



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

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

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A

VERÓNICA ROMÁN MONTERO

DIRECTOR DE TESIS: M.EN. C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ

MÉXICO, D.F, DICIEMBRE 2012





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser un padre amoroso, sabio y justo conmigo, porque en su presencia más allá de los ojos me ha guiado por el camino correcto y me ha acobijado en su protección en lugares y situaciones riesgosas.

A mi maestro espiritual, por ser mi guía y fortaleza.

A mi familia.

A mi padre Felipe Albores H. que a pesar de estar poco tiempo en vida conmigo, me hizo feliz, me dio un cariño sin condición y fue mi ejemplo a seguir.

A mi mamá Guadalupe Montero, por estar conmigo y seguir aquí para compartir este logro.

A mis hermanos: Guillermo, Viridiana, Juan (q.e.p.d), y Sofía por ser los ladrillos de esta construcción, por acompañarme en las buenas y en las malas.

A mi sobrinos Andrea, Felipe Iván y Boni por distraerme en el momento necesario y alumbrarme con su luz.

A mis amigos.

Liliana Blancas, Soledad Márquez, Gilberto L. Magallón, Mario Alan Moreno, Karina Montiel, Vianney Díaz, Vanessa Rodríguez, Aglae Bocanegra, Alba Zamora, Vibina Mora, Suleyma Sánchez, Paulina Guzmán, Adrian Flores, MaFer Flores, Gabriela Bermeo, Sharet Rodriguez, Ilis Ortiz, Agus Palafox, Gustavo Emba, Leticia Garcia, Gabriela García, Carmen Padilla, Mauricio Olalde, Abraham Calderón, Tania Domínguez, Evelin de la Cruz, Joel Ruiz, a la familia Nuñez Barbina, por compartir bellos y malos momentos en mi formación, por las salidas que se pospusieron, por las salidas para despejarme, por creer en mi, por darme sus consejos, por hacerme reír hasta que me doliera el diafragma y las energías para continuar con este proyecto, mil gracias.

Elizabeth Martínez H., por ser mi amiga y compartir juntas esta travesía, los momentos de estrés, desesperación, histeria y felicidad.

A mis ejemplos a seguir.

A la Biol. Ma de Lourdes Roque Hernández. Por demostrarme la pasión y las maravillas de la biología y ayudarme a definir el camino que debería recorrer.

Dr. Víctor Manuel Chávez. Por toda la confianza que me dio al trabajar con usted, por enseñarme la importancia de la biotecnología y la botánica en la vida diario y por apoyarme en algún momento de mi vida a continuar mis estudios.

Dr. Raúl Silva, por abrirme las puertas de su laboratorio, por recibirme después de terminada mi estancia y permitirme realizar una de las cosas que más me apasionan, la inmunología.

Y si, al M. en C. Germán Calva Vázquez. Que durante el proceso de esta tesis no solo me formó como profesionalista, si no como ser humano, que confronto conmigo misma y me permitió ver de lo que soy capaz.

Y a una gran alma, y una persona especial en mi vida hoy y siempre, que jamás dudo de que yo pudiera terminar esto, y que cada vez que me daba por vencida me impulsaba a seguir, gracias Alan Jhoshet Sánchez Hernández.

“Lo que percibes es tu propia conciencia.

¡Como cambian las escenas cuando levantas ese telón!”.

Richard Bach.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
INDICE DE CUADROS.....	vii
RESUMEN.....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	2
2. ANTECEDENTES.....	4
3. PROBLEMÁTICA.....	9
4. OBJETIVOS.....	10
GENERAL.....	10
PARTICULARES.....	10
5. MARCO TEORÍCO.....	11
5.1 PRODUCTIVIDAD PRIMARIA BRUTA (PPB) Y PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA (PPN).....	11
5.2 ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA.....	12
5.3 SUMIDEROS DE CARBONO.....	13
5.4 MODELOS DE ESTIMACIÓN A PARTIR DE LA BIOMASA FORESTAL.....	13
5.4.1 MODELO ALOMÉTRICO (FUNCIÓN POTENCIAL).....	16
5.4.2 ECUACIONES DE BIOMASA ARBÓREA.....	17
5.6 ESTUDIOS SOBRE EL DECLINE FORESTAN EN LA CUENCA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	19
6. METODOLOGÍA.....	20
6.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	20
PARQUE RECREATIVO Y CULTURAL DESIERTO DE LOS LEONES.....	20
6.1.2 Descripción Geográfica.....	20
6.2 MUESTREO.....	22
CAPTURA DE DATOS DASOMÉTRICOS.....	22
6.2.1 DIÁMETRO A LA ALTURA DEL PECHO (DAP).....	23
6.2.2 ALTURA (h).....	23
6.2.3 PATRÓN DE MORTALIDAD Y PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE COPA.....	23
6.2.4 TOMA DE NÚCLEOS.....	23
6.3 LABORATORIO Y GABINETE.....	24
6.3.1 CONTEO DE ANILLOS.....	24
6.3.2 ESTIMACIÓN DE BIOMASA.....	24
6.3.3 MODELOS DE CONTENIDO DE CARBONO.....	25
6.3.3.1 CONTENIDO DE CARBONO EVALUADO POR ECUACIÓN DE ROJAS (2004).....	25

6.3.3.2	CONTENIDO DE CARBONO EVALUADO POR ECUACIÓN DE AVENDAÑO (2009)	26
6.3.3	ECUACIÓN DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE CARBONO EN DESIERTO DE LOS LEONES	26
6.3.3.1	PRUEBA DEL CONTENIDO DE CARBONO EN ROMAN-MANZANILLA (2010)	26
6.4	CAPTURA POTENCIAL DE CARBONO	27
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
7.1	CONTENIDO Y POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO	28
7.1.1	CONTENIDO DE CARBONO EVALUADO POR ECUACIÓN DE ROJAS (2004)	28
7.1.2	CONTENIDO DE CARBONO EVALUADO POR MODELO DE AVENDAÑO (2009)	29
7.1.3	CONTENIDO DE CARBONO ROMÁN (2011)	30
7.1.4	CARBONO ALMACENADO, MODELO MANZANILLA (Ajustado por Román EN UN BOSQUE VIRGEN)	32
7.1.5	CARBONO ALMACENADO, MODELO MANZANILLA (Ajustado por Román) EN BOSQUE NATURAL	33
7.1.6	CARBONO ALMACENADO, MODELO MANZANILLA (Ajustado por Román) EN BOSQUE DE EXPLOITACION	34
7.1.7	CONTENIDO DE CARBONO EN TRES TIPOS DE BOSQUE, MODELO MANZANILLA (Ajustado por Román)	35
7.1.8	POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO	37
7.2	FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CONTENIDO Y POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO	39
7.2.1	EDAD, ALTURA Y DN	39
7.2.2	PATRON DE MORTALIDAD Y PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE COPA	40
7.2.2.1	PATRON DE MORTALIDAD DE COPA	40
7.2.2.2	PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE COPA	42
7.2.3	SUCESIÓN ECOLÓGICA	44
8.	CONCLUSIONES	46
9.	RECOMENDACIONES	47
10.	BIBLIOGRAFÍA	48
	ANEXOS	51
	ANEXO 1. Ficha biológica de <i>Abies religiosa</i>	51
	ANEXO 2. Mapa de zonificación del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones	52
	ANEXO 3. Medición del diámetro normal al pecho (dap) de acuerdo a la posición del fuste, en <i>Guide To Monitoring Forest Carbon Store</i> (1997)	53
	Anexo 4. Patrones de Retención de Copa Realizados por la SAGAR (SAHAR,1984)	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rutas para estimar la biomasa total desde el volumen comercial.....	4
Figura 2. Flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal.....	11
Figura 3. . Componentes de la Producción Primaria Neta Aérea de un Bosque.....	12
Figura 4. Ecuaciones Alométricas.....	16
Figura 5. La ecuación alométrica transformada logarítmicamente.....	16
Figura 6. Zonificación del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones.....	20
Figura 7. Estructura de la parcela de monitoreo según Labau.....	22
Figura 8. Imagen satelital de las zonas de muestreo en el Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones.....	22
Figura 9. Relación trigonométrica para calcular la altura.....	23
Figura 10. Pulido de los núcleos.....	24
Figura 11. Conteo de anillos de crecimiento.....	24
Figura 12. Contenido de Carbono Almacenado (CAA), Evaluado por ecuación de Rojas.....	28
Figura 13. Contenido de Carbono Almacenado (CAA), Avendaño.....	29
Figura 14. Contenido de Carbono Almacenado (CAA) Román.....	31
Figura 15. Contenido de Carbono Almacenado (CAA) en un bosque Virgen Modelo Manzanilla (Ajustado por Román).....	32
Figura 16. Contenido de Carbono Almacenado (CAA), Bosque Natural Modelo Manzanilla (Ajustado por Román).....	33
Figura 17. Contenido de Carbono Almacenado (CAA).Bosque Explotación, Modelo Manzanilla (Ajustado por Román).....	34
Figura 18. Comparación del CAA en los tres tipos de Bosque según Manzanilla-Román.....	36

Figura 19. Contenido de carbono y potencial de captura de Abies religiosa, en el Desierto de los Leones.....	37
Figura 20. Relación entre Edad, DN y altura de Abies religiosa en el Desierto de los Leones.....	39
Figura 21. Patrones de mortalidad de copa en Abies religiosa, en el Desierto de los Leones.....	40
Figura 22. Porcentaje de retención de copa de Abies religiosa en el Desierto de los Leones.....	42
Figura 23. Porcentaje de cobertura vegetal en el Desierto de los Leones.....	44

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadro 1. Estudios Sobre El Contenido De Carbono En La Zona De La Cuenca Del Valle De México Y Anexas.....	6
Cuadro 2. Categorías Diamétricas Según Manzanilla (1974) En Base A La Distribución Diamétricas Del Oyamel.....	7
Cuadro 3. Características Físicas Y Biológicas En El Parque Recreativo Y Cultural Desierto De Los Leones.....	21

RESUMEN

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.

En México las ecuaciones alométricas usadas para calcular el contenido de carbono en los bosques, se han derivado de modelos en estudios extranjeros, por métodos destructivos o para especies en particular se emplean en otras. Estos modelos no contemplan situaciones reales de los ecosistemas ya que se han diseñado en predios de manejo forestal o poco perturbados.

En este estudio se elaboró un modelo de estimación del contenido de carbono de forma indirecta, en un bosque declinado, utilizando diferentes ecuaciones alométricas y comparando los resultados con tres tipos de bosque de oyamel, virgen, natural y explotado. El coeficiente de correlación del modelo del contenido de carbono obtenido fue de 0.95 en el modelo potencial y de 0.85 para el modelo lineal, por lo que es confiable para utilizarlo en oyamel en zonas que presentan decline. Los modelos alométricos se basan en el Diámetro Normal y Altura pero no se relaciona con estado de salud de copa.

En este estudio se incluyó el estado de salud de la copa, evaluando el patrón de mortalidad de la copa, % de copa muerta y el % de retención de copa, edad y etapa sucesional. Se obtuvo que la mayoría de los individuos muestreados en el Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones presentaron mortalidad irregular (MI) y % de muerte de copa del 50 %, el conteo de anillos mostro que los individuos tienen edad de entre 47, 82 y 104 años, la cobertura vegetal de la zona presentó un 40 % de dominancia del estrato herbáceo, 32% el estrato arbóreo y 28% de estrato arbustivo, por lo que se el Desierto de los Leones se encuentra en una etapa sucesional terminal

La edad, la etapa sucesional y el daño en copa, influyen directamente en la cantidad de carbono que puede capturar *Abies religiosa*, el metabolismo y la vitalidad disminuye con la edad, así que se hace más lenta la captura y asimilación de carbono.

Palabras clave: Modelos Alométricos, Productividad Primaria, Estado de Salud de la Copa, Contaminación Atmosférica, Decline Forestal.

1. INTRODUCCIÓN

Hace 50 años, por cada tonelada de CO₂ emitida, 600 Kg eran retirados por los sumideros naturales. En 2006 solo 550 Kg. eran secuestrados y la cantidad está bajando. La proporción de dióxido de carbono que permanece en la atmósfera después de la absorción de la vegetación y océanos se ha intensificado en los últimos 50 años, y muestra una disminución en la capacidad del planeta para absorber las emisiones antropogénicas (Larios, 2008).

El Protocolo de Kioto está obligando a la comunidad científica y a los productores silvícolas a trabajar en la estimación de las cantidades de CO₂ que los sistemas forestales son capaces de incorporar y de emitir a la atmósfera, mediante estudios en los que se valoran las posibilidades de aumentar y mantener la fijación de C dentro de estos (Pérez, 2007) por lo que el uso de métodos de estimación de carbono y potencialidad de captura se prefieren sobre los modelos destructivos, los cuales aumentan la pérdida de bosques sumado a la tala clandestina y uso de suelo.

En México los modelos de estimación de carbono se han realizado a partir de ecuaciones diseñadas en el extranjero y con especies diferentes a las que habitan en nuestro país y algunas existentes son diseñadas en predios de manejo forestal y no en condiciones naturales. Entre los estudios más relevantes en la zona centro del país se encuentran los realizados por Rojas (2004) mediante el método destructivo en un bosque templado de pino y que con sus datos uso las ecuaciones de Brown (1984) las cuales fueron diseñadas en bosques tropicales.

Para oyamel derivan de los estudios realizados por Avendaño (2009) desarrollada en un bosque explotado, bajo el método destructivo. Flores (2010) determinó ecuaciones de contenido de biomasa en cada parte del árbol pero no el contenido de carbono total de todo el árbol. Pese a todo ello, no se han realizado modelos de estimación de carbono en bosque con decline forestal y no se han incluido el estatus del hábitat para conocer el comportamiento del carbono dentro del rodal, y la capacidad de sumidero que puede tener.

Se considera que el grado de decline altera la proporción de biomasa dentro del árbol, uno de los factores de estrés es el daño por ozono cuyo indicador es la clorosis, este deterioro modifica la estructura de la copa y la retranslocación de los nutrientes también impacta los compuestos de carbono (López, 2006).

En el presente estudio, se calculó el contenido de carbono obteniendo un modelo específico para Oyamel en un bosque con decline, que se originó a partir de la toma de datos que pudieran incluirse en una ecuación alométrica, se probó el ajuste de algunas ecuaciones previamente determinadas en México, por Rojas (2004) y Avendaño (2009). Su interpretación se asocio con los patrones de mortalidad de copa y porcentaje de retención de copa, y las categorías diamétricas.

La importancia de este diseño es que este modelo puede ser específico para el bosque de oyamel con decline y a partir de ello, se tomen las decisiones necesarias para llevar acabo reforestación o planes de manejo forestal considerando el estado de salud del mismo rodal, la extensión, baja densidad y el estrato vegetal herbáceo y arbustivo que evita la supresión de los brínzales en la Cuenca del Valle de México.

BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

A principios de los años ochenta, se desencadenó la alerta en Europa: *Nuestros bosques se mueren*. La contaminación atmosférica, especialmente las <<lluvias ácidas>>, fueron acusadas como las responsables del deterioro de las comunidades forestales.

Ante esta problemática surge el Proceso de Montreal, el cual identificó siete criterios y 67 indicadores como componentes esenciales de la conservación y el manejo sustentable de los bosques templados y boreales, entre ellos se encuentra el mantenimiento de la contribución de los bosques al ciclo global del carbono, ya que los bosques cumplen un papel importante en los ciclos globales del carbono, como sumideros. Al respecto, el Proceso menciona que es útil monitorear cambios en la capacidad productiva y que la presencia de factores imprevistos que afectan al ecosistema como los depósitos ácidos y los cambios climáticos provocan el decline. Es

importante conocer los flujos de carbono a través del tiempo, sobre todo para elaborar proyecciones a futuro con diversos escenarios que planteen el cambio climático (régimen de precipitaciones y temperatura) y con la longevidad de la especie arbórea, este conocimiento nos permite manejar mejor los balances de carbono dentro del ecosistema.

En 1992 Brown desarrollo las primeras estimaciones de biomasa, pero en bosques tropicales en la Amazonia, donde la tasa de reciclaje es mucho más rápida. La mayoría de los modelos para el cálculo de carbono corresponden a ambientes de producción forestal o bosques de clima cálido y poco se sabe en condiciones de decline, las relaciones alométricas entre el DN y la altura o el volumen para el cálculo de carbono son inciertos ya que los árboles asignan más carbono a reparación que a crecimiento y en consecuencia, existe una desviación en la asignación de energía.

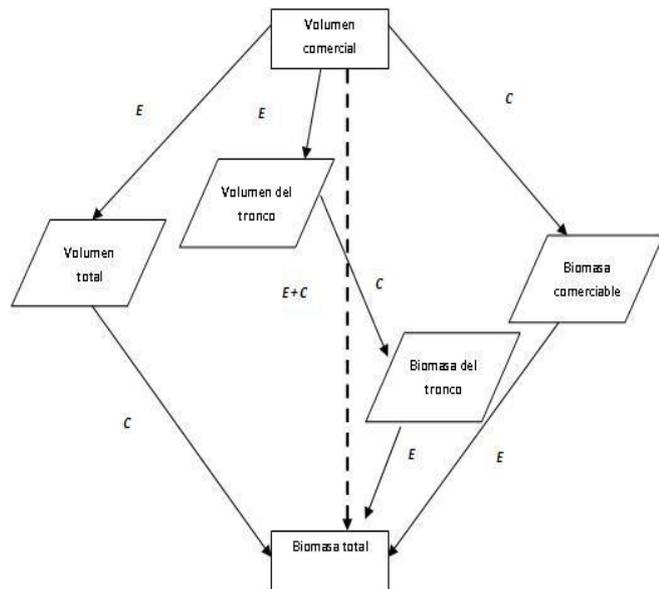
Estudios *in situ* nos acercan al conocimiento ecológico y del hábitat, ya que ingresan factores externos como: daño en copa, categorías diamétricas, además contribuyen a generar modelos propios. El hábitat en los que se desarrollan los bosques de oyamel ha sido alterado y eso repercute en la calidad del hábitat.

La especie *Abies religiosa* tiene importancia en la región de la Cuenca del Valle de México porque cohabita con cuatro especies de Pino endémicas (*Pinus hartwegii*, *Pinus ayacahuite*, *P. montezumae*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus*). Con el 70% de dióxido de carbono de las casi 7 millones de toneladas en la atmósfera de la Cuenca, se hace necesario conocer la capacidad que tiene ese bosque como sumidero de carbono, ya que de acuerdo a Larios (2008), la capacidad de remoción y secuestro del CO₂ se ven mermadas por la calidad del hábitat donde se desarrolla el Oyamel.

El presente trabajo pretende elaborar un modelo específico para un bosque de Oyamel, y que incluye un estado de salud del bosque, para conocer cómo se comporta el carbono dentro de la estructura de *Abies religiosa*

2. ANTECEDENTES

Los primeros cálculos para conocer el contenido de carbono en las masas forestales lo realizó Brown en 1984, diseñó una fórmula para calcular la biomasa al multiplicar el volumen por la densidad de la madera, esta ecuación alométrica ha sido muy utilizada. Más tarde (2002) Brown publica un artículo donde



analiza el estado actual y los desafíos futuros sobre la medición de carbono en los bosques, se centra principalmente en dos métodos para calcular el contenido de carbono y examina las ventajas y desventajas de cada uno de ellos; el primero son los factores de expansión de biomasa (BEF's, por sus siglas en inglés), los cuales se utilizan cuando se tiene reporte del volumen comercial de todas las especies para conocer el diámetro mínimo y transformarlo a valores de biomasa.

Figura 1. rutas para estimar la biomasa total desde el volumen comercial. E para la expansión, C para la conversión. Tronco se refiere a todas las partes del tallo incluidas, pero excluidas todas las hojas y ramas. Modificado de Somogyi (2005)

Al respecto Somogyi (2005) explica acerca de los BEF's que la estimación de la biomasa aérea desde el volumen mercantil o comercial se puede hacer por 3 vías: 1) expansión del volumen comercial total del árbol seguido de la conversión a biomasa 2) conversión del volumen de árboles comercial a la biomasa de la parte comercial del árbol seguido por la expansión de esta biomasa a la biomasa total del árbol 3) conversión y expansión, en un solo paso, desde el volumen comercial del árbol a la biomasa del árbol (Figura 1).

Si los inventarios forestales reportan datos individuales de los diámetros de los árboles o tablas del stand (número de árboles por unidad de área y por clase diamétricas)

estos datos pueden convertir directamente usando ecuaciones alométricas de regresión de biomasa, la inclusión de la altura en la ecuación mejora el coeficiente de correlación e incrementa la precisión (Brown, 2002). Brown sugiere que la base de datos para las ecuaciones de regresión de biomasa contengan árboles de mayor diámetro ya que estos tienden a contar como una gran proporción de biomasa aérea en bosques maduros: incluso del 30 al 40% de la biomasa aérea puede encontrarse en árboles con diámetros mayores de 70 cm, inclusive en los inventarios se asume que los árboles más pequeños (de 10 cm o menos) contribuyen poco al carbono total en biomasa de un bosque por lo que no deben ser medidos, sin embargo su contribución depende del estado sucesional del stand.

Somogyi (2005) expone al respecto de las Ecuaciones de Biomasa (BE, por sus siglas en inglés), que éstas relacionan la biomasa de los árboles muestreados a dimensiones que son fáciles de medir para un gran número de árboles, como son el diámetro a la altura del pecho y altura, la mayoría de las ecuaciones son de tipo potencial, las cuales pueden ser usadas para aproximaciones de la biomasa en un área, donde los estudios sobre biomasa de especies en particular no existen.

En México los estudios más recientes para el estudio del contenido del carbono en los bosques incluyen a Rojas (2004), Avendaño (2009) y Flores (2010). En el estudio realizado por Rojas (2004) para calcular el contenido y potencial de captura de carbono en un bosque de *Pinus hartwegii*, en el Parque Nacional “La Malinche”, se usó: 1) Ecuación trigonométrica para medir la altura, 2) Ecuación de volumen y 3) Factor de expansión de fustes para determinar la biomasa total del árbol.

El resumen de los trabajos realizados sobre cálculo del contenido de carbono, se encuentran en el cuadro 1, en ella se describe el autor, localidad, tipo de bosque, especie, Diámetro Normal (DN), alturas y el contenido de carbono calculado.

Cuadro 1. Estudios Sobre El Contenido De Carbono En La Zona De La Cuenca Del Valle De México Y

Anexas								
Autor	Zona	Tipo de bosque	Especie	DN (m)		Altura (m)		Carbono encontrado (tC)
				Expo. N	Expo. SE	Expo. N	Expo. SE	
Rojas (2004)	Parque Nacional la Malinche, Puebla	Natural (sin manejo forestal)	Pinus hartwegii	0.260	0.479	13.8	22.9	55,104.5
Avendaño (2009)	Tlaxcala	Explotado (manejo forestal)	Abies religiosa	0.05-0.79		7.91-42.45		1.6
Flores (2010)	Cerro Tláloc, Texcoco	Declinado	Abies religiosa	0.42		No muestra datos		4.68
	Desierto de los Leones, DF			0.60				5.17

Avendaño (2009) realizó ecuaciones alométricas específicas para *Abies religiosa*, a partir de un método destructivo y mediante las diferencias entre el peso húmedo y el peso seco se obtuvo la biomasa por partes y la sumatoria dio origen a la biomasa total, se relacionó la biomasa total con el DN de cada árbol mediante la ecuación de tipo:

$$Y=bX^k$$

Para obtener el contenido de carbono, se empleó la siguiente ecuación:

$$Ct=B*FC \quad \text{donde: B= Biomasa}$$

FC= Factor de contenido de carbono, determinado en laboratorio.

El contenido de carbono de cada árbol fue la suma del carbono del fuste, ramas y follaje y para obtener la ecuación alométrica para estimar el carbono se empleó el modelo alométrico que relaciona el contenido de carbono con el DN de cada árbol. El número de árboles muestreados fue de 26. El objetivo de Avendaño (2009) no fue

calcular el contenido de carbono de la zona, si no el desarrollo de una ecuación alométrica específica para oyamel.

Flores (2010) construyó ecuaciones de correlación entre el DN y cada parte del árbol para conocer el contenido de biomasa y con qué porción se relacionaba mejor, **pero no elaboró una ecuación de contenido de carbono**, esto, a partir de un muestreo destructivo, obtuvo ecuaciones a partir del peso húmedo y seco, la densidad de la madera y obtención de biomasa mediante un modelo previamente establecido.

Uno de los primeros estudios estructurales que se hicieron en México para el oyamel, fue el realizado por Manzanilla en 1974 en tres tipos de bosque (Virgen, Natural y Explotado) en Puebla y Jalisco.

Clasificó en siete categorías diamétricas a los árboles de los diferentes tipos de bosques (Cuadro 2.)

Cuadro 2. Categorías Diamétricas Según Manzanilla (1974) En Base A La Distribución Diamétricas Del Oyamel		La composición diamétrica de un bosque considerado Virgen posee el 56 % de árboles con DN de 10-40 cm se incluye también el 15% (porcentaje más elevado comparado con los otros tipos de bosque) con DN de 81-100 cm o más y el 25 % de árboles viejos que son mayores de 100 años, esto nos señala claramente que este tipo de bosque ha permanecido, por lo menos durante mucho tiempo, libre de cortas y de incendios.
CATEGORIA DIAMÉTRICA	DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA (cm)	
I	10-20	
I	21-40	
III	41-60	
IV	61-80	
V	81-100	
VI	101-120	
VII	121-140	
VIII	>140	

Los diámetros más delgados en el estudio de Manzanilla (1979) se encuentran en el bosque Natural donde el 79% tienen DN de 10-40 cm, y en este tipo de bosque

encontramos la menor parte (2%) de árboles con categorías diamétricas de 81-100 cm. En el bosque en Explotación el 79% se encuentran en las clases de edades de 10 hasta 60 años, pocos árboles sobrepasan los 100 años, el número de árboles es relativamente alto en las clases diamétricas de 41-80cm.

3. PROBLEMÁTICA

Para la estimación del contenido de carbono los métodos destructivos provocan la pérdida de bosque, las ecuaciones evitan esa pérdida de superficie boscosa, pero la cantidad de carbono fijado está siendo afectado por el decline que se presenta en el Desierto de los leones, determinado por diversas investigaciones publicadas por Cibrían (1988), Álvarez et al., (1998), Alvarado et al. (1999), Watmough and Hutchinson (1999), Zambrano and Nash III (2000), Rivera et al. (2006), Fenn et al. (2008) y Rosas-Rojas (2008), desde los 80s hasta fechas recientes el decline está bien documentado y este altera la proporción de biomasa que hay en cada parte del árbol (tallo, ramas y hojas). En la parte central de México, no se ha determinado una relación alométrica específica para el bosque de Oyamel del Parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones y no se han podido estimar la cantidad de carbono que se captura y en consecuencia pueda ser considerado como sumidero de carbono.

4. OBJETIVOS

GENERAL

Determinar el contenido de carbono en la biomasa de *Abies religiosa* y conocer el potencial captura de carbono que tienen sus bosques en el Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones (DDLL)

PARTICULARES

1. Emplear un método no destructivo de estimación de biomasa a partir del volumen (Ecuación de Grijpma (2001), usada en Rojas (2004)).
2. Calcular el carbono almacenado y comparar los resultados al usar las ecuaciones de Avendaño (2009) y Rojas (2004) para elegir la ecuación que mejor ajuste a la relación Diámetro Normal (DN) y Carbono almacenado, para el Desierto de los Leones.
3. Calcular el contenido de carbono con el modelo ajustado para el Desierto de los Leones, usando los datos de tres tipos de bosque según el estudio de Manzanilla 1974, para conocer el comportamiento del carbono antes de que se presentara el fenómeno del decline forestal.
4. Calcular el potencial de captura de carbono de *A. religiosa* en el Desierto de los Leones, en base al porcentaje de cobertura vegetal que presenta dentro de la comunidad forestal.
5. Inferir cómo la edad, etapa sucesional y el daño en copa influyen sobre el potencial de captura de carbono en *A. religiosa*.

5. MARCO TEORÍCO

Desde que comenzó la era industrial, en torno al año 1750, el consumo de combustibles fósiles ha desequilibrado el ciclo del carbono, las emisiones son mayores que la fijación de carbono y como resultado tenemos el aumento de carbono en la atmósfera, el calentamiento global y su cambio climático asociado.

5.1 PRODUCTIVIDAD PRIMARIA BRUTA (PPB) Y PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA (PPN)

Para mitigar el desequilibrio en el ciclo del carbono hay dos vías principales, una es reducir las emisiones y otra aumentar la fijación por medio de la fotosíntesis de los vegetales. Una pequeña parte de la energía radiante alcanza la superficie terrestre, alrededor del 2 por ciento, y es convertida por la plantas en energía química mediante la fotosíntesis; se denomina Producción Primaria Bruta (PPB).

Esta producción bruta puede ser utilizada en la formación de los tejidos vegetales (biomasa) o usada en la respiración. Así la producción primaria bruta menos la respiración de las plantas verdes (los productores primarios) determina una biomasa denominada Producción Primaria Neta (PPN).

La producción anual de los bosques se basa en un stock de de crecimiento que puede tener es de 30, 50, o más de 100 años de biomasa acumulada. La biomasa del tallo se acumula año tras año, y se convierte en una parte cada vez mayor de la biomasa total de la comunidad. La productividad primaria neta cambia con la edad, probablemente en relación con la curva de incremento medio anual de la madera del tallo (Spurr, 1982).

La producción primaria representa la mayor entrada de carbono y energía en los ecosistemas. Las plantas usan la energía almacenada en compuestos orgánicos fijados en la fotosíntesis para la respiración

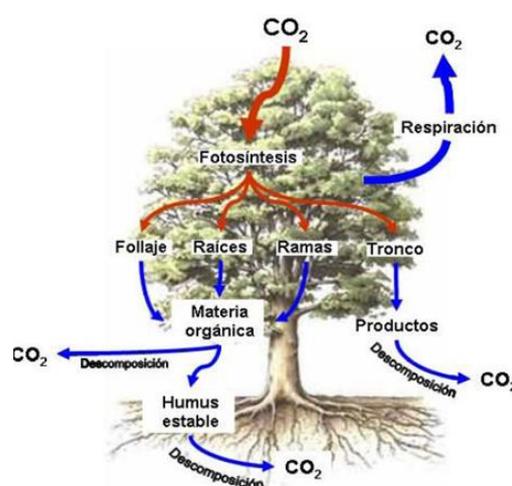


Figura 2. Flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal. (Fragoso, 2003. Tomado de Galeana, 2008)

autótrofa (Figura 2). El balance entre la fijación del carbono en la fotosíntesis y la pérdida de carbono en la respiración de la planta es la Producción Primaria Neta (Sala *et al.*,2000).

5.2 ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA

La estimación de la Productividad Primaria Neta comprende de dos niveles: producción aérea y subterránea. Cada nivel se estudia considerando sus compartimientos: para el caso de la Productividad Primaria Aérea se toman en cuenta los incrementos y las pérdidas de la Biomasa aérea (Figura 3). Para el caso de los bosques tienen dos componentes separados: el incremento en madera y producción de hojarasca, ambos componentes tienen tasas de retorno y metodologías diferentes (Salas *et al.*,2006). Todo ello pone de manifiesto que la vegetación tiene un papel primordial como sumidero de carbono y que, dada la actual tendencia ascendente de la concentración de CO₂ atmosférico, han de adoptarse medidas dirigidas a fomentar la capacidad de los sumideros naturales de carbono para contrarrestar esta situación.

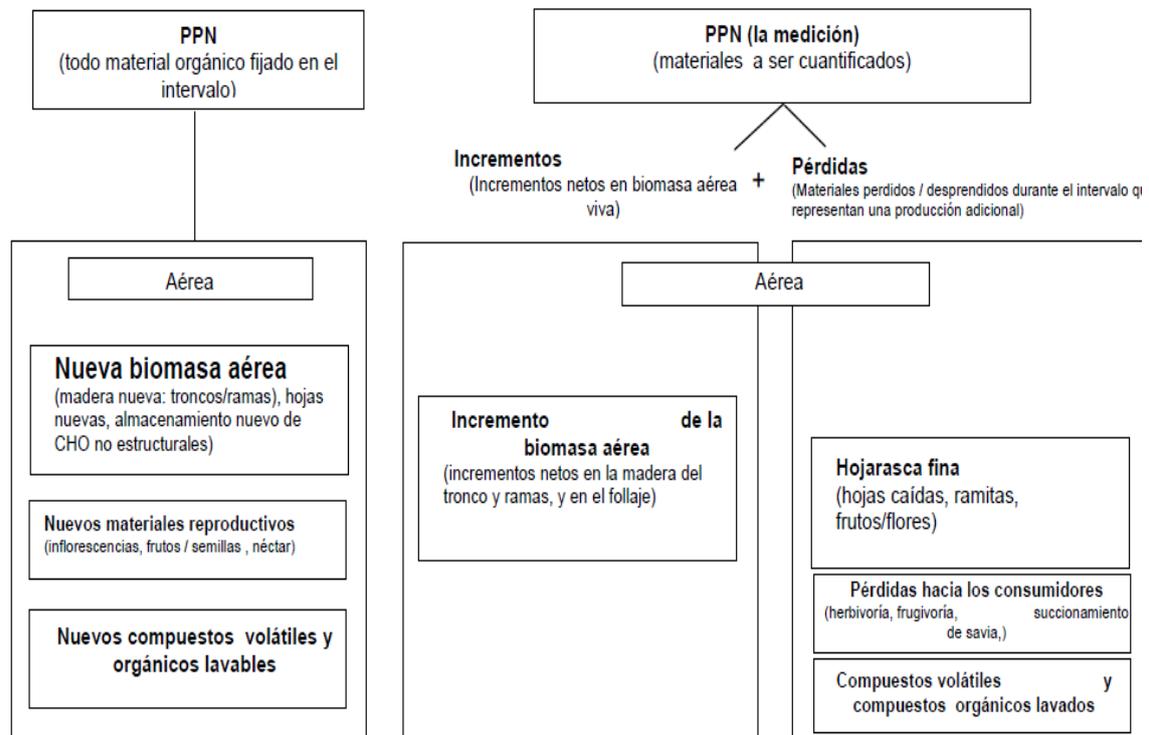


Figura 3. Componentes de la Producción Primaria Neta Aérea de un Bosque. CHO: Carbohidratos. Adaptado de Clark *et al.* (2001a).

5.3 SUMIDEROS DE CARBONO

Una parte muy importante del CO₂ del planeta es secuestrada por la vegetación, a través de su proceso de crecimiento. La superficie captadora de CO₂ de un árbol puede llegar a ser 1000 veces superior a la superficie que ocupa el propio árbol y está determinada por el índice de área foliar, esto es, la suma de superficie de todas sus hojas. De esta forma, los ecosistemas terrestres inciden de forma notable en el ciclo mundial del carbono. La cantidad de carbono que se intercambia anualmente entre la vegetación, los suelos y la atmósfera se estima en 125.000 millones de toneladas, cantidad que equivale a los dos quintos del intercambio total de carbono entre la tierra y la atmósfera.

Una vez asimilado el CO₂ mediante la fotosíntesis, el carbono se almacena tanto en la biomasa viva (madera en pie, ramas, follaje y raíces) como en la biomasa muerta (la hojarasca, los restos de madera, la materia orgánica del suelo y los productos forestales). Cualquier actividad que afecte al volumen de la biomasa en la vegetación y en el suelo provoca cambios en la capacidad para retener o liberar carbono de la atmósfera o hacia la atmósfera.

Por tanto se entiende por sumidero “cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero de la atmósfera” UNFCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) en 2006. Sin embargo la fijación de carbono considerada por el Protocolo de Kioto es aquella que depende directamente de la actividad humana y se ha desarrollado a partir de 1990, año base del Protocolo. En concreto, el Artículo 3.3 del propio Protocolo, únicamente considera la absorción de carbono por los sumideros debida a la actividad humana directamente relacionada con el uso del suelo, el cambio del uso de la tierra y la silvicultura (Camps,2004).

5.4 MODELOS DE ESTIMACIÓN A PARTIR DE LA BIOMASA FORESTAL

Hoy en día los modelos matemáticos son el método más habitual para estimar la biomasa forestal (Balboa *et.al.*, 2004). Las ecuaciones estiman el peso, como una forma captación de carbono, de las diferentes fracciones arbóreas como pueden ser raíces, tronco, ramas-ramillas y hojas, por ello se definen variables del árbol y de su

biomasa. Para su ajuste se tienen que conocer variables explicativas y se tiene que determinar el peso seco de las fracciones.

Cualquiera que sea la técnica para inventariar la biomasa forestal, tiene que incluirse la biomasa del árbol individual mediante las denominadas técnicas del “árbol tipo” y su agregación para determinar la biomasa total por unidad de superficie (Sato y Madgwick, 1982 en Balboa).

Las técnicas se basan en los factores de proporcionalidad entre una parte y el todo, esta metodología tiene un fundamento similar a la técnica “Ratio-Type Estimators” (Brigg. *et.al.*,1987 en Balboa *et.al.*,2006).

Otras dos técnicas más específicas con las que se estima la biomasa con muy poco sesgo son: Randomized Branch Sampling o RBS (muestreo aleatorio de sendas) e Importance Sampling (Valentine *et.al.*,1984); ambas comienzan la medición desde la base del árbol hasta una ramilla terminal de la copa, el primer segmento va de la base al primer verticilo, escogiéndose aleatoriamente una de las ramas y se le asigna la probabilidad de la selección (Pr).

Donde:

l_r = longitud de la rama

$d_{ins_r}^2$ = diámetro de la rama

$d_{ins_i}^2$ = diámetro de la inserción

n = ramas que constituyen el verticilo

El método de Importance Sampling se basa en la biomasa del tronco al igual que el RBs, el fundamento de esta técnica considera el conjunto de rodajas de grosor fijo y volumen conocido. Se selecciona una rodaja al azar con una probabilidad a su volumen, se determina su peso seco y se divide por su probabilidad de selección.

Donde:

D = del segmento a una distancia (L_s) del inicio de camino del tronco.

P_k = Probabilidad de elección de ese camino de muestreo.

Con los valores obtenidos, se ajusta en la fracción $S(L)$:

En la cual:

l = longitud del camino o tronco

V = Volumen aproximado del total del tronco

Un paso más es localizar un punto, a una distancia α del origen del camino de muestreo, cuya probabilidad de selección es proporcional a $S(L)$. Posteriormente se hace la transformación a peso seco (W_T) explicado en Balboa (2004).

Toda vez que sea determinado los pesos de las diferentes fracciones de los árboles medidos es necesario ajustar modelos matemáticos que relacionen los pesos con otras variables representativas del árbol o de su masa.

Las tres formas matemáticas propuestas por Pardé (1980), Snowdon (1985), Perresol (1999) para modelizar la biomasa antes descrita son:

Lineal:

No lineal:

No lineal:

Para lo que:

P = Biomasa total o de alguna de las fracciones del árbol

x = variables explicativas del árbol o de masa

β = parámetros del modelo

ε = error

5.4.1 MODELO ALOMÉTRICO (FUNCIÓN POTENCIAL).

Con las mediciones de los componentes del árbol (tallo, ramas y hojas) obtenidos en los métodos destructivos es posible ajustar modelos matemáticos que relacionen los parámetros del árbol tales como diámetro, altura o

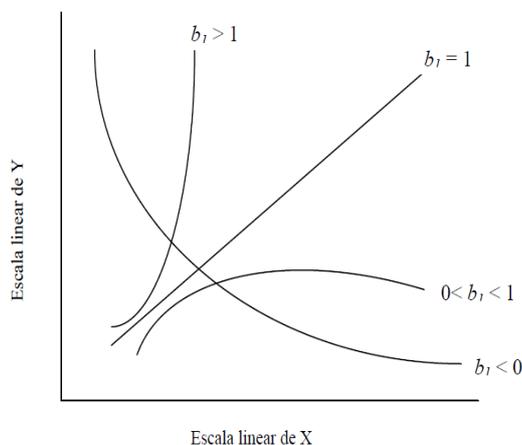


Figura 4. Ecuaciones Alométricas (SMA,---)

alguna combinación de éstas.

La función potencial o alométrica (figura. 4) tiene mejor ajuste entre estas variables que las funciones de tipo lineal, simples o polinomiales. Sin embargo en biología el procedimiento de ajuste de este modelo requiere de la aplicación de logaritmos en ambos lados de la ecuación para linearizarla, resultando en:

$$\ln Y = \ln b_0 + b_1 \ln X$$

En la Figura 5. Se muestra la ecuación alométrica transformada logarítmicamente, al cambiar las variables X y Y en sus logaritmos se estabiliza la varianza del error (Zar, 1968; Baskerville, 1972). Al usar este modelo se puede describir la forma en que la proporción relativa de materia seca asignada a cada órgano de la planta cambia con el tamaño de la misma, de acuerdo a la teoría de crecimiento alométrico (Baillan *et al.*,1991).

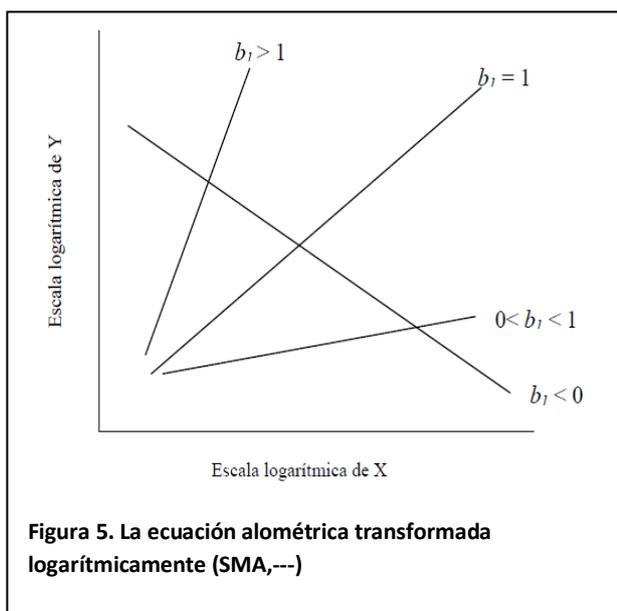


Figura 5. La ecuación alométrica transformada logarítmicamente (SMA,---)

5.4.2 ECUACIONES DE BIOMASA ARBÓREA

El cálculo de la biomasa seca para las especies forestales arbóreas tiene aplicación en los estudios de flujos de nutrientes en ecosistemas y cuantificación de carbono relacionado al cambio climático. (Bravo, 2007)

La construcción de los modelos de estimación de la biomasa específicos requiere de:

- a) Inventarios forestales
- b) Determinar Factores de Expansión
- c) Estimar la biomasa en diferentes escenarios

Para el calcular la biomasa es necesaria la cubicación del volumen de la madera en el tronco y las ramas del árbol vivo, después se multiplica por la densidad de madera. Las tablas de cubicación y de manejo para las masas forestales podrían proporcionar un material útil para la elaboración de modelos. En México no existe referencia de bases de datos para la elaboración de las ecuaciones, ni bases de datos como las de BASIFOR (Sistema para el Manejo del Inventario Forestal).

5.5 EL DECLINE FORESTAL Y LA CAPTURA POTENCIAL DE CARBONO

A principios de los años ochenta los botánicos europeos alertaron sobre la presencia de una misteriosa enfermedad de los árboles que se manifestaba como amarillamiento de las hojas y en subsecuente debilitamiento gradual hasta ocasionarles la muerte, denominando esto como *declinación forestal* (Granados, 2001).

El decaimiento forestal es uno de los problemas comunes de las naciones industrializadas que implica la reducción del vigor y sobrevivencia de los árboles de los bosques y dada la relación que existe entre los contaminantes originados por el hombre y otros factores ambientales tensionantes, los patólogos forestales definen a la declinación forestal como una enfermedad multifactorial. Es la acumulación de varias “enfermedades” causadas tanto por factores abióticos como bióticos, que propician el deterioro gradual del individuo en forma general. Consiste en la pérdida del vigor del arbolado, expresado a través de un amplio rango de síntomas, incluyendo la decoloración o follaje anormal, reducción del crecimiento, disminución del follaje,

rompimiento de las ramas y ramillas y enfermedades sucesivas, hasta llegar a la muerte de los árboles en un período más corto de lo normal (Carnier, 1986).

Carnier (1986), Manion (1981) y Kozlowski (1979) denominan a la declinación como “estrés ambiental”, al considerar que el decaimiento es un complejo, con muchos de los tensionantes actuando secuencialmente o colectivamente, sin embargo, aun no se ha determinado el factor crítico, aunque muchos investigadores como Schütt y Cowling (1985) consideran que la polución atmosférica (lluvia ácida) y sus efectos sobre el ecosistema (acidificación del suelo) es la uno de los principales agentes desencadenan estrés ambiental sobre el individuo.

Un bosque que presenta declinación muestra cambios en la función que tiene de capturar y retener carbono proveniente de la atmósfera en forma de CO₂, por lo tanto la cantidad de CO₂ capturado durante la fotosíntesis se ve reducido por daño en copa, el carbono disponible es utilizado no para producción de semillas o nuevas hojas, si no para la reparación de estructuras dañadas, por lo tanto los fotosintatos son translocados a los sitios de reparación, las tasas de crecimiento disminuyen su actividad como sumidero de carbono.

Los niveles de contaminación atmosférica tienen un impacto importante sobre la estructura y función de los bosques templados, Smith (1974) divide en tres clases el impacto sobre la vegetación. Bajo condiciones de baja descarga de contaminantes se designa la clase I, en donde la respuesta de los árboles individuales es indetectable y puede involucrar o no mínimas alteraciones fisiológicas. Si la descarga se incrementa se atraviesa el umbral de tolerancia de las especies y causa un efecto directo sobre la fisiología, reduciendo el crecimiento, la reproducción, aumenta la morbilidad, se reduce el vigor, biomasa y productividad (Clase II). En la clase III se incluye la morbilidad y mortalidad de las especies así como la pérdida de nutrientes, alteración en la estabilidad hídrica y de microclima a nivel del ecosistema.

5.6 ESTUDIOS SOBRE EL DECLINE FORESTAN EN LA CUENCA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

En los bosques localizados en el oeste y suroeste de la Ciudad de México se ha observado una declinación de oyamel *Abies religiosa* (H.B.K.) *Schl et. Cham* durante los últimos 258 años. Este fenómeno influye sobre la distribución de biomasa en los organismos. (López, 2005). El decline forestal está asociado con un amplio rango de síntomas como la escases y decoloración en el follaje, reducción en la talla de las hojas, mortalidad de ramas, reducción en las tasas de crecimiento, mortalidad de los árboles y una pobre regeneración de las especies.

En la década de los 80 De la Isla Bauer y colaboradores fueron los primeros en reportar la presencia de síntomas de decline en el bosque del Parque cultural y recreativo “Desierto de los Leones”, al suroeste de la Ciudad de México.

Los bosques cercanos a la Ciudad de México presentan altas concentraciones de ozono troposférico como principal agente causal (Alvarado,1993), contaminación atmosférica sobre *Abies religiosa*, manifestando clorosis debido a la pérdida de clorofila por las altas concentraciones de ozono en etapas de crecimiento del nuevo follaje, la clorosis no aparece en el viejo follaje cuando se suprime el crecimiento del nuevo, esto sugiere que la clorosis se vincula con la relación fuente-sumidero dentro de la planta.

El impacto en compuestos de carbono altera los patrones de distribución de biomasa dentro de las plántulas y está relacionado a transformaciones en el metabolismo de los fotosintatos además de que los factores de estrés alteran la distribución de la biomasa, en la cual se puede apreciar características morfológicas y fisiológicas anormales, el daño es acumulativo y varía de acuerdo al grado de decline.

En el Anexo 1 se encuentra a modo de tabla, las características, importancia ecológica, biológica y económica de *Abies religiosa*, pero principalmente se utilizó para este estudio, por ser sensible a cambios de temperatura, humedad e indicadora del estado de salud de la comunidad donde se desarrolla.

6. METODOLOGÍA

6.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La Cuenca de México se encuentra enclavada en una provincia que abarca parte del altiplano y del Eje Volcánico Transversal (Provincia Biótica Volcánico-Transversal), la que se caracteriza por presentar tres fenómenos fisiográficos: altitud superior a los 2,000 msnm, considerable número de depósitos lacustres y un activo vulcanismo (Ceballos y Galindo, 1984).

Los diversos grados de afectación de sus recursos naturales, ocasionados por el efecto acumulado de factores como la contaminación ambiental, los incendios forestales y el turismo desordenado. Por ello, el Desierto de los Leones es una de las áreas naturales más importantes dentro del Suelo de Conservación del Distrito Federal, ya que sus bosques de oyamel (*Abies religiosa*) y pino (*Pinus sp.*), generan servicios ambientales de gran importancia. La zona está catalogada como de capacidad moderada para la infiltración de agua y actualmente gran parte de sus manantiales son explotados para abastecimiento de agua de la zona urbana (CONAMP, 2004).

PARQUE RECREATIVO Y CULTURAL DESIERTO DE LOS LEONES.

6.1.2 Descripción Geográfica

Se localiza en la región central de la República Mexicana, al suroeste de la Cuenca de México. Pertenece a la unidad geomorfológica Sierra de Las Cruces, que forma parte del sistema montañoso denominado Eje Neovolcánico Transversal (Cantoral, 1986).

El Parque Nacional (Figura 6.) cuenta con una superficie decretada de 1529.00 ha. De acuerdo al plano oficial de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, el

Parque cuenta con una superficie de 1,523.95 ha; sus coordenadas UTM extremas son: 465261.25 m E y 2137029.52 m N; 468996.54 m E y 2129839.47 m N, en el anexo 2 se muestra

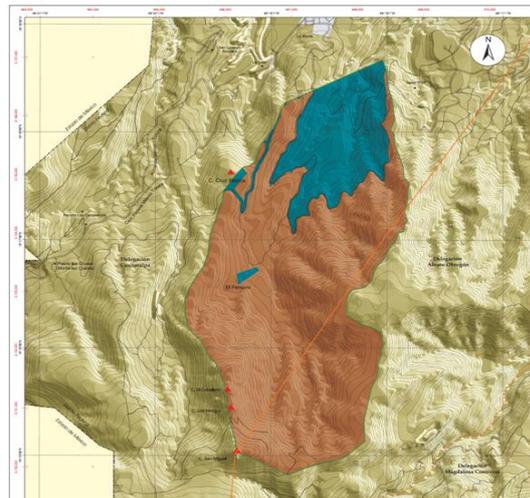


Figura.6. Zonificación del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones. CONAMP (2004)

el mapa de zonificación completo, las características físicas y biológicas del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Características Físicas Y Biológicas En El Parque Recreativo Y Cultural Desierto De Los Leones

		DESCRIPCIÓN
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Edafología	Origen volcánico, profundos, húmedos, ligeramente ácidos.
	Climatología	Templado con lluvias en verano, precipitación invernal con respecto al total es menor de 5 %.
CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS	Tipos de vegetación	Bosque de Abies-Pino- Quercus (2,800 a 3,000 msnm)
		Bosque de Abies religiosa (3,000 msnm) en la parte central del parque.
	Áreas de Reforestación	Bosque de Pinus hartwegii (3,600 a 3,780 msnm) Vegetación Secundaria en bosques de Abies donde han sido perturbados. En paraje Cementerio, con especies de Pinus patula, P. ayacahuite, P. montezumae, Cupressus lusitánica.

6.2.1 DIÁMETRO A LA ALTURA DEL PECHO (DAP).

El DAP se midió con una cinta diamétrica, a la altura de 1.3 sobre el nivel del suelo, según lo especificado en *Guide to Monitoring Forest Carbon Store* (1997) en anexo 3.

6.2.2 ALTURA (h)

La altura se midió con clisímetro, lejos del árbol para permitir ver la copa a través del clisímetro, como se muestra en la Figura 8 y con la siguiente fórmula:

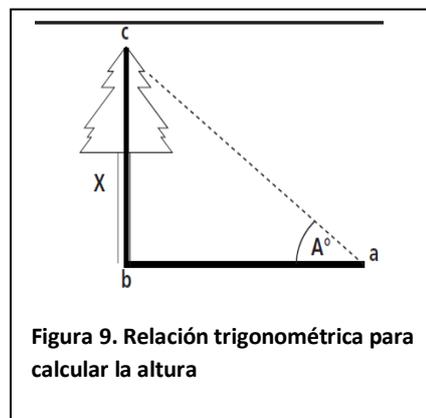
$$X = ab \times \text{Tangente } A$$

Donde:

X =Altura

ab = distancia desde el árbol

A = ángulo de elevación



6.2.3 PATRÓN DE MORTALIDAD Y PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE COPA

El patrón de mortalidad de la copa y el porcentaje de retención fueron registradas de acuerdo a la guía elaborada por la SAHAR (1984) ANEXO 4.

6.2.4 TOMA DE NÚCLEOS

En cada parcela y por círculo se extrajo un núcleo con un taladro Pressler, en dirección perpendicular a la pendiente, estos se recolectaron de individuos en el mejor estado de salud posible, es decir que no tuviese presencia de plagas, cicatrices de incendio etc.

Los núcleos guardaron en un tubo de plástico (popote), y se selló la perforación del árbol con un tapón de madera humedecida en solución de formol para evitar que algún agente patógeno atacara al árbol, los núcleos se llevaron al laboratorio para el conteo de anillos.

6.2 MUESTREO

CAPTURA DE DATOS DASOMÉTRICOS

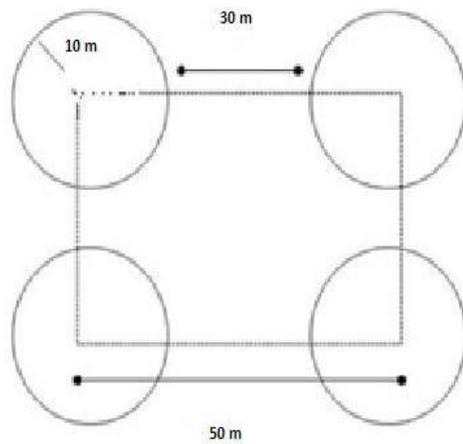


Figura. 7. Estructura de la parcela de monitoreo según Labau (1993).

La toma de datos se realizó por el método de punto por parcela (Figura.6) de Labau (1993), cada círculo cubre un área de aproximadamente 314.16 m^2 , el total por parcela es 1256.64 m^2 (es decir 1.26 ha) en 2 sitios del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones: 1) Cruz Blanca y 2) Casa Manero (Figura.7) Donde se tomó un inventario forestal por cada círculo, se midieron las siguientes características en estrato arbóreo: especie, DAP (diámetro a

la altura del pecho), Altura total, % de retención de copa, patrón de mortalidad de copa.

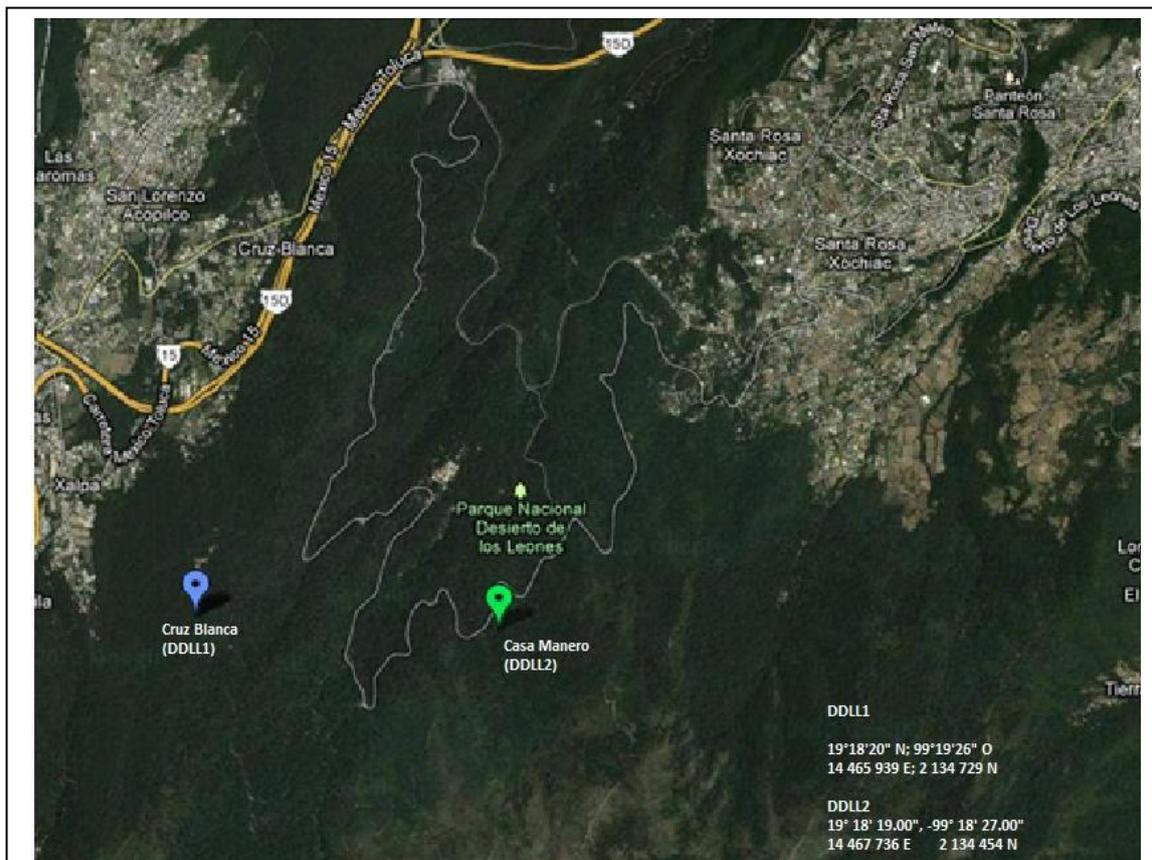


Figura 8. Imagen satelital de las zonas de muestreo en el Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones. Google INEGI 2009.

6.3 LABORATORIO Y GABINETE.

6.3.1 CONTEO DE ANILLOS.

Los núcleos se secaron en una estufa Kinet A 5387 a 40 °C durante tres días, una vez secos se fijaron con pegamento líquido en un bastidor de madera, conforme a la orientación vertical de las traqueidas del xilema, posteriormente se lijaron manualmente con lijas de papel de los siguientes grosores: 220, 120 y 60 (Figura 9).

A continuación colocó una hoja milimétrica como guía en el borde de cada bastidor se contaron en un estereoscopio los anillos y falsos anillos de cada uno de los núcleos (Figura 10).



Figura 10. Pulido de los núcleos.

Laboratorio de Contaminación Atmosférica.

FES Zaragoza



Figura 11. Conteo de anillos de crecimiento

Laboratorio de Contaminación Atmosférica.

FES Zaragoza

6.3.2 ESTIMACIÓN DE BIOMASA.

Se decidió utilizar una ecuación alométrica para la estimación de biomasa en lugar de un Factor de Expansión ya que estos solo son recomendables cuando se tienen datos sobre volúmenes maderables de la especie.

Con los DN de cada árbol se obtuvo su volumen, este dato se multiplicó con el coeficiente mórfico forestal, para obtener el volumen en metros cúbicos de acuerdo con la fórmula propuesta por Grijpma (2001):

$$V = (DN^2) * (0.7854) * (h) * (0.7)$$

Donde:

V= volumen (m³)

DN²= diámetro normalizado al cuadrado (cm)

0.7854= $\pi / 4$

h= altura del árbol (m)

0.7= coeficiente mórfico forestal

Una vez obtenido el volumen se multiplica por la densidad de la madera obtenida para *Abies religiosa*, para saber la biomasa de cada árbol en toneladas, de acuerdo con la fórmula propuesta por Brown (1984), la densidad de la madera se obtuvo de las monografías del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP,2003):

$$B= V * DM$$

Donde:

B= biomasa (t)

V= volumen (m³)

DM= densidad de la madera (t/m³)

6.3.3 MODELOS DE CONTENIDO DE CARBONO

Se utilizaron los modelos de Avendaño (2009) y Rojas (2004) para conocer el comportamiento de los datos obtenidos en el Desierto de los Leones y conocer el ajuste a los modelos anteriores.

6.3.3.1 CONTENIDO DE CARBONO EVALUADO POR ECUACIÓN DE ROJAS (2004).

Una vez obtenida la biomasa se utilizó la ecuación usada por Rojas en (2004) en la cual se multiplicó por el factor de expansión de fustes y la proporción de carbono en la biomasa del Oyamel en el Parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones.

$$CCA= B * 1.3 * 0.45$$

Donde:

CCA= contenido de carbono por árbol (tC)

B= biomasa (t)

1.3= factor de expansión de fustes

0.45= proporción de carbono en la biomasa seca (tC)

6.3.3.2 CONTENIDO DE CARBONO EVALUADO POR ECUACIÓN DE AVENDAÑO (2009)

Con los DN obtenidos en el Desierto de los Leones se usó la ecuación obtenida por Avendaño (2009) para conocer el contenido de carbono, en base a:

$$CAA = 0.0332 * DN^{2.5104}$$

Donde:

CAA: Carbono Almacenado (Kg)

DN: Diámetro Normal

6.3.3 ECUACIÓN DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE CARBONO EN DESIERTO DE LOS LEONES.

Una vez que se probaron las ecuaciones anteriores, se decidió tomar la que describiera mejor el contenido de carbono en Oyamel y la cual arrojó un mejor coeficiente de correlación entre variables. Dado que el tipo de bosque influye en el contenido de carbono, se utilizaron los datos de *Abies religiosa* en cada tipo de bosque (Virgen, natural y explotado) del estudio de Manzanilla (1974) en la ecuación Román.

6.3.3.1 PRUEBA DEL CONTENIDO DE CARBONO EN ROMAN-MANZANILLA (2010)

Se usó los DN promedio (para calcular el contenido de carbono almacenado) por categoría diamétrica de cada uno de los tipos de bosque del estudio de Manzanilla (1974) y se introdujeron en la ecuación ajustada por Román (2010) y se multiplicó por el número de individuos de cada categoría diamétrica propuesta en 1974, por Manzanilla.

$$CAA = 1.3376 * (DN)^{0.3831} * \# \text{ ind}$$

Donde:

DN= DN promedio por categoría diamétrica

ind= Número de individuos por categoría diamétrica

6.4 CAPTURA POTENCIAL DE CARBONO

Con el valor del Incremento Corriente Anual (ICA) tomado de las monografías del INIFAP (2003) se realizó un análisis dimensional para transformarlo de $m^3 ha^{-1}año^{-1}$ a $tC ha^{-1}año^{-1}$; con que se multiplico el ICA por la densidad de la madera y el contenido de carbono referente en la biomasa (Ordoñez et.al.,2008).

$$I_{esp}=(ICA)(d)(0.5)$$

Donde:

I_{esp} = Incremento de la especie en cuestión ($tC ha^{-1} año^{-1}$)

ICA= Incremento corriente anual ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$)

d= Densidad de la madera ($t (m^3)^{-1}$)

Se calculó el incremento en toneladas de Carbono anexando el la proporción de cobertura vegetal que cubrió el oyamel con respecto a herbáceas y arbustiva, con la siguiente formula tomada de Galeana (2008):

$$I_{cob}= I_{esp} * \% \text{ superficie de esta cobertura}$$

Donde:

I_{cob} = Incremento de Carbono por cobertura ($tC ha^{-1} año^{-1}$)

I_{esp} = Incremento de Carbono de la especie

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 CONTENIDO Y POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO

7.1.1 CONTENIDO DE CARBONO EVALUADO POR ECUACIÓN DE ROJAS (2004)

El coeficiente de correlación para este modelo fue de 0.8125 para la función lineal y 0.9698 para el modelo potencial. La menor cantidad de carbono que almacenó un individuo fue de 0.0052 toneladas de Carbono (tC) y 112,46 tC por zona muestreada.

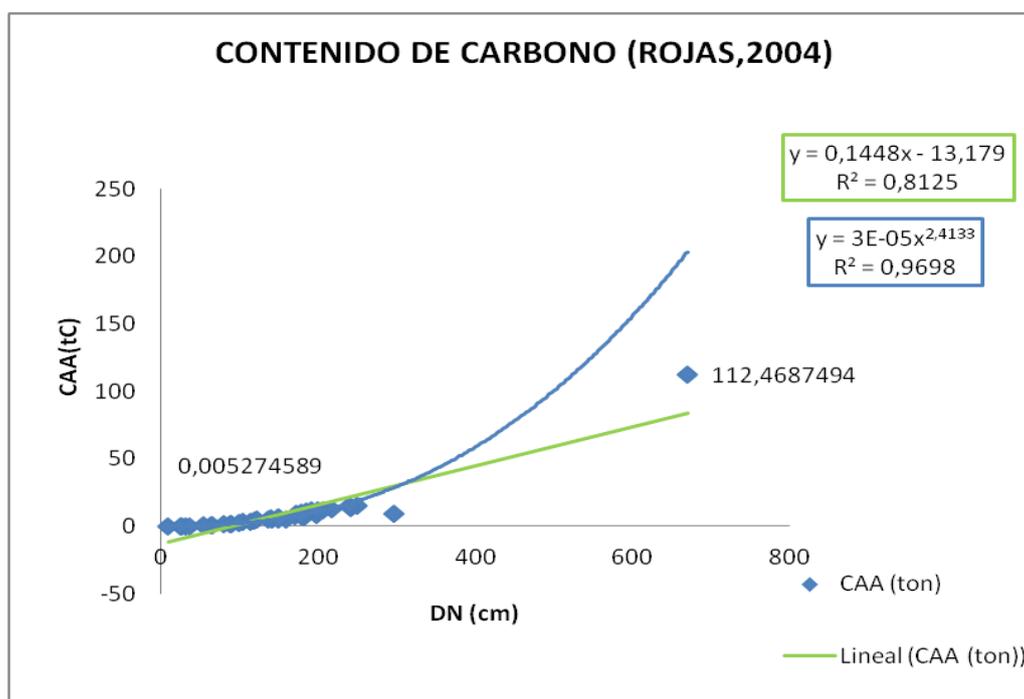


Figura 12. Contenido de Carbono Almacenado (CAA), Evaluado por ecuación de Rojas (2004). El coeficiente de correlación entre el DN y el CAA, en el modelo lineal es de 0.9698, mientras que en el modelo potencial el ajuste es de 0.8125, el CAA es cuantificado por Zona.

En la Figura 12 se observa que la cantidad de carbono es mayor 1) porque en el Parque Nacional la Malinche (zona donde se obtuvieron datos para el modelos de Rojas, 2004) se encontró mayor cantidad de individuos por hectárea muestreada, un total de 425 individuos (con DN promedios de 0.28cm, es decir que su tasa de incorporación de carbono es más elevada, aunque en principio su crecimiento sea apical). A este tipo de individuos se les clasifica como juveniles. En el DDLL se encontraron 38 individuos con

DN promedio de 0.53 m, 1.53m, 2.37m, a ellos se les considera árboles maduros y extramaduros en la clasificación de Harold (1984).

2) Esta zona no presenta aclareos ni un fenómeno de declinación que impida el flujo de carbono de nutrientes por daño en copa o depósito ácido, como el caso del DDLL, otra razón para tener mayor cantidad de carbono es que *P. hartwegii* tiene un mayor contenido de carbono debido a que tiene resinas y hemicelulosa, que contienen carbono.

7.1.2 CONTENIDO DE CARBONO EVALUADO POR MODELO DE AVENDAÑO (2009)

Se obtuvo un coeficiente de correlación de 1 para la función potencial, y de 0.8597 para la función lineal, la cantidad de carbono mínima por zona fue de 10.75 kg y el mayor de 53,548,3 kg.

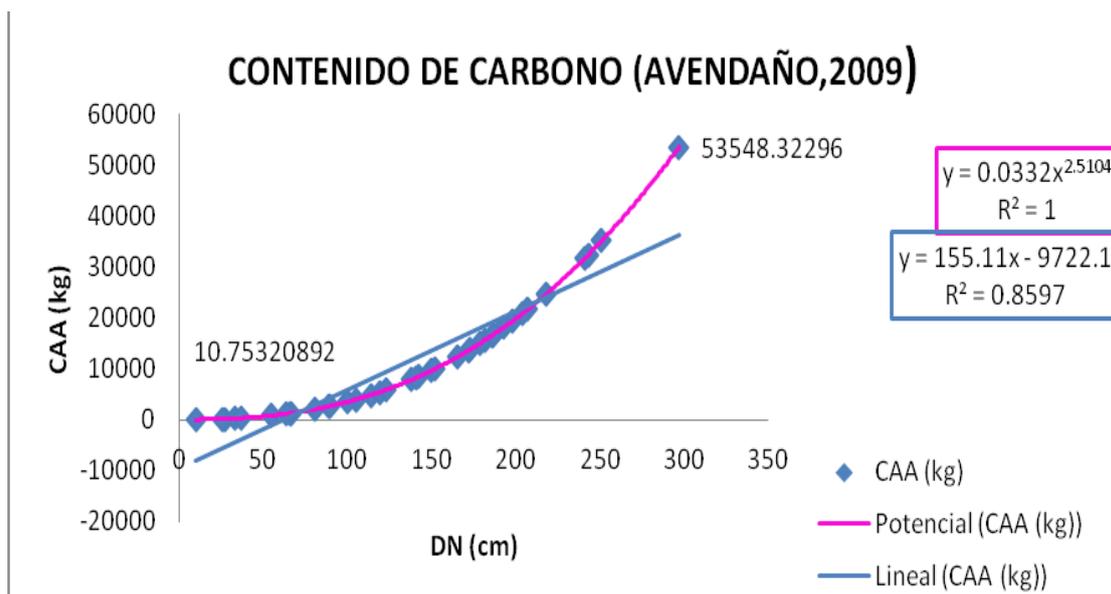


Figura 13. Contenido de Carbono Almacenado (CAA), Avendaño (2009). Con los datos de los individuos muestreados en el DDLL en el modelo de Avendaño (2009). El coeficiente de correlación en el modelo lineal es de 0.8597 y 1 en el modelo potencial. La menor cantidad de carbono que se capturó fue de 10,75 Kg y el mayor fue de 53548,32 Kg.

El modelo tiene un buen coeficiente de correlación entre el DN y el contenido de carbono almacenado. Comparado con el Modelo anterior (Figura 12), en el modelo de Avendaño (Figura 13) se alcanzó mayor cantidad de carbono en el mismo DN (10 cm)

esto se debe a que en un predio de manejo forestal no existe la competencia inter e intraespecífica, como en un bosque natural como lo es el Parque Nacional la Malinche.

En el DDLL los individuos son mayoritariamente adultos (o maduros) incluso pueden llegar a ser extremadamente maduros, cuando se encuentran ramas muertas en la copa. En las primeras etapas de desarrollo el crecimiento del árbol toma la forma de incremento en altura; esto predomina hasta la última etapa de poste cuando ya se aprecia un incremento en el diámetro. En la mayoría de las especies la tasa de crecimiento en altura es mayor en etapas de desarrollo, mientras que los diámetros son relativamente mayores en las etapas posteriores, una vez que los árboles han tenido la oportunidad de desarrollar su corona por arriba de las especies más pequeñas (Harold, 1984), en el predio de manejo forestal solo muestrearon individuos menores de 79 cm por lo que no cubre totalmente los DN encontrados en el DDLL que están por arriba de los 200 cm. Pese a la diferencia entre los DN con los que Avendaño realizó su modelo, y los DN obtenidos DDLL, se decidió seleccionarlo para ajustarlo a los datos colectados en el DDLL por que es un diseño específico para *Abies religiosa*, ya que el modelo de Rojas (2004) fue diseñado para *P. hartwegii* el cual tiene mayor cantidad de resinas y hemicelulosa, lo que utilizarlo sobreestimaría la cantidad real de carbono almacenado en oyamel.

7.1.3 CONTENIDO DE CARBONO ROMÁN (2011)

La función potencial tuvo un coeficiente de correlación de 0.9504 y 0.8536 para la función lineal. La cantidad mínima de carbono almacenado fue de 2.37 kg en arboles de 10 cm de DN y el contenido de carbono mayor fue de 10.8 kg en un individuo de 297 cm de DN.

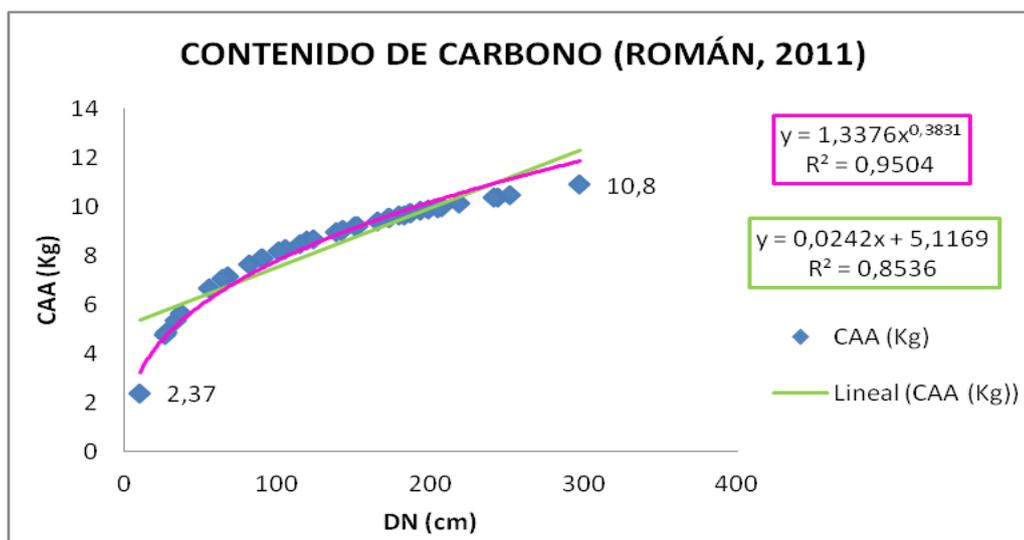


Figura 14. Contenido de Carbono Almacenado (CAA) Román (2011), se obtuvo buen coeficiente de correlación en la función potencial con un valor de 0.9504 y 0.8536 en la función lineal.

El modelo propuesto en la presente investigación y aplicado para los datos dasométricos de los individuos arbóreos del DDLL muestra que para el mismo DN de los dos modelos anteriores (Figura 12 y 12) presento un contenido de carbono menor, esto se debe a 1) La edad de los árboles. Los individuos oscilan entre los 80 y 90 años. Como se sabe llega un momento en que la captura y retención carbono se vuelve lenta y la tasa de incorporación se vuelve constante esto se puede observar en la función potencial y lineal (Figura 14) 2) Número de individuos mues, los cuales fueron muy pocos comparados con los muestreados por Rojas (2004), pese a que se muestreó poco más de 1 ha/parcela cabe denotar que las zonas fueron las más representativas del DDLL 3) Destino del Carbono incorporado. El carbono que incorpora oyamel no es utilizado para almacenamiento anual o producción de semillas, si no para la reparación de sus estructuras como follaje en condiciones de estrés.

Una vez que se obtuvo este modelo, los datos de Manzanilla (1974) se utilizaron para probar el comportamiento del modelo de estudio en tres tipos de bosques, Virgen, Natural y Explotado, para conocer el comportamiento del carbono en cada uno de estos.

7.1.4 CARBONO ALMACENADO, MODELO MANZANILLA (Ajustado por Román EN UN BOSQUE VIRGEN.

La relación entre el contenido de Carbono Almacenado y el DN para la función potencial tuvo de 0.5147 y 0,7913 de ajuste entre las variables. La cantidad encontrada de kg de carbono fue de 495.40 a un DN de 30.5 cm, mientras que la cantidad mínima fue de 17.66 kg en árboles de 140 cm de DN.

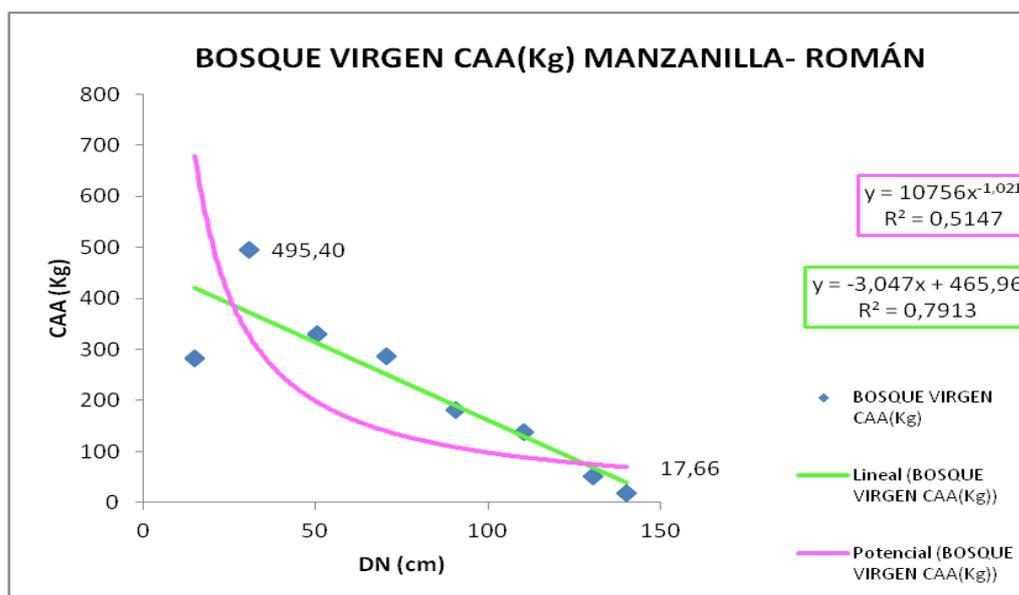


Figura 15. Contenido de Carbono Almacenado (CAA) en un bosque Virgen Modelo Manzanilla (Ajustado por Román) Encontramos una función que explica que conforme aumenta el DN, disminuye la tasa con la que absorbe carbono. La cantidad mínima que obtuvimos de contenido de carbono fue de 17.66 Kg y el máximo de 495,40 kg.

En esta función (Figura 15) se observa claramente que conforme el DN aumenta la cantidad de carbono que puede capturar es menor, en un bosque virgen su composición es principalmente de árboles viejos, Manzanilla (1974) expone que la vitalidad y la tendencia dinámica va mejorando hasta la categoría diamétrica 41cm - 60cm (árboles jóvenes) y disminuye hasta llegar al DN de 140 cm y que el incremento corriente anual (ICA) disminuye después de la categoría diamétrica de 81-100 cm.

El contenido de carbono decrece conforme aumenta el DN y se va volviendo constante, es decir que el metabolismo decrece drásticamente, se sabe que en las primeras etapas de desarrollo, oyamel captura mayor cantidad de carbono, pese a que tenga bajos DN para acaparar espacio y dominar sobre otras especies.

Cuando un bosque presenta la mayor cantidad de árboles viejos quiere decir que ha estado intacto de cortas ilegales, sin embargo este no es el fenómeno que está cambiando el flujo de carbono en el DDLL por lo tanto no puede tomarse como comparativo un bosque virgen.

7.1.5 CARBONO ALMACENADO, MODELO MANZANILLA (Ajustado por Román) EN BOSQUE NATURAL.

El contenido de carbono almacenado en árboles de *Abies religiosa* con DN de 30.5 cm fue de 1302.9 kg, y en DN de 130.5 cm se almacenó 8.64 kg de carbono, los valores que relacionan las variables en la función potencial fue de 0.789 y para el modelo lineal fue 0.7628.

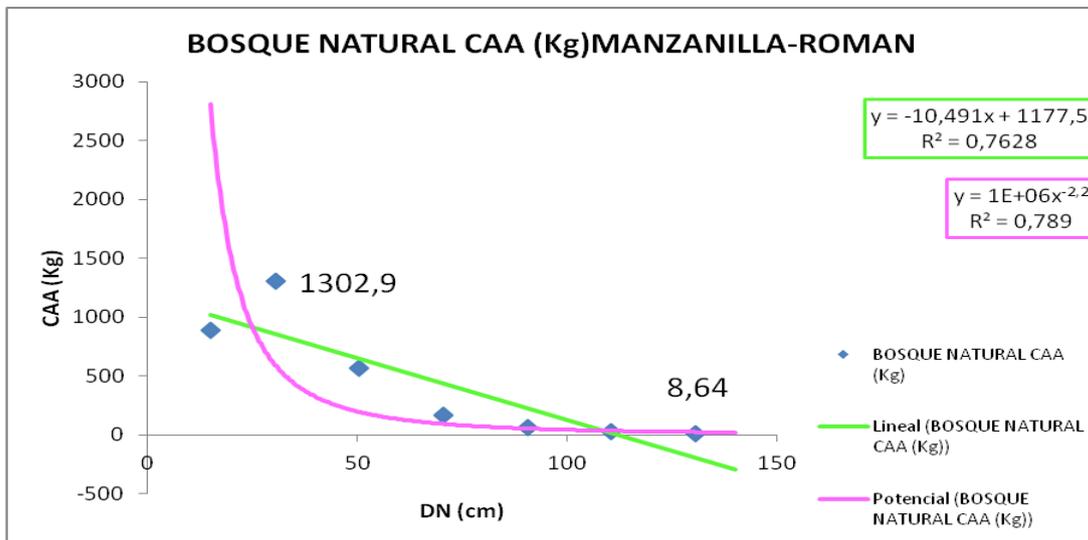


Figura 16. Contenido de Carbono Almacenado (CAA), Bosque Natural Modelo Manzanilla (Ajustado por Román). Usando los datos promedios de los DN por categoría diamétrica de Manzanilla en el modelo de Román, lo que encontramos fue que aumentó nuestro coeficiente de correlación de la función potencial con respecto al mostrado en la Figura 16.

Un bosque natural como lo describe Manzanilla (1974) es aquel que presenta cortas ilegales o incontroladas y su desarrollo ha sido influenciado por incendios, en el caso del modelo que se ajustó para el DDLL (Figura 16), no solo existen cortas sino que la zona también está influenciada por vientos contaminados provenientes de la ciudad, los cuales se desplazan hasta las copas de oyamel, por otro lado bosque natural debería tener una composición representada por árboles jóvenes o con edades aproximadas de 10-60 años, desde el punto de vista de Manzanilla la vitalidad y

tendencia dinámica del oyamel aumenta en promedio hasta la clase diamétrica de 41-60 cm.

Harold (1984) argumenta que en la producción de troncos se presenta un máximo de biomasa en el periodo temprano de vida y que a medida que la localidad envejece declina su proporción de biomasa potencial relativa, ya que son más vigorosas y son capaces de utilizar el potencial total de la condiciones de la localidad), sin embargo disminuye después constantemente hasta llegar al DN de 140, los árboles muestreados en el DDLL no son jóvenes, y se acercan cada vez más a los 140 cm por lo tanto el modelo se va volviendo asintótico, en cuanto a la cantidad de carbono que va capturando y almacenando, cuando alcanzamos los 130.5 cm de DN apenas se está capturando 8.64 Kg de carbono.

7.1.6 CARBONO ALMACENADO, MODELO MANZANILLA (Ajustado por Román) EN BOSQUE DE EXPLOITACION.

Los coeficientes de correlación entre en DN y el CAA en el modelo potencial fue de 0.1895 y para el modelo lineal fue de 0,153. La menor cantidad de carbono que se registró fue de 8.64 kg en un DN de 130.5 cm, la mayor cantidad se registró en DN de 50.5 cm y almacenaron 474.7 Kg de carbono.

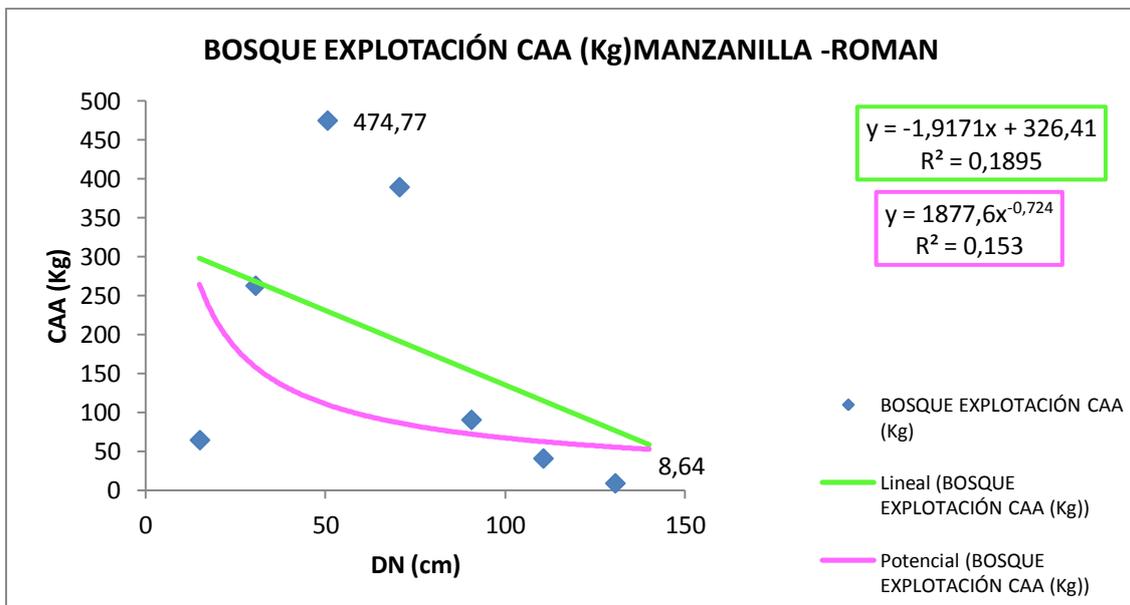


Figura 17. Contenido de Carbono Almacenado (CAA).Bosque Explotación, Modelo Manzanilla (Ajustado por Román). El coeficiente de correlación de la función potencial es de 0.153, mientras que la función lineal es de 0.1895.

La baja correlación de las funciones lineales y potenciales de un bosque en explotación (Figura 17) se debe a que la zona muestreada del DDLL no corresponde con una zona con manejo forestal controlado (Explotación) como lo define Manzanilla (1974). Él encontró que en este tipo de bosques tiene un alto número de árboles en las categorías diamétricas de 41-80 cm, es decir un 60%, mientras que en el DDLL esta categoría solamente cubre 12.5% por lo que es muy bajo el porcentaje de carbono que puede acumular el oyamel, ya que en estas etapas lo utiliza en sus funciones vitales, no tanto en almacenamiento en tronco, además que conforme avanza la edad y el DN, el metabolismo se hace más lento y puede capturar menos carbono.

La línea asintótica en el modelo potencial es menos pronunciada y no se acerca tanto a cero, Manzanilla (1974) explica que los bosques de manejo forestal asemejan una distribución asimétrica positiva que tiene a la normalidad por la cantidad de árboles con DN de las categorías III y IV, comúnmente en estos predios, los aclareos mantienen los DN y alturas que le convienen al productor forestal para obtener mejor calidad en la madera y reduce la proximidad física entre los árboles, lo cual disminuye la competencia de espacio, recursos nutrimentales, hídricos y lumínicos, por tanto aumenta su crecimiento, captura y retención de carbono. En el Desierto de los Leones no existe competencia interespecífica, pero el oyamel si compite con el estrato arbustivo.

7.1.7 CONTENIDO DE CARBONO EN TRES TIPOS DE BOSQUE, MODELO

MANZANILLA (Ajustado por Román).

Se encontró que el mayor contenido de carbono lo captura un bosque natural con 3017.9 kg, después le sigue el bosque virgen con 1783.6 kg y finalmente un bosque en explotación con 1330.15 kg.

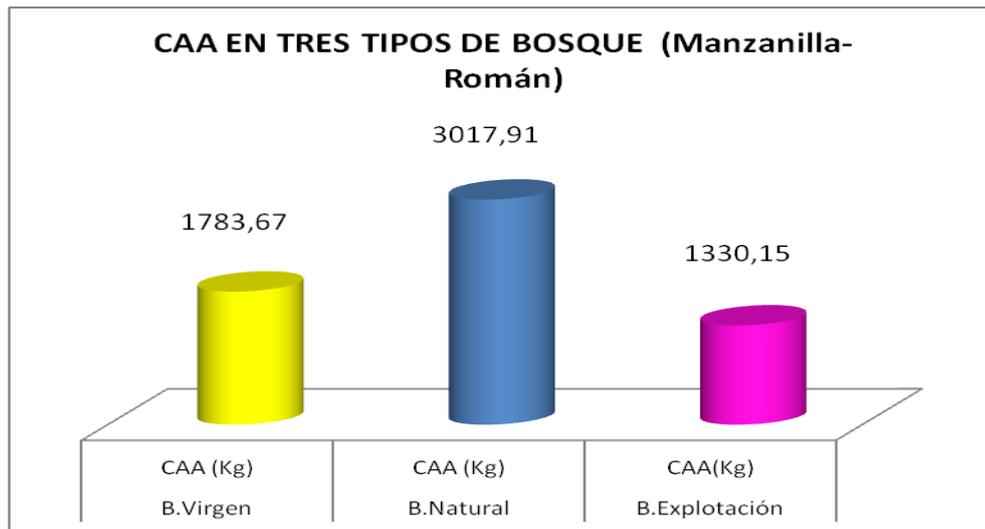


Figura 18. Comparación del CAA en los tres tipos de Bosque según Manzanilla-Román. Encontramos que la mayor cantidad de carbono almacenado lo encontramos en un bosque Natural y que el bosque en explotación conserva una menor porción de carbono comparado con el bosque Virgen con 1330.15 Kg.

En base a los modelos obtenidos se puede comparar la cantidad de carbono que debe tener cada bosque (Figura 18), y como se comporta este mismo usando los datos de Manzanilla (1974) en el modelo de Román.

Un bosque natural captura mayor cantidad que un bosque Virgen porque en este último está principalmente constituido por árboles viejos, normalmente en edades por arriba de los 125 años, en donde la tasa de incorporación se vuelve casi constante. Como lo sustenta Manzanilla (1974) la mayoría de los árboles con diámetros delgados se encontraron en el Bosque Natural donde cerca del 79% de ellos tienen un D.N. de 10-40 cm, posteriormente le sigue el Bosque Virgen con 56% y un bosque de Explotación 32%.

El bosque natural ostenta el mayor crecimiento absoluto de todos los tipos de bosque en las clases diamétricas de 10-20 cm y 21-40 cm, después disminuye constantemente, sin embargo en el bosque de explotación el DN es mayor y sobre pasa a los otros tipos de bosque a partir de la clase diamétrica 41-60. En lo recabado en el Desierto de los Leones se encontró poco contenido de carbono, en el bosque en explotación no coinciden con los DN con los del DDLL y no coinciden con las categorías diamétricas

que Manzanilla (1974) propone para un bosque de este tipo, por lo que el ajuste del modelo fue menor.

Al respecto del DN Harold (1984) argumenta que en las primeras etapas de desarrollo el crecimiento del árbol toma originalmente la forma del incremento en altura (es decir con DN muy delgados) esto predomina en la última etapa de poste cuando ya se aprecia un incremento en el diámetro, en las primeras etapas el carbono que se captura es utilizado para poder desarrollar los meristemos apicales y darle estructura a la copa y producir más carbohidratos para que el cambium, el xilema y el floema continúen desarrollándose. A medida que continúa esta transición durante la estación de crecimiento, esto permite la producción de células de madera durante el verano en el tallo y las raíces.

7.1.8 POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO

En las zonas de muestreo del Desierto de los Leones se encontró 0.16 tC ha^{-1} de carbono almacenado y un potencial de captura de 0.54 tC por ha, en comparación con Manzanilla (1974), un bosque natural debería almacenar $3,01 \text{ tC ha}^{-1}$.

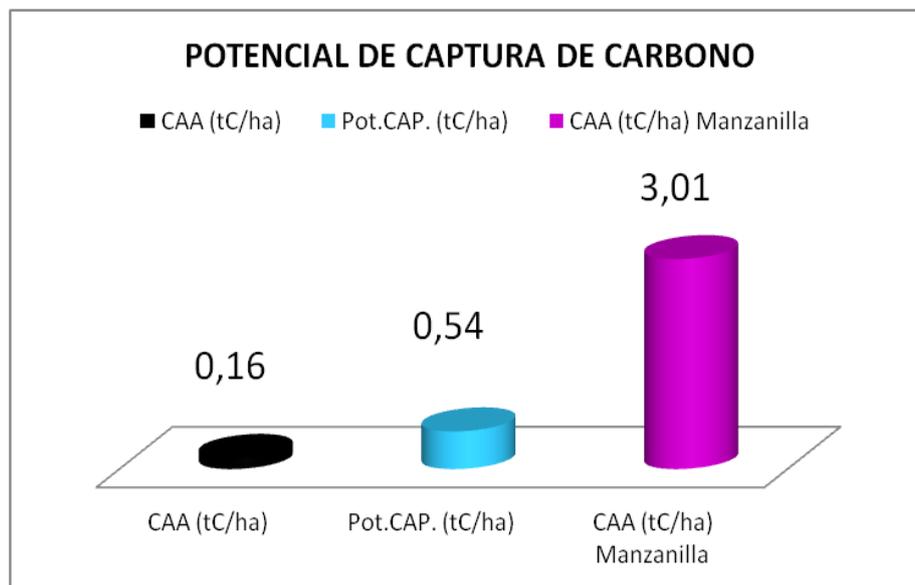


Figura 19. Contenido de carbono y potencial de captura de *Abies religiosa*, en el Desierto de los Leones.

El carbono almacenado por oyamel en el DDLL es de 0.16 ton ha^{-1} , comparado con las 3.01 tC (CAA tC ha^{-1} , Manzanilla), que podría capturar si el DDLL fuera un bosque natural, sin embargo este se encuentra en un proceso de decline y el potencial de captura solamente se limita a 0.54 tC ha^{-1} (Figura 19).

Esto se debe al bajo número de individuos que se encontraron en la zona, en la primera parcela (Cruz Blanca) 34 individuos mientras que en la segunda parcela (Casa Manero) solamente 7.

El contenido y el potencial de captura pueden estar influenciados por el daño que presenta la copa, ya que el 40% solo retiene la mitad de su follaje y el 30% de los especímenes presentan mortalidad del 75% de su copa.

Cuando la copa presenta daño, los demás órganos cambian su forma para mantener una estructura que le permita al árbol mantener estabilidad y permanecer de pie. López (2006) encontró el daño en el follaje por ozono provoca la retranslocación de otros nutrientes y que esto influye en la relación fuente- sumidero del carbono, lo que altera los patrones de distribución de la biomasa.

Además mientras la biomasa foliar disminuye la biomasa de la raíz también tiende a descender, dado que la raíz es la última en recibir los carbohidratos provenientes de las hojas, la caída de las hojas es una estrategia para mantener el balance entre la absorción de agua (raíz) y la transpiración en las hojas.

En el 2006, López en su estudio concluye que la disminución en la fijación de carbono puede ser impactada negativamente por la respiración en la acumulación desproporcional de madera en los nuevos brotes, lo que hace difícil que pueda regenerarse el oyamel.

Otro factor que alteró el potencial de captura de la comunidad es la edad que presentaron los individuos, los cuales se encuentran en etapas seniles, conforme avanza la edad, el metabolismo disminuye, también la cantidad de carbono que puede capturar para sus funciones vitales, por lo tanto tira parte de su follaje ya que no puede sustentarlo.

7.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CONTENIDO Y POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO.

7.2.1 EDAD, ALTURA Y DN

Se encontraron en promedio tres clases de edad (<50 años, 50< x <80 años, >80 años), 4 clases de altura (8.4 m, 17.57 m, 19.47 m, 22.93 m) y tres clases de DN (0.53 m, 1.53 m, 2.37m)

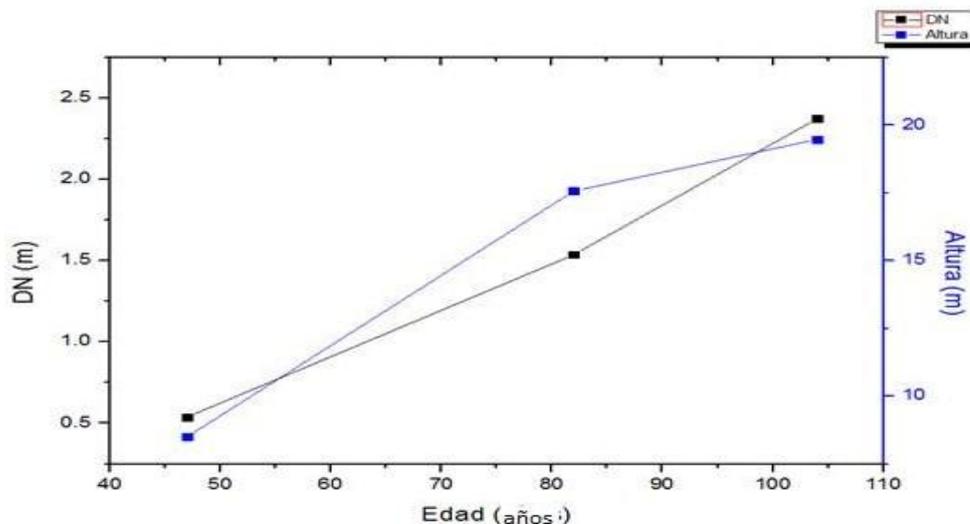


Figura 20. Relación entre Edad, DN y altura de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones.

En la Figura 20, los árboles de oyamel muestreados presentan alturas y DN menores (comparadas con las obtenidas en Rojas (2004), Avendaño (2009)), en edades jóvenes y maduras (Harold, 1984). Por ejemplo, en el predio de manejo forestal de Avendaño a un DN de 0.05 m se encontró una altura de 7.91 m, y en DN de 0.79 (máxima) se alcanzó una altura de 42.45 m, en tanto Rojas encontró a un DN de 0.260 m alturas de 13.8 m y en DN de 0.479m alturas de 22.9m.

Los DN, Alturas reducidos en Edades adultas se deben a diferentes condiciones de estrés que presentó el Desierto de los Leones, entre ellos los incendios de 1998 que afectó más de 400 h (Reforma, 2005), en 2002 un temporal derribó cientos de árboles enfermos por ozono y plaga de descortezadores, pero desde 1983 se hizo evidente el deterioro de *Abies religiosa* y *P. hartwegii*. (Martinez,2005)

7.2.2 PATRON DE MORTALIDAD Y PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE COPA

7.2.2.1 PATRON DE MORTALIDAD DE COPA

El patrón de mortalidad de copa más frecuente en *Abies religiosa* fue de tipo Irregular (MI) con un 65%, después la Mortalidad Ascendente (MA) con 32% y finalmente la Mortalidad Lateral (ML) con 3%.

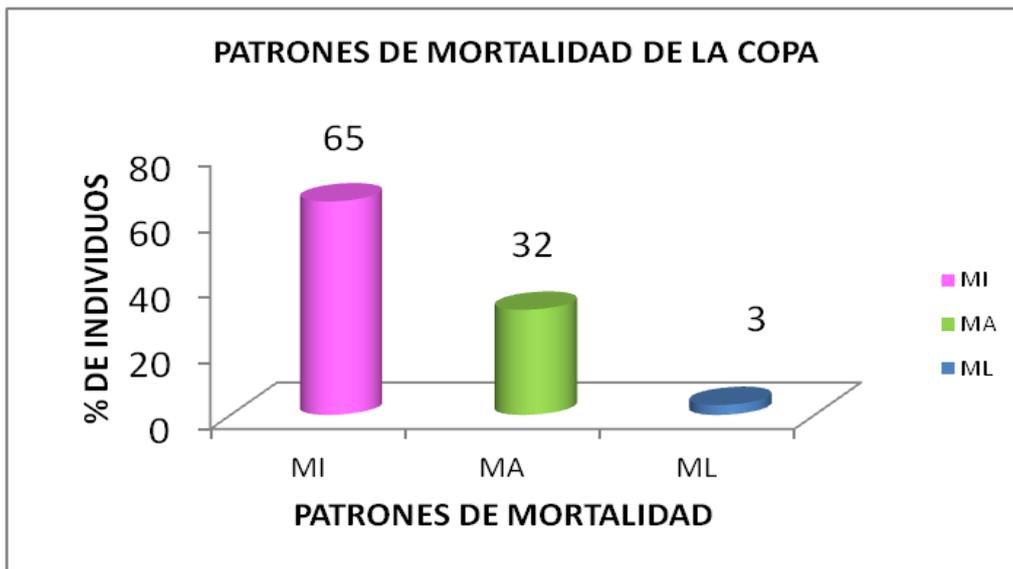


Figura 21. Patrones de mortalidad de copa en *Abies religiosa*, en el Desierto de los Leones.

En el Desierto de los Leones, la dirección del viento arrastra los contaminantes de la ciudad de México hasta depositarse en la copa de las especies arbóreas del bosque, especialmente *Abies religiosa*, se puede afectar la vegetación a tres niveles principalmente como lo explica Smith (1974) en la dosis de contaminantes clase II provoca una respuesta directa o indirectamente por parte de la vegetación en una discapacidad fisiológica en la cual se reduce su crecimiento, producción y morbilidad.

En una dosis clase III la pérdida de nutrientes, erosión, alteraciones del microclima e hídrica se reduce la estabilidad del ecosistema, esto provoca una morbilidad y mortalidad aguda de los árboles individuales.

En las zonas que muestreadas se encontró una baja densidad de árboles de oyamel, esto mantiene al suelo descubierto, ya que una de las funciones del estrato arbóreo es evitar la erosión, por ahora no se ha observado presencia de una fuerte erosión debido

a que el estrato arbustivo amortigua la desnudes del suelo, sin embargo es menor la protección que ofrece comparada con el estrato arbóreo.

Teniendo en cuenta que la mortalidad irregular (MI) es el patrón dominante (Figura 21), el daño en copa se debe a un estrés atmosférico de contaminantes, provenientes de la ciudad de México acarreados por los vientos predominantes. Sobre todo el ozono que es un fuerte oxidante y en el ambiente de la planta puede suprimir la fotosíntesis e incrementar la masa seca global.

Rosas (2006) mencionó en su reporte, que *Abies religiosa* presentó serios daños visibles en el follaje del año anterior en contraste con los brotes del follaje nuevo, esto hace pensar en daños ocasionados por aire contaminado, ya que las hojas de oyamel duran 3 años antes de caerse. Muchos *Abies* presentaron defoliación, aún en los adultos, si las hojas se dañan se secan y caen prematuramente por acción de los contaminantes, los árboles defoliados se debilitan progresivamente y son presa fácil de los descortezadores.

La mortalidad ascendente (MA) se relaciona con déficit nutrimental, la depositación ácida provoca la acidificación del suelo, este aumento en el pH afecta la disponibilidad de Ca, Mg, y P, y poner en movilidad aluminio y otros elementos tóxicos, el movimiento de estos nutrientes a otras estructuras de la planta a través del xilema en las raíces, sigue la misma dirección de las raíces a la parte superior, por lo que al no llegar adecuadamente los nutrientes, las hojas de la parte inferior empiezan a morir, en una trayectoria basipétala.

En Waring (1987) Withaker and Woodvell (1968) menciona que los forestales reconocen que un árbol saludable usualmente tiene una copa simétricamente distribuida a lo largo del tallo y que es un manera de predecir la salud del individuo.

En cuanto al porcentaje de retención de copa en *Abies* puede deberse a varias causas principalmente:

- 1) Edad de los individuos muestreados.
- 2) Efecto de los contaminantes atmosféricos.

7.2.2.2 PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE COPA

El 40% de los árboles muestreados presentaron solamente el 50% del total de su copa, el 35 % de ellos mantuvieron el 25% de su follaje, mientras que el 27% solo permaneció con el 75% de su estructura foliar, en un bajo porcentaje (3%) mantienen el 100% de su copa.

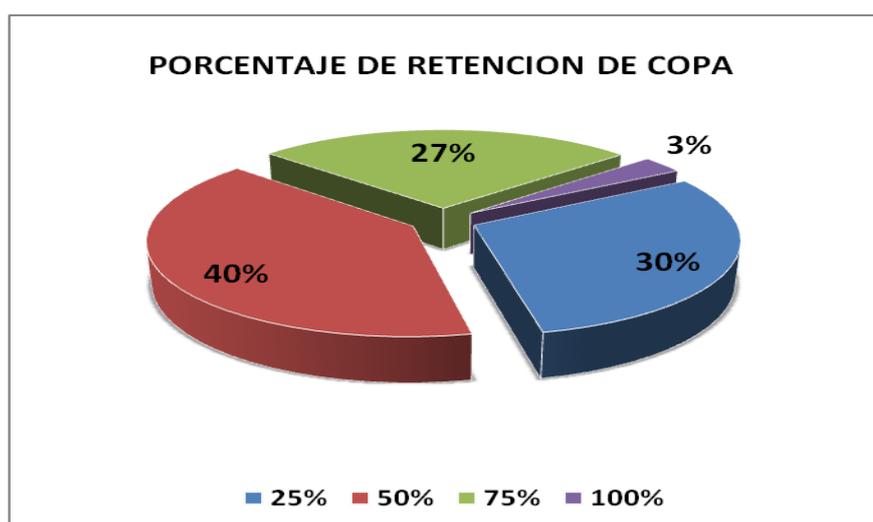


Figura 22. Porcentaje de retención de copa de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones

El elevado porcentaje de individuos (40%) que mantienen el 50% de su copa está relacionado con factores como Edad, exposición a los contaminantes atmosféricos, sucesión ecológica y se vuelve más crítico aún el hecho de que el 30% de los especímenes conserven el 25% de su follaje, es decir que perdieron el 75% de su biomasa fotosintética (Figura 22).

Aunque en Jiménez (---) no se trabaja específicamente con *Abies religiosa* si no con *Abies. vejari*, concluye que a medida que incrementa su edad disminuye el porcentaje de copa, es decir, a la edad de 20 años, esta especie retuvo el de 74% de su follaje, mientras que a la edad de 80 años conservó solamente un 61%. A partir de esa edad mostro una estabilización en lo referente al porcentaje de copa que mantenía.

La edad pudiese ser un factor importante para la perdida de la copa, en el oyamel se encontró que la cantidad de follaje retenido no fue constante a pesar de que

pertenecían a individuos de la misma edad, es decir, no se ve que la disminución vaya del 100% del total de copa al 75% de esta, si no que directamente los árboles retienen solamente el 50% de su copa total, además en el caso de *A. vejari* a la edad de 40 años, retiene 67% de su copa y a los 60 años solamente el 61% es poco la pérdida que va teniendo en un lapso de 20 años, y a los 80, no a perdido nada, en el Desierto de los Leones pese a tener edades promedio de 104, 82 y 47 la más joven, presenta pérdida de copa de 50% o más debido a la condiciones de su ambiente.

Tomando en cuenta el patrón de mortalidad, se afirma entonces que la causa de pérdida de copa es el estrés causado por la exposición de los vientos contaminados provenientes de la ciudad.

La National Research Council (1989) explica que la pérdida de área foliar, debido a la toxicidad de la contaminación del aire puede producirse a través de otro mecanismo de muerte celular, ya que los contaminantes causan senescencia prematura y la pérdida de follaje del arboles caducos o siempre verdes. Este proceso afecta la apariencia de la copa y provoca transparencias, esta transparencia es extensamente usado como indicador de daño por contaminación atmosférica, con lo cual en los bosques de Europa la pérdida de copa y las transparencias son considerados como bioindicadores del decline Schütt (1989)

La absorción directa de los contaminantes como el ozono y el dióxido de azufre, con el tiempo podría superar la capacidad de reparación de una planta e iniciar el daño y no solamente matar células individuales, si no que también induce la producción de resina y fenoles que rellenan y cubren la pared del tejido circundante hasta que muere. Este daño puede originar células engrosadas.

En la zona de muestreo, se la variación en el % de retención de la copa y este con el daño en copa no solo afecta la captación de energía si no la cantidad de carbohidratos y la relación fuente-sumidero alterando los patrones de distribución de biomasa dentro del árbol, esta variación depende de los diferentes tipos de estrés y el grado del mismo, la disminución en las reservas de carbohidratos y compuestos que sirven de defensa eventualmente reducen la cantidad de copa que posee el oyamel

En *Abies religiosa* la distribución de la biomasa cambia de acuerdo al grado de decline, la acumulación de la biomasa en diferentes órganos con respecto a la de las plántulas indica que mientras la biomasa foliar disminuye también lo hace la biomasa de la raíz conforme incrementa el daño.

Si se considera que el decremento de la masa foliar en la mayoría de los arboles dañados se debe en gran medida al grado de caída de las hojas es claro que la raíz es el órgano que recibe la última porción de carbohidratos y la caída de las hojas podría ser una estrategia de las plantas en decline para mantener el balance entre los órganos de absorción de agua (en raíz) y transpiración (hojas) y este imbalance también disminuye la cantidad de carbono fijado (López,2006).

7.2.3 SUCESIÓN ECOLÓGICA

Se encontró que el 40% de la superficie muestreada en el Desierto de los Leones, estaba cubierta por el estrato Herbáceo, 32% por el Arbóreo y 28% Arbustivo.

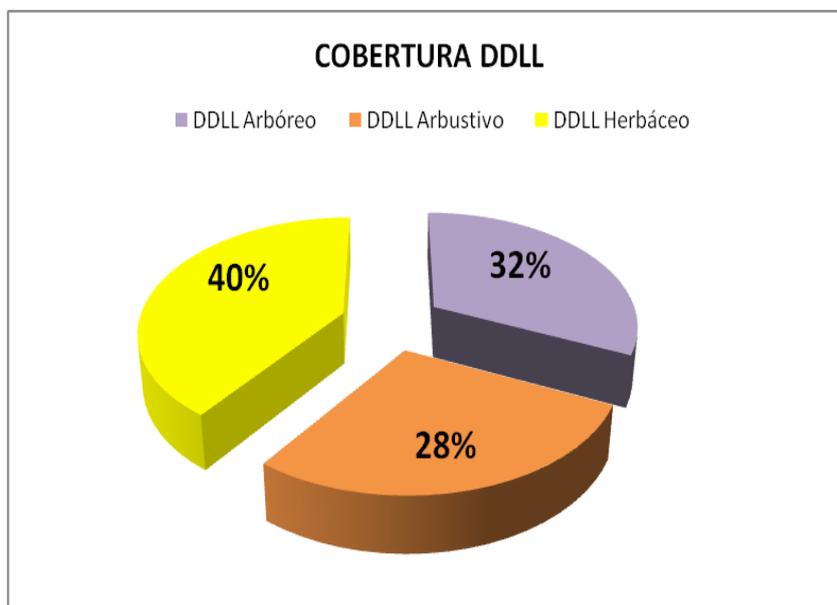


Figura 23. Porcentaje de cobertura vegetal en el Desierto de los Leones

Weck (1957) definió cuatro estados de estructura de bosques: Probosque, Bosque intermedio, Bosque principal, Bosque final. Un bosque dominado por herbáceas es

considerado como en etapa de sucesión intermedia, el segundo estrato es el arbóreo, esto supondría una condición juvenil de la especie arbórea, la cual ha superado al estrato arbustivo, sin embargo el estrato arbustivo solamente tiene un 4% de diferencia en superficie, sin embargo como el estrato dominante es el herbáceo el bosque va en tendencia a un estado retrospectivo o final ya que cuando los arboles mueren dejan espacio para la colonización del estrato arbustivo que ha sido desplazado ya por las herbáceas que soportan mejor las condiciones adversas de un suelo alterado, y condiciones ambientales que favorecen su crecimiento.

La característica de este estado es la culminación del bosque principal, donde hay estancamiento del crecimiento y sin regeneración, sin embargo también presenta características de probosque donde el estrato arbóreo tiene que competir con los arbustos, y claramente se ve que la masa arbustiva es la dominante y es aquí en esta zona donde la franja arbórea es menor comparada con los arbustos y las herbáceas, pudiendo deberse a la alta exposición de contaminantes atmosféricos.

En general en la zona muestreada del DDLL exhibe una etapa de sucesión con tendencia marcada hacia una etapa final, ya que el 40% de las especies son herbáceas, el 32% es arbóreo y finalmente muy cerca esta el arbustivo con 28%, pero la masa arbórea tiene una alta disposición a disminuir por el estrés ambiental al que esta sometido (Figura 23).

8. CONCLUSIONES

- El método no destructivo para determinar el contenido y potencial de captura de carbono a partir del Diámetro Normal y altura fue $y = 1.3376x^{0.3831}$ como el modelo más ajustado para el Desierto de los Leones.
- El uso de la ecuación alométrica potencial se recomienda para el cálculo de biomasa cuando no se disponen de datos volumétricos maderables, densidad y factor mórfico.
- Los modelos ajustados con los datos de Manzanilla (1974) tuvieron baja correlación debido a que el Desierto de los Leones no tiene características de ningún tipo de bosque (Virgen, Natural, Explotación) por ser un bosque desestructurado, y con decline.
- Al presentar solamente el 32% de superficie, el estrato arbóreo, representado por *Abies religiosa* posee menor cantidad de carbono almacenado (0.16 tC ha^{-1}) y con potencial solamente de 0.54 tC ha^{-1} comparado con un bosque natural que almacena hasta 3.01 tC ha^{-1} .
- El porcentaje de copa muerta y cantidad de copa que retiene, junto con la edad (árboles adultos en su mayoría), limitan la cantidad de fotosintatos que *Abies religiosa* puede fabricar, dado que el Desierto de los Leones presenta depósito de contaminantes atmosféricos, oyamel utiliza sus carbohidratos para reparación de estructura foliar.
- La edad, la etapa sucesional y el daño en copa, influyen directamente en la cantidad de carbono que puede capturar *Abies religiosa*, el metabolismo y la vitalidad disminuye con la edad, así que se hace más lenta la captura y asimilación de carbono. En la etapa sucesional donde oyamel está perdiendo espacios, se rompe el microclima adecuado en humedad y temperatura y si a esto se agrega la pérdida de copa, la cantidad de energía que puede capturar para realizar la fotosíntesis se ve disminuida.

9. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio dendroquímico en las zonas de muestreo, para conocer a fondo la translocación del carbono y el daño de tejidos de almacenaje, así como biomarcador de cambios por temperatura y condición nutrimental.
- Hacer análisis de suelo y precipitación en estas zonas para relacionarlo directamente con depósito ácido como *troughfall* y *stemflow* y déficit nutrimental, en este estudio solo se tomó en cuenta la sintomatología del decline.
- Calcular el ICA (incremento Corriente Anual) y la densidad de la madera, para conocer si estas propiedades varían en un árbol declinado.

10. BIBLIOGRAFÍA.

1. Alvarado. R. D.; De la Isla .B. M.L; Galindo. A.J. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. **1993**. *Environmental pollution*. 80. 115-121.
2. Avendaño. H. D. Estimación de Biomasa y Carbono En Un Bosque De *Abies religiosa*.**2009**. *Revista Fitotecnia Mexicana*.Vol.32, Núm.3., Julio-Septiembre. Pp. 233-238.
3. Biologic Markers of Air Pollution Stress and Damage in Forest. National Research Council. 1989.
4. Brown,S. y E. Lugo.**1984**. Biomass estimation for tropical forest: A new estimated based on forest volumes. *Science* .223. 1290-1293.
5. Brown. S. Mesuring Carbón In Forest: Current Status And Future Challenges. **2002**. *Enviromental Pollution*. 116. Pp.363-372.
6. Camps. A.M; y M.Pinto. Los sumideros de carbon en el Marco del Protocolo de Kioto. *Edafología* (11)(1).**2004**. pp.27-36
7. Cantoral H., M. T. **1986**.Comunidades liquénicas epifitas en *Abies religiosa* (H.B.K.) Chamy Schl. Como indicadores de contaminación atmosférica en el Parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones. Tesis profesional. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala. UNAM. México.
8. Carnier, L. Decline in Quebec's Forests; Assessment of the situation. **1986**. *Service de la REcherche Applique. Ministere del Energie et des Ressources*. Quebec.
9. Ceballos G.G y C. Galindo. L. Mamíferos silvestres de la cuenca de México. Limusa. 1984. México.
10. Cibrían, 1988; Air Pollution And Forest Decline Near Mexico City. *Environmental Monitoring and Assessment* 12: 49-58, 1989
11. Clark. A. Deborah. Measuring Net Primary Production In Forests: Concepts And Fields Methods. **2001**. *Ecological Applications*. 11 (2), 2001. pp. 356-370.
12. Cowling, E.B. Comparison of regional decline of forest in Europe and North America, the possible role of airborne chemicals, in air pollution effects on forest ecosystems. *Acid Rain Foundation*.**1985**. St Paul Minnesota. Pp. 217-234.
13. Fenn, M.E; Perea-Estrada, V.M: De Bauer, L.I: Pérez-Suarez, M; Parker, D.R.; Cetina-Alcalá V.M. **2006**. Nutrient status and plant growth efects of foreste soil in the Basin of Mexico. *Environmental pollution*.140: 187-199.

14. Flores N.P. **2010**. Impacto Del Proceso De Declinación Sobre La Productividad Primaria Neta En Bosques De *Abies religiosa*. Tesis de Maestría. Texcoco, Edo de México, México. Colegio de Postgraduados. 01-03-2012.
15. García, E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a la República Mexicana. **1988**. México.
16. Granados S.D y López R. G.F. Declinación Forestal. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* (7), núm. 001. Pp. 5-13. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
17. Grijpma, P. 2001. Producción Forestal. Ed Secretaría de Educación Pública (SEP)/Trillas, 4ª Reimpresión, México D.F. 134 p.
18. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. XII Censo General de Población y Vivienda. **2000**. Cuaderno Estadístico Delegacional No. 931765. Cuajimalpa de Morelos y Álvaro Obregón. D.F. México.
19. Intergovernmental Panel On Climatic Change, IPCC. 1996. Third Assessment Report- Climatic Change, The Scientific Basis.
20. Intergovernmental Panel On Climatic Change, IPCC. 2007. Fourth Assessment Report- Climatic Change., The Scientific Basis.
21. Kozlowsky, T.T. The growth and environmental stresses. Ed. University of Washington. **1979**.
22. Larios M. José. Calentamiento Global: Al Borde Del Limite. Instituto De Estudios Transnacionales (INET). España. **2008**
23. López L.M. Ángel. Biomass Distribution In Declining Sacred- Fir Seedlings. **2006**. *Interciencia*. Vol. 31. Núm. 6. 451-455.
24. Manion, P. Tree Disease concepts. Prentice-Hall Englewood cliffs. **1981**. New York. P.324-339.
25. Manzanilla H. Investigaciones Epidométricas y Silvícolas En Bosques Mexicanos de *Abies religiosa*. 2ª edición. Edit. México, 1974.
26. Ordóñez J.A.B., de Jong b.h.j., García-Oliva F., Aviña, F.L., Pérez J.V., Guerrero G., Martínez R. y Masera O., 2008, "Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, México", *Forest Ecology and Management*.
27. Pérez P. S. Modelización Del Secuestro Del Secuestro De Carbono En Sistemas Forestales: Efecto De La Elección De La Especie. **2007**. *Ecología*. Núm. 21. 341-352.
28. Programa De Conservación y Manejo Parque Nacional Desierto de Los Leones. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 1ª Edición. México, 2006.

29. Rojas. G. F. (2004). Contenido Y Potencial De Carbono En El Bosque De *Pinus Hartwegii* Del Parque Nacional La Malinche: Tlaxcala-Puebla. Tesis De Licenciatura. México. Facultad De Ciencias, UNAM. 19-11-2010.
30. Rosas P.I., Ruiz S. G. Calidad del Aire y la Relación Ciudad-Bosque en la Cuenca Atmosférica del Valle de México. 2006. UNAM, México.
31. Rzedowsky, J. 1978. La vegetación de México. Ed. Limusa. México.
32. Rzedowsky, G.C. de J. Rzedowsky y colaboradores. 2001. Flora Fanerogámica del Valle de México. 2º Ed, Instituto de Ecología, A.C. y CONABIO, Michoacán, México.
33. Sala, O.; Jackson, J.; Money, H. y Howarth, R. (2000). *Methods in Ecosystem Science*. Springer-Verlag. Berlín.
34. Salas J.R. Aboveground Net Primary Production In Some Ecosystems And Biomass Estimation In Forests Plantations. 2006. *Rev. For. Lat.* No 40. 47-70.
35. Schütt P. Symptoms as bioindicators of decline in European Forest. (1989). *Biologic Markers of Air Pollution Stress and Damage in Forest*. National Research Council
36. Smith H. W. Air Pollution: Effects on the structure and function of the temperate forest ecosystem. *Environmental pollution* (6). 1974. pp. 111-129.
37. Smith H.W. Air Pollution: Effects On The Structure And Function Of Temperate Forest Ecosystem. 1974. *Environmental Pollution* (6). pp. 111-129.
38. Somogy. Z., Indirects Methods Of Large-Scale Forest Biomass Estimation. 2006. *European Journal Of Forest Research*. 2007, VOL 126; NUMBER 2, Pp. 197-207.
39. Spurr. S y Barnes B. Ecología Forestal. AGT Editor S.A. 1982. México
40. UNFCC (United Nations Framework Convention on Climatic Change). 2006. Bonn Alemania.
41. Vernon J.L. Regional Monitoring Whit Plot Networks. 1993. *Environmental Monitoring And Assessment* 26. pp. 283-294.
42. Waring R.H Characteristics of Tree Predisposed to Die. 1987. *BioScience* (37). No8. 569-574.
43. Watmough, S., T. Brydges, and T. Hutchinson. 1990. Tree-ring chemistry of declining sugar maple in central Ontario, Canada. *Ambio*. 28(7):613-618.
44. Whittaker, R.H., and G.M. Woodwell. Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest. *Ecology*. 1968. 50. New York. 1-25.
45. Zambrano, A., and Nash III. T.H. 2000. Lichen responses to short-term transpiration in Desierto de los Leone, Mexico City. *Environ. Pollut.* 107: 407-412.

ANEXOS

ANEXO 1. Ficha biológica de *Abies religiosa*.

Abies religiosa (Kunth Schltld. et Cham.)



Origen: Árbol nativo de México

Forma Biológica: Árbol monóico de 30 a 40 m de altura, en algunas ocasiones hasta 60 m y diámetros normales de 1.8m.

Fenología (tipo de hoja): Perennifolia

Distribución en México:

Asociación vegetal: Bosque de coníferas, las masas puras formadas por esta especie son llamadas también bosque de *Abies*, bosque de Abetos o

bosque de Oyamel.

Coordenadas geográficas: entre los 17° 30' a 20° 00'' latitud norte y los 97° 104' longitud oeste.

Entidades: Distrito Federal, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, Estado de México, Guerrero y Tlaxcala.

Requerimientos ambientales:

Altitud (msnm): Media: Óptima 3,200; Mínima: 2,800; xima: 3,500

Suelo: Histosol, Inceptisol, Espodosol.

Características físicas y químicas

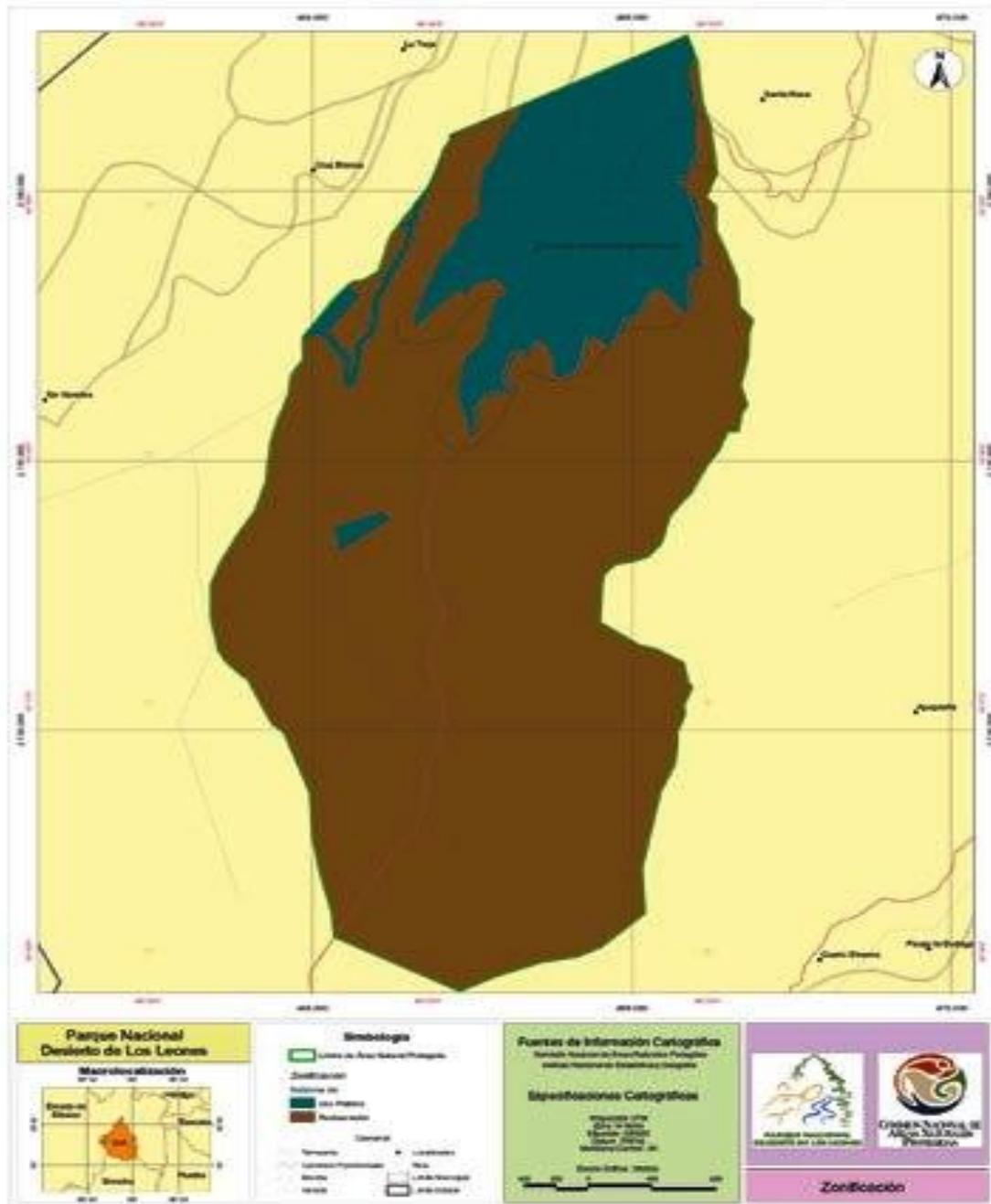
Profundidad y Drenaje: Generalmente profundos

Textura: Limo-arenosa, arcillo-arenosa, arenosa, bien drenados

Humedad aparente: Húmedos la mayor parte del año

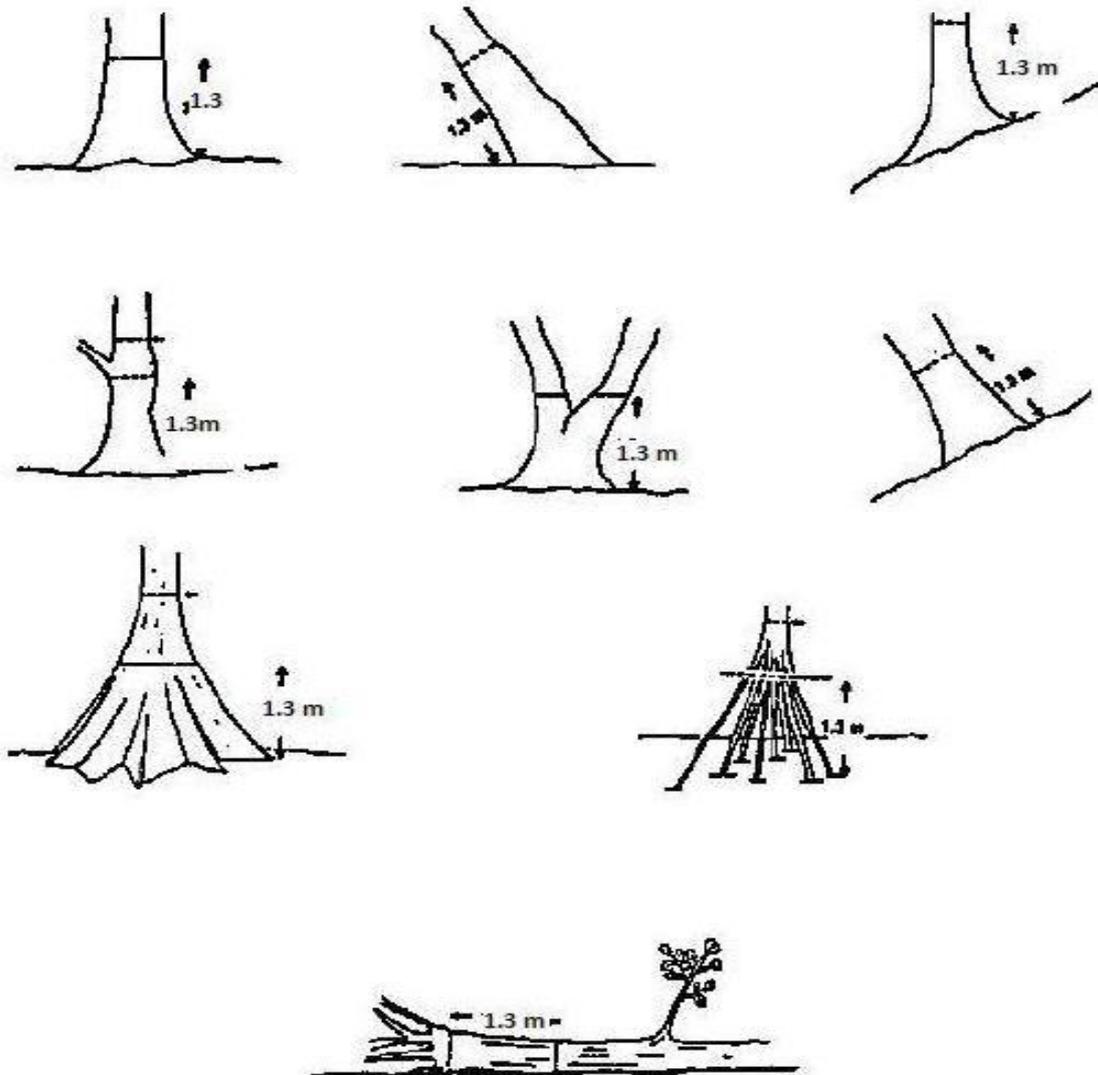
pH: de 5 a 7, muy ricos en materia orgánica, hasta 70%, especialmente en horizontes superficiales

ANEXO 2. Mapa de zonificación del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones.



www.conanp.gob.mx

ANEXO 3. Medición del diámetro normal al pecho (dap) de acuerdo a la posición del fuste, en *Guide To Monitoring Forest Carbon Store* (1997)



Anexo 4. Patrones de Retención de Copa Realizados por la SAGAR (SAHAR,1984)

% DE COPA RETENIDA	0	25%	50%	75%	100%
TIPO DE MORTALIDAD		1/4	2/4	3/4	4/4
Irregular (I)					
Descendente (D)					
Ascendente (A)					
Lateral (L)					

S = SALUDABLE
MP = MUERTO EN PIE

LABORATORIO DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
FES-ZARAGOZA UNAM