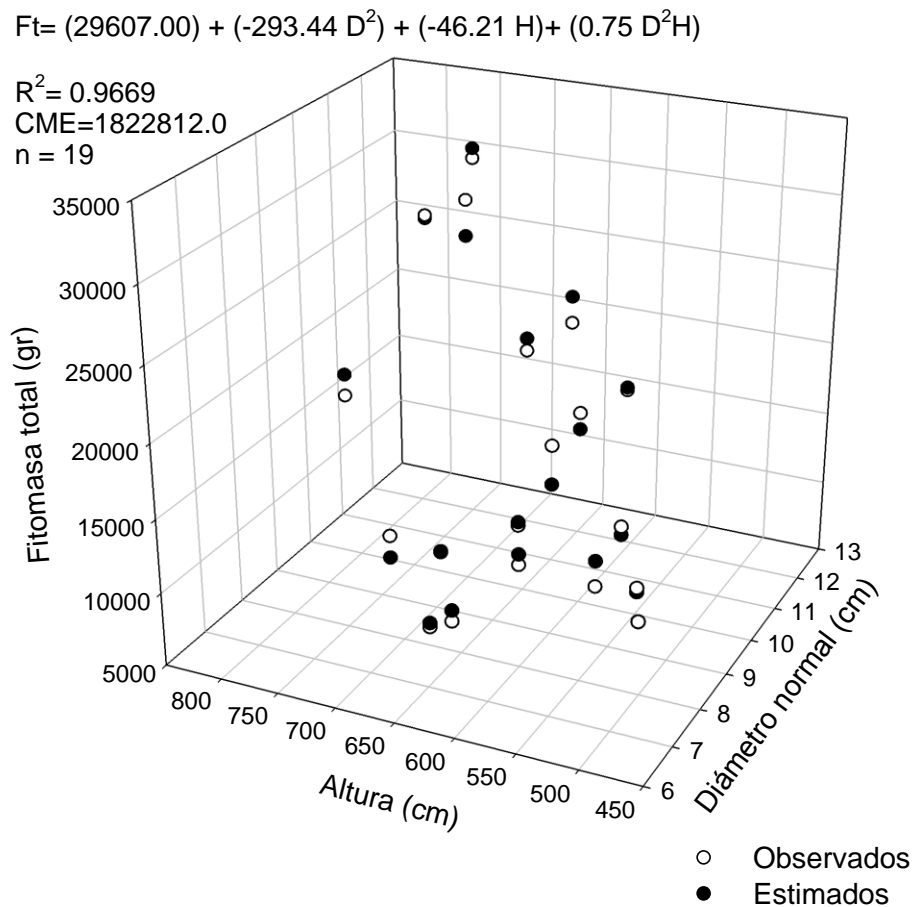


Figura 8. Relación entre las variables diámetro normal y altura con la fitomasa total de *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Merino *et al.* (2003) estimaron la fitomasa total (arbórea) en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia, España, reportando un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.98$) semejante al presente estudio.

Pacheco *et al.* (2007) estimaron la fitomasa total aérea de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. de 6 años de edad, mediante una ecuación polinomial de segundo orden, obteniendo como resultado una R^2 de 0.89. Comparando el resultado obtenido por estos investigadores con respecto al presente estudio, el valor de R^2 es menor debido a que solo utilizaron un modelo, lo que no les permitió tener un amplio criterio para la selección de modelos, mientras que en el presente estudio se probaron varios modelos permitiendo seleccionar al de mejor ajuste y así describir la fitomasa total.

Aguilar (2009) reporta que el modelo de la forma $LnY = \beta_0 + \beta_1 D$ (modelo 6 del presente estudio) fue el que mejor se ajustó para estimar la fitomasa total de una plantación de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coah., al presentar un $R^2 = 0.9493$ y un C.M.E. = 11.8973. Aguilar (2009) reporta un modelo que se descarto en el presente estudio (Modelo 6) al no presentar buen ajuste para la estimación de la fitomasa total; además, dicho autor reporta un valor de R^2 menor que en el presente estudio.

4.4. Fitomasa aérea y carbono almacenado en *Pinus greggii* Engelm

Una vez seleccionados los mejores modelos para estimar la fitomasa de los componentes (hojas, ramas, fuste) y total del árbol, se procedió a estimar la fitomasa total observada (obtenida en laboratorio) de los 20 árboles analizados en el presente estudio y comparar cual forma estima mejor si los modelos de componentes o el total. La comparación consistió de lo siguiente: sumar la fitomasa estimada de hojas, mas ramas, mas fuste, obteniendo como resultado en los modelos de componentes una subestimación de ± 4.34 kg con respecto a la fitomasa observada. El modelo seleccionado para estimar la fitomasa total subestima en ± 11.05 kg con respecto a la fitomasa observada, por lo que

estimando la fitomasa por componente e integrándola resulta en mejores estimaciones de la fitomasa total.

Usando los modelos seleccionados por componente y utilizando la información dendrométrica de la plantación de *Pinus greggii* se estimó la fitomasa aérea a nivel hectárea y usando el factor de conversión de fitomasa a carbono recomendado por el IPCC (1996) se obtuvo el siguiente resultado.

A nivel árbol, la fitomasa aérea y el carbono almacenado promedian en 19.46 kg y 9.73 kg, respectivamente; la fitomasa aérea de la plantación corresponde a 24.24 t ha⁻¹ distribuida en fustes (61.48%), ramas (22.94%) y hojas (15.58%), con una productividad primaria neta estimada de 1.52 t ha⁻¹ año⁻¹ y un almacenamiento de carbono de 12.12 t C ha⁻¹. Cabe mencionar que los porcentajes de fitomasa aérea difieren un poco a los porcentajes promedios de los 20 árboles analizados, ya que estos porcentajes fueron obtenidos de las estimaciones de los modelos de fitomasa por componente.

Con fines comparativos de almacenaje de fitomasa y carbono en *Pinus greggii*, de este estudio con otros, Merino *et al.* (2003) estimaron la fitomasa arbórea (aérea) en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia, España., con edades entre 16 a 29 años, el cual comprenden categorías diamétricas de 10 a 40 cm y alturas de 17 a 18 m. La cantidad de fitomasa arbórea (aérea) osciló entre 94 y 240 t ha⁻¹. La fitomasa que reportan estos autores son valores muy altos al presente estudio, a pesar de que manejan una densidad promedio de 1226 árboles ha⁻¹ comparada a la manejada en nuestra área de estudio (1246 árboles ha⁻¹), sin embargo, los resultados se deben a los rangos de edad, diámetros y alturas que utilizan dichos autores; además, a las condiciones más favorables (temperatura, precipitación) que tiene la región, permitiéndole a la especie tener un mejor crecimiento y desarrollo al del presente estudio.

Alba *et al.* (2007) reportan para una plantación de 13 años de edad con tres procedencias (Hidalgo, Querétaro y Nuevo León) de *Pinus greggii* Engelm., un carbono almacenado en la fitomasa total aérea de 4,272.90 kg y una captura

promedio por árbol y procedencia de 57.91, 70.65 y 90.95 kg, respectivamente. Por lo que, se puede observar la fitomasa y el carbono que almacena *Pinus greggii* a nivel árbol es mayor al del presente estudio, puede ser a las condiciones ambientales existentes (suelo, temperatura y precipitación) en Veracruz, lo cual crea un crecimiento más rápido a la del presente estudio.

Pacheco *et al.* (2007) reportan una fitomasa seca aérea promedio de 8.0 kg por árbol de una plantación de 6 años de edad de *Pinus greggii*, de la cual el fuste aporta el 51%, ramas 24% y el follaje 25%; la fitomasa aérea a nivel plantación fue de 35.2 t ha⁻¹ con una productividad primaria neta de 5.8 t ha⁻¹ año⁻¹ y un almacén de carbono de 17.9 t ha⁻¹. Estos resultados obtenidos son más altos al presente estudio, debido a que la plantación comprende una mayor densidad (4425 árboles ha⁻¹) comparada a nuestra área de estudio (1246 árboles ha⁻¹), por otra parte la similitud con respecto al porcentaje de fitomasa de ramas y hojas se debe a que es una plantación joven que no ha recibido ningún manejo silvícola como podas, raleos etc. además de estar establecida en un ambiente favorable para dicha especie mismo que le ha permitido obtener un buen crecimiento y desarrollo.

Aguilar (2009) reporta para una plantación de *Pinus greggii* Engelm. de 16 años, con categorías diamétricas de 5 a 15 cm y alturas promedio de 6.9 m, una fitomasa aérea y un carbono almacenado de 30.06 t ha⁻¹ y 15.03 t C ha⁻¹ respectivamente, y a nivel árbol de 25.62 kg y 12.81 kg, respectivamente, ocupando el fuste comercial el 61.20%, las ramas el 28.26% y hojas el 10.54%. Los resultados obtenidos por Aguilar (2009) en fitomasa aérea y carbono de la plantación y a nivel árbol son mayores al presente estudio, a pesar de tener una menor densidad (920 árboles ha⁻¹) comparada a la nuestra (1246 árboles ha⁻¹), sin embargo, estos resultados se deben a que la plantación comprende una categoría diamétrica mas (5 a 15 cm) y una altura mayor (6.9 m), dado que está establecida en una exposición cenital y con mayor espaciamiento entre arboles (2.5 m), mismos que podrían ser lo que le han permitido tener un mejor crecimiento y desarrollo comparado a nuestra área de estudio, el cual

comprende categorías diamétricas de 5 y 10 cm, una altura de 6.4 m, con exposición sur y un espaciamiento entre arboles de 1.8 m. Por otra parte, la gran similitud con respecto al porcentaje de fitomasa de fuste, ramas y hojas se debe a que ambas plantaciones son jóvenes (16 años) y están establecidas en el mismo lugar, del cual, han recibido el mismo manejo silvícola (podas).

4.5. Crecimiento e incremento en fitomasa fustal de *Pinus greggii* Engelm

Para estimar el crecimiento en fitomasa de fuste de *Pinus greggii* Engelm. se probaron nueve modelos (Cuadro 2) presentando coeficientes de determinación y C.M.E. promedio de 0.7736 y 2.9735, respectivamente (Apéndice 6).

El modelo que presentó el mejor ajuste para estimar el crecimiento en fitomasa fustal de *Pinus greggii* Engelm., fue el de Gompertz, presentando buenos estadísticos (R^2 de 0.7810 y C.M.E. de 2.8759), además, de que la curva de crecimiento en fitomasa de fuste presentó buen comportamiento. También destacan los modelos de Logístico y Schumacher por presentar valores cercanos al modelo seleccionado. El modelo que menos ajuste presentó fue el Logístico de tres parámetros (Apéndice 6).

La curva de crecimiento en fitomasa de fuste (Figura 9) en los primeros 3 años tiende a ser lineal representando un crecimiento lento con una fitomasa de fuste promedio de 0.002 kg; posteriormente, la curva presenta una parte cóncava hasta los 9 años, siendo el crecimiento más rápido representando una fitomasa de fuste promedio de 1.200 kg. A partir de 9 años hasta los 16 años la curva presenta otra parte lineal, mostrando un crecimiento más acelerado alcanzando una fitomasa promedio de 9.772 kg y tiende a incrementarse conforme aumenta la edad. Los rangos de crecimiento en fitomasa observada fustal de los árboles analizados fluctuaron entre los 5.466 y 18.270 kg a la edad de 16 años. Así mismo, este comportamiento en crecimiento de fitomasa de fuste solo representa cerca del 61.8% de la fitomasa aérea, por lo que faltaría conocer cuál es el crecimiento en fitomasa de ramas (24.7%) y hojas (13.5%).

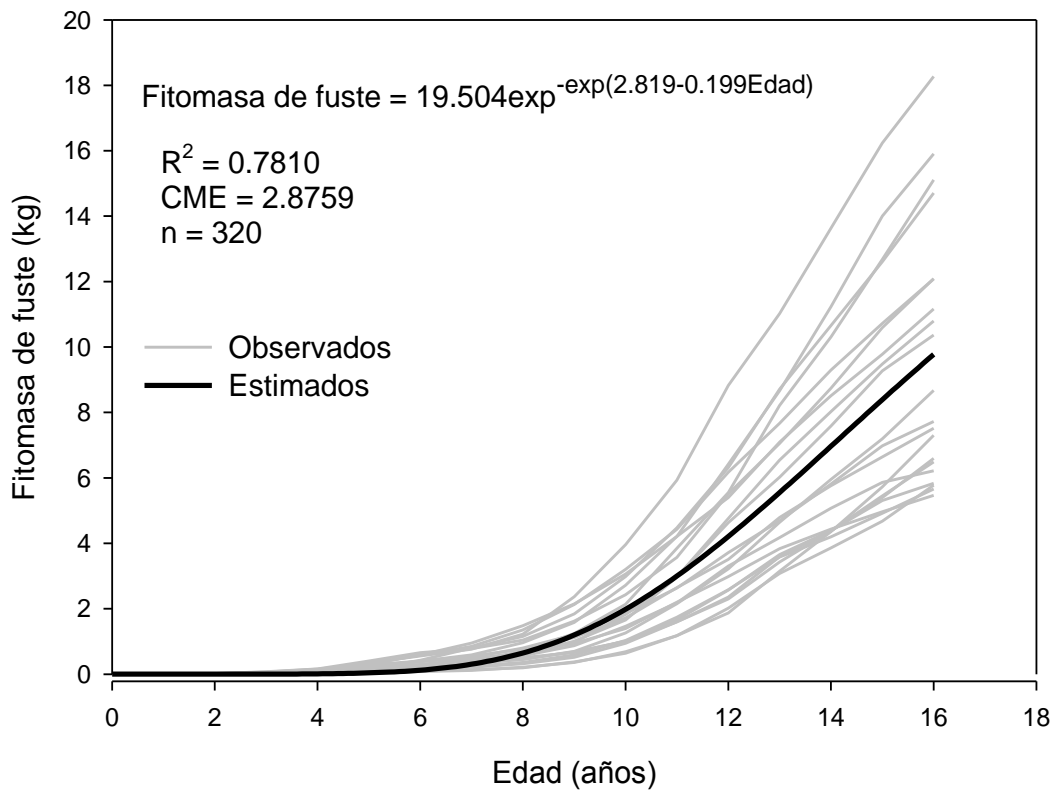


Figura 9. Relación edad y fitomasa de fuste y ajuste del modelo de Gompertz, para *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Ante la carencia de estudios en plantaciones forestales de *Pinus*, sobre crecimiento e incremento en fitomasa aérea, se reportan dos estudios realizados en plantaciones de *Pinus*, mediante análisis troncales y modelos de crecimiento, que describen el crecimiento en volumen, mismo que si es multiplicado por la densidad de la madera de cada especie de *Pinus*, permite conocer la proporción que existe de fitomasa en dicho volumen.

Arteaga (2000) evaluó el crecimiento de plantaciones de cuatro especies de pinos en la región de Ayotoxtla, Guerrero, mediante análisis troncales y modelos de crecimiento. El autor encontró que el modelo que mejor se ajusta para describir la relación edad-volumen fue el de Schumacher con un $R^2 = 0.85$ para *Pinus radiata*, un $R^2 = 0.91$ para *P. oaxacana* y un $R^2 = 0.89$ para *P. pseudostrobus* y para *P. montezumae* no se considero en el ajuste de los

modelos de crecimiento. Se puede apreciar que los resultados obtenidos por Arteaga (2000) son diferentes al presente estudio, al reportar un modelo diferente y valores de R^2 mayores al presente estudio; sin embargo, existe similitud en ambos trabajos, enfocados a conocer el crecimiento y productividad de las plantaciones forestales (*Pinus*).

Arteaga (2003) realizó una evaluación dasométrica de una plantación de *Pinus patula*, *P. oaxacana* y *P. montezumae* en Perote, Veracruz, México, con edad de 14.6 años, mediante análisis troncal e información dasométrica. El autor probó tres modelos de crecimiento el cual no describe, solo el de Chapman-Richard que fue el que mejor se ajustó para describir la relación edad-volumen por cada especie. El resultado obtenido por este autor, se diferencia del presente estudio, ya que reporta un modelo que en el presente estudio no se contemplo; por otra parte el autor no reporta el valor de R^2 que pudiera servir de comparación al presente estudio.

4.5.1. Incremento en fitomasa de fuste

El incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA) en fitomasa de fuste de *Pinus greggii* Engelm., fueron estimados utilizando las derivadas del modelo que mejor estimó el crecimiento (Gompertz), los cuales vienen dados de la siguiente manera:

$$ICA = \frac{dy}{dx} = \beta_0 \beta_2 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 E}} e^{\beta_1 - \beta_2 E}$$

$$IMA = \frac{\partial y}{\partial a} = e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 E}}$$

Los incrementos ICA e IMA en fitomasa de fuste de *Pinus greggii* Engelm., fueron proyectados hasta una edad de 30 años (parte sombreada) (Figura 10). Ambos incrementos comienzan con un crecimiento lento, alcanzando un valor de incremento de 0.002 kg en fitomasa de fuste durante los primeros 3 años y si consideramos la fracción de carbono recomendado por el IPPCC (1996) tenemos un incremento de carbono almacenado en la fitomasa de fuste de

0.001 kg. Después el ICA a los 14 años alcanza su máximo valor de 1.429 kg año⁻¹ en fitomasa de fuste, con una tasa de captura de carbono de 0.7145 kg año⁻¹ posteriormente, decrece rápidamente hasta los 30 años sin llegar a estabilizarse. Mientras que el IMA alcanza su máximo incremento en fitomasa de fuste y carbono de 0.720 kg año⁻¹ y 0.360 kg año⁻¹ respectivamente, a los 21 años, en donde intercepta a la curva del ICA, después disminuye muy lentamente sin llegar a estabilizarse.

El ICA en fitomasa de fuste de *Pinus greggii* a la edad de 16 años (edad de la plantación) alcanza un valor de incremento de 1.276 kg año⁻¹ en fitomasa de fuste y 0.638 kg año⁻¹ de carbono. El IMA alcanza un valor de incremento en fitomasa de fuste de 0.632 kg año⁻¹ y un carbono de 0.316 kg año⁻¹.

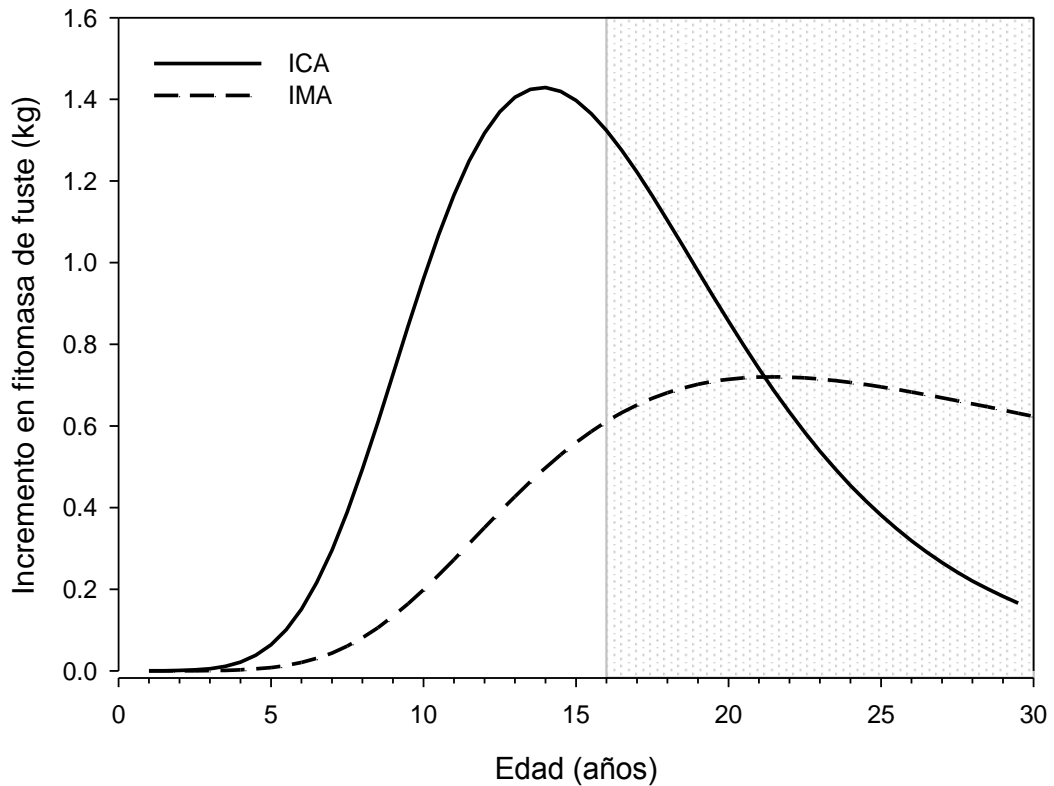


Figura 10. Relación edad y curvas de incremento corriente anual (ICA) y medio anual (IMA), para *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Con los datos que reportan Pacheco *et al.* (2007) y Aguilar (2009), como la edad de su área de estudio (plantación) y la cantidad de fitomasa que aporta el fuste (kg) a la fitomasa total a nivel árbol, se procedió a calcularles el incremento medio anual (IMA) en fitomasa de fuste mediante la siguiente fórmula:

$$\text{IMA} = \text{Variable} / \text{edad}$$

Donde:

Variable= Fitomasa en fuste (kg).

Pacheco *et al.* (2007) reporta para una plantación de *Pinus greggii* Engelm, con edad de 6 años, una fitomasa seca aérea promedio en fuste de 4.1 kg [51%] correspondiente a la fitomasa total aérea a nivel árbol (8 kg). Con el uso de la fórmula del IMA se obtuvo un incremento en fitomasa de fuste de 0.679 kg año⁻¹. Resultado semejante al presente estudio que fue de 0.632 kg año⁻¹ [61.8%] en incremento de medio anual en fitomasa de fuste, sin embargo, la plantación que maneja este autor es más joven al presente estudio (16 años). Así mismo, Aguilar (2009) reporta para una plantación de la misma especie, con edad de 16 años, una fitomasa seca promedio en fuste de 13.49 kg [59.06%] que se ubica en la fitomasa total a nivel árbol (22.84 kg). Aplicando la fórmula del IMA, se obtuvo un incremento medio anual en fitomasa de fuste de 0.843 kg año⁻¹. Se puede observar que el resultado obtenido por este autor es mayor al presente estudio (0.632 kg año⁻¹) a pesar de tener la misma edad la plantación, sin embargo, se debe a las categorías diamétricas y alturas manejadas por este autor, así también podría ser a la exposición y espaciamiento entre arboles de su área de estudio, que lo hace más favorable para tener un mejor desarrollo la especie y plantación.

5. CONCLUSIONES

Los modelos seleccionados para estimar la fitomasa por componente (hojas, ramas y fuste) y total en *Pinus greggii*, presentaron coeficientes de determinación (R^2) promedio de 0.8196, 0.9324, 0.9277 y de 0.9278 respectivamente, considerándose buenos de acuerdo a la literatura consultada.

Las estimaciones de la fitomasa de las hojas y ramas de *Pinus greggii* pueden obtenerse por medio de los modelos 2 ($Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2$) y 4 ($Y = \beta_0 + \beta_1 D^2$), respectivamente, usando el diámetro normal. Mientras que la fitomasa de fuste y el total pueden usarse los modelos 5 ($Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2 H$) y 3 ($Y = \beta_0 + \beta_1 D^2 + \beta_2 H + \beta_3 D^2 H$), respectivamente, los cuales utilizan el diámetro normal y altura total.

Con los modelos seleccionados para estimar la fitomasa por componente (hojas, ramas y fuste) e integrándola, se puede obtener confiablemente la fitomasa aérea de *Pinus greggii*, en comparación del modelo seleccionado de fitomasa total.

El carbono que almacena *Pinus greggii* se encuentra distribuido en la fitomasa aérea principalmente en el fuste (61.48%), en las ramas (22.94%) y en las hojas (15.58%).

Se estimó y describió el crecimiento e incremento en fitomasa de fuste de *Pinus greggii* Engelm., mediante la metodología de análisis troncales y probando nueve modelos de crecimiento. El modelo que mejor explica el crecimiento e incremento en fitomasa fustal de *Pinus greggii* fue el de Gompertz ($R^2 = 0.7810$).

Pinus greggii alcanza su mayor incremento corriente anual (ICA) a los 14 años con una producción de fitomasa de fuste de $1.429 \text{ kg año}^{-1}$ y una captura de carbono de $0.7145 \text{ kg año}^{-1}$. Mientras que el incremento medio anual (IMA) máximo es alcanzado a los 21 años con una producción en fitomasa de fuste de $0.720 \text{ kg año}^{-1}$ y de $0.360 \text{ kg C año}^{-1}$.

6. RECOMENDACIONES

Utilizar los siete modelos probados en el presente estudio y otras de las mas citadas en literatura, para estimar la fitomasa por componente y total del árbol, para trabajos similares en otras especies y regiones, ya que son muy sencillos prácticos y confiables.

Se recomienda que los modelos seleccionados en el presente estudio, tanto los que estiman la fitomasa por componentes, así como el que estima la fitomasa total del árbol, sean utilizados en plantaciones de *Pinus greggii*, en la Sierra de Arteaga, Coahuila, con categorías diamétricas de 5 a 15 cm.

Los estudios sobre la dinámica de crecimiento e incremento en fitomasa de plantaciones forestales son muy escasos, por lo tanto se recomienda que se utilicen los modelos de crecimiento probados en el presente estudio con el fin de conocer la productividad en especies con alto valor ecológico especialmente los de *Pinus*. De igual forma se recomienda que utilicen la metodología de análisis troncales, para obtener crecimiento e incrementos.

Para complementar la información sobre almacenes de carbono en plantaciones de *Pinus greggii*, se recomienda realizar investigaciones relacionados con carbono en las raíces y en el suelo, lo que permitirá que la suma de estos datos nos dé una información más completa del verdadero papel que juegan estos ecosistemas en el almacenaje de carbono.

La especie de *Pinus greggii* en el presente estudio, mostró tener una gran importancia ambiental, por lo que se recomienda realizar proyectos para la venta de servicios ambientales sobre captura de carbono, protección y restauración de suelos, así como de paisajismo y recreación.

7. LITERATURA CITADA

- Aguilar C J (2009)** Captura de carbono en una plantación de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila. Tesis Profesional. U.A.A.A.N. Buenavista, Saltillo, Coahuila. 60 p.
- Alatorre G (1997)** El protocolo de Kyoto: Un segundo primer paso en el camino hacia la protección del sistema climático planetario. Dirección Internet: <http://www.laneta.apc.org/gea>.
- 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 p.
- Alfaro M (1997)** Almacenamiento y fijación de carbono en ecosistemas forestales. Revista Forestal Centroamericana 19: 9-12 p.
- Andrasko K (1990)** El recalentamiento del globo terráqueo y los bosques: estado actual de los conocimientos. Unasylva 4: 3-9 p.
- Arteaga M B (2000)** Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pinos en Ayotoxtla, Guerrero. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 6: 151-157.
- Arteaga M B (2003)** Evaluación dasométrica de una plantación de *Pinus spp.* en Perote, Veracruz, México. Foresta Veracruzana 5: 27-32.
- Benítez N J Y, A Vidal C, J Rodríguez R, R C Álvarez R, M Rivero V (2002)** Determinación del peso de la biomasa de copa en árboles en pie de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la EFI Viñales. CITMA, Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. CIGET Pinar del Rio.
- Brand D (1998)** Opportunities generated by Kyoto Protocol en the forest sector. Commonwealth Forestry Review 77: 164-169 p.
- 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, C A Hall, W Knabe, J Raich, M C Trexler, P Woomeer (1993)** Tropical forests: Their past, present, and potential future role in the terrestrial carbon budget. Water, Air, and Soil Pollution 70: 71-74 p.
- Bucio Z E (2006)** Selección de árboles y diseño de una área semillera de *Pinus greggii* Engelm. en el CESA, Arteaga, Coahuila. Tesis Profesional. U.A.A.A.N. Buenavista Saltillo, Coahuila. 36 p.

- Castellanos F J, A Velázquez M, 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.
- Centeno J (1992)** El efecto Invernadero. *PLANIUC*. 18-19: pp 75-96.
- 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.
- Ciesla W M (1996)** Cambio Climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto. *Estudios FAO montes* 126 Roma. 147 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2001)** Dirección local de Coahuila. precipitación y temperaturas de la estación meteorológica de San Antonio de Las Alazanas, Arteaga, Coahuila. Periodo 2000-2005 (Documento inédito).
- Decanio, S J (1997)** The economics of climate change. *Redefining Progress*. One Kearny Street, Fourth Floor. San Francisco, CA. USA. 39 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 p.
- Dvorak W S, J K Donahue, (1993)** Reseña de investigaciones de la Cooperativa CAMCORE 1980-1992. Traducc. Meneses, J. Departamento Forestal, Universidad Estatal de Carolina del Norte. USA. 94 p.
- Eckestein D, J Ogden, G Jacoby, J Ash (1980)** Determinación de la edad y ritmo de crecimiento en árboles tropicales. La aplicación de métodos dendrocronológicos. Eventos de taller sobre la determinación de la edad y ritmo de crecimiento de árboles tropicales en colaboración de Hernand Forest Petersham. Massachusetts.
- Estrada M (2003)** Consideraciones sobre el mecanismo de desarrollo limpio en México. Dirección de Cambio Climático. SEMARNAT. 19 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.
- FWPRDC (Forest and Wood Products Research and Development Corporation). 1996.** Environmental properties of timber. Brisbane, Australia.

- Gaffron H (1974)** Fotosíntesis. Magdalena Rovalo M (traductora). Primera edición en español. Compañía Editorial Continental, S. A. Calz. de Tlalpan Núm. 4620, México, D. F. 36 p.
- García E (1987)** Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. UNAM. Mexico.245 p.
- Gayoso J (2001)** Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. Revista Forestal Iberoamericana 1: 1-13 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.
- Giménez A M, G Moglia (1992)** Determinación de patrones de crecimiento de especies leñosas arbóreas de la Region Chaqueña Seca. Revista Yvyrareta. 46-60.
- González Z M, (2008)** Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximonoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 81 p.
- Husch B, C I Millar, T W Beers (1972)** Forest mensuration. Jhon Wiley & Sons. USA. 410 p.
- Imaña E J, O Encinas (2008)** Epidometria Forestal. Brasilia: Universidad de Brasilia. Departamento de Engenharia Florestal. Merida: Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Primera edición. 79 p.
- INEGI (1999)** Carta topográfica. Arteaga. G14 C34. Escala 1:50,000. México.
- INEGI (2000)** Carta topográfica. San Antonio de las Alazanas. G14 C35. Escala 1:50,000. México.
- Instituto Nacional de Ecología (INE) (2006)** Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002. Mexico. Primera Edición 344 p. (www.ine.gob.mx)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1995)** Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. Cambridge. 64 p.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1996)** Guidelines for national greenhouse gas inventories: the reference manual. (Volumen 3). Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6d.html>
- Joos F (2003)** Trends in marine dissolved oxygen: implications for ocean circulation changes and the carbon budget, EOS. 197 p.
- Kent A M, R W Charles (2002)** El carbono orgánico del suelo y el ciclo global del carbono. Universidad del Estado de Kansas. 4 p. <http://www.oznet.ksu.edu>
- 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 p.
- LGDFS (2003)** Art. 7, fracc. XXXVII, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable 70 p.
- López D, L Soto, G Jiménez, S Hernández (2003)** Relaciones alométricas para la predicción de biomasa forrajera y leña de *Acacia pennatula* y *Guazuma ulmifolia* en dos comunidades del norte de Chiapas, México. Interciencia 28:334-339.
- López L M, S Valencia M (2000)** Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. Madera y Bosques 7: 37-46.
- Makela A (1997)** A carbon balance model of growth and self-pruning in tree based on structural relationships. For. Sci. 43: 7-24.
- Martens W J M, R Slooff, E K Jackson (1998)** El cambio climático, la salud humana y el desarrollo sostenible. Revista Panamericana de Salud Publica/Pan Americana Journal of Public Health, 4:100-105.
- Martínez M (1948)** Los pinos mexicanos. Segunda edición. Ediciones Botas. México. 361 p.
- 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.
- Merino A, C Rey, J Brañas, R Rodríguez S (2003)** Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia, España. Invest. Agrar.: Sist. Recur. For. 12: 85-98.

- Montes de Oca C E, P García R (2005)** Flujos y asimilación de CO₂ 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.
- Montoya G, L Soto, Ben de Jong, K Nelson, P Farias, P Y Tic, J Taylor, R Tipper (1995)** Desarrollo forestal sustentable: captura de carbono en las Zonas Tzeltal y Tojolabal del Estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología, Cuadernos de Trabajo 4. México, D.F.
- Nájera L J A (1999)** Ecuaciones para estimar biomasa, volumen y crecimiento en biomasa y captura de carbono en diez especies típicas del Matorral Espinoso Tamaulipeco del nordeste de México. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Forestales, UANL. N.L. Mex. 93p.
- Návar 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 J A B (1999)** Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Primera edición. Desarrollo Gráfico Editorial, S. A. de C.V. Municipio Libre 175, Col. Portales México D.F. 73 p.
- Ordóñez J A B, O Maser (2001)** La captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7: 3-12.
- Pacheco E F C, A Aldrete, A Gómez, A M Fierros, V M Cetina, H Vaquera (2007)** Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia*. México 30: 251-254.
- Pagiola S, J Bishop, N Landell-Mills (2003)** La venta de servicios ambientales forestales. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 459 p.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (2001)** Cambio Climático 2007: Resumen técnico. Parte de la contribución del Grupo de trabajo I al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Shanghai China. 84 p.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (2007)** Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de

redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza. 104 p.

Panhwar F (1996) Conserving, Agro-Forestry Is The Solution Of Future Global-Warming And Biodiversity Sindh A Case.

Phillips V D, R Tschida, M Hernández, G Aquino M (2007). Manual de Servicios Ambientales. Manual de capacitación para la participación comunitaria. 10p.

Prodan M, R Peters, F Cox, P Real (1997) Mensura Forestal. Proyecto IICA BMZ / GTZ, Sobre Agricultura, Recursos Naturales y desarrollo sostenible, San Jose, Costa Rica. 561p.

Protocolo de Kyoto (1998) Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 24 p.

Rodríguez L R, J Jiménez P, O A Aguirre C, E J Treviño G (2006) Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. Ciencia UANL 9: 179-188.

Salati E (1990) Los Posible Cambios Climáticos en América Latina y el Caribe y sus Consecuencias. Reporte # 90-7-1223, Naciones Unidas and Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL. Santiago de Chile, 12-14 de Septiembre, 45 pp.

Sanquetta C R, L F Watzlawick, J E Arce, A A Mello (2001) Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda* en el Sur del estado de Paraná, Brasil. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de carbono en Ecosistemas Forestales. Octubre, 2001. Valdivia- Chile. 11 p.

Schelegel B, J Gayoso, J Guerra (2000) Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. 21p.

Schelegel B, J Gayoso, J Guerra (2001) Manual de procedimientos para inventarios de carbono de carbono en ecosistemas. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. 17p.

Schimel D S (1995) Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. Global change biology, 1: 77-91.

Schlesinger W H (1997) Biogeochemistry: an Analysis of Global Change. Academic Press, San Diego, CA. USA. 588 p.

- Schulze E D, C Wirt, M Heimann (2000)** Managing forest after Kyoto. Science 289:2058-2059.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2007)** Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2007-2012. México. Primera Edición. 170 p.
- Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP) (1983).** Carta Hidrológica de Aguas Superficiales. G14-7. Escala 1:25000. México.
- Shand E (1996)** Biodiversidad y retención de carbono. XII Congreso Mundial Forestal, Antalya Turquía. 143 p.
- Stamm A J (1964)** Wood and Cellulose Science. The Ronald Press Company, N.Y. 549p.
- Steinlin H (1984)** The forest resources of the earth. Plant Research and Development. 20: 74-92 p.
- Tipper R (1996)** Hacia un Programa Nacional de Captura de Carbono y Desarrollo Agro-forestal. Documento de Trabajo Versión 1.2.
- UN (Naciones Unidas) (1992)** Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. 27 p.
- Vargas H J J, A Muñoz O (1988)** Crecimiento y supervivencia en plántulas de cuatro especies de *Pinus*. Agrociencia 72:197-208 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.

APÉNDICES

Apéndice 1. Programa SAS para la evaluación de los modelos 2, 4, 5 y 3, y describir la fitomasa de hojas, ramas, fuste y total, respectivamente.

```
options ls=80 ps=60 pagenumber=1;
DATA FITOMASA;
INPUT DN H BF BR BH BT;
if BH=7680.22355 OR BH=3214.56928 OR BH=4450.68942 THEN DELETE;
DN2=DN*DN; DN2H=DN2*H;
LIST; CARDS;
Data= infile C:\Acceso publico\Programas SAS\fitomasa.dat;
*PROC PRINT DATA=FITOMASA;
*VAR DN DN2 H DN2H;
*RUN;
proc reg data=FITOMASA;
title3 'modelo 2, FITOMASA DE HOJAS';
model BH=DN DN2;
```

```
options ls=80 ps=60 pagenumber=1;
DATA FITOMASA;
INPUT DN H BF BR BH BT;
if BR=1370.45734 OR BR=2569.98635 OR BR=8673.41980 OR BR=11394.27304 THEN DELETE;
DN2=DN*DN; DN2H=DN2*H;
LIST; CARDS;
Data= infile C:\Acceso publico\Programas SAS\fitomasa.dat;
*PROC PRINT DATA=FITOMASA;
*VAR DN DN2 H DN2H;
*RUN;
proc reg data=FITOMASA;
title3 'modelo 4'FITOMASA RAMAS';
model BR=DN2;
```

```
options ls=80 ps=60 pagenumber=1;
DATA FITOMASA;
INPUT DN H BF BR BH BT;
if BF=11904.53020 OR BF=10355.00547 THEN DELETE;
DN2=DN*DN; DN2H=DN2*H;
LIST; CARDS;
Data= infile C:\Acceso publico\Programas SAS\fitomasa.dat;
*PROC PRINT DATA=FITOMASA;
*VAR DN DN2 H DN2H;
*RUN;
proc reg data=FITOMASA;
title3 'modelo 5' FITOMASA FUSTE;
model BF=DN DN2H;
```

```
options ls=80 ps=60 pagenumber=1;
DATA FITOMASA;
INPUT DN H BF BR BH BT;
if BT=36519.05295 THEN DELETE;
DN2=DN*DN; DN2H=DN2*H;
LIST; CARDS;
Data= infile C:\Acceso publico\Programas SAS\fitomasa.dat;
*PROC PRINT DATA=FITOMASA;
*VAR DN DN2 H DN2H;
*RUN;
proc reg data=FITOMASA;
title3 'modelo 3'FITOMASA TOTAL;
model BT=DN2 H DN2H;
output out=pred1 p=BT_hat press=press r=rtm l95=l95 u95=u95 l95m=l95m u95m=u95m rstudent=rstu;
```

```

data reg1;
set pred1;
pres_sqh=pres**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*BT_hat='*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
plot rstu*BT_hat='*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
run;
proc plot data=reg1;
plot BT*dn='O' BT_hat*dn='P' I95*dn='|' u95*dn='u'
I95m*dn='m' u95m*dn='m' / HPOS=60 VPOS=40 OVERLAY;
run;
proc sort data=reg1;
by rstu rtm BT dn BT_hat;
proc print data=reg1;
var rstu rtm BT dn BT_hat; ;
run;

```

Apéndice 2. Parámetros y estadísticos de modelos para estimar la fitomasa de hojas de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

M	R ²	C.M.E.	PRESS	ABSPRESS	Análisis							
					Normalidad	Re-St	n	β ₀	β ₁	β ₂	β ₃	
1	0.7978	286478.8	5913843.3	8093.5	0.336	M	19	1.4631	2.7772			
2	0.9039	121472.0	2906845.3	6087.8	0.248	B	17	10954.0000	-2557.1553	169.0383		
3	0.9237	125864.0	3002789.4	5894.5	0.616	B	18	8020.4358	-78.6133	-13.6118	0.1713	
4	0.7931	293112.0	6117661.9	8256.6	0.485	B	19	-923.4680	36.3726			
5	0.7996	301778.0	6691600.0	8519.1	0.762	B	19	-2172.6806	334.1845	0.0237		
6	0.7462	735219.4	17022660.5	11334.6	0.001	M	20	4.5848	0.3295			
7	0.7728	322006.5	6769887.0	9398.9	0.938	M	19	-3.8492	1.0536			
X̄	0.8196	312275.8	6917898.2	8226.4	0.484		19					

Donde: M= Modelo; R²= Coeficiente de determinación; C.M.E.= Cuadrado Medio del Error; PRESS= Suma de Cuadrados de los predichos; ABSPRESS= Sumatoria de PRESS; Análisis de Normalidad= Valor de P Shapiro-Wilks; Re-St= Residuales estudentizados; B= Bueno; M= Malo; n= número de observaciones; β₀, β₁, β₂ y β₃= Parámetros de la Regresión; X̄=Promedio.

Apéndice 3. Parámetros y estadísticos de modelos para estimar la fitomasa de ramas de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

M	R ²	C.M.E.	PRESS	ABSPRESS	Análisis							
					Normalidad	Re-St	n	β ₀	β ₁	β ₂	β ₃	
1	0.9547	133830.5	2403298.8	5530.3	0.089	R	16	2.9648	2.3927			
2	0.9480	180044.0	3723220.3	6688.2	0.750	R	17	639.8626	-374.3107	79.1219		
3	0.9684	124649.0	2429803.6	5659.4	0.771	B	16	6033.8430	-14.5339	-11.5356	0.1169	
4	0.9526	140093.0	2539951.5	5678.9	0.176	B	16	-867.2325	57.3368			
5	0.9456	188490.0	3746039.5	6621.9	0.876	B	17	-5043.9901	898.6384	0.0153		
6	0.8847	468148.8	9227339.9	8722.7	0.001	R	17	5.7551	0.2727			
7	0.8730	515879.5	10378469.7	10369.0	0.011	R	17	-2.3942	0.9833			
\bar{X}	0.9324	250162.1	4921160.5	7038.6	0.382		17					

Donde: M= Modelo; R²= Coeficiente de determinación; C.M.E.= Cuadrado Medio del Error; PRESS= Suma de Cuadrados de los predichos; ABSPRESS= Sumatoria de PRESS; Análisis de Normalidad= Valor de P Shapiro-Wilks; Re-St= Residuales estudentizados; B= Bueno; R= Regular; n= número de observaciones; β₀, β₁, β₂ y β₃= Parámetros de la Regresión; \bar{X} =Promedio.

Apéndice 4. Parámetros y estadísticos de modelos para estimar la fitomasa de fuste de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

M	R ²	C.M.E.	PRESS	ABSPRESS	Análisis							
					Normalidad	Re-St	n	β ₀	β ₁	β ₂	β ₃	
1	0.8212	3229047.4	72573213.5	29450.5	0.559	M	20	4.6655	2.0439			
2	0.9572	961751.0	19732895.8	14924.7	0.865	B	17	20560.0000	-4820.9679	395.0052		
3	0.9804	451955.0	10923556.9	11021.4	0.870	B	18	559.3897	12.8168	-0.5619	0.1656	
4	0.9459	1135050.0	21613081.9	16796.6	0.582	B	17	-1828.8133	142.6780			
5	0.9802	426869.0	8806434.7	9923.2	0.864	B	18	-976.0172	264.6758	0.1631		
6	0.8266	3130968.8	70090874.9	27333.9	0.392	M	20	7.1612	0.2188			
7	0.9821	363442.8	6912735.9	8300.7	0.838	B	17	-0.7763	0.9195			
\bar{X}	0.9277	1385583.4	30093256.2	16821.6	0.710		18					

Donde: M= Modelo; R²= Coeficiente de determinación; C.M.E.= Cuadrado Medio del Error; PRESS= Suma de Cuadrados de los predichos; ABSPRESS= Sumatoria de PRESS; Análisis de Normalidad= Valor de P Shapiro-Wilks; Re-St= Residuales estudentizados; B= Bueno; M= Malo; n= número de observaciones; β₀, β₁, β₂ y β₃= Parámetros de la Regresión; \bar{X} = Promedio.

Apéndice 5. Parámetros y estadísticos de modelos para estimar la fitomasa de total de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

M	R ²	C.M.E.	PRESS	ABSPRESS	Análisis							
					Normalidad	Re-St	n	β ₀	β ₁	β ₂	β ₃	
1	0.8781	8127806.0	190487394.8	44036.8	0.497	M	20	4.3538	2.4028			
2	0.9604	3121177.0	81439278.6	30226.0	0.946	B	18	47072.0000	-11492.0000	877.516		
3	0.9669	1822812.0	41085225.3	21567.6	0.230	B	19	29607.0000	-293.4440	-46.2085	0.7450	
4	0.8850	5589362.0	127021303.9	37346.0	0.952	B	19	-2924.6503	225.0270			
5	0.9446	2862584.0	66085433.7	30105.8	0.682	B	19	-2684.4332	569.5650	0.2502		
6	0.8935	7099157.0	167809404.0	40711.5	0.470	M	20	7.2839	0.2576			
7	0.9659	1867092.2	34125189.9	17404.1	0.853	B	16	-1.7154	1.0423			
\bar{X}	0.9278	4355712.9	101150461.5	31628.2	0.661		19					

Donde: M= Modelo; R²= Coeficiente de determinación; C.M.E.= Cuadrado Medio del Error; PRESS= Suma de Cuadrados de los predichos; ABSPRESS= Sumatoria de PRESS; Análisis de Normalidad= Valor de P Shapiro-Wilks; Re-St= Residuales estudentizados; B= Bueno; M= Malo; n= número de observaciones; β₀, β₁, β₂ y β₃= Parámetros de la Regresión; \bar{X} = Promedio.

Apéndice 6: Parámetros y estadísticos de modelos de crecimiento para estimar la fitomasa de fuste de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

M	R ²	C.M.E.	Syx	C.V.	F cal.	n	β ₀	β ₁	β ₂	β ₃
1	0.7810	2.8759	1.6959	63.5465	644.0522	320	19.5041	2.8190	0.1993	
2	0.7808	2.8781	1.6965	63.5710	964.7106	320	4.8987	-41.6636		
3	0.7763	2.9372	1.7138	64.2204	628.4005	320	0.9243	-0.5714	0.0706	
4	0.7769	2.9298	1.7117	64.1387	472.9541	320	0.4275	-0.2660	0.0270	0.0017
5	0.7816	2.8683	1.6936	63.4618	646.0542	320	11.9261	6.8256	0.5157	
6	0.7616	3.1304	1.7693	66.2982	583.1095	320	0.8574	4.4265	0.2628	
7	0.7698	3.0235	1.7388	65.1569	455.8377	320	3.6054	10.8467	0.2117	-0.8730
8	0.7624	3.1205	1.7665	66.1938	877.4251	320	0.1580	0.2628		
9	0.7717	2.9980	1.7315	64.8812	460.3922	320	-19.2342	-0.1346	18.8381	-0.1397
\bar{X}	0.7736	2.9735	1.7242	64.6076	636.9929	320				

Donde: M= Modelo; R²= Coeficiente de determinación; C.M.E.= Cuadrado Medio del Error; Syx= Error estándar (gr); C.V.= Coeficiente de Variación; F cal.= F calculada; n= numero de observaciones; β₀, β₁, β₂ y β₃= Parámetros de la Regresión; \bar{X} = Promedio.

Apéndice 7. Análisis de los residuales estudentizados para la fitomasa de hojas (a), ramas (b), fuste (c) y total (d).

