



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**Estimación del almacenamiento de carbono de
Abies religiosa en Suelo de Conservación de la
Ciudad de México utilizando ecuaciones
alométricas y dendrocronología**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

PRESENTA:

Yazmin Carrillo Mata



DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento

Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía,
UNAM.

ASESOR INTERNO:

M. en C. Germán Calva Vásquez

Laboratorio de Contaminación Atmosférica, FES Zaragoza,
UNAM.

CDMX, 2017.



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ZARAGOZA”

DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E.

Comunico a usted que la alumna **CARRILLO MATA YAZMIN**, con número de cuenta **310028455**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **06 de septiembre de 2017** a las **11:00 hrs.**, para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

PRESIDENTE M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL

VOCAL Dr. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO*

SECRETARIO M. en C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ

SUPLENTE Dr. GERARDO CRUZ FLORES

SUPLENTE Dr. EFRAÍN REYES ÁNGELES CERVANTES

El título de la tesis que presenta es: **Estimación del almacenamiento de carbono de *Abies religiosa* en Suelo de Conservación de la Ciudad de México utilizando ecuaciones alométricas y dendrocronología.**

Opción de titulación: Tesis

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Ciudad de México, a 15 de agosto de 2017

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ
DIRECTOR



VO. BO.
M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL
JEFE DE CARRERA

RECIBÍ
OFICINA DE EXÁMENES
PROFESIONALES Y DE GRADO

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico y la beca otorgada a través del Proyecto de Investigación 179301, con el nombre de: Evaluación Económico – Ambiental del Suelo de Conservación del Distrito Federal a cargo del Dr. Enrique Pérez Campuzano, para la elaboración de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

A la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de ser parte de su comunidad y por otorgarme la formación académica desde el bachiller, en sus estancias estuve asesorada por buenos profesores, los cuales me ayudaron a encontrar mi vocación y me formaron como profesionista, también, en sus instalaciones forme lazos con amigos que hasta el día de hoy agradezco siguen a mi lado.

Al Dr. Enrique Pérez Campuzano por confiar en mis habilidades y conocimientos para la elaboración de una tesis y brindarme la oportunidad de realizarla.

Al Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento por el apoyo y asesoramiento en el trabajo, por compartir sus conocimientos para la elaboración de la tesis y la paciencia de orientarme en el camino.

Al M. en C. Germán Calva Vásquez quien fundó mi conocimiento en las ciencias ambientales en el Laboratorio de Investigación Formativa VII y VIII, por haberme asesorado y orientado en las bases de la tesis, por darme un tiempo y tener paciencia para revisar mis avances en el trabajo y brindarme un espacio en el laboratorio para seguir desarrollando el trabajo que se culmina con el presente escrito. Por tomarse el tiempo necesario para compartir anécdotas personales y escucharme, por orientarme en situaciones difíciles porque es un profesor que no solo se preocupa por formar y guiar el crecimiento como profesionista sino también como persona.

Muchas gracias.

DEDICATORIAS

A mi familia

A mis abuelos Daniel y Emma por apoyarme cuando más lo necesitaba acogiéndome en su hogar siendo esta etapa la que marca la culminación del camino donde me han acompañado. Gracias por los consejos, charlas, mimos y demás que me brindaron con su amor, momentos que persistirán en mi mente con cariño recordando a las personas fuertes que llegue a conocer.

A mis abuelos Ana María y Javier por acogerme en su hogar en otra etapa de mi vida reciente brindándome apoyo para continuar con mis estudios a pesar de las adversidades. Por los consejos, charlas y anécdotas compartidas. Por las tristezas y baches compartidos.

Por y para ustedes Emma y Javier que siempre formarán una parte importante de mí y aunque ya no estén presentes físicamente siempre los tendré en mi mente recordándolos con mucho cariño. Los voy a extrañar.

A mis padres, por tener un logro pesar de los obstáculos difíciles y dolorosos, gracias por el apoyo y brindarme la libertad que me ha permitido seguir adelante sin importar las circunstancias para luchar por mis objetivos.

Para mis hermanos Jair y Javier porque para que tengan nuevas metas y sigan adelante aun con los obstáculos.

Para mi pequeño Ivan que ya no está para seguirme alentando a continuar, y aunque el tiempo compartido fue efímero seguiré por él, y lo extraño más que a nadie.

A mi tía Araceli y mis primos Ana Bertha y Carlos Alberto por apoyarme, escucharme y brindarme consejos, por compartir tantos momentos de alegría y tristeza, las fiestas y las locuras juntos, los quiero mucho. Espero que los cuatro podamos seguir con nuestras aventuras.

A la familia Carrillo por compartir tantas alegrías y el consuelo en los malos ratos, por apoyarme en todo momento. Especialmente a mi tía Francisca por escucharme tantas veces y brindarme consejos. Gracias.

A Oscar por mostrar interés en todo lo que realizo, por apoyarme, por los nuevos momentos y darse el tiempo de leer mi trabajo. En serio no sabes cuánto aprecio mucho lo que has hecho en este tiempo.

A mis primas Esmeralda y Berenice, por creer en mí y apoyarme en todo momento, por las charlas, las pijamadas, por las lágrimas de felicidad y alegría, y todas las confidencias, muchas gracias.

A la familia Mata por creer en mí y en especial a mi tía Angélica.
A mis tías Eustolia Águila y Mónica Macazaga por brindarme su apoyo. Gracias.

A mis amigos

A Carlos González, mi más viejo amigo quien me ha brindado su amistad incondicional y su apoyo en los buenos y malos momentos. Por las metas que tenemos cada uno y por las que aún nos faltan conseguir. Te aprecio tanto y te quiero mucho.

A Priscila Matías que me ha acompañado desde el bachillerato, una amiga que valoro mucho.

A Tayde Yesenia por brindarme su amistad incondicional desde que la conocí, por las largas charlas y los consejos. Por ser más que una amiga, te quiero mucho.

A mis amigos Jesús Rosas, Ivan Arredondo y que han estado conmigo en los buenos y malos momentos desde que iniciamos la carrera, por las aventuras, por los consejos.

A Omar Moreno por brindarme su amistad y compañía, por las largas charlas y los consejos que siempre necesitamos. Por las aventuras y las discusiones por tener la razón (algo que siempre recordaré). Te quiero.

Al equipo Miguelitos que sin pensarlo se volvieron en una parte importante de mí, por compartir su valiosa amistad y momentos inolvidables, Jesús Vázquez, Eyra Salinas Montserrat Méndez, Rosa Navarrete, Kalid Martínez, Uriel García, Clarisa Marmolejo, Francisco Pacheco y Alfonso Vázquez, un amigo que también me acompaña desde primer semestre. Los quiero mucho amigos.

A los amigos ya mencionados que me acompañaron y apoyaron en mis prácticas de campo de la tesis a pesar del poco tiempo que disponían incluyendo a Ulises Hernández, muchas gracias.

Gracias a cada uno de ustedes por todos los momentos que hemos vivido, llenos de sentimientos y pensamientos compartidos. Por dedicarme tiempo para demostrar su preocupación por mí, tiempo para escuchar mis problemas, mi sufrir y ayudarme a descubrir que a pesar de los problemas puedo ser feliz. Por ser personas maravillosas. Sé que no siempre me han escuchado decirles: “Los Amo” pero aunque no lo escuchen, sepan que los aprecio mucho a cada uno de ustedes.

NO TE RINDAS

*No te rindas, aún estás a tiempo
de alcanzar y comenzar de nuevo,
aceptar tus sombras, enterrar tus miedos,
liberar el lastre, retomar el vuelo.*

*No te rindas que la vida es eso,
continuar el viaje,
perseguir tus sueños,
destrabar el tiempo,
correr los escombros y destapar el cielo.*

*No te rindas, por favor no cedas,
aunque el frío queme,
aunque el miedo muerda,
aunque el sol se esconda y se calle el viento,
aún hay fuego en tu alma,
aún hay vida en tus sueños,
porque la vida es tuya y tuyo también el deseo,
porque lo has querido y porque te quiero.*

*Porque existe el vino y el amor, es cierto,
porque no hay heridas que no cure el tiempo,
abrir las puertas quitar los cerrojos,
abandonar las murallas que te protegieron.*

*Vivir la vida y aceptar el reto,
recuperar la risa, ensayar el canto,
bajar la guardia y extender las manos,
desplegar las alas e intentar de nuevo,
celebrar la vida y retomar los cielos,*

*No te rindas por favor no cedas,
aunque el frío queme,
aunque el miedo muerda,
aunque el sol se ponga y se calle el viento,
aún hay fuego en tu alma,
aún hay vida en tus sueños,
porque cada día es un comienzo,
porque esta es la hora y el mejor momento,
porque no estás sola,
porque yo te quiero.*

Mario Benedetti.

“No hay inversión más rentable que la del conocimiento” **Benjamin Franklin-**

“Cuando el objetivo te parezca difícil, no cambies de objetivo; busca un nuevo camino para llegar a él” **Confucio.**

“El dolor es algo temporal, puede durar un minuto, una hora, un día, o un año, pero al final se acabara y otra cosa tomara su lugar. Sin embargo, si me rindo ese dolor será para siempre” **Lance Armstrong.**

Todo depende de tu actitud. Sólo si piensas que todavía existe una posibilidad de lograr tus propósitos los podrás conseguir. En caso contrario no hay nada que hacer.

Porque ¡caer está permitido pero levantarse es obligatorio!

“La verdadera amistad es como la fosforescencia, resplandece mejor cuando todo se ha oscurecido” **Rabindranath Tagore.**

“Amigo es el que en la prosperidad acude al ser llamado y en la adversidad sin serlo”

Demetrio de Falero.

“Un hermano puede no ser un amigo, pero un amigo será siempre un hermano” **Demetrio de Falero.**

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
I. MARCO TEÓRICO	4
1.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y CALENTAMIENTO GLOBAL.....	4
1.2 CICLO DE CARBONO.....	12
1.3 EL PAPEL DE LOS ECOSISTEMAS EN EL CICLO DEL CARBONO.....	13
1.4 MEDIDAS DE MITIGACIÓN CON BOSQUES.....	15
II. ANTECEDENTES DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO.....	18
2.1 BOSQUES TEMPLADOS.....	22
2.2 BOSQUE DE <i>ABIES RELIGIOSA</i> (H.B.K.) SCHL. ET CHAM. (OYAMEL).....	25
2.3 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....	30
2.4 SUELO DE CONSERVACIÓN.....	32
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	36
IV. OBJETIVOS	38
V. MÉTODO	39
5.1 ZONA DE ESTUDIO.....	39
5.2 DISEÑO DE MUESTREO.....	43
5.3 ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA.....	44
5.4 MODELOS DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS.....	48
5.5 EDAD DEL BOSQUE.....	48
5.6 CONCENTRACIÓN DE CARBONO.....	49
VI. RESULTADOS	52
6.1 ESTRUCTURA DEL BOSQUE.....	52
6.2 EDAD Y CRECIMIENTO DEL ARBOLADO.....	57
6.3 BIOMASA Y CARBONO DE <i>ABIES RELIGIOSA</i>	59
6.4 MODELOS DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS.....	60
VII. DISCUSIÓN	62
7.1 ESTRUCTURA.....	62
7.2 EDAD Y CRECIMIENTO.....	66
7.3 BIOMASA Y CARBONO.....	67
7.4 CARBONO POTENCIAL.....	71
7.5 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....	72
VIII. CONCLUSIONES.....	75
IX. RECOMENDACIONES.....	76
X. REFERENCIAS	77
XI. CITAS ELECTRÓNICAS.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cambios observados de la temperatura superficial a escala continental y mundial comparados con los modelos simulados del clima.	7
Figura 2. Emisiones antropógenas anuales totales de gases de GEI para el período comprendido entre 1970 y 2010.....	11
Figura 3. Troceo del arbolado.....	20
Figura 4. Mapa del Parque ejidal San Nicolás Totolapan.....	41
Figura 5. (a) Vista desde abajo del bosque de <i>Abies</i> , (b) distancia mínima de parcelas, (c) perforación del árbol con el taladro Pressler, (d) medida de DN en árbol, (e) extracción de viruta con el bastidor y (f) medición de albura.	45
Figura 6. Bosque de oyamel.....	46
Figura 7. (a) Núcleos orientados, (b) núcleos lijados; los anillos se observan fácilmente, (c) virutas en el escáner Epson Expression 1680, software WinDENDRO™ STD1600+ (d) imagen del path marcado con el WINDENDRO. ...	50
Figura 8. (a) Muestra compuesta por categoría, (b) muestra molida y (c) muestra de madera tamizada.....	51
Figura 9. Retoños de <i>Abies religiosa</i> (H.B.K.) Schl. et Cham.....	52
Figura 10. Estructura de diámetros normales del bosque de <i>Abies religiosa</i> de San Nicolás Totolapan.....	53
Figura 11. Distribución de la altura del bosque.....	53
Figura 12. Distribución del área del DN del bosque.	54
Figura 13. Relación entre las variables del área del DN y altura.....	55
Figura 14. Relación entre las variables de diámetro normal y altura.	56
Figura 15. Índice de esbeltez; Manzanilla (1974).	57
Figura 16. Promedio de ancho de crecimiento en intervalos de 5 años	58
Figura 17. Índice de sensibilidad y ganancia por año.	59
Figura 18. Distribución de biomasa y carbono para cada categoría.....	60
Figura 19. Obtención del modelo para el cálculo del almacén de biomasa.....	61
Figura 20. Obtención del modelo para el cálculo del almacén de carbono.	61
Figura 21. Estructura de diámetros normales del bosque de <i>Abies religiosa</i> de San Nicolás Totolapan en las categorías propuestas para el mismo.	65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Aumento promedio de la temperatura global	6
Cuadro 2. Mitigación de CO ₂ con bosques.....	17
Cuadro 3. Antecedentes de la estimación de carbono en bosques conservados y naturales a nivel internacional.	18
Cuadro 4. Antecedentes de la estimación de biomasa y carbono en México.	21
Cuadro 5. Comparación de los bosques de <i>Abies</i> de México y Eurasia	26
Cuadro 6. Antecedentes de estimación de Carbono en <i>Abies religiosa</i>	29
Cuadro 7. Concentración de Carbono y Nitrógeno.....	62
Cuadro 8. Estimación de Biomasa y Carbono del Parque Ejidal con ecuaciones para <i>Abies religiosa</i>	70



RESUMEN

El suelo de conservación de la ciudad de México juega un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos, sin embargo, el servicio de captura de carbono ha sido poco explorado. El presente trabajo realiza una descripción de la estructura del bosque y la estimación del almacén de biomasa y carbono del Parque Ejidal de San Nicolás Totolapan ubicado en la Ciudad de México. En el sitio de estudio se ubicaron 13 parcelas de 25 × 25 m en la que se determinó la altura y el diámetro normal (DN) de todos los árboles de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. *et* Cham. Con la información dasométrica se determinaron estimaciones indirectas de biomasa y carbono, ajustando el coeficiente mórfico, el factor de expansión de biomasa y determinando el contenido de carbono. Los resultados de la estructura sugieren que es un bosque joven, ya que alrededor del 60 % de los árboles está en las categorías < 20 cm DN y < 10 m de altura; la edad promedio del bosque es de 63.5 años. El bosque tiene una condición saludable con una densidad promedio de 1, 084 ± 44 árboles ha⁻¹ y un índice de esbeltez de 99.84 %, sugiriendo una estructura sana y en regeneración. La estimación de biomasa es de 865 Mg ha⁻¹ y para carbono 460 Mg ha⁻¹, pero cabe señalar que los árboles con un DN < 60 cm contribuyen al 80 % del carbono almacenado en el sitio de estudio. Es decir, existe una relación negativa entre la densidad de las categorías diamétricas y el potencial de almacenamiento de carbono. El almacenamiento de carbono del Parque Ejidal de San Nicolás Totolapan juega un rol fundamental en la captura de carbono, la regulación del régimen climático local y la recarga hídrica de la ciudad de México.

Palabras clave: Suelo de Conservación, almacén de carbono, servicios ecosistémicos, Pago por Servicios Ambientales.



INTRODUCCIÓN

El presente trabajo pretende recopilar información sobre la captura de carbono de un Parque Ejidal con bosque de oyamel (*Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham.) perteneciente al suelo de conservación de la Ciudad de México (CDMX). Ésta ocupa una extensión aproximada de 149, 830 hectáreas (ha), su territorio representa 0.1 % de la superficie total del país; 61, 179 ha son áreas urbanas y el resto 88, 652 ha (59.2 %) corresponden a la zona rural, por lo que se puede dividir en dos áreas básicas, en función de los usos de suelo: Área de Desarrollo Urbano (ADU) y Suelo de Conservación (SC). El último tiene 38, 252 ha cubiertas por bosques, 500 ha de matorrales y 28, 599 ha de uso agrícola (PAOT, 2010a).

La estructura verde que tenemos actualmente es básicamente la que se creó en la época colonial, con algunas adiciones que nunca compensaron el crecimiento desmesurado de la ciudad. La superficie urbana creció sin control en el período de 1950 – 1970 por la parte norte y oriente hasta rebasar los límites con el Estado de México estableciendo la configuración de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) (Sánchez y Díaz, 2011). Esto ocasionó el deterioro del área verde junto con la fisionomía de la ciudad y la calidad de vida de los habitantes. Para frenar y limitar el crecimiento de la mancha urbana hacia el sur, el 17 de diciembre de 1970 se estableció una “zona de veda” denominada “Suelo de Conservación Ecológica” (Sánchez y Díaz, 2011).

Algunos datos de 1980 mencionan que para dicha década el suelo de conservación correspondía al 5.2 % de la superficie de área urbana incluyendo áreas verdes en camellones, glorietas y similares que no tiene garantía de



permanencia (COCODA, 1986). Desde entonces la necesidad de restaurar y mejorar el uso de estos espacios, restableciendo el equilibrio ecológico que se ha ido deteriorando. El suelo de conservación funciona como reserva territorial y constituye el patrimonio natural del cual depende la sobrevivencia y bienestar de las generaciones futuras de la CDMX. Esta zona proporciona bienes y servicios ecosistémicos que permiten la viabilidad de la ciudad, entre los que se encuentran: la captación e infiltración de agua a los mantos acuíferos, la regulación del clima, el mejoramiento de la calidad del aire, hábitat para la biodiversidad, oportunidades para la educación, investigación y recreación, producción de alimentos y materias primas, entre otros (PAOT, 2009). El suelo de conservación hoy en día alberga vegetación natural que constituye la reserva de la flora y fauna en esta región y representa una fuente importante de bienes y servicios ambientales, como la diversidad de productos utilizados por los pueblos y comunidades rurales locales y su potencial para desarrollar actividades productivas sustentables (Pozos y Lee, 2015), pero el estudio del suelo de conservación es escaso, conocer la dinámica de estos espacios y tener datos o estimaciones que se adapten a la ecología del sistema ayudarían a proponer mejores planes y medidas de manejo para potenciar el uso de suelo.



I. MARCO TEÓRICO

1.1 Cambio climático y calentamiento global.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es un organismo intergubernamental establecido conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), para abordar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas, y de formular estrategias de respuesta realistas, proporcionando a los responsables de políticas las evaluaciones científicas y técnicas más autorizadas y objetivas en ese ámbito. Para el IPCC (2007), el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. Este significado difiere del utilizado en la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, que describe el cambio climático como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparables.

La temperatura media calculada de los registros analizados por el IPCC ha aumentado en los últimos 10 años al incorporar los datos recientes. La tendencia lineal a 100 años para el período de 1901 - 2000 corresponde a un aumento



promedio de temperatura de 0.6 °C (IPCC, 2001). Para el 2007 en el Cuarto Informe se menciona que del período de 1995 - 2006, once años se figuraban entre los doce más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850) y la tendencia (1906 - 2005), que entonces se proyectó obtuvo un 0.74 °C (IPCC, 2007).

En el V Informe se afirma que cada último año de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la tierra que cualquier decenio anterior a 1850. Y que los últimos 30 años (1983 - 2012) es el período más cálido de los últimos 1, 400 años en el hemisferio Norte, reportando un calentamiento de 0.85 °C para el período de 1880 al 2012 (IPCC, 2015).

El aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta y es más acentuado en las latitudes septentrionales superiores y las regiones terrestres se han calentado más aprisa que los océanos (IPCC, 2015). Datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que el promedio anual de la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en un 2.7 % [entre 2.1 y 3.3] por decenio, con disminuciones estivales de 7.4 % [entre 5.0 y 9.8] por decenio (IPCC, 2015).

Se ha observado una disminución de los glaciares de montaña y la cubierta de nieve en ambos hemisferios que concuerda con el calentamiento. Contrastando con el aumento promedio del nivel de los océanos mundiales, este ha aumentado un promedio de 1.8 mm año⁻¹ [entre 1.3 y 2.3] (desde 1961), y de 3.1 mm año⁻¹ [entre 2.4 y 3.8] (desde 1993), a consecuencia del deshielo de los glaciares y en parte por efecto de la dilatación térmica. Este aumento de nivel del mar también concuerda con el calentamiento (IPCC, 2007). En el cuadro 1 se pueden ver las



tendencias de temperatura a 100 años y en la figura 1 los modelos de temperatura continental, oceánica y mundial.

Cuadro 1. Aumento promedio de la temperatura global, (tomado de IPCC, 2007).

Período	Temperatura media	Intervalo
	_____ °C _____	
1901 - 2000	0,6	0,4 - 0,8
1906 - 2005	0,74	0,56 - 0,92
1880 - 2012	0,85	0,65 - 1,06

El cambio climático es el problema ambiental más severo al que nos enfrentamos en este siglo y será mucho más difícil de solucionar si las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) no se mitigan y se buscan procesos industriales más limpios y menos contaminantes (Ordóñez, 2007).

La variación de las concentraciones de los GEI y aerosoles en la atmósfera, las variaciones de la temperatura de cubierta terrestre y la radiación solar alteran el equilibrio energético del sistema climático (IPCC, 2007). El resultado de actividades productivas es la generación de los GEI cuya importancia radica en que tiene la posibilidad de aumentar la temperatura de la atmósfera y por ende los patrones climáticos del planeta (Ordóñez, 2007). Las emisiones mundiales de GEI (CO₂, CH₄, N₂O y PFC) por efecto de actividades humanas han aumentado desde la era preindustrial, en un 70 % entre 1970 y 2004 (IPCC, 2007).

Cambio experimentado por la temperatura a nivel mundial y continental

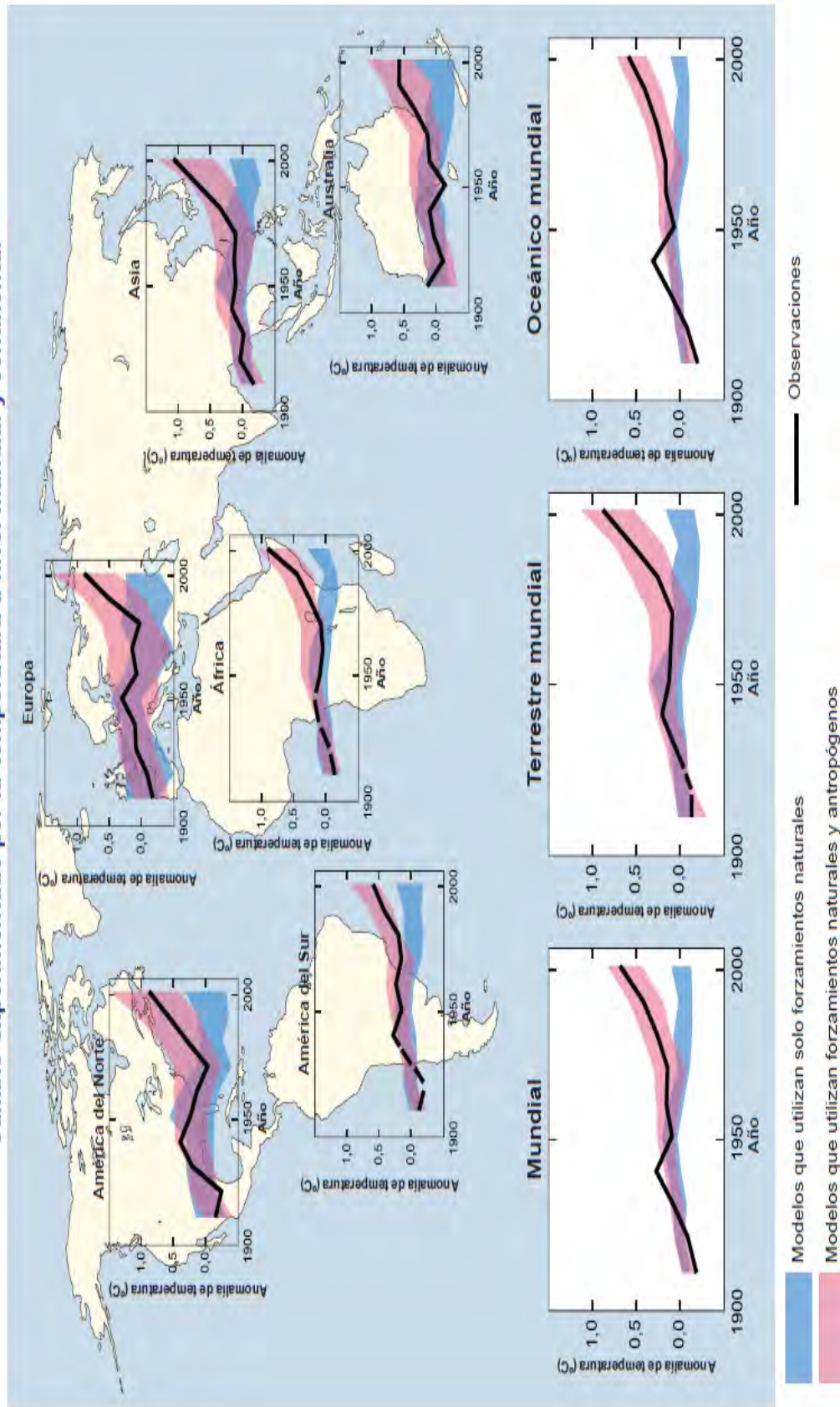


Figura 1. Cambios observados de la temperatura superficial a escala continental y mundial comparados con los modelos simulados del clima. Con forzamientos naturales (actividad solar y volcanes; franja azul) y forzamientos naturales y antropógenos (franja roja). Los promedios decenales de las observaciones correspondientes al período 1906 - 2005 (línea negra) aparecen representados gráficamente respecto del punto central del decenio y respecto del promedio correspondiente al período 1901 - 1950. Las líneas denotan una cobertura espacial inferior a 50 %. Ambas franjas denotan un intervalo entre el 5 % y el 95 %. Tomado de IPCC, 2007.



Las concentraciones atmosféricas de CO₂ (379 ppm) y CH₄ (1774 ppb) en 2005 exceden con mucho el intervalo natural de valores de los últimos 650, 000 años. La concentración de CO₂ en la atmósfera mundial aumentó, pasando de un valor preindustrial de aproximadamente 280 ppm a 379 ppm en 2005 (Epstein y Rogers, 2004).

En los diez últimos años la tasa de crecimiento anual de las concentraciones de CO₂ es de 1.9 ppm anuales (1995 - 2005) y ha sido mayor que desde el comienzo de las mediciones directas continuas de la atmósfera con un valor de 1.4 ppm anuales (1960 - 2005) de lo que podemos estimar que también es la mayor de los últimos 420 mil años y probablemente la mayor de los últimos 20 millones de años de la historia de la tierra (Acosta *et al.*, 2001).

La concentración de CH₄ en la atmósfera ha aumentado de un valor preindustrial de 715 ppb aproximadamente, a 1, 732 ppb (inicios 90's), alcanzando en 2005 las 1, 774 ppb, es probable que este aumento se deba predominantemente a la agricultura y a la utilización de combustibles de origen fósil. Las tasas de crecimiento han disminuido desde el comienzo de los años 90, en concordancia con las emisiones totales (suma de fuentes antropogénicas y naturales), que fueron casi constantes durante ese período (IPCC, 2007). La concentración mundial de N₂O en la atmósfera aumentó respecto de los valores preindustriales, pasando de aproximadamente 270 ppb a 319 ppb en 2005. El aumento procede principalmente de la agricultura o bien al cambio de uso de suelo.



La concentración de numerosos halocarbonos (incluidos los hidrofluorocarbonos) ha aumentado respecto de unos niveles casi nulos en la era preindustrial, debido principalmente a la actividad humana. El IPCC (2015) asegura que las actividades humanas (desde 1750) son la causa principal del calentamiento global y que mientras mayor sea la perturbación de estas sobre el clima, mayores serán los riesgos del impacto y la irreversibilidad. De los GEI mencionados el CO₂ existe también en la atmósfera de manera natural, por lo que puede ser incorporado (o secuestrado) por las estructuras vegetales (Ordóñez, 2007).

En el 2010 las emisiones antropógenas de GEI alcanzaron la cifra de 49 ± 4.5 Gt CO₂-eq por año (fig. 2). El monitoreo de estas emisiones han demostrado que el dióxido de carbono (CO₂) es el GEI antropogénico más importante, sus emisiones procedentes de la combustión de combustibles fósiles y los procesos industriales contribuyeron en torno al 78 % del aumento total de emisiones de GEI de 1970 a 2010 (IPCC, 2014). Los aumentos de la concentración mundial de CO₂ se deben principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y en una menor parte a los cambios de uso de suelo (IPCC, 2007).

El informe sobre escenarios de emisiones proyecta un aumento mundial de GEI 25 % a 90 % (CO₂-eq) entre 2000 y 2030, suponiendo que los combustibles de origen fósil mantengan su posición dominante en el conjunto mundial de fuentes de energía hasta 2030 como mínimo (IPCC, 2007). Las proyecciones indican un calentamiento de aproximadamente 0.2 °C por decenio para toda una serie de escenarios de emisiones (IPCC, 2000b). El modelo de calentamiento



reduce la incorporación terrena y oceánica de CO₂ atmosférico, incrementando así la fracción de emisiones antropogénicas que subsisten en la atmósfera, sin embargo, la intensidad del efecto varía notablemente según el modelo (IPCC, 2000b).

Para el 2015 el IPCC menciona que entre 1750 y 2011 las emisiones antropógenas de CO₂ mundiales a la atmósfera fueron de 2, 040 ± 310 Gt CO₂. Alrededor del 40 % de esas emisiones han permanecido en la atmósfera (880 ± 35 Gt CO₂) y el resto fueron removidas de la atmósfera y almacenadas en la tierra (en plantas y suelos) y en el océano. Los océanos han absorbido alrededor del 30 % del CO₂ antropógeno emitido, provocando su acidificación. Alrededor de la mitad de las emisiones de CO₂ antropógenas acumuladas entre 1750 y 2011 se han producido en los últimos 40 años (fig. 2).

También se estima que ~ 20 – 30 % de las especies consideradas hasta la fecha estarán probablemente amenazadas de extinción, si el calentamiento promedio mundial aumenta más de 1.5 – 2.5 °C (respecto del período 1980 - 1999) (IPCC, 2000b). Si el promedio de la temperatura mundial aumentara en más de 3.5 °C, las proyecciones de los modelos indican que podrían sobrevenir extinciones masivas (entre 40 - 70 % de las especies estudiadas) en todo el mundo (IPCC, 2000b). Indudablemente el cambio climático producirá probablemente algunos impactos irreversibles, de aquí la importancia de disminuir las emisiones y mitigar el impacto.

Emisiones antropógenas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010

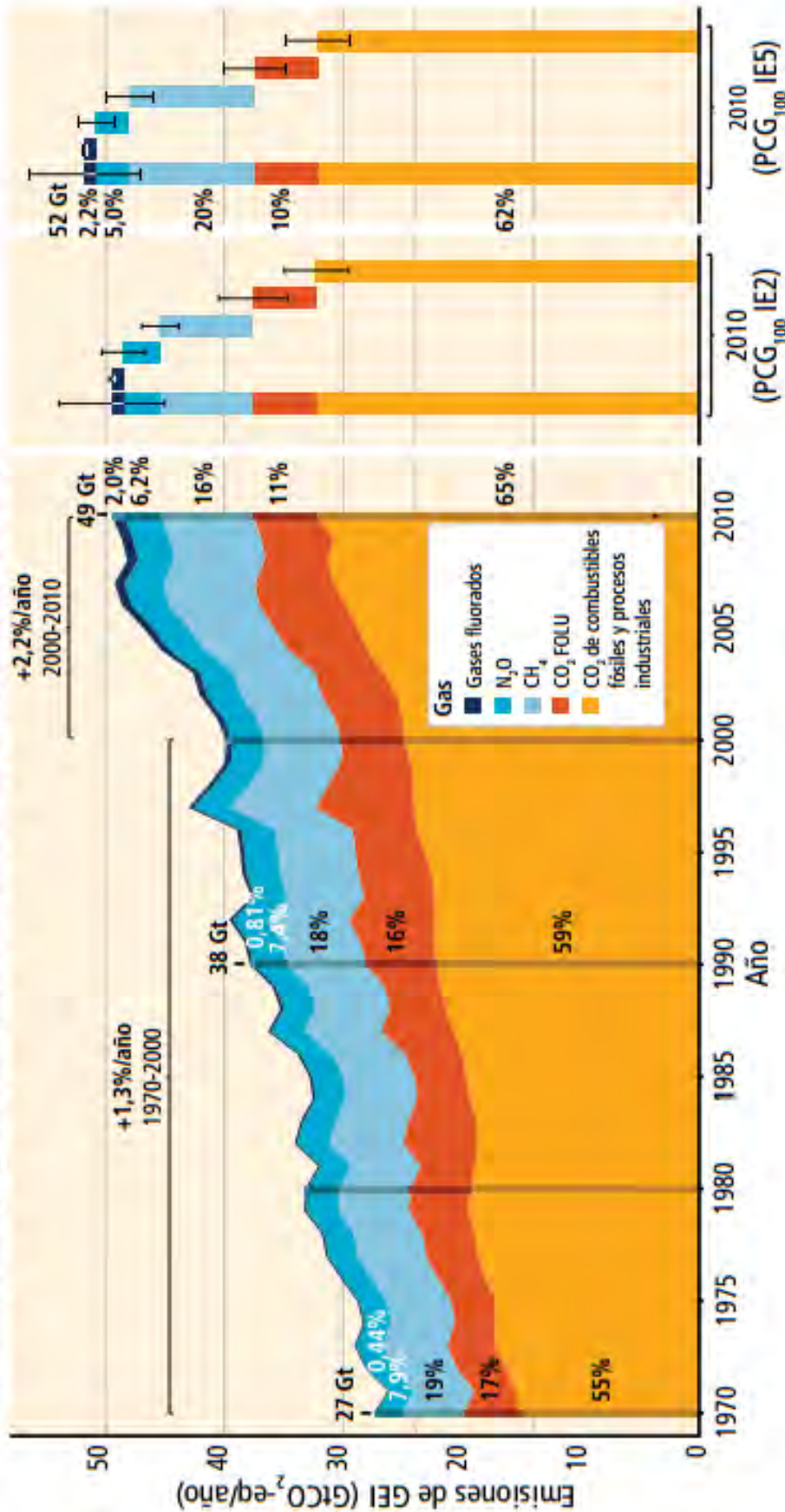


Figura 2. Emisiones antropógenas anuales totales de gases de GEI para el período comprendido entre 1970 y 2010. Por gases: CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales; CO₂ procedente de la silvicultura y otros usos del suelo (FOLU); metano (CH₄); óxido nitroso (N₂O); gases fluorados abarcados en el Protocolo de Kyoto. A la derecha se muestran las emisiones de 2010, con ponderaciones de emisiones de CO₂-eq basadas en valores de los Informes de Evaluación segundo y quinto del IPCC. Las emisiones de CO₂-eq están calculados sobre la base de valores del potencial de calentamiento global con un horizonte temporal de 100 años (PCG₁₀₀) procedentes del Segundo Informe de Evaluación (IE2). La utilización de valores de PCG₁₀₀ más recientes del Quinto Informe de Evaluación (IE5) daría un mayor nivel de emisiones anuales totales de gases de efecto invernadero (52 Gt CO₂-eq año⁻¹) a raíz de una mayor contribución del metano. Tomado de IPCC, 2014.



1.2 Ciclo de Carbono.

El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico en el cual este elemento (no metálico) se traslada e intercambia entre la biosfera, litósfera, hidrósfera y la atmósfera de nuestro planeta. La reserva más grande de carbono (C) se encuentra en la hidrósfera específicamente en los océanos (39, 000 Gt C) con más de 90 % presente como iones de bicarbonato (HCO_3^-), y cerca de 2, 500 Gt C en los sedimentos marinos de carbonato (CO_3^{2-}) (los cuales se van compactando para transformarse en rocas sedimentarias con el paso del tiempo geológico) (Rackley, 2010). Del CO_2 disuelto en el océano aproximadamente 120 Gt C (16 %) es antropogénico con una tasa de captación estimada de 2 Gt C al año (Rackley, 2010). Esta reserva tiene ~ 50 veces el carbono contenido en la atmósfera e incluye los arrecifes de coral y rocas calizas.

La corteza terrestre representa la parte superior de la litósfera y es el sumidero final del C geológico se estima que contiene 5×10^7 Gt C en rocas sedimentarias de los cuales un 20 % está formado de C orgánico, el resto como roca caliza y combustibles fósiles – carbón, petróleo y gas – representan juntos entre 4,000 – 6,000 Gt C (0.05 %) del total de C orgánico presente en las rocas sedimentarias (Rackley, 2010). El inventario atmosférico en su totalidad es casi CO_2 con una concentración de 388 ppm o 0.04 % en volumen, el restante se representa por el metano (~ 1.8 ppm) con trazas de monóxido de carbono (CO) y clorofluorocarbonos (CFC) antropogénicos. El inventario total de C en la atmósfera es de 780 Gt C con un aumento anual ~ 1.7 ppm equivale a un aumento neto de



3.5 Gt C al año sedimentarias (Rackley, 2010). El inventario de C terrestre se estima cerca de 2, 200 Gt C de las cuales 600 Gt C están presentes como biomasa¹ y 1, 600 Gt C como C orgánico en el suelo y los sedimentos, este inventario ha decrecido cerca del 10 % desde la época preindustrial y predominantemente a partir de la segunda mitad del siglo XIX como resultado de prácticas de cambios de uso de suelo, deforestación, y un intensivo uso de agricultura (Rackley, 2010).

El ciclo del C orgánico se sincroniza con las estaciones del hemisferio norte, de mayo a septiembre está ~ 3.5 ppm CO₂ por debajo de la tendencia media anual de la producción fotosintética y se recupera en una cantidad similar como resultado de la descomposición de la biomasa (octubre a abril) (Rackley, 2010). Se deduce que la velocidad de fijación del CO₂ es proporcional a la tasa de crecimiento e incremento de la biomasa (Méndez *et al.*, 2011). La cuantificación de la biomasa en base al crecimiento de la vegetación en los ecosistemas forestales es importante para estimar el C almacenado y las tasa anual de fijación; un tema relevante por sus implicaciones directas con el calentamiento global (Cifuentes y Catie, 2009 citado en Cuenca *et al.*, 2014).

1.3 El papel de los ecosistemas en el ciclo del carbono.

Las plantas absorben el CO₂ del aire a través de los estomas de sus hojas para incorporarlo al proceso fotosintético. Con la interacción del agua obtenida del

¹Biomasa: Es la cantidad total de materia orgánica presente en los árboles se divide en biomasa aérea (hojas, ramas, tronco y corteza) y biomasa subterránea (raíces) (Ordoñez y Masera, 2001; Garzuglia y Saket, 2003 citado en Flores *et al.*, 2011).



suelo y con la ayuda de la clorofila el CO₂ captado produce azúcares (Carrillo *et al.*, 2014), los cuales son sintetizados en compuestos complejos de carbono que incorporan a sus tejidos, llegando a representar 40 % - 50 % de su biomasa dependiendo de la especie (Méndez *et al.*, 2011). A través de las raíces las plantas también absorben partículas con carbono del suelo y este pasa a formar parte de su estructura. Una pequeña parte del CO₂ asimilado regresa a la atmósfera como desecho de la respiración vegetal, otra se queda en el suelo y otra se incorpora a la cadena trófica cuando parte de la planta es consumida. Los bosques (templados y tropicales) del mundo capturan, almacenan y liberan carbono como resultados de los procesos fotosintéticos, de respiración y degradación de la materia seca (Torres y Guevara, 2002). Conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90 % del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Apps *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994; citados en Ordóñez y Maser, 2001). De igual manera, el suelo juega un papel muy importante en el ciclo y el almacén del carbono de estos ecosistemas. El suelo tiene una gran capacidad de "secuestrar" carbono (Johnson, 1992; citado en Ordóñez y Maser, 2001), ya que puede acumularlo por miles de años (Schlesinger, 1990; citado en Ordóñez y Maser, 2001).

Una vez que el dióxido de carbono es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis, este puede participar en la estructura del árbol (follaje, ramas, tronco, raíces), y es así como los sistemas forestales desempeñan un papel importante en la conservación, por la cantidad de Carbono que pueden retirar de la atmósfera (Ordóñez, 2007).



Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, misma que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable que a su vez, aporta nuevamente CO₂ al entorno (Ordóñez, 1998 y 1999). El C en la vegetación es la suma del carbono contenido en la biomasa aérea y el carbono contenido en la biomasa de las raíces. La estimación precisa de la dinámica de los flujos netos de carbono entre los bosques y la atmósfera (el balance emisión-captura) ha sido uno de los problemas abiertos más importantes en la discusión sobre cambio climático (IPCC, 1995).

La remoción del carbono de la atmósfera por fotosíntesis terrestre se estima en 120 Gt C por año como producción primaria bruta (PPB), de los cuales 60 Gt C año⁻¹ son reemitidas a la atmósfera por la respiración de las plantas y las otras 60 Gt C año⁻¹ se retienen como producción primaria neta (PPN), que es el crecimiento de la biomasa (Rackley, 2010).

1.4 Medidas de mitigación con bosques.

Los ecosistemas forestales tienen efectos importantes en el balance global de carbono (Dixon *et al.*, 1994; Brown, 2002). La importancia de los bosques se debe a la biomasa que albergan, ya que es un sumidero de carbono. Al secuestrar el excedente de CO₂ de un modo temporal (biomasa) o permanente (suelo) y a las consecuencias que derivan de esta modificación climática en la estructura, salud y biodiversidad del sistema forestal (Vidal *et al.*, 2004 citado en Flores *et al.*, 2011). El IPCC (2007) menciona que las medidas de mitigación ante el cambio climático para reducir el CO₂ atmosférico por medio de los bosques son las técnicas de



reforestación, gestión de recursos maderables y el uso potencial del suelo aumentan la productividad de biomasa y la captura de carbono (cuadro 2). En México, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático realizó en el 2013 el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 – 2010, donde recopila las emisiones reportándolas en CO₂-eq y reporta como línea base de concentración de contaminantes los correspondientes a 1990. Al 2010 se reporta un incremento de 23.6 % en la concentración de CO₂, 59.8 % para CH₄, 32.1% para N₂O y 2, 307 % representado por HFC, PFC y SF₆.

Para el 2012 México aprueba la Ley General de Cambio Climático en la cual se menciona que el Gobierno, las dependencias y entidades de la administración pública se comprometen a reducir las emisiones de carbono con la ayuda de programas y prácticas en el área de energía, transporte y áreas verdes. En lo que nos compete en el presente trabajo, dicha ley menciona que promoverán, diseñarán y elaborarán políticas y acciones para mantener y aumentar los sumideros de carbono, frenando la deforestación y la degradación de los sistemas forestales, ampliando el área de cobertura vegetal, fomentar la agricultura sostenible, fortaleciendo los esquemas de manejo y restaurando los ecosistemas, mejorando las técnicas de cultivo, diseñando y estableciendo incentivos económicos para la absorción y conservación de carbono en las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y las zonas de conservación ecológica.



Cuadro 2. Mitigación de CO₂ con bosques, (tomado de IPCC, 2007).

Tecnologías y prácticas de mitigación	Tecnologías y prácticas de mitigación relevantes antes del 2030	Políticas, medidas e instrumentos probadamente efectivos para el medio ambiente	Limitaciones y oportunidades
Forestación; reforestación; gestión de bosques; reducción de la deforestación; gestión de productos de madera cultivados; utilización de productos forestales para la obtención de biocombustibles que sustituyan los combustibles de origen fósil.	Mejora de las especies de árboles para aumentar la productividad de biomasa y el secuestro de carbono; mejora de las tecnologías de teledetección para el análisis del potencial de secuestro de carbono en la vegetación/el suelo, y topografía de los cambios de uso de suelo.	Incentivos financieros (nacionales e internacionales) para incrementar la superficie forestal, para reducir la deforestación, y para mantener y gestionar los bosques; reglamentaciones sobre el uso de suelo ² , y observancia.	Falta de capital inversor y los problemas de tenencia de las tierras. Puede ayudar a atenuar la pobreza.

En el artículo segundo de los transitorios. “El país asume el objetivo indicativo o meta aspiracional de reducir un treinta por ciento de emisiones con respecto a la línea de base al año 2020; así como un cincuenta por ciento de reducción de emisiones al 2050 en relación con las emitidas en el año 2000...”(LGCC, 2016).

²Es el conjunto de disposiciones, actividades y aportes en relación con cierto tipo de cubierta terrestre (es decir, un conjunto de acciones humanas). Designa también los fines sociales y económicos que guían la gestión del suelo (por ejemplo, el pastoreo, la extracción de madera, o la conservación) (IPCC, 2000a).



II. ANTECEDENTES DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO

Previo al presente estudio la estimación de biomasa y carbono de la vegetación se comenzó a evaluar en sistemas forestales tropicales por Brown y Lugo (1984), en la década de 1980 y desde entonces varios autores han elaborado estimaciones, los cuadros 3 y 4 son una revisión de algunos. Las primeras ecuaciones se basaron en el volumen (Brown y Lugo, 1984; Brown, 1997 citado en Návar *et al.*, 2013), relacionando la estimación con la captura potencial del bosque tropical.

Cuadro 3. Antecedentes de la estimación de carbono en bosques conservados y naturales a nivel internacional.

Autor, año, lugar	Aportación
<p>Lugo y Brown (1992). E.U.A.</p>	<p>Reportaron que los bosques tropicales son fuentes de carbono debido al cambio de uso de suelo, al incremento de la deforestación y la quema de vegetación. Sin embargo con las medidas de manejo adecuadas del bosque, la biomasa y el carbono orgánico en el suelo aumentarán y en conjunto estos componentes tienen un potencial de secuestro de carbono en bosques conservados de 1.5 – 3.2 ³Pg C por año lo equivalente al 31 – 58 % del carbono producido por las emisiones de quema de combustible fósil de aquel entonces.</p>
<p>Fang <i>et al.</i> (2001). China</p>	<p>Compararon los cambios en el almacén de biomasa y carbono en los bosques de China de 1949 a 1998. Este almacén y su cobertura decrecieron de 1949 (5.06 Pg C; 102.34 × 10⁶ ha) a la década de 1980 (4.38 Pg C; 95.62 × 10⁶ ha) debido al cambio de usos de suelo y al aumento de la población causando erosión del suelo, desertificación generalizada, pérdida de biodiversidad e inundaciones catastróficas es por ello que en la década de 1970 el gobierno de China implementó proyectos de restauración ecológica y programas de conservación forestal para lo que la biomasa volvió a aumentar para 1998 (4.75 Pg C; 105.82 × 10⁶ ha) pero aún seguía siendo menor a la reportada en 1949.</p>
<p>Nadler <i>et al.</i> (2001). Chile</p>	<p>En el Simposio Internacional de Medición y Monitoreo de carbono en Ecosistemas Forestales en Valdivia, Chile se presentó un trabajo sobre la medición de carbono almacenado en los bosques de la Reserva de Malleco, Chile con un resultado de 9, 900 Mg de Carbono total para la reserva con 16 580.6 ha.</p>

³ 1 Pg = 10⁸ Mg = 1 Gt



Continuación cuadro 3

Pretzsch (2006).	Utilizó ecuaciones alométricas para describir el autoadelgazamiento del fuste de acuerdo a la edad basado en la geometría euclidiana y la teoría fractal de Enquist. Trabajó con cuatro especies (<i>Fagus sylvatica</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Pinus sylvestris</i> y <i>Quercus petraea</i>). Predijo que el uso de exponentes para ajustar el adelgazamiento y la mortalidad para cada especie pueden dar un mejor ajuste a este tipo de ecuaciones relacionando así procesos y estructura de los árboles. Tuvó estas ecuaciones como una herramienta para tener un diagnóstico de la dinámica del bosque con un muestreo simple.
Concha, Alegre y Pocomucha (2007). Perú	Evaluaron el carbono captado por sistemas agroforestales de <i>Theobroma cacao</i> asociado con diferentes especies frutales, maderables en Perú. El carbono de la biomasa aérea viva, osciló desde 12.09 Mg ha ⁻¹ hasta 35.5 Mg ha ⁻¹ . Los sistemas relacionados con café, guaba y papaya presentaron mayor cantidad de C.
Mena, Andrade y Navarro (2011). Costa Rica	Estimaron el carbono almacenado en sistemas agroforestales de café (<i>Coffea arabica</i>) - laurel (<i>Cordia alliodora</i>) y café - poró (<i>Erithryna poeppigiana</i>) contrastando con bosques secundarios ubicados en tres pisos altitudinales del Corredor Biológico Volcánica Central – Talamanca en Costa Rica. El promedio de carbono fue de 171.3 Mg ha ⁻¹ .
Peckham, Gower y Buongiorno (2012). E.U.A.	Evaluaron un balance en el sistema forestal entre el ciclo de carbono biológico (producción neta) y el industrial (emisiones netas de la industria forestal) e hicieron una protección a futuro del secuestro de carbono y como maximizar su captura por parte de los bosques. Utilizaron un programa para las proyecciones del cual obtuvieron un balance positivo de captura con respecto a la emisiones, con una fijación de 2.29 t C ha ⁻¹ año ⁻¹ y una emisión industria de 0.082 t C ha ⁻¹ año ⁻¹ lo que representó menos del 10 % de la tasa de fijación obtenida. Con una proyección de 100 años, la tasa aumentara un 22 % o bien a 0.33 t C ha ⁻¹ año ⁻¹ .
Cuenca et al. (2014). Ecuador	Estimaron biomasa y carbono con ecuaciones alométricas para un bosque de tierras bajas en la Amazonia Ecuatoriana. Trabajando con 9 grupos resultantes de la interacción de la densidad (< 500 kg m ³ , 500 – 700 kg m ³ y ≥ 700 kg m ³) y la morfología (< 3 m de altura en fuste comercial, ≥ 3 m de altura en fuste comercial y ≥ 7 m de altura en fuste comercial). Se correlaciono el área basal (m ² ha ⁻¹) y el volumen (m ³ ha ⁻¹) comercial para predecir la biomasa aérea (Mg ha ⁻¹) en el 95 % de los grupos. Determinaron un factor de expansión de biomasa de 2.03 con un total de 124.85 Mg ha ⁻¹ y 62.43 Mg ha ⁻¹ para carbono.

Para la determinación de biomasa existen métodos directos e indirectos. El método directo consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa del tronco, raíces, ramas y follaje (fig. 3) determinado después su peso seco (Brown, 1997; citado en

Návar *et al.*, 2013), obteniendo así la biomasa por componentes para después obtener la estimación a partir del fuste. Cabe mencionar que del cambio de diámetro entre las cinco rodajas obtenidas del troceo del árbol se obtiene el coeficiente mórfico del árbol y de la diferencia de biomasa en el fuste con los demás componentes el factor de expansión de biomasa.

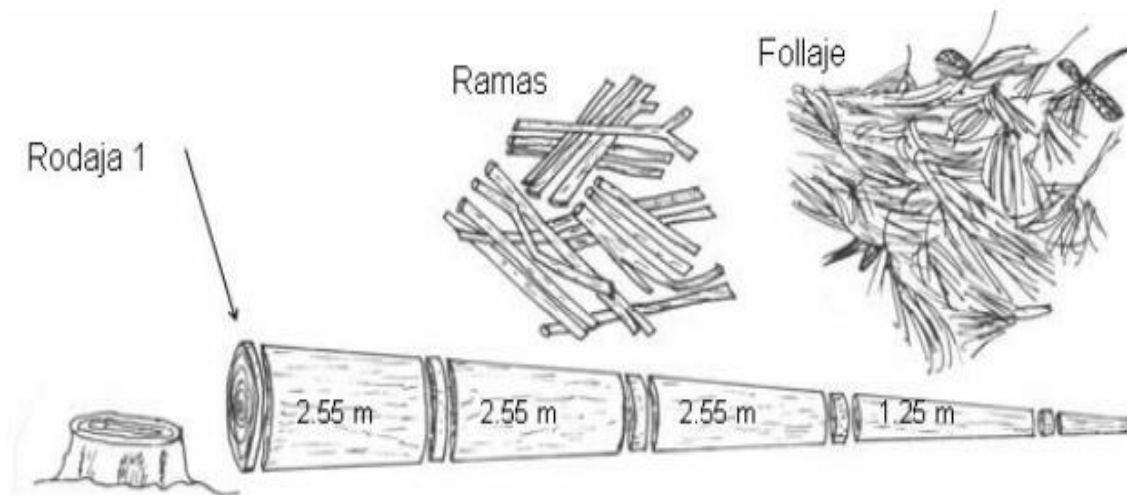


Figura 3. Troceo del arbolado, obtención de rodajas, muestras de ramas y follaje, (tomado de Díaz *et al.*, 2007).

Las estimaciones indirectas también se conocen como modelajes para realizar inferencias estadísticas (Carrillo *et al.*, 2014) y para realizarlas se necesitan funciones matemáticas o bien ecuaciones alométricas las cuales son una relación de algunas partes que constituyen a un individuo (Huxley, 1932 citado en Carrillo *et al.*, 2014). La estimación se realiza con las variables más accesibles como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura (h) o el radio de la copa.

Las relaciones alométricas han sido utilizadas en varias especies forestales de bosque natural de clima templado frío para determinar tanto la biomasa como el carbono (Carrillo *et al.*, 2014). Las ecuaciones son importantes porque permiten



evaluar la estructura y condición de un bosque, cuantificar su productividad, determinar la cantidad de carbono capturado y la tasa de fijación de CO₂, nos permite valorar el impacto de estos en la mitigación de los GEI (Méndez *et al.*, 2011).

Cuadro 4. Antecedentes de la estimación de biomasa y carbono en México.

Autor, año, lugar	Aportación
Rojas (2004). Tlaxcala	Estimo la biomasa y el carbono potencial para el bosque de <i>Pinus hartwegii</i> en el Parque Nacional de la Malinche, Tlaxcala. Con un valor promedio de 101 Mg C ha ⁻¹ realizó una proyección de captura potencial utilizando un volumen calculado y el Incremento Corriente Anual (ICA) para una estimación de los años 2008, 2013, 2018, 2023, 2028, 2043 y 2053; esta terminó hasta que la parcela tuvo una edad promedio de 100 años.
Díaz <i>et al.</i> (2007). Tlaxcala	Estimaron la biomasa y el carbono de <i>Pinus patula</i> Schl. <i>et</i> Cham desarrollando ecuaciones alométricas de un bosque de Tlaxcala. Con organismos con un DN entre 6.7 y 64.1 cm la ecuación para la biomasa es $B = 0.0357 DN^{2.616}$ y para la estimación de carbono es $C = 0.021 DN^{2.6451}$ ambas con una $r^2 = 0.98$, la concentración de C en <i>Pinus</i> es de 0.5031. Para árboles de 20 cm de DN la biomasa fue de 113 kg.
Méndez <i>et al.</i> (2011). Guanajuato	Desarrollaron ecuaciones alométricas para determinar la biomasa y carbono de <i>Pinus devoniana</i> Lindl y <i>Pinus pseudostrobus</i> Lind. en una plantación de 12 años en Gto. Desarrollaron 9 ecuaciones de acuerdo a los modelos propuestos por Gayoso y col. (2002; citado en Méndez <i>et al.</i> , 2011) para fuste, hojas, ramas y total teniendo así 54 modelos, concluyeron que la estimación de B es más certera cuando se conjuntan los valores del fuste con hojas y ramas. <i>Pinus pseudostrobus</i> tuvo un rendimiento 1.6 veces mayor al obtenido por <i>Pinus devoniana</i> . La proyección predice que la máxima productividad de biomasa aérea se alcanza a los 20 años de edad. A un DN de 20 cm <i>P. devoniana</i> reporta 59.9 kg y 81.2 kg en <i>P. pseudostrobus</i> para biomasa de fuste. El ICA máximo se alcanzó a los 9.8 años representando 5.83, 2.91 y 10.70 Mg ha ⁻¹ año ⁻¹ para B, C y CO ₂ eq y mientras que a los 20 años estos valores ascienden a 79.23, 36.61 y 145.40 Mg ha ⁻¹ .
Návar, Rodríguez y Domínguez (2013) Sinaloa	Realizaron una relación de las ecuaciones alométricas que se han desarrollado para árboles tropicales con los datos del inventario forestal de Sinaloa utilizando el teorema del límite central. Deducen que las ecuaciones convencionales solo tienen datos del DN que proporcionan proyecciones de la biomasa en función del diámetro siguiendo una ecuación potencial. La combinación de modelos para estimar la biomasa aumenta la predicción, sus resultados tiene un sesgo a la derecha de los datos o bien en los árboles con DN mayores debido a la falta de datos en el registro. De los modelos tuvieron estimaciones desde 25 – 260 Mg ha ⁻¹ para biomasa.



Continuación cuadro 4

Carrillo et al. (2014).	Generaron ecuaciones para determinar biomasa y carbono para <i>Pinus montezumae</i> y <i>Alnus jorullensis</i> H. B. K. <i>ssp. jorullensis</i> . El intervalo de DN de los organismos utilizados para la elaboración del modelo para pino es de 7.2 a 65.9 cm el porcentaje de biomasa en fuste fue de 77.07 %, ramas 8.45 % y follaje 9.01 % el modelo propuesto es $B = 0.013 DN^{3.0462}$ ($r^2 = 0.9909$) de donde se obtuvieron valores de 5.25 – 4, 485.98 kg por individuo, mientras que la ecuación de carbono es $C = 0.0065 DN^{3.0484}$ ($r^2 = 0.9914$). <i>Alnus</i> tuvo árboles con un DN de 7.5 a 49.5 cm, tuvo una biomasa en fuste de 63.77 %, en ramas 20.99 % y follaje 11.46 % el modelo propuesto para biomasa es $B = 0.0195 DN^{2.7519}$ ($r^2 = 0.9311$) con valores entre 6.37 – 1007.93 kg por individuo y la ecuación de carbono es $C = 0.009 DN^{2.7522}$ ($r^2 = 0.9313$).
--------------------------------	--

2.1 Bosques templados.

Galicia y Zarco (2014) reportan que los bosques templados cubren 10, 400, 000 km² de la superficie terrestre la cual equivale 25 % de la cobertura forestal total u 8 % en comparación con la superficie continental total, se estima que estos bosques almacenan 175 Pg C en biomasa aérea. En México los bosques templados se distribuyen en mayor grado en el norte y sur de Baja California, a lo largo de las Sierras Madre Occidental y Oriental, en el Eje Neovolcánico, la Sierra Norte de Oaxaca y en el sur de Chiapas, así como en distintas serranías y montañas aisladas en el Altiplano y entremezclados en las planicies tropicales (Challenger, 2008). Se desarrollan en altitudes entre 2, 000 y 3,400 m (Challenger, 2008); en zonas con temperaturas promedio entre 12 y 23 °C, aunque en invierno la temperatura puede llegar hasta por debajo de 0 °C, estos ecosistemas van de subhúmedos a templado húmedos, con una precipitación anual entre 600 y 1,000 mm. Crecen sobre suelos muy variados desde limosos a arenosos y moderadamente ácidos, por lo general con abundante materia orgánica y hojarasca (CONABIO, 2010). De manera general, se subdividen en clima



templado subhúmedo, que predominan en extensión, y clima templado húmedo. Los primeros se dividen en bosques de coníferas (pino, abeto u oyamel, ayarín, cedro y táscate), bosques de latifoliadas (donde los encinos son dominantes) y bosques mixtos de pino y encino, en distintas proporciones (Challenger, 2008).

Los bosques de clima templado húmedo son casi exclusivamente bosques mesófilos de montaña, aunque algunos bosques de oyamel pueden encontrarse en estas condiciones (Challenger, 2008). En conjunto, estos bosques ocupaban 43.96 millones de ha (INEGI 2003) y actualmente ocupan 16.45 % de la superficie (21.19 y 11.13 millones de ha en condición primaria y secundaria, respectivamente; INEGI, 2005; CONABIO, 2010). Estos ecosistemas aportan diferentes servicios, ya que retienen el agua de lluvia facilitando que se infiltre al subsuelo y se recarguen los mantos acuíferos, disminuyen la erosión al reducir la velocidad del agua y sujetar la tierra por lo que reducen el riesgo de inundaciones. En el proceso de fotosíntesis los árboles, como todas las plantas, capturan dióxido de carbono y devuelven oxígeno, ofrecen multitud de hábitats distintos para gran variedad de organismos, además proveen una variedad de productos siendo la madera importante para la economía (CONABIO, 2010; Buytaert *et al.*, 2011 citado en Galicia y Zarco, 2014).

El servicio que los bosques proveen como sumideros permite equilibrar la concentración de CO₂, el cual se incrementa debido a las emisiones producto de la actividad humana. La captura neta positiva depende del manejo que se le dé a la cobertura vegetal, de la edad, distribución de tamaños, y la composición de esta (Torres y Guevara, 2002). Además de obtener una remuneración por la provisión



de este servicio, la incorporación del Carbono al bosque ayuda a mitigar su efecto como GEI y disminuir su concentración en la atmósfera. Otro servicio relevante por parte de los bosques es su desempeño hidráulico, los bosques impiden el rápido escurrimiento del agua de lluvia precipitada, propiciando la infiltración de agua que alimenta los mantos acuíferos y la prolongación del ciclo del agua, además conserva los suelos y ayuda a mitigar los riesgos de desastres por inundaciones y derrumbes (Torres y Guevara, 2002).

Para el 2003 se calculaba que ~ 27 % de los bosques de coníferas y de encinos que ocupaban el país se perderían, en datos de la superficie de los bosques templados, el porcentaje de pérdida de los bosques corresponde al 26.45 % hasta el 2010. (CONABIO, 2010)

Los estados donde estos ecosistemas se encuentran más protegidos oficialmente son: el Distrito Federal, Chiapas, Querétaro, Hidalgo y Michoacán. En el marco legal el aprovechamiento forestal está regulado por la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable de México. Los bosques de México pueden ser extremadamente vulnerables al cambio climático (Villers y Trejo, 1998) y en 1997 representaban un almacén de carbono aproximado de 8 Gt C (Maser *et al.*, 1997), cantidad equivalente a las emisiones mundiales de CO₂ de aquella fecha. En 2016 Murray y colaboradores estiman un valor de 5, 431 ± 1, 319 Tg C para bosques perennes y 1, 385 ± 575 Tg C para bosques perennes de hoja acicular y un almacén total de 34, 506 ± 7, 483 Tg C para el país contemplado el almacén en toda la vegetación y el suelo. La capacidad de almacenamiento de carbono en estos bosques se está perdiendo rápidamente por los procesos de deforestación y



degradación de los ecosistemas forestales. De hecho, Murray *et al.* (2016) estiman que solo se captura el 11 % del carbono las emisiones de CO₂.

México se encuentra entre las regiones más vulnerables a los impactos asociados al cambio climático debido a sus condiciones bioclimáticas y socioeconómicas (Villers y Trejo, 1998; Ordóñez, 1998; Gay, 2000; Milenio, 2001; citado en Ordóñez y Maser, 2001). La deforestación mundial anual calculada por el IPCC en 1995 es de 17 millones de ha, lo equivalente al 20 % (1.8 Gt C) de las emisiones antrópicas totales.

2.2 Bosque de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. (oyamel).

A pesar de que no cubren grandes superficies del terreno, estos bosques sobresalen del conjunto de las comunidades conformadas por coníferas. Esto se debe a las particularidades ecológicas de las cuales son indicadoras (CONABIO, 2010). Desde el punto de vista económico, *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. (oyamel) es la especie más importante de la región (Manzanilla, 1974), ya que es la materia prima para la industria de la celulosa y del papel, y en menor proporción se utiliza como combustible, construcción o aserrar (CONABIO, 2010).

Los bosques de *Abies* tienen similitudes florísticas, faunísticas, fisonómicas y ecológicas con las grandes masas forestales que cubren las regiones septentrionales de Norteamérica y Eurasia (cuadro 5), conocidas también como “taiga”. Sin embargo, cabe destacar que al ponderar estas similitudes se pasan por alto características peculiares de las comunidades; entre las más relevantes las siguientes: en México el bosque de *Abies* prácticamente no interrumpe sus



actividades de fotosíntesis, absorción y transpiración en comparación con los bosques de Eurasia, si no que sufre una disminución de actividad en los períodos más fríos y más secos del año (CONABIO, 2010).

Cuadro 5. Comparación de los bosques de *Abies* de México y Eurasia, (tomado de CONABIO, 2010).

Bosque de <i>Abies</i> de México	Bosque de coníferas de Canadá, Norte de Europa y de Asia
Clima subisotérmico, sin estaciones fría y caliente bien diferenciadas. Con estación seca bien diferenciada. Temperatura media anual entre 7 – 15 (20) °C. Oscilaciones diurnas de la temperatura intensas. Insolación intensa. Largo del día poco variable en el transcurso del año.	Clima de estaciones fría y caliente bien diferenciadas. Generalmente sin estación seca. Temperatura media anual entre 2.5 – 6 °C. Oscilaciones diurnas de las temperaturas escasas o moderadas. Insolación relativamente baja. Largo del día muy variable en el transcurso del año.

La distribución geográfica de los bosques de *Abies* en México es dispersa y localizada. Los bosques de México están conformados por *Abies concolor* de la península de Baja California, *Abies durangensis*, en la parte norte del país, *Abies religiosa* en la parte central y *Abies guatemalensis*, en el sur, para lo que reportan una estimación de 3, 156.10 km² de superficie de este tipo de vegetación en el país (Madrigal *et al.*, 1971). Flores y Gerez (1994) estiman una expansión total en México del 0.16 %. Challenger (2008) menciona que el bosque de oyamel tiene 0.1254 millones de ha, lo que equivale a 0.06383 % de la superficie del país en vegetación primaria y 0.0169 millones de ha equivalente al 0.00859 % de la superficie del país para la vegetación secundaria, manteniendo el porcentaje estimado por Flores en 1994.

La mayor parte la comunidad se presenta en forma de manchones aislados y restringidos. Las áreas continuas de mayor extensión se presentan en serranías



que circundan las zonas montañosas de la Ciudad de México seguidas por el Eje Volcánico Transversal (Pico de Orizaba, el Cobre de Perote, el Nevado de Toluca, el Tancítaro, el Nevado de Colima entre otras) localizadas en los estados de Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, México, Guerrero y Tlaxcala (Martínez, 1963; Manzanilla, 1974).

En México esta vegetación tiene una distribución entre los 17° 30' y 21° 00' latitud Norte y 97° – 104° 00' longitud Oeste (Manzanilla, 1974). Está confinada a sitios de alta montaña 2, 400 – 3, 600 m snm (aquí se encuentra el 95 % de la superficie que ocupa) aunque su distribución altitudinal difiere de las condiciones locales encontrando su límite inferior a los 2, 100 m snm en el Volcán de Colima, Jalisco (exposición SO) y el mayor a los 3, 600 m snm en la Sierra del Ajusco, D.F. (Madrigal, 1967). Las mayores extensiones de *Abies* se han registrado para las serranías que circundan el Valle de México, las faldas de los volcanes con mayor altitud en el Eje Neovolcánico Transversal y algunas porciones de la sierra Madre del Sur (Rzedowski y Rzedowski, 1979). Esta comunidad se presenta en pendientes del 17 – 60 % climáticamente requieren de alta humedad (precipitación media anual de 1, 000 mm, en 100 o más días con lluvia apreciable) (Madrigal, 1967; Rzedowski y Rzedowski, 1979). La altura de la comunidad varía por lo general entre 20 y 40 m, aunque puede alcanzar hasta los 50 m (CONABIO, 2010). Las copas de los árboles presentan un contorno triangular que se ramifica desde niveles relativamente bajos (CONABIO, 2010). En condiciones naturales el bosque es denso y crea condiciones de penumbra a niveles inferiores donde el desarrollo del estrato herbáceo y arbustivo suele ser limitado (CONABIO, 2010).



Los bosques de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. tienen gran valor para la vida de la migración de la Mariposa Monarca, ya que ahí se realiza parte de su ciclo de vida, por lo cual el bosque fue declarado como Zona de Reserva y Refugio Silvestre en 1986 se declara como ANP y finalmente en el 2000 se declara Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (Correa *et al.*, 2007; CONABIO, 2010). Estos bosques han proporcionado madera para combustible, construcción y fabricación de muebles y utensilios; espacios para la siembra del maíz, y recreación (Correa *et al.*, 2007). Pero la sobreexplotación, la falta de planeación para recibir miles de turistas, la tala clandestina, falta de regulación del uso de los recursos y del crecimiento de la mancha urbana ejercen una fuerte presión en los bosques (Correa *et al.*, 2007).

De 1987 al 2007 esta reserva perdió 40 % de la cobertura forestal, y para el 2007 se reportaban 40, 000 ha de bosque de oyamel (Correa *et al.*, 2007). Los incendios forestales frecuentes, la ganadería extensiva, la contaminación atmosférica, el crecimiento de centros de población y la conversión de zonas boscosas a terrenos de cultivo de avena, papa, maíz o pastizales, causando estos la eliminación de esta vegetación (Flores y Gerez, 1994).

Los bosques de *Abies* resultan de gran importancia debido a que son bosques endémicos, entre las zonas en las que se distribuye está el Valle de México el cual toma importancia debido a que circunda la CDMX y la ZMCM, forma parte del ecosistema que recarga los mantos acuíferos que abastecen a la Ciudad, genera oxígeno y captura CO₂ y contaminantes atmosféricos. Con base a lo anterior, se ha estimado la concentración de C en los sistemas forestales



circundantes a la Ciudad (cuadro 6), los cuales son capaces de incorporar el elemento al ciclo.

Cuadro 6. Antecedentes de estimación de Carbono en *Abies religiosa*.

Autor, año, lugar	Aportación
<p>Avendaño (2006). Tlaxcala</p>	<p>Realizó una ecuación alométrica para la estimación de biomasa y carbono en función al Diámetro Normal (DN) basada en un método destructivo para un bosque en Tlaxcala. El DN de los datos se encuentra en un intervalo de 5.9 – 79 cm. $B = 0.0754 \text{ DN}^{2.513}$, con una $r^2 = 0.99$. $CC = 0.035 \text{ DN}^{2.513}$, con una $r^2 = 0.99$ y un factor de concentración de carbono de 0.4648</p>
<p>Rojas (2008). Parque Nacional La Malinche en Tlaxcala y Puebla.</p>	<p>Realizó la estimación de biomasa y su balance con el carbono en distintas especies entre ellas <i>Abies</i>. Evalúa diferentes altitudes a 3128 m snm obtiene una densidad de 191 árboles ha^{-1} y a 3 300 m snm 866 árboles ha^{-1}. Obtuvo el valor de densidad para la especie ($0.3874 \text{ g cm}^{-3} \pm 0.066$) por la cual la clasifica como una madera moderadamente liviana según la escala de Markwar y Meck. En cuanto a la estimación de biomasa de <i>Abies</i> es de 265.6 Mg ha^{-1}.</p>
<p>Flores (2010). Parque Nacional del Desierto de los Leones, CDMX y Cerro de Tláloc, Estado de México.</p>	<p>Cuantificó la biomasa y evalúa el impacto de la declinación en la productividad primaria neta de <i>Abies religiosa</i> en el Parque Nacional y el cerro Tláloc en el Estado de México. Obtuvo modelos para estimar biomasa en fuste con base al DN ($12 - 105.80 \text{ cm}$; $0.0173 \text{ DN}^{2.7459}$ con una $r^2 = 0.92$) donde obtuvo un modelo potencial y para ramas ($B = 1.5842 e^{0.044\text{DN}}$ con una $r^2 = 0.61$) y follaje ($B = 0.8413 e^{0.0398\text{DN}}$ con una $r^2 = 0.58$) en base al diámetro basal de las ramas ($1 - 120 \text{ mm}$). Estimando una captura de carbono total de $4,680 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.</p>
<p>Román (2012). Parque Nacional del Desierto de los Leones, CDMX.</p>	<p>Desarrollo ecuaciones alométricas relacionadas con el porcentaje de retención de la copa (salud), de las cuales el 40 % de los árboles retuvo el 50 % de cobertura de copa, el 35 % mantuvo el 25 % del follaje, un 27 % retuvo un 75 % de su copa y solo el 3 % mantuvo una 100 % de follaje. Comparando los valores de conservación de acuerdo a Manzanilla (1974) el bosque natural obtuvo un 3,017.91 kg de Carbono, un bosque virgen 1,783.67 kg y un bosque bajo explotación 1,330.15 kg.</p>
<p>Rodríguez (2013). Parque Nacional el Chico, Hidalgo.</p>	<p>Estimo la biomasa y el carbono almacenado en el Parque Nacional el Chico comparándolo con el carbono almacenado en los años anteriores. Obtuvo la biomasa por ecuaciones volumétricas y una ecuación en función al DN de los árboles. La mayoría de los árboles de este estudio se encuentran en las primeras etapas de vida por lo cual el modelo genera un sesgo al estimar valores para DN mayores a 75 cm. Ecuación para biomasa; $B = 3.1661 \times 10^{-5} \text{ DN}^{2.62221}$, $r^2 = 1$ Ecuación para carbono; $1.8933 \times 10^{-5} \text{ DN}^{2.2221}$, $r^2 = 1$</p>



2.3 Servicios ecosistémicos.

Se entiende por servicio a todo aquel componente (biótico, abiótico y sus interacciones), condición y proceso a través de los cuales los ecosistemas naturales se obtienen productos para consumo directo, que sea disfrutado o que contribuya al bienestar humano (Torres y Guevara, 2002; Balvanera y Cotler, 2007). El interés por entender los servicios ecosistémicos y el desarrollo de mecanismos que aseguren su mantenimiento se ha incrementado en los últimos 25 años, estos estudios sobre los servicios se puede agrupar en cuatro enfoques (Balvanera y Cotler, 2007):

1. Marcos conceptuales y metodológicos inter y transdisciplinarios.
2. Análisis de los distintos servicios que provee un ecosistema o un componente particular del mismo.
3. Valoración económica.
4. Análisis de experiencias concretas conducentes a modificar los patrones actuales de toma de decisiones que permitan maximizar el mantenimiento de los servicios.

El programa The Economics of Ecosystem and Biodiversity (TEEB) propuso una clasificación de los servicios basada en la distinción entre procesos ecosistémicos, procesos ecosistémicos benéficos y servicios ecosistémicos benéficos; esta separación evita el riesgo de duplicar el conteo del servicio como ocurre en otras clasificaciones (Galicia y Zarco, 2014). A pesar de los estudios de estos servicios a nivel general se reconocen cuatro categorías de servicios ambientales: hidrológicos, de conservación de la biodiversidad, de belleza escénica, y captura y almacenamiento de carbono. El monto que se paga depende



del lugar geográfico y el tipo de emisión, ya que el costo varía dependiendo del proceso industrial al que se encuentra asociada. (Ordoñez, 2007).

En México los bosques templados constituyen un activo natural que proveen servicios a nivel nacional, estos servicios son reconocidos legalmente y forman parte de la estrategia nacional en los programas de protección y mejora de estos ecosistemas; en el año 2003 se estableció un pago de \$400.00 M/N por hectárea y 300, para bosques mesófilos y de montaña, y selvas y otros bosques respectivamente (DOF; 3 octubre 2003). El IPCC (2007) menciona que el incentivo económico por el cuidado y mantenimiento de los bosques podría ayudar para conseguir la meta inclusive el buen manejo podría reducir la pobreza.

El concepto de servicios ambientales forestales busca reconocer los servicios asociados al bosque (provisión de agua en cantidad y calidad, generación de oxígeno, recreación, protección de la biodiversidad y de suelos, entre otros), y retribuir al que garantiza su conservación y desarrollo. En México se coordinan y financian por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (Ordoñez, 2007), el programa de PSA reconoce servicios hidrológicos, almacén de carbono y hábitat (SEMARNAT, 2011).

La CONAFOR (2015), evalúa los servicios de acuerdo al ecosistema definiendo los Servicios Ambientales del Bosque (SAB) que son los beneficios que la gente recibe de los diferentes ecosistemas forestales, ya sea de manera natural o por medio de su manejo sustentable, ya sea a nivel local, regional o global.

Los servicios ambientales del bosque, son:

- Captación y filtración de agua;



- Mitigación de los efectos del cambio climático;
- Generación de oxígeno y asimilación de diversos contaminantes;
- Protección de la biodiversidad
- Retención de suelo;
- Refugio de fauna silvestre;
- Belleza escénica, entre otros.

Los SA se pagan a los propietarios que realizan proyectos de reforestación, manejo, y /o protección del bosque. (Ordoñez, 2007). Siendo la provisión de madera es el principal servicio ecosistémico que proveen los bosques templados de México y forma parte del 93 % (\$ 1, 336 millones) de todo el valor de la silvicultura en los bosques templados de México (SEMARNAT, 2011).

2.4 Suelo de Conservación.

En la actualidad se ha vuelto imprescindible contar con áreas verdes con vegetación saludable que garanticen la sustentabilidad en las zonas urbanas, rebasando con ello el concepto de que la vegetación urbana cumplía solo con funciones de estética. Cada árbol en la ciudad representa un invaluable beneficio para la sociedad en su conjunto al brindarnos enormes beneficios ambientales como la regulación del clima, la captación de carbono, mantener la humedad del aire, atenuar el ruido y capturar el polvo, además de ser hábitat para aves residentes y migratorias (PAOT, 2010a). Estas áreas juegan un papel social indispensable, ya que repercute de manera directa en el estado de ánimo de los



habitantes de la ciudad. Ya que la vegetación brinda una sensación de tranquilidad, disminuye el estrés y repercute positivamente en la salud de la gente.

Además es indispensable llevar a cabo el saneamiento y renovación del arbolado urbano ya que por estar dentro de la ciudad se encuentra expuesto a condiciones más agresivas (PAOT, 2010a).

En las últimas décadas resulta claro que las zonas de vegetación natural que rodean a la mancha urbana, han ido disminuyendo de manera consistente y alarmante, debido al incremento de la urbanización. Las zonas naturales colindantes a la ciudad que se encuentran aún con la demarcación de la CDMX (bosques, matorrales, pastizales, humedales y zonas agrícolas), y a partir de 1966 se catalogaron como Suelo de Conservación por ser ecosistemas aportadores de servicios ambientales para la población: elevando la calidad de vida, zonas de recreación y esparcimiento, papel en el ciclo hidrológicos con la infiltración, amortiguación de vientos con el dosel de la vegetación, humedad y frescura en el entorno debido a la sombra que general (Sorensen *et al.*, 1998). Para el 2010 la CDMX ocupaba una extensión aproximada de 149, 830 ha de territorio, lo cual representa 0.1 % de la superficie total del país; 61, 179 ha son áreas urbanas y el resto 88, 652 ha (59.2 %) corresponden a la zona rural. Por lo que se puede dividir en dos áreas básicas en función de los usos de suelo: Área de Desarrollo Urbano (ADU) y Suelo de Conservación (SC), este último se divide en: 38, 252 ha de bosques, 500 ha de matorrales y 28, 599 ha de uso agrícola (PAOT, 2010a).

El 9.3 % del suelo de conservación corresponde a Áreas Naturales Protegidas (ANP). Estas se dividen en cuatro categorías: Zona Sujeta a



Conservación Ecológica, Parque Nacional, Zona Protectora Forestal y Corredor Biológico (GDF, 2003).

Según el cálculo realizado para el Programa General de Ordenamiento Ecológico, el suelo de conservación de la CDMX tiene una extensión de 877 km². Este territorio se distribuye en 9 delegaciones: Álvaro Obregón (20 km²), Cuajimalpa (58 km²), Gustavo A. Madero (13 km²), Iztapalapa (11 km²), Magdalena Contreras (62 km²), Milpa Alta (283 km²), Tláhuac (66 km²), Tlalpan (260 km²) y Xochimilco (104 km²). Con lo anterior podemos decir que la mayor proporción (93 %) del suelo de conservación se ubica en las serranías que delimitan al Valle de México: hacia el sur, La Sierra Chichinautzin y la Sierra del Ajusco; hacia el suroeste, la Sierra de las Cruces y al norte, la Sierra de Guadalupe. El resto (7 %) se incluye dentro del área lacustre de Xochimilco y Tláhuac. Este territorio proporciona refugio a más de 2, 500 especies de flora y fauna inmersas en una extensa gama de ecosistemas, el cual es el hábitat del 2 % de la biodiversidad mundial y del 12 % de especies de flora y fauna de México (PAOT, 2010a).

La importancia de este territorio y de sus recursos naturales se basa en consideraciones de tipo ambiental, biológico y socio – económico, al contar con extensiones significativas donde los recursos naturales ofrecen un servicio vital a los habitantes de la ciudad. El suelo de conservación alberga vegetación natural que constituye la reserva de la flora y fauna en esta región y representa una fuente importante de bienes y servicios ambientales, como la diversidad de productos utilizados por los pueblos y comunidades rurales locales y su potencial para



desarrollar actividades productivas sustentables, recarga de mantos acuíferos, etc. (Pozos y Lee, 2015).

Cualquier acción o proyecto que se pretenda desarrollar en estas áreas deberá contar necesariamente con la participación y aprobación de los ejidatarios y comunitarios. De acuerdo al Diagnóstico del Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal (2002 - 2003) la vegetación natural dentro del suelo de conservación se compone de bosque de oyamel, bosque de encino, bosque de pino, matorral xerófilo y pastizal. Algunas comunidades de vertebrados que se encuentran en las zonas más alejadas y menos perturbadas (PAOT, 2010a).

Las principales amenazas a la calidad ambiental y que generan impactos adversos en el SC están asociadas al cambio de la cobertura del suelo por el crecimiento urbano, la agricultura, y la transformación de la vegetación natural (extracción de materiales como roca o suelo para construcción) y el avance de la deforestación o tala ilegal (GDF, 2003). Se estima que las áreas deforestadas equivalen al 7 % de la extensión del SC y se concentra principalmente en las Delegaciones Álvaro Obregón, Cuajimalpa y La Magdalena Contreras (GDF, 2003), cabe mencionar que en estas Delegaciones se encuentran las áreas de recarga del acuífero más importante de la CDMX (FUNDLOCAL, 2007). Para el 2009 Aguilar (citado en Ávila, 2012) señala que para el período de 1995 – 2005 la tasa de deforestación en SC fue de 239 ha año⁻¹ y la de urbanización de 25, 889 ha año⁻¹.



III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falta de registros de captura de carbono en los relictos de bosque de oyamel-pino pertenecientes al suelo de conservación de la CDMX, podrían orientar a los propietarios para manejar sus bosques con base a la conservación y aprovechamiento sostenible sin necesidad de propiciar un cambio de uso de suelo.

Existen diferentes métodos de estimación de carbono recomendados por la PAOT (2010a) y FAO (2012) para bosques naturales y de producción maderera. En la literatura existe poca información sobre la captura y almacén de carbono en sistemas boscosos cercanos a la ciudad, pero están sujetas a cambios, por ejemplo, atmósfera enrarecida, cambio en el régimen de lluvias, radiación y temperaturas, que influye en el contenido de carbono, por ello, los árboles responden al efecto y para una mejor estimación se requiere del cálculo de carbono. De ahí la importancia del presente estudio es reafirmar el servicio ambiental y encontrar un modelo que se ajuste mejor a la zona de interés. Algunos estudios han estimado el contenido de carbono de oyamel por hectárea para el suelo de conservación de la CDMX, el cual oscila entre 83.97 y 102.85 Mg (PAOT, 2010a). Sin embargo, en el Parque Ejidal San Nicolás Totolapan (Ajusco medio) algunos ejidatarios han vendido ilegalmente sus parcelas y en el terreno se han construido casas, lo cual tiene profundas repercusiones en el almacenamiento de carbono. El PSA sería la opción para reconocer oficialmente los servicios por captura carbono, hidrología y hábitat para esta comunidad, que les permita mejorar sus ingresos y la conservación de la vegetación. Los bosques mitigan el



cambio climático por lo que aumentar el uso potencial del suelo con técnicas de reforestación y gestión de los recursos maderables es una opción viable.

El incentivo económico por el cuidado y mantenimiento de los bosques a través del PSA podría ayudar para conseguir la meta inclusive el buen manejo podría reducir la pobreza (IPCC, 2007). Para la mitigación del cambio climático es benéfico fomentar el manejo adecuado de los bosques y proveer de herramientas a los que trabajan en ellos. Este trabajo pretende dar una herramienta que calcule la biomasa y el carbono almacenado por el parque ejidal con el fin de obtener el pago por servicios ambientales adecuado a las condiciones del bosque, ya que debido a la falta de información los ejidatarios no tienen noción del valor del bosque y el apoyo por parte del programa de Pago por Servicios Ambientales.



IV. OBJETIVOS

General.

Describir la estructura del bosque y las características dasométricas de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. para estimar el contenido de biomasa y carbono de los árboles del Parque Ejidal San Nicolás Totolapan.

Particulares.

- (1) Describir la estructura del bosque de *A. religiosa*.
- (2) Determinar la biomasa y el almacenamiento de Carbono del bosque de *A. religiosa* utilizando ecuaciones alométricas.
- (3) Elegir el coeficiente mórfico de *A. religiosa* y el contenido de carbono que mejor se ajusten para la estimación del almacén de carbono.
- (4) Caracterizar el estado de los servicios ecosistémicos (almacén de carbono) del bosque de *A. religiosa*.



V. MÉTODO

5.1 Zona de estudio.

El ejido de San Nicolás Totolapan (fig. 4), ubicado al suroeste de la CDMX y la zona boscosa del sur de la Cuenca de México, que a su vez pertenece a la región central del Eje Neovolcánico Transversal y de la zona de transición entre las dos regiones biogeográficas de América: Neoártica y Neotropical.

En 1998 se inaugura el Parque Ejidal San Nicolás Totolapan, el primer proyecto social de ecoturismo desarrollado en el suelo de conservación del Distrito Federal. Con una extensión de aproximadamente 1900 ha de bosque templado, en el año 2006 1,984.70 ha del ejido son decretadas como ANP (anexo 1), con la categoría de Reserva Ecológica Comunitaria (Publicado en la Gaceta Oficial del DF el 27 de noviembre de 2006). El ejido hoy en día cuenta con una superficie de 2,303 ha que pertenecen a las Delegaciones de Tlalpan y La Magdalena Contreras, la propiedad consta de 336 ejidatarios. El bosque proveía económicamente a los ejidatarios por el aprovechamiento maderable para la papelera Loreto y Peña Pobre, pero debido a la veda forestal decidieron darle un uso sustentable creando una Unidad de Manejo Ambiental (UMA) de venado cola blanca (Ávila, 2012).

Los bosques templados del ejido tienen una extensión aproximada de 1,900 ha (Ávila, 2012) y se localizan en un rango altitudinal que va de los 2,700 m snm los 3,740 m snm. El paisaje lo dominan formaciones montañosas con laderas escarpadas y cañadas con una orientación dominante hacia el norte lo cual ha favorecido el desarrollo de bosques de coníferas principalmente de oyamel. El



clima de la región es templado con temperaturas que oscilan entre los 5 y 18 °C, con lluvias en verano.

Flora

La vegetación dominante en el ejido San Nicolás Totolapan corresponde encinares, bosques mixtos, pinares y principalmente oyameles, los cuales son la vegetación emblemática del parque. Estos son bosques de clima templado frío entre los que se definen tres comunidades principales *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa*, bosque mixto y de encinos *Quercus spp.* El bosque de *Pinus hartwegii*, se caracteriza por ser monoespecífico y abierto, en tanto que el bosque de *Abies religiosa*, es denso, localizado en la parte media de la cuenca y el cual cubre alrededor de 50 % de la superficie total de la misma. El bosque mixto y de *Quercus* se localiza en la parte más baja de la cuenca cercana a asentamientos humanos. Se ha registrado un total de 87 familias con 250 géneros y 486 especies en la lista florística. Las familias más importantes en cuanto al número de especies fueron: Asteraceae 21 %, Poaceae 4.9 %, Lamiaceae 4.7 %, Caryophyllaceae 4.3 %, Rosaceae 3.7 % y Brassicaceae 3.5 %.



Figura 4. Mapa del Parque ejidal San Nicolás Totolapan. (Izq. Tomado de PAOT, 2009)



Fauna

La fauna silvestre de los bosques del Ejido de San Nicolás Totolapan se caracteriza por ser rica en especies, es representada por mamíferos medianos y pequeños roedores como ratas de campo (*Rattus norvegicus*), liebres (*Lepus spp.*), tejón (*Nasua narica*), tlacuache (*Didelphis marsupialis*), víbora de cascabel (*Crotalus spp.*), coyote (*Canis latrans*) y tuza (*Geomys bursarius*), destacando el conejo montés (*Sylvilagus cunicularius*), el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), mapache (*Procyon lotor*) y el gato montés o lince (*Felis silvestris*) por mencionar algunos además de la gran variedad de roedores pequeños (PAOT, 2009).

Se presentan anfibios y reptiles como las salamandras (orden Caudata) el falso escorpión (*Barisia ciliaris*) y el camaleón carnudo (*Phrynosoma spp.*). Es extraordinaria la diversidad de aves que existen en estos bosques tanto como residentes como migratorias, así como endémicas de México, tales como el búho carnudo (*Bubo virginianus*), la gallina de monte (*Tinamus major*), el cuervo (*Corvus corax*), entre muchas otras. (PAOT, 2009).

El aprovechamiento forestal es inexistente debido a la veda forestal de 1947 que impide que las comunidades hagan uso de los recursos forestales. Los propietarios de los terrenos sólo pueden obtener ingresos legalmente por la extracción de tierra ($\$ 650 \text{ m}^{-3}$) y otros productos no maderables, así como eventualmente por el aprovechamiento de árboles retirados en saneamientos o actividades de ecoturismo (Imaz, Camacho y Ruíz, 2011; citado en Ávila, 2012). Esto ha obligado a los ejidatarios a abandonar sus tierras buscando otras fuentes



de trabajo o vender ilegalmente parte de sus parcelas para viviendas. Vieyra (2009) demostró que del 2000 al 2003 en Magdalena Contreras se perdió el Suelo de Conservación a una tasa anual de 1.8 %.

Los servicios ambientales son una opción viable para beneficiarse del ejido. Se consideran como bienes y servicios ambientales; la recarga de acuíferos, la captación de partículas suspendidas, la producción de oxígeno y la captura de carbono, la regulación climática y microclimática, la mitigación de la contaminación auditiva, la retención de suelo fértil, así como su función como espacios de esparcimiento turísticos y culturales (Pozos y Lee, 2015).

5.2 Diseño de muestreo.

Se seleccionaron 13 parcelas monoespecíficas de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. de 25 × 25 m (fig. 5b), y se ubicaron en una distancia de 200 m entre cada una (para mantener la heterogeneidad de la muestra). Todas las parcelas tenían árboles de todas las etapas de desarrollo (fig. 5a y 6).

En cada parcela se realizó registro de las medidas de diámetro normal (DN) y de altura (h), descartando los valores de circunferencia < 5 cm y una altura < 1.3 m (formato anexo 2, fig. 5d) por imprecisiones en la estimación de la biomasa. El DN se registró con una cinta métrica y la altura con el software de DESKIS (2016; anexo 3) aplicación para celular “Medir altura” la cual se basa en funciones trigonométricas. Estas variables son necesarias para obtener el cálculo de la biomasa y carbono. Para complementar la información de biomasa y carbono se extrajeron muestras de dos virutas por árbol con un taladro Pressler (44 mm / 16”;



fig. 5c y 5e) por parcela, en el orificio resultante del árbol se colocaron taquetes de madera previamente remojados en formol (10 % V / V) con el fin de evitar la entrada de patógenos al árbol, posterior a la extracción se midieron la albura y el duramen de las virutas (fig. 5f) para su traslado las cuales fueron guardadas posteriormente en popotes de plástico. Con ello se obtuvo la edad del bosque y una porción de la madera extraída fue para los registros de carbono en el Laboratorio de Edafología Ambiental (LEA) del Instituto de Geología, UNAM.

5.3 Estimación de la biomasa.

Se obtuvieron clases diamétricas con el modelo de Manzanilla (1974), porque él determinó la estructura del bosque (natural, explotación virgen) verificando la toma de datos de las cuatro etapas de desarrollo para la elaboración del modelo, elaborándose las categorías de acuerdo a los datos.

Con los datos registrados en campo (DN y altura fustal) se utilizaron ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa. Estas ecuaciones se corrigieron con el valor del coeficiente mórfico forestal más adecuado para la especie. La cual se obtiene de la relación existente entre el volumen de un árbol y de un cilindro que tiene como base el área transversal del árbol a la altura del DN y la altura correspondiente del árbol (Caballero, 1982; en Rojas, 2004). Con el DN se utilizaron las siguientes fórmulas de las cuales se obtendrá el área del DN, el volumen, biomasa y carbono.

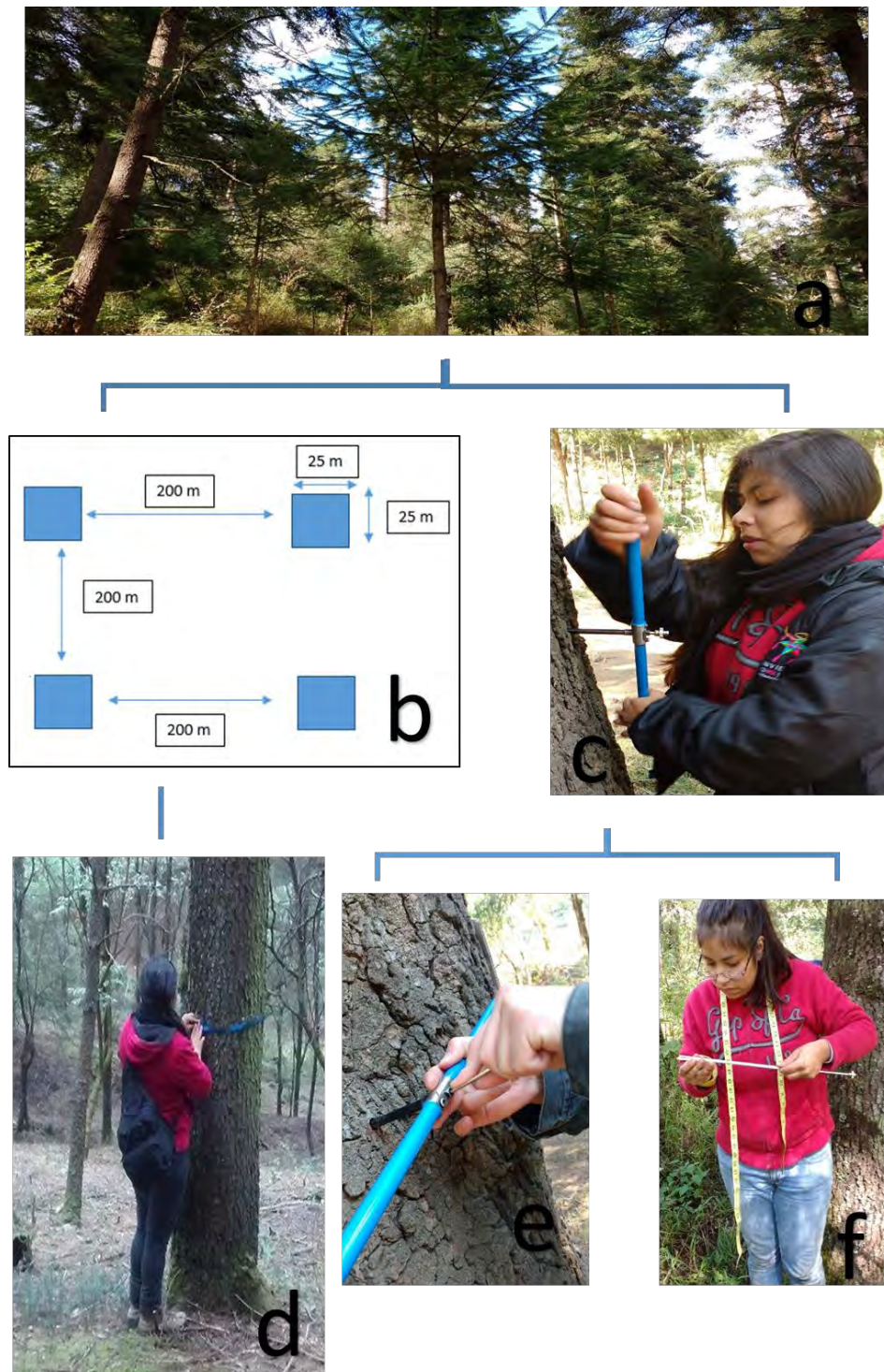




Figura 6. Bosque de oyamel.

Se utilizó la ecuación para el área basal (siguiente fórmula), para obtener el área del DN:

$$AB = \pi \left(\frac{DN^2}{4} \right) \quad (1)$$

Dónde: AB = área basal (m²); DN = diámetro normal (m); $\pi = 3.1416$

Para el volumen se utilizó el DN y la altura. Con la siguiente fórmula propuesta por Grijpma (1982):

$$V = (AB)(h)(CM) \quad (2)$$

Dónde: V= Volumen (m³); AB = área basal (m²); h = altura (m); CM = coeficiente mórfico forestal (0.5424) reportado por Ramírez (1988).



La biomasa aérea total se calcula con el volumen del árbol y la densidad de la madera de acuerdo a la fórmula propuesta por Brown y Lugo (1984).

$$B = (V)(\vartheta) \quad (3)$$

Dónde: B = biomasa (g); V = volumen (m³); ϑ = densidad (g m⁻³). La densidad que se utilizara será la reportada por Rojas (2008) 0.3874 g cm⁻³.

También se determinó la densidad de la madera en el laboratorio por el método del desplazamiento de agua.

Con las ecuaciones anteriores y las variables de campo se obtuvieron los datos de estructura del bosque, las variables se relacionaron con la altura. También se determinó el índice de esbeltez reportado por Manzanilla (1974).

El contenido de carbono por individuo se obtuvo de la multiplicación del valor de la biomasa, el factor de contenido de carbono promedio (este se obtendrá para la especie en el sitio con muestras compuestas de cada una de las categorías diamétricas) y el factor de expansión de biomasa (es la relación que existe en las ramas y hojas con respecto al fuste; 1.1) propuesto para coníferas (PAOT, 2010a).

$$CC = (B)(1.1)(C) \quad (4)$$

Dónde: CC = contenido de carbono (g); B = biomasa (g); 1.1 = factor de expansión de biomasa; C = proporción de carbono por categoría, Avendaño (2006) reporta un valor de 0.46 para la misma especie.



5.4 Modelos de ecuaciones alométricas.

Con los datos de biomasa y contenido de carbono se desarrolló un modelo para estimar la biomasa y el carbono de acuerdo al DN para la especie *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. del Parque Ejidal de San Nicolás Totolapan, estos datos se trabajaron en Excel. Y se compararon con los modelos previamente desarrollados para la especie.

5.5 Edad del bosque.

Los núcleos se montaron en bastidores y se enlazaron para evitar que se doblasen con el calor, ya que se secaron a 105 °C por 48 horas. Después las muestras se montaron en otros bastidores de madera (de 40 cm de largo con un canal de 5 mm de ancho y 2.5 mm de profundidad), las virutas se orientaron dejando expuesta la cara transversal de las traqueidas que reflejaran la luz o se orientaron colocando las fibras traqueidales de forma vertical (fig. 7a), se fijaron con pegamento especial para la madera y fueron etiquetados. Una vez fijos las muestras se cortaron con una navaja de acero inoxidable hasta dejar una superficie plana (al ras del bastidor) las irregularidades del corte se quitaron con lijas para madera (300, 800, 1200) para facilitar la observación de los anillos (fig. 7b), posteriormente se colocó una hoja milimétrica como guía en el borde de cada bastidor, en el cual se marcaron los anillos verdaderos observados al estereoscopio. Para complementar la información las muestras también fueron escaneadas (Epson Expression 1680; fig. 7c) para marcar los anillos con el software WinDENDRO™ STD1600+ (2003; fig. 7d). Este software también nos



ayuda a cuantificar la edad de los árboles y medir el ancho de cada anillo lo que permite calcular el Incremento de las ganancias (IG) de los árboles. La normalización del crecimiento y la ganancia se calcularon con el método de Larsson (2017) .Los anillos de crecimiento del árbol fueron marcados del núcleo a la corteza.

5.6 Concentración de carbono.

Las virutas que se destinaron para la cuantificación de carbono también fueron secadas en la estufa a 105 °C por 48 horas, posteriormente fueron separadas por categorías para formar una muestra compuesta por categoría y fueron homogenizadas en un molino (fig. 8). Se prepararon 3 réplicas de cada muestra (3 g cada una) las cuales fueron tamizadas (# 40; 0.0165 mm) ya etiquetadas fueron enviadas al Laboratorio de Edafología Ambiental (LEA) del Instituto de Geología, UNAM para la determinación del contenido de carbono con un analizador de Carbono – Nitrógeno – Hidrógeno – Azufre (Perkin Elmer, 2400).

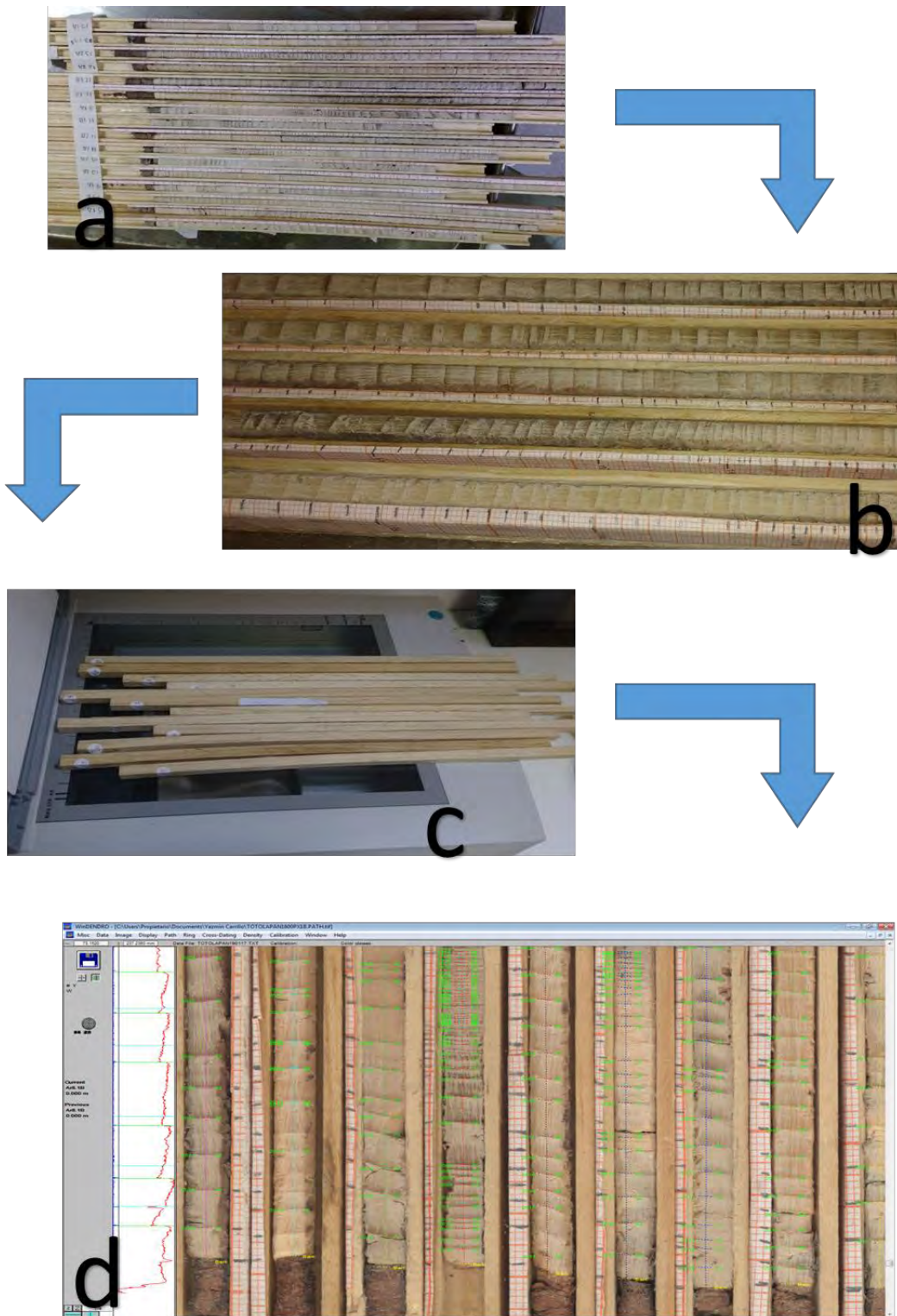


Figura 7. (a) Núcleos orientados, (b) núcleos lijados; los anillos se observan fácilmente, (c) virutas en el escáner Epson Expression 1680, software *WinDENDRO™ STD1600+* (d) imagen del path marcado con el WINDENDRO.

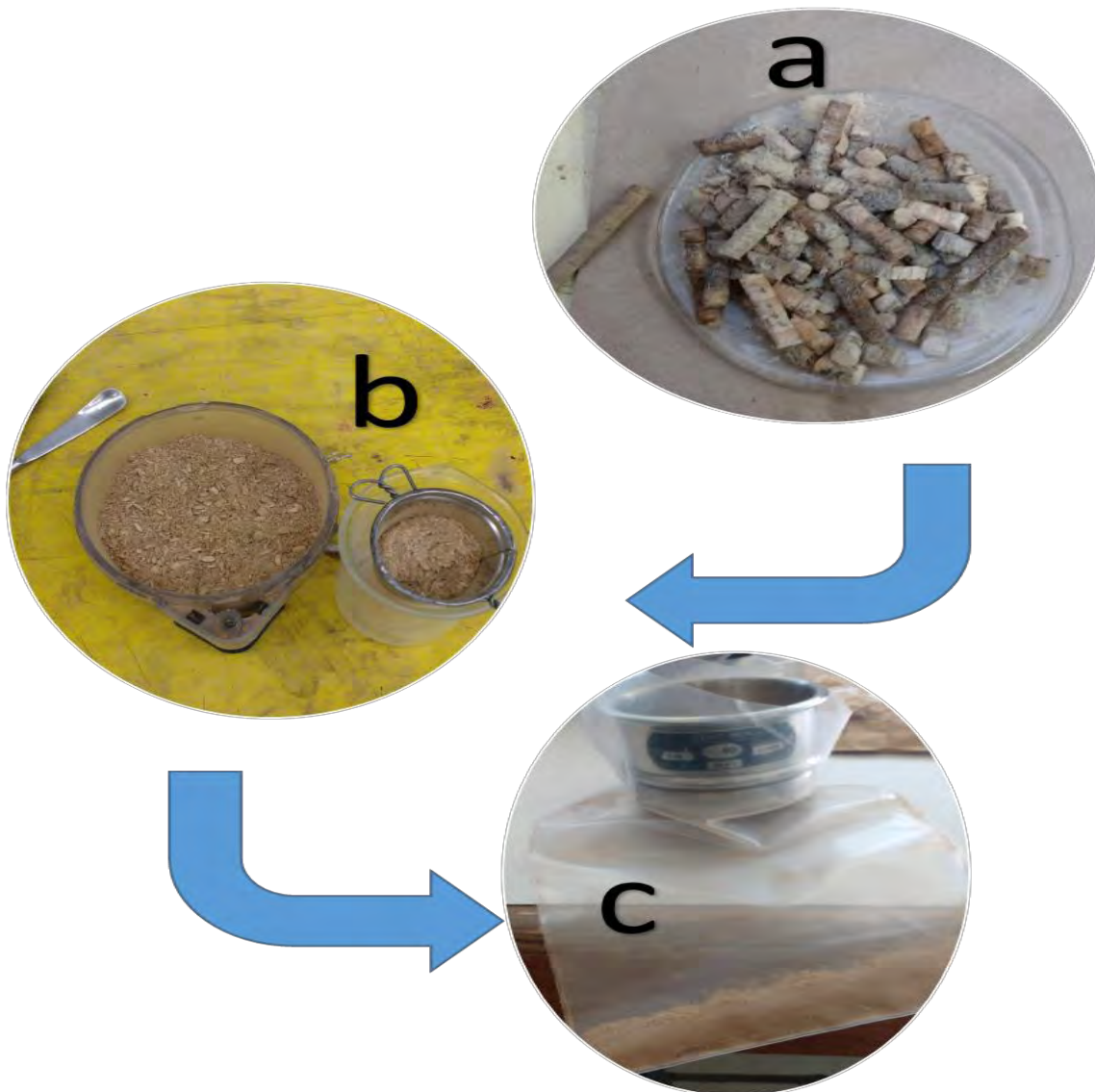


Figura 8. (a) Muestra compuesta por categoría, (b) muestra molida y (c) muestra de madera tamizada.

VI. RESULTADOS

6.1 Estructura del bosque.

El bosque tuvo una densidad promedio de $1,084 \pm 44$ árboles ha^{-1} con un intervalo entre $304 - 2,208$ árboles ha^{-1} . Esto se debe a que en algunas zonas se tienen brinzales de *Abies religiosa*, es decir, regeneración natural de la especie (fig. 9).



Figura 9. Retoños de *Abies religiosa*.

La estructura de la población se distribuye de la siguiente manera. El 60 % de los árboles se encuentran en la primera categoría diamétrica (0 – 9 cm) y solo un 10 % en las clases ≥ 60 cm. En la figura 10 se puede observar la distribución de la estructura confirmando el estado joven del bosque y el estado de regeneración.

Con respecto a la distribución por alturas, alrededor del 54 % de los árboles son ≤ 10 m, mientras que 37 % son > 15 m. Esto sugiere que la mayoría de los

árboles se encuentran en etapa juvenil (fig. 11). La distribución bimodal explica la presencia de las etapas de edad, las cuales en el tiempo se suman de una a la otra.

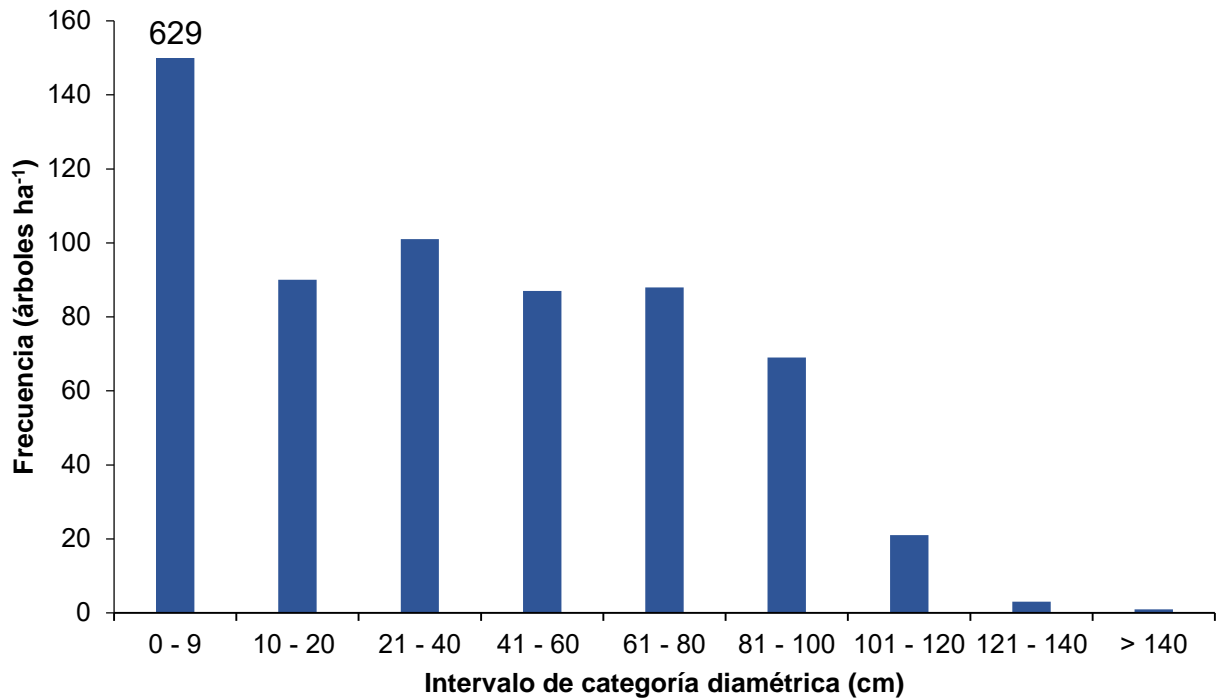


Figura 10. Estructura de diámetros normales del bosque de *Abies religiosa* de San Nicolás Totolapan propuestas por Manzanilla (1974).

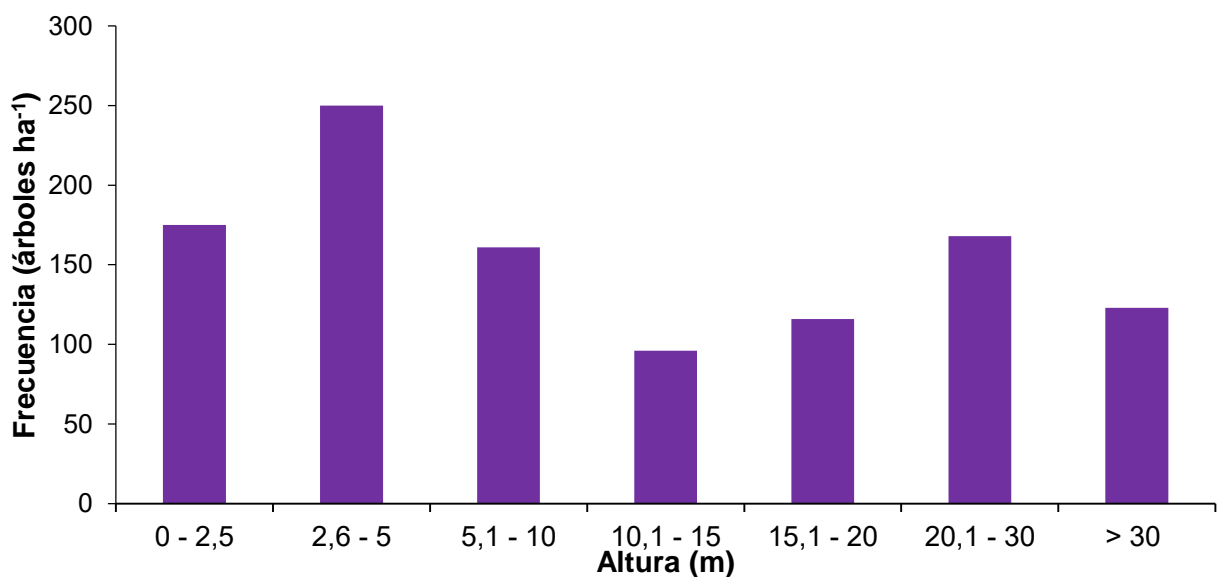


Figura 11. Distribución de la altura del bosque.

La distribución del área del DN del bosque tiene un 53 % de los datos acumulado en las primeras tres categorías ($> 0.005 \text{ m}^2$), después desciende a un 20 % en las siguientes tres ($0.005 - 0.1 \text{ m}^2$) y aumenta al 27 % restante ($< 0.1 \text{ m}^2$). En el intervalo con mayor frecuencia (26 %) se encontró en árboles con área del DN entre $0.001 - 0.005 \text{ m}^2$, el siguiente (17 %) de 0.1 a 0.5 m^2 y el intervalo con menor frecuencia fue el de $> 1 \text{ m}^2$ con un 0.7 % (fig. 12).

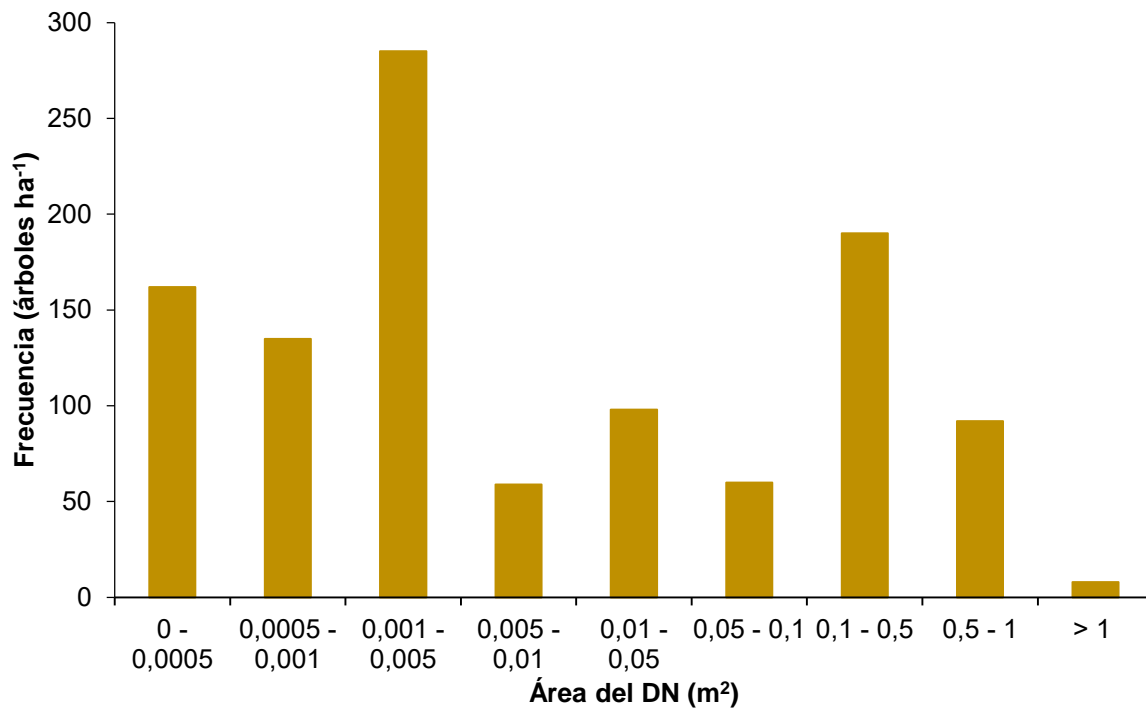


Figura 12. Distribución del área del DN del bosque.

En las relaciones que se elaboraron entre las variables tenemos que:

La altura tiene una relación positiva con el área del DN. La primera describe a la segunda con un ajuste de modelo potencial con una $r^2 = 0.8498$, mientras que para el lineal tiene un valor de $r^2 = 0.6151$. Para una misma altura se tiene un intervalo amplio para el área del DN, esto se debe a que a pesar de tener una



altura de 20 m un árbol podía tener un área del DN diferente (0 – 0.7 m²), esto es probable porque también tiene un diámetro variable (fig. 13). En sistemas forestales productivos el espaciamiento es cerrado para obtener la mayor producción posible, situación que provoca árboles delgados y altos, como se sabe anteriormente hubo un manejo forestal.

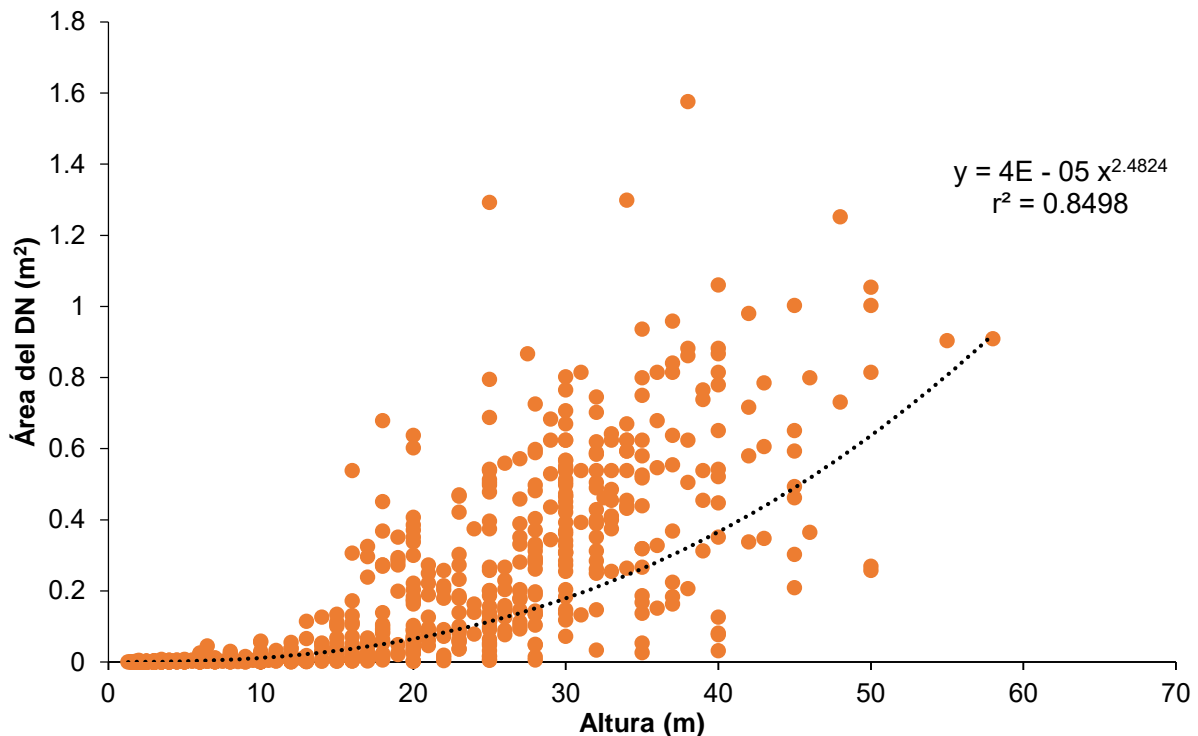


Figura 13. Relación entre las variables del área del DN y altura.

Lo anterior es un reflejo de la relación entre la altura y el DN (fig. 18), esta relación es positiva, al igual que el área del DN en esta relación nos señala que para una misma altura el intervalo de DN es amplio, por ejemplo, podemos ver que para una altura de 30 m el intervalo de DN se encuentra entre 0.2 – 1 m. El modelo lineal tiene una $r^2 = 0.7782$, pero el mejor ajuste lo tiene el modelo potencial con una $r^2 = 0.8498$ (fig. 14).

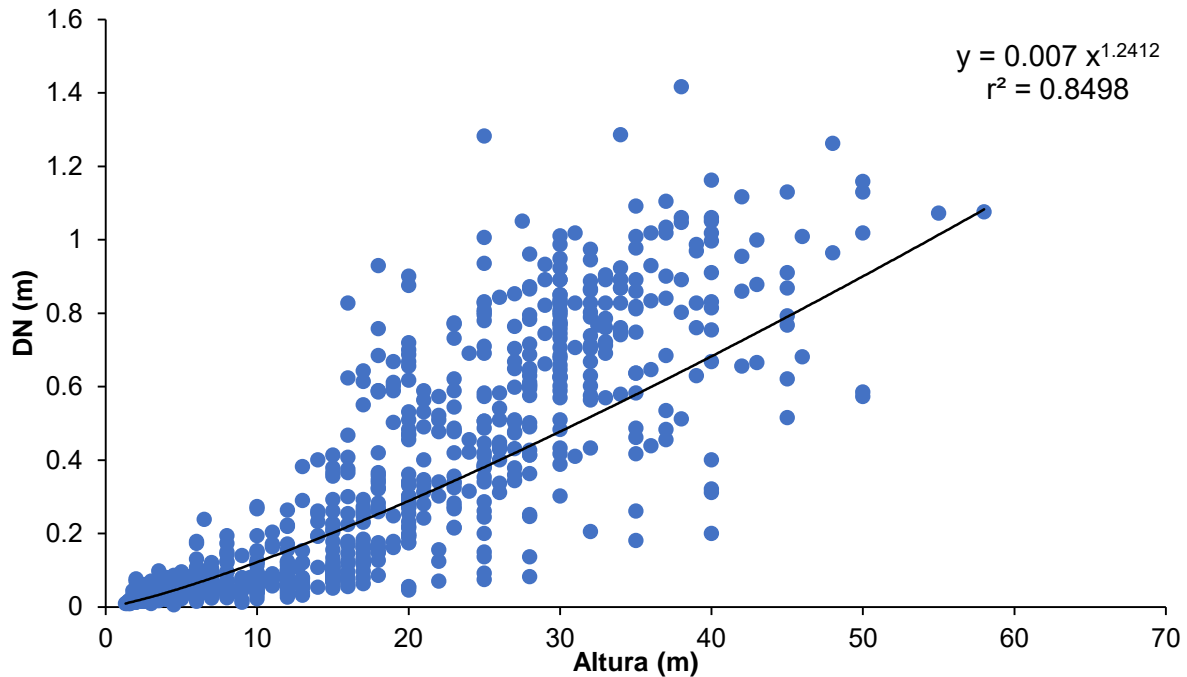


Figura 14. Relación entre las variables de diámetro normal y altura.

La relación entre el diámetro y la altura también se representa con el índice de esbeltez (fig. 15), es una medida que nos permite apreciar la intensidad de los sucesos dinámicos de los estratos arbóreos. Se puede observar que a un diámetro menor la esbeltez es mayor (98.84) y conforme el diámetro aumenta la esbeltez disminuye (19.33), esto describe un comportamiento exponencial negativo o bien un aumento en la robustez de los árboles, lo que indica que el bosque tiene un desarrollo proporcionado entre la altura y el DN por lo que no hay alteración de esta relación característica de la especie.

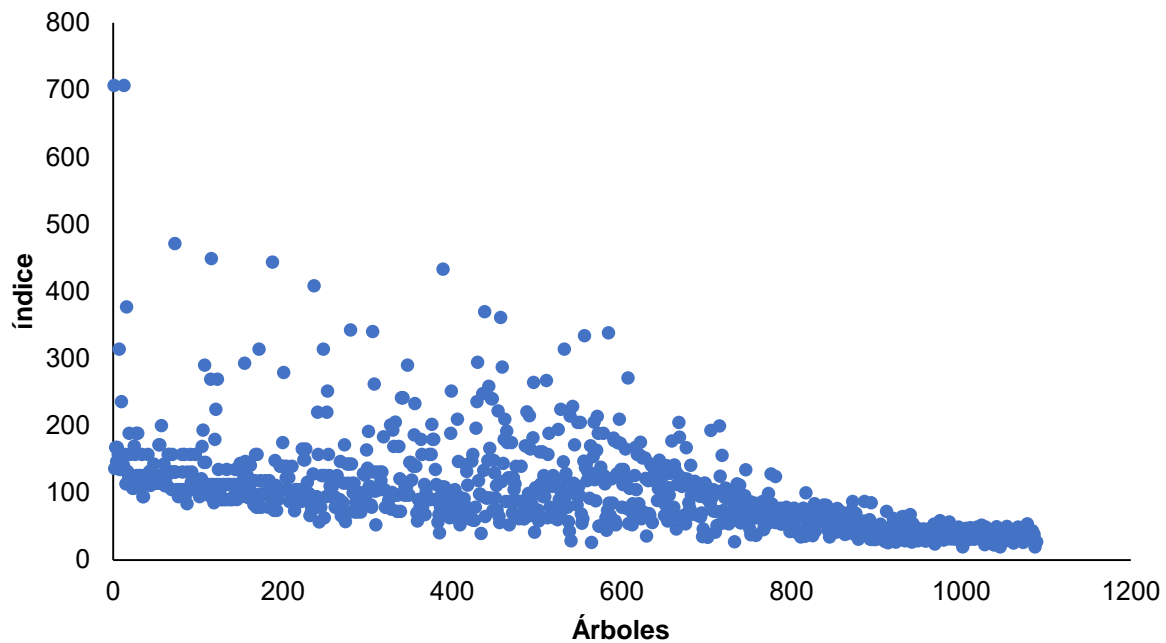


Figura 15. Índice de esbeltez; $I. E. = \frac{\text{Altura del árbol (h)}}{\text{Diámetro normal (DN)}}$ Tomado de Manzanilla (1974).

6.2 Edad y crecimiento del arbolado.

De los datos obtenidos con el Windendro®, el árbol más viejo tuvo una edad de 91 años y el más joven 24 años. Haciendo un promedio del ancho de anillos por quinquenio (fig. 16) se obtuvo que los valores más altos corresponden al período de 1941 – 1955, (ancho de anillos promedio mayor a 6 mm), el crecimiento decrece hasta llegar al período de 1986 a 1990 con un valor de 2.15 mm (valor mínimo), volviendo a tener un aumento hasta llegar al 2010 con un valor de 4.61 mm. La desviación de los datos se encuentra en un intervalo de 1.59 – 3.89 mm para el ancho del anillo, con valor promedio de 2.16 mm.

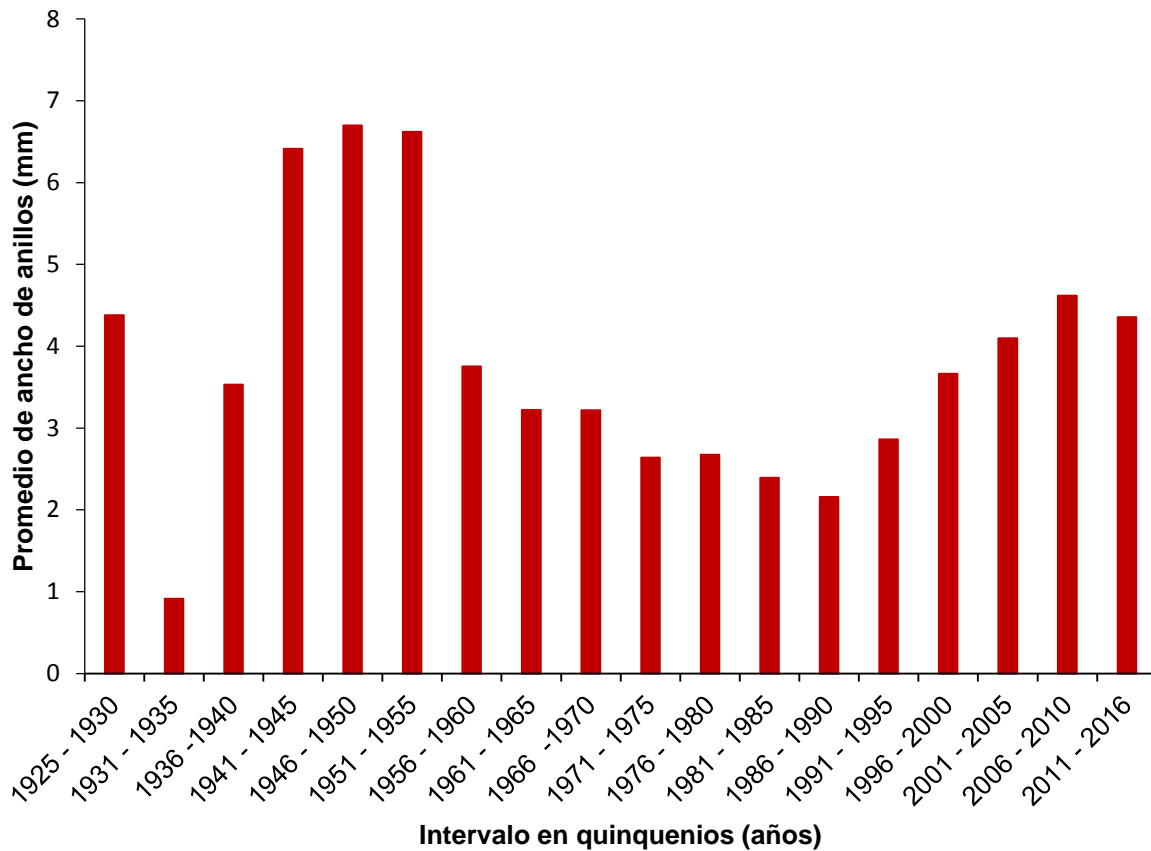


Figura 16. Promedio de ancho de crecimiento en intervalos de 5 años.

El crecimiento es constante en el período comprendido de 1925 – 2016 con una variación de 0.004 mm. De acuerdo a estos valores el promedio de la ganancia anual se obtuvo de 0.500 ± 0.064 mm, con un intervalo que va de 0.30 a 0.80 mm (fig. 17). Con los valores de la ganancia se obtuvo el índice de sensibilidad (fig. 17), en general al inicio el índice tuvo valores negativos hasta 1930, después el índice aumento poco hasta la década de 1950, donde volvió a tener un descenso culminando en 1985 donde vuelve a tener un ascenso hasta el 2000. El ciclo más amplio ocurrió en las décadas de 1930 – 1940, 1970 – 1980, 1980 – 1990; con una tendencia a reducirse en el tiempo.



Figura 17. Índice de sensibilidad y ganancia por año.

6.3 Biomasa y carbono de *Abies religiosa*.

Se determinó una densidad para la madera de 0.3454 g cm^{-3} , pero se prefirió usar la densidad reportada por Rojas (2008) para la determinación del volumen. Resultando en la biomasa estimada de $865.99 \text{ Mg ha}^{-1}$ que se distribuyó de la siguiente manera en los árboles. El intervalo de $77.22 - 89.96 \text{ cm}$ de DN tiene el 25 % de la biomasa total ($216.773 \text{ Mg ha}^{-1}$). El 80 % de la biomasa se almacena en árboles $\text{DN} > 100 \text{ cm}$ (fig. 18) y los de menor biomasa son árboles $\text{DN} < 13 \text{ cm}$ con un 0.34 % (2.944 Mg ha^{-1}) de la biomasa. Las categorías de la figura 18 son las propuestas para el sitio en base a lo obtenido.

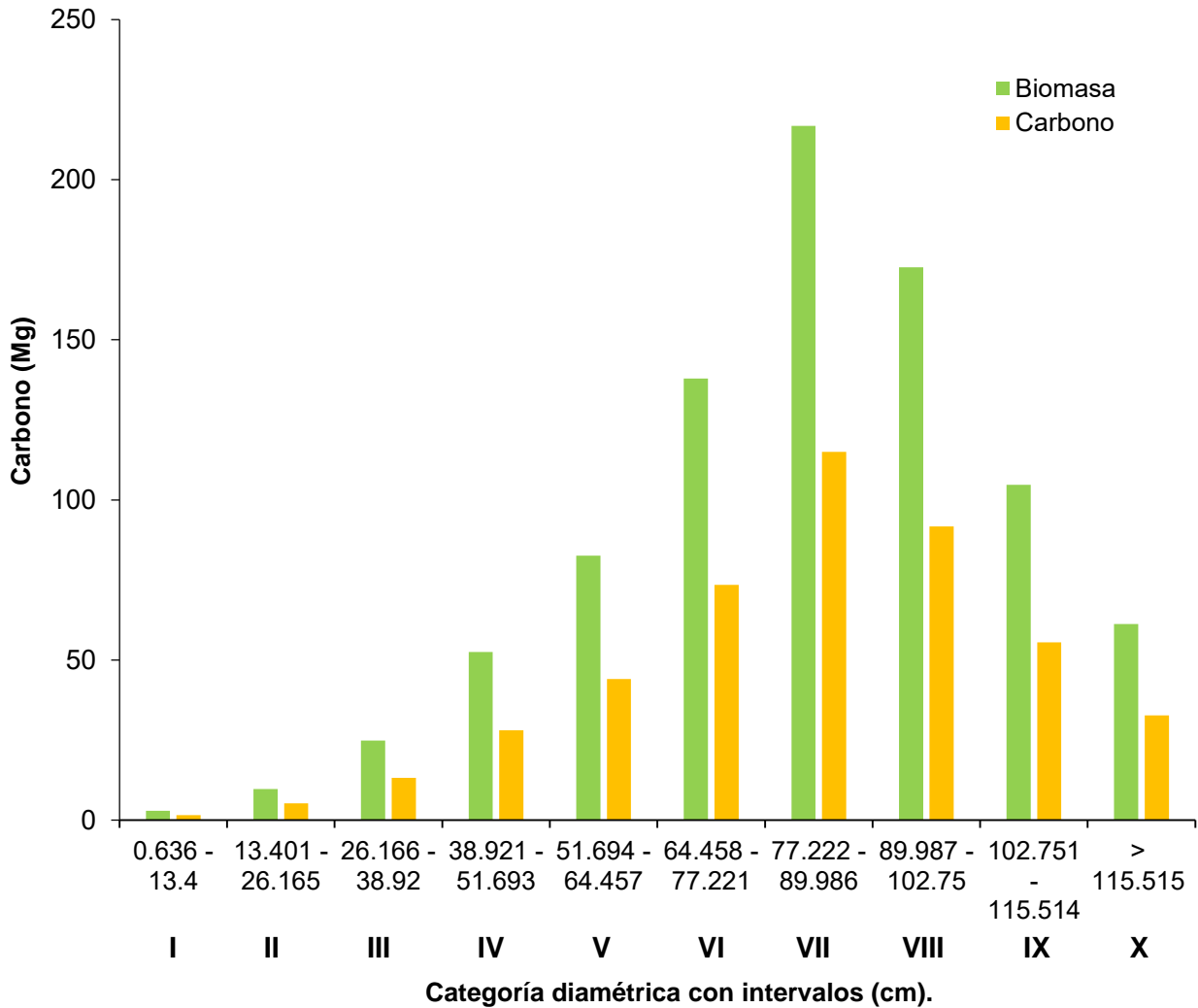


Figura 18. Distribución de biomasa y carbono para cada categoría.

6.4 Modelos de ecuaciones alométricas.

Los modelos de la biomasa y el carbono obtenidos tienen un crecimiento expresado en un modelo potencial, ambos tienen un coeficiente de correlación de 98.86 % para los parámetros estimados (fig. 19 y 20). Estos datos se obtuvieron del ordenamiento de los datos en orden creciente con respecto al DN.

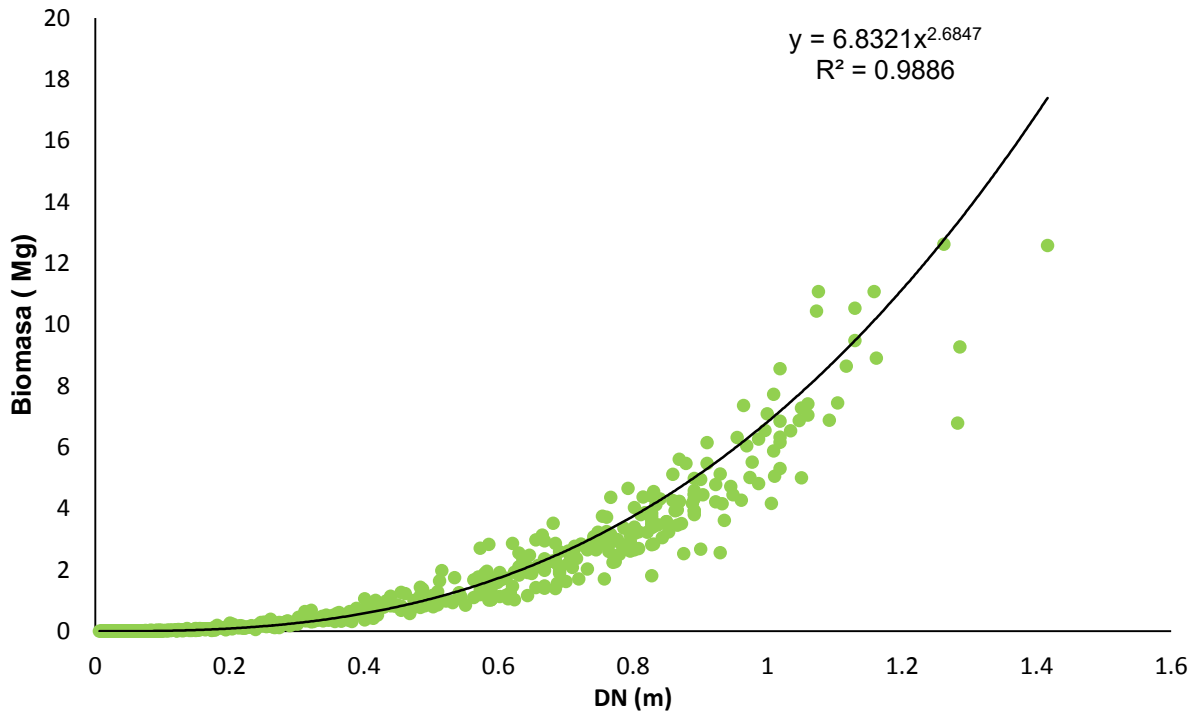


Figura 19. Obtención del modelo para el cálculo del almacén de biomasa.

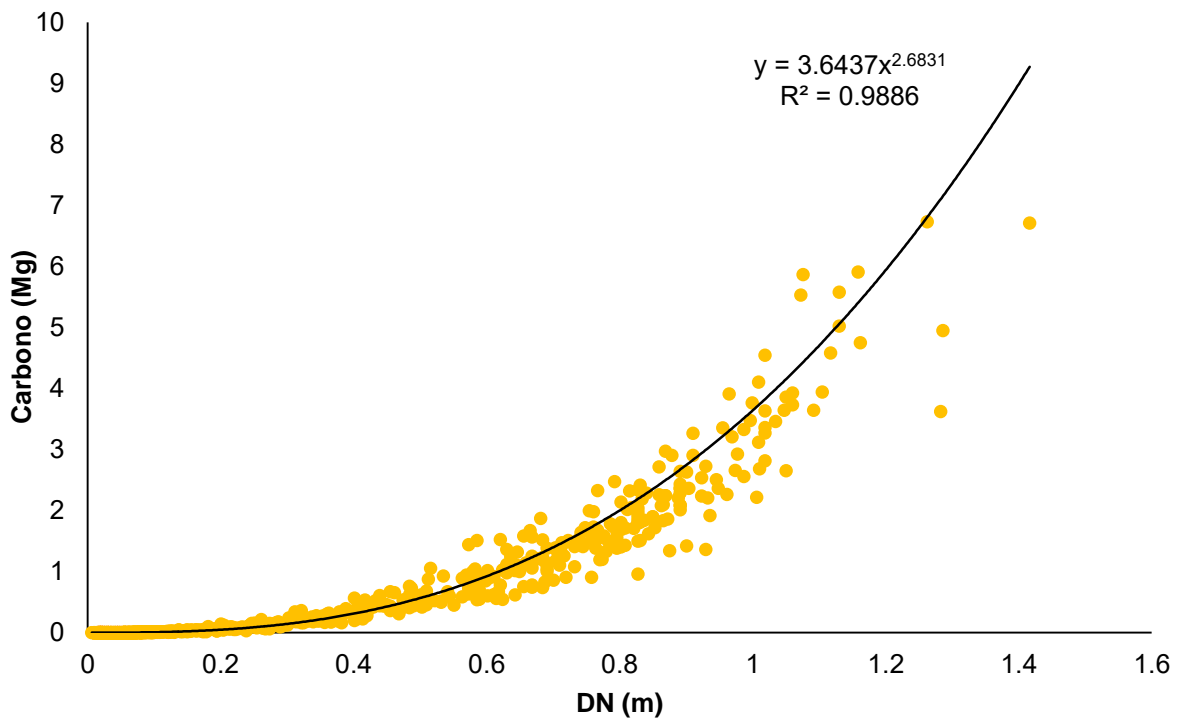


Figura 20. Obtención del modelo para el cálculo del almacén de carbono.



Del análisis de contenido de carbono por categoría (cuadro 7), la categoría II (13.401 – 26.165 cm) es la que contiene mayor concentración de carbono en el estudio con 0.4951. En cuanto al promedio para la especie en el Ejido es de 0.4851, por lo que el almacén de carbono en el bosque es de 460.56 Mg ha⁻¹.

Cuadro 7. Concentración de Carbono y Nitrógeno cuantificado con un analizador de Carbono – Nitrógeno – Hidrógeno – Azufre (Perkin Elmer, 2400).

Categoría	Concentración de	
	C	N
	%	
I	48.6946	0.3125
II	49.5181	0.0842
III	48.325	0.0534
IV	48.4953	0.058
V	48.524	0.0993
VI	48.4155	0.0704
VII	48.236	0.0627
VIII	48.291	0.0788
IX	48.168	0.0672
X	48.5113	0.0812
Promedio	48.5179	0.09681

VII. DISCUSIÓN

7.1 Estructura.

La estructura del bosque (DN < 10 cm y h < 10 m) nos indica que es un bosque joven en regeneración después del cambio de manejo debido a la veda forestal de 1947. Al evitar que se extrajera material del bosque dio oportunidad de que el sistema recuperara la estructura después del manejo. El bosque presenta un descanso de la explotación de 70 años y la restauración fue positiva e inmediata, la edad promedio calculada del bosque es de 63.5 años, lo que nos indica que se encuentra en buenas condiciones de regeneración.



La densidad poblacional de *A. religiosa* del Parque Ejidal de San Nicolás Totolapan es similar a la reportada en otros estudios: Arista (1995) reporta una densidad de 1, 057 árboles ha^{-1} para *Abies pinsapo* al sur de España, donde los árboles tienen un DN de 28 ± 0.5 cm, Dang *et al.*, (2010) evalúan la estructura de un bosque de *Abies fargesii* en China, el cual tiene una densidad de 180 – 870 árboles ha^{-1} , un DN 15 – 52 cm en diferentes pisos altitudinales, Wang *et al.*, (2014) realizan un estudio en un bosque de *Abies georgei* también en China, el cual tiene una densidad de 508 árboles ha^{-1} con un DN 15 – 85 cm y una altura de 8 – 30 m. En México comparado con lo referido por Manzanilla (1974), un bosque virgen tuvo de 327 árboles ha^{-1} , un bosque natural 556 árboles ha^{-1} y el bosque de explotación 198 árboles ha^{-1} de *Abies religiosa*, pertenecientes al paraje San Rafael del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y Atenquique del Nevado y volcán Colima, respectivamente. Esto nos indica que el bosque posee una buena densidad y de todas las edades. Rojas (2008) obtiene una densidad de 191 árboles ha^{-1} a 3, 128 m snm y de 866 árboles ha^{-1} a 3, 300 m snm para la misma especie en el Parque Nacional La Malinche, este bosque se encuentra deteriorado por el efecto de las emisiones volcánicas y porque no es cultivado su mortalidad neta es alta. Galicia *et al.*, (2015) reportan densidades de 1, 460 y 1, 308 para bosques conservados con alturas de 9.7 y 11.3 m.

Cancino (2006) menciona que la densidad está relacionada con la competencia y el crecimiento, ya que a mayor densidad el efecto de la competencia intra-específica es mayor. El mayor número de árboles fueron pequeños, por lo que la competencia por espacio era mínima; sin embargo, la



densidad de los árboles grandes es menor probablemente la competencia elimino a la mayoría de los árboles al desarrollarse la copa. Con base en lo anterior se puede deducir que el bosque del Parque Ejidal se encuentra en buenas condiciones por la distribución que va sumando grupos de edad en la población, el tener la mitad de la densidad reportada para una ANP y el doble de algunos bosques deteriorados o con algún tipo de manejo, de acuerdo con las características que mencionan Manzanilla (1974) y Galicia *et al.*, (2015).

El elaborar categorías diamétricas ajustadas para el parque nos da un mejor reflejo del aporte de biomasa y carbono en árboles con un DN > 35 cm, además estas se acoplan a los árboles del bosque en particular y no en la especie en general. Las categorías de *A. religiosa* tienen una mejor distribución de los árboles, aunque el 60 % se sigue acumulado en la primera categoría (etapa juvenil), esto se debe a que en esta etapa las tasas de crecimiento son altas debido a la inexistencia de la competencia entre árboles. Esta etapa termina en el momento que las copas cierran entrando a la madurez donde la tasa disminuye y la competencia por espacio aumenta, ya que los árboles reaccionan rápidamente cuando se les alivia de competencia (Cancino, 2006).

La distribución de DN del ejido es de 24.49 ± 30.47 cm comparado con los datos para el género mencionados anteriormente el bosque del ejido tiene una estructura sesgada en árboles jóvenes, junto con la altura que es mayor a los reportados para el género indican que el bosque es joven ya que dicha especie puede alcanzar hasta 60 m de altura y el DN tiene un valor de 100 – 180 cm. Esto se relaciona con el índice de esbeltez, que Manzanilla (1974) reporta con



promedio de 66.2 para un bosque virgen, 75.33 para un bosque natural y 58 para un bosque en explotación. El ejido tiene un índice de esbeltez de 99.843, por lo que se encuentra arriba del bosque virgen y conservado, indicando que el bosque tiene una estructura robusta indicando una buena relación entre ambas variables.

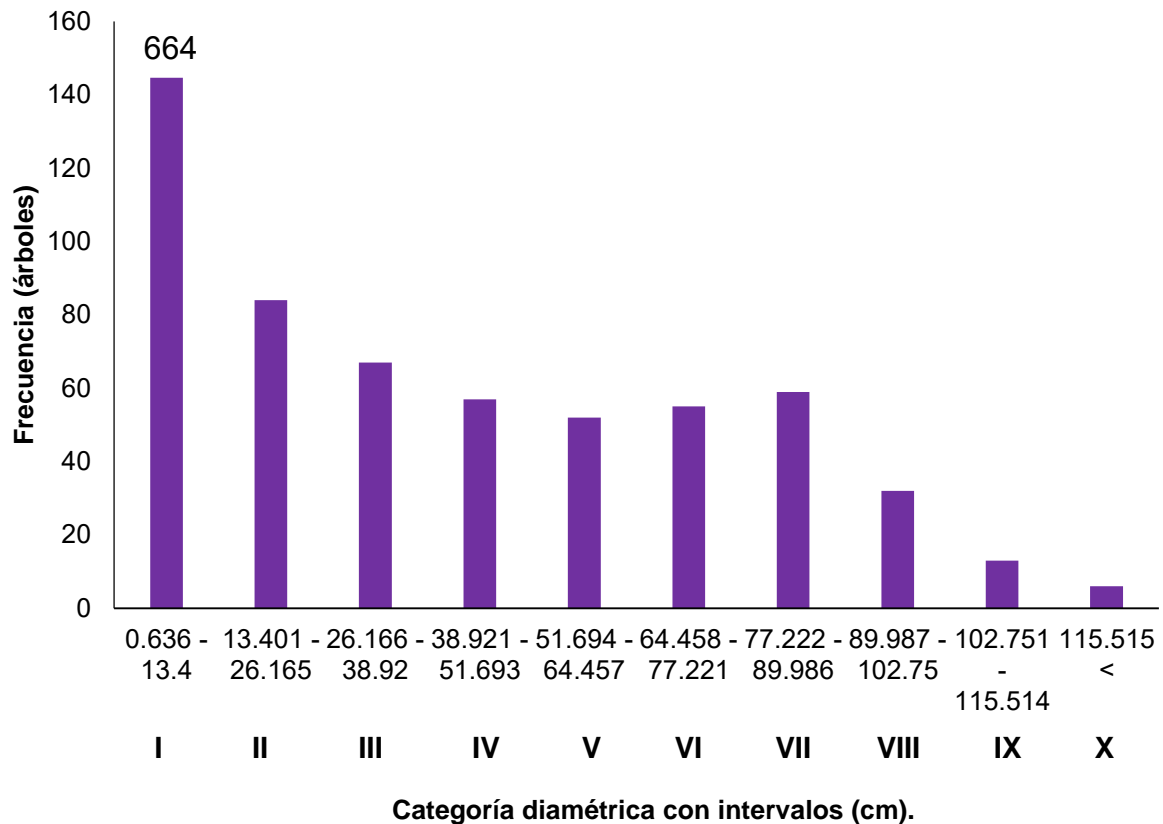


Figura 21. Estructura de diámetros normales del bosque de *Abies religiosa* de San Nicolás Totolapan en las categorías propuestas para el mismo.

El aumento de DN es sensible al ambiente y depende de la calidad del sitio y el manejo (Cancino, 2006). Esto podría explicar el cambio en el tamaño de los anillos de crecimiento, ya que a partir de la veda forestal la competencia entre árboles por espacio aumentó y el crecimiento del fuste fue menor. Por ejemplo,



Dang *et al.*, (2010) reportan que *Abies Fargesii* es sensible al cambio de las condiciones climáticas.

7.2 Edad y crecimiento.

Arista (1994), reporta una media de 44.8 ± 1.6 años siendo el más viejo de 64 años, Dang *et al.*, (2010), trabajaron con edades de 32 – 302 años, Manzanilla (1974), reporta edades mayores a 60 años para bosque virgen y para bosque natural una edad promedio entre 35 – 45 años, en el Parque ejidal se tuvo una edad entre 24 y 91 años por lo que podría decirse que tenemos un bosque conservado. Este resultado puede ser posible debido al cambio de manejo por la veda forestal con lo cual el bosque tuvo una regeneración pudiendo tener árboles mayores a 60 años. En cuanto al crecimiento los anillos, Jasso (2014), reporta un ancho de 3.4 mm a los 3, 300 m snm y 2.3 mm a los 3, 400 m snm para *Abies religiosa*. El ancho del anillo disminuyó conforme la relación con la edad, pero en los últimos 4 años de su estudio registró incrementos de 4 y 7 mm para el piso bajo y alto a los que se refiere. Esto indica que en este período hubo un cambio favorable para que aumentará su crecimiento, lo más probable es que se deba a un aumento en el régimen hídrico, ya que es el factor limitante de la especie. También registró una disminución de los valores en la década de 1970 a 1980, posteriormente un aumento en el crecimiento a partir de 1990, lo cual relaciona con los eventos del niño de 1949 – 1962 y 1998 – 2004, coincidiendo con la sensibilidad de la especie a cambios climáticos y su factor limitante (la humedad). Similar a lo reportado por Manzanilla (1974), los valores de crecimiento son



mayores (> 6 mm) entre los 15 y 30 años. Todos los cambios del crecimiento o ancho de las traqueidas en el árbol se encuentran dentro de lo reportado por Goche *et al.*, (2000) para *Abies religiosa* (1, 875.17 μm mínimo, 6, 851.38 μm máximo y un promedio de 4, 477.43 μm). Esta variación puede deberse a que en este intervalo se encuentra la tasa máxima de crecimiento para la especie y el régimen hídrico juega un papel importante para marcar el inicio de la formación del anillo de crecimiento.

7.3 Biomasa y carbono.

La biomasa (Mg B) y carbono total (Mg C) se determinaron ajustando el modelo de Rodríguez (2013) con respecto al coeficiente mórfico, el factor de expansión de biomasa y el contenido de carbono de la especie. Se han desarrollado ecuaciones para la estimación de biomasa y carbono en bosques tropicales (BTR) y templados (BTEM) de México (cuadro 5) y para *Abies religiosa* con resultados similares a esta investigación (cuadro 6).

En BTR de Sinaloa (Návar, Rodríguez y Domínguez, 2013) han reportado valores de 25 – 260 Mg B ha^{-1} , Méndez *et al.*, (2011) estiman 79.23 Mg B ha^{-1} y 36.61 Mg C ha^{-1} en bosques de pino, Ordoñez *et al.*, (2001) estiman entre 74 – 225 Mg C ha^{-1} para un bosque de *Pinus pseudostrobus*, Jasso (2014) determina carbono a diferentes altitudes de un BTEM 416.54, 370, 165, 115.32, y 101.09 Mg C ha^{-1} , Galicia *et al.*, (2015) reportan de 347 y 225 Mg B ha^{-1} para bosques conservados. De los estudios de *Abies religiosa* para México, Rojas (2008) determina 265.6 Mg B ha^{-1} ; Mendoza y Galicia (2010) 372 Mg B ha^{-1} para un



bosque conservado de *A. religiosa*; Jasso (2014) reporta dos promedios a diferente altitud 190.3 ± 0.4 y 115.3 ± 1.1 Mg B ha⁻¹; Wang *et al.*, (2014) determinan una concentración de C en fuste del 46.7 – 48.3 % y un almacén entre 67.41 – 209.8 Mg C ha⁻¹. Esta especie está restringida biológicamente a un piso altitudinal y a una orografía y humedad específica, por lo que es probable que la variación en el almacenamiento dependa de esto.

La distribución de la biomasa estuvo concentrada en los árboles adultos a pesar de que ~ 70 % de los árboles se encuentran en etapa juvenil, indicando que a mayor edad los organismos acumulan mayor biomasa a pesar de que los árboles juveniles se encuentran en desarrollo. El conjunto de estos DN no alcanzó el valor medio de la biomasa acumulada por los árboles maduros, relacionando así la tasa de crecimiento de cada etapa y la densidad, ya que esta se ve influenciada con la edad (Goche *et al.*, 2000). La biomasa del bosque es cuatro veces mayor a lo reportado en BTR, y más del doble de lo reportado para los bosques conservados, mientras que el almacén de carbono duplica el valor reportado para BTEM. Inclusive para bosques del mismo género en estado de conservación, la estimación más cercana una reportada por Jasso (2014). Esto podría deberse a que la mayoría de estudios de ecuaciones alométricas no contemplan organismos mayores a 55 cm de DN, por lo que los modelos de estimación para ellos son pocos o nulos.

Los modelos de estimación de biomasa y carbono tienen una $r^2 = 0.9856$ para el Parque Ejidal. La ecuación de Avendaño (2006), estima más biomasa para el bosque seguida de la ecuación de PAOT, y la propia en tercer lugar, mientras



que Flores reporta la menor biomasa esto puede deberse a que su modelo se realizó para un bosque perturbado por decline forestal. Sin embargo, en la estimación de carbono la ecuación propia es la que tiene un valor mayor seguida de Avendaño y PAOT, el menor valor lo estima el modelo de Flores. Esto se debe a que el modelo que la PAOT reporta para la especie es el de Avendaño (2006) pero con un ligero ajuste y estima $\sim 21 \text{ Mg B ha}^{-1}$ y $\sim 37 \text{ Mg C ha}^{-1}$ menos que la ecuación original, respectivamente. En cuanto a la inversión de estimación de biomasa y carbono de dichos modelos con el propio, se debe a los valores que cada autor toma en consideración para el coeficiente mórfico, el factor de expansión de biomasa y la concentración de carbono (cuadro 8).

Estos coeficientes varían con respecto a la especie. El coeficiente mórfico (o factor de forma) es la relación entre el volumen real del tronco y el volumen de un cilindro o algún solido de revolución resultante de una parábola, hipérbola o un cono – la figura que más se asemeje al tronco – con la misma base y altura que el árbol. El factor de expansión de biomasa es un coeficiente que expande el volumen comercial o total del fuste para obtener la biomasa total del árbol, es decir, la proporción directa entre la biomasa aérea total y la biomasa del fuste. La concentración de carbono en fuste determinada para *A. religiosa* en este estudio es mayor al intervalo reportado por Wang *et al.* (2014) para *A. georgei*, y mayor a la reportada por Etchevers *et al.* (2009), lo que nos indica que la misma especie almacena diferentes cantidades de carbono en distintos sitios, siendo en la categoría II, donde llega a incorporar su máximo en el sitio.



Cuadro 8. Estimación de Biomasa y Carbono del Parque Ejidal con ecuaciones para *Abies religiosa*.

Autor	Ecuación	Biomasa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
Avendaño(2006)	B = 0.0754 DN ^{2.513} r ² = 0.9934	1162.665	539.698
	C = 0.035 DN ^{2.513} r ² = 0.9934		
Flores (2010)	B = 0.0173 DN ^{2.745} r ² = 0.928	741.771	375.336*
PAOT (2010a)	C = 0.033 DN ^{2.51} r ² = 0.99	1141.409*	502.220
Rodríguez (2013)	B = 3.1661 × 10 ⁻⁵ DN ^{2.6222} r ² = 1	787.986	471.208
	C = 1.8933 × 10 ⁻⁵ DN ^{2.6222} r ² = 1		
Modelo determinado con los datos del estudio presente	B = 6.832 DN ^{2.684} r ² = 0.9986 C = 3.6437 DN ^{2.684} r ² = 0.9886	956.027	509.972

*No determinó ecuación para el parámetro y se realizó una estimación con los valores del parque.

Los tres factores (coeficiente mórfico, el factor de expansión de biomasa y la concentración de carbono) dependen de la especie, la densidad, la edad y las condiciones ambientales, incluso aunque sea la misma especie los coeficientes suelen variar en diferentes regiones, es por ello que determinar la biomasa y carbono para la especie en el Parque Ejidal nos daría una idea de lo que almacena la vegetación en condiciones de perturbación y contaminación por la cercanía a la ciudad.



7.4 Carbono potencial.

CONABIO (s. f.) realizó mapas de superficie potencial de los bosques templados vs la superficie actual, en el cual al 2010 se calculaba una pérdida del 26.45 % de la superficie. Masera *et al.*, (1997) estiman la captura potencial de acuerdo al tipo de vegetación 179 Mg C ha⁻¹ para coníferas y 153 Mg C ha⁻¹ para especies de hoja ancha, Monreal *et al.*, (2005) mencionan 200 Mg C ha⁻¹ para bosques en general. La estimación de carbono aéreo del suelo de conservación es de 1, 870, 208.91 – 102, 548, 835.42 Mg (PAOT, 2010a) y la mayoría corresponde al bosque de pino. PAOT (2010a) estima que el oyamel almacena de 83.97 a 105.85 Mg C ha⁻¹ en la CDMX. Los resultados muestran que *A. religiosa* almacena más carbono que lo reportado para los bosques, inclusive es mayor a lo estimado para la especie cabe tomar en cuenta que esto sucede en los árboles con un DN > 60 cm, y que el bosque al ser joven tiene un potencial de almacén de carbono en aumento a unos 100 años.

Con base en lo anterior, el Parque Ejidal está almacenando poco más del doble a lo reportado por Masera *et al.*, (1997) para un bosque de coníferas y Monreal *et al.*, (2005) o bien cuatro veces lo reportado por Masera *et al.*, (1997) para una ANP y PAOT (2010a) para un bosque de oyamel perteneciente a la CDMX. Contemplando la edad promedio del bosque (63.5 años) la tasa de fijación de este sería de 13.637 Mg C h⁻¹ año⁻¹ comparado al promedio de emisiones de una ANP (7.2 Mg C año⁻¹) (Masera *et al.*, 1997). El bosque captura ~ 6.5 Mg C h⁻¹ año⁻¹ de carbono, lo que mitiga el efecto invernadero producido por este gas y por ende los efectos del cambio climático. La captura de carbono es una razón por la



cual los propietarios pueden obtener insumos de parte de los subsidios propuestos por el gobierno para la captura de carbono, además de ayudar a mantener el bosque en buenas condiciones y no cambiar el uso de suelo ilícitamente por falta de fondos. Ya que antes de la veda forestal y el decreto como ANP, los ejidatarios se dedicaban a la extracción de madera para la empresa papelera Loreto y Peña Pobre, ya que la especie es una buena opción para la elaboración de la pulpa de este producto.

7.5 Servicios ecosistémicos.

Desglosar los beneficios que obtiene la sociedad de un ecosistema se liga desde la estructura, las funciones, los servicios y los beneficios a la evaluación económica la cual se realiza a partir de los servicios que provee. De acuerdo con Groot *et al.* (2010), se identifican 20 de los 23 servicios ecosistémicos en el bosque. Para el país la norma NADF-006-RNAT-2004 menciona que las áreas verdes públicas son **indispensables para disminuir las islas de calor, capturar contaminantes y partículas suspendidas, producir oxígeno, frenar la erosión del suelo, incrementar la humedad, disminuir los niveles de ruido, captar agua pluvial y constituir sitios de refugio y alimentación para diversas formas de vida**. Todos los anteriores son servicios ecosistémicos que proveen los bosques.

La CDMX tiene una temperatura mínima de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una máxima de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, los bosques ayudan a mitigar los cambios drásticos de temperatura en la ciudad, esto es importante, ya que la superficie verde es reducida y la contaminación por



las emisiones del parque vehicular y fábricas degradan la calidad del aire. El tener una ANP dentro de la ciudad es relevante, porque este ecosistema ayuda a capturar carbono y filtrar contaminantes como los NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ entre otros del aire.

Como parte del PSA por captura de carbono, Kanninen (2001), estimó el costo por unidad de reducir las emisiones de C, disminuyendo la deforestación y protegiendo, el cual tiende a ser bajo (oscila entre menos de 1 hasta 15 dólares Mg⁻¹ C), el costo de reducir las emisiones de C mediante la agroforestería, plantaciones de rotación larga y corta, regeneración natural, manejo forestal y prácticas silvoculturales oscila entre 2 y 30 dólares Mg⁻¹ C. A nivel internacional, se ha determinado un precio aproximado de US \$ 10 Mg⁻¹ C como captura de carbono (Ordoñez *et al.*, 2001). Cabe mencionar que cuando se quiere tomar en cuenta solo el valor económico los métodos de la valuación no siempre capturan el valor económico total de los procesos, bienes y servicios que proveen los ecosistemas (Groot *et al.*, 2010).

De acuerdo a la PAOT (2009) el suelo de conservación ha estado permanentemente amenazado por el crecimiento de la ciudad, la presencia de asentamientos humanos irregulares, así como el desarrollo inmobiliario, han contribuido a que la urbanización se desplace hacia las zonas rurales. Esto ha causado, entre otros, los siguientes problemas:

- Sobreexplotación de los mantos acuíferos
- Daños a la cubierta vegetal



- Contaminación del suelo
- Deforestación y erosión
- Pérdida de la vegetación natural y biodiversidad
- Disminución de especies de flora y fauna silvestre

Una de las áreas de mayor vulnerabilidad ambiental en la Ciudad de México son las barrancas, afectadas primordialmente por depósito de residuos, relleno con cascajo y otros materiales, descargas de aguas residuales, construcciones y asentamientos irregulares (PAOT, 2009). Es por ello que parte del proyecto de Pago de Servicios Ambientales que implanto Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en el 2003 para mantener los bosques debe ser reforzado en el Suelo de Conservación.

Además del Servicio Ambiental por captura de carbono, CONAFOR reconoce otros dos para el pago, el hidrológico, el cual cumple el bosque, ya que forma parte de una de las zonas más importantes para la recarga del acuífero de la ciudad (Perevochtchikova, 2016) y el servicio de hábitat. Se debe mencionar que el bosque aporta otros servicios que se reconocen a nivel mundial, pero que aún no se han implementado en la remuneración de los servicios.



VIII. CONCLUSIONES

El bosque se encuentra en recuperación por regeneración natural, ya que alrededor del 60 % de los árboles se concentran en etapa brinzal (categoría I); mientras el resto se distribuye en la etapa madura. La estructura del bosque es saludable por lo que tiene poca influencia de la CDMX.

El bosque se considera joven (24 - 90 años) y en recuperación debido a sus antecedentes de manejo, con un potencial de almacén carbono durante los próximos 100 años. Por lo juega un papel importante en los servicios de captura de carbono y de regulación de clima en la CDMX.

La estimación de biomasa de *A. religiosa* es de 865.99 Mg ha⁻¹ y para carbono 460.56 Mg ha⁻¹, se destaca que la mayor cantidad de biomasa se encuentra en los árboles adultos, esto puede deberse al aumento del volumen y la densidad de madera de los árboles.

La concentración de Carbono de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. es de 48.51%.

Los servicios ecosistémicos que provee este bosque son relevantes para la ciudad. De los cuales tenemos almacén de carbono, retención de suelo, captura de agua, provisión de oxígeno y captura de PM_x.



IX. RECOMENDACIONES

Es conveniente obtener ecuaciones alométricas *in situ* como método de estimación no destructivo cuando existe veda forestal, o bien cuando las brigadas de corta no son compatibles en tiempo y forma.

De acuerdo a las condiciones del bosque es importante contemplar un plan de manejo, ya que es posible que exista un desplazamiento de *Abies religiosa* por *Pinus ssp.* debido a la presencia de plantaciones con pino.

Es relevante que el Programa de Pago por Servicios Ambientales este fundamentado en el conocimiento de los recursos, ya que estos proveen información acerca de las condiciones de los mismos y su posible potencial. También es importante contemplar los servicios de oxígeno, transpiración, captación de PM_x, biodiversidad de fauna acompañante de estos bosques.

Es imperativo que estos bosques sean conservados dada la importancia en el turismo ecológico y educación ambiental que ya proveen a los habitantes.



X. REFERENCIAS

- Acosta M, D. Etchevers, C. Monreal, K. Quednow y C. Hidalgo. (2001). Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México. Simposio Internacional de Medición y Monitoreo de Carbono en Ecosistemas Forestales en Valdivia, Chile.
- Aguilar A. (2009). Urbanización periférica e impacto ambiental. El suelo de conservación en la Ciudad de México. En Aguilar A. e I. Escamilla (coords.) Periferia ambiental. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana. México, Instituto de Geografía, UNAM. Porrúa.
- Apps, M.J, W.A. Kurz, R.J. Luxmoore, L.O. Nilsson, R.A. Sedjo, R. Schmidt, L.G. Simpson y T.S. Vinson. (1993). Boreal Forests and Tundra. In: Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds) Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂. Kluwer Academic Publishers. Holanda. p: 39-53.
- Arista M. (1995). The structure and dynamics of an *Abies pinsapo* forest in southern Spain. Forest Ecology and Management 74: 81 – 89.
- Avendaño D. (2006). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham., en Tlaxcala, México. Tesis de Ingeniero forestal. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México.
- Avila-Foucat, S. (2012). Diversificación productiva en el suelo de conservación de la ciudad de México: Caso San Nicolás Totolapan. Estudios sociales (Hermosillo, Son.), 20(40), 355-375.
- Balvanera P y Cotler H. (2007). Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos. Gaceta Ecológica. Número especial. 84 – 85. Julio – Diciembre. 8 – 15.
- Brown, S., (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forest. Forest Resources Assessment Publication. Forestry Paper 134. Rome, Italy, FAO. 55.
- Brown S. (2002). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environmental Pollution Núm. 116,363–372.
- Brown, S. y Lugo A. (1984). Biomass of tropical forest: a new estimate based on forest volume. Science (Washington; D.C.), 223: 1290 – 1293.
- Brown, S, Gillespie A. y Lugo A. (1991). Biomass of tropical forest of south and southeast Asia Can J. For. Res., 21:111 – 117.
- Brown, S., Ch. Hall, W. Knabe, J. Raich, M. Trexler y P. Woome. (1993). Tropical forest: their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. Water, Air and Soil Pollution. No. 70: 71 - 94.



- Buytaert W, Cuesta F y Tobón C, (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global EcolBiogeography*. 20. 19 – 33.
- Caballero M. (1982). Empleo de coeficientes mórficos en la elaboración de tablas de volúmenes de cedro rojo. *Boletín Divulgativo*. No. 26, Abril. 2ª ed. INIF: SARH, México. 27.
- Carrillo F, Acosta M, Flores E, Juárez J y Bonilla E. (2014). Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol 5. Número 5. 779 – 793.
- Challenger, A. (2008). Los ecosistemas terrestres, en *Capital natural de México*, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, 87-108.
- Cifuentes M y Catie T. (2009). ABC del cambio climático en Mesoamérica. Programa Cambio.
- COCODA. (1986). Manual de planeación, diseño y manejo de las áreas verdes urbanas del Distrito Federal. Comisión Coordinadora para el Desarrollo Agropecuario. D.D.F. Ecoguarda COCODA – D.D.F.
- Concha J. Alegre J. y Pocomucha V. (2007). Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología aplicada*, 6 (1,2).
- Correa M, Torres J Morales G. (2007). La mariposa monarca y su reino de oyameles. PRONATURA, por la gente por la tierra. Núm. 25 Oct – Nov. 16 – 21.
- Cuenca E, Jadán O. Cueva K, Aguirre C. (2014). Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *CEDAMAZ*, 21- 31.
- Cuevas R *et al.*, (2011). Análisis estructural y de diversidad en los bosques de *Abies* de Jalisco, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82: 1219 – 1233.
- Dang H, Zhang Y, Zhang K, Jiang M Zhang Q. (2010). Age structure and regeneration of subalpine fir (*Abies fargesii*) forest across an altitudinal range in the Qinling Mountains, China. *Forest Ecology and Management*. 259: 547 – 554.
- De Groot R, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecol. Complexity*. 7: 260 – 272.
- Díaz F, Acosta M, Carrillo F, Buendía, E, Flores E. Etchevers J. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. *et Cham*. *Madera y Bosques* 13 (1), 25 – 34.



- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler y J. Wisniewski. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Etchevers J, Carrillo F, Avendaño D, Acosta, M; (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, Julio-Septiembre, 233-238.
- Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S y Ci L. (2001). Changes in Forest biomass carbon storage in Chin between 1949 and 1998. *Science* 292 (5525), 2320 – 2322.
- FAO. [Picard N., Saint-André L., Henry M.] (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 223.
- Flores O y Gerez P. (1994). Biodiversidad y conservación en México: Vertebrados, vegetación y uso de suelo. UNAM, Facultad de Ciencias. México, 439.
- Flores P. (2010). Impacto del proceso de declinación sobre la productividad primaria neta en bosques de *Abies religiosa*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Texcoco. Estado de México. México.
- Flores P, López M, Pérez G, De la Isla M, Calva G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunt) Schlttdl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. Vol. 2. Núm. 8, 9 – 20.
- FUNDLOCAL (2007). Ciudad de Ciudades, Fundación para el Fortalecimiento de los Gobiernos Locales A.C., México.
- Galicia L y Zarco A. (2014). Multiple ecosystem services, possible trade - offs and synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*.
- Galicia L, Saynes V. y Campo J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences* 93 (3): 473 – 484.
- Garzuglia M, y Sarek M. (2003) Wood volume and woody biomass: review of FRA 2000 estimates. Forest Resource Assessment WP 68. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Italy. 30.
- Gay, C. (2000). El Cambio climático, el problema global más importante del futuro. *Gaceta UNAM*, Noviembre 13. No. 3411: 12-13.
- Gayoso J, Guerra J, Alarcón D. (2002). Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 157.



- Goche J. Fuentes M. Borja A y Ramírez H. (2000). Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 6(1):83-92.
- Grijpma, P. I. (1982). Produccion Forestal. SEP. Trillas. México. 134.
- Huxley, J. S. (1932). Problems of relative growth. The Dial Press, New York. 276.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2013). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (1990-2010). SEMARNAT, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2003). Conjunto de datos vectoriales de la carta de vegetación primaria 1:1 000 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes.
- INEGI. (2005). Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación: escala 1: 250 000. Serie III (continuo nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes.
- Imaz, M.; Camacho, R. y E. Ruiz, (2011) "Política pública ambiental en la ciudad de México. Suelo de conservación: una ruta incorrecta" en Pérez, E.; Perevotchkova, M. y S. Ávila-Foucat (coords.), Suelo de conservación del Distrito federal: ¿hacia una gestión y manejo sustentables? México, Miguel Ángel Porrúa.
- IPCC, (2000a). *Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Watson, R.T. y colaboradores (directores de la publicación)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, 377.
- IPCC, (2000b). Escenarios de emisiones. Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Nakićenović, N. y colaboradores (directores de la publicación)].
- IPCC, (2001). Cambio climático 2000: 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.
- 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.
- IPCC, (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157.



- Jasso I. (2014). Crecimiento, biomasa y carbono arbóreo en un gradiente altitudinal en bosques templados del centro de México. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Instituto de Geología, UNAM. México.
- Johnson, D. W. (1992). Effects of forest management on soil carbon storage. In: Natural Sink of CO₂. J. Wisniewski y A. E. Lugo (Eds). Kluwer Academic Publs. Palmas de mar, Puerto Rico. 83-120.
- Kumar O, editor. (2010). The economics of ecosystems and biodiversity ecological and economic foundations. London: Earthscan.
- Ley General de Cambio Climático (LGCC) (2016).
- Lugo A y Brown S. (1992). Tropical forest as sink of atmospheric carbon. *Forest Ecology and Management Elsevier*. 54: 239 – 255.
- Madrigal, X. (1967). Contribución al conocimiento de la ecología de los bosques de oyamel (*Abies religiosa* (HBK) Schl. et Cham.) Boletín técnico Núm. 38. IFIF. México
- Madrigal X, Jiménez J, Flores G, Moncayo F y Fakari F. (1971). Memoria del mapa de tipos de vegetación de la República Mexicana. Subsecretaría de planeación general de estudios Dirección de agrología. México. 60.
- Manzanilla H. (1974). Investigaciones Epidométricas y Silvícolas en Bosques Mexicanos de *Abies religiosa*. Litográfica Ingramex, México.
- Martínez M. (1963). Las Pináceas mexicanas. Ed 3. UNAM, México.
- Masera O, Ordoñez MJ, Dirzo R. (1997). Carbon emissions from Mexican forest: current situation and long term scenarios. *ClimChange*. 35:265 – 295.
- Mena V. Andrade H. y Navarro C. (2011). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios e un gradiente altitudinales en Costa Rica. *Agroforesteria Neotropical*. Septiembre, No. 1.
- Méndez J, Lickie L, Capó M y Nájera J. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencias* 45: 479 – 491.
- Mendoza y Galicia (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in Highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry*, v. 83. Núm 5: 497 – 506.
- Milenio. (2001). Crece la amenaza por el cambio climático. *Milenio Diario*, Lunes 19 de febrero, 2001. 35.



- Monreal CM, Etchevers JD, Acosta M, Hidalgo C, Padilla J, López RM, Jiménez L, Velázquez A. (2005). A method for measuring above – and below – ground C stocks in hillside landscapes. *Can J SoilSci.* 85:523 – 530.
- Murray G *et al.*, (2016). The carbon cycle in Mexico: past, present and future of C stocks and fluxes. *Biogeosciences.* 13, 223 – 238.
- Nadler C, Meza A, Torres R. Jara M. (2001). Medición del carbono almacenado en los bosques de la Reserva Nacional Malleco. IX Región Chile. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales (18 – 20 de Octubre de 2001), Valdivia, Chile.
- Nívar J. Rodríguez F. y Domínguez P. (2013). Ecuaciones alométricas para árboles tropicales: aplicación al inventario forestal de Sinaloa, México. *Agronomía mesoamericana* 24 (2): 347 – 356.
- Ordóñez, A. (1998). Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México D.F.
- Ordóñez, A. (1999). Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F.
- Ordoñez A. Jong B y Masera O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques.* 7(2): 27 – 47.
- Ordóñez, A. (2007). Árboles para reciclar carbono. La guerra contra el calentamiento global. *PRONATURA.* Por la gente por la tierra. 25. Oct – Nov; 46 – 51.
- Ordóñez A. y Masera, O. (2001). Captura de Carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques.* 7(1): 3-12.
- PAOT, (2009). Estudio sobre la superficie ocupada en Áreas Naturales Protegidas del Distrito Federal.
- PAOT, (2010a). Estudio de estimación de captura de carbono como indicador del estatus del derecho de los habitantes del Distrito Federal a gozar de áreas verdes adecuadas para su desarrollo, salud y bienestar.
- PAOT. (2010b). Presente y futuro de las áreas verdes y del arbolado de la Ciudad de México. *Ekilibria.*
- Pan Y. Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG *et al.*, (2011). Alarge and persistent carbón sink in the world's forest. *Science.* 333:988 – 993.



- Peckham S, Gower S, Buongiorno J. (2012). Estimating the carbon budget and maximizing future carbon uptake for a temperate forest region in the U.S. *Carbon Balance and Management*. 7:6.
- Perevochtchikova M. (2016). Estudio de los efectos del programa de Pago por Servicios Ambientales: experiencia en Ajusco, México. El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, México.
- Pozos D. y J. Lee. (2015). Desarrollo sustentable y agenciamiento de desarrollo: el caso del parque ejidal San Nicolás Totolapan. 20° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México. UNAM.
- Pretzsch. (2006). Species-specific allometric scaling under self-thinning: evidence from long – term plots in forest stand. *Ecosystem ecology. Oecologia* 146: 572-583.
- Rackley, S.A. (2010). *Carbon capture and storage*. Elsevier. USA.
- Ramírez G. (1988). Análisis de una plantación de *Abies religiosa* (HBK) Schl. et Cham. y *Pinus patula* Schl. et Cham. En el campo experimental forestal (C.E.F.) San Juan Tetla, Puebla. Tesis profesional. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.
- Rodríguez V. (2013). Estimación dasométrica de carbono almacenado en un bosque de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. del paraje el Cedral del Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Rojas F. (2004). Contenido y captura potencial de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche Tlaxcala – Puebla. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Rojas F. (2008). Consideraciones para el balance de carbono: Evaluación del movimiento de biomasa en el Parque Nacional Malinche. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Instituto de Geología, UNAM, México.
- Román V. (2012). Determinación del carbono en la biomasa de *Abies religiosa* del Parque recreativo y cultural Desierto de los Leones para evaluar su capacidad como sumidero de Carbono. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- Rzedowski J y Rzedowski G. (1979). Flora Fanerogámica del Valle de México. Continental, México. 403.
- Sánchez C. y Díaz H. (2011). Pueblos, comunidades y ejidos en la dinámica ambiental de la Ciudad de México. Escuela Nacional de Antropología e Historia. Cuicuilco, Vol. 18. Núm. 52. 191 – 224. México. D.F.



- Schlesinger W. H. (1990). Evidences from chronosequence studies for low carbon-storage potential of soils. *Nature* 348: 232-234.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). Anuario estadístico de la producción forestal 2008. SEMARNAT. México.
- Sorensen *et al.*, (1998). Manejo de áreas verdes urbanas, División de Medio Ambiente del Departamento de Desarrollo Sostenible del Banco Interamericano de Desarrollo Washington. (Consultado en PAOT, 2010b).
- Torres J y Guevara A. (2002). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*. Número 63. Abril – Junio; 40 – 59.
- Vidal A, Benítez J, Rodríguez J, Carlos R y Gra H. (2004). Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea var caribaea* en la E.F.I. La Pala de la provincia de Pina del Río. Cuba. Quebrcho. *Revista de Ciencias Forestales* (11), 60 – 66.
- Vieyra, A., (2009) “Proyectos productivos y expansión urbana en el suelo de conservación del sur del Distrito Federal” citado en Aguilar, A. G. e I. Escamilla (coords.), *Periferia ambiental. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana*. México, Instituto de Geografía, UNAM, Porrúa.
- Villers R.y Trejo V. (1997). Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research* 9:87- 93.
- Wang G, Ran F, Chang R. Yang Y. Luo J, Fan J. (2014). Variations in the live biomass and carbon pools of *Abies georgei* along an elevation gradient on the Tibetan Plateau, China. *Forest Ecology and Management* 329: 255 – 263.



XI. CITAS ELECTRÓNICAS

- Cancino, J. (2006). Dendrometría básica. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Manejo de Bosques y medio Ambiente. Chile. Recuperado de: http://www.sibudec.cl/ebook/UDEC_Dendrometria_Basica.pdf
- CONABIO. (s. f.). [En línea]. Mapas de superficie de ecosistemas en México. Consultado: Octubre, 2016. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/mapas/mapa.html>
- CONABIO. (2010). Bosques de coníferas Capitulo 17. CONABIO. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMxC17.pdf> consulta do: 26 de octubre de 2016.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2015). [En línea]. SEMARNAT. Consultado: abril de 2017. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/servicios-ambientales/>
- Cutini, A.; Chianucci, F.; Manetti, MC. (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *iForestBiogeosciences and Forestry* 6: 331 – 337. Disponible en: <http://www.sisef.it/forest/contents/?id=ifor0941-006>.
- Epstein, R. y C. Rogers. (2004). The impacts of CO₂ and climate change on public health in the Inner City. The Center for Health and the Global Environment-Harvard Medical School. <http://www.med.harvard.edu/chge>.
- FAO. (2011). [en línea]. La situación de los Bosques del Mundo 2011. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [última actualización 25 de marzo de 2012]. Disponible en: www.fao.org
- GDF (2003). [en línea]. Programa general de ordenamiento ecológico del distrito Federal (2000 – 2003), México. Consultado: febrero, 2017. Disponible en: <http://www.paot.org.mx/centro/programas/pgoedf.pdf>
- INECC. (2016). [en línea]. Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático Consultado: Febrero, 2017. Disponible en: <http://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/mecanismo-de-desarrollo-limpio-mdl>
- Kanninen K. (2001) [en línea]. Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo. Agroforestería para la producción animal en América Latina - II. FAO Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/Y4435S/y4435s09.htm>
- Larsson L.A. (2017). [en línea] Cybis Elektronik & Data AB. Disponible en: <http://www.cybis.se/forfun/dendro/newmath2/>



Anexo 1. Cédula de información de ANP (PAOT, 2009).

Cedula de Información Áreas Naturales Protegidas Identificación de la ANP		
1. Nombre del ANP	San Nicolás Totolapan	
2. Categoría	Reserva Ecológica Comunitaria	
3. Delegación	Magdalena Contreras y Tlalpan	
4. Decreto		
Decreto Presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación 29 noviembre 2006		
5. Superficie Decretada	1984.7 hectáreas	
5. Ubicación geográfica Coordenadas UTM NAD 27		
	X	Y
Punto No.		
1	468676	2132724
2	477137	2125456
6. Ubicación	Se encuentra al surponiente de la Ciudad de México.	
7. Colindancias:	Al oriente se encuentra muy cercano el Parque Ecológico de la Ciudad de México.	
8. Zonificación PDDU	Zonificación: PE Preservación Ecológica, Son las zonas que por sus características e importancia en el equilibrio ecológico deberán ser conservadas, restauradas y manejadas con criterios que conlleven a su recuperación. Además de ser zonas boscosas y en algunos casos deforestadas, que deberán ser recuperadas y preservadas de la invasión de asentamientos, permitiendo sólo actividades recreativas, deportivas y su explotación.	
9. Superficie ocupada por Asentamientos Humanos	0 hectáreas	







Estimación del almacenamiento de carbono de *Abies religiosa* en Suelo de Conservación de la Ciudad de México utilizando ecuaciones alométricas y dendrocronología.



Anexo 2. Formato de campo para capturar datos de DN y altura, en el recuadro inferior se anota el tamaño de la albura y el duramen de las virutas extraídas para dendrocronología.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
 Departamento de geografía económica
 Elaborado por Carrilic Maza, X. Aragón, 2016.



Fecha: _____ Responsable: _____ N: _____ O: _____ Altitud: _____ Orientación: _____

Zona: San Nicolás Parcela: _____ UTM: _____ % Pendiente: _____

Coordenadas

No.	DN (cm)	h (m)	No.	DN (cm)	h (m)	No.	DN (cm)	h (m)	No.	DN (cm)	h (m)	No.	DN (cm)	h (m)
Ar 1			Ar 61			Ar 81			Ar 101			Ar 121		
Ar 2			Ar 62			Ar 82			Ar 102			Ar 122		
Ar 3			Ar 63			Ar 83			Ar 103			Ar 123		
Ar 4			Ar 64			Ar 84			Ar 104			Ar 124		
Ar 5			Ar 65			Ar 85			Ar 105			Ar 125		
Ar 6			Ar 66			Ar 86			Ar 106			Ar 126		
Ar 7			Ar 67			Ar 87			Ar 107			Ar 127		
Ar 8			Ar 68			Ar 88			Ar 108			Ar 128		
Ar 9			Ar 69			Ar 89			Ar 109			Ar 129		
Ar 10			Ar 70			Ar 90			Ar 110			Ar 130		
Ar 11			Ar 71			Ar 91			Ar 111			Ar 131		
Ar 12			Ar 72			Ar 92			Ar 112			Ar 132		
Ar 13			Ar 73			Ar 93			Ar 113			Ar 133		
Ar 14			Ar 74			Ar 94			Ar 114			Ar 134		
Ar 15			Ar 75			Ar 95			Ar 115			Ar 135		
Ar 16			Ar 76			Ar 96			Ar 116			Ar 136		
Ar 17			Ar 77			Ar 97			Ar 117			Ar 137		
Ar 18			Ar 78			Ar 98			Ar 118			Ar 138		
Ar 19			Ar 79			Ar 99			Ar 119			Ar 139		
Ar 20			Ar 80			Ar 100			Ar 120			Ar 140		
Muestra	2A	1B	2A	1B	2A	1B	2A	1B	2A	1B	2A	1B	2A	1B
Albura														
Duramen														
Madera tardía														



Anexo 3. Página web de Deskis y Aplicación Measure Height (Medir altura).



Metsahaldus

Windows arvutitel töötav kaarditarkvara, mis on mõeldud metsaomanikele ja metsaühistutele takseerandmete vaatamiseks ja metsamajandustööde planeerimiseks.

VAATA EDASI



Metsakorraldus

Windows arvutitel töötav kaarditarkvara, mis on tehtud metsakorraldajale kavade tootmiseks, nende trükkimiseks ja Metsaregistrisse saatmiseks.

VAATA EDASI

Kontakt

Peep Teppo

Tarkvarade müük ja tehniline tugi

Telefon: (+372) 5568 3266

E-post: peep[at]deskis.ee



Measure Height

Deskis OÜ Herramientas

★★★★ 329

Todos

Agregar a la lista de deseos

Instalar

