



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

**IMPACTO DEL PROCESO DE DECLINACIÓN
SOBRE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA
NETA EN BOSQUES DE *Abies religiosa***

PATRICIA FLORES NIEVES

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2010

La presente tesis titulada “**Impacto del proceso de declinación sobre la productividad primaria neta en bosques de *Abies religiosa***”, realizada por: Patricia Flores Nieves, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS
FORESTAL**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO Y DIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR:

DRA. MARÍA DE LOURDES DE LA ISLA
SERRANO

ASESOR:

DR. GREGORIO ÁNGELES PÉREZ

ASESOR:

M EN C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ

El presente trabajo se realizó gracias al financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Proyecto 61559-2006. Fisiología del proceso de declinación de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones. Parte del financiamiento provino de LPI-8: Impacto y Mitigación del Cambio Climático.

Los magos no sufren ante una pérdida porque solo lo irreal puede perderse. Aunque perdamos todo, lo real seguirá existiendo. En medio de los escombros de la devastación y el desastre hay tesoros ocultos.

Cuando busques entre las cenizas, mira bien (D. Chopra).

¿Y si durmieras?

¿Y si, en sueños, soñaras?

¿Y si, en el sueño, volaras al cielo y

allí cogieras una extraña y hermosa flor?

¿Y si, al despertar, tuvieras esa flor en la mano?

(S. T. Coleridge)

Dedicatoria

A mis padres Blas Esteban y Evangelina por brindarme una valiosa lección sobre el amor incondicional y a pesar de todo seguir regalándome tan valioso tesoro, gracias por no cortarme las alas.

A Lauro y Víctor mis hermanos que me han apoyado en momentos difíciles y sobre todo por sus palabras de ánimo, en estos últimos meses.

Al pequeño Kevin A. por recordarme la limpieza del alma y los instantes mágicos de cada día.

Agradezco a:

Yaz E. R., Ludmi H. M. T., Nestor R. V., Mary E. F y Dan C. F: Tantos mundos tanto espacio y coincidir en esta maravillosa irrealidad, gracias por estar en momentos de mi vida!!!

Mis amigos y colegas Biólogos de la Facultad, gracias por seguir compartiendo un poco de su vida conmigo (Lizbeth, Almalu, Carlos, Eric, Fer, Rigo, Cris, Kary, Hugo Silíceo, Manolo y Rogger) que con sus palabras influyeron para retomar el sendero.

Mis compañeros y amigos de generación de la Maestría gracias por su amistad, palabras y oídos (Arlett C. F., Mariana P. T., Oscar R. H., Dian C., Martín P. C y Jaime Azael).

Francisco M. Lara Viveros, por recordarme invaluable lecciones: el maestro dijo “Por los frutos conoceréis al árbol (Y. J)”, “la intención es el combustible, la voluntad el conductor (W. W. D.)”. Que Dios te llene de bendiciones e ilumine tu camino, fue un gusto encontrarte!!!

La familia Lara Viveros, Sra. Ma. de Lourdes Viveros C. por sus muestras de aprecio, palabras de aliento y su amistad, Susana del Rocío por tus palabras y largas charlas, fue un placer conocer a toda la familia y a los pequeños (Víctor y Nancy), tienen un lugar especial en mi vida.

Agradecimientos

- *Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante mi estancia de Maestría en el Colegio de Postgraduados.*
- *Al Proyecto 61559-2006. Fisiología del proceso de declinación de *Abies religiosa* en el desierto de los leones. Parte del financiamiento provino de LPI-8: Impacto y Mitigación del Cambio Climático.*
- *Al laboratorio de Contaminación atmosférica de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (UNAM) por la facilidad en la utilización del programa Windendro.*
- *Gracias a mis asesores por sus valiosos puntos de vista, para el mejoramiento de este trabajo.*
- *Dr. Miguel Ángel López López. Mi más profundo agradecimiento por su paciencia, por la buena disposición mostrada para la realización de este trabajo y por todas las facilidades que obtuve.
Por las palabras que me brindó en momentos complicados a los cuales me enfrente en lo personal y por el respeto que siempre mostró hacia mi persona, es un gusto conocerlo.*
- *Dra. María de Lourdes de la Isla de Bauer. Gracias por sus observaciones y por su buena disposición para ayudar a mejorar este trabajo.*
- *Dr. Gregorio Ángeles Pérez. Gracias por sus valiosos puntos de vista para mejorar este trabajo y por darme la oportunidad de aprender, un gusto conocerlo.*
- *M. en C. Germán Calva Vásquez. Gracias por sus valiosas observaciones, puntos de vista para enriquecer este trabajo y por todos los consejos en lo académico.
Y en especial por el apoyo personal que me ha regalado desde que lo conocí y por sus atinados comentarios en estos últimos meses (una palabra puede cambiar la vida, le agradezco su tiempo, me alegra conocerlo).*
- *Dr. Víctor Manuel Cetina A. por los ratos de humor y consejos durante mi estancia.*
- *Dra. Patricia Hernández de la Rosa, por la buena disposición que siempre mostró, mi más profundo respeto.*
- *A todas aquellas personas que trabajaron en este proyecto (en campo y en laboratorio) mis más profundos agradecimientos.*
- *Al Ing. Francisco Cruz Martínez director de SETIFOR por las facilidades en el trabajo de campo.*
- *Al Presidente Comisariado Ejidal de San Pablo Ixayoc, Miguel Ángel Sánchez Hernández y al Sr. Lucio Sánchez Hernández por la buena disposición y demás personas que participaron en el derribo de árboles, muchas gracias.*

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos particulares.....	3
3. HIPÓTESIS.....	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1. Contaminación Atmosférica.....	5
4.1.1. Principales Fuentes de Contaminación Atmosférica en México.....	6
4.1.2. Efectos de la Contaminación Atmosférica en bosques.....	8
4.2. Cambio Climático Global.....	11
4.2.1. Efectos en los Ecosistemas.....	13
4.3. Declinación Forestal.....	15
4.3.1. Declinación de los bosques en el mundo.....	16
4.3.2. Declinación de los bosques en México.....	17
4.4. Productividad Primaria Neta (PPN).....	19
4.4.1. Compartimentos de la Producción Primaria Neta Aérea (PPNA).....	20
5. MATERIALES Y METODOS.....	22
5.1. Descripción de las áreas de estudio.....	22
5.1.1. Desierto de los Leones.....	22
5.1.1.1. Localización.....	22
5.1.1.2. Suelos.....	23
5.1.1.3. Clima.....	23
5.1.1.4. Vegetación.....	24
5.1.1.5. Fauna.....	27
5.1.2. Cerro Tláloc.....	27

5.1.2.1.	Localización.....	27
5.1.2.2.	Clima.....	28
5.1.2.3.	Suelos.....	28
5.1.2.4.	Vegetación.....	29
5.2.	Muestreo.....	29
5.2.1.	Variables evaluadas.....	30
5.2.1.1.	Elaboración de modelos de biomasa de Oyamel.....	30
5.2.1.1.1.	Diámetro a la altura del pecho.....	30
5.2.1.1.2.	Altura total.....	30
5.2.1.1.3.	Diámetros mayor y menor de las trozas.....	31
5.2.1.1.4.	Biomasa de las trozas.....	32
5.2.1.1.5.	Densidad de la madera de trozas.....	32
5.2.1.1.6.	Biomasa de madera de ramas.....	34
5.2.1.1.7.	Biomasa foliar de ramas.....	35
5.3.	Para la elaboración de modelos de biomasa de especies arborescentes.....	36
5.3.1.	Evaluación de la PPNA.....	37
5.3.1.1.	<i>Abies religiosa</i>	37
5.3.1.1.1.	Incremento en diámetro.....	37
5.3.1.1.2.	Grosor de corteza.....	38
5.3.1.1.3.	Masa de detritos de oyamel.....	38
5.3.1.2.	Especies arbustivas.....	39
5.3.1.2.1.	Diámetro basal.....	39
5.3.1.2.2.	Mortalidad de ramas y follaje de arbustivas.....	39
5.4.	Productividad primaria neta de oyamel (PPNaO).....	40
5.5.	Productividad primaria neta de especies arbustivas (PPNaA).....	40
5.5.1.	Incremento de biomasa aérea de arbustivas.....	41
5.5.2.	Detritos de arbustivas.....	41
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
6.1.	Modelos de predicción de biomasa.....	42
6.1.1.	De <i>Abies religiosa</i> (H.B.K) Schl. et Cham.....	42
6.1.1.1.	Estimación de biomasa a nivel de ramas individuales.....	42

6.1.1.2.	Estimación de biomasa a nivel árbol.....	43
6.1.2.	Especies arbustivas.....	49
6.2.	Modelos de predicción de grosor de corteza.....	51
6.3.	Productividad primaria neta aérea.....	52
6.3.1.	Productividad Primaria Neta Aérea (PPNa) de <i>Abies religiosa</i>	52
6.3.2.	Productividad Primaria Neta Aérea (PPNa) de especies arbustivas.....	57
6.3.3.	Productividad Primaria Neta Aérea Total (PPNaT).....	59
6.4.	Partición de biomasa dentro del árbol.....	59
7.	CONCLUSIONES.....	62
8.	RECOMENDACIONES.....	63
9.	LITERATURA CITADA.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Pérdida de Ecosistemas por cambio de uso de tierra.....	13
Figura 2.	Incendios forestales que afectan a los bosques (Cerro Tláloc).....	14
Figura 3.	Muerte masiva de <i>Abies religiosa</i> ocasionando una reducción en el volumen de madera del bosque.....	19
Figura 4.	Componentes de la Productividad Primaria Neta Aérea de un bosque. Adaptado de Clark <i>et al.</i> (2001).....	21
Figura 5.	Localización de las áreas de estudio (A) Cerro Tláloc y (B) Desierto de los Leones.....	22
Figura 6.	A) Diámetro a la altura del pecho B) Altura total C) Pesado de trozas D) Obtención de muestras de trozas.....	31
Figura 7.	A) Toma de muestras de trozas, B) Pesado de rodajas con cera, C) Determinación de la densidad de las rodajas, D) Secado de rodajas.....	33
Figura 8.	A) Toma de muestras de acículas y B) Determinación de biomasa foliar.....	36
Figura 9.	A) Muestreo de arbustivas y B) Medición de diámetro basal de arbustivas.....	37
Figura 10.	Extracción de virutas para estimar el incremento en diámetro.....	38
Figura 11.	A) Colocación de trampas y B) Recolecta de detritos.....	39
Figura 12.	A) Medición de diámetro basal en arbustivas y B) Colecta mensual de detritos de arbustivas.....	41
Figura 13.	Modelos de biomasa de A) madera de ramas y B) acículas de ramas de <i>A. religiosa</i> , en el Cerro Tláloc, Texcoco, Edo. de México.....	43
Figura 14.	Modelos de biomasa de A) Fuste, B) Madera de ramas y C) de Acículas de <i>A. religiosa</i> a nivel árbol, en el Cerro Tláloc, Texcoco, Edo. de México.....	45
Figura 15.	A, B, C y D. Árboles derribados para la elaboración de los modelos de estimación de biomasa.....	46

Figura 16.	Duramen A-B) En proceso de pudrición, C-D) Podrido.....	48
Figura 17.	A) Mortalidad de ramas, B) Punta de la copa muerta.....	49
Figura 18.	Modelos para estimación de biomasa de A) Madera y B) Follaje de arbustivas.....	50
Figura 19.	Modelos para estimación de grosor de corteza de <i>A. religiosa</i> a partir de A) Diámetro normal con corteza y B) Diámetro normal sin corteza.....	51
Figura 20.	Productividad Primaria Neta Aérea en las áreas de estudio Desierto de los Leones (DDL) y Cerro Tláloc (CT).....	52
Figura 21.	Productividad Primaria Neta Aérea de arbustivas en el Desierto de los Leones y Cerro Tláloc.....	57
Figura 22.	Partición de biomasa entre los componentes aéreos de <i>Abies religiosa</i> en A) Desierto de los Leones y B) Cerro Tláloc.....	61

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Temperatura y Precipitación Anual en el Desierto de los Leones (INEGI, 2002).....	24
Cuadro 2. Ambientes climáticos en el Desierto de los Leones (SARH, 1982).....	24
Cuadro 3. Clasificación de la vegetación en el Desierto de los Leones....	26
Cuadro 4. Coordenadas geográficas de las áreas de muestreo (CT y DDLL).....	30
Cuadro 5. Comparación de biomاسas totales de <i>Abies religiosa</i> , estimadas con los modelos del presente trabajo y con el modelo de Avendaño <i>et al.</i> (2007).....	47
Cuadro 6. Variables dasométricas del bosque de Oyamel en las áreas de estudio.....	53
Cuadro 7. Prueba de Wilcoxon para la PPN de los diferentes componentes del árbol (fustes, ramas y acículas) en el Desierto de los Leones (DDLL) y Cerro Tláloc (CT).....	53
Cuadro 8. Prueba de Wilcoxon para comparar la PPNa de arbustivas del DDLL y CT.....	58
Cuadro 9. Productividad Primaria Neta Aérea Total del Desierto de los Leones y Cerro Tláloc.....	59
Cuadro 10. Prueba de Wilcoxon para la Productividad Primaria Neta Total del DDLL y CT.....	59

IMPACTO DEL PROCESO DE DECLINACIÓN SOBRE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA EN BOSQUES DE *Abies religiosa*

Patricia Flores Nieves, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2010

En la actualidad los bosques de *Abies religiosa* (H.B.K) Schl. et Cham. cercanos a la Ciudad de México están sufriendo un proceso de declinación. A la fecha, no existen estudios sobre el efecto de este fenómeno sobre su Productividad Primaria Neta. Para realizar estudios de este tipo se requiere la construcción de modelos de estimación de biomasa a partir de variables dasométricas fáciles de medir tales como el Diámetro Normal (DN). En este estudio se construyeron modelos para la estimación de biomasa de *Abies religiosa* en sus tres principales componentes: madera de fuste, madera de ramas y acículas. Aprovechando un programa de saneamiento en el Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México, se seleccionaron 10 árboles de diferente diámetro a los que se les estimó por separado su peso de fuste, madera de ramas y acículas. Se ajustaron modelos no lineales de biomasa obteniendo valores de R^2 de 0.928 para fuste, 0.9074 para ramas y 0.8363 para acículas. El bajo valor de R^2 para acículas sugiere la influencia del proceso de declinación, que afectó diferencialmente a los árboles derribados. Se obtuvo una productividad primaria neta aérea total de 5178 kg ha⁻¹año⁻¹ para el Desierto de los Leones y 4680 kg ha⁻¹año⁻¹ para Cerro Tláloc. A nivel de árbol o rodal, 97 % de la biomasa se encontró en los fustes, 2 % en la madera de ramas y 1 % en acículas. Este patrón de partición de biomasa es atípico para especies tolerantes a la sombra. En el Cerro Tláloc, aunque el fenómeno de declinación de *A. religiosa* es agudo de acuerdo con la baja PPNa de esa especie encontrada en el presente estudio, hoy en día existe una densidad de arbolado mucho mayor que en el Desierto de los Leones, debido a que el proceso de declinación es incipiente en la zona. La relativamente alta densidad de arbolado en el Cerro Tláloc reduce la llegada de radiación solar al sotobosque, limitando el establecimiento de arbustivas.

Palabras clave: *Abies religiosa*, ecuación alométrica, biomasa de fuste, biomasa de ramas, biomasa de acículas, productividad primaria neta aérea.

**IMPACT OF THE DECLINE PROCESS ON NET PRIMARY
PRODUCTIVITY IN *Abies religiosa* FOREST**

Patricia Flores Nieves, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2010

At present, *Abies religiosa* (H.B.K) Schl. et Cham. forests surrounding Mexico City are suffering from a decline process. To date, no studies are reported on the effects of this phenomenon on their net primary productivity. This type of studies requires models to be constructed to estimate biomass from easily measurable dasometric variables such as breast height diameter (BHD). In this study, models were constructed to estimate biomass of the main components of *Abies religiosa* trees: stem wood, branch wood, and foliage. By taking advantage of a sanitation program at Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de Mexico, 10 trees of varying diameters were selected and felled and their stem wood, branch wood and foliage were separated and their weights estimated. Biomass data were fitted to non-linear models getting R^2 values of 0.928 for stem wood, 0.905 for branch wood, and 0.882 for foliage. The low foliage R^2 -value suggests an effect of the decline process, which differentially affected the felled trees. Net primary productivities of 5178 kg ha⁻¹yr⁻¹ and 4680 kg ha⁻¹yr⁻¹ were obtained for the Desierto de los Leones and Cerro Tlaloc, respectively. At a tree or stand level, 97 % of biomass is found in stems, 2 % in branch wood and 1 % in foliage. This is an atypical biomass partitioning pattern for shade tolerant species. Even though the decline phenomenon at Cerro Tlaloc is acute according to the low net primary productivity found in this study, nowadays there exists a higher tree density than that occurring at Desierto de los Leones since the decline process is incipient in the former study area. The relatively high tree density at Cerro Tlaloc reduces solar radiation reaching understory, limiting the establishment of shrubs.

Key words:

Abies religiosa, allometric equation, stem biomass, branch wood biomass, foliage biomass, aerial net primary productivity.

1. INTRODUCCIÓN

Los patólogos forestales definen a la declinación forestal como una enfermedad multifactorial causada tanto por factores abióticos como bióticos, en el que implica la reducción del vigor y sobrevivencia de los árboles (Granados *et al.*, 2001 y Vázquez *et al.*, 2004). (Ciesla, 1989 y Granados *et al.*, 2001), señalan que son varios los síntomas, incluyendo reducción del crecimiento, degeneración de los sistemas radicales, presencia de clorosis en el follaje, reducción de las reservas fotosintéticas, mortalidad de brotes y ramas e incremento de la incidencia de ataques de insectos. Estos síntomas se pueden presentar de manera secuencial o simultánea. Alvarado *et al.* (1993) describe al fenómeno de declinación forestal como la pérdida gradual del vigor y de la forma de crecimiento cónico, acompañado por defoliación severa y muerte de ramas en las partes bajas del árbol.

El fenómeno de declinación forestal se ha presentado en países como Alemania, Holanda, Estados Unidos y Canadá, entre muchos otros, con síntomas parecidos en todos los casos. México no ha sido la excepción, habiendo aparecido el síndrome en del Desierto de los Leones, Distrito Federal, afectando principalmente a *Abies religiosa* (Oyamel) y a *Pinus hartweggi*. Durante la década de los años 80 del siglo XX, Bauer *et al.* (1985) identificaron el problema e impulsaron varios estudios tendientes a identificar las posibles causas. Desde entonces el fenómeno de declinación del Oyamel en la región central de México ha sido estudiado desde diferentes puntos de vista. De la I. de Bauer y Hernández (1986) sugieren que la contaminación por ozono es la principal causa. López (1996) menciona que los desordenes fisiológicos, entre ellos los nutrimentales, juegan un papel importante en el proceso de declinación; sin embargo, el autor menciona que falta establecer la causa de tales desordenes nutrimentales y que probablemente éstos tengan su origen en la contaminación ambiental. Sierra *et al.* (1988), mencionan que alrededor del año 1970 los bosques de esta región, en los que la especie dominante es *A. religiosa*, han experimentado cambios en cuanto a la estructura (distribución de edades, composición de los estratos, estructura de las copas, etc.) debido a los cambios que se han presentado en el dosel superior y a las tasas de mortalidad. A nivel internacional, Schütt y Cowling (1985), Binns *et al.* (1986), Kolmaier *et al.* (1989) y Poschenrieder y Barcelo (1999), sugieren que la toxicidad por aluminio, altas concentraciones de los óxidos de azufre, óxidos nítricos y acidificación del suelo tienen relevancia en el proceso de declinación. Cualesquiera que

sean las causas de la declinación de especies forestales, el hecho es que afectan el desarrollo de grandes superficies forestales, los procesos biogeoquímicos en los ecosistemas y la productividad primaria neta, entre otros.

La productividad primaria neta, de acuerdo con (Clark *et al.*, 2001) es la nueva materia orgánica vegetal total producida en un intervalo de tiempo específico. Es una variable compleja que ha ganado importancia desde el punto de vista del cambio climático, por su valor en la mitigación del mismo, al presentar el balance del flujo de carbono entre el ecosistema y la atmósfera. La productividad primaria neta es además un buen indicador de sustentabilidad de un ecosistema y de la rentabilidad financiera de los sistemas forestales comerciales.

En el caso del Desierto de los Leones, se desconoce la manera en que el fenómeno de declinación de *Abies religiosa* ha afectado la productividad primaria neta aérea de la especie. Por este motivo, en el presente estudio se determinó esta variable, comparándola con la productividad primaria neta aérea de un bosque dominado por la misma especie, y presumiblemente sano, ubicado en el Cerro Tláloc, en el oriente del Valle de México.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General:

Estudiar el fenómeno de declinación de *Abies religiosa* en términos de la productividad primaria neta de la especie y de las especies arbustivas asociadas.

2.2. Objetivos Particulares:

2.2.1. Generar modelos matemáticos para estimar biomasa de compartimientos aéreos de *Abies religiosa*.

2.2.2. Generar modelos matemáticos para estimar biomasa de compartimientos aéreos de especies arbustivas asociadas con *Abies religiosa*.

2.2.3. Comparar la productividad primaria neta de dos bosques de *Abies religiosa* con diferente grado de declinación.

3. HIPÓTESIS

3.1. La productividad primaria neta de *Abies religiosa*, es independiente del grado de declinación de los bosques estudiados.

3.2. La productividad primaria neta de especies arbustivas en bosques de *Abies religiosa* es independiente del grado de declinación de los bosques estudiados.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Contaminación Atmosférica

Contaminación es la introducción de sustancias químicas (trazas de metales pesados y compuestos tóxicos), físicas (vidrios, plásticos) y biológicas en concentraciones tan elevadas y con tal duración que son o pueden ser nocivas para la salud, perjudiciales para la vida animal, vegetal y son irreversibles (Fergusson, 1990). Actividades humanas como el cambio en el uso del suelo, consumo de combustibles fósiles y de combustibles a base de biomasa, la conversión de tierras húmedas a usos urbanos y agrícolas, así como la producción y liberación de clorofluorocarbonos, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafloruro de azufre, han aumentado la presencia de estos gases a niveles que los procesos naturales no pueden remover (Jacobson y Price 1990, Dietz y Rosa 2002).

Fergusson (1990) menciona que las emisiones de elementos metálicos a la atmósfera ocurren en forma sólida o líquida, como partículas de tamaño fino, cuya permanencia en el ambiente es corta y en los estratos acuáticos el tiempo de permanencia puede ser de un mes o durar años.

La disminución de la calidad del aire provocada por la contaminación atmosférica en zonas urbanas es resultado de un conjunto de factores entre los que se encuentran la cantidad y calidad de los combustibles, utilizados en la industria, actividades de la población y las condiciones meteorológicas. Es de gran importancia el control de la contaminación atmosférica ya que causa daños directos a la salud humana, a la flora y fauna (alteraciones foliares, reducción del crecimiento, pérdida de especies entre otros) y alteraciones al ambiente (atenuación de la radiación solar, cambios en la precipitación y temperatura).

Se ha señalado a los contaminantes atmosféricos como los principales culpables de la declinación forestal. Aun en bajas concentraciones pueden intoxicar a las plantas. Las plantas levemente afectadas por contaminantes, sólo tienen reajustes homeostáticos en su metabolismo, aún así, todos los procesos bioquímicos y controles fisiológicos repercuten en el crecimiento de las plantas. La sensibilidad y adaptación a contaminantes o tolerancia se establece por el balance entre procesos y todos los procesos fisiológicos que integran el metabolismo de cada planta (Granados *et al.*, 2001).

4.1.1. Principales Fuentes de Contaminación Atmosférica en México

México tiene importantes emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Los sectores que más emiten CO₂ (principal GEI) son el transporte y el sector energético (60%) y el sector forestal (35%), cuyo factor mas importante es el cambio de uso de suelo asociado a la deforestación (Muhlia, 2006). Desafortunadamente las emisiones de CO₂ por transporte generalmente van acompañadas de otros contaminantes tales como Hidrocarburos, Óxidos de Nitrógeno y Bióxido de azufre. Los dos primeros generan un contaminante secundario: el Ozono, el cual que es uno de los gases oxidantes más agresivos hacia la vegetación y seres vivos.

Las partículas suspendidas representan otro agente de contaminación. Estas son de gran importancia debido a los efectos tóxicos que causan en el ser humano, además de reducir la radiación solar y la visibilidad (Dockery *et al.*, 1993; Anderson *et al.*, 1996; Choudhury *et al.*, 1997).

Se ha demostrado que el ozono y sus precursores pueden alcanzar distancias considerables a partir de las grandes ciudades, dependiendo de la dirección de los vientos (Hernández, 1984). El ozono ha inducido perturbaciones a la vegetación en grandes áreas y su impacto se ha observado en varios ecosistemas; sin embargo, el nitrato de peroxiacetilo y el dióxido de nitrógeno tienen gran influencia, principalmente en países industrializados y altamente poblados ya que en éstos se generan grandes cantidades de estos compuestos.

Hace pocos años se consideraba que la contaminación atmosférica era exclusiva de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM); sin embargo esto es un problema de muchos centros urbanos debido al crecimiento poblacional e industrial acelerados. La topografía del Valle de México tiene relación con la presencia y comportamiento de los contaminantes atmosféricos. El hecho de que el Valle de México está casi completamente rodeado por montañas que alcanzan más de 4000 m de altitud o más, constituye un factor importante para la formación del fenómeno natural conocido como inversión térmica. Esta se produce cuando una capa de aire caliente se sitúa por arriba de una capa de aire frío, atrapando las emisiones contaminantes provenientes de la actividad urbana; ya que más de la mitad de la industria mexicana se encuentra localizada dentro de los 1,050 kilómetros cuadrados que forman la mancha urbana de la ZMVM. Una quinta parte de los habitantes de México radican en la ZMVM, tres quintas partes de los automóviles del país circulan

en ella y el promedio del consumo de energía por unidad de área es 150 veces mayor que en el resto del país (Hernández, 1984).

A partir de 1986 comenzaron a establecerse medidas de control de la contaminación del aire en la Ciudad de México. En ese año arrancó la sustitución del combustóleo por gas natural y se redujo el contenido de tetraetilo de plomo en las gasolinas. En 1990 se puso en marcha el programa de verificación vehicular, se introdujeron las gasolinas oxigenadas y se inició el programa de hoy no circula. Para 1990-1994 se estableció el programa integral contra la contaminación atmosférica (PICA) cuya aplicación ha sido gradual y ha reducido de manera paulatina las emisiones de contaminantes atmosféricos. Las áreas prioritarias de acción de este programa eran las siguientes: a) la industria petrolera, b) el transporte, c) la industria privada y los establecimientos de servicios, d) las termoeléctricas, e) reforestación y restauración ecológica, f) investigación, educación ecológica, y comunicación social (Lacasaña *et al.*, 2005).

Con este programa se pretendía que no se rebasaran las normas internacionales de plomo, así como también las normas nacionales e internacionales de bióxido de azufre. También se buscó frenar el incremento de los niveles de partículas originadas por erosión de suelos y tiraderos clandestinos que van a dar al aire, y reducir de forma significativa los hidrocarburos (precursores del O₃), con la incorporación gradual de los convertidores catalíticos y de mejores sistemas de combustión en la industria y los servicios. Por otra parte también se buscó la reducción de los óxidos de nitrógeno y el monóxido de carbono (Lacasaña *et al.*, 2005).

Actualmente en México, los instrumentos regulatorios para la calidad del aire incluyen la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), el Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica y las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para el control de los niveles de emisiones de contaminantes a la atmósfera, provenientes de fuentes determinadas. Por otro lado están las normas que son emitidas por la Secretaría de Salud específicamente para los siguientes contaminantes atmosféricos: bióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), partículas suspendidas totales (PST) y partículas menores a diez micrómetros de diámetro (PM₁₀) y plomo (Pb). Las normas son observadas por las autoridades federales y locales que tengan a su cargo el desarrollo y aplicación de los

programas de política ambiental (SEMARNAP-INE, 2003). Pero también esta emite una serie de NOM que regulan las emisiones de contaminantes provenientes de fuentes fijas y móviles y definen los niveles de emisiones de óxidos de azufre y otros compuestos de este elemento, de óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas, compuestos orgánicos volátiles y monóxido de carbono. Esto para la protección de la salud de la población y la de los ecosistemas, lo cual se logra regulando la calidad del aire.

Ya que uno de los problemas comunes en las ciudades respecto de la calidad del aire está relacionado con las concentraciones de ozono por encima de la norma, se ha identificado como prioritaria la reducción de emisiones de hidrocarburos y de óxidos de nitrógeno para controlar este problema, por ser estos gases precursores del ozono. Para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) 2002-2010 se considera la implementación de una serie de medidas relacionadas directamente con la emisión de hidrocarburos. De acuerdo con el inventario de emisiones de la ZMVM (SEMARNAP-INE, 2003), esta emite a la atmósfera anualmente aproximadamente 2.5 millones de toneladas de contaminantes, de los cuales aproximadamente 19% (475 mil toneladas) son hidrocarburos. En cuanto a las fuentes de emisión de los hidrocarburos totales se distribuyen como sigue: el 52%, fuentes puntuales, el 5%, la vegetación, suelos el 3% y las fuentes móviles 40% (SEMARNAP-INE, 2003).

La normatividad ambiental mexicana vigente incluye normas relativas a los niveles máximos permisibles de concentración de contaminantes atmosféricos así como normas para emisiones de fuentes fijas industriales y de fuentes móviles (Charles *et al.*, 1993).

4.1.2. Efectos de la Contaminación Atmosférica en bosques

El incremento acelerado del carbono en la atmósfera se inició durante la revolución industrial a finales del siglo XVIII. El carbono atmosférico ha afectado, además del clima de la Tierra, el metabolismo de las plantas, pues estos aumentos de concentración tienen un impacto sobre la estructura y la biodiversidad de los ecosistemas en el planeta (Taylor, 1969; Muhlia, 2006).

Durante la revolución industrial se aumentó significativamente la cantidad de elementos tóxicos afectando diferentes ecosistemas, de estos hay elementos traza que son liberados a la atmósfera gracias a su volatilidad durante los procesos de combustión (Hoornaert *et al.*, 1999). Tras este periodo se ha registrado una degradación de ecosistemas, la cual se ha

visto agravada por una mayor producción de materiales residuales, por la introducción de nuevos contaminantes y por la concentración de la población en ciudades (Prat y Ward, 1994).

Dentro de las primeras investigaciones sobre la contaminación atmosférica en la ciudad de México están las realizadas por (Jáuregui, 1958; citado por Hernández, 1984) quien señaló que las montañas del sur del Valle de México, como el Ajusco en el D.F., impiden el flujo lateral del aire contaminado. En sus investigaciones posteriores este autor comparó las alteraciones climáticas y los niveles de contaminación por dióxido de azufre en varias ciudades y las comparó con las de la Ciudad de México (Hernández, 1984).

Posteriormente Bauer (1972) estudió el efecto de los aeropoluantes sobre la vegetación en México y detectó daños por oxidantes en algunas plantas indicadoras expuestas en la Ciudad de México. En estudios realizados por Krupa *et al.* (1976) estos autores observaron que los pinos y otras plantas silvestres son afectados por los gases oxidantes producidos en la Ciudad de México y transportados por los vientos hasta el Ajusco.

Actualmente un tipo importante de contaminantes en México son los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) que son derivados principalmente de la actividad industrial. Desde el inicio de la industrialización hasta la actualidad este tipo de actividades generan diversas clases de residuos peligrosos que ante la falta de una regulación jurídica que los identifique como tales su riesgo sigue latente (SEMARNAT, 2004).

Entre los elementos potencialmente tóxicos para los ecosistemas destacan (Cu, Zn, Cd, Ni, Cr, Va y Pb) los cuales representan riesgo para los organismos del suelo y para el crecimiento de los árboles en donde se evidencian concentraciones de estos elementos en microestructuras de anillos de crecimiento de coníferas (Flores, 2006). Los EPT se distribuyen en los ecosistemas naturales en forma muy variada, su patrón de dispersión se limita localmente a la periferia de la fuente de contaminación pero tal patrón depende del tipo de emisión (Remröd, 1985).

Se plantea a la contaminación ambiental como posible causa de la declinación forestal. Ésta puede afectar a la vegetación a través de la generación de la precipitación ácida, los efectos del ozono, de los óxidos de nitrógeno y de azufre, así como de los EPT los cuales son emitidos por la industria y los vehículos (Castro, 2002).

Los principales iones de origen antropogénico que se incorporan a los ecosistemas forestales son los sulfatos (SO_4^{2-}), nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+) e hidrógeno (H^+), (Krupa, 2002). Éstos iones tienen un elevado potencial acidificante, y si son depositados en grandes cantidades, pueden alterar el funcionamiento de los ecosistemas forestales, principalmente por el desbalance nutrimental provocado por acidificación del suelo (Pérez *et al.*, 2006).

López (1993) señala que la contaminación atmosférica puede causar daños directos e indirectos a la vegetación. El primer caso se refiere a alteraciones de las estructuras de los tejidos o del mecanismo de fotosíntesis. Entre los mecanismos sugeridos está la entrada de gases contaminantes por los estomas y una vez en el interior, cada gas produce sus propios efectos: el dióxido de azufre (SO_2) compite con el bióxido de carbono (CO_2) por los sitios de fijación, disminuyendo el proceso fotosintético.

A nivel experimental se ha detectado el efecto de algunos contaminantes sobre la fotosíntesis. La aplicación de SO_2 sobre individuos de cualquier especie, ha resultado en una depresión o detenimiento de la fotosíntesis. Otros experimentos han demostrado que concentraciones de ozono de 0.15 a 0.45 ppm, causan reducciones hasta de 85% en la tasa fotosintética (Kramer y Kozlowski, 1979). El ozono O_3 al igual que el peróxido de hidrógeno, es un oxidante que puede conducir a la producción de radicales libres en los tejidos fotosintéticos de las plantas, causa daños foliares a cultivos agronómicos y hortícolas, árboles caducifolios y coníferas (Krupa, 1999).

Los efectos indirectos son daños a la vegetación por la contaminación atmosférica producidos vía nutrición de las plantas. Muchos trabajos relacionan el problema de la lluvia ácida con la nutrición. Por lo tanto las causas de los síntomas de estrés nutrimental que se presentan en la vegetación se engloban en tres rubros: 1) desbalances nutrimentales 2) toxicidad de nutrientes y elementos y 3) efectos sobre la microflora (López, 1993).

La respuesta de varias especies vegetales superiores a la contaminación atmosférica puede ser aguda (respuesta a episodios breves de contaminación), frecuentes a través de síntomas de daño foliar o crónico (respuesta a exposiciones de largo plazo a concentraciones bajas de contaminantes y a concentraciones relativamente altas, periódicas, intermitentes). Las respuestas crónicas pueden ir acompañadas o no, por síntomas de daño foliar; a pesar de ello, pueden resultar en reducción del desarrollo y pérdida en productividad (rendimiento) (Krupa, 1999).

La contaminación atmosférica puede afectar una planta directamente dañando el follaje o el dosel (por O₃), o indirectamente, a través de sus efectos en el suelo (trazas de metales) o por ambas vías (Krupa, 1999).

4.2. Cambio Climático Global

La variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medidas o de su variabilidad, que se mantiene durante un periodo prolongado (generalmente durante decenios o por mas tiempo) es lo que se conoce como cambio climático (IPCC, 2007).

Este término frecuentemente se usa de manera inapropiada ya que suele utilizarse como sinónimo de calentamiento global. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático usa el término Cambio Climático para referirse al cambio por causas humanas: por Cambio Climático se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial la cual se suma a la variabilidad natural del clima. Al cambio producido por causas naturales se le denomina variabilidad natural del clima y a aquel que es de origen humano se le llama cambio climático antropógeno (Rozelot y Lefebvre, 2006).

Las causas del cambio climático son primordialmente antropógenas y se relacionan con el incremento de la temperatura a nivel planetario a causa de la acumulación de gases de efecto invernadero. El efecto invernadero es un proceso natural asociado con la atmósfera que envuelve a la Tierra, la cual no permite que las ondas de alta frecuencia la atraviesen después de reflejarse en la superficie terrestre. Este efecto hace posible una temperatura en la que la vida puede desarrollarse. De no existir el efecto invernadero, la Tierra sería inhabitablemente fría (Margulis y Lovelock, 1974). Sin embargo, la liberación continúa de gases de efecto invernadero como el Metano y el Bióxido de Carbono derivado de actividades humanas (entre las que se encuentran las agrícolas, las ganaderas y las industriales) ha llevado a que la temperatura vaya incrementando progresivamente.

Como resultado del cambio climático, se ha pronosticado que habrá un incremento en la temperatura promedio del planeta; se derretirán amplias superficies de los hielos polares; Habrá un aumento en el nivel del mar, se producirán inundaciones de regiones costeras y de islas; a nivel regional las precipitaciones aumentaran con efectos en flora, fauna y agricultura, así como el aumento de desastres debido a huracanes e inundaciones que con

mayor frecuencia e intensidad impactarán zonas densamente pobladas (Bolin *et al.*, 1986; Jacobson y Price 1990).

Noss (2001) señala que los efectos del cambio climático aumentan porque se dan sobre ecosistemas degradados, fragmentados, invadidos por especies exóticas o francamente destruidos. Así, tales cambios ocurren en un escenario altamente comprometedor para la biodiversidad a todos los niveles.

Se espera que algunos ecosistemas forestales se vean más afectados que otros, tanto por su fragilidad biológica (arrecifes coralinos, bosques mesófilos, ecosistemas árticos) (CONABIO, 2006) como por el prolongado manejo humano al que han estado sometidos los bosques de coníferas (Noss, 2002).

Actualmente el proceso responsable del cambio climático es el efecto invernadero, el cual se origina porque la energía que llega del sol formada por ondas de frecuencias altas, traspasa la atmósfera con gran facilidad, mientras que la energía devuelta hacia el exterior desde la tierra, es remitida en forma de ondas de frecuencia mas baja, ya que procede de un cuerpo mas frío, lo que ocasiona que sea absorbida por los gases atmosféricos. Esta retención de energía hace que la temperatura se incremente, ya que el efecto invernadero provoca que la energía que llega a la tierra regrese más lentamente y se mantenga mas tiempo cerca de la superficie, generando una elevación de la temperatura de la atmósfera.

El cambio climático es originado por emisiones de GEI derivados de las actividades humanas a partir de la revolución industrial. Antes de esta la atmosfera estaba compuesta por 78% nitrógeno (N₂), 21% de oxígeno (O₂), 0.9% Argón (Ar), trazas de otros gases y sólo 0.03% bióxido de carbono (CO₂). Éste último se considera el más importante de los GEI, después del vapor de agua. México contribuye con 1.5% al problema global, comparándolo con los grandes emisores (Estados Unidos, Europa y China) que contribuyen con más de 17 mil millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, es decir alrededor de un 35% de las emisiones por año. Por otro lado Indonesia y Brasil sólo por deforestación emiten anualmente 5 mil millones de toneladas, alrededor del 10% del total global. De acuerdo al registro histórico a finales del siglo XIX empezó a verificarse un aumento de temperatura en los dos hemisferios, coincidiendo con el aumento de las concentraciones atmosféricas de CO₂. El máximo de temperatura alcanzado se registró a finales de los años 30's. En las siguientes décadas la temperatura global descendió ligeramente hasta los finales de los setentas, continuando posteriormente con una tendencia descendiente.

Así el incremento en la concentración de los GEI en la tropósfera ha originado el aumento global de la temperatura de la superficie terrestre, ha este fenómeno se le ha denominado Calentamiento Global (Mc Michael *et al.*, 2006).

4.2.1. Efectos en los Ecosistemas

La pérdida de varios ecosistemas tanto a nivel local como regional es un hecho en la actualidad; además, hay ecosistemas que se encuentran en riesgo por la vulnerabilidad que presentan (Figura 1). Si un ecosistema desaparece pierde sus componentes y también la totalidad de los servicios ambientales que presta. Con la pérdida o degradación de un ecosistema se coarta la captación, la purificación y el almacenamiento del agua en cuerpos subterráneos; se vulnera la regulación, el amortiguamiento de oscilaciones climáticas y la acumulación de biomasa y se favorece la pérdida de suelo y el hábitat de todas las especies presentes.



Figura 1. Pérdida de Ecosistemas por cambio de uso de tierra.

(Ehrlich, 1996) indica que el fenómeno de cambio climático global trae transformaciones en los ecosistemas naturales al punto de poner en riesgo la capacidad de éstos para auto-regenerarse y de atentar contra la capacidad misma del planeta para sostener en condiciones propicias el desarrollo de las sociedades.

Los bosques influyen en el cambio climático por su capacidad de alterar el nivel del CO₂ en la atmósfera. Los bosques conforme se desarrollan absorben parte del carbono de la

atmósfera, el cual queda almacenado en los diferentes componentes del árbol, tronco, ramas, hojas y sistema radical. Por tal motivo los bosques se consideran como sumideros de carbono por su capacidad de absorber y almacenar carbono durante largos periodos de tiempo. El carbono queda atrapado en los ecosistemas forestales pero uno de los factores que hace que el carbono vuelva a la atmósfera son los incendios forestales y especialmente la deforestación con fines agrícolas o pecuarios (Figura 2).



Figura 2. Incendios forestales que afectan a los bosques (Cerro Tláloc).

A través del estudio de los cambios estacionales que ocurren en las plantas (fenología), inducido por factores ambientales, se ha encontrado que el cambio climático inducido por el hombre tiene un efecto sobre las especies y las comunidades, principalmente sobre aspectos de fisiología, adaptación y distribución. La evidencia de cambio en rangos de distribución o conductas durante el calentamiento atmosférico recientes se ha registrado para más de 400 especies de plantas y animales. La mayoría de la información proviene de plantas, aves migratorias y mariposas de zonas templadas, pero una gran variedad de animales vertebrados e invertebrados se están moviendo hacia el norte o hacia una altitud mayor (Williams, 2007).

Muchos organismos están adelantando el tiempo de sus actividades estacionales. En las regiones templadas el desarrollo y crecimiento de las plantas están determinados por la temperatura. En los árboles están siendo utilizados como indicadores ya que las primeras hojas y flores están apareciendo más temprano cada año. Los cambios en la fenología de

las plantas y en la migración de las aves muestran que el calentamiento está llevando a un desacoplamiento en las interacciones bióticas.

El calentamiento global afecta todo el equilibrio ecológico del bosque en el que haya un aumento en la temperatura y en el CO₂ de la atmósfera y que la duración de la temporada de sequía sea mayor. Se prevé que ocurrirán modificaciones en el equilibrio dinámico del bosque, que tendrán como consecuencia que la abundancia relativa de especies cambie y la biodiversidad decline (Williams, 2007).

4.3. Declinación Forestal

El decaimiento forestal es uno de los problemas comunes de las naciones industrializadas que implica la reducción del vigor y sobrevivir 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 (Granados *et al.*, 2001).

Ciesla (1989) define a la Declinación Forestal como el deterioro gradual de la condición y vigor de los árboles que finalmente los conducen a la muerte y señala que los síntomas son varios, incluyendo una reducción del crecimiento, degeneración de los sistemas radicales, presencia de clorosis en el follaje, reducción de las reservas fotosintéticas, mortalidad de brotes y ramas, y el incremento de la incidencia de ataques de insectos. Estos síntomas se pueden presentar de manera secuencial o simultánea. Alvarado *et al.* (1993) lo describe como la pérdida gradual del vigor y de la forma de crecimiento cónico, acompañado por defoliación severa y muerte de ramas en las partes bajas del árbol. López (1996) señala que los síntomas iniciales están ligados a una serie de desórdenes fisiológicos en los árboles, los cuales se manifiestan como clorosis, enrojecimiento o bronceado del follaje y defoliación.

López *et al.* (2006) mencionan que estos desórdenes fisiológicos afectan la distribución de biomasa dentro del árbol, disminuyendo la relación raíz-parte aérea, con lo que se reduce la capacidad de la raíz para abastecer de agua y nutrientes a la parte aérea. Esto trae consigo la muerte de órganos aéreos para mantener el balance entre el órgano de absorción (raíz) y el de transpiración (hojas).

La declinación se describe como síndrome de una enfermedad que consiste en la acumulación de varios síntomas, causados por factores abióticos y bióticos que propician el deterioro gradual del árbol, hasta causar su muerte (Manion *et al.*, 1992).

Lo grave de la declinación en el Valle de México es que es un proceso constante, cuya solución no depende directamente de los propios recursos naturales, ya que el principal factor es la contaminación que en el caso del Desierto de los Leones, se produce en la zona urbana del Distrito Federal. Vázquez (1988), menciona que desde 1983 fueron evidentes los efectos de declinación en los Parques Nacionales Ajusco y Desierto de los Leones, los que afectaron de manera considerable las especies *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*.

4.3.1. Declinación de los bosques en el mundo

En Alemania hacia el final del siglo XIX, las industrias liberaron emisiones altas de contaminantes, las cuales causaron una amplia devastación forestal (Krupa, 1999).

Este fenómeno se dio en Europa del Este y algunas regiones tales como, Checoslovaquia, Polonia, Yugoslavia, Hungría, etc. en el cual se dio el peor caso de daño forestal a nivel mundial, este daño ha sido ocasionado solamente por el bióxido de azufre y otros aerocontaminantes primarios. En Checoslovaquia por ejemplo se reportó un severo daño forestal ocurrido entre 1982 y 1983, en los radales de Abeto noruego (Krupa, 1999).

Los síntomas más severos de la declinación de árboles en Norteamérica, se observaron en el Abeto rojo (*Picea rubens*) que se desarrolla en sitios elevados desde Nueva York y Nueva Inglaterra (Krupa, 1999).

En 1980, la lluvia ácida llegó a considerarse de importancia nacional en Estados Unidos, debido a que fue la causa de una importante declinación forestal que en Alemania se llamaba “waldsterben” la cual fue preocupante como lo fue en Alemania Occidental (Krupa, 1999). Investigadores suponen que la mortalidad en bosques de Estados Unidos y Canadá se debe a la contaminación atmosférica, acidez de la lluvia y factores climáticos (Schütt y Cowling, 1985). Alaska también sufre de este fenómeno pero en ese caso, también se atribuye a insectos y hongos y se sugiere que es debido al estrés ambiental.

Los síntomas de daño forestal son diversos, especialmente si se incluyen otras especies de arbóreas, como el abeto balsámico (*Abies balsamea*) y el abeto Fraser (*Abies fraseri*). En Norteamérica, uno de los síntomas foliares visibles más importantes es la pérdida de

acículas, que empiezan por las puntas de las ramas y el ápice de la corona, al contrario de la situación de Alemania Occidental, la pérdida de acículas no está acompañada por clorosis pronunciada o síntomas de deficiencias nutricionales (Krupa, 1999).

4.3.2. Declinación de los bosques en México

Los contaminantes emitidos por la industria y vehículos de motor de la Ciudad de México, son transportados por los vientos, causando daños a la vegetación herbácea y arbórea a lo largo de su trayectoria. Las áreas más afectadas son las de barlovento, donde llegan los vientos de la Ciudad de México, especialmente en cañadas donde se encajonan dichos vientos (Granados *et al.*, 2001).

Cuando se detectó el problema de declinación en el Parque Nacional Desierto de los Leones, se le atribuyó al ataque de insectos y a la sequía de mediados de los 60's. Desde 1975 se registraron altos niveles de oxidantes en la atmósfera en varios puntos del área metropolitana de la Ciudad de México, se ha observado también el transporte atmosférico de contaminantes tales como el ozono hacia el extremo sur de Valle de México, alcanzando las montañas en esa área (Bravo *et al.*, 1988). Durante los años 70's se reconoció el daño por gases oxidantes en pinos de la zona del Ajusco y este se atribuyó a presencia de ozono, el cual se genera en la Ciudad de México y es transportado por los vientos hacia la zona boscosa del suroeste del Valle de México (De la I. de Bauer y Hernández, 1986). Se realizaron estudios de evaluación de daño con los cuales se comprobó que el daño por ozono es más grave a medida que el tiempo transcurre, observándose que la pérdida de vigor es significativa en corto tiempo. En 1982 se detectó en el Parque Desierto de los Leones, una enfermedad del arbolado en los bosques de oyamel ya que presentó una muerte masiva, muy parecida a lo que ha ocurrido en partes de Europa, Estados Unidos, Alaska y Canadá. La declinación se presenta en árboles de todas las edades (Vázquez, 1988).

Vázquez (1988) sugiere que el deterioro pudiera ser parte de un proceso natural de la sucesión vegetal o alguna respuesta de los bosques al manejo y mal uso que el hombre hace de ellos.

Alvarado (1993) menciona que existen diversos factores que pueden estar involucrados en la declinación y muerte del oyamel tales como el manejo forestal. El mal manejo propicia el debilitamiento de árboles que actúan como focos de atracción de enfermedades y

plagas, además de servir como inóculo y reservorios permanentes. También observó que las hojas de los árboles enfermos presentan pequeñas lesiones amorfas blanquecinas por el haz hasta su desprendimiento, la muerte de los árboles es ascendente y sólo retienen las hojas por 2 años.

En 1983 el volumen total afectado era de 181,318 m³ de madera de oyamel, es decir el 24% del volumen total, para 1984-1987 el volumen total de madera fue de 270, 775 m³, equivalente al 36% del total del parque, que en ese año era de 753, 063 m³.

La alta mortalidad de ramas en la mayoría de los árboles del área imprime una fisonomía diferente a los árboles que dominan este bosque (Figura 3). Adelgaza demasiado el dosel superior, permitiendo la entrada de elevadas cantidades de luz y energía calorífica en beneficio del sotobosque por lo que actualmente el piso forestal se encuentra invadido por una gran cantidad de especies herbáceas y arbustivas que en otros oyametales no se presentan (López, 2006).

(Innes y Skelly, 1994) en su estudio realizado sobre la declinación forestal en Europa y Norteamérica, mencionan que la contaminación atmosférica influye en la salud de los árboles pero no en el fenómeno de declinación y sugieren que se debe realizar una investigación más detallada enfocada a la patología, entomología forestal, fisiología relacionadas con las ciencias forestales.

El daño a la vegetación forestal en Europa como en Norteamérica se atribuye a la interacción de factores manipulados por el hombre y factores ambientales (Krupa, 1999). (Innes y Skelly, 1994) señalan que la sequía es uno de los factores más importantes que pueden iniciar la declinación forestal.

Desde hace tres décadas el bosque del Desierto de los Leones ha sido afectado por el proceso de declinación, dañando principalmente dos de sus principales especies arbóreas: *Pinus hartwegii* Lindl. y *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. La primera se localiza de 3500 a 3700 msnm cubriendo una superficie de 250 ha, mientras que *Abies religiosa* la especie más importante en términos de área basal por hectárea ocupa una superficie de 1375 ha (López, 2006).



Figura 3. Muerte masiva de *Abies religiosa* ocasionando una reducción en el volumen de madera del bosque.

4.4. Productividad Primaria Neta (PPN)

En la actualidad es necesario conocer y entender la productividad primaria neta (PPN) en los bosques del mundo, ya que estos son ecosistemas que tienen gran importancia en el balance global de carbono (Dixon *et al.*, 1994).

Clark *et al.* (2001) definen a la PPN como la nueva materia orgánica total producida en un intervalo de tiempo. Sin embargo en ocasiones la PPN se subestima porque no pueden medirse en forma directa debido a las transformaciones que sufren (consumo, descomposición, mortalidad, exportación). Las mediciones se restringen a la hojarasca fina y el incremento de la biomasa aérea y la suma es el equivalente a la PPN aérea. Frecuentemente los componentes subterráneos son ignorados o estimados como una proporción teórica de los valores de la parte aérea.

Por otro lado, (Ryan, 1991) menciona que la productividad primaria bruta no puede ser medida directamente; y estimar la respiración total de las plantas a nivel de ecosistema es difícil e involucra una gran labor.

La biomasa y la productividad frecuentemente se confunden, la biomasa se usa para estimar la productividad. La biomasa de una comunidad de plantas se define como su masa seca total (follaje, ramas, troncos y raíces), pero excluye la hojarasca y la materia orgánica en descomposición (Salas e Infante, 2006).

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 autótrofa. 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. Las plantas pierden carbono por varias vías; una parte por respiración pero la más grande de esta liberación es por la transferencia del carbono al suelo (caída de las hojas, mortalidad de las estructuras de la planta, exudación de raíces y transferencia de carbono a los microbios) (Sala *et al.*, 2000).

4.4.1. Compartimentos de la Producción Primaria Neta Aérea (PPNA)

La estimación de la Producción Primaria Neta comprende dos niveles: producción aérea y subterránea. Cada nivel se estudia considerando sus compartimentos; para el caso de Productividad Primaria Aérea se toman en cuenta los incrementos y las pérdidas de biomasa aérea. La Figura 4 indica los diversos compartimentos de la Producción Primaria Neta Aérea de un bosque. La suma de todos los materiales representan (i) la cantidad de nueva materia orgánica que es retenida por las plantas vivas al final del intervalo (ii) la cantidad de materia orgánica que fue producida y pérdida durante el mismo intervalo. Cabe mencionar que pocos de los componentes de la PPNA son medidos. Estos están restringidos por lo general a la hojarasca fina y el incremento de la biomasa aérea. Los componentes subterráneos son a menudo ignorados o estimados como una proporción teórica de los valores de la parte aérea (Clark *et al.*, 2001).

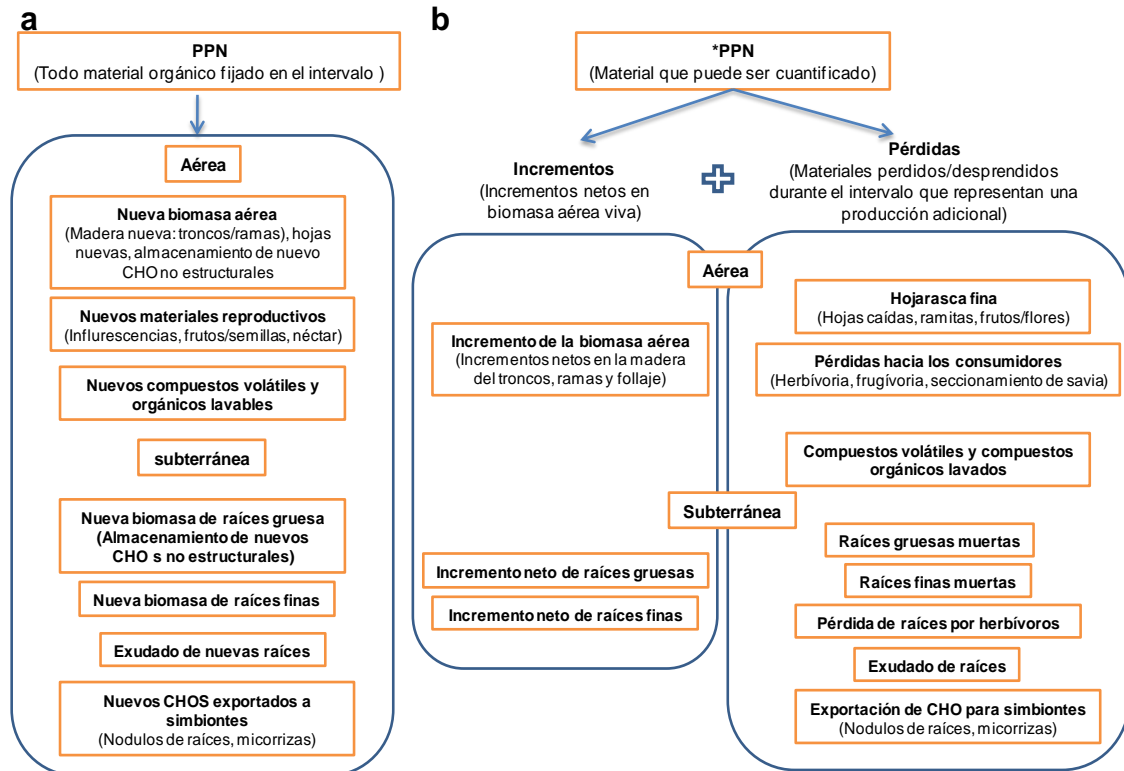


Figura 4. Componentes de la Productividad Primaria Neta Aérea de un bosque. Adaptado de Clark *et al.* (2001).

Para estimar la Producción Primaria Neta aérea existen dos categorías que dependen de la tasa de reemplazo de la biomasa. Los pastizales y estepas pertenecen a los ecosistemas de tasas de reemplazo rápido, mientras que los ecosistemas forestales pertenecen a los de tasa de reemplazo lento con proporciones de PPNA/ biomasa bajas y grandes individuos de vida larga. Los métodos utilizados para la estimación de la PPNA son diferentes para estos ecosistemas. En el caso de ecosistemas de arbustivas la estimación de la PPNA requiere de la combinación de los dos métodos (Sala *et al.*, 2000). Los bosques, tierras arboladas y arbustales tienen dos componentes separados de la producción primaria aérea: las hojas que son producidas en un intervalo de tiempo dado y el incremento en madera, ambos componentes tienen tasas de retorno y metodologías diferentes.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Descripción de las áreas de estudio

La investigación se llevó a cabo en el Parque Nacional Desierto de los Leones ubicado en el Distrito Federal y en el Cerro Tláloc, en el Oriente del Estado de México. Las áreas se encuentran en sitios opuestos del Valle de México (Figura 5). Por otro lado la condición aparente del arbolado de *Abies religiosa* en las áreas de estudio es contrastante en lo relativo al grado de daño en copas, siendo más conspicuo en el Desierto de los Leones.



Figura 5. Localización de las áreas de estudio: A) Cerro Tláloc y B) Desierto de los Leones.

5.1.1. Desierto de los Leones

5.1.1.1. Localización

El Parque Nacional Desierto de los Leones 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).

De acuerdo al plano oficial de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, el parque cuenta con una superficie de 1529 ha, conforme el artículo primero del decreto de creación publicado en el Diario Oficial de la Federación el 27 de noviembre de 1917. Sus coordenadas UTM extremas son: 465261.25 m E y 2137029.52 m N; 468996.54 m E y 2129839.47 m N. El parque se ubica al poniente de la Ciudad de México, dentro de las delegaciones Álvaro Obregón y Cuajimalpa de Morelos, en el Distrito Federal.

5.1.1.2. Suelos

Los suelos son de origen volcánico, dominan las andesitas; son profundos, relativamente abundantes, bien drenados y fértiles; húmedos la mayor parte del año. Los valores de pH son, ligeramente ácidos. De acuerdo con INEGI (2000), en la totalidad del parque nacional el tipo de suelo se clasifica como podzólico y con textura arcillo-arenosa. Sosa (1952) y Freyermuth (1952) reportan la predominancia de suelos de textura arcillo-silicosa, fértiles, profundos, de hasta dos metros de espesor y con abundante detritus orgánico; subsuelo rocoso e impermeable.

5.1.1.3. Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por García (1988), el tipo de clima corresponde a C(W2) W (b)ig, que equivale a (Cuadro 1):

- Templado, con lluvias en verano.
- Precipitación invernal menor de 5%, con respecto al total.
- Forma parte del grupo más húmedo de los subhúmedos.
- Isotermal (la diferencia de temperatura entre el mes más cálido y el mes más frío es menor a 5°C).

Cuadro 1. Temperatura y Precipitación Anual en el Desierto de los Leones (INEGI, 2002)

Temperatura (°C)				
Estación	Periodo	Temperatura promedio	Temperatura del año más frío	Temperatura del año más caluroso
Desierto de los leones	1951 a 1988	10.8	8.6	12.0

Precipitación (mm)				
Estación	Periodo	Precipitación promedio	Precipitación año más seco	Precipitación año más lluvioso
Desierto de los leones	1951 a 1988	1,340.6	1,005.5	1,837.6

Según el INEGI (1993) en el parque atraviesan dos isotermas: una en la porción norte de 10AC; y la otra, en la porción centro-sur de 8AC. En la porción sur del parque pasa una isoyeta de 1,500 mm.

El Servicio Meteorológico Nacional (SARH, 1982) reporta ocho ambientes climáticos en el parque (Cuadro 2):

Cuadro 2. Ambientes climáticos en el Desierto de los Leones (SARH, 1982).

Ambiente climático	Localización	Clima	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
1	Norte	Fresco subhúmedo	12	1 200
2	Norte	Fresco subhúmedo	9-12	1 200
3	Norte	Fresco subhúmedo	9-12	1 200-1 300
4	Oriente-poniente	Semifrío	9-11	1 300
5	Paralelo al anterior	Frío-húmedo	6-9	1 300
6	Vertiente-oriente	Frío-húmedo	6-9	1 200- 1 300
7	Taludes superiores	Frio subhúmedo	6-9	1 200
8	Arriba de 3,725 msnm	Frío subhúmedo	6	1 200

5.1.1.4. Vegetación

El Desierto de los Leones se encuentra dentro de la Región Mesoamericana de Montaña, formando parte de la provincia florística de las serranías meridionales, a la cual se adscribe el Eje Volcánico Transversal. La provincia incluye las elevaciones más altas de México, así como áreas montañosas aisladas, cuya presencia propicia el desarrollo de numerosos endemismos (Rzedowski, 1978). El parque nacional se localiza dentro de lo

que Rzedowski *et al.* (2001) llamarón el Valle de México (Cuenca de México). La Cuenca de México es privilegiada en aspectos florísticos con relación a otras regiones de nuestro país ya que, al ubicarse en la mitad meridional de la república, es considerada una de las regiones más ricas en el mundo en cuanto a su flora, al interceptarse en su superficie dos regiones biogeográficas, la Neártica y la Neotropical, (Rzedowski *et al.*, 2001).

Los tipos de vegetación se determinaron con base en la clasificación de Rzedowski (1978), los cuales se describen a continuación:

Bosque de *Abies-Pinus-Quercus*.- Esta formación vegetal comprende la mayor parte del área del parque y se ubica al norte de la misma, en un rango altitudinal de 2,800 a 3,000 msnm, en este bosque predominan en el dosel *Abies religiosa* y *Pinus patula*, principalmente. Según Rzedowski *et al.* (2001) se considera a *P. patula* como especie introducida y aparentemente naturalizada. En el estrato arbóreo bajo encontramos diferentes especies de *Quercus*, como *Q. laurina*, *Q. castanea*, *Q. laeta*, entre otros, pero *Q. laurina* parece ser la más abundante, junto con *Salix paradoxa*; los encinos están acompañados de elementos aislados de *Berberis moranensis*, *Garrya laurifolia*, *Arbutus xalapensis*, *Buddleia cordata* y de *Clethra mexicana*. En el estrato arbustivo encontramos a *Senecio barba-johannis*, *Symphoricarpos microphyllus*, *Cestrum anagyris*, *Solanum cervantesii*, *Physalis viscosa*, *Fuchsia microphylla*, entre otras. Por último, en el estrato herbáceo se presentan *Geranium seemannii*, *Valeriana clematitidis* y *A. rchibaccharis hirtella*. Respecto a los hongos macromicetos presentes, principalmente durante la época de lluvias, se tienen *Cantharellus cibarius*, *Phlogiotis helvelloides*, *Amanita ccf. citrina*, *Geastrum triplex*, *Ramaria sp.*

Bosque de *Abies religiosa*.- Este bosque se ubica en la parte central del parque, por arriba de los 3,000 msnm, donde la especie dominante es *Abies religiosa*.

En el estrato arbóreo bajo se encuentra acompañado por *Garrya laurifolia*, *Salix paradoxa* y *Buddleia cordata*. En el estrato arbustivo encontramos *Baccharis conferta*, *Senecio angulifolius*, *S. platanifolius*, *S. barba-johannis*.

En el estrato herbáceo se pueden encontrar *Acaena elongata*, *Sigesbeckia jorullensis* y *Alchemilla procumbens*. En la Cuenca de México generalmente este tipo de vegetación se encuentra en laderas de cerros o cañadas protegidas contra la acción de vientos fuertes e insolación, aunque no es raro encontrarla en el parque, en las cimas de los cerros

pequeños. Así mismo existen macromicetos como *Lactarius salmonicolor*, *Tylopilus sp.*, *Morchella spp.*, *Inocybe geophyla*.

Bosque de *Abies-Pinus hartwegii*.- Esta formación vegetal se ubica al sur del área, ocupa una franja angosta alrededor de los 3,650 msnm, la que representa la transición entre el bosque de *Abies religiosa* perturbado por incendios y las partes más altas ocupadas por *Pinus hartwegii*-pastizal. El dosel se encuentra dominado por *Abies religiosa* y *P. hartwegii*, acompañados en el estrato arbustivo por *Baccharis conferta* y *Senecio salignus*; en el estrato herbáceo encontramos diferentes especies de gramíneas, predominando *Festuca amplissima*. Además encontramos hongos como *Lyophyllum spp.*, *Entoloma spp.*, *Amanita muscaria*, *Boletus pinicola*.

Bosque de *Pinus hartwegii*-Pastizal.- Esta comunidad puede considerarse como la mejor adaptada al clima de alta montaña (Melo, 1978) por lo que este bosque se ubica en las partes más altas del área, específicamente en cimas y laderas de los Cerros San Miguel y Caballete, altitudes que van de los 3,600 a los 3,780 msnm. Su composición en el dosel es principalmente de *Pinus hartwegii*; mientras que el estrato arbustivo es casi nulo, encontrando elementos aislados de *Baccharis conferta*, *Lupinus montanus*, *Juniperus monticola*, *Senecio cinerarioides* y *Ribes ciliatum*, sobre todo en lugares rocosos. En el estrato herbáceo la dominancia es de gramíneas, principalmente de *Festuca amplissima*, acompañada por *Muhlenbergia macroura*, *M. robusta* y especies como *Eryngium proteiflorum*, *Penstemon gentianioides* y *Echeveria secunda*, entre otras. Algunos de los hongos presentes son *Laccaria laccata*, *Amanita aff. rubescens*, *Collybia dryophyla* y *Boletus spp* (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación de la vegetación en el Desierto de los Leones.

Superficie ocupada por tipos de vegetación	
Tipo de Vegetación	Superficie (ha)
<i>Abies-Pinus-Quercus</i>	680.65
<i>Abies religiosa</i>	183.03
<i>Abies</i> perturbado por incendio	421.37
<i>Abies-Pinus hartwegii</i>	59.90
<i>Pinus hartwegii</i> -pastizal	93.49
Vegetación secundaria	66.15
Área de reforestación	19.36
Total	1,523.95

5.1.1.5. Fauna

Se han reportado 57 familias de vertebrados, de las cuales tres corresponden a anfibios, cinco a reptiles, 35 a aves y 14 a mamíferos, con 136 especies en total según registros de especímenes colectados dentro del área y depositados en el Instituto de Biología y en el Museo de Zoología “Alfonso L. Herrera” de la Facultad de Ciencias, ambos pertenecientes a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Las familias mejor representadas son: Plethodontidae (Clase Amphibia), con cinco especies, Phrynosomatidae (Clase Reptilia) con tres especies, Parulidae (Clase Aves) con 13 especies y Muridae (Clase Mammalia) con siete especies. Estas especies representan para los anfibios el 58.3% y para los reptiles el 30.7% con respecto a la lista potencial de especies reportadas para la Cuenca de México por Díaz (1961), González (1964), Aguilar (1971) y Dúges (1988). Los mamíferos representan el 32.1% de los reportados para la Cuenca de México (Ceballos y Galindo, 1984) y la Sierra del Ajusco (Aranda *et al.*, 1980); y las aves, el 29.1% de las señaladas para la Ciudad de México por Wilson y Ceballos (1987) y el 44.5% de las citadas por Velázquez y Romero (1999).

Se tienen 30 especies endémicas de vertebrados que representan el 22% de las especies reportadas para el área. De éstas, Amphibia y Reptilia presentan el mayor porcentaje con 100% de endemismos; seguida de Mammalia, con 18.5%; y Aves, con 10.6%.

De acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2001, 15 especies se encuentran en algunas categorías de riesgo (amenazadas o sujetas a protección especial) y constituyen el 11% del total de especies registradas. Cinco especies de anfibios (71.4%), tres de reptiles (37.5%) y siete especies de aves (7.4%) se ubican en alguna categoría de riesgo.

5.1.2. Cerro Tláloc

5.1.2.1. Localización

Se localiza en la región fisiográfica conocida como Sierra Nevada al oriente del Estado de México. La elevación del cerro es de 4120 m y sus laderas muestran graves problemas de erosión en toda la región (Palma, 1996). El área de estudio se localiza en la vertiente occidental del Cerro Tláloc entre las latitudes 19° 26' 12.5" N y 19° 26' 27" N y entre las

longitudes 98° 45' 26.2" O y 98° 45' 54" O. La elevación del área de estudio varía entre 3027 y 3150 m.

5.1.2.2. Clima

A lo largo del declive occidental del Cerro Tláloc se distinguen tres subtipos climáticos; en las áreas planas más cercanas a los lomeríos el clima es C (w0) (w) b(i'); templado subhúmedo con una precipitación media anual de 700 mm. Con régimen de lluvia en verano, temperatura media anual entre 12 y 18 °C y con una oscilación térmica de 5 a 7 °C. En la zona de lomeríos hacia las estribaciones de la Sierra de Río Frío el clima es C (w1) (w) b(i'); templado subhúmedo, con una precipitación media anual entre 800 y 900 mm, régimen de lluvias en verano, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C y con una oscilación térmica de 5 a 7 °C. En las laderas montañosas el clima es de tipo C(w2) (w) b(i'); templado subhúmedo, con una precipitación media anual entre 900 y 1200 mm, régimen de lluvias en verano, temperatura media anual entre 10 y 14 °C con una oscilación térmica de 5 a 7 °C. Las fluctuaciones climáticas se deben a la orografía (Ortíz y Cuanalo, 1977).

5.1.2.3. Suelos

De acuerdo a Mooser (1975) el material que constituye el Valle de México fue producto de erupciones ocurridas en el terciario y cuaternario a partir de fallas y fracturas de la formación Chapala-Acambay, ramal de la falla de san Andrés. Las formaciones del terciario medio (oligoceno-mioceno) se localizan del Tláloc hasta cerca del poblado de San Pablo Ixayoc. El material que constituye la cuenca del Río Texcoco incluye materiales endesíticos, dacíticos y abánicos de origen volcánico. Los suelos que se localizan en la cuenca del Río Texcoco de acuerdo a la clasificación de la FAO incluyen el phaeozem háplico, regosol eútrico, cambisol eútrico, litosol, fluvisol.

Los suelos son incipientes, de textura gruesa en las proximidades del cono cinerítico del Tláloc y en las áreas restantes son negros, profundos, muy ricos en materia orgánica y de textura media (migajones o francos).

5.1.2.4. Vegetación

Palma (1996) reporta seis tipos de vegetación: pastizal, bosque de pino, bosque de oyamel, bosque de pino-oyamel-encino, bosque de pino-aile-encino y bosque de pino-encino, las variaciones altitudinales y climáticas. La vegetación de la cuenca del Rio Texcoco se distribuye de la siguiente manera:

En la zona alta de montaña se encuentra bosque y pastizales de altura. En la parte más alta de esta zona se tiene bosque de *Pinus hatwegii*, *Garrya laurifolia* y *Juniperus monticola*. A continuación bosque de *Abies religiosa* y *Quercus spp.*

En la zona media de lomeríos se desarrolla bosque de *Pinus leiophylla*, *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus rudis*, *Cupressus lindleyi*. En sitios húmedos la vegetación está constituida por *Alnus jurollensis*, *Salix bonplandiana*, *Fraxinus udhei*, *Buddleia cordata*, *Prunus serotina*, *Taxodium mucronatum* y *Senecio salignus*.

Las especies de vegetación herbácea características de estas Áreas son: gramíneas, leguminosas, cactáceas, liliáceas y compuestas.

La zona baja es un área en al que no se encuentra vegetación nativa aunque existe *Schinus molle* que es una especie abundante hasta los 2500 m.

5.2. Muestreo

Utilizando mapas de cada una de las áreas de estudio (Desierto de los Leones y Cerro Tláloc), se seleccionaron cinco sitios circulares de 1000 m² en cada una de ellas, procurando que las características topográficas (elevación, exposición y pendiente) en las áreas de estudio fueran similares. Estos sitios fueron utilizados para evaluar la PPN de especies arbóreas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Coordenadas geográficas de las áreas de muestreo (CT y DDLL).

Sitios	Cerro Tláloc					Desierto de los Leones				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Coordenadas	19° 26' 30.86'' 20° 45' 58.14''	19° 26' 24.73'' 20° 45' 50.02''	19° 26' 11.56'' 20° 45' 31.31''	19° 26' 29.30'' 20° 45' 37.49''	19° 26' 10.06'' 20° 45' 26.45''	19° 18' 43.48'' 21° 18' 3.83''	19° 18' 24.06'' 21° 18' 24.05''	19° 18' 14.00'' 21° 18' 26.87''	19° 18' 4.48'' 21° 18' 17.33''	19° 18' 49.60'' 21° 18' 4.94''

Dentro de cada sitio de muestreo se instalaron tres trampas de 0.5 m², para la evaluación de detritus (hojarasca). Por otro lado se establecieron tres parcelas rectangulares de 3 m x 1 m, para evaluar la productividad de especies arbustivas.

5.2.1. Variables evaluadas

5.2.1.1. Elaboración de modelos de biomasa de Oyamel

5.2.1.1.1. Diámetro a la altura del pecho

A cada uno de los árboles de oyamel que se derribaron, se les determinó el diámetro normal. Ésta medición se tomó con una cinta diamétrica, a una altura de 1.30 m sobre nivel del suelo (Figura 6A).

5.2.1.1.2. Altura total

La altura total se tomó cuando el árbol ya se había derribado y se hizo utilizando una cinta diamétrica (Figura 6B).

5.2.1.1.3. Diámetros mayor y menor de las trozas

Con ayuda de una cinta diamétrica se midió el diámetro inferior así como el superior de cada troza. A cada una de las trozas se le estimó su volumen utilizando la fórmula de Smalian:

$$V = ((B + b) / 2) * L$$

Donde:

v = Volumen de la troza en (m^3)

B, b = Áreas de la secciones mayor y menor de la troza en (m^2)

L = Longitud de la troza en (m)

A



B



C



D



Figura 6. A) Diámetro a la altura del pecho B) Altura total C) Pesado de trozas D) Obtención de muestras de trozas.

5.2.1.1.4. Biomasa de las trozas

Cuando las dimensiones de las trozas lo permitieron se pesaron en campo utilizando una báscula de 100 kg de capacidad y 50 g de precisión (Figura 6C). Se tomó una rodaja de cada extremo de las trozas para obtener el contenido de humedad de la madera (Figura 6D). Esto se hizo colocando las rodajas en un horno de secado de circulación forzada a 80 °C por 48 horas o hasta alcanzar peso constante. El contenido de humedad así determinado se aplicó a las trozas de origen de cada muestra para obtener su biomasa.

Cuando el peso de las trozas rebasó la capacidad de la báscula (100 kg), la estimación de la biomasa de trozas se realizó de manera indirecta utilizando la densidad de la madera multiplicado por el volumen.

5.2.1.1.5. Densidad de la madera de trozas

Se tomó una rodaja de cinco centímetros de espesor de la parte inferior y una de la parte superior de cada troza. Cuando las rodajas fueron demasiado grandes se tomó una muestra representativa (Figura 7A). Para evitar la pérdida de humedad durante el transporte de las muestras al laboratorio, éstas se colocaron en bolsas de plástico. En el laboratorio las muestras se impermeabilizaron con parafina para obtener su volumen (Figura 7B).

Para obtener el volumen de cada muestra se aplicó el principio de Arquímedes. Para ello se utilizaron recipientes con agua de tamaño adecuado al volumen de las muestras. Los recipientes se colocaron sobre una báscula de 100 kg de capacidad y 50 g de precisión cuando las muestras fueron grandes, pero cuando éstas fueron pequeñas se utilizó una balanza de dos kilogramos de capacidad y un décimo de gramo de precisión (Figura 7C).

Posteriormente se procedió a obtener la biomasa de cada muestra o rodaja. Para ello las muestras se colocaron en un horno de secado de circulación forzada a 80°C, para eliminar la parafina y humedad y poder obtener la biomasa (Figura 7D). Con estos datos se obtuvo la densidad de la madera, aplicando la siguiente fórmula:

$$\delta m = mv$$

Donde:

$$\delta m = \text{Densidad de la madera en húmedo (kg/m}^3\text{)}$$

m = Masa de la muestra (kg)

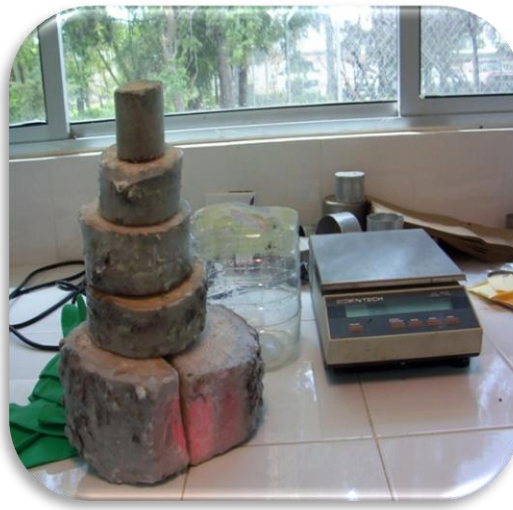
v = Volumen de la muestra (m^3)

Utilizando la densidad de las rodajas se calculó la biomasa de cada una de las trozas.

A)



B)



C)



D)



Figura 7. A) Toma de muestras de trozas, B) Pesado de rodajas con cera, C) Determinación de la densidad de las rodajas, D) Secado de rodajas.

5.2.1.1.6. Biomasa de madera de ramas

La biomasa de ramas se obtuvo utilizando un modelo previamente elaborado de la forma:

$$B_{mr} = f(D_b)$$

Donde:

B_{mr} = Biomasa de madera de ramas (kg)

D_b = Diámetro basal de ramas (mm)

Este modelo fue elaborado siguiendo el procedimiento que se explica a continuación:

Se tomaron 35 ramas de diámetros basales que variaron desde 1mm hasta 27 cm. A cada rama se le midió su diámetro basal con una cinta diamétrica cuando eran muy grandes y con un vernier digital en caso contrario. Por otro lado se determinó la biomasa de madera de las ramas. Cuando las ramas fueron pequeñas el total de madera se introdujo en la estufa de secado y se determinó su biomasa. Para el caso en que las ramas fueron grandes se determinó su peso húmedo y se tomaron muestras de madera (rodajas) las cuales se transportaron al laboratorio en bolsas de plástico para determinar su contenido de humedad.

$$CH_m = ((PH_m - PS_m) * 100) / PH_m$$

Donde:

CH_m = Contenido de humedad de la muestra o rodaja (%)

PH_m = Peso húmedo de la muestra (g)

PS_m = Peso seco de la muestra (g)

El contenido de humedad determinado mediante la fórmula anterior se aplicó a la madera de las ramas para obtener su peso seco, a partir de su peso húmedo.

$$B_{mr} = PH_{mr} - (PH_{mr} * CH_{mr}/100)$$

Donde:

Bmr = Biomasa de madera de rama (Kg)

PHmr = Peso húmedo de madera de rama (Kg)

CHmr = Contenido de humedad de la muestra de madera (%)

Con los datos de diámetros basales y las correspondientes biomásas de cada rama se procedió a elaborar el modelo de biomasa de ramas. Los datos se procesaron en una hoja de Excel probando diferentes modelos para seleccionar el modelo que presentó el mayor ajuste (mayor valor de R^2).

5.2.1.1.7. Biomasa foliar de ramas

La biomasa de acículas de ramas se obtuvo utilizando un modelo previamente elaborado de la forma:

$$B_f = f(D_b)$$

Donde:

B_f = Biomasa foliar de ramas (kg)

D_b = Diámetro basal de ramas (mm)

Este modelo fue elaborado siguiendo el procedimiento que se explica a continuación:

Se tomaron 33 ramas de diámetros basales que variaron desde 1mm hasta 27 cm. A cada rama se le midió su diámetro basal con una cinta diamétrica cuando las ramas eran grandes y con un vernier digital en caso contrario (Figura 8A). Por otro lado se determinó la biomasa foliar, desprendiendo manualmente las acículas y secándolas en un horno de circulación forzada a 70 °C durante 48 horas o hasta alcanzar peso constante. Las acículas secas se pesaron en una balanza de 2 kg de capacidad y un décimo de gramo de precisión (Figura 8B).

Con los datos de diámetros basales y las correspondientes biomásas foliares de cada rama se procedió a elaborar el modelo de biomasa de acículas. Los datos se procesaron en una

hoja de Excel probando diferentes modelos para seleccionar aquel que presentó el mayor ajuste (mayor valor de R^2).



Figura 8. A) Toma de muestras de acículas y B) Determinación de biomasa foliar.

5.3 Para la elaboración de modelos de biomasa de especies arbustivas

Para estimar las biomásas de especies arbustivas se elaboró un solo modelo que incluyó todas las especies arbustivas presentes en los sitios de muestreo (Figura 9A). Con este propósito se establecieron 10 parcelas de 1 m^2 ubicadas aleatoriamente en las cercanías, pero fuera de cada uno de los sitios de muestreo del Desierto de los Leones.

Se cortaron todas las especies arbustivas existentes en las parcelas, se midió el diámetro basal con un vernier digital y se separaron sus componentes madera y acículas. Cada uno de los componentes se colocaron en un horno de secado de circulación forzada a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 h o a peso constante para obtener su biomasa.

A partir del diámetro basal de cada arbustiva encontrada en la parcela de 1 m^2 se obtuvo el área basal mediante la fórmula de $A=\pi r^2$. Sumando las áreas basales individuales se obtuvo el área basal por m^2 , misma que se utilizó como variable independiente en los modelos de estimación de biomasa (Figura 9B).

A)



B)



Figura 9. A) Muestreo de arbustivas y B) Medición de diámetro basal de arbustivas.

5.3.1. Evaluación de la PPNA

5.3.1.1. *Abies religiosa*

5.3.1.1.1. Incremento en diámetro

El incremento en biomasa se evaluó estimando la biomasa de cada árbol encontrado dentro del sitio, a partir de su diámetro a la altura del pecho (DAP), en dos años consecutivos (Figura 10). Para ello fue necesario estimar el DAP un año antes del actual (2007). Esto se logró haciendo una estimación del incremento anual de diámetro, a partir de virutas extraídas de cinco Árboles (aunque cabe señalar que algunos sitios tuvieron menos de cinco árboles) de diámetros variados dentro de cada uno de los sitios de muestreo, considerando también el grosor de la corteza, el cual se estimó siempre a partir del DAP, utilizando un modelo previamente elaborado. Las virutas extraídas se trasladaron al laboratorio, se secaron en una estufa de circulación forzada a 70 °C hasta peso constante, se montaron en una superficie de madera y se midió el incremento de diámetro correspondiente a los últimos cinco años para obtener el incremento medio anual.

5.3.1.1.2. Grosor de corteza

El grosor de corteza se midió utilizando un medidor de corteza. Esta variable se midió en un total de 36 árboles seleccionados aleatoriamente en el área de estudio Cerro Tlálloc. Estos datos fueron utilizados para la elaboración de modelos de estimación de grosor de corteza en función del DAP, medido con una cinta diamétrica.



Figura 10. Extracción de virutas para estimar el incremento en diámetro.

5.3.1.1.3. Masa de detritos de oyamel

Para determinar la masa de detritos, en cada unidad de muestreo se colocaron tres trampas de 1m² de superficie elaboradas de tela, de forma cónica para colecta de detritos (Figura 11A).

En cada una de las unidades de muestreo, se colectó mensualmente los detritos durante 10 meses (febrero-noviembre del 2008, Figura 11B). Las muestras se llevaron al laboratorio para su secado a 75 °C por 48 horas, se separó el material en acículas de pino, acículas de oyamel, ramas de pino, ramas de oyamel y madera de arbustivas y follaje de arbustivas, además de semillas. Cada uno de los materiales se pesó por separado en una balanza analítica. Para cada uno de los sitios de muestreo se obtuvo la masa promedio de cada uno de los componentes de detritos.

A)



B)



Figura 11. A) Colocación de trampas y B) Recolecta de detritos.

5.3.1.2. Especies arbustivas

5.3.1.2.1. Diámetro basal

En cada unidad de muestreo se establecieron tres subparcelas para medición de incrementos y mortalidad de arbustivas.

Para la estimación de los incrementos de biomasa se midió el diámetro basal de todos los individuos de especies arbustivas usando un vernier digital. Esta actividad se realizó en dos fechas una al establecer las parcelas (mayo) y la otra en noviembre 2008.

5.3.1.2.2. Mortalidad de ramas y follaje de arbustivas

En cada una de las unidades de muestreo, se colectó mensualmente los detritos (madera y acículas) de las tres subparcelas durante cinco meses (julio-noviembre del 2008). Las muestras se llevaron al laboratorio para su secado a 75 °C por 48 horas, se separó el material en acículas y madera de arbustivas. Cada uno de los materiales se pesó por separado en una balanza analítica. Para cada una de las unidades muestreo se obtuvo la masa promedio de cada uno de los componentes de las arbustivas.

5.4. Productividad primaria neta de oyamel (PPNaO)

La PPNaO se determinó en cada uno de los sitios circulares de muestreo por el método de campo descrito por Clark *et al.* (2001), utilizando como fórmula general la siguiente ecuación:

$$PPNaO = \Delta Ba + D$$

Donde:

PPNaO = Productividad primaria neta aérea (kg/ha/año)

ΔBa = Incremento de biomasa aérea (kg/ha/año)

D = Detritos de oyamel (kg/ha/año)

El incremento de biomasa aérea incluyó la biomasa de fustes, biomasa foliar y de madera de ramas tanto del año X como del año X-1. La biomasa de estos compartimentos se estimó a partir del diámetro normal de los árboles, utilizando modelos alométricos previamente desarrollados, cuyo procedimiento de elaboración se explicó previamente. El diámetro normal para el año X se obtuvo con una cinta diamétrica mientras que el diámetro normal para el año X-1 se estimó a partir de virutas extraídas de 5 árboles seleccionados aleatoriamente dentro de los sitios de muestreo. Para estimar la biomasa de los compartimentos de los Árboles de *A. religiosa* se utilizaron los modelos alométricos detallados con anterioridad.

En el caso del presente estudio, dentro de las pérdidas solo se consideró mortalidad de órganos aéreos finos, tales como hojas, flores y frutos, además de ramillas.

En cada uno de los sitios circulares se determinó la Productividad Primaria Neta Aérea de fuste, madera de ramas, acículas y total de *Abies religiosa*. Estas variables se compararon entre las áreas de estudio (Cerro Tláloc y Desierto de los Leones) utilizando la prueba no paramétrica de Mann-Whitney.

5.5. Productividad primaria neta de especies arbustivas (PPNaA)

La PPNaA se estimó para cada uno de los sitios de muestreo a partir de las subparcelas rectangulares de 3 x 1 m, utilizando la fórmula general siguiente (Clark *et al.*, 2001):

$$PPNaA = \Delta Ba + D$$

Donde:

PPNaA = Productividad primaria neta aérea de arbustivas (Kg/ha/año)

ΔBa = Incremento de biomasa aérea de arbustivas (Kg/ha/año)

D = Detritos de arbustivas (Kg/ha/año)

5.5.1. Incremento de biomasa aérea de arbustivas

El incremento de biomasa de arbustivas se estimó por diferencia entre las biomásas inicial y final presentes en las subparcelas de 3 x 1m localizadas en cada unidad de muestreo. Utilizando el diámetro basal inicial de las arbustivas se obtuvo el área basal inicial por metro cuadrado. Esta variable se utilizó para alimentar el modelo de estimación de biomásas de madera y foliar previamente elaborado. El mismo procedimiento se realizó al final del periodo de evaluación para obtener por diferencia los incrementos de biomasa (Figura 12A).

5.5.2. Detritos de arbustivas

En cada una de las subparcelas de 3 x 1 m, se colectó mensualmente los detritos (madera y follaje) de arbustivas. Para cada una de las unidades muestreo se obtuvo la masa de cada uno de los componentes (madera y follaje) de las arbustivas (Figura 12B).

A)



B)



Figura 12. A) Medición de diámetro basal en arbustivas y B) Colecta mensual de detritos de arbustivas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Modelos de predicción de biomasa

6.1.1. De *Abies religiosa* (H.B.K) Schl. et Cham.

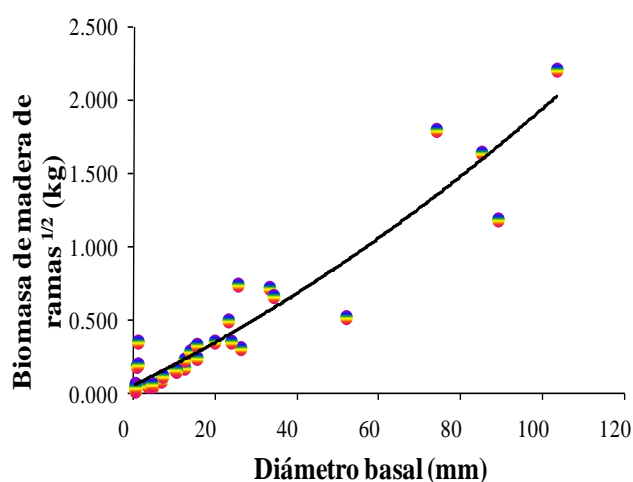
6.1.1.1. Estimación de biomasa a nivel de ramas individuales

La Figura 13 muestra los modelos para estimar biomasa de madera de ramas y acículas de ramas de *Abies religiosa* (H.B.K) Schl. et Cham. La predicción de biomasa está en función del diámetro basal de las ramas. Los modelos son de tipo polinomial de segundo grado y su uso se recomienda para ramas con diámetros que varíen desde uno hasta 105 mm debido a que los modelos derivan de ramas de esas dimensiones. El uso del modelo para estimación de biomasa de ramas de dimensiones fuera del intervalo mencionado puede resultar en estimaciones sesgadas.

Para el modelo de madera de ramas se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9074, y para el caso de acículas de ramas de 0.8363. Estos valores de R^2 son bajos comparados con los obtenidos por Castellanos *et al.* (1996) en un estudio con *Pinus patula* (0.96 y 0.92 para madera de ramas y follaje de ramas, respectivamente) y también son inferiores comparados con los encontrados por Garcidueñas *et al.* (1987) para el caso de *Pinus montezumae* (0.9663 y 0.8557 para madera de ramas y acículas de ramas, respectivamente). Vidal *et al.* (2004) reportan una R^2 para biomasa de acículas de 0.9055 y para biomasa de madera de ramas de 0.8954 para *Pinus caribaea var. caribaea*. Estos valores son parecidos a los determinados en el presente estudio.

Es probable que los relativamente bajos valores de R^2 obtenidos en el presente trabajo sean consecuencia de los altos niveles de mortalidad de ramillas y follaje relacionados con la declinación de la especie presente en la zona. En la construcción de estos modelos se tomaron ramas con grados de declinación muy variables lo que probablemente contribuyó a aumentar la variabilidad y a disminuir los coeficientes de determinación.

A)



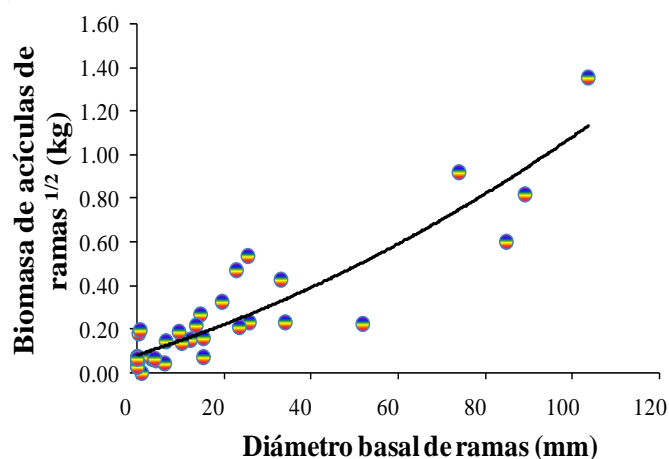
$$Bmr^{1/2} = 0.00005Dbr^2 + 0.0133Dbr + 0.0605$$

$$R^2 = 0.9074$$

Donde:

Bmr= Biomasa de madera de ramas (kg)
 Dbr = Diámetro basal de ramas (mm)

B)



$$Bacr^{1/2} = 0.00004Dbr^2 + 0.006Dbr + 0.0778$$

$$R^2 = 0.8362$$

Donde:

Bacr = Biomasa de acículas de ramas (kg)
 Dbr = Diámetro basal de ramas (mm)

Figura 13. Modelos de biomasa de A) madera de ramas y B) acículas de ramas de *A. religiosa*, en el Cerro Tláloc, Texcoco, Edo. de México.

6.1.1.2 Estimación de biomasa a nivel árbol

La Figura 14 muestra los modelos para estimar biomasa de fuste, biomasa de madera de ramas y biomasa de acículas de árboles completos de *A. religiosa*. La predicción de biomasa en estos modelos está en función del diámetro normal (DN). El modelo para biomasa de fuste es de tipo potencial, mientras que los de biomasa de madera de ramas y de acículas son de tipo exponencial. El uso de estos modelos es recomendable para valores de DN que varíen desde de 12 cm hasta 105.80 cm.

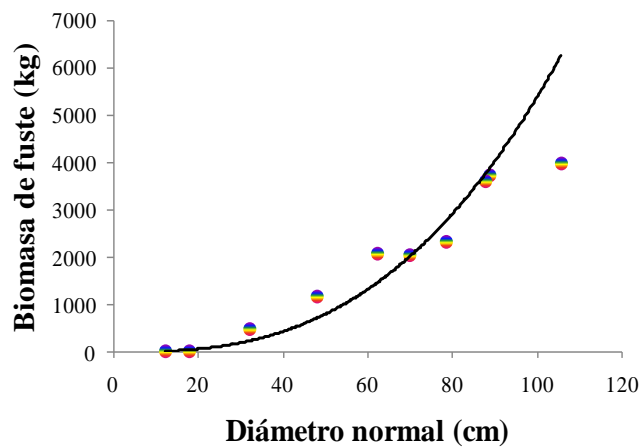
Para el modelo de biomasa de fuste se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.928, para madera de ramas de 0.6176 y para biomasa de acículas, de 0.588. Díaz (2007), en un estudio con *Pinus patula* reporta valores de R^2 de 0.9828 para biomasa de fuste en el cual el diámetro normal varió en un rango de 6.7 a 64.1 cm. Para *Abies religiosa* Avendaño *et al.* (2007) encontraron una R^2 de 0.99. Gerón y Ruark (1988), obtuvieron una R^2 de sólo 0.62 para biomasa de acículas en *Pinus radiata*. Navar *et al.* (2001) reportan una R^2 de 0.83 para biomasa de fuste, 0.66 para biomasa de madera de ramas y 0.38 para biomasa de acículas de *Pinus durangensis* y *Pinus cooperi*.

Aunque los valores de R^2 obtenidos en el presente trabajo son superiores que los reportados por algunos otros autores, hubiera sido deseable lograr valores más altos; sin embargo esto no fue así, probablemente como consecuencia de los altos niveles de mortalidad a nivel fuste, ramas y de acículas, a su vez causados por la de declinación en la zona.

Para la construcción de estos modelos se tomaron árboles con grados de declinación muy variables, lo que probablemente contribuyó a aumentar la variabilidad con la consecuente disminución de los coeficientes de determinación, especialmente en los casos de ramas y de acículas (Figura 15).

La variabilidad en la biomasa de ramas y acículas normalmente es afectada por la posición de la copa en el dosel en especies intolerantes a la sombra; sin embargo, en el caso de *Abies religiosa*, una especie tolerante a la sombra, la expectativa es que estos compartimentos no sean alterados de manera significativa por el mencionado factor, debiéndose atribuir la variabilidad encontrada en el presente trabajo al fenómeno de declinación de la especie, el cual claramente afecta la sobrevivencia de ramas y la permanencia del follaje, así como la mortalidad y pudrición de partes del fuste.

A)



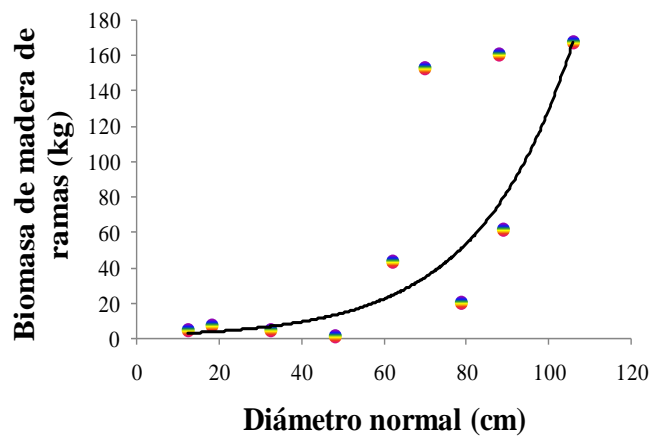
$$Bf = 0.0173Dn^{2.7459}$$
$$R^2 = 0.928$$

Donde:

Bf = Biomasa de fuste (kg)

Dn = Diámetro normal (cm)

B)



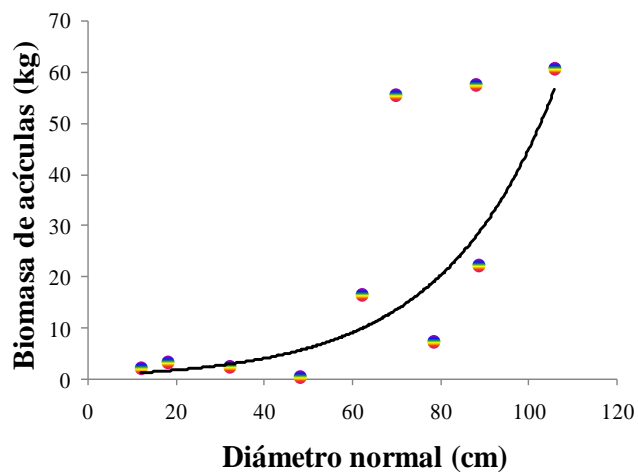
$$Bmr = 1.5842e^{0.044Dn}$$
$$R^2 = 0.6176$$

Donde:

Bmr = Biomasa de madera de las ramas (kg)

Dn = Diámetro normal (cm)

C)



$$Ba = 0.8413e^{0.0398Dn}$$
$$R^2 = 0.588$$

Donde:

Ba = Biomasa de acículas (kg)

Dn = Diámetro normal (cm)

Figura 14. Modelos de biomasa de A) Fuste, B) Madera de ramas y C) de Acículas de *A. religiosa* a nivel árbol, en el Cerro Tláloc, Texcoco, Edo. de México.

A)



B)



C)



D)

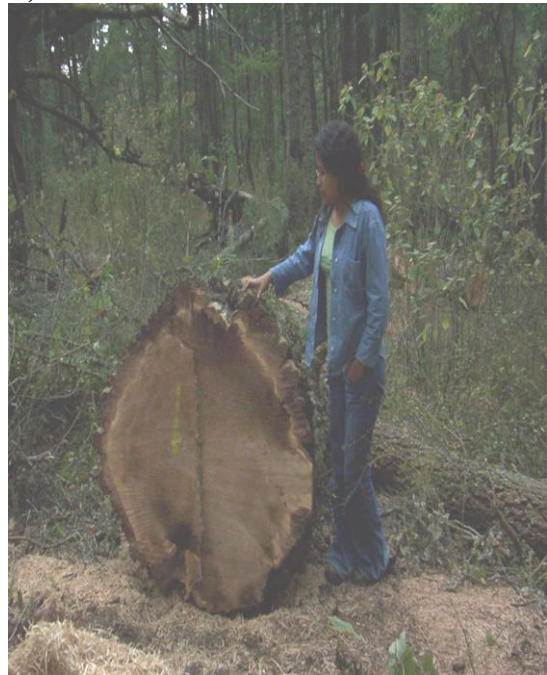


Figura 15. A, B, C y D. Árboles derribados para la elaboración de los modelos de estimación de biomasa.

Cuadro 5. Comparación de biomاسas totales de *Abies religiosa*, estimadas con los modelos del presente trabajo y con el modelo de Avendaño *et al.* (2007).

DAP (cm)	Biomasa total (presente estudio, kg)	Biomasa total (Avendaño <i>et al.</i> , 2007, kg)*
10	13.3	23.1
15	33.9	64.0
20	70.3	131.7
25	126.3	230.6
30	205.5	364.5
35	311.3	536.8
40	447.0	750.5
45	615.8	1008.7
50	820.7	1314.1
55	1065.0	1669.3
60	1351.7	2076.8

* $B = 0.0714 * DN^{2.5103}$; B= Biomasa seca (kg), DN= Diámetro normal (cm)

El Cuadro 5 muestra que existe marcada diferencia en la estimación de biomasa de *Abies religiosa* al usar el modelo obtenido en el presente trabajo comparado con el del estudio de Avendaño *et al.* (2007). El modelo de Avendaño *et al.* (2007) produce casi el doble de biomasa que el conjunto de modelos del presente trabajo (fuste + madera de ramas + acículas). Estas diferencias muy probablemente son consecuencia del grado de declinación que se presenta en la zona (Cerro Tláloc), donde algunos individuos presentaron el duramen podrido o en proceso de pudrición (Figura 16), mortalidad de ramas y en algunas ocasiones la punta de la copa muerta (Figura 17). No existen reportes de la existencia de declinación en Nanacamilpa, Tlaxcala, zona estudiada por Avendaño *et al.* (2007). Si la diferencia en las estimaciones de biomasa es debida a los grados de declinación de los bosques de donde provienen los modelos, entonces, las pérdidas de biomasa debidas a este fenómeno son muy elevadas y seguramente de importantes implicaciones ecológicas y económicas.

A)



B)



C)



D)



Figura 16. Duramen A-B) En proceso de pudrición, C-D) Podrido.

A)



B)

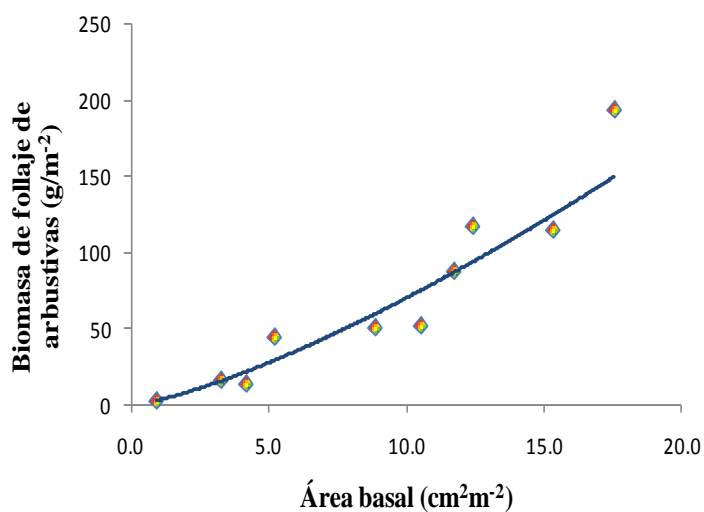


Figura 17. A) Mortalidad de ramas, B) Punta de la copa muerta.

6.1.2. Especies arbustivas

La Figura 18 muestra los modelos para estimar biomasa de madera y follaje de arbustivas. La predicción de biomasa está en función del área basal de arbustivas por metro cuadrado de terreno. Los modelos para biomasa de madera y follaje de especies arbustivas son de tipo potencial y su uso es recomendable cuando los valores del área basal varíen desde cerca de 0 hasta $20 \text{ cm}^2\text{m}^{-2}$. Los coeficientes de determinación de los modelos fueron 0.9533 y 0.896 para biomasa foliar y de madera, respectivamente.

A)



$$Bfa = 3.1555Ab^{1.3478}$$

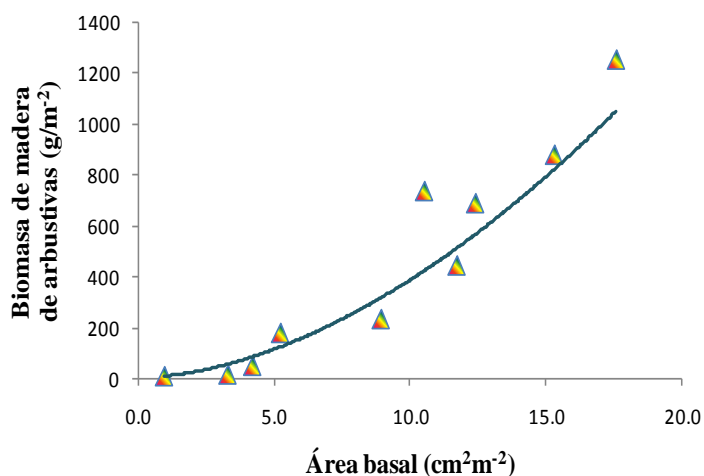
$$R^2 = 0.9533$$

Donde:

Bfa = Biomasa de follaje de arbustivas ($g\ m^{-2}$).

Ab = Área basal ($cm^2\ m^{-2}$).

B)



$$Bma = 6.5389Ab^{1.7714}$$

$$R^2 = 0.896$$

Donde:

Bma = Biomasa de madera de arbustivas ($g\ m^{-2}$).

Ab = Área basal ($cm^2\ m^{-2}$).

Figura 18. Modelos para estimación de biomasa de A) Madera y B) Follaje de arbustivas.

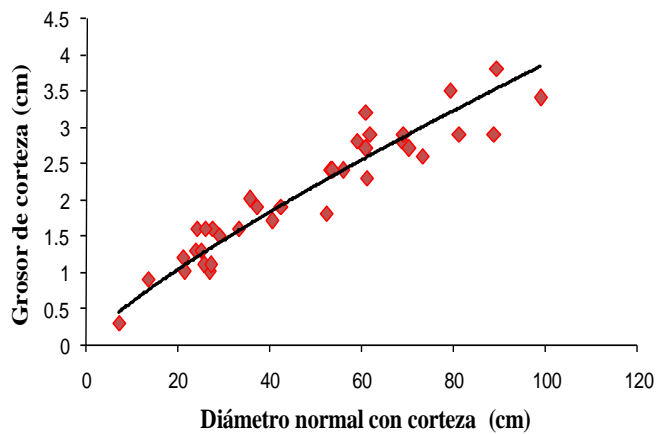
Estos modelos son generales e incluyen a todas las especies arbustivas encontradas en una superficie de un metro cuadrado. Tomando en cuenta que los modelos representan múltiples especies arbustivas, se puede considerar que los coeficientes de determinación obtenidos son relativamente altos. Acosta *et al.* (2002) intentaron elaborar un modelo de predicción de biomasa para varias especies arbustivas, con resultados no satisfactorios. Es probable que el uso del área basal por unidad de superficie como variable independiente en modelos multiespecíficos de estimación de biomasa de arbustivas contribuya a mejorar

la correlación ente la biomasa y la variable independiente, como se encontró en el presente estudio, en el que los coeficientes de correlación fueron altos (Figura 18).

6.2. Modelos de predicción de grosor de corteza

La Figura 19 muestra los modelos para estimar grosor de corteza de *A. religiosa*. La predicción del grosor de corteza se hizo en función del diámetro normal con corteza o bien del diámetro normal sin corteza. Los modelos para grosor de corteza son de tipo potencial y para el caso de la predicción a partir del diámetro normal con corteza, el valor de R^2 fue de 0.912, mientras que para el otro caso fue de 0.8966.

A)



$$Gc = 0.0886Dncc^{0.8208}$$

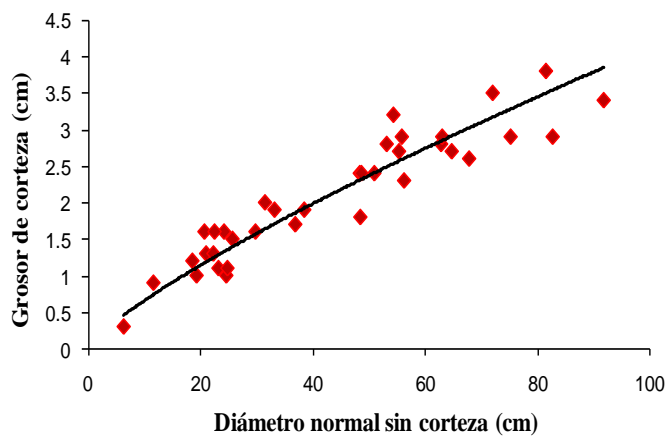
$$R^2 = 0.912$$

Donde:

Gc = Grosor de corteza (cm)

Dncc = Diámetro normal con corteza (cm)

B)



$$Gc = 0.104Dnsc^{0.7985}$$

$$R^2 = 0.8966$$

Donde:

Gc = Grosor de corteza (cm)

Dnsc = Diámetro normal sin corteza (cm)

Figura 19. Modelos para estimación de grosor de corteza de *A. religiosa* a partir de A) Diámetro normal con corteza y B) Diámetro normal sin corteza.

Los modelos indican que existe una correlación razonable entre el diámetro normal y el grosor de corteza en *Abies religiosa*, y que por tanto, es factible usarlos para estimar en

forma práctica el grosor de corteza a partir de diámetros ya sea con o sin corteza, que en ocasiones se requieren durante el proceso de estimación de los incrementos de biomasa. La correlación es de tipo potencial; es decir, al aumentar el diámetro normal del fuste incrementa el grosor de corteza, aunque los cambios de grosor de corteza al cambiar la categoría diamétrica son ligeramente menores cada vez que aumenta el diámetro normal.

6.3. Productividad primaria neta aérea

6.3.1. Productividad Primaria Neta Aérea (PPNa) de *Abies religiosa*

En la Figura 20 se observa que la PPNa en el Desierto de los Leones es superior ($5178 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) que en el Cerro Tláloc ($4680 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Este comportamiento es contrario al hipotetizado, ya que se esperaba una mayor PPNa en el Cerro Tláloc, debido a que el paisaje en esta área tiene mejor apariencia que en el Desierto de los Leones, con mayor cantidad de árboles por hectárea, aunque éstos son de menores dimensiones y el área basal por hectárea es similar en ambas áreas de estudio (Cuadro 6).

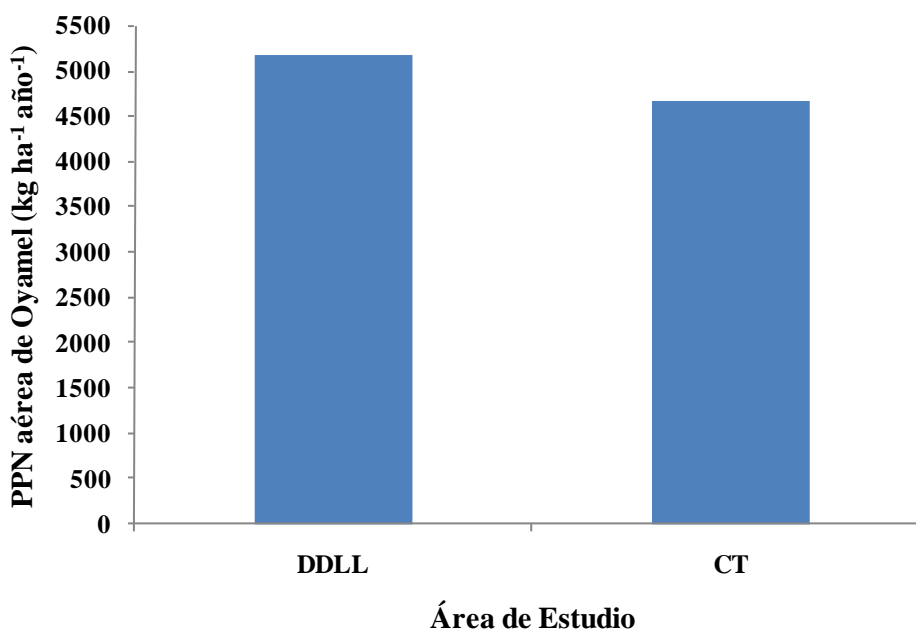


Figura 20. Productividad Primaria Neta Aérea en las áreas de estudio Desierto de los Leones (DDLL) y Cerro Tláloc (CT).

Cuadro 6. Variables dasométricas del bosque de Oyamel en las áreas de estudio.

Área de estudio	Sitio	Cantidad de árboles por sitio	Diámetro Normal (cm)	Área basal ha ⁻¹ (m ² ha ⁻¹)
DDL	1	4	55.6	10.0
	2	6	93.5	36.0
	3	7	72.4	30.0
	4	31	26.1	31.0
	5	12	56.9	32.0
Media		12	60.9	27.8
CT	1	6	52.8	16.0
	2	21	54.3	39.0
	3	32	45.7	42.0
	4	25	23.7	17.0
	5	45	37.7	61.0
Media		25.8	42.84	35.0

No obstante que la Figura 20 muestra una mayor PPNa, en el Desierto de los Leones la prueba de Wilcoxon indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos áreas de estudio (DDL y CT, Cuadro 7). El mismo cuadro muestra que tampoco existe diferencia significativa en PPN de los diferentes compartimientos del árbol entre las áreas de estudio.

Cuadro 7. Prueba de Wilcoxon para la PPN de los diferentes componentes del árbol (fustes, ramas y acículas) en el Desierto de los Leones (DDL) y Cerro Tláloc (CT).

	Prob> Z	Z	DDL (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	CT (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)
PPNf	0.417	0.209	3719.77a	3068.57a
PPNr	0.338	-0.418	473.48a	407.28a
PPNac	0.265	-0.627	985.20a	1204.85a
PPNa			5178.44a	4680.70a

Letras iguales en una fila indican que los valores de PPN no son diferentes estadísticamente.

PPNf= Productividad primaria neta de fustes, PPNr= Productividad primaria neta de ramas, PPNac= Productividad primaria neta de acículas, PPNa= Productividad primaria neta aérea.

Al inicio del estudio se consideró como bosque sano al Cerro Tláloc y al Desierto de los Leones como bosque en declinación. En el segundo caso existen documentos científicos que demuestran que el Desierto de los Leones es un bosque en declinación (Bauer, 1972; Krupa *et al.*, 1976; Hernández, 1984; Alvarado *et al.*, 1993; López, 1993; López, 1996; Castro, 2002; López *et al.*, 2006), sin embargo, para el Cerro Tláloc no existe información al respecto, por lo que el considerarlo como bosque sano tuvo como base la apariencia visual del bosque principalmente. Con base a lo anterior se esperaba para el Cerro Tláloc una mayor productividad primaria neta aérea (PPNa) de *Abies religiosa* que para el Desierto de los Leones. Sin embargo, los resultados de este estudio muestran que la PPNa es estadísticamente igual en ambas áreas, por lo que no se rechaza la hipótesis nula.

Lo anterior implica que el proceso de declinación es probablemente más agudo en el Cerro Tláloc que en el Desierto de los Leones actualmente, puesto que la PPN es la suma de los incrementos de biomasa, en este caso de los árboles de Oyamel, y en el Cerro Tláloc, la densidad de arbolado es mucho mayor que en el Desierto de los Leones (Cuadro 6). Es decir, en el DL se acumula igual cantidad de biomasa por unidad de superficie y de tiempo con pocos árboles (todos ellos con importantes secuelas por el fenómeno de declinación), que en el Cerro Tláloc, donde la densidad de arbolado es mucho mayor. Este hallazgo concuerda con el hecho de que en el Cerro Tláloc se han estado haciendo cortas de saneamiento y recuperación para mejorar la condición general del bosque como sucedió en el Desierto de los Leones en la década de 1980 del siglo pasado. Obviamente estas cortas responden a las altas tasas de mortalidad de arbolado que se han presentado en la zona, además de los daños visibles a nivel de ramas y acículas.

Cuando los árboles fueron derribados para la elaboración de los modelos de biomasa del presente trabajo, se detectó que el duramen del 40% de los individuos presentó pudrición. Esto indica que el proceso de declinación en esta área está en una fase aguda y muy probablemente en pocos años el Cerro Tláloc se encuentre en las mismas condiciones que presenta el Desierto de los Leones en la actualidad.

La PPNa en las dos aéreas estudiadas en el presente trabajo es baja comparada con el rango propuesto por Landsberg y Gower (1997) quienes mencionan que la PPNa promedio para coníferas de clima templado frío oscila entre 2000 y 20 000 kg ha⁻¹ año⁻¹; sin embargo, Lieth (1975) y Schlesinger (1997), mencionan que los bosques más

productivos alcanzan valores de 30 000 kg ha⁻¹año⁻¹. Cabe destacar que los bosques más productivos se encuentran cerca del Ecuador donde los niveles de temperatura y luz son altos durante todo el año, existe abundante precipitación y no hay estación de crecimiento y reposo como en las zonas templadas de los hemisferios norte y sur.

Manzano *et al.* (2007), reportaron una PPN aérea de 9898.09 Kg ha⁻¹año⁻¹ en una plantación de *Pinus montezumae* ubicada en Tequexquináhuac, Texcoco, Edo. de México; la parte baja del Cerro Tláloc. Esta productividad es alta comparada con la obtenida en el presente trabajo, aun cuando la plantación evaluada por dichos autores, se ubica en un sitio altamente erosionado y con fuertes limitaciones nutrimentales (Etchevers *et al.*, 1992). Esto confirma que el proceso de declinación del oyamel en el Cerro Tláloc es muy agudo.

Grier *et al.* (1986) reportaron una PPN de 7660 kg ha⁻¹año⁻¹ para *Pseudotsuga menziesii* en el NW de EEUU. Este valor es alto comparado con los valores obtenidos en el presente trabajo. Schlesinger (1997) reporta una PPN de 4260 kg ha⁻¹año⁻¹ en un bosque joven de *Abies amabilis* de 23 años mientras que para uno de 180 años de edad de la misma especie, reportó 2320 kg ha⁻¹año⁻¹. En el caso del bosque joven, la PPNa es parecida a la determinada en las áreas estudiadas del presente trabajo, sin embargo en el caso del bosque viejo la productividad fue inferior a la obtenida en el presente estudio.

Varios estudios en el suroeste del Valle de México sugieren que los daños en el Desierto de los Leones se deben a altos niveles de ozono. Tal es el caso de los estudios de Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda (2002) quienes reportan que el daño se ve reflejado en lesiones en acículas y en el sistema radicular que contribuyen a la disminución del vigor en el arbolado. Alvarado (1989) menciona que la exposición juega un papel muy relevante en la presencia o ausencia de árboles afectados ya que el viento que llega cargado con los contaminantes se estanca al final de las cañadas, además de que la altura de las montañas en ocasiones puede coincidir con la altura de la capa de inversión térmica de la Ciudad de México, la cual se ubica aproximadamente a 900 m sobre el nivel de la Ciudad de México y evita la fuga de contaminantes, produciendo un daño más severo en esa parte de las cañadas.

Los vientos dominantes arrastran la contaminación hacia el Desierto de los Leones, pero para el caso del Cerro Tláloc, muy probablemente aunque los vientos no son dominantes, la concentración de los contaminantes en el ambiente ha sido alta en los últimos años, por eso los daños son graduales tal como ocurrió en el Desierto de los Leones en décadas pasadas. Respecto a esto, Villaseñor-González, (datos no publicados) encontró concentraciones de ozono de 128 y 110 microgramos de ozono por metro cúbico (0.000128 y 0.00011 ppm) en Huixquilucan (poniente del Valle de México) y Cerro Tláloc (oriente del Valle de México) respectivamente. El investigador encontró también que las concentraciones en los sitios son significativamente diferentes. Castro (2002) reportó que en el Cerro Tláloc, existen registros de contaminantes como metales pesados en el suelo que han sido evaluados en algunos estudios técnicos.

Alvarado (1989) señala una evidente muerte ascendente de los árboles en el Desierto de los Leones, la cual puede explicarse debido a que las ramas de la parte inferior han estado más tiempo expuestas a la influencia de los factores promotores de la declinación. Por el contrario, las ramas que se encuentran en la parte superior, por ser las más jóvenes son las últimas en morir. Esta sintomatología es generalizada y va acompañada de la pérdida de la forma cónica de la copa de los árboles. Todos estos cambios en la fisonomía de los árboles implican una disminución de la producción primaria neta aérea de los individuos.

Estudios sobre nutrición de *A. religiosa* en el Desierto de los Leones reportaron desórdenes nutrimentales en los árboles en declinación; sin embargo, también relacionaron el proceso de declinación y por ende la baja productividad primaria neta aérea con la presencia de contaminantes del aire. López *et al.* (2006) señalan que la aparición de síntomas de declinación y probablemente el propio proceso de declinación en el Desierto de los Leones se debe a los desórdenes nutrimentales presentes en los árboles, aunque tales desórdenes posiblemente tienen su origen en la presencia de contaminantes atmosféricos. La presencia de contaminantes atmosféricos, especialmente ozono, promueve la translocación de nutrimentos desde los tejidos maduros a los que están en crecimiento, generando deficiencias nutrimentales, envejecimiento prematuro y defoliación en los primeros (Lange *et al.*, 1987; Nambiar y Fife, 1987).

Los estudios anteriores indican que la zona del Desierto de los Leones, aparentemente es la más afectada por el fenómeno de declinación de *A. religiosa* y que este proceso, debería

reflejarse en una disminución de la productividad primaria neta aérea (PPNa) de la especie. No obstante, el presente estudio indica que la PPNa de *A. religiosa* es igual en el Desierto de los Leones que en el Cerro Tláloc lo cual muestra que esta última área y probablemente otras áreas de *A. religiosa* del centro de México pueden estar sufriendo en la actualidad un proceso acelerado de declinación.

En los últimos años se ha autorizado por parte de la SEMARNAT aprovechamientos maderables de saneamiento y recuperación de *A. religiosa* en el Cerro Tláloc para extraer los árboles más afectados por muerte progresiva. Este hecho está de acuerdo con lo encontrado en el presente estudio e indica que probablemente en el futuro, los bosques de esta especie en el Cerro Tláloc presenten una fisonomía parecida a los del actual bosque del Desierto de los Leones.

6.3.2. Productividad Primaria Neta Aérea (PPNa) de especies arbustivas

En la Figura 21, se observa que la PPNa aérea de arbustivas en el Desierto de los Leones fue de 7326.8 kg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que para el Cerro Tláloc fue de 249.6 kg ha⁻¹ año⁻¹.

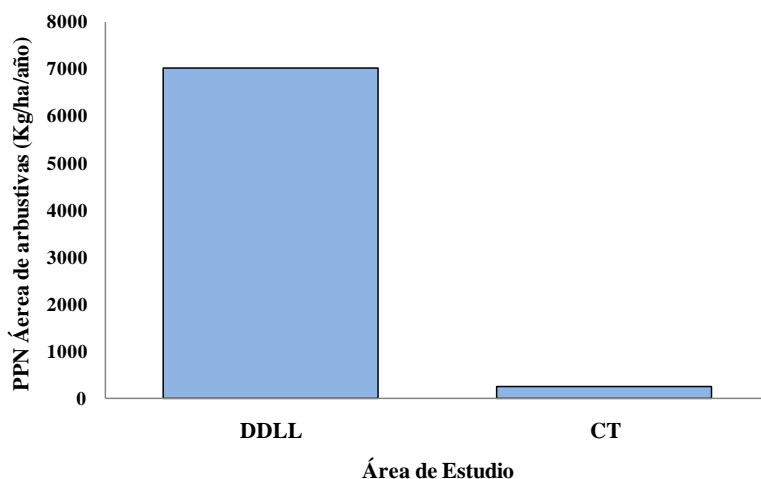


Figura 21. Productividad Primaria Neta Aérea de arbustivas en el Desierto de los Leones y Cerro Tláloc.

La mayor productividad primaria neta aérea de especies arbustivas en el Desierto de los Leones probablemente es resultado del proceso de declinación de *A. religiosa* en la zona. En efecto, la densidad de arbolado de *A. religiosa* en la mayoría de sitios del Desierto de los Leones es baja debido a la elevada mortalidad de arbolado sucedida en el pasado (Cuadro 6). La baja densidad de arbolado propicia el ingreso de una radiación solar

elevada a la superficie del suelo, lo que a su vez facilita el establecimiento de abundantes cantidades de especies arbustivas.

Contrariamente, en el Cerro Tlálloc, aunque el fenómeno de declinación de *A. religiosa* es agudo de acuerdo con la baja PPN de esa especie encontrada en el presente estudio, hoy en día existe una densidad de arbolado mucho mayor que en el Desierto de los Leones, debido a que el proceso de declinación es incipiente o más reciente en la zona, lo que reduce la llegada de radiación solar al sotobosque, limitando el establecimiento de arbustivas.

El Cuadro 8 muestra una mayor PPNa de arbustivas en el Desierto de los Leones, la prueba de Wilcoxon indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos áreas de estudio (DDLL y CT). El mismo cuadro muestra que existe diferencia significativa en PPN de los diferentes compartimientos de las arbustivas entre las áreas de estudio.

Cuadro 8. Prueba de Wilcoxon para comparar la PPNa de arbustivas del DDLL y CT.

	Prob> Z	Z	DDLL	CT
PPNm	0.010	2.327	5905.9a	90.7b
PPNh	0.010	2.327	1420.9a	158.9b
PPNa			7326.8a	249.6b

Letras iguales en una fila indican que los valores de PPNa no son diferentes estadísticamente.

PPNm = Productividad primaria neta de madera de arbustivas

PPNh = Productividad primaria neta de hojas de arbustivas

6.3.3. Productividad Primaria Neta Aérea Total (PPNaT)

El Cuadro 9 muestra una gran diferencia en PPNa total (oyamel + arbustivas) en las dos áreas de estudio (12205 y 4930 kg ha⁻¹año⁻¹ para el DDLL y CT, respectivamente). La prueba de Wilcoxon indica que la PPNaT de Desierto de los Leones es significativamente superior que la del Cerro Tlálloc (Cuadro 10).

Cuadro 9. Productividad Primaria Neta Aérea Total del Desierto de los Leones y Cerro Tláloc.

Área de estudio	Sitio	PPNa de Oyamel (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	PPNa de Arbustivas (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	PPNaT por Área de estudio (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)
DDLL	1	5178.44	7026.85	12205.29
CT	2	4680.70	249.61	4930.31

Cuadro 10. Prueba de Wilcoxon para la Productividad Primaria Neta Total del DDLL y CT.

	Prob> Z	Z	DDLL	CT
PPNa Oyamel	0.265	0.627	5178.44a	4680.70a
PPNa de Arbustivas	0.01	2.327	7026.85a	249.61b
PPNaT	0.033	1.837	12205.29a	4930.32b

Letras iguales en una fila indican que los valores de PPNa no son diferentes estadísticamente.

PPNa= Productividad primaria neta aérea, PPNaT= Productividad primaria neta aérea total.

6.4. Partición de biomasa dentro del árbol

En la Figura 22 se observa que la mayor cantidad de biomasa se localiza en los fustes, seguida de la biomasa de ramas y acículas. Esta proporción de biomazas entre los componentes de los rodales es congruente con la condición de declinación que actualmente presentan las áreas de estudio. Es decir, las biomazas de ramas y de acículas son extremadamente reducidas en comparación con las biomazas de fuste debido a la pérdida de parte de estos componentes como consecuencia del proceso de declinación.

Avendaño *et al.* (2007), reportan que en los árboles de oyamel que ellos estudiaron se encuentra el 84.63 % de biomasa en los fustes, 6.89% en ramas y 8.48 % en acículas. Estos valores son superiores a los determinados en el presente estudio. Esto sugiere que los árboles en los sitios que se estudiaron en el presente trabajo están más dañados a nivel ramas y acículas muy probablemente por su exposición y cercanía a la Ciudad de México, área con altos niveles de contaminación comparada con las áreas de estudio de Avendaño *et al.* (2007), las cuales se encuentran en la vertiente opuesta al Valle de México, en el Estado de Tlaxcala.

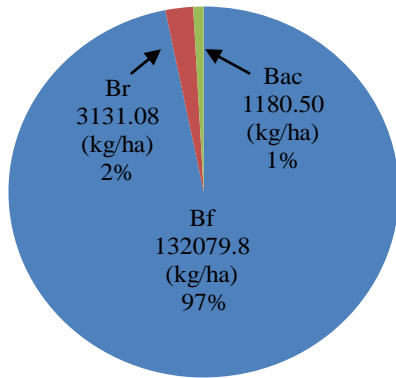
Los valores de biomasa de ramas y acículas encontradas en el presente trabajo son aún más bajos comparados con los obtenidos para los casos de *Pinus durangensis* y *Pinus cooperi* por Navar *et al.* (2001), quienes reportan que el fuste contiene 64 y 67 % de la biomasa total del árbol, mientras que la madera de ramas contiene 22.5 y 22.4 %, y la biomasa de acículas 13.5 y 10.6 % respectivamente para cada especie.

Las limitadas proporciones de biomasa de ramas y acículas mostradas en la Figura 22, sugieren una importante tasa de mortalidad de estos componentes del árbol, la cual es probable que sea producto del proceso de declinación, de acuerdo con las descripciones de este proceso hechas por Alvarado (1989) y Ciesla (1989).

La Figura 22 muestra que la biomasa se concentra en el fuste (Bf) en ambas áreas de estudio, y la menor cantidad de biomasa se encuentra en las acículas (Bac) del arbolado de oyamel. Cabe mencionar que si bien en el área del Desierto de los Leones se encuentra una mayor cantidad absoluta de biomasa en ramas que en el Cerro Tlálloc, es importante señalar que los modelos fueron elaborados a partir de datos provenientes del Cerro Tlálloc, en donde el proceso de declinación es incipiente aunque agudo. En esta área de estudio se observa una considerable cantidad de copa en los individuos, contrario a lo registrado en el Desierto de los Leones en donde el daño es extremadamente marcado y el dosel se observa sumamente reducido. Por esta razón las estimaciones de biomasa de ramas y acículas para el caso del Desierto de los Leones pueden estar considerablemente sobrestimado (Figura 22A). En este sentido hubiese sido deseable considerar una variable indicadora del grado de daño en la copa para obtener modelos con aplicación a bosques con grados de daño variados.

Por la razón anterior las estimaciones obtenidas de la biomasa de ramas y acículas, en el caso Desierto de los Leones no parecen ser congruentes con la apariencia actual del arbolado en esa zona cuyas biomasa de ramas y acículas son extremadamente reducidas.

A)



B)

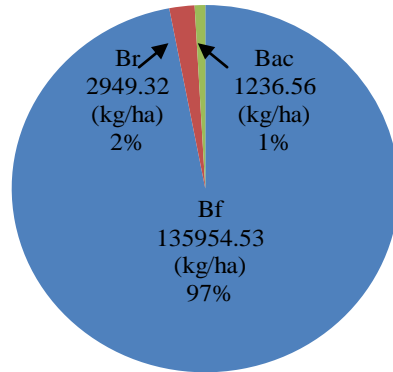


Figura 22. Partición de biomasa entre los componentes aéreos de *Abies religiosa* en A) Desierto de los Leones y B) Cerro Tlálloc.

7. CONCLUSIONES

- Los valores de R^2 obtenidos para los modelos de biomasa de madera de ramas y de acículas se consideran bajos (0.6176 y 0.588 respectivamente). Este resultado se atribuye, en alguna medida, a la amplia variación en los niveles de declinación de los árboles seleccionados para desarrollar los modelos, ya que este fenómeno provoca mortalidad principalmente de ramas y de acículas, aunque también causa alteraciones al fuste.
- El uso de un modelo multiespecífico para especies arbustivas con área basal por hectárea como variable independiente produjo buenos niveles de ajuste ($R^2=0.9533$ y 0.896 para biomasa de madera y follaje, respectivamente).
- Con casi el doble de densidad de arbolado en el Cerro Tláloc que en el Desierto de los Leones, ambas áreas tienen estadísticamente igual productividad primaria neta aérea (PPNa) de oyamel. Esta condición, además de los síntomas que presenta el arbolado, implica que en el bosque del Cerro Tláloc se presenta actualmente el proceso de declinación de esta especie.
- 40% de los diez individuos derribados para la elaboración de los modelos de estimación de biomasa presentó pudrición de duramen. Esto puede ser un factor causal del proceso de declinación.
- La PPN aérea de arbustivas en el Desierto de los Leones fue significativamente mayor que para el Cerro Tláloc.
- Aunque el fenómeno de declinación de *A. religiosa* en el Cerro Tláloc es agudo de acuerdo con la baja PPN de esa especie, hoy en día existe una densidad de arbolado mucho mayor que en el Desierto de los Leones, debido a que el proceso de declinación es incipiente o más reciente en la zona.
- La PPNaT en el Desierto de los Leones es significativamente superior que en el Cerro Tláloc. Esto indica que aunque existen graves secuelas del proceso de declinación en el Desierto de los Leones, actualmente este fenómeno parece ser más agudo en el Cerro Tláloc.
- De acuerdo con la baja PPNA en ambas áreas de estudio, la capacidad de estos bosques para capturar carbono atmosférico es limitada por la condición de declinación en que se encuentran.

- El patrón de distribución de biomasa en los componentes aéreos de árboles de *Abies religiosa* en el área de estudio es atípico debido a la alta mortalidad de acículas y ramas.
- 97 % de la biomasa de los rodales se encuentra en el fuste, 2 % en madera de ramas y 1 % en acículas.
- Los modelos de predicción de biomasa generados, probablemente sobreestiman las biomásas de madera de ramas y de acículas en el caso del arbolado del Desierto de los Leones.

8. RECOMENDACIONES

- Se sugiere buscar mecanismos para incrementar la PPNa de la especie en estos bosques a través de prácticas tales como manejo nutrimental, aclareos y limpiezas entre otras.
- Se recomienda investigar la causa de la presencia de la pudrición de duramen encontrado en un 40 % de los árboles derribados en el Cerro Tláloc.
- Para la elaboración de modelos de estimación de biomasa en bosques afectados por el proceso de declinación, se sugiere incluir un índice del grado de declinación como una variable independiente adicional.

9. LITERATURA CITADA

- Alvarado, R. D. 1989. Declinación y muerte del bosque de Oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Valle de México. Tesis de Maestría. Centro de Fitopatología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 78 p.
- Alvarado, R. D.; Bauer L. y J. Galindo A. 1993. Decline of sacred-fir (*Abies religiosa*) in a forest park south Mexico City. *Environmental Pollution*. 80: 115-121.
- Alvarado-Rosales, D. y Hernández-Tejeda T. 2002. Decline of sacred fir in the Desierto de los Leones National Park. In: Fenn, M. E., de Bauer, L. I., Hernández-Tejeda T. (Eds.), *Urban air Pollution and Forests. Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Ecological Studies Series, vol. 156. Springer-Verlang, New York. pp. 243-260.
- Aguilar, O. V. 1971. Anfibios y Reptiles existentes en la colección del departamento de Zoología del Instituto de Biología. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 78 p.
- Anderson, H. R.; A. Ponce de León.; J. Bland M.; J. Bower S. y D. Strachan P. 1996. Air pollution and daily mortality in London. *Brid. Med. J.* 312: 665-669.
- Aranda, J. M.; C. Martínez del Río L.; C. Colmenero. y V. Magallón M. 1980. Los Mamíferos de la Sierra del Ajusco". COCODA, D. F., México.
- Avendaño, H. D.; Acosta, M. M.; F. Carrillo A. y Etchevers, B. J. 2007. Estimación de la biomasa y carbono en árboles de *Abies religiosa* (H.B.K.) SCHL. et CHAM. Mediante ecuaciones alométricas. VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Morelia, Michoacán, México. Memorias en extenso. 9 p.
- Bauer, L. I. de. 1972. Uso de plantas indicadoras de aeropolutos en la Ciudad de México. *Agrociencia*. México. 9: 139-141.

- Bauer, L. I. de.; T. Hernández T. y W. Manning. 1985. Ozone causes needle injury and tree decline in *Pinus hawregii* at high altitudes in the mountains around Mexico City. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 35(8): 404.
- Binns, W. O.; B. Redfern D.; Boswell R. and A. Betts J. A. 1986. Forest health and air pollution: 1986 survey. Forestry Commission Research and Development. 147 p.
- Bolin, B.; B. R. Doos.; J. Jäger. and R. A. Warrick. (Eds.). 1986. The greenhouse effect, climatic change and ecosystems. SCOPE Report 29, Wiley, Nueva York. 541 p.
- Bravo, H.; R. Torres. y R. Sosa. 1988. Ozone and its nighttime concentration in the southern Mexico city metropolitana area. *Geof. Int.* 27(1): pp. 83-98.
- Cantoral, H. M. T. 1986. Comunidades liquénicas epífitas en *Abies religiosa* (H.B.K.) Cham & Schl. como indicadores de contaminación atmosférica en el parque Cultura y Recreativo Desierto de los Leones. Tesis Profesional. Escuela de Estudios Profesionales Iztacala. UNAM. México, D.F. 58 p.
- Castellanos, J. F.; A. Velázquez M.; J. J. Vargas H.; C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Agrociencia* 30: 123-128.
- Castro, C. B. 2002. Contaminación por elementos potencialmente tóxicos en los suelos de Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de Méx. 75 p.
- Ceballos, G. G. y C. L. Galindo. 1984. Mamíferos Silvestres de la Cuenca de México. Editorial Limusa. México. 299 p.
- Charles, O. C. and S. Scott L. 1993. Air pollution in the valley of Mexico. *American Geographical Society.* 83: 119-133.

- Choudhury, A. H.; M. Gordian E. y S. Morris S. 1997. Associations between respiratory illness and PM10 air pollution. *Arch. Environ. Health*. 52: 113-117.
- Ciesla, W. M. 1989. Aerial photos for assessment on forest decline. A multinational overview. *J. For.* 87 (2): 37-41.
- Clark, D. A.; S. Brown.; D. Kicklighter W.; J. Chambers Q.; J. Thomlinson R. y J. Ni. 2001. Measuring net primary production in forests. Concepts and field methods. *Ecological Applications*. 11(2): 356-370.
- CONABIO. 2006. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2006. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx>.
- De la I, de Bauer. y T. T. Hernández. 1986. Contaminación: una amenaza para la vegetación en México. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 78 p.
- Díaz, F. R.; Acosta M. M.; F. Carrillo A.; R. Buendía E.; A. Flores E. y J. Etchevers D. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et. Cham. *Maderas y bosque*. 13(1): 25-34.
- Díaz, G. 1961. Contribución al Conocimiento de la Herpetología del Pedregal de San Ángel. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Dietz, T. y E. A. Rosa. 2002. Human Dimensions of Global Environmental Change. En: R. E. Dunlap y W. Michelson (Eds.). *Handbook of Environmental Psychology*. Greenwood Press, Londres. pp. 360-406.
- Dixon, R. K.; S. Brown.; R. Houghton A.; A. Solomon M.; M. Trexler C. y J. Wisniewski. 1994. Carbon pool and flux of global forest ecosystems. *Science*. 263:185-190.
- Dockery, D.W.; C. Pope III A.; X. Xu.; J. Spengler D.; J. Ware W.; M. Fay E.; B. Ferris G. y F. Spaizer A. 1993. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N. Engl. J. Med.* 329: 1753-1759.

- Dúges, A. 1888. Herpetología del Valle de México. Naturaleza. México. 2(1): 97-146.
- Ehrlich, P. R. 1996. Conservation in temperate forests: What do we need to know and do? Forest Ecology and Management 85: 9-19.
- Etchervers, D. J.; R. López R.; M. Zebrowski C. y D. Peña H. 1992. Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala México. Órgano científico de la sociedad mexicana de la ciencia del suelo, A.C. Primer Simposio Internacional. Terra. (10):171-177.
- Fergusson, J. E. 1990. The heavy metals: chemistry environmental impact and health effects. Pergamon press, Great Britain U.K. 486 p.
- Freyermunth, J. E. 1952. Contribución al conocimiento de la flora fanerogámica del “Desierto de los Leones”. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Flores, N. P. 2006. Aplicación de SEM/EDS (Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersion Spectroscopy) para la determinación estructural y elemental de anillos de *Abies religiosa* del Parque Nacional Izta-Popocatepetl. Tesis Profesional. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM, México. 97 p.
- García, A. E. 1988. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Adaptación a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía. UNAM. México. 217 p.
- Garcidueñas, M. A. R. 1987. Producción de biomasa y acumulación de nutrientes en un rodal de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco. Edo. de Méx. 243 p.
- Granados-Sánchez, D. y G. F. López-Ríos. 2001. Declinación forestal. Revista Chapingo. Ciencias Forestales y del Ambiente. 7(1): 5-13.

- Geron, C. D. y G. A. Ruark. 1988. Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree general. *Can. J. For. Res.* 18(10): 1298-1304.
- González, A. H. 1964. Contribución al Conocimiento de la Fauna Herpetológica de las Serranías que Bordean la Cuenca de México. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Grier, C. C. y D. J. Vogt. 1986. Production, turnover and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. En: *Advances in Ecological Research*.15: 303-377.
- Hernández, T. T. 1984. Efecto de los gases oxidantes sobre algunas especies del género *Pinus* nativas del Valle de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 109 p.
- Hoornaert, S.; B. Treiger R.; V. Grieken. and R. Laane. 1999. Trend analysis of the published concentrations of heavy metals in aerosols above the North Sea and the English Channel for the period 1971-1994. *National Research Council Canada. Environ. Rev.* 7: 191-202.
- INEGI. 1993. “Cuaderno Estadístico Delegacional Cuajimalpa de Morelos”, D. F. México. <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx>
- INEGI. 2000. XII censo general de población y vivienda 2000. “Cuaderno Estadístico Delegacional No. 931765”, Cuajimalpa de Morelos y Álvaro Obregón. D.F., México.
- INEGI. 2002. Cuaderno Estadístico Delegacional Cuajimalpa de Morelos, D. F. México. <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx>
- Innes, L. J. and J. M. Skelly. 1994. Waldsterben in forests of central Europe and North America: fantasy or reality. *Plant Disease*: pp. 1021-1032.

IPCC. 2007. El Cambio climático 2007: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. IV informe de evaluación del IPCC. Disponible en:

<http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>

Jacobson, H. K. y Price, M. F. 1990. *A Framework for Research on the Human Dimensions of Global Environmental Change*. Human Dimensions of Global Environmental Change Programme, Barcelona, España.

Kohlmaier, G. F.; E. O. Sire. and A. Janecek. 1989. Modeling the seasonal contribution of a CO₂ fertilization effect of the terrestrial vegetation to the amplitude increase in atmospheric CO₂ at Mauna Loa observatory, *Tellus* 41B. pp 487-510.

Kramer, P. J. and T. T. Kozlowski. 1979. *Physiology of woody plants*. New York: Academic Press. 811 p.

Krupa, S. V. 1999. *Polución, población y plantas*. México. 185 p.

Krupa, S. V. 2002. Sampling and physico-chemical analysis of precipitation: a review. *Environ. Pollut.* 120: 565-594.

Krupa, S. V. y L. I. de Bauer. 1976. La ciudad daña los pinos del Ajusco. México. 4:5-7.

Lacasaña, N. M.; G. Aguilar C. y Romieu, I. 2005. Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina. *Salud Pública de México*. Instituto Nacional de Salud Pública. Cuernavaca, México. 41 (003): 203-215.

Lange, O. L., H. Zellner, J. Gebel, P. Schramel, B. Köstner and F. C. Czygan. 1987. Photosynthetic capacity, chloroplast pigments, and mineral content of previous year's spruce needles with and without the new flush: analysis of the forest decline phenomenon of needle bleaching. *Oecologia (Berl)*. 73: 351-357.

- Landsberg, J. J. and S.T. Gower. 1997. Applications of physiological ecology to forest management. Academic Press. San Diego. 354 p.
- Lieth, H. F. H. 1975. Primary production of the major vegetation units of the world. In: Primary Productivity of the Biosphere (H. Lieth, and R.H. Whittaker, eds.). Ecological Studies 14. Springer-Verlag, New York and Berlin. pp. 203-215.
- López, L. M. A. 1993. Evaluación nutrimental de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones, D.F. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. 101 p.
- López, L. M. A. 1996. Declinación del oyamel del Desierto de los Leones, D.F.: Un modelo del proceso. In: memorias del II Simposio Internacional y III Reunión Nacional sobre Agricultura Sostenible: Una contribución al Desarrollo Agrícola Integral. Comisión de Estudios Ambientales y Campus San Luis Potosí al Colegio de Postgraduados. México. pp. 425-431.
- López, L. M. A.; A. Velázquez M.; M. Acosta J. y E. Estañol B. 2006. Distribución de biomasa en plántulas de Oyamel en Declinación. *INCI*. 31(6): 451-455.
- Manzano, M. D.; M. A. López L.; F. Manzano M. y E. Pineda H. 2007. Productividad primaria neta de una plantación de recuperación de suelos. VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Morelia, Michoacán, México. Memorias en extenso. 11 p.
- Manion, P. D. y D. Lachance. 1992. Forest Decline Concepts. St. Paul, USA. The American Phytopathological Society Press. 249 p.
- Margulis, L. y T. Lovelock. 1974. Biological modulation of the Herat`s Atmosphere. *Icarus*. Academic Press, EE.UU. 21: 471-489.
- Mc Michael, A. J.; R. E. Woodruff. y S. Hales. 2006. Climate change and human health: present and future risks. *Lancet*. 367: 859-869.

- Mooser, F. 1975. Historia Geológica de la cuenca de México, en: departamento del Distrito Federal (eds). Memorias de las obras del sistema del drenaje profundo del Distrito Federal. Tono 1. Talleres Gráficos de la Nación. México, DF. pp 7-38.
- Muhlia, M. A. 2006. Memoria de la primera reunión de investigadores para la conformación del Programa Mexicano del Carbono (PMC). México.
- Nambiar, E. K. S y Fife, D. N. 1987. Growth and nutrient retranslocation in needles of radiata pine in relation to nitrogen supply. *Ann. Bot.* 60:147–156.
- Navar, J.; González N. y J. Graciano. 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango. México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia Chile. pp. 1– 12.
- Noss, R. F. 2001. Beyond Kyoto: Forest Management in a Time of Rapid Climate Change. *Conservation Biology* 15(3): 578-590.
- Ortíz, S. C y Cuanalo de la Cerda H. 1977. Levantamiento fisiográfico del área de influencia de Chapingo. Colegio de Postgraduados. Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, Estado de México.
- Palma, T. A. 1996. Tipología del uso forestal de la tierra de la región norte de la Sierra Nevada y su cartografía. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Estado de México. 103 p.
- Pérez, S. M.; V. M. Cetina A.; A. Aldrete.; M. E. Fenn. y L. L. Landois P. 2006. Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la ciudad de México. *Agrociencia*. 40: 239-248.
- Prat, N. y Ward, J. V. 1994. The tamed river. En *Limnology now: a paradigm of planetary problems* (ed. Margalef, R.), Elsevier Science. pp. 219-236.

- Poschenrieder, Ch. y M. Barceló J. 1999. Structural and ultrastructural changes in heavy metal exposed plants. In: M.N.V. Prasad & J. Hagemeyer (eds.) *Heavy Metal Stress in Plants; from Molecules to Ecosystems*. Springer Verlag, Berlin. pp 183-205.
- Remröd, J. 1985. Efectos de la contaminación atmosférica. IX Congreso Forestal Mundial. SARH. pp. 697-709.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa, México, D. F. 432 p.
- Rzedowski, G. C. y J. Rzedowski. 2001. Flora Fanerógamica del Valle de México. 2da ed. Instituto de ecología A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro (Michoacán). 1406 p.
- Rozelot, J. P. and S. Lefebvre. 2006. *It is possible to find a solar signature in the current climatic warming?* Physics and Chemistry of the Earth. pp. 31-41.
- Ryan, M. G. 1991. A simple method for estimating gross carbon budgets for vegetation in forest ecosystems. *Tree physiology*. 9:255-266.
- Salas, J. R. y A. Infante A. 2006. Aboveground net primary production in some ecosystems and biomass estimation in forest plantations. *Rev. for. Lat.* 40: 47-70.
- Sala, O.; J. Jackson.; H. Money. and R. Howarth. 2000. *Methods in ecosystem science*. Springer-Verlag. Berlin.
- SARH. 1982. Registros del Servicio Meteorológico Nacional 1954-1982". Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Schütt, P. and E. Cowling B. 1985. Waldsterben, a general decline of forest in central Europe: Symptoms, development, and possible causes. *Plant Dis.* 69: 548-558.

Schlesinger, W. H. 1997. Biogeochemistry: An analysis of global change. 2nd Ed. Academic Press. U.S.A. 588 p.

SEMARNAT. 2002. “Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001, Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo”. Diario Oficial de la Federación.

SEMARNAT. 2004. Estadísticas del medio ambiente de México. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección ambiental.

SEMARNAT-INE. 2003. Avances de México en materia de cambio climático 2001-2003, México. Disponible en http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub

Sierra, P. A.; Rodríguez T. D. A.; Bonilla A. V. O.; Flores R. V.; González R. M. A.; Olgún C. C.; Acosta D. M.; Ruíz H. P.; Valladares M. R. y Gómez S. R. 1988. Estructura y dinámica del bosque de oyamel afectado por la declinación forestal en el Desierto de los Leones. COCODER. México. 36 p.

Sosa, A. H. 1952. Parque Nacional Desierto de los Leones. SAG. Dirección General Forestal y de Caza. Colección: Los Parques Nacionales de México. México, D.F. 137 p.

Taylor, O. C. 1969. Injury symptoms produced by oxidant air pollutants. In: Handbook of effects assessment of vegetation damage. Pennsylvania. 4:1-10.

Vázquez, S. J. 1988. Los tratamientos silvícolas del Desierto de los Leones. Sus fundamentos. Comisión Coordinadora para el Desarrollo Rural (COCODER), D. F. pp 7-33.

Vázquez, S. L.; J. C. Tamarit y J. O. Quintanar. 2004. Caracterización de la declinación de bosques de encino en “Sierra de los Lobos” Guanajuato, México. 17: 1-14.

- Velázquez, A. y Romero F. J. 1999. Biodiversidad de la región de montaña del sur de la cuenca de México: Bases para el Ordenamiento Ecológico. Secretaría del Medio Ambiente-Gobierno del Distrito Federal y UAM-X. México.
- Vidal, A.; J. Benítez Y.; Rodríguez, J.; R. Carlos. y H. Gra. 2004. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var *caribaea* en la E.F.I. La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. Quebracho. Revista de Ciencias Forestales. (11): 60-66.
- Williams, L. G. 2007. El bosque de niebla del centro de Veracruz: ecología, historia y destino en tiempos de fragmentación y cambio climático. Conabio. México. 204 p.
- Wilson, R. y H. Ceballos L. 1987. The birds of Mexico City, Mexico City: an Annotated Checklist and Bird-finding Guide to the Federal District. BBC Print y Graph. LTD, Ontario, Canadá.