



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores
Zaragoza



**ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN BOSQUES DE *Abies religiosa* DEL
MUNICIPIO DE AMECAMECA, ESTADO DE MÉXICO.**



TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

PRESENTA

DIANA MONTSERRAT ROVELO SOTO

DIRECTOR DE TESIS: M. EN C. EFRAÍN R. ÁNGELES CERVANTES

MÉXICO, D.F.

MAYO, 2010.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

Primero que todo, a mí. ¡Qué bárbara!, ¡¡sí pude!! ت

Para Lupita Soto y Arturo Rovelo: ¡Ahí 'ta, ahí 'ta, ahí 'ta, ahí 'ta, ahí 'ta!, jajajajajaja.

Para Tillo: ¡Que te dediquen muchos más! Te amo.

A mis hermanitas chulas: Cristy, Marthis, Viole, Ale, Diana y Neyt.

A mi nena consentida: Martha Irene me encantas, ¡dame un beso! Que esto te sirva de 'guía' mi amor. ¡Vamos p'arriba!

Para vos también. Volim te.

Agradecimientos

Hay muchas personas e instituciones que quisiera mencionar para que quede en la historia (¡bue!, al menos en MI HISTORIA) el eterno agradecimiento que siempre les tendré.

Para empezar podría referirme a mi *alma mater*... la UNAM. Dentro de ella he vivido cosas impresionantes y que difícilmente sabré si en otra escuela lo hubiere hecho. En la UNAM, tanto en la prepa (la gloriosa 3) como en la facultad, he tenido los más maravillosos acercamientos a la cultura, la ciencia, el deporte (está bien, ¡está bien!, ¡no molesten!), y la tecnología.

A Lupita Soto. Gracias por tu tiempo, dedicación y cariño. Siempre estás cuando más te necesito... aunque no siempre te hago caso, siempre te tomo en cuenta. ¡Te amo!

Gracias también a Arturo Rovelo, por estar conmigo aunque las circunstancias no siempre lo permitan. ¡Me gusta ser de tu equipo! ¡Te amo pa'!

A mi único y original “prof”, por la confianza y los conocimientos que me comparte dentro y fuera del lab; gracias por hacerme sentir importante en materia ambiental.

A mis hermanitas Cristy, Marthis, Viole, Ale, Diana y Neyt que, aunque nos encontramos a tiempos diferentes, siempre-siempre son mis ángeles y cómplices. ¡Gracias princesas!

Gracias también a la Organización de Bienes Comunales de Amecameca, por el apoyo brindado para la realización de este estudio; en especial al C. P. Fernando Cisneros Velázquez.

Índice

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	1
Introducción	2
Antecedentes	3
Antecedentes de investigación en México	3
Esquema de pago por servicios ambientales por captura de Carbono	4
Costos de carbono capturado por hectárea	5
Métodos de estimación de captura de carbono	6
Cuantificación de biomasa	10
Modelos de simulación	12
<i>Modelo CO₂Fix</i>	12
<i>Modelo Cambio de uso de suelo y captura de Carbono</i>	12
<i>Modelo GORCAM</i>	13
Imágenes satelitales	13
Los bosques y la tenencia de la tierra en México	13
Justificación	14
Preguntas de investigación	14
Hipótesis	14
Objetivos	
General	14
Particulares	15
Descripción de la zona de estudio	15
Ubicación	15
Hidrografía	15
Clima	15
Orografía	15
Geología	16
Edafología	16
Flora	17
Fauna	17
Características y uso de suelo	18
Métodos	
En campo	
<i>Obtención de la ecuación de crecimiento</i>	18
<i>Obtención de biomasa y la ecuación de captura de carbono</i>	19
<i>Obtención de la ecuación diámetro-edad</i>	20
<i>Determinación la densidad arbórea</i>	20
<i>Cálculo de la biomasa por ha</i>	21
Cálculo de Carbono	21
Resultados	
<i>Tipos de estructura diamétrica de los bosques</i>	22
<i>Relación DAP-Edad</i>	24

<i>Relación Altura – Edad</i>	25
<i>Relación Biomasa del fuste – Edad</i>	26
<i>Relación Biomasa del follaje – Edad</i>	27
<i>Relación Biomasa de Raíz – Edad</i>	28
<i>Relación Biomasa de Ramas – Edad</i>	29
<i>Relación Carbono - Edad</i>	30
<i>Variación del contenido de Carbono con la edad de un árbol</i>	31
<i>Relación Carbono total – Tipo de bosque</i>	32
Discusión	32
<i>Carbono capturado si se establecieran plantaciones de A. religiosa</i>	34
<i>Ecuación de Carbono capturado por edad de una plantación de A. religiosa</i>	34
Conclusiones	36
Literatura citada	37

RESUMEN

De las opciones más importantes que México tiene para la mitigación del cambio climático está la denominada “captura de carbono en el sector forestal”, ya que con el manejo sustentable de los bosques mediante estrategias de forestación y reforestación, se captura CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis durante el crecimiento de la biomasa vegetal, implicando así una disminución en las concentraciones de CO₂.

Los ejidatarios de Amecameca requieren conocer la cantidad de carbono que capturan sus bosques y así saber si son adecuados para prestar servicios ambientales por medio de la captura de carbono. De modo que la importancia de este estudio es conocer el potencial de captura de carbono en bosques comunales alterados por la tala y conocer la cantidad de carbono que actualmente capturan los bosques y plantaciones que realicen los comuneros de Amecameca, y así fortalecer la solicitud del pago por servicios ambientales.

A través del incremento corriente anual en muestras troncales de *Abies religiosa* en la región, se determinó la densidad de población, la distribución diamétrica, la estructura de edades del arbolado, la relación edad- DAP y la ecuación de crecimiento; así finalmente se calculó el contenido total de carbono.

Con base a lo anterior, se determinó que estos bosques presentan una captura de carbono que oscila entre 3.92 hasta 88.5 tC ha⁻¹. El valor menor corresponde a bosques con escasa repoblación, talados o afectados por incendios. En tanto que el valor mayor corresponde a bosques que han sido afectados por talas clandestinas, lo que ocasiona apertura de claros y favorecen el incremento del volumen de C capturado. Además se obtuvo una ecuación que permitió calcular la variación de la captura de carbono de la plantación, a través de los años.

Palabras clave: Captura de carbono, ecología de bosques, oyamel, Amecameca, servicios ambientales.

Introducción

El Cambio Climático es un tema que desde hace varias décadas ha formado parte de las investigaciones del medio científico (Masera *et al.*, 2000). Una de las manifestaciones del Cambio Climático es el calentamiento global, producido por el incremento en la concentración de diversos gases en la atmósfera, conocidos como Gases de Efecto Invernadero (GEI), entre los que destacan: el dióxido de carbono (CO₂), metano, óxido nitroso, ozono, dióxido de azufre y los clorofluorocarbonos (Acosta *et al.*, 2007).

De acuerdo con un estudio realizado para el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en 1995, en los últimos 200 años, el aumento de la concentración de CO₂ a nivel mundial ha pasado de 280 ppm a 380 ppm, a finales de 2008. Este aumento se explica principalmente por dos fuentes antropogénicas en la emisión de carbono: el uso de combustibles fósiles como el petróleo, gas y carbón, y los cambios en la utilización de tierras o transformaciones a los ecosistemas como la deforestación (Masera *et al.*, 2000).

Bajo procedimientos establecidos por el protocolo de Kyoto, las naciones pueden compensar las emisiones de CO₂ implementando proyectos y políticas que realcen el almacenaje neto del carbono en bosques (Gutrich y Howarth, 2007).

Los bosques juegan un papel importante en la regulación del clima global. Las plantas verdes toman el CO₂ de la atmósfera en el proceso de la fotosíntesis y lo utilizan para elaborar azúcares y otros compuestos orgánicos necesarios para su crecimiento y metabolismo (Ordóñez, 1999).

Las plantas con madera de larga vida capturan el carbono en la madera y en otros tejidos hasta su muerte, cuando empiezan a descomponerse. Después, pueden liberar el carbono de su madera a la atmósfera en forma de CO₂, monóxido de carbono (CO), o de metano (CH₄), de esta manera también puede integrarse al suelo como materia orgánica (Pagiola *et al.*, 2006).

De las opciones de mitigación más importantes para México, una es la denominada “captura de carbono en el sector forestal”, ya que en el manejo sustentable de los bosques, con estrategias de forestación y reforestación, se captura CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis durante el crecimiento de la biomasa vegetal, implicando una disminución en las concentraciones de CO₂ (Ordóñez, 1999).

Algunos estudios recientes sobre la captura de carbono (C) en bosques se ha centrado específicamente en el almacenaje *in situ* (Liski *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2002; Howard *et al.*, 2004). En ese sentido cabe mencionar que los proyectos forestales bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) podrían tener un precio de venta por tonelada de C capturada entre 13 y 42 US\$ por tonelada, mientras que los costos varían de 2 a 3 US\$ por tonelada de C, en manejo de bosques primarios, de 1 a 10 US\$ la tonelada por proyectos de forestación y 1 a 10 US\$ por tonelada por proyectos de preservación de áreas protegidas (Olguín, 2001). México ha ingresado al esquema de pago por Servicios Ambientales y dentro de ellos está el pago por captura de carbono.

El Valle de México presenta altas emisiones de CO₂, y el papel de los bosques es fundamental, sin embargo se desconoce su papel como zonas de captura de carbono. En el área de influencia del Parque Nacional Izta-Popo, los comuneros del ejido de Amecameca desean saber qué potencial de captura de carbono tienen sus bosques para poder estimar los beneficios que podrían obtener por el concepto de captura de carbono en sus ecosistemas de

oyamel (*Abies religiosa*). Por ello, el objetivo de este trabajo es: estimar el potencial de la captura de carbono en los bosques comunales de Amecameca, Estado de México.

Antecedentes

Los cinco grandes almacenes o reservorios de C que existen en nuestro planeta son: (a) la atmósfera, (b) la vegetación terrestre, (c) el suelo, (d) los océanos y (e) los combustibles fósiles. Entre cada uno de estos almacenes o reservorios existe un flujo continuo de carbono, que se mantiene más o menos en equilibrio (Gutrich y Howarth, 2007).

El almacenaje de carbono en los productos de madera no siempre es considerado, especialmente los que no están dentro de las pautas para el primer período de aplicación del Protocolo de Kyoto. Sin embargo, cantidades considerables de carbono se almacenan en productos de madera duraderos (Karjalainen *et al.*, 1994; Karjalainen, 1996; Winjum *et al.*, 1998; Maser *et al.*, 2003) y hay un llamado en la metodología para mejorar la contabilidad incluyendo tal almacenaje para las valoraciones post-2012 (Marland y Marland, 2003).

Aunque hay diversas posibilidades de almacenamiento de carbono en diferentes tipos de bosques (Vogt, 1991; Lugo y Brown, 1992; Brown, 1993), pocos cálculos de almacenamiento potencial de carbono en especies individuales han sido publicados (Kraenzel *et al.*, 2003). Además, algunos estudios previos están enfocados hacia el almacenamiento de carbono en bosques tropicales, bosques templados y en bosques boreales (Sundquist, 1993; Dixon *et al.*, 1994; Houghton, 2005). Desafortunadamente, el presupuesto de carbono de las zonas subtropicales ha recibido poca atención hasta ahora (Zhang *et al.*, 2007).

Estimar grandes presupuestos de C en bosques resulta un tanto complicado debido a la dificultad de cuantificar los impactos de la variabilidad ambiental natural y de los disturbios humanos (Liu *et al.*, 2006).

Antecedentes de investigación en México

De las opciones de mitigación más importantes para México, una es la denominada “captura de carbono en el sector forestal”, ya que con el manejo sustentable de los bosques mediante estrategias de forestación y reforestación, se captura CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis durante el crecimiento de la biomasa vegetal, implicando así una disminución en las concentraciones de CO₂ (Ordóñez, 1999).

De acuerdo con Montoya *et al.* (1995), la captura forestal de carbono en México se basa en dos cuestiones principales: a) la absorción activa de la nueva vegetación: esta perspectiva incluye a las actividades que implican la plantación de árboles nuevos o el aumentar las tasas de crecimiento de la cubierta forestal existente. También incluye el sustituir el combustible fósil por una biomasa producida de manera sostenible con el fin de reducir las emisiones de carbono que provienen de la producción de energía; y b) las emisiones retenidas por la vegetación existente, que considera la prevención o reducción de la deforestación y del cambio de uso de suelo o la reducción del daño a los bosques existentes.

Esta segunda perspectiva, según Maser *et al.* (2000), puede incluir la conservación directa de los bosques o de métodos indirectos, como el aumentar la eficacia productiva de los sistemas de agricultura de corte y quema o el mejorar la eficiencia del uso final de los recursos de leña; ambos reducirían la presión sobre los bosques existentes.

Otros ejemplos de acciones para disminuir la existencia de carbono son: las prácticas mejoradas de explotación forestal y la prevención de incendios forestales (Brown, 1996).

La mitigación de los GEI es de suma importancia ya que, por un lado, México está entre los 20 países con mayor índice de emisiones de estos gases; y por el otro, se encuentra entre las regiones más vulnerables a los impactos asociados al cambio climático, debido a sus condiciones bioclimáticas y socioeconómicas (Maser y Ordóñez, 2001). De esta manera, se han realizado estudios de gran importancia que dan a conocer el contenido de carbono en ecosistemas forestales, por medio de modelos de simulación, imágenes satelitales, ecuaciones alométricas e inventarios forestales.

Pese a ser un tema importante que requiere acciones inmediatas, debido a la gran biodiversidad de ecosistemas forestales y al alto potencial de la contribución de la captura de carbono, México cuenta con muy pocos estudios al respecto, en comparación con otros países de América latina.

Ordóñez *et al.* (2001) realizaron un estudio en San Juan Nuevo, Michoacán, dentro de un bosque de *Pinus pseudotrobus* y tuvo como objetivo determinar el potencial de captura de Carbono en un bosque templado, con la utilización del modelo de simulación CO₂Fix.

Ellos concluyeron que teóricamente, al término de 50 años, la captura de carbono potencial para el bosque de San Juan Nuevo sería de 1.5 millones de tC, para una superficie de 8870 ha del género *Pinus*, y en un plazo de 250 años, esta captura se estabilizará en 1.9 millones de tC (Ordóñez *et al.*, 2001).

En Tlaxcala, Acosta *et al.* (2007), encontraron que la captura de carbono en bosques de *Abies religiosa-Pinus* fue de 301.9 MgC/ha y en bosques de *Pinus patula* fue de 183.2 MgC/ha, ambos en un año.

López *et al.* (2007) estimaron el contenido de carbono en un bosque de pino-encino en el Ejido Guachochi, municipio de Guachochi, Chihuahua, utilizando muestras de biomasa sometidas a un analizador de sólidos de carbono orgánico total (Solids TOC Analyzer), para determinar la concentración de carbono contenido en la biomasa total. El contenido de carbono promedio resultó de 42.026 Mg·ha⁻¹ (± 3.076) y 6.485 Mg·ha⁻¹ (± 1.014), en la biomasa de pino y encino respectivamente.

Esquema de pago por servicios ambientales por captura de Carbono

Algunas estimaciones, desde el punto de vista biológico y económico, respecto al potencial de las prácticas de manejo forestal para controlar las concentraciones de dióxido de carbono son altamente especulativas o contradictorias. Por ejemplo, Dixon *et al.* (1994), proporcionan una estimación general de la potencialidad y viabilidad económica de la conservación y captura de carbono, por medio de las prácticas de manejo forestal, de 1 MgC/año, en el mundo.

El costo marginal de implementación de estas opciones se estimó en 10 dólares/tC. En otro estudio, se identificó una gama de políticas forestales opcionales para los Estados Unidos, que podrían contrarrestar los niveles de emisiones, ahorrando de entre 75 y 115 tC por año a un costo marginal de entre 30 y 50 dólares/tC. En el mismo sentido, un vasto número de proyectos particulares financiados por empresas vinculadas a la generación de

energía eléctrica ha calculado un costo de captura de entre uno y cinco dólares por tonelada de carbono (Dixon *et al.*, 1994).

Desde la celebración de la “Cumbre de la Tierra” en Río de Janeiro en 1992, se enfatizó que a fin de alcanzar la conservación y manejo sostenible de los recursos naturales es necesario generar estructuras que hagan internos los costos y beneficios de los sistemas de mercado (Montoya *et al.*, 1995). En este sentido varios autores han coincidido en incorporar una perspectiva integral económico-ecológica, basada principalmente en los bienes y servicios ambientales (BSA). El reconocimiento de los BSA, además de establecer un valor económico a los beneficios que la naturaleza brinda de forma gratuita, alerta a las sociedades sobre pérdidas de elementos y funciones ecológicas que son sustento de la actividad económica y de su propio bienestar (Olguín, 2001).

Los bienes ambientales son producto de las funciones ecológicas (alimentos y agua), y los servicios ambientales son atributos de éstas; por ejemplo: ciclaje de nutrientes, formación y retención del suelo, flujo y almacenamiento del agua (Immerzeel *et al.*, 2008), sin embargo ambos dependen de la estructura y diversidad presente en cada ecosistema, por lo que la cantidad y calidad de los BSA se pone en peligro, al deteriorarse los procesos u otros elementos de base que mantienen las condiciones óptimas de los ecosistemas (Olguín, 2001).

El Pago por Servicios Ambientales está surgiendo como un nuevo enfoque para la gestión de los valiosos servicios derivados de los ecosistemas (Immerzeel *et al.*, 2008).

Recientemente varios investigadores han utilizado datos de sitios específicos y modelos para evaluar la viabilidad de los pagos por servicios ambientales. Estos estudios utilizan datos muy detallados (como el Inventario Nacional de Recursos en los Estados Unidos), sin embargo, en la mayoría de los casos ni el tiempo ni los recursos están disponibles para la toma de datos detallados (Immerzeel *et al.*, 2008).

El papel potencial del subsector forestal en el proceso de captura de carbono ha sido recientemente evaluado por numerosos autores como Houghton (2005). Aunque dichas evaluaciones son preliminares, los resultados sugieren que la conservación de recursos forestales, el establecimiento y el manejo forestal, así como las prácticas de agroforestería, podrían contribuir a la captura global de carbono. En este contexto, es muy importante el papel de los dueños y poseedores de los recursos forestales (Montoya *et al.*, 1995).

Costos de Carbono capturado por hectárea

Al tratar de captar la magnitud de la "industria ambiental", lo más problemático es asignar una cifra exacta en dólares al total de gastos ambientales. Esto, a su vez, refleja la ausencia de una definición clara de lo que constituye exactamente el "sector verde". A diferencia de los sectores conocidos y bien definidos, el gasto ambiental atraviesa todo un abanico de sectores, desde los industriales muy contaminadores hasta el energético, el de transporte y el agrícola, así como diversos sectores de servicios, por ejemplo el turístico (Fragoso, 2003). Asimismo, se han hecho varios esfuerzos para clasificar y calcular los gastos ambientales (Olguín, 2001).

Un experto en este ámbito arguye que las inversiones ambientales deberían abarcar todos los bienes y servicios que mejoran las condiciones del medio ambiente, ya sea reduciendo el derroche de recursos naturales (técnicas de ecoeficiencia o de producción asociadas con ella), o reduciendo las emisiones (Montoya *et al.*, 1995).

Como cada opción presenta ventajas y desventajas en función de la precisión de la certidumbre y de los costos, lo importante es que las partes implicadas en el proyecto usen una estructura común para su establecimiento, análisis y supervisión (IPCC, 1995; Olgúin, 2001).

Para calcular el valor económico de la captura de carbono de los proyectos de mitigación, se deben considerar los costos de establecimiento, monitoreo y operación a largo plazo del proyecto (valor de la tierra, mano de obra, beneficios perdidos por el uso alternativo del suelo), así como los beneficios del proyecto con evaluación del mercado y otros beneficios como el control de la erosión, incremento de la biodiversidad y estéticos (Montoya *et al.*, 1995; Maser *et al.*, 2000). De esta forma, se establece el valor presente de los beneficios netos (VPBN), el cual sirve para estimar si el proyecto propuesto es económicamente viable respecto a si no se instrumentara (Montoya *et al.*, 1995).

En ese sentido, Olgúin (2001) menciona que los proyectos forestales bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) podrían tener un precio de venta por tonelada capturada de entre 13 y 42 US\$ por tonelada, mientras que los costos varían de 2 a 3 US\$ por tonelada en manejo de bosques primarios, de 1 a 10 US\$ la tonelada por proyectos de forestación y 1 a 10 US\$ por tonelada por proyectos de preservación de áreas protegidas.

Métodos de estimación de captura de Carbono

La forma en que el carbono se comporta dentro de un ecosistema forestal es muy compleja, por lo que es necesario un análisis para descubrir el potencial de captura, esto es, analizar conjuntamente el carbono capturado en la vegetación (aérea y subterránea), suelos (incluso materia en descomposición) y productos forestales (Maser *et al.*, 2000; Ordóñez *et al.*, 2001).

Existen diferentes métodos para estimar la cantidad de carbono almacenado, algunos se basan en imágenes satelitales y otros tantos son modelos de simulación (Acosta y Etchevers, 2005).

Dentro del tema de los métodos de captura de carbono en bosques, es necesario conocer qué es la captura unitaria de carbono y cómo se estima (Maser y Ordóñez, 2001).

La captura unitaria es aquella que resulta de la diferencia entre una forma de mitigación determinada llevada a cabo, y el uso alternativo. Su objetivo fundamental es incorporar cualquier opción forestal a un análisis de mitigación de carbono y se estima por medio de la medición de carbono contenido en diferentes almacenes y cada uno de los reservorios (que pueden ser emitidos o ahorrados) (Maser y Ordóñez, 2001).

Estos almacenes incluyen:

C_v = carbono contenido en la vegetación.

C_d = carbono contenido en la materia orgánica en descomposición.

C_s = carbono contenido en los suelos.

C_p = carbono contenido en productos forestales (por ejemplo, papel, muebles).

C_f = carbono ahorrado por no utilizar combustibles fósiles (por ejemplo, proyectos bioenergéticos, aclarando que este punto no es un almacén de carbono).

a) Carbono contenido en la vegetación (Cv): es la suma del carbono contenido en la biomasa aérea (tronco, hojas, ramas y partes reproductivas) y en la biomasa de las raíces (Ordóñez, 1999; Maser y Ordóñez, 2001).

Existen dos métodos para calcular la biomasa de los ecosistemas y su elección dependerá de los datos que estén disponibles al momento de realizar la estimación (Maser y Ordóñez, 2001).

Uno de ellos es el método destructivo, el cual utiliza datos colectados a partir de las mediciones destructivas de la vegetación, esto en una unidad de superficie determinada. Este método es escasamente aplicado, debido a su alto costo (Maser *et al.*, 2000).

De acuerdo con Ordóñez (1999), la estimación de la biomasa de un rodal forestal, se determina comúnmente con el método de estimación por regresión. En este método, los datos de biomasa se obtienen por el muestreo destructivo de unos cuantos árboles para relacionar con el diámetro normal, utilizando métodos de regresión.

Las ecuaciones de biomasa mejoran su predicción cuando se consideran al mismo tiempo las variables diámetro y altura, pero la medición de alturas no se realiza en la práctica, debido a que toma mucho tiempo y en algunos bosques con coberturas cerradas no es fácil identificar la punta del árbol, sobre todo cuando las mediciones se hacen en forma indirecta (Maser *et al.*, 2000).

En el segundo método se utilizan las ecuaciones alométricas para estimar el carbono contenido en la biomasa, en caso de no contar con datos como la altura y el diámetro de los árboles (Maser y Ordóñez, 2001). En este caso los contenidos de C se estimarán por medio de:

i) Método utilizando inventarios forestales: en este método se toman en cuenta el contenido de carbono en la vegetación, el contenido de carbono en la biomasa aérea (volumen, densidad de la madera, factor de expansión) y el contenido de carbono en la biomasa de las raíces (Maser *et al.*, 2000).

Las estimaciones de las ecuaciones de biomasa y los factores de expansión están basados en conjuntos de datos que solo consideran árboles con vida y no toman en cuenta materia orgánica en descomposición o árboles muertos. Esto podría generar errores en las estimaciones de la biomasa en los bosques templados, pero no en los bosques tropicales ya que estos ecosistemas poseen la mayor parte de su biomasa en la vegetación área viva (Maser *et al.*, 2000).

ii) Método utilizando ecuaciones alométricas: En caso de contar con la información de inventarios forestales se pueden utilizar una serie de ecuaciones alométricas que han sido desarrolladas con el objetivo de poder estimar la biomasa contenida en la vegetación utilizando datos fáciles de obtener en campo tales como la altura de los árboles (H) y el diámetro de los árboles a la altura del pecho (DAP) (Maser *et al.*, 2000).

Existen dos ecuaciones, uno para ser utilizado en bosques tropicales, y el otro para bosques templados.

ii.1) Bosques Tropicales: en caso de contar con el diámetro, hábitat, el diámetro a la altura del pecho (D, cm.), la altura total (H, m.) y la densidad de la madera a la gravedad específica (S, mg /m³), se puede calcular el carbono almacenado en la biomasa aérea total de los bosques tropicales, mediante una serie de ecuaciones de regresión (Maser *et al.*, 2000).

ii.2) Bosques Templados: en caso de contar con datos como diámetro a la altura de pecho (DAP) y la altura estimada de cada árbol (A) se puede calcular el carbono almacenado en la biomasa aérea total de los bosques templados, mediante una serie de ecuaciones. Para construir dichas ecuaciones se organizan los datos obtenidos en campo por rodal o sitio tomando la altura y el DAP de aproximadamente 30 árboles en cada sitio. Con estos datos se obtiene el modelo de regresión logarítmica para calcular la altura de los árboles a los que se les midió el DAP (Maser *et al.*, 2000). Para calcular el carbono en las raíces se multiplica el carbono contenido en la biomasa aérea de los estimaciones por el factor de expansión de la raíces.

b) Carbono contenido en la materia orgánica en descomposición (C_d): es el contenido de carbono que se encuentra en la materia orgánica en proceso de descomposición y es originada cuando las estructuras vegetales como las hojas, las ramas y el tronco son depositadas en el suelo (Ordóñez, 1999; Maser y Ordóñez 2001).

El método recomendado para estimar este reservorio es a través de colectas directas de campo, ya que datos indirectos no están disponibles en la mayoría de los casos, sin embargo, el carbono contenido en la materia orgánica en descomposición en cualquier tiempo puede ser calculado por: $C_d(t) = C_{do} e^{-Kdt}$, donde Kd es la tasa de decaimiento de la materia (por ejemplo por el periodo de descomposición de 10 años el valor de Kd es de 0.1) y C_{do} es la cantidad de materia en descomposición al tiempo cero ($t=0$) (Maser *et al.*, 2000).

Si no se desea considerar el paso del tiempo, C_d es simplemente: $C_d = MAID/Kd$, donde MAID es el promedio anual del incremento de la materia en descomposición. MAID se calcula: $MAI * fd$, donde MAI es el promedio del incremento anual de la biomasa vegetal (expresada en toneladas de carbono por hectárea por año) y fd la fracción de madera cultivada y que, por no ser utilizada, decae (Maser *et al.*, 2000).

c) Carbono contenido en el suelo (C_s): es el carbono contenido en las capas que conforman el suelo forestal; este suelo es originado por fragmentación de la roca madre expuesta (material parental), donde se establece un organismo vegetal, que a lo largo del tiempo va formando capas mediante el depósito de materiales, las que al irse acumulando y compactando, almacenan una cierta cantidad de carbono misma que se aumentará por la continuidad del proceso de formación del suelo (Ordóñez, 1999; Maser y Ordóñez, 2001).

La dinámica del carbono en los suelos es también muy compleja, la conversión de las áreas forestales a otro tipo de usos del suelo ocasiona una pérdida irremediable del carbono existente en el suelo. De manera contraria a lo anterior si las tierras de cultivo o las raíces forestales degradadas son rehabilitadas mediante reforestación se puede esperar un incremento en el contenido de carbono en los suelos (Maser *et al.*, 2000), sin embargo, actualmente aún no hay un consenso acerca de la cantidad de suelo perdido o ganado como producto de los cambios de uso de suelo.

Como primera aproximación, el carbono secuestrado por el suelo en una opción particular de mitigación, que se puede estimar mediante la siguiente fórmula: $C_s = C_{sf} * f_s$, donde C_{sf} es el contenido de carbono del suelo del bosque original (MgC/ha) y f_s , la fracción del carbono del suelo que se piensa es producto de la implementación de la opción

de mitigación y que se compara con el contenido de C del suelo del bosque original (Maserá *et al.*, 2000).

d) Carbono contenido en productos forestales (C_p): son los productos forestales como almacenes de carbono durante todo el tiempo de vida del producto (Maserá, 2000) y cuando este tiempo termina, el carbono se incorporará al ciclo dependiendo del proceso de degradación del producto. Mientras mayor sea la vida media de un producto forestal, el carbono estará almacenado por más tiempo (Ordóñez, 1999; Maserá y Ordóñez, 2001).

El procedimiento para estimar contenido de carbono en productos se basa en la siguiente fórmula: $C_p(t) = C_{po} e^{-K_p t}$ ó $C_p(t) = C_p(t-1) - C_p(t-1) * k_p$, donde K_p es la tasa de decaimiento del producto forestal (por ejemplo, para un producto que en promedio dura 10 años $K_p = 0.1$) y C_{po} el contenido de carbono del producto al tiempo $t = 0$. La primera, fórmula de un decaimiento exponencial, mientras que la segunda da un decaimiento porcentual un poco más rápido (Maserá *et al.*, 2000).

e) Carbono ahorrado por la sustitución de combustibles fósiles (C_f): es una alternativa para contabilizar créditos que se pueden comercializar por la sustitución de combustibles fósiles (por ejemplo, por el uso de la biomasa forestal para la producción de energía), aclarando que este punto se contempla en el cálculo de la captura unitaria pero, no es captura de carbono (Ordóñez, 1999; Maserá y Ordóñez, 2001).

El carbono de esta alternativa se obtiene de la siguiente manera: $C_f(t) = E(t) * C_{cf} * (\eta_b/\eta_f)$, donde $E(t)$ es el contenido de carbono en la madera utilizada anualmente para sustituir energía fósil, C_{cf} el contenido de carbono de los combustibles fósiles (generalmente expresados en toneladas de carbono por giga joules) y η_b/η_f la eficiencia energética de la biomasa y de la planta de poder que utilizan combustibles fósiles (o cualquier otro tipo de aparato de conversión) $E(t)$ es: volumen de la madera * densidad de la madera * contenido de carbono (Maserá *et al.*, 2000).

El carbono total capturado (C_T) en toneladas de carbono por hectárea se puede expresar como (Maserá y Ordóñez, 2001):

$$C_T = C_v + C_d + C_s + C_p + C_f$$

como resultado de la sumatoria se obtiene C_T que es igual al carbono total fijado en Mg/ha. O se puede estimar dinámicamente como:

$$C_T = \frac{C_v + C_d + C_s + C_p}{T} + \sum C_f$$

donde: T = tiempo; de esta forma, C_t es el promedio del carbono fijado en vegetación, materia en descomposición, suelos y productos forestales, más la suma del carbono ahorrado por la sustitución de combustibles fósiles debido al uso de bioenergía (Maserá y Ordóñez, 2001).

Para la mayoría de los reservorios de carbono que se mencionan anteriormente existen varios métodos de estimación y la elección de una u otra dependerá del tipo de información que esté disponible en el momento de hacer las estimaciones y de la precisión que se requiera (Maserá y Ordóñez, 2001).

Cuantificación de biomasa

Mediante estudios de biomasa se puede obtener la distribución de la materia orgánica, y así evaluar efectos que modifiquen el equilibrio del ecosistema forestal (Gayoso *et al.*, 2000).

La biomasa se puede cuantificar de forma indirecta, donde implica recolectar datos de campo y de inventarios para su posterior utilización en ecuaciones y modelos matemáticos calculados por medio de análisis de regresión; de forma directa, consiste en el apeo y pesado del árbol y determinar el peso seco (Sans *et al.*, 2007).

La biomasa forestal se define como la estimación de materia orgánica existente en determinado ecosistema forestal, tanto aérea como subterránea. Normalmente se le cuantifica en toneladas por hectárea de peso verde o seco (Sans *et al.*, 2007).

Brown *et al.* (1996) y Husch (2001) consideran que una estimación de la cantidad de carbono en un bosque requiere que inicialmente se estime el peso seco de la biomasa. Se estima el peso de carbono multiplicando el peso de la biomasa por un factor que varía entre 0.45 y 0.55. La cifra indica la proporción de carbono en el material vegetativo. En la ausencia de información específica, generalmente se usa un valor de 0.50 (Husch, 2001).

Los factores de expansión son una herramienta muy útil para estimar la biomasa y el carbono en los bosques, contando sólo con información de inventarios forestales (Schleger, 2001; Schoene, 2001). En la revisión de literatura no se encontró información sobre factores de expansión de carbono y se derivan para facilitar su cálculo en ecosistemas forestales.

Existe un método, de menor confiabilidad por la utilización de funciones de volumen de fuste asociadas a la densidad básica de la madera. En la aplicación de los métodos indirectos, para transformar la biomasa de cada individuo a biomasa total del sistema se aplican factores de expansión, y factores de reducción para la contabilización de carbono (Gayoso *et al.*, 2000).

Para calcular la biomasa aérea de cada árbol en dos de los más importantes tipos de bosques de las tierras bajas de Bolivia, utilizaron los datos del diámetro (D), altura estimada (He) y la densidad de la madera (De) y se basaron en la fórmula propuesta por Brown (1993):

$$\text{Biomasa aérea} = \exp[-2.409 + 0.952 * \ln(\text{De} * \text{D}^2 * \text{He})]$$

esta fórmula es la más aceptada científicamente y se cuantifica en toneladas por hectárea de peso seco o verde (Sans *et al.*, 2007).

Acosta *et al.* (2005), determinaron la cantidad de carbono almacenado en la parte aérea de ecosistemas forestales y de pastizales en tres regiones de México, realizando el cálculo de biomasa y el ajuste de ecuaciones alométricas para cada especie. Para ello se utilizaron las variables dasométricas: diámetro normal (DN), altura y el peso seco de cada individuo en la ecuación (Sans *et al.*, 2007):

$$Y = aX^b$$

donde Y = biomasa en kilos, X = diámetro normal, a y b son los parámetros a estimar.

Por otra parte Sans *et al.*, 2007, para cuantificar la biomasa forestal y el carbono, utilizaron un factor de 1.4 a partir de la biomasa del fuste para el cálculo de la biomasa total (fuste y hojas). Luego redujeron el valor de biomasa a materia seca con un factor de 0.5 y finalmente para cuantificar el carbono se aplica otro factor de 0.5 dando origen a la siguiente ecuación:

$$\text{Carbono} = \text{biomasa fuste} * 1.4 * 0.5 * 0.5$$

También se presentan diferentes modelos matemáticos para la estimación del carbono en la biomasa forestal aérea (Sans *et al.*, 2007):

$$\text{Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 DAP^2$$

$$\text{Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 DAP^2$$

$$\text{Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 H$$

$$\text{Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 H$$

$$\text{Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 H$$

$$\text{Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 H + \beta_3 DAP^2 H$$

$$\text{Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 DAP^{2P2} H^2$$

$$\text{Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 DAP^{2P1}$$

Donde β_0 , β_1 , β_2 y β_3 son constantes de regresión.

Se realizó un trabajo en *Eucalyptus globulus* en Galicia, y utilizaron el diámetro normal (dn) para calcular la biomasa en peso seco (W) de las diferentes fracciones del árbol (Sans *et al.*, 2007):

Madera:	$W = 0.0062 \cdot dn^{135} \cdot h^{1.072}$	$R^2 0.9753$
Corteza:	$W = 0.0093 \cdot dn^{145}$	$R^2 0.7091$
Ramas gruesas:	$W = 0.0076 \cdot dn^{130} \cdot G^{0.83}$	$R^2 0.6986$
Ramas finas:	$W = 0.0264 \cdot dn^{163} \cdot G^{0.82}$	$R^2 0.8453$
Ramitas:	$W = 0.0451 \cdot dn^{308} \cdot G^{2.50}$	$R^2 0.7617$
Hojas:	$W = 0.0043 \cdot dn^{360} \cdot G^{-1.11}$	$R^2 0.7502$

Para estimar la biomasa radical dos tipos de ecuaciones de acuerdo al tamaño de las raíces, se utiliza:

$$\text{Ln BRg} = -4.273 + 2.633 * \text{Ln D}$$

$$\text{MRf} = 6.9981 + 0.2879 * G$$

considerando como raíces gruesas a aquellas que tengan un diámetro mayor de 5 mm (biomasa de raíces gruesas [BRg]); en la biomasa de raíces finas (MRf), se consideran aquellas menores a 5 mm de diámetro; G = área basal del arbolado.

El porcentaje de contribución evalúa el aporte de biomasa radical a la biomasa total de los árboles y, de acuerdo con Sutton y Tinus (1983), la proporción biomasa radical/biomasa aérea (BR/BA) es la relación en peso seco de la masa del sistema radical y la masa total de la parte aérea. El porcentaje de contribución evalúa el aporte de biomasa radical a la biomasa total de los árboles, y se determina con la ecuación:

$$\% \text{contribución} = (\text{BR/BA} * 100) / (\text{BR/BA} + 1)$$

Gayoso *et al.* (2000), cuantificó la biomasa subterránea utilizando un método al cual denominó Skeleton, debido a la dificultad operativa y económica que implica la extracción de raíces. El método consiste en remover el suelo sobre la zona de influencia de las raíces (ZIR), después mediante el uso de un trípode y malacate se extrae la raíz para su posterior limpieza y obtención de muestras según diámetro y así seguir con el pesado de éstas.

Modelos de simulación

Algunos investigadores se basan en ecuaciones alométricas o en métodos de inventarios para estimar la cantidad de carbono que existe en los depósitos de carbono, pero actualmente existen diferentes modelos de simulación para lograr el cometido. De acuerdo con Maser y Ordóñez (2001), existen tres modelos de simulación que son los más utilizados.

Modelo CO₂Fix. Está basado en una simulación de ciclo del carbono para rodales (áreas con la misma estructura arbórea) forestales bajo manejo silvícola. Con el modelo se puede calcular el carbono total capturado a nivel de una plantación y se ha aplicado en diferentes regiones del mundo como bosque tropical lluvioso, bosque boreal y bosque templado deciduo, con una representación de sistemas de silvicultura tradicional (Maser, 2001).

La estimación se fundamenta en el ciclo del carbono e integra el crecimiento anual y las tasas de pérdida de las principales combinaciones de la biomasa incluyendo, además, la relación de la dinámica de la descomposición de la materia orgánica del suelo. La distribución relativa de follaje, ramas y raíces, y su relación con el incremento en el volumen del tronco (es decir, cada uno de los componentes arbóreos) son integrados en conjunto con un tiempo de vida esperado (Ordóñez, 1999; Maser *et al.*, 2000).

La diferencia entre la asimilación y la descomposición durante el desarrollo forestal determina la cantidad neta de carbono fijada durante el desarrollo de rodales y de la suma total de carbono, el cual está permanentemente almacenado dentro de los ecosistemas (Maser *et al.*, 2000). En este modelo se pueden distinguir tres elementos principales:

- a) Reservorios: como troncos, ramas, hojas, hojarasca, humus y productos (Ordóñez *et al.*, 2001).
- b) Transiciones de masas de un reservorio a otro (incluyendo atmósfera), provocado por factores como mortalidad natural, cosechas, descomposición, caída de hojas y ramas, entre otras (Ordóñez *et al.*, 2001).
- c) Crecimiento de los reservorios vivos, como troncos, ramas, hojas y raíces (Ordóñez *et al.*, 2001).

Modelo Cambio de uso de suelo y captura de Carbono. Es un modelo que intenta simular y considerar la interacción entre el ser humano y el bosque. Es simple y genérico, se puede utilizar en diferentes condiciones y ambientes (Maser *et al.*, 2000). De acuerdo con Ordóñez *et al.*, (2001), su principal objetivo es identificar las implicaciones de diferentes esquemas de manejo. Este modelo fue desarrollado bajo tres consideraciones principales:

- a) Capturar las interacciones físicas esenciales entre población y bosques en países en desarrollo.
- b) No es demasiado complicado.
- c) Ser capaz de representar una amplia variedad de situaciones y esquemas de manejo.

Modelo GORCAM. Este modelo se trabaja en una hoja de cálculo de Excel y fue desarrollado para calcular los flujos netos de carbono en la atmósfera que estén asociados

con el uso del suelo, el cambio en el uso del suelo y los proyectos bioenergéticos y forestales (Maserá *et al.*, 2000).

El modelo requiere parámetros para describir: el destino del aprovechamiento forestal para varias corrientes de productos y desperdicios, la duración media de los productos madereros y del carbono del suelo y la hojarasca, la eficiencia con que se utilizan los productos madereros (y valores comparables de los materiales que sustituyen) y la energía necesaria para la ordenación del sistema de productos forestales (y valores comparables para la producción y entrega de los combustibles o productos alternativos). Los materiales de la madera pueden ser reciclados, colocados en un terreno de relleno o utilizados para generar energía al final de su vida útil (Maserá *et al.*, 2000).

Imágenes satelitales

En diversos estudios a nivel nacional e internacional, se estima el contenido de carbono en ecosistemas forestales por medio de las imágenes satelitales. Estas imágenes son representaciones visuales de información, las cuales se capturan por un sensor localizado en satélites (Acosta y Etchevers, 2005). Estos sensores recogen información de la superficie de la tierra que luego se envía a la tierra y posteriormente se procesa para mostrar las características de la tierra (Carpio y Ramírez, 2001).

Existen varios modelos de imágenes satelitales como: LANDSAT 7, KH-11, AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), MODIS, SPOT-5, por mencionar algunos (Liu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2007).

En México se han utilizado imágenes satelitales para la estimación de carbono por medio del sensor SPOT-5 en bosques de *Pinus patula* (Aguirre, 2007).

Se ajustaron modelos de regresión lineal múltiple y se utilizaron métodos no paramétricos para estimar biomasa y carbono en función de los datos espectrales capturados por la imagen y de índices construidos a partir de éstos. Algunos investigadores lo consideran una nueva alternativa para la estimación de parámetros forestales a una escala propia para el manejo forestal operativo (Aguirre, 2007).

Los bosques y la tenencia de la tierra en México

En el año de 1917, la Constitución consagró en su artículo 27 los principios que rigen la existencia y funcionamiento de los núcleos agrarios, con un espíritu que privilegiaba el interés social por encima del individual, a diferencia de su antecesor de 1857 (Márquez, 2002).

Según la Ley Agraria, en el marco legal reformado en 2008 (Diario Oficial de la Federación, 2008) se reconocen tres formas de propiedad de tierras y aguas: pública, privada y social; esta última corresponde a los núcleos agrarios (ejidos y comunidades agrarias).

Ejido es la porción de tierras, bosques o aguas que el gobierno entregó a un núcleo de población campesina para su explotación. Las tierras ejidales son inembargables, imprescriptibles e inalienables a menos que la asamblea ejidal lo modifique.

Comunidad es el núcleo de población formado por el conjunto de tierras, bosques y aguas que fueron reconocidos o restituidos a dicha comunidad, y de los cuales ha tenido presuntamente la posesión por tiempo inmemorial, con costumbres y prácticas comunales.

Justificación

Los ejidatarios de Amecameca requieren conocer la cantidad de carbono que capturan sus bosques y conocer si son adecuados para prestar servicios ambientales por medio de la captura de carbono.

La mayor parte del municipio es forestal, ocupa la mitad de su territorio y solo el 4% se ocupa como zona urbana. Tiene aproximadamente 8000 hectáreas de bosque de las cuales 5000 pertenecen a bienes comunales de la región y las restantes son de pequeña propiedad.

Se distinguen tres zonas: 1) Protección: Se ubican en la zona de los volcanes, donde existen bosques de oyamel (*Abies religiosa*), pino y encino; (2) Conservación: comprende las zonas agrícolas; y (3) Restauración: que es la parte contigua al Popo (PMDUA, 2003).

Las alteraciones al medio ambiente más representativas se dan sobre las faldas de los volcanes, que son provocadas esencialmente por la tala ilegal (PMDUA, 2003).

Por lo anterior, la importancia de este estudio es conocer el potencial de captura de carbono en bosques comunales alterados por la tala y conocer la cantidad de carbono que actualmente capturan los bosques y las plantaciones que realicen los comuneros de Amecameca, y así fortalecer la solicitud del pago por servicios ambientales.

Se ha tomado en cuenta el bosque de *Abies religiosa* ya que es uno de los principales bosques en la zona y presenta zonas conservadas, con una alta presencia de especies diagnósticas de conservación (Velázquez *et al.*, 1999).

Preguntas de investigación

¿Cuánto carbono está contenido en una hectárea de bosque de *Abies religiosa*?

¿Qué ecuación explica con mayor detalle la relación DAP-carbono capturado?

Hipótesis

De acuerdo con Ordóñez *et al.* (2001), el contenido de carbono en un bosque de *Pinus* es de 217 MgC/ha; Acosta *et al.* (2007) para bosques de *Abies-Pinus* encuentran 301.9 MgC/ha, por lo que se considera que el rango de carbono que se obtendrá en los bosques de Amecameca, se encontrará entre 216 y 301.9 MgC/ha. La ecuación que explicará mejor la relación: DAP-carbono capturado, será de tipo potencial o polinómica.

Objetivos

General

Estimar la cantidad de carbono capturado en las hojas, ramas, fuste y raíces de arboles de *Abies religiosa*, a diferentes edades, en los bosques comunales de Amecameca, Estado de México.

Particulares

- a) Determinar la relación edad- DAP, y la ecuación de crecimiento, a través del incremento corriente anual en muestras troncales de *Abies religiosa*.
- b) Determinar la densidad de población, la distribución diamétrica y la estructura de edades del arbolado de un bosque de *Abies religiosa*.
- c) Obtener la ecuación que explique la relación edad-dap-captura de carbono.

Descripción de la zona de estudio

Ubicación

El municipio de Amecameca se encuentra en las faldas de la Sierra Nevada dentro de la provincia del eje volcánico en la cuenca del río Moctezuma–Pánuco, tiene una superficie de 181.72 Km²; la altura sobre el nivel del mar es de 2420 m en la cabecera municipal. Sus coordenadas geográficas son de longitud 98°37'34'' y 98°49'10'', latitud 19°3'12'' y 19°11'2''. Se ubica en la porción sur del oriente del Estado de México (PMDUA, 2003).

Hidrografía

La totalidad de los ríos, arroyos y manantiales de este municipio proviene de los escurrimientos de la Sierra Nevada que está conformada por los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl (PMDUA, 2003). La red hidrológica cubre toda la zona por el deshielo y las precipitaciones pluviales que existen en estas alturas. En la época de lluvias aumentan los escurrimientos formándose riachuelos, manantiales y arroyos (Gaceta Municipal, 2006).

Clima

Amecameca tiene un tipo de clima C(w2), el clima es el más húmedo de los templados subhúmedos, con lluvias en verano (Gaceta municipal, 2006). La temperatura media anual está entre los 12°C y los 18°C, las del mes más frío (enero) entre los -3°C y 12°C. La precipitación pluvial promedio de la zona es de 1200 mm anuales. Para altitudes mayores a 3800 m el clima es de tipo EFH, es decir un clima muy frío, con temperatura media anual de 2°C por arriba de la línea de vegetación arbórea, la temperatura puede descender bajo cero en cualquier época del año (PMDUA, 2003).

Orografía

La Sierra Nevada es la cadena más importante de la región; recorre el territorio de norte a sur y sus vertientes ocupan la mayor parte de la zona oriente. La Sierra Nevada culmina en los volcanes del Popocatepetl e Iztaccíhuatl, que tienen una altitud de 5452 y 5284 m. s. n. m., respectivamente, y son la segunda y tercera montañas más altas de México.

El Popocatepetl tiene un cráter elíptico, que mide alrededor de 800 m en su eje menor, y tiene una profundidad de 500 metros; ha hecho erupción durante varios años hasta 2004. El Iztaccíhuatl más que un largo edificio volcánico, es una sierra cuyo eje norte sur mide siete kilómetros (Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Amecameca, 2003).

Está formado por una serie de volcanes alineados más pequeños que son: el Telapón, el Papayo, el Tecámac y el Tláloc. La serranía de Aqualco une ambos volcanes, en el lugar llamado Tlamacaxco, hoy Tlamacas o paso de Cortés. El pecho alcanza la mayor altitud 5286; la cabeza 5146 metros; y los pies 4749 metros. El 20 de julio de 1868 “la volcana” como la llaman los lugareños, expulsó grandes peñascos por una cobertura próxima a la cumbre; desde entonces no hay noticias de actividad en el Iztaccíhuatl (Gaceta Municipal, 2006).

Geología

El Iztaccíhuatl y el Popocatepetl se formaron en el período del Mioceno (PMDUA, 2003; Gaceta Municipal, 2006).

A pesar de su origen común presentan características distintas, ya que mientras el Iztaccíhuatl emergió de una fractura de gran tamaño por donde emanaron materiales en puntos distintos, el Popocatepetl emergió de una sola boca formando la estructura que presenta (edificio volcánico) (Gaceta Municipal, 2006).

En la clasificación geológica de Amecameca de Juárez, existen tres series de rocas del Iztaccíhuatl y se conforma de la siguiente manera:

1. Serie Volcánica Xochitepec, las más antiguas expuestas por la erosión de los arroyos a lo largo de las laderas del Iztaccíhuatl y corresponden al Terciario Medio. Las rocas de esta serie son Traquiandesitas de hornablenda de color claro. Muy acentuadas en la cañada Alcalican (Gaceta Municipal, 2006).

2. La serie Volcánica Andesítica Iztaccíhuatl, donde predominan las Andesitas porfídicas de piroxena y conforman la masa principal del volcán (Gaceta Municipal, 2006).

3. Serie Basáltica, son basaltos arrojados en grandes cantidades por los conos pequeños de formación reciente y se sitúan al pie del Iztaccíhuatl; estos son de alta permeabilidad y permiten la infiltración con facilidad formando corrientes subterráneas. Son útiles como material de relleno (Gaceta Municipal, 2006).

En las zonas bajas y planas predominan los aluviales, que dan a esta área un gran potencial para el desarrollo agrícola (PMDUA, 2003).

Edafología

Los suelos de Amecameca son faltos de materia orgánica y muy susceptible de erosión, de origen volcánico, no retienen mucha agua, las unidades de suelo características de esta zona se dividen en cuatro tipos: litosoles, andosoles, cambisoles y fluvisoles (PMDUA, 2003).

El lugar donde se ubica la zona urbana predomina el suelo tipo fluvisol cuyo material es acarreado por los arroyos de la Sierra Nevada; cerca de las montañas predomina el suelo tipo vertisol y andosol, en tanto que en las partes altas el tipo de suelo es de tipo litosol (PMDUA, 2003).

En la región ocupada por los volcanes, el material parental de los suelos está formado por cenizas volcánicas y pómez (tefras) (Gaceta Municipal, 2006).

Litosoles: son suelos de 10 cm de espesor sobre roca de tepetate; estos suelos no se desarrollan debido a la altitud en la que se ubican (más de 4500 m), clima frío y rápido escurrimiento del agua hacen que difícilmente se implante la vegetación (Gaceta Municipal, 2006).

Andosoles: se caracterizan por derivarse de las cenizas volcánicas recientes, presentan características de baja densidad aparente, son suelos ligeros con alta retención de humedad y nutrimentos puede presentar un horizonte "A" úmbrico, mólico, ócrico o vítrico, y un horizonte "B" cámbrico poco desarrollado (Gaceta Municipal, 2006).

Los Andosoles se encuentran relacionados con los litosoles y cambisoles en zonas de transición (Gaceta Municipal, 2006).

Cambisoles: son suelos que presentan mejor desarrollo que los anteriores. Se caracterizan por presentar un horizonte "A" ócrico o úmbrico y un horizonte "B" cámbrico, sin embargo son faltos de nutrimentos (Gaceta Municipal, 2006).

Fluvisoles: son de origen aluvial reciente, pueden tener un horizonte “A” ócrico, la textura es gruesa, según el material depositado, su fertilidad es variable y por lo general son bajos en nutrimentos (Gaceta Municipal, 2006).

Flora

En el piso superior, entre los 3500 y 4200 metros se encuentra un tipo de bosque de pinares abiertos, con abundantes gramíneas amacolladas; es un bosque donde predomina una sola especie de pino, que se mezcla entre las altitudes más bajas con oyameles y ahiles. En los volcanes, el pino llega a las mayores altitudes en el mundo (PMDUA, 2003).

Arriba de los 4000 m, este bosque se mezcla con una pradera alpina o vegetación de paramos de altura; las especies dominantes son los pastos amacollados, así como el cardo santo (*Cirsium nivale*) (PMDUA, 2003).

Entre los 3400 y los 2900 m, se localiza el segundo piso de vegetación, formado por oyameles (*Abies religiosa*), que se encuentran principalmente en los cañones, mientras en las laderas son dominantes los pinos y cedros. Se encuentran madroños (*Arbutus xalapensis*) y ahiles (*Alnus firmifolia*). Las especies arbustivas y herbáceas no varían mucho del estrato anterior, pero son abundantes gracias a que hay una conservación de la vegetación original. En el límite superior de este piso se forma una masa original de oyameles donde mora una gran cantidad de la fauna silvestre (PMDUA, 2003).

Entre las plantas comestibles se encuentra los quelites, que se dan de forma silvestre y abundante en épocas de lluvia, ente otros se encuentran los quintoniles, los cuauhquelites, el quelite cenizo y los perritos, entre otros (PMDUA, 2003).

En las partes más húmedas se encuentran una gran variedad de hongos comestibles, los más conocidos son: Xochilillos, sanjuaneros, membrillos, paraquitas, xoletes, xocoyoles, olotitos o mazorquitas, panzas chilpanes, totopitles, cornetas, yemas, escobetas, mazapeles entre otras más (PMDUA, 2003).

Fauna

A lo largo de la microcuenca se observa una diversidad de la fauna silvestre que alberga desde mamíferos, aves, reptiles, anfibios e insectos que sin duda se han adaptado al clima, al tipo de hábitat y a las diferentes altitudes (PMDUA, 2003).

Es notable la presencia de una especie que vive en esta zona, el conejo de los volcanes o teporingo (*Romerolagus diazii*); otros animales son: la musaraña (*Criptomys alticola*), conejos y liebres (como *Syvilagus florinadus*), ardillas (*Sciurus nelsonii*), coyote (*Canis latrans*), armadillo (*Dasipus novemcicntus*), mapaches (*Procyón lotor*) y Zorrillo (*Mephitis mephitis*) (PMDUA, 2003).

Entre los reptiles más significativos encontramos la víbora de cascabel (*Crotalus triseriatus*), lagartijas y tizincoyotes (PMDUA, 2003).

En cuanto a las aves, tienen presencia el gavilancillo (*Falco aparverius*), águilas, correcaminos, codorniz, lechuza, búho, cuervo, zenzontle, jilguero, calandria, gorrión, azulejo, tórtola, coquito, chillón, tigrillo, primavera, carpintero, colibrí, chochoyota, seseto, cardenal, cacaxtle, tordo y mulato. Dentro de los insectos habita la araña capulina, araña tigre, alacrán, catarinas, mosquitos, mariposas, palomas y gusanos de varias especies (PMDUA, 2003).

Lamentablemente existe fauna que se encuentra en peligro de extinción, por la cacería a que están expuestas y el tráfico ilegal de animales; las especies en desaparición son el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*). Esta especie actualmente se encuentra bajo un programa de reproducción en cautiverio en la UMA Temascal; el venado cola blanca, zorros, el mázate, gato montés, puma y diversas aves también están en riesgo de extinción. Los animales domésticos son las gallinas, guajolotes, patos, codornices, conejos, vacas, burros, mulas, borregos, chivos, perros, gatos y abejas (PMDUA, 2003).

Entre la fauna nociva se encuentran las ratas, ratones, tuzas, moscas, cucarachas y jaurías de perros callejeros (PMDUA, 2003).

Características y uso de suelo

En la región ocupada por los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, el material parental de los suelos está formado por cenizas volcánicas y pómez (tefras) de diferentes edades, lo que ejerce un efecto sobre el desarrollo de los andosoles que ocupan grades superficies (Gaceta Municipal, 2006).

Las unidades del suelo características del declive occidental del Iztaccíhuatl se divide en cuatro tipos: litosoles, andosoles, cambisoles y fluvisoles (PMDUA, 2003).

En lo que se refiere a los usos del suelo, se observa una pérdida de superficie forestal del 20%, en los últimos 15 años. La mayoría de esta superficie se ha dedicado a la agricultura y a la ganadería (Gaceta Municipal, 2006).

También el renglón de erosión y tierras improductivas se ha elevado sensiblemente, lo que hace suponer que la pérdida de bosques se traduce en pérdida de suelo cultivable. Por otro lado la superficie agrícola y ganadera se ha visto afectada igualmente por el crecimiento urbano de la cabecera y sus delegaciones (Gaceta Municipal, 2006).

Métodos

En campo

Obtención de la ecuación de crecimiento

En el bosque de oyamel, se eligieron de entre 5 y 20 individuos sanos y sin daños visibles, de las siguientes edades: 1 mes, 1, 4, 10, y únicamente un árbol de 37 años y uno de 64 años (recientemente caídos por vientos). El número varió debido a la disponibilidad de individuos presentes en la zona.

En individuos jóvenes se determina la edad por medio del conteo de los nudos, esta especie presenta crecimiento rítmico estacional anual esto es, sólo presenta un verticilo cada año que deja un nudo en el tallo, haciendo posible determinar su edad. En arbolado adulto la edad se estima de la siguiente manera:

En *Abies religiosa* sólo se forma un anillo al año, por lo que se obtuvieron rodajas de dos árboles adultos (uno de 87 años y otro de 110 años), se determinó la relación edad y el diámetro del tronco, por medio de un análisis de regresión, con modelos de ecuaciones exponenciales, potenciales y polinómicas. El criterio de elección del modelo de la ecuación se basó principalmente por el valor de R^2 más cercano a 1.



Obtención de biomasa y la ecuación de captura de carbono

En cada individuo se cuantifica la biomasa de raíz, tallo o fuste, ramas, ramillas y hojas. La biomasa de raíz se obtiene excavando cuidadosamente hasta obtenerla lo más completa e intacta posible, después se obtiene el peso fresco de ésta.

La biomasa del tallo, se obtiene desde el cuello de la raíz hasta la yema apical. En árboles de más de 10 años, se fragmentará en secciones para así registrar su peso total.

La biomasa de las ramas se obtiene separándolas de las hojas y pesándolas.

La biomasa de las hojas y ramillas se obtiene registrando su peso conjunto.



Posteriormente, se empaquetan individualmente los grupos, se trasladan al laboratorio y se colocan dentro de una estufa (Felisa, modelo FE-132D) a una temperatura constante de 37 °C durante 72 horas para lograr eliminar el agua contenida, luego de transcurrido este tiempo, las muestras se sacan de la estufa y son pesadas de la misma manera que se hizo en campo para así obtener su peso en seco o biomasa. Para obtener el peso del carbono almacenado se considero multiplicar el peso de la biomasa por el factor de 0.5.

Para obtener la ecuación de incremento de biomasa, se graficó edad contra biomasa de cada componente. Se procede a encontrar la ecuación por regresión lineal por mínimos cuadrados con modelos: lineal simple, exponencial, potencial, logarítmico y polinomial. Y finalmente se elige la ecuación que tenga mayor coeficiente de determinación R^2 .

Para obtener la ecuación diámetro-edad

Se grafican los datos de diámetro-edad. Se procede a encontrar la ecuación por regresión lineal por mínimos cuadrados con modelos: lineal simple, exponencial, potencial, y logarítmico. Y se elige la ecuación que tenga mayor coeficiente de determinación R^2 .

Para determinar la densidad arbórea

El área de estudio comprende 8000 ha de las cuales 5000 ha pertenecen a bienes comunales, y de éstos, sólo 850 ha, son de bosque de oyamel. Por lo que se reconocieron 6 tipos de bosques, cuyas características están en el cuadro 1:

Cuadro 1. Relación del carbono total para diferentes tipos de bosques de *Abies religiosa* en el municipio de Amecameca, Estado de México.

Tipo de Vegetación	Exposición	Altitud	Clima	Suelo
Bosque de <i>Abies</i> con claros	W	3200 m	Semifrío-húmedo con lluvias en verano*	Andosol**
Bosque de <i>Abies</i> conservado	W	3300 m	Semifrío-húmedo con lluvias en verano*	Andosol**
Bosque de <i>Abies</i> con repoblación h/12 años	W	3280 m	Semifrío-húmedo con lluvias en verano*	Andosol**
Bosque de <i>Abies</i> afectado por incendio superficial	W	3230 m	Semifrío-húmedo con lluvias en verano*	Andosol**
Bosque de <i>Abies</i> desmontado	W	3250 m	Semifrío-húmedo con lluvias en verano*	Andosol**
Bosque de <i>Abies</i> con repoblación h/9 años	W	3300 m	Semifrío-húmedo con lluvias en verano*	Andosol**

*Conanp-SEMARNAT.

**García, 2003.

En cada uno se ubico 1 cuadro de 0.1 ha, lo que da una intensidad de muestreo de 0.04%. En cada cuadro, se registraron todos los árboles y se obtuvo la densidad arbórea promedio por hectárea. Además, se registró: diámetro, altura y cobertura de todos los oyameles. De esta manera se obtienen las estructuras diamétricas y la estructura de edades.



Cálculo de la biomasa por ha

A partir de la ecuación obtenida anteriormente, con el diámetro es posible estimar la edad y la biomasa de cada árbol.

Cálculo de Carbono

De acuerdo con Husch (2001), se utilizó la siguiente fórmula:

$$C = (\text{biomasa})^{(0.5)}$$

y la sumatoria de todo el carbono de los árboles darán la cantidad de C promedio/ha que tienen estos bosques.

Se forma una base de datos que contiene edad, peso del tallo, peso del tallo seco, peso de hojas, peso de hojas secas, peso de raíz, peso de raíces secas, peso de ramas, peso de ramas secas.

Resultados

Tipos de estructura diamétrica de los bosques. Se detectaron cinco tipos de estructura diamétrica (Figura 1). La estructura diamétrica se registró en intervalos de 0.1-10.0, 10.1-20.0, 20.1-30.0, 30.1-40.0 y de 40.1- 50.0 cm. La estructura tipo I, presentó estas cuatro clases diamétricas, excepto el intervalo 20-30 cm, con densidades de 30, 20, 0, 30 y 10 árboles·ha⁻¹, respectivamente (Figura 1a). La estructura tipo II, presentó las cinco clases diamétricas, con una densidad de 500, 170, 40, 60 y 20 árboles·ha⁻¹, respectivamente (Figura 1b).

La estructura tipo III, registró sólo dos clases diamétricas de 0.1 a 10 cm y de 40.1 a 50.0 cm, ambos con una densidad de 10 árboles·ha⁻¹ (Figura 1c).

La estructura tipo IV, también mostró dos clases diamétricas de 20.1 a 30.0 y de 40.1 a 50.0 cm con densidades de 10 y 20 árboles·ha⁻¹, respectivamente (Figura 1d).

La estructura tipo V, se presentó en dos sitios con repoblación de arbolado de 9 y 12 años de edad respectivamente y registró sólo una clase diamétrica de 0.1-10.0 cm, con densidades de 190 y 310 árboles·ha⁻¹ (Figura 1 e y f).

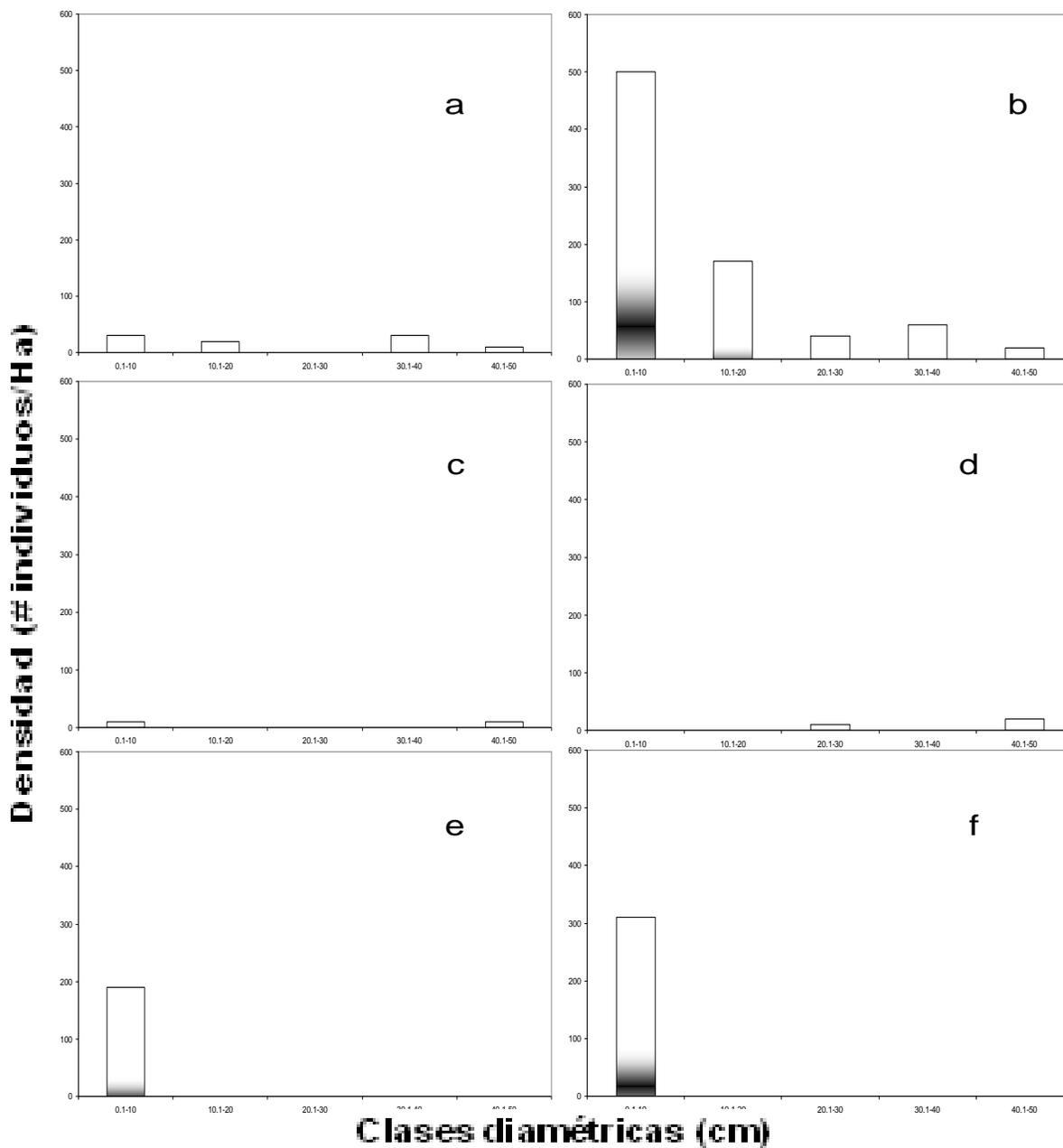


Figura 1. Tipos de estructura diamétrica en bosques de *Abies religiosa*, de la comunidad de Amecameca, Estado de México.

Relación DAP-Edad. La figura 2, muestra que la relación DAP – Edad, fue descrita por la ecuación polinómica $y = -0.0002x^3 + 0.0239x^2 + 0.2577x + 1$, con una $R^2 = 0.998$. También se muestra que a la edad de 80 años, el árbol disminuye su incremento en el volumen, y el mayor valor de DAP obtenido en campo fue de 97 cm.

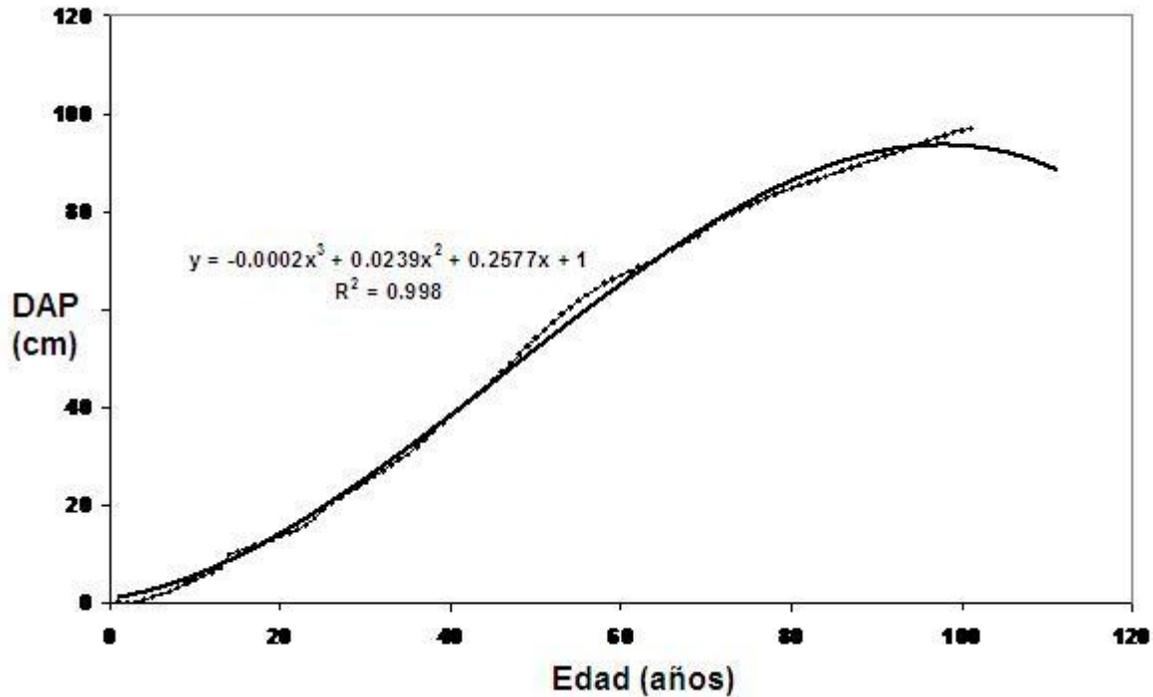


Figura 2. Relación diámetro-edad en individuos de *Abies religiosa* de los bosques comunales de Amecameca, Estado de México. La línea punteada representa valores obtenidos, y la línea continua los valores estimados con la ecuación.

Relación Altura – Edad. La mayor altura ≈ 46 - 47 m, se alcanzan entre los 50 y 58 años. La ecuación polinomial que describe esta relación es $y = -0.0008x^3 + 0.0763x^2 - 0.833x + 1.9333$ con una $R^2 = 0.9988$. Sin embargo la ecuación sobreestima la altura en 4 a 6 m, por encima de los 35 años (Figura 3).

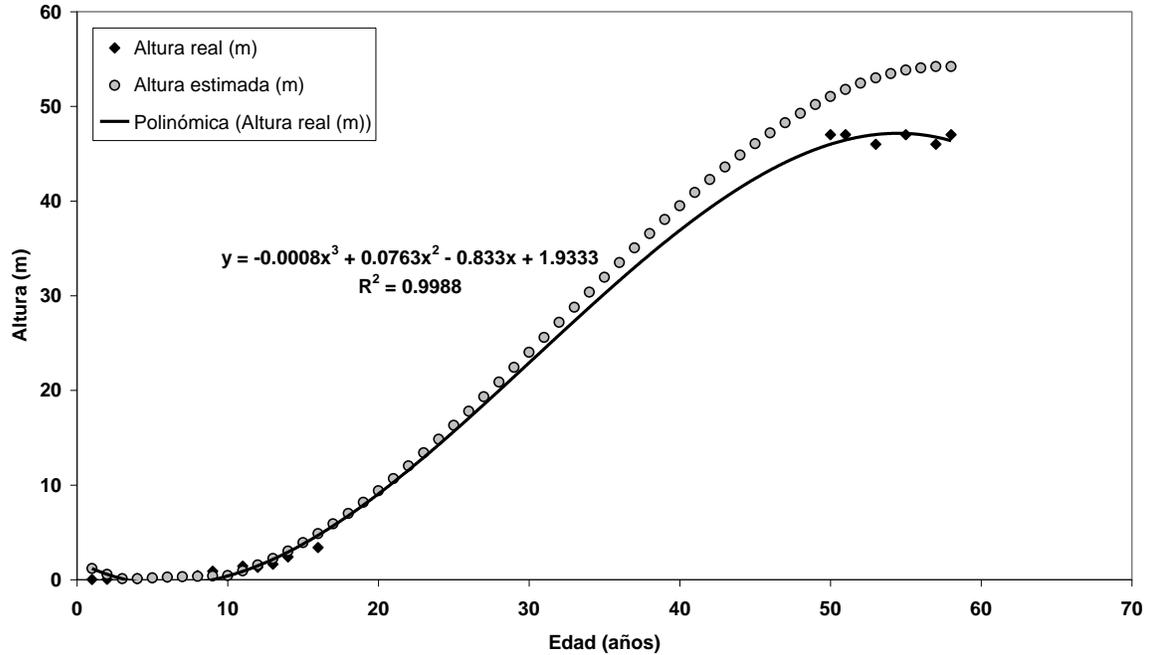


Figura 3. Relación Altura – Edad, en individuos de *Abies religiosa* de los bosques comunales de Amecameca, Estado de México.

Relación Biomasa del fuste – Edad. La relación se ajustó satisfactoriamente (Figura 4) a la ecuación polinomial de tercer orden $y = -0.0019x^3 + 0.2313x^2 - 2.5547x + 5.0388$, con una $R^2=0.9996$. La biomasa del fuste, registró su máximo valor de 303 kg, a la edad de 68 años.

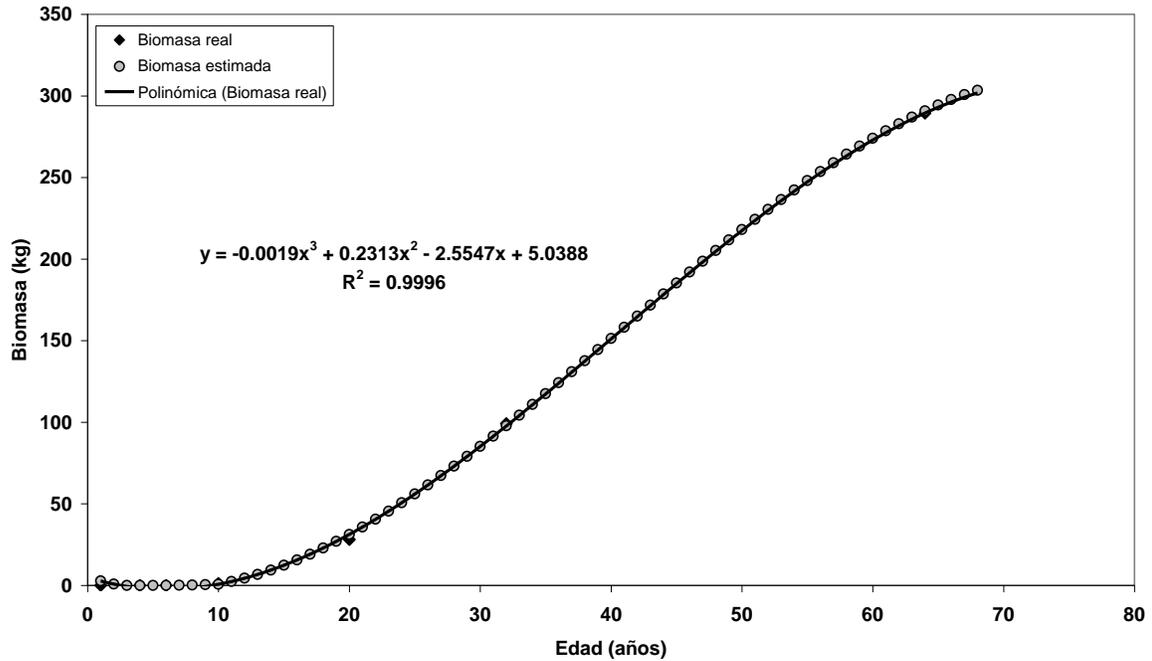


Figura 4. Relación entre la biomasa del fuste y la edad de individuos de *Abies religiosa* en los bosques comunales de Amecameca, Estado de México. Se muestra la ecuación polinómica y los datos estimados.

Relación Biomasa del follaje – Edad. La función polinomial que describe la relación edad biomasa del follaje fue $y = -0.0013x^3 + 0.1563x^2 - 1.5756x + 2.8797$, con una $R^2 = 0.9998$. En los primeros años el incremento del follaje es muy lento y a partir de los 10 años se incrementa de forma exponencial, alcanzando el máximo valor de 209 kg a la edad de 68 años.

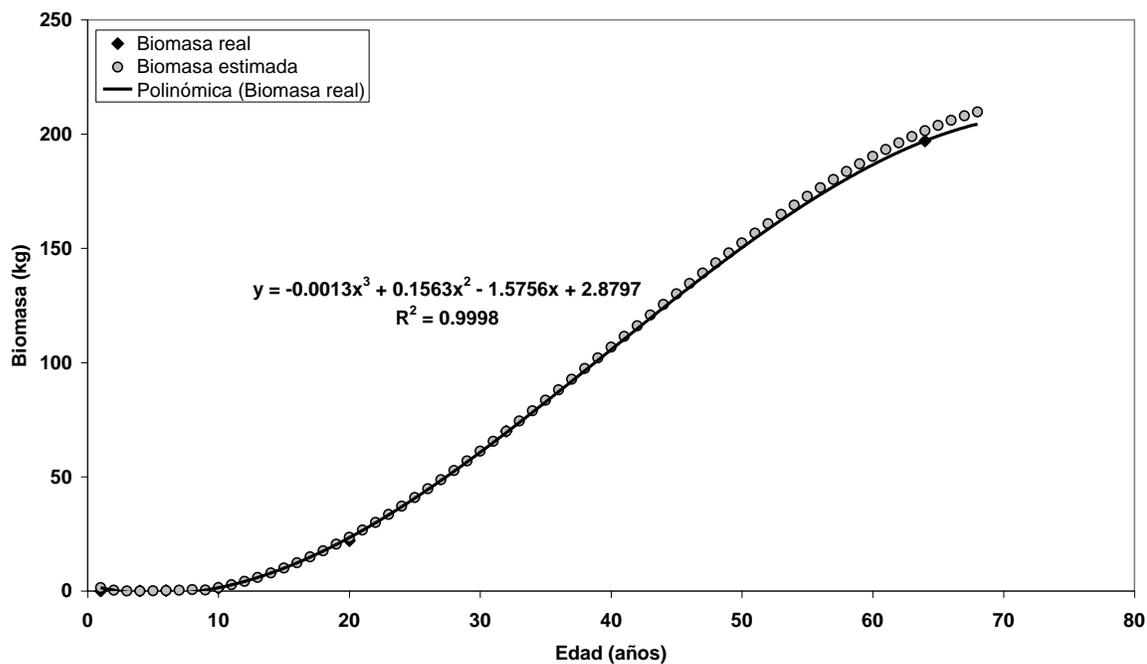


Figura 5. Relación Biomasa del follaje – Edad, en individuos de *Abies religiosa* en bosques de Amecameca, Estado de México.

Relación Biomasa de Raíz – Edad La ecuación de la función polinomial $y = -0.0006x^3 + 0.0726x^2 - 0.4863x + 0.4304$ presentó una $R^2 = 0.9999$. El mayor valor de biomasa de raíz se alcanza a una edad entre los 60 y 70 años con un valor estimado de 98 kg (Figura 6).

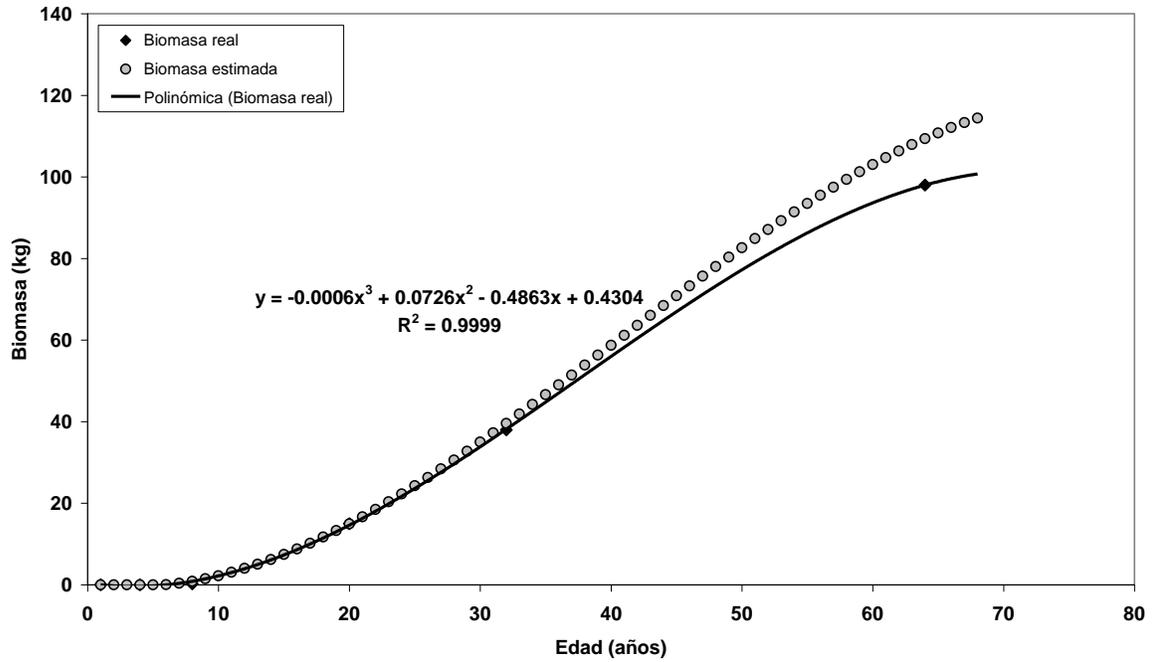


Figura 6. Relación Biomasa de la raíz – Edad, en individuos de *Abies religiosa* en bosques de Amecameca, Estado de México.

Relación Biomasa de Ramas – Edad. La ecuación polinomial de tercer orden $y = -0.0016x^3 + 0.1902x^2 - 1.91x + 3.3819$, con una $R^2=0.9998$, describe la relación de manera adecuada. En los primeros 10 años, el incremento en la biomasa de las ramas fue mínimo, y posteriormente se incrementó de forma exponencial, alcanzando un máximo valor de 245 kg a la edad de 66 años (Figura 7).

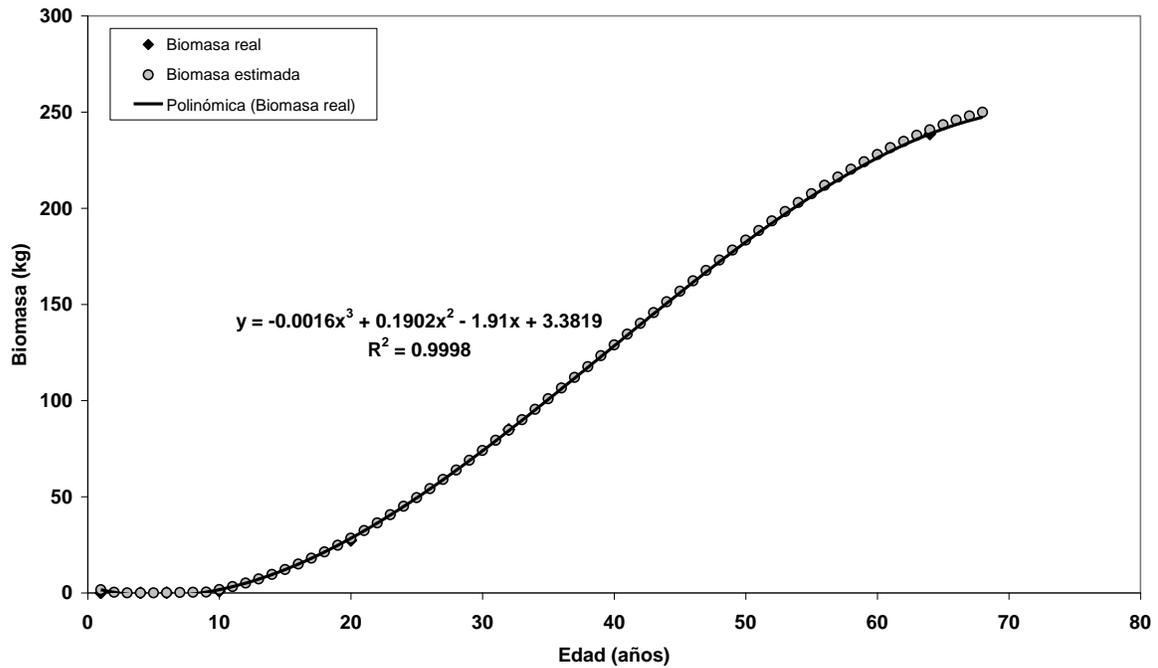


Figura 7. Relación Biomasa de ramas – Edad, en *Abies religiosa* en bosques de Amecameca, Estado de México.

Relación Carbono - Edad. El carbono total contenido en un individuo de *Abies religiosa* comienza a crecer de manera exponencial a partir de los diez años de edad. El fuste presenta los mayores valores de carbono capturado, seguido de ramas, follaje y raíz. Un individuo de 44 años, presenta un valor de carbono total de 261.8706 kg, de los cuales: 89.2896 kg (34.09 %) están en el fuste, 75.6373 kg (28.88%) en las ramas, 62.7054 kg (23.94%) en el follaje y 34.2382 kg (13.07%) en la raíz.

Puede observarse que el componente más importante como almacén de C es el fuste del árbol.

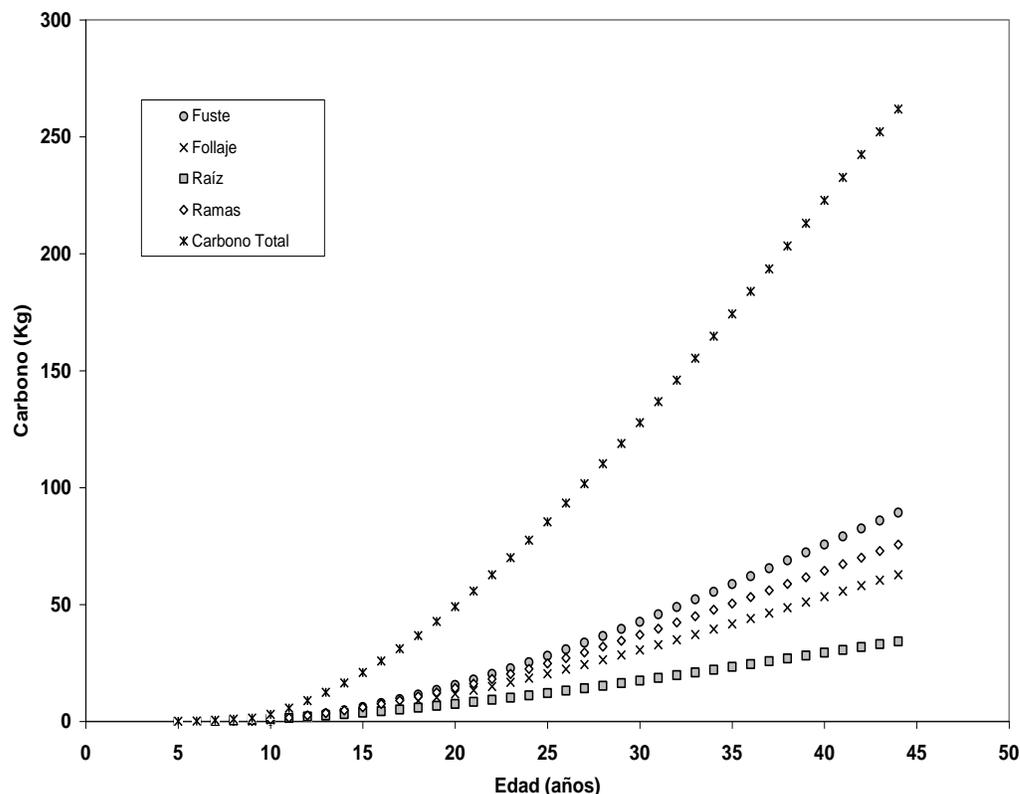


Figura 8. Relación entre el Carbono total – Edad de individuos de *Abies religiosa* en bosques comunales del municipio de Amecameca, Estado de México.

Variación del contenido de Carbono con la edad de un árbol en los diferentes componentes. En los primeros tres años el mayor contenido de carbono corresponde al follaje, posteriormente disminuye y el carbono en la raíz se incrementa hasta la edad de diez años. En los años siguientes, todos los componentes tienden a mantener una relación constante (Figura 9). Esta relación permite conocer cómo se distribuye la energía y por lo tanto el C almacenado en el tallo es constante en estos años, pero se deben considerar en las mediciones de C, tanto el follaje como la raíz, para lograr una evaluación más certera; no hacerlo disminuiría el C almacenado, el cual sería subestimado y el pago sería menor.

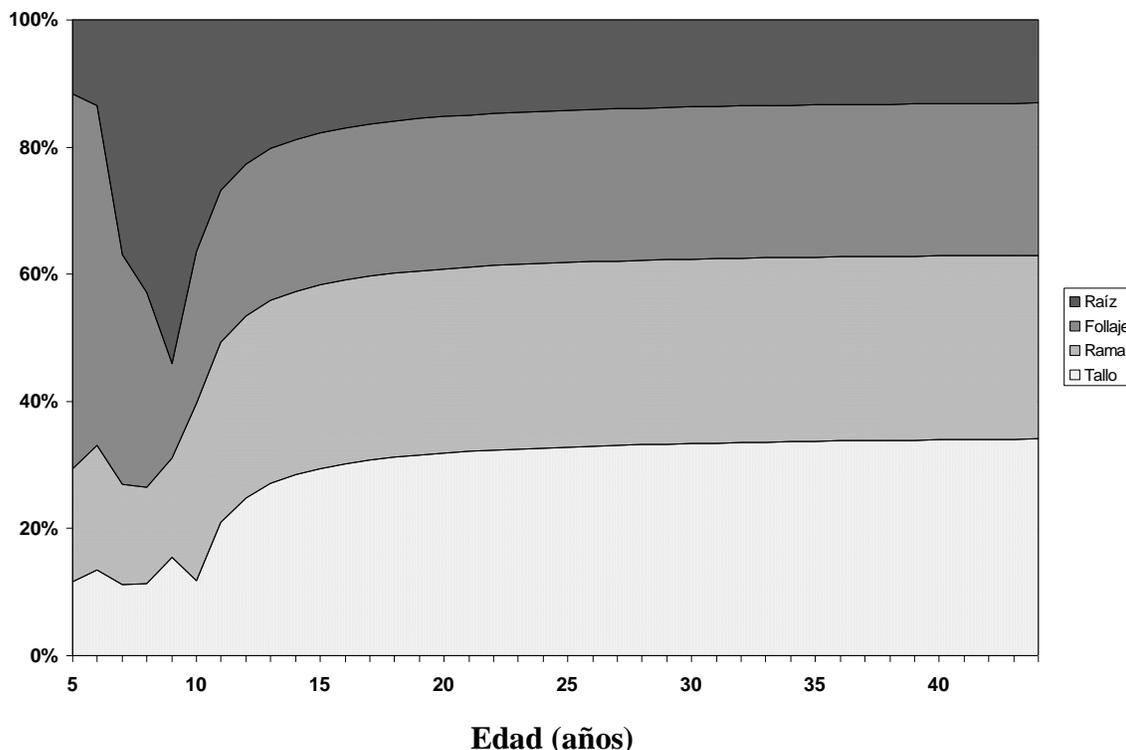


Figura 9. Porcentaje de Carbono asignado a raíz, follaje, ramas y tallo en un individuo de *Abies religiosa* de bosques en el municipio de Amecameca, Estado de México.

Relación Carbono total – Tipo de bosque. En la figura 10 se observa que el carbono total capturado es mayor en el bosque de claros con $88.579 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$; seguido por el bosque conservado con $41.8238 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, el bosque con repoblación hasta los 12 años con $38.9046 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, después el bosque maduro afectado por incendio superficial con $27.6301 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, bosque maduro desmontado con $11.6364 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ y finalmente, el bosque con repoblación de individuos hasta los nueve años con $3.9267 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$.

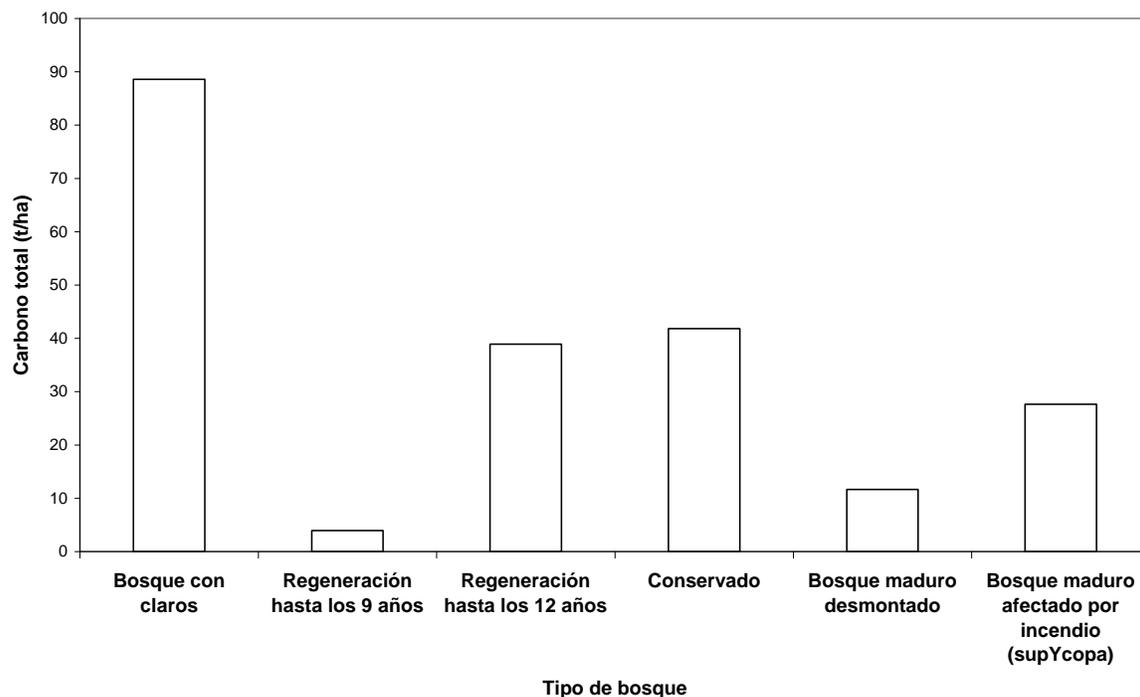


Figura 10. Estimación del Carbono total para bosques con claros, bosque en repoblación, bosque conservado y bosques maduros de *Abies religiosa* en el municipio de Amecameca, Estado de México.

Discusión

Los bosques de oyamel de la comunidad de Amecameca, presentan varios rodales con diferente estructura. La baja densidad arbórea y de repoblación ocasiona que se tenga la necesidad de realizar labores de repoblación artificial, a través de plantaciones, lo cual significa una gran oportunidad para mejorar tanto la economía de familias como la de favorecer la recuperación de los bosques y la generación de servicios ambientales que proporcionan.

El uso de ecuaciones polinomiales dio el mayor ajuste al crecimiento, lo cual es importante porque de ésta manera disminuye la subestimación o sobreestimación de las cantidades de carbono capturado.

Estos bosques presentan una captura de carbono que oscila entre 3.92 hasta 88.5 tC ha⁻¹. El valor menor corresponde a bosques con escasa repoblación, talados o afectados por incendios. En tanto que el valor mayor corresponde a bosques que han sido afectados por talas clandestinas, lo que ocasiona apertura de claros y favorecen el incremento del volumen de C capturado.

El máximo valor de C capturado, se ubica dentro de los valores registrados para otros bosques de coníferas (Cuadro 2). Este valor de 88.5 t·ha⁻¹, es superior al reportado para bosques de *Pinus* (Foster y Morrison 2002), *Cunninghamia lanceolata* en China (Zhang *et al.* 2007) con 54.15 t·ha⁻¹, lo que se atribuye a que *Abies religiosa* retiene las ramas, así como a su velocidad de crecimiento en esta zona, o a que no se han considerado los aportes de la ramas, hojas, raíces y únicamente se ha considerado el fuste. Asimismo es afín con el valor de 98 t·ha⁻¹ registrado por Liu *et al.* (2006). Y menor a los valores registrados por Acosta *et al.* (2007) y Franco (2009) de 301.9 MgC/ha y 163.62 MgC/ha respectivamente.

Cuadro 2. Estimaciones de captura de C en diferentes ecosistemas.

Fuente	Tipo de vegetación	Carbono capturado
López <i>et al.</i> , 2007.	<i>Quercus</i>	6.48 MgC/ha
Foster y Morrison, 2002.	<i>Pinus</i>	30-75 MgC/ha
López <i>et al.</i> , 2007.	<i>Pinus</i>	42.02 MgC/ha
Banfield <i>et al.</i> , 2002.	Bosques boreales	43 MgC/ha
Zhang <i>et al.</i> , 2007.	<i>Cunninghamia lanceolata</i>	54.15 MgC/ha
Ordóñez <i>et al.</i> , 2001.	<i>Pinus pseudostrubus</i>	74 MgC/ha
Nilsson y Schopfhauser, 1995.	Bosque templado-seco	90 MgC/ha
Ordoñez <i>et al.</i> , 1998.	Bosque de coníferas	91 MgC/ha
Liu <i>et al.</i> , 2006.	Bosques templados	98 MgC/ha
De Jong <i>et al.</i> , 1997.	Bosque de pino	120 MgC/ha
Nilsson y Schopfhauser, 1995.	Bosque templado	123 MgC/ha
De Jong <i>et al.</i> , 1997.	Bosque de pino encino	135 MgC/ha
Nabuurs y Morhen, 1993.	<i>Pinus radiata</i>	136 MgC/ha
Nabuurs y Morhen, 1993.	<i>P. caribea</i>	145 MgC/ha
Franco, 2009.	Bosque de oyamel	163.62 MgC/ha
Acosta <i>et al.</i> , 2007.	<i>Pinus patula</i>	183.2 MgC/ha
Nabuurs y Morhen, 1993.	<i>Abies</i>	225 MgC/ha
Acosta <i>et al.</i> , 2007.	<i>Abies religiosa-Pinus</i>	301.9 MgC/ha
Kirby y Potvin, 2007.	Plantaciones tropicales	335 MgC/ha
Roveló, 2010.	<i>Abies religiosa</i>	88.5 MgC/ha

Carbono capturado si se establecieran plantaciones de A. religiosa.

En virtud de que la legislación vigente (CONAFOR, 2010) solo contempla el pago de captura de carbono, a través de plantaciones y durante los primeros cinco años, se procedió a calcular la cantidad de C capturado por oyameles a diferente edad y bajo la suposición de establecer plantaciones.

Ecuación de Carbono capturado por edad de una plantación de A. religiosa.

La recomendación que se emite para las plantaciones en la región de Amecameca, es la siembra de 1 árbol m⁻², lo que da un total de 10,000 plantas ha⁻¹. Esta densidad se reduce conforme al tiempo y para obtener la ecuación se supuso una densidad inicial de 10,000 individuos y una densidad final de 400 árboles ha⁻¹. Se obtuvo la ecuación siguiente que permitió calcular la variación de la captura de carbono de la plantación, a través de los años:

$$Y = 0.0009X^4 - 0.1322X^3 + 5.0575X^2 - 49.474X + 141.08$$

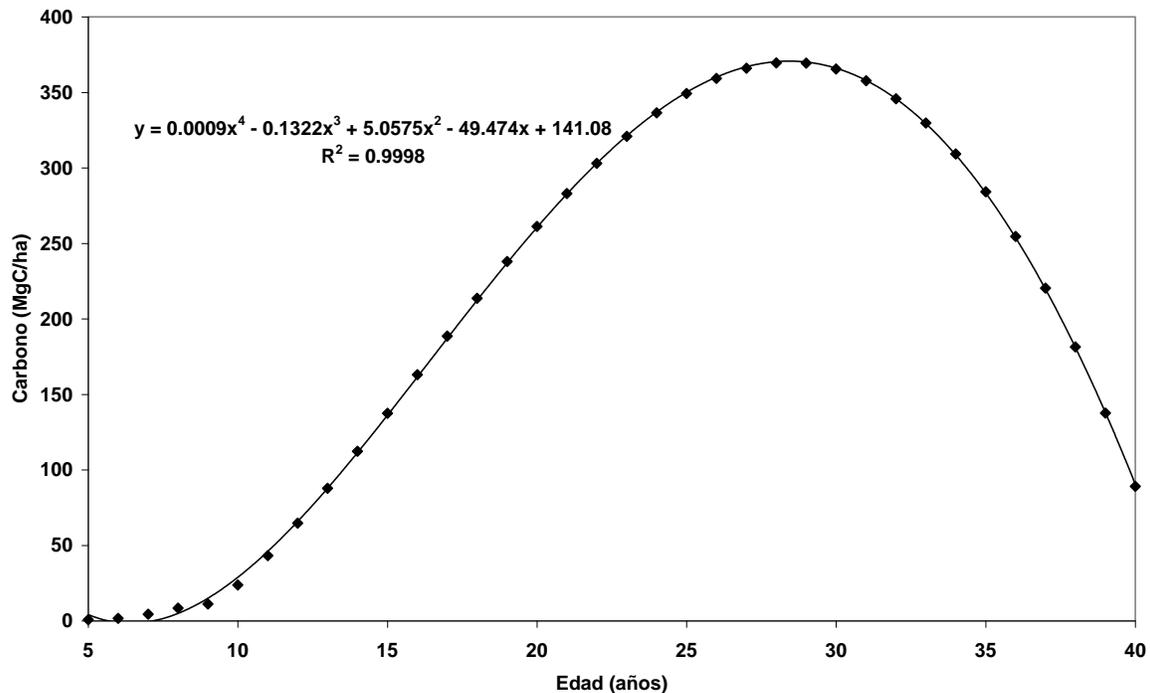


Figura 10. Relación entre la edad de una plantación tipo de *Abies religiosa* y el carbono capturado en Mg·ha⁻¹ en los bosques comunales de Amecameca, Estado de México.

Con base en la Figura 10, se puede observar que el valor máximo de captura de carbono se obtiene a los 28 años de la plantación. Esto indica que la longitud de turno debería ser de 28 años, realizar la corta de aprovechamiento y transformarla a productos maderables u otros subproductos para incrementar el tiempo de captura de C. Este tipo de curvas se han descrito para varias especies en Canadá por Banfield *et al.* (2002).

A los 28 años se estima un total de $370 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$, alcanzando un beneficio económico de \$66,660 m. n. por hectárea. Este valor es superior al reportado para bosques de *Pinus* (Foster y Morrison 2002), *Pinus massoniana* en China (Zhang *et al.* 2007) con $70.6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, lo que se atribuye a que *Abies religiosa* retiene las ramas, así como a su velocidad de crecimiento en esta zona, o a que no se han considerado los aportes de la ramas, hojas, raíces y únicamente se ha considerado el fuste. Lo anterior indica que los valores de captura de carbono no pueden ser extrapolados a otros géneros de coníferas. Sin embargo este valor es similar al registrado por Kirby y Potvin (335 Mg C ha^{-1}), para bosques de coníferas tropicales.

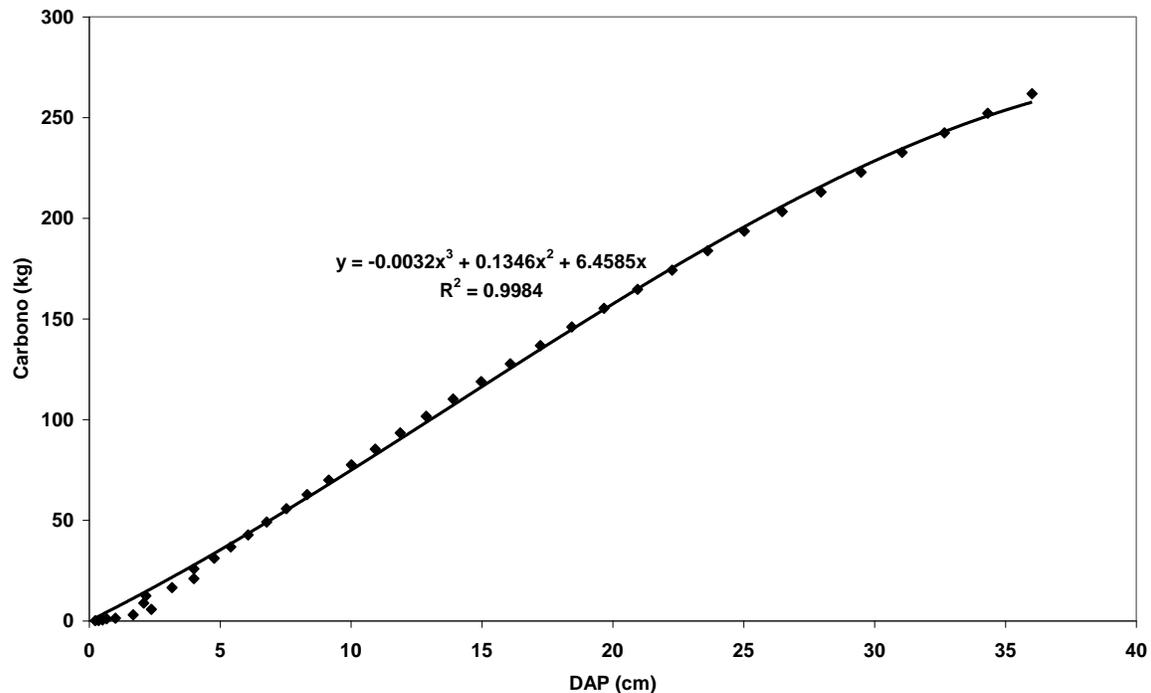


Figura 11. Relación DAP-Carbono almacenado por cada árbol de *Abies religiosa* en bosques comunales de Amecameca, Estado de México.

Con base en todo lo anterior, los habitantes propietarios de estos bosques pueden estimar la cantidad de carbono almacenado en cada árbol conociendo únicamente el DAP basándose en la ecuación de la Figura 11. Estos cálculos podrán ser utilizados en inventarios y plantaciones forestales de esta especie en esta zona.

Conclusiones

1. El carbono que está almacenado en estos bosques oscila entre 3 hasta 88 t·ha⁻¹.
2. Los bosques comunales de *Abies religiosa*, en Amecameca son heterogéneos, presentan diferente densidad y estructura diamétrica, por lo que se debe realizar un inventario completo. La determinación del volumen de C almacenado, puede ser obtenida utilizando la medida del DAP y aplicándola a la ecuación obtenida.
3. El establecimiento de plantaciones de *Abies religiosa* bajo las recomendaciones oficiales, permitiría incrementar la captura de C hasta 370 MgC·ha⁻¹, a una edad de 28 años, lo que incrementará el pago que reciben los comuneros de Amecameca. El esquema actual de apoyarlos económicamente sólo los primeros cinco años no es adecuado y se propone que debe apoyarse por lo menos hasta los diez años.
4. Con la ecuación $C = 0.0009(DAP^4) - 0.1322(DAP^3) + 5.0575(DAP^2) - 49.474(DAP) + 141.08$ los comuneros, propietarios de los bosques, pueden estimar el contenido de carbono de cada árbol en inventarios y plantaciones forestales de esta especie.

Literatura citada

- Acosta M., Etchevers J. D. 2005. *Los sumideros de Carbono: Una alternativa para el cobro de servicios ambientales. Programa de Investigación en Servicios Ambientales*. SAGARPA-INIFAP. 129–140 pp.
- Acosta M. M., Carrillo F. A., Díaz L. M. 2007. Carbono total (C) en bosques de *Pinus patula* Schl. et Cham. en la región de Tlaxco, Tlaxcala. VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales del 28 al 31 de octubre de 2007. Morelia, Michoacán, México Sociedad Mexicana de Recursos Forestales Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera – UMSNH. Pp 37-56.
- Aguirre C. S., Valdez J. L., Ángeles G. P., De los Santos H. P., Haapanen R., Aguirre A. S. 2007. Mapeo de biomasa y carbono en bosques manejados de *Pinus patula* mediante datos espectrales SPOT 5 HRG: regresión y K-NN. VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales del 28 al 31 de octubre de 2007. Morelia, Michoacán, México. Sociedad Mexicana de Recursos Forestales Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera – UMSNH.
- Brown S. 1993. Tropical forests and the global carbon cycle: the need for sustainable land use patterns. *Agric. Ecosyst. Environ.* 46, 31-44.
- Brown S., Sathaye J., Cannell M., Kauppi P. 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *Commonwealth forestry Review*. 75 (1): 80-91.
- Carpio, C.; Ramírez, O. 2001. Estudios económicos sobre el uso de los bosques latinoamericanos para mitigar el cambio climático. *Revista Asturiana de Economía*. Universidad Tecnológica de Texas – RAE No. 21. 1 – 27 pp.
- CONAFOR. 2010. Convocatoria ProÁrbol por lineamientos 2010. SEMARNAT 16 De Febrero de 2010. México.
- Conanp-SEMARNAT. www.conanp.gob.mx
- Diario Oficial de la Federación. 2008. Ley Agraria. DOF 17-04-2008.
- Diccionario de la Lengua Española. 1984. Real Academia Española. Madrid. 70, 268 pp.
- Dixon R. K., Brown S., Houghton R. A., Solomon A. M., Trexler M. C., Wisniewski J. 1994. Carbon pools and fluxes of global forest ecosystems. *Science* 263, 185–190.
- Fragoso P. L. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio “Cerro Grande”, municipio de Tancítaro, Michoacán, México. Tesis de Ingeniería Agrónoma Especialista en Bosques. UMSNH. Facultad de Agrobiología, Michoacán. Páginas 13-17.
- Franco-Maass S. 2009. *Estimación de la captura de carbono en zonas forestales: El caso del Parque Nacional Nevado de Toluca*. UAEM. Toluca, México.
- Gaceta Municipal (2006). Plan de desarrollo Municipal 2006 – 2009. Órgano Informativo 1: 1 – 174.
- García H. M. S. 2003. Indicadores de calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H. B. K.) Schl. et Cham. En la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis. Biología. FES Zaragoza. UNAM, México.
- Gayoso J. 2000. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. *Revista Forestal Iberoamericana*. Universidad Austral de Chile 1 (1): 1 – 13.

- Gutrich J., Howarth R. B. 2007. Carbon sequestration and the optimal management of New Hampshire timber stands. *Ecological Economics* 62. Páginas 441-450.
- Houghton R. A. 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Glob. Change Biol.* 11, 945–958.
- Howard E. A., Gower S. T., Foley J. A., Kucharik C. J. 2004. Effects of logging on carbon dynamics of a jack pine forest in Saskatchewan, Canada. *Global Change Biol.* 10, 1267–1284.
- Husch B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. *Simposio Internacional sobre Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales* 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 9 p.
- Immerzeel W., Stoorvogel J., Antel J. 2008. Can Payments for Ecosystems Services Secure the Water Tower of Tibet? *Agricultural Systems* 96: 52 – 63.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1995. Climate Change 1995. *The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Karjalainen T., Kellomäki S., Pussinen A. 1994. Role of wood based products absorbing atmospheric carbon. *Silva Fenn.* 28 (2), 67–80.
- Karjalainen T. 1996. Dynamics and potentials of carbon sequestration in managed stands and wood products in Finland under changing climatic conditions. *For. Ecol. Manage.* 80, 113–132.
- Kraenzel M., Castillo A., Moore T., Potvin C. 2003. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panamá. *Forest Ecology and Management* 173. pp. 213-225.
- Krebs C. J. 1978. *Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance*. Harper & Row. 2ª ed. USA. pp. 104-129.
- Lee J., Morrison I. K., Leblanc J. D., Dumas M. T., Cameron D. A. 2002. Carbon sequestration in trees and regrowth vegetation as affected by clearcut and partial harvesting in a second-growth boreal mixedwood. *For. Ecol. Manage.* 169, 83–101.
- Liski J., Karjalainen T., Pussinen A., Nabuurs G. J., Kauppi P. 2000. Trees as carbon sinks and sources in the European Union. *Environ. Sci. Policy* 3; 91–97.
- Liu J., Liu S., Loveland T. R. 2006. Temporal evolution of Carbon budgets of the Appalachian forests in the U. S. from 1972 to 2000. *Forest Ecology and Management* 222: 191 – 201.
- López A. T., Nívar J. C., Flores J. L., Cantú C. A. 2007. Estimación de carbono y factor de expansión de carbono en ecosistemas forestales en Chihuahua, México. VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales del 28 al 31 de octubre de 2007. Morelia, Michoacán, México *Sociedad Mexicana de Recursos Forestales Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera – UMSNH*.
- Lugo A. E., Brown S. 1992. Tropical forests as sinks of atmospheric carbon. *For. Ecol. Mgmt.* 54, 239-256.
- Marland E., Marland G. 2003. The treatment of long-lived carbon-containing products in inventories of carbon dioxide emissions to the atmosphere. *Environ. Sci. Policy* 6, 139–152.

- Márquez C. R. 2002. Apropiación del territorio y gestión de recursos forestales. Estudio de caso en ejidos de Márquez de Comillas, Selva Lacandona, Chiapas. *Revista Estudios Agrarios [México]*: núm. 19: 9-39.
- Masera O. R. 2001. Carbon sequestration dynamics in forestry projects: The CO₂FIX V.2 Model approach. Instituto de Ecología, UNAM. México, D. F. 1 – 13 pp.
- Masera O. R., Ordóñez J. B. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1), 2001:3-12.
- Masera O.R., Garza C. F., Kanninen M., Karjalainen T., Liski J., Nabuurs G. J., Pussinen A., de Jong B. J., Mohren G. J. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO₂FIX V.2 approach. *Ecol. Model.* 164, 177–199.
- Montoya G., Soto L., De Jong B., Nelson K., Farias P., Yakactic P., Taylor J. H. 1995. Desarrollo forestal sustentable: Captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas. *Instituto Nacional de Ecología*. México. 1 – 50 pp.
- Olguín M. 2001. Incorporación de la captura de carbono como propuesta de manejo forestal integral: Estudio de caso en una comunidad de la Meseta Purépecha. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. 73pag.
- Ordóñez J. D. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. Primera edición. México, Distrito Federal. Páginas 7-29.
- Ordóñez J. A., de Jong B. H., Masera O. 2001. Almacenamiento de Carbono en un Bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7 (2): 27 – 47.
- Pagiola S., Bishop N., Landell M. 2006. *La venta servicios ambientales forestales: Mecanismos basados en el mercado para la conservación y desarrollo*. Segunda Edición. Instituto Nacional de Ecología (INE – SERMANAT). México. 337–358 pp.
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Amecameca (PMDUA). 2003. Gobierno del Estado de México. *Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda*. 1–174 pp.
- Sans C., Daniluk G., Escudero R., IrisityF., Soria L., Priore E., Peludo M., Arnaboldi G., Giosa R.. 2007. *Determinación de parámetros y ecuaciones para estimar biomasa en plantaciones forestales*. Estudio realizado en el marco del “Convenio Especifico de Colaboración Tecnológica. Uruguay. 1 – 30 pp.
- Sundquist E. T. 1993. The global carbon dioxide budget. *Science* 259; 935–941.
- Velázquez A., Romero F. J., Bacco G. 1999. Análisis y simulación de la distribución de especies diagnósticas de la región de montaña del sur de la cuenca de México. En: *Biodiversidad de la región de montaña del sur de la cuenca de México*. Parte 3:66-178.
- Vogt K. 1991. Carbon budgets of temperate forest ecosystems. *Tree Physiol.* 9. Pp 69-86.
- Winjum, J. K., Brown S., Schlamadinger B. 1998. Forest harvest and wood products: sources and sinks of atmospheric carbon dioxide. *For. Sci.* 44 (2); 272–284.
- Zhang J., Ge Y., Chang J., Jiang B., Jiang H., Peng C., Zhu J., Yuan W., Qi L., Yu S. 2007. Carbon storage by ecological service forests in Zhejiang Province, Subtropical China. *Forest Ecology and Management* 245: 64 –75.