



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

Registro del daño **por ozono y senescencia** en *Abies religiosa* en dos parajes de Parques Nacionales

Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Zoquiapan

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**BIÓLOGA**

P R E S E N T A:

ELIZABETH MARTÍNEZ HERRERA

DIRECTOR DE TESIS

M. en C.: GERMÁN CALVA VÁSQUEZ

MÉXICO D.F. DICIEMBRE 2012





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

*El mejor de los milagros, es que existen...*

## DEDICATORIA

*Muy especialmente para:*

Dios y a la vida por darme la oportunidad de llegar a otra meta más.

Lourdes Herrera Mireles y Elois Martínez Mireles, mis papás, por ser un ejemplo de lucha y superación, por su paciencia, apoyo y sobre todo amor incondicional. Por su confianza y respeto a mis decisiones.

Cinthya e Israel, mis hermanos, por su apoyo y comprensión, por los momentos juntos, por ser un ejemplo de constante superación a pesar de las pruebas difíciles.

Mely y Zad dos personitas que con sus sonrisas han iluminado todo.

Gracias por ser lo más importante en mi vida, sin ustedes esto no sería posible.

# AGRADECIMIENTOS

## *Mi más profundo y sincero agradecimiento*

A la UNAM- Facultad de Estudios Superiores Zaragoza a la cual pertenece el Laboratorio de Contaminación Atmosférica, por la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura y con ello contribuir a mi superación académica.

Al M.C. Germán Calva Vásquez, por su infinita paciencia, consejos y apoyo en lo personal pero sobre todo en lo académico; mi respeto y más profunda admiración como profesional y más aún como persona. Un placer haberlo conocido. Que Dios lo bendiga.

A mis sinodales por su tiempo y observaciones para mejorar este trabajo.

A mis profesores de carrera por contribuir a mi crecimiento profesional con la transmisión de sus conocimientos.

A Verónica Román Montero, por su amistad, apoyo, ánimo, consejos. Por compartir momentos de alegría, estrés, histeria, desánimos y logros. Que Dios te llene de bendiciones.

A mis amigos y compañeros Mayra, Pili, Lulú, Nadia, Lety, María, Karina, Miguel, Arturo; por su amistad, consejos y por estar ahí siempre en el momento justo, mil gracias por todo.

# INDICE

INDICE DE CUADROS .....	iii
RESUMEN .....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Planteamiento del Problema .....</b>	<b>2</b>
1.2 Justificación .....	3
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Objetivo General .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2 Objetivos Particulares .....</b>	<b>4</b>
<b>3. HIPÓTESIS .....</b>	<b>5</b>
<b>4. ANTECEDENTES .....</b>	<b>6</b>
<b>5. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
5.1 Formación de ozono a partir de sus emisiones de sus precursores, NO <sub>x</sub> y COV <sub>s</sub> .....	12
5.2 Daño por O <sub>3</sub> troposférico en las plantas .....	13
a) Nivel bioquímico .....	13
<b>b) Nivel celular .....</b>	<b>16</b>
c) Nivel fisiológico .....	18
d) Fotosíntesis .....	18
e) Función estomática .....	20
f) Senescencia .....	20
g) Nivel de ecosistema .....	21
h) Mecanismos de resistencia al ozono .....	23
i) Sensibilidad de especies vegetales a la exposición de O <sub>3</sub> .....	24
j) Enmascaramientos y sinergismos de O <sub>3</sub> .....	25
5.3 Descripción de <i>Abies religiosa</i> .....	26
<b>6 MATERIAL Y MÉTODO .....</b>	<b>28</b>
6.1 Descripción de la zona de estudio .....	28
<b>6.1.1 Fisiografía .....</b>	<b>29</b>
6.1.2 Suelos .....	29
6.1.3 Clima .....	29
6.1.4 Vegetación .....	29
6.1.5 Fauna .....	30

6.2	Muestreo en campo .....	31
6.3.1.1	Evaluación del daño foliar por O <sub>3</sub> en Abies religiosa .....	32
6.3.1.2	<b>Evaluación de daño en las copas por defoliación .....</b>	<b>33</b>
6.3.1.3	<b>Evaluación de la senescencia .....</b>	<b>33</b>
6.3	.....	34
6.4	Fase de laboratorio .....	34
7	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>35</b>
9	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>53</b>
10	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>54</b>
11	<b>ANEXOS .....</b>	<b>60</b>

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Metabolitos secundarios (fenilpropanoides).....	24
<b>Cuadro 2.</b> Clases de daño a determinar en las coronas de los árboles.....	32
<b>Cuadro 3.</b> Correlación de Kendall senescencia y clases de ozono.....	46

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Rosas de viento promedio anual, 2002.....	5
<b>Figura 2.</b> Historia de los registros de ozono en ZMVM (SMA-GDF 2006).....	9
<b>Figura 3.</b> Formación de ozono a partir de COVs y NOx .....	12
<b>Figura 4.</b> Fotografía de la contaminación atmosférica de la ciudad de México.....	13
<b>Figura 5.</b> Hojas de árboles dañadas por ozono.....	17
<b>Figura 6.</b> Daño causado por ozono en renuevo de <i>Abies religiosa</i> en Zoquiapan.....	25
<b>Figura 7.</b> Localización de las áreas de estudio y parajes.....	28
<b>Figura 8.</b> Método de muestreo de 4 sitios circulares (Labaú, 1993).....	31
<b>Figura 9.</b> Muestreo de 4 círculos.....	32
<b>Figura 10.</b> Tipo de mortalidad y % de retención de copa.....	33
<b>Figura 11.</b> Senescencia del follaje a través del conteo de nodos en las ramas.....	34
<b>Figura 12.</b> Método clorótico y necrosis en acículas de <i>Abies religiosa</i> en Zoquiapan e Iztaccíhuatl-Popocatepetl.....	35
<b>Figura 13.</b> Daño por ozono en acículas de <i>Abies religiosa</i> .....	36
<b>Figura 14.</b> Tipo de mortalidad en las copas de <i>Abies religiosa</i> .....	38
<b>Figura 15.</b> Tipo de mortalidad registrada en copas de <i>Abies religiosa</i> .....	39
<b>Figura 16.</b> Estado (condición) de las copas que presenta <i>Abies religiosa</i> .....	40
<b>Figura 17.</b> Estado de las copas que presenta <i>Abies religiosa</i> .....	41
<b>Figura 18.</b> Porcentaje de Retención de follaje en las copas de <i>Abies religiosa</i> .....	42
<b>Figura 19.</b> Senescencia de <i>Abies religiosa</i> del Parque Nacional Zoquiapan.....	44
<b>Figura 20.</b> Senescencia de <i>Abies religiosa</i> del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.....	45
<b>Figura 21.</b> Respuesta de las plantas frente al ozono.....	47
<b>Figura 22.</b> Método clorótico y amarillamiento en ramas de oyamel.....	48
<b>Figura 23.</b> Decaimiento del follaje en <i>Abies religiosa</i> .....	49



## RESUMEN

Se analizaron daños visibles en ramillas y acículas provocados por ozono troposférico en bosques de ***Abies religiosa*** (HBK) Schl. et Cham., en los Parques Nacionales Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Zoquiapan, Estado de México, con el objeto de identificar el estado de salud de bosques de oyamel y saber si ***Abies religiosa*** sirve como indicador de contaminación atmosférica.

Se eligieron dos parcelas en cada paraje de acuerdo a un muestreo dirigido que fueron determinadas por la presencia de bosques puros de oyamel, el muestreo se realizó de acuerdo al método con círculos propuesto por Labaú, (1993) para indicadores de salud en vegetación arbórea, las variables consideradas para este estudio fueron Porcentaje de moteado clorótico en acículas de acuerdo a la plantilla del RED CE NIVEL II, estado de salud, salud y porcentaje de retención en copa de acuerdo a lo propuesto por el Servicio de Protección Contra Agentes Dañinos (SPCAN, 2001), y senescencia del follaje por el método de conteo de nodos en las ramas. Las gráficas y análisis de correlación de Kendall fueron realizados en el Statistical Package Social Science (SPSS V.20).

El análisis de Kendal indicó una correlación significativa entre los índices de ozono registrados en las acículas de ambos parques. 73 % de los individuos muestreados presentaron daño ligero por ozono en ambas zonas, 74% con deterioro importante en sus copas con mortalidad irregular (MI) y ascendente (AC) y con un severo estado accidentado (AC), retención promedio del 63% de su follaje y longevidad foliar de 3 y 4 años, lo que demuestra que ***Abies religiosa*** es una especie sensible a los contaminantes atmosféricos los cuales están influyendo fuertemente en la retención de las acículas para el proceso fotosintético y aumentando el decline de estos bosques, por lo tanto el uso de índice RED CE – II resulto ser buena herramienta para determinar el daño foliar por ozono y ***Abies religiosa*** se propone como especie bioindicadora.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, se emiten grandes cantidades de N a la atmósfera, mediante la agricultura intensiva y la quema de combustibles fósiles, con lo cual se está fertilizando al planeta (Fenn *et al.*, 1998; Fenn *et al.*, 2003), además de intensificar la acidificación de los ecosistemas forestales, la formación de O<sub>3</sub> y el calentamiento global (PNUMA, 2000). En el decline forestal, no actúa un solo factor, varias tensiones bióticas y abióticas se combinan para minar gradualmente la salud del bosque (Smith, 1990; Alvarado *et al.*, 1993). La contaminación atmosférica expresada por altos niveles de óxido nitroso, cambios en los niveles de ozono y la lluvia ácida, se han propuesto como responsables del deterioro de los bosques templados (Briseño, 1989).

Aunque existen diversas sustancias que actúan como oxidantes fotoquímicos, el ozono (O<sub>3</sub>) es el oxidante más reactivo y fitotóxico. Según Kozlouski *et al.*, 1991 (citado por Pérez, 2004). El ozono troposférico (O<sub>3</sub>) es responsable de una amplia gama de daños a las plantas. Las características químicas base de su comportamiento son el alto poder oxidante, una difusión coeficiente similar a la de CO<sub>2</sub> y por consiguiente una cierta facilidad para penetrar en los tejidos vegetales (parénquima y cavidades estomáticas), su solubilidad en agua es 10 veces mayor que el CO<sub>2</sub> y tiende a reaccionar con agua en un entorno medioambiental sub-básico (Izuta, 2006).

Una de las afectaciones severas que padecen los bosques a nivel mundial incluidos los de nuestro país, es el síndrome de decline forestal, el cual ha tenido graves consecuencias acabando con grandes áreas boscosas que tienen una importancia ecológica, ambiental y recreativa para la humanidad (Hernández – Tejeda y Bauer, 1989; Alvarado y Hernández-Tejeda, 2002).

En México una de las zonas donde se han realizado diversos estudios referentes al fenómeno de decline forestal, es en el Parque Nacional Desierto de los Leones (DDLL), ubicado al sur de la ciudad de México. Las principales especies arbóreas como *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*, han sido afectadas gravemente en las últimas décadas, donde se observan áreas con una mortalidad total del arbolado. En algunas cañadas del parque, se acumulan los contaminantes atmosféricos provenientes de la ciudad de México que son arrastrados por los vientos dominantes que van de Noreste a Suroeste (Jáuregui, 1958; Bravo *et al.*, 1991), motivo por el cual se ha señalado el efecto directo de los gases contaminantes como la posible causa del deterioro de la cobertura vegetal de la zona (Alvarado, 1989; Miller *et al.*, 1994 y López *et al.*, 1998).

A pesar de lo anterior, aún existen bosques circundantes a la ciudad de México donde no se han reportado estudios que indiquen las condiciones de salud del arbolado, siendo de estas áreas naturales el Parque Nacional Zoquiapan ubicado a 53 Km al este de la ciudad de México y el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl que se encuentra a 55 km al sureste de la ciudad de México. Estos parques requieren de una sustentabilidad y solo conociendo los **indicadores de presión**, como es el cuantificar el daño por ozono y la senescencia permitirá conocer el **estado del ecosistema** (síntomas que provocan cambios en la copa y crecimiento), solo así es posible buscar alternativas para su conservación, a través de **indicadores de respuesta**, como es el daño foliar causado por ozono. El presente trabajo tiene por objetivo realizar un registro del daño por ozono en poblaciones de *Abies religiosa*, a través de un patrón estandarizado internacional (plantilla generada por ordenador) elaborado por la Comisión Forestal Europea, ya que este modelo puede ser de gran ayuda para conocer aspectos relacionados con el estado de salud, senescencia y decline forestal provocados por ozono.

### 1.1 Planteamiento del Problema

El decline forestal es un síndrome que consiste en la acumulación de varios signos y síntomas, inducidos tanto por factores abióticos como bióticos, los cuales promueven el deterioro gradual del árbol. El deterioro se observa como la pérdida del vigor del arbolado, caracterizado por diferentes síntomas tales como: decoloración del follaje, senescencia prematura (defoliación prematura), rompimiento de las ramas y ramillas, reducción del crecimiento, disminución del follaje y aparición de yemas adventicias así como el incremento en la incidencia de patógenos que dañan hasta ocasionar la muerte de árboles en un periodo más corto de lo normal (Sandermann, 1997).

En México el fenómeno del decline forestal se evaluó en los años 70's por Alvarado *et al.*, (1993) en los bosques del Parque Nacional Desierto de los Leones y Parque Nacional Cumbres del Ajusco, al sur del D F; registrando concentraciones de ozono de 0.09 a 0.15 ppm, y en los Dinamos, al suroeste de la Ciudad de México encontrando concentraciones de 0.15 ppm. Estas concentraciones pueden causar diversos efectos negativos sobre la vegetación, incluyendo daños visibles en las hojas, reducciones en el crecimiento y producción, y altera la sensibilidad a los estreses bióticos y otros estreses abióticos. Se puede concluir que el aumento en las concentraciones de ozono no sólo tienen un efecto negativo sobre la producción de madera (se han señalado disminuciones de hasta un 10%), sino que pueden producir situaciones inestables en ecosistemas forestales que pueden producir una disminución de la capacidad

adaptativa a nuevos estreses en el futuro. Por tanto, efectos a largo plazo sobre los árboles pueden perjudicar la función de los ecosistemas forestales, por ejemplo, su papel con respecto a los balances de agua y energía, protección del suelo frente a la erosión, así como la estética y arquitectura del paisaje (RED CE NIVEL II, 2002).

## 1.2 Justificación

*Abies religiosa* es una especie sensible a las modificaciones del medio ambiente, a los cambios en el régimen de precipitación o la polución, estos factores inhiben la fotosíntesis, alteran el transporte de nutrientes, reduciendo el suministro de nutrientes a las hojas, confirmando la hipótesis formulada en los ochentas por Schutt y Cowling (1985) sobre el decline de los bosques causado por ozono. A pesar de que existen algunos trabajos que evalúan y reportan supuestos de daño por ozono en bosques mexicanos que rodean a la ciudad, México **no cuenta** con criterios que permitan evaluar el estado de salud de sus bosques de oyamel, en materia de daño por ozono (**Estándares globales e internacionales**). La longevidad del follaje (senescencia) es otro indicador que se ha utilizado para evaluar el estado de salud de arbolado; sin embargo, no se ha utilizado en México y puede resultar una herramienta útil para detectar los cambios en las copas por contaminantes aéreos.

Razón por la cual el ozono y la senescencia serán evaluados por un método estandarizado Internacional (plantilla generada por ordenador) realizado y probado por la Comisión Forestal Europea como indicadores de la condición de salud forestal, de la población de oyamel en los Parques Nacionales Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Zoquiapan.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

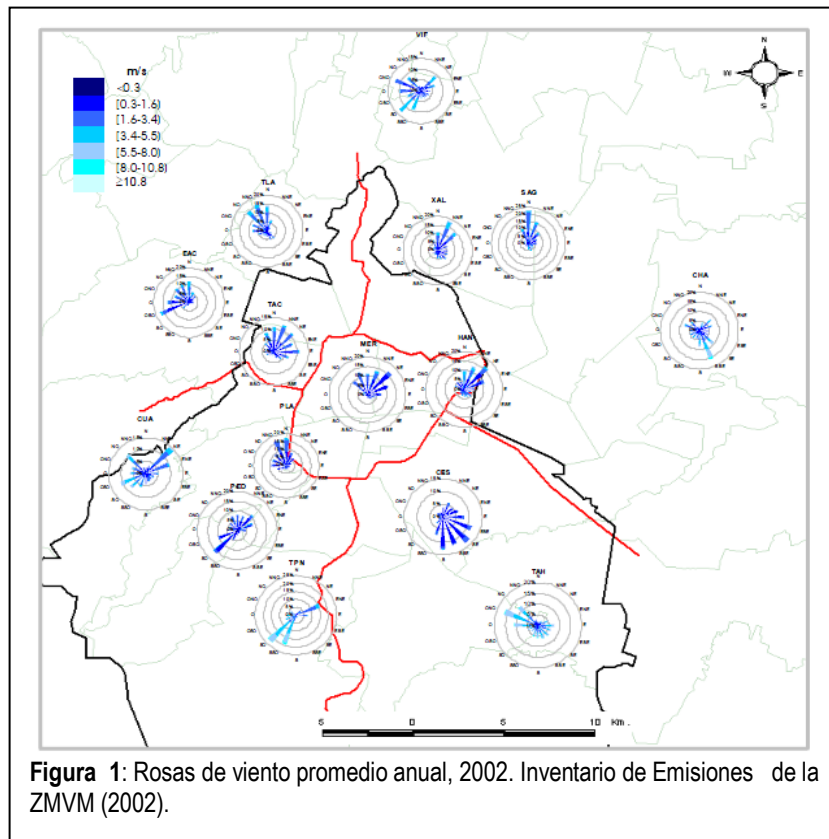
Registrar y comparar el daño por ozono y senescencia en *Abies religiosa* para conocer su estado de salud.

### 2.1.2 Objetivos Particulares

1. Realizar un registro por clases de ozono probando un modelo estandarizado en acículas de *Abies religiosa* para deducir la viabilidad de su aplicación como indicador de salud forestal.
2. Determinar el daño foliar ocasionado por ozono en *Abies religiosa* para valorar su aplicación como especie bioindicadora.
3. Medir la senescencia (longevidad del follaje) en *Abies religiosa* para conocer el estado de salud de las copas y del bosque en general.
4. Comparar el daño foliar en *Abies religiosa* entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl y Parque Nacional Zoquiapan para saber cual presenta mayor afectación de daño por ozono y mejor estado de salud.

### 3. HIPÓTESIS

Sí el ozono proveniente de la Ciudad de México impacta primero los bosques de Zoquiapan antes que en los de Iztaccíhuatl-Popocatepetl, entonces, el daño foliar por ozono de acuerdo con el índice RED-II será, de moderado a severo (clases 2 a 4) para Zoquiapan y de ligero a moderado (clases 0 a 2) para Iztaccíhuatl-Popocatepetl.



La frecuencia de vientos determina una circulación del flujo de los contaminantes de Norte a Sur durante las estaciones de verano-otoño y en sentido contrario durante la temporada invierno-primavera, esto se debe a que los vientos cálidos suben del ecuador.

#### 4. ANTECEDENTES

Los bosques de coníferas son considerados entre los más sensibles a los contaminantes atmosféricos, ya que su elevada rugosidad aerodinámica y densidad de copa incrementan la tasa de intercepción de precipitación y el intercambio de aerosoles, partículas y gases de la atmósfera (Erisman *et al.*, 1994; Rustand *et al.*, 1994; Whelan *et al.* 1998; citados por Pérez, 2004).

Las copas de los árboles tienen una alta reactividad y gran superficie de contacto, por lo que son efectivos receptores de las partículas y gases que son transportados por el aire y que se depositan en el dosel forestal, a través del depósito seco y/o húmedo; de ahí que los bosques sean sumideros particularmente importantes de los contaminantes emitidos a la atmósfera por las actividades antropogénicas (Rustand *et al.*, 1994; Warfvinge *et al.*, 1988; Ranger y Turpault. 1999; citados por Pérez, 2004).

El término decaimiento o decline forestal se usa para describir el estado de deterioro de los ecosistemas forestales incluyendo cambios metabólicos, problemas de reproducción, prematura senescencia de las hojas, decoloración, disminución y alteraciones del crecimiento, alteraciones de las ramas y de la morfología de la copa, pérdida de follaje, y finalmente la muerte del árbol (Innes, 1993).

Los decaimientos forestales observados en las pasadas tres décadas en Europa y Norte América han sido relacionados de forma general con la contaminación, o la presencia de factores bióticos y abióticos asociados a fenómenos de debilitamiento de la vegetación. Los primeros síntomas de estos tipos de daño aparecieron en Alemania al inicio de la década de los 70's, primero en abeto (*Abies alba* Mill) y rápidamente se generalizaron a picea (*Picea abies* Karst.), pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y finalmente a frondosas. La situación anterior fue explicada por el desfavorable efecto de la contaminación atmosférica en los bosques (Innes, 1993). Por ejemplo, la alta radiación solar, la extendida emisión de los precursores de los oxidantes fotoquímicos (NO<sub>x</sub>, COV's) han llevado a pensar que la interacción de contaminantes específicos como el ozono puede convertirse en un factor de estrés para las plantas (Sanz *et al.*, 2001), convirtiendo de esta manera a los bosques en potencialmente sensibles a las fluctuaciones climáticas y a los cambios en las condiciones atmosféricas.

Los daños producidos por el ozono en la vegetación fueron observados en el campo y documentados primera vez por Middleton *et al.*, (1950) en el área de los Ángeles. Estos síntomas eran muy similares a

los efectos causados por el peroxiacetilnitrato (PAN) o por mezclas de PAN, aldehídos y otros compuestos químicos oxidantes. Más tarde, Richards *et al* (1958) describieron motas en la uva cerca de San Bernardino (California) debidas al ozono atmosférico (Richards *et al* 1958, citado por EEA, 1998). En 1952 se observaron puntos cloróticos en las hojas de tabaco en Beltsville (Maryland) y en el sur de Ontario en 1959 (MacDowall *et al.*, 1963; citado por EEA, 1998). En Canadá se realizó un estudio etiológico en 1959 (Linzon, 1966, citado por Delgado, 2005) y en Estados Unidos en 1961 (Berry and Ripperton, 1963, citado por Delgado, 2005) para determinar la relación existente entre el ozono troposférico y unos daños observados en los pinos de la zona este del país.

Publicaciones recientes indican que las concentraciones de ozono en algunos países son suficientemente altas para disminuir el crecimiento y producción de numerosos cultivos y especies forestales de la zona (Pardos, 2006; Seoáñez, 2002; Gimeno, 2008; Delgado, 2005). Se debe prestar particular atención a la presencia de síntomas visibles de daño por ozono en las hojas porque pueden ser útiles para detectar concentraciones fitotóxicas.

En los Estados Unidos se ha demostrado que las concentraciones ambientales de ozono son las responsables del moteado clorótico que se desarrolla desde el ápice hasta la base de las acículas en algunas especies de *Pinus* en el sur de California (Miller *et al.*, 1969; Acobson & Hill, 1970, citado por Sánchez, 1992). El daño se asocia generalmente con la senescencia prematura de las acículas más viejas. Para poder diagnosticar daños de ozono es importante establecer que los síntomas son debidos al ozono y no a deficiencias minerales, o a los efectos de plagas y patógenos (Sánchez, 1992).

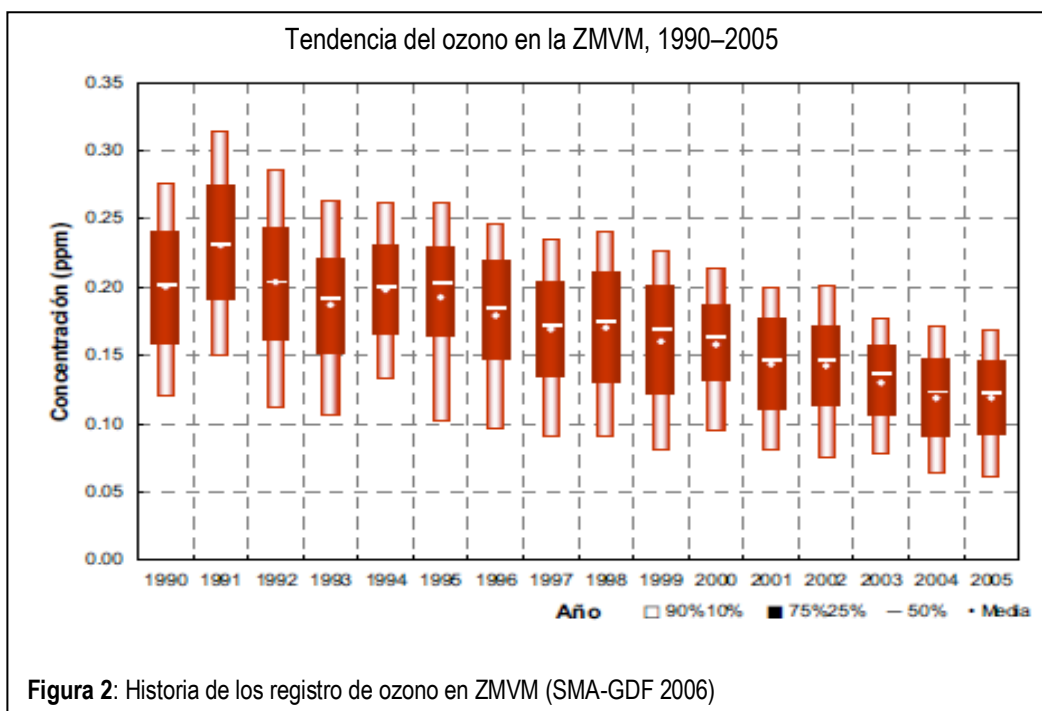
El estudio realizado por Sánchez *et al.*, (1992) confirmó que la contaminación por oxidantes fotoquímicos son los responsables del bandeo clorótico observado en las acículas de los árboles adultos de *Pinus halepensis* de determinadas zonas de España y Grecia. Además, las conclusiones de estas investigaciones están apoyadas por experimentos controlados en la Universidad de Kuopio, Finlandia, donde se han observado síntomas similares (pero más intensos) de bandeo clorótica en plantaciones de Pino carrasco expuestos a concentraciones elevadas de ozono (600 ppb) en períodos cortos (12 h. al día durante dos días) en cámaras de ambiente controlado. Además, se han podido observar síntomas de daños similares en árboles ornamentales de *P. halepensis* del área de Los Ángeles (Káreni, 1987; citado por Sánchez *et al.*, 1992). La observación de que la intensidad del daño aumenta con la edad de las acículas también apoya la hipótesis de que el ozono es el responsable de los síntomas observados en el campo (EPA, 1978).



En hojas de cultivos expuestos durante largos periodos (1-3 meses) a concentraciones ( $100-230\mu\text{g m}^3$ ) de ozono se produce un envejecimiento de las hojas más temprano y una catálisis acelerada que lleva a una rápida pérdida de las proteínas y de la clorofila. Como resultado de la reducción de la duración de la hoja disminuye el periodo de tiempo en el que se asimila el  $\text{CO}_2$  en la planta y por lo tanto se reduce la producción total de la planta (WHO, 2000). Estos cambios, junto con la energía destinada a la eliminación del ozono y sus subproductos, producen decrementos en la productividad de la planta relacionados directamente con los efectos del ozono en la fotosíntesis (Health-Canada and Environment-Canada, 1999). Como consecuencia se provoca en los cultivos una reducción de la cantidad de granos y semillas o incluso puede alterar la capacidad de la planta de tolerar estrés adicional (sequía o bajas temperaturas) (WHO, 2000).

Entre los primeros estudios sobre la contaminación ambiental en la ciudad de México figuran las investigaciones realizadas por Jáuregui en 1958, quien señaló que las montañas del sur del Valle de México, entre las que se encuentra el Ajusco, impiden la salida lateral del aire contaminado que avanza sobre la ciudad generalmente de norte a sur. La evidencia principal indica que el problema principal de la ciudad de México es causado por los gases oxidantes producidos fotoquímicamente, lo cual se debe a que el clima es tibio y seco y numerosos los motores de combustión interna que son la principal fuente de aeropolución.

Históricamente, el ozono en la atmósfera urbana en la ciudad de México se ha vuelto algo cotidiano en base a su concentración (Figura 2). De 1990 a 2005 el ozono ha mostrado una tendencia descendente en la ZMVM alcanzando su nivel máximo en 1991 y 1992 (0.30 a 0.34 ppm promedio horario) y manteniéndose entre 0.25 y 0.27 ppm promedio horario de 1993 a 1996. A pesar de esta tendencia descendente es importante señalar que los valores de ozono han sobrepasado la norma en forma constante entre 0.157 y 0.252 ppm promedio horario, de acuerdo con los valores obtenidos a través de los promedios de las treinta concentraciones máximas anuales TOP30 (RAMA TOP 30, 1996).



La ZMVM alcanza cada vez mayor extensión territorial, alto índice de migración que resulta en casi 20 millones de habitantes, tiene 3.5 millones de vehículos, gran cantidad de industrias, topografía circundante accidentada y aunadas a los fenómenos meteorológicos que agravan el problema de la contaminación atmosférica (DDF, GEM, SSA, 1996). Los resultados de las reacciones fotoquímicas no solo es el O<sub>3</sub>, sino también, aldehídos y aerosoles que inciden en el daño a la estructura arborea siendo en general más sensibles las coníferas las especies de hoja ancha.

Los estudios del efecto de los aeropolutantes sobre la vegetación en México los inicio Bauer a partir de 1971, quien detecto daños por gases oxidantes en algunas plantas indicadoras expuestas en la Ciudad de México (Hernández, 1984). Posteriormente, observó que los pinos y otras plantas silvestres son afectados por los gases oxidantes producidos en la Ciudad de México y transportados por el viento. Así mismo se han hecho algunas observaciones sobre el efecto de los aeropolutantes en la vegetación del Valle de México, donde se encontró que los pinos son las especies más sensibles. En un estudio realizado durante 1981 en el Ajusco, D.F., se concluyó que el decaimiento de los árboles de *Pinus hartwegii* y *P.moctezumae* se debe al efecto de los gases oxidantes, principalmente ozono, del cual se han registrado concentraciones de 0.15 ppm o más, mismas que rebasan la norma de calidad del aire

para la Ciudad de México, que es de 0.11 ppm, siendo la primera especie la más sensible (Hernández, 2009).

En la década de los ochenta se realizaron estudios detallados sobre los síntomas de daño en los pinos del Ajusco, determinándose por primera vez que el efecto de los oxidantes fotoquímicos (especialmente O<sub>3</sub>) se expresa como una pequeña mancha irregular de color blanco, principalmente en las acículas de mayor edad, la cual poco a poco va tomando un color amarillo, que al coalescer (unirse o fundirse) con otras, y con el paso del tiempo, forman una mancha de color café claro, conocida como “lesión necrótica”. Finalmente, ocurre una **senectud** y caída de las acículas prematuras (Hernández, 1984). El aspecto senil de árboles jóvenes y la proliferación de brotes adventicios y una fructificación intensa en *Abies religiosa* constituyen caracteres de las etapas que preceden una mortandad generalizada (Rosas, 2006). Si las hojas se dañan, se secan y caen prematuramente por acción del O<sub>3</sub>, los árboles defoliados se debilitan progresivamente y son presa fácil de los descortezadores.

En el caso de *Abies religiosa* del Desierto de los Leones (Bauer and Krupa, 1990) explican que la exposición del bosque a contaminantes atmosféricos ha causado una disminución importante en el arbolado, caracterizándose por una pérdida de copa en los árboles, producto de la pérdida temprana de las ramas y se explica cuando el ozono reduce el crecimiento global y acelera la **senescencia** de las hojas, aun en las hojas nuevas.

## 5. MARCO TEÓRICO

La actividad agropecuaria e industrial produce y libera a la atmósfera y al suelo grandes agentes contaminantes denominados xenobióticos, como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), compuestos clorofluorocarbonados (CFC), plaguicidas, metales y otros compuestos (Grajales, 2002).

La fotólisis de los óxidos de nitrógeno provoca en la troposfera la acumulación de ozono, en donde los hidrocarburos, aldehídos y monóxido de carbono aceleran dichas reacciones (Wellburn, 1994). Estas reacciones fotoquímicas se ven afectadas por otros factores del ambiente como: la velocidad del viento, la temperatura, la humedad atmosférica, la concentración de los gases, así como por la inyección de nuevas emisiones atmosféricas (Treshow y Anderson, 1989; citado por Grajales, 2002).

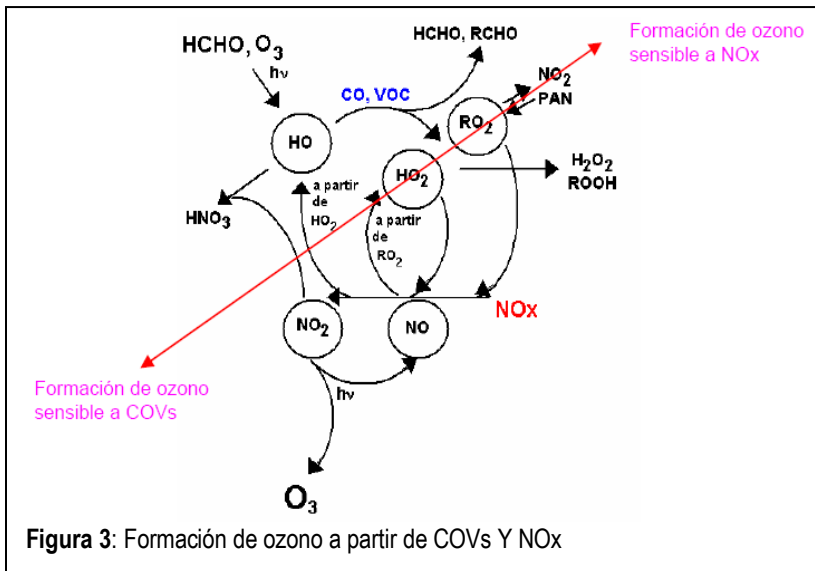
La mayor parte del ozono existente en la atmósfera se encuentra en la estratosfera (12 ppm), formando parte de la capa que protege a la Tierra de los rayos ultravioleta (ozonósfera). Sin embargo, aproximadamente un 10% del ozono existente en la atmósfera (en una concentración aproximada de 0.02 ppm) se localiza en las capas bajas de la misma, y es la resultante de reacciones químicas, activadas por la radiación solar, de otros contaminantes primarios como los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), y en menor medida, el metano ( $\text{CH}_4$ ) (Andrade, 1989).

Las concentraciones de ozono mayores a 0.025 ppm y otros oxidantes de origen fotoquímico, son el resultado de por lo menos, tres procesos generales: 1) la emisión inicial, la dispersión y el transporte de los precursores: hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. 2) reacciones fotoquímicas que ocurren en la atmósfera conforme se efectúa la dispersión y el transporte de los contaminantes. 3) el proceso de depuración de la atmósfera que se da en la trayectoria de los contaminantes y que reduce la concentración tanto de los precursores como de los oxidantes resultantes de las reacciones fotoquímicas (Andrade, 1989).

## 5.1 Formación de ozono a partir de sus emisiones de sus precursores, NO<sub>x</sub> y COVs

Las siguientes reacciones forman el ciclo fotolítico del bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) para la generación de ozono. Figura 3

El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es un componente normal del aire, y se disocia por la acción del Sol:



El oxígeno atómico (O) formado, reacciona a su vez con el oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) presente en el aire.



El ozono producido vuelve a reaccionar con el NO de la primera reacción:



En un ciclo natural que evita la producción excesiva de ozono en la superficie.

Las mezclas de NO, NO<sub>2</sub> y HC disponibles para las reacciones fotoquímicas en atmósferas urbanas dependen de los tipos y las cantidades de emisiones de los precursores, la meteorología y el almacenamiento de los contaminantes de días previos (Figura 4).



Para diseñar una estrategia de control para el  $O_3$ , es necesario evaluar cuidadosamente las repercusiones que tendría en la fotoquímica de la contaminación atmosférica el control de precursores, hidrocarburos no metánicos y óxidos de nitrógeno. Para eso es necesario realizar una investigación muy específica sobre los estudios de exposición, efecto de dispersión de contaminantes y las mediciones ambientales.

## 5.2 Daño por $O_3$ troposférico en las plantas

Los efectos del ozono en las plantas se presentan de manera general en diferentes niveles de organización que van desde el nivel molecular (metabólico o bioquímico), celular (tejidos), fisiológico (nivel de organismo completo, es decir, la planta) y ecosistema (comunidad de plantas) (Weber *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 2001). Nótese la interacción de los niveles puesto que el nivel de ecosistema depende del fisiológico, el que a su vez depende del celular y éste, del bioquímico (Grajales, 2002).

### a) Nivel bioquímico

El gas suele actuar por absorción, es decir, penetra por los estomas, y ataca principalmente al parénquima en empalizada, debido posiblemente a que el ozono produce en ellos una serie de transformaciones químicas que lo convierte en un agente fitotóxico muy activo (Sandermann, 1996). Seguidamente ataca a grupos de células debajo de la epidermis. Se presentan plasmólisis por deshidratación y el contenido celular se destruye, apareciendo en algunos casos ciertos pigmentos oscuros (Gimeno, 2008).

Una vez que el  $O_3$  entra por los estomas, se difunde en la fase gaseosa y dada su alta reactividad, se convierte en otros compuestos altamente oxidantes que se difunden en la fase líquida. En dicha fase, los ácidos grasos insaturados, los grupos sulfhidrilos y los aminoácidos como la metionina, el triptófano, la tirosina, la histilina, la fenilalanina y la cistina, son susceptibles al ozono (Orcutt y Nilsen,

2000). Las numerosas reacciones de oxidación que se producen inducen la pérdida de la permeabilidad selectiva del plasmalema y provocan el colapso y muerte celular, lo que conlleva a la aparición de lesiones necróticas en las hojas, similares a la respuesta hipersensible inducida por el ataque de patógenos (Azcon, 2000).

Orcutt y Nilsen (2000), mencionan que el  $O_3$  reacciona con los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados formando aldehídos o cetonas y peróxido de hidrógeno, siendo este último el que resulta tóxico para las plantas. Los aldehídos posteriormente se oxidan con el ozono para formar ácidos, dando lugar a un proceso referido como ozonólisis. El  $O_3$  puede aumentar los radicales libres en los tejidos de la planta ya sea indirectamente o bien por su descomposición en solución. Algunos de los reactantes del  $O_3$  en el agua son el peróxido de hidrógeno, los radicales hidróxilos y los superóxidos. Generalmente se acepta que el  $O_3$  no entra en el citoplasma, pero su alta reactividad resulta en la formación de productos reactivos en el apoplasto y/o la fase externa de la plasmalema. Dichos productos penetran la membrana y perturban las actividades metabólicas como los sistemas de transporte membranales así como también los mecanismos de transducción energética, los que conducen finalmente a daños visuales o bien daños que no se ven y que son considerados como efectos subliminales o latentes los cuales afectan el crecimiento y la productividad de la planta.

El  $O_3$  no penetra en la plasmalema, su sitio de acción debe ser las proteínas periféricas de la plasmalema. El  $O_3$  también oxida los aminoácidos y las proteínas. Los aminoácidos y la fenilalanina, así como los azufrados, son muy susceptibles al ataque por  $O_3$ , dada la presencia de dobles enlaces. La reactividad del  $O_3$  con estos aminoácidos es muy importante puesto que forman parte integral de la estructura de proteínas relevantes. Se ha visto que algunas enzimas afectadas por el  $O_3$  son la Ureasa, la cual es importante en el metabolismo del nitrógeno a nivel de la raíz; las peroxidasas y catalasas, que son sistemas enzimáticos básicos en la descomposición de los radicales libres altamente tóxicos; la lisozima, que es una enzima importante en los sistemas digestivos; la fosfatasa ácida y, la betaglucuronidasas, enzimas claves en el metabolismo energético y sobre todo la RIBISCO, enzima reguladora del proceso principal de las plantas (la fotosíntesis) (Grajales, 2000; Orcutt y Nilsen, 2000; Sanderman, 1996; Zuccarini, 2000).

El  $O_3$  induce también la producción de etileno y una vez producido, el ozono puede reaccionar con el etileno, formando formaldehído altamente tóxico, el cual a su vez puede reaccionar con los peróxidos

hidrometilados, los cuales se sabe que inhiben las peroxidasas (Polle y Junkermann, 1994). La producción del etileno es muy importante ya que participa en la regulación de enzimas que están asociadas a los mecanismos de defensa de la planta tales como, las vías biosintéticas de fenilpropanoides, flavonoides y lignina (Kangasjärvi *et al*, 1994).

Kangasjärvi *et al* (1994) menciona que las poliamidas pueden actuar como quelantes de metales requeridos para la peroxidación de los lípidos membranales así como secuestradores de los oxirradicales generados por el O<sub>3</sub>.

Sandermann (2000), propone la siguiente cadena de eventos para explicar la alta reactividad del O<sub>3</sub> sobre los cloroplastos y sobre el núcleo:

- I. El ozono penetra por los estomas.
- II. El ozono se difunde en el apoplasto y se descompone en productos radicales (ozonolidos, hidroperóxidos, etc.).
- III. Los radicales altamente oxidantes reaccionan con un receptor membranal (especialmente ácidos grasos insaturados de los lípidos y aminoácidos cíclicos y azufrados de proteínas periféricas de la plasmalema).
- IV. Se modifica la permeabilidad selectiva y sistema de transporte en la plasmalema.
- V. Se producen mensajeros tales como etileno y/o ácido salicílico.
- VI. Hay modificación en la integridad estructural y funcional de los cloroplastos, que conducen a degradación de clorofilas.
- VII. Se produce una inducción de genes que codifican para la síntesis de enzimas de regulación de vías biosintéticas de metabolitos secundarios.
- VIII. El balance metabólico se modifica produciendo susceptibilidad a la resistencia a estreses secundarios, manifestando un desfase de las etapas fenológicas.
- IX. El crecimiento se ve inhibido.
- X. Se producen síntomas visibles.

Sandermann (1996) y Zuccarini (2000), propusieron que el O<sub>3</sub> puede considerarse como un elicitador abiótico efectivo que modifica fuertemente el metabolismo secundario, así como los sistemas de defensa de las plantas, tales como el sistema de respuesta hipersensible (HR), y el de resistencia sistémica adquirida (SAR), en donde participa activamente el ácido salicílico. (Alvarez *et al*, 1998;



Sandermann, 1996; Sandermann, 2000) señalan que se está dando énfasis al uso de biomarcadores para O<sub>3</sub> (además de plantas indicadoras) que incluyen metabolitos secundarios como fitoalexinas, ligninas, algunas enzimas, ácido salicílico y sistemas antioxidativos, como propuesta de una nueva herramienta de modelo epidemiológico para predecir la interacción O<sub>3</sub>-patógeno.

### **b) Nivel celular**

Las propiedades de la célula influyen en la susceptibilidad de la planta a cualquier contaminante. Si una sustancia tóxica penetra la pared celular, los próximos sitios de acción son las membranas, tanto la plasmalema como las membranas de los orgánulos subcelulares, provocando una modificación de la integridad estructural de las mismas, la cual conduce a un colapso de los protoplastos. Si son dañados los cloroplastos, entonces es afectada la productividad primaria de la planta. Si la mitocondria es dañada, razonablemente será alterada la respiración aeróbica. Por lo tanto, para poder comprender cómo algún contaminante, como el ozono, altera la estructura y función celular, es necesario comprender cómo el O<sub>3</sub> induce tales alteraciones (Pell, 1979; citado por Grajales 2000).

Krupa (1999), señala que el primer sitio del daño ocurre en las células del mesófilo o tejido del parénquima en empalizada en la superficie foliar superior. Es posible que eso se deba a que las células del mesófilo son parenquimáticas clorofilianas que alojan el aparato fotosintético, el cual abunda en clorofilas, proteínas y enzimas ricas en dobles enlaces por lo que son susceptibles del ataque oxidante del ozono. De hecho la mayoría de las enzimas son de naturaleza REDOX (Grajales, 2000). (Treshow y Anderson, 1989; citado por Grajales, 2002) reporta que las células del mesófilo dañadas por el O<sub>3</sub> se colapsan simultáneamente en los diferentes estadios de la maduración del tejido acicular en *Abies religiosa*.

Si las concentraciones de ozono oscilan entre 0.05 y 0.12 ppm en periodos de exposición de dos a cuatro horas las hojas de diversas plantas sensibles se ven seriamente dañadas (López, 1995). Las necrosis externas son patentes, viéndose daños en los parénquimas lagunares y en casi todos los tejidos internos (Paoletti, 2010). Los cloroplastos del parénquima en empalizada se disuelven y desaparecen, viéndose alterados por tanto los fenómenos fotosintéticos (Sanderman, 1996).

Una vez que O<sub>3</sub> ha penetrado a través de los estomas, ocupa los espacios intercelulares y reacciona con grupos fenólicos, oleofinas y proteínas de la pared celular generando especies activas al oxígeno. Si la concentración de O<sub>3</sub> es elevada, las numerosas reacciones de oxidación que se llevan a cabo

inducen la pérdida de la semi-permeabilidad de la membrana plasmática. Provocando colapso y muerte celular. Estos procesos conducen a la aparición de un gran número de lesiones necróticas en las hojas (figura 5), similares a la respuesta inducida por el ataque de patógenos; además de incrementar la producción del etileno en las hojas (Azcón y Talon, 2000).

La alteración en el metabolismo celular y el daño en los componentes estructurales de la membrana puede resultar en una senescencia foliar acelerada (Sandermann, 1997). Generalmente los ataques se



**Figura 5:** Hojas de árboles dañadas por el ozono/forestryimages.com

presentan puntiformes o como necrosis en el haz de las hojas. Las manchas suelen ser de color rojizo o blanquecino, según sea la especie, el individuo y las condiciones de la perturbación (Paoletti, 2010).

Las zonas necrosadas no están delimitadas claramente, sino que el verde de la epidermis va haciéndose más tenue hasta que se hace cada vez más patente el color rojizo o blanquecino. Las perturbaciones que provoca se fijan sobre todo en los sistemas foliares. Se alteran las células del parénquima lagunar que están más próximas a los

estomas por donde penetra el gas, produciéndose mortalidad en ellas. En ciertos casos, las necrosis aparecen en las células próximas a la epidermis inferior (Pardos, 2006). También se ven afectadas las células oclusivas de los estomas, siendo muy sensibles las células jóvenes, y por tanto las hojas jóvenes.

En el caso particular de *Abies religiosa*, se puede suponer que las alteraciones celulares que involucran protoplasma y plasmalema son causados por contaminantes atmosféricos especialmente ozono. De acuerdo con Álvarez *et al*, 1998 el ozono es el principal factor de descomposición de la pared celular y la membrana plasmática, por lo que los efectos negativos de ozono podrían ser particularmente visibles en estas estructuras, principalmente para la pérdida de permeabilidad en la membrana y eventualmente para la plasmólisis y muerte celular, causando **senescencia y defoliación prematuras**.

### **c) Nivel fisiológico**

La contaminación por ozono provoca alteraciones en los procesos fisiológicos fundamentales de las plantas, como la fotosíntesis, la translocación de fotoasimilados, la retranslocación de las hojas viejas a tejidos jóvenes, la función estomática y la senectud y abscisión de hojas, flores y frutos (Omrod y Beverley, 1995).

Las alteraciones en la fisiología de las plantas causadas por ozono, son el resultado de un efecto directo sobre un organelo o efectos indirectos sobre otras partes de la célula. Zuccarini (2009) encontró que niveles fitotóxicos de O<sub>3</sub> modifican la permeabilidad de la plasmalema y de otras membranas internas, alterando el transporte de Ca<sup>2+</sup>. Por otra parte, se han examinado por microscopía de cianofractura y de barrido la membrana nuclear, la plasmalema y la membrana externa de cloroplastos de *Abies religiosa*, *Populus deltoides* y frijol pinto, observando un aumento en la depositación de proteínas intramembranales, después de la exposición a niveles fitotóxicos de ozono. Dichas proteínas, explicarían la alteración en la permeabilidad membranal (Cunningham y Swanson, 1977; Giacomo Bartoli *et al.* 2010; Alvarez *et al.*, 1998; Rosas, 2006).

De acuerdo a los estudios realizados por Küppers and Klumpp (1988) y Tingey *et al.*, (1976) el metabolismo de los carbohidratos depende directamente de la actividad fotosintética. En álamos las bajas concentraciones restringe la capacidad fotosintética acelerando la caída de hojas y reduciendo su ciclo de vida. En los árboles adultos, las hojas de más edad se declinan rápidamente y se conducen a una acelerada saturación de luz.

El resultado de los experimentos en condiciones de invernadero el ozono afecta la respiración y la tasa fotosintética, se reduce la captura de carbono; su almacenamiento, reparto y asignación. Se calcula que esta captura de carbono puede reducirse del 30% al 80%.

### **d) Fotosíntesis**

La fotosíntesis es el proceso fisiológico y metabólico más afectado por el ozono, además de estar íntimamente relacionado con la productividad: aunque se sabe que el ozono afecta la fotosíntesis, ésta involucra muchos factores por lo que no es fácil saber cuál de éstos es más sensible al ozono, cuál es el primero en ser afectado y cómo puede éste influir en los demás factores (Treshow y Anderson, 1989; citado por Grajales, 2000).

La sensibilidad de la fotosíntesis al ozono varía ampliamente entre las especies y también bajo las condiciones ambientales, por ejemplo concentraciones de 0.10 ppm de ozono por una hora o 0.035 ppm de O<sub>3</sub> en una fumigación intermitente de 147 horas durante tres semanas, causan una reducción considerable en la fotosíntesis (Darral, 1989).

Forberg citado por Darral (1989), dice que la fotosíntesis el pino blanco se reduce de un 15 a 20 % después de haber estado expuesto durante tres meses con niveles de O<sub>3</sub> tan bajos como 0.40 ppm. Por su lado Ryan y Waring citados por Smith *et al.*, (2001), reportan una reducción para pinos longevos del 18% en su proceso de fotosíntesis. Mientras que Yoder *et al.*, citado por Smith *et al.* (2001), dice que la disminución de la fotosíntesis va de 14-30% en *Pinus ponderosa*.

Darral (1989), considera inicialmente afectada la fotofosforilación, la cual representa el transporte de electrones que se inicia con la ruptura fotolítica del agua, el transporte de electrones consecuente a través de la membrana tilacoidal, la liberación de oxígeno y la producción de ATP.

El impacto del ozono sobre la fotosíntesis es probablemente el más evidente, pudiendo afectar el metabolismo de carbohidratos directamente a través de sus efectos sobre las reacciones luminosas (fotofosforilación) y reacciones oscuras (fijación de CO<sub>2</sub>), a través de sus efectos en la conductancia estomatal (Orcutt y Nilsen, 2000). La respuesta fotosintética a los niveles de ozono, depende también del metabolismo de la planta; es decir, si es una planta C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> o CAM (Grajales, 2000)

Guderian *et al.* y Mud citados por Grajales (2000), encontraron que el sistema fotosintético unido a la membrana tilacoidal se desintegra por acción del ozono. El ozono altera la permeabilidad de la membrana, en virtud de que produce oxidantes fuertes como radicales libres que oxidan los lípidos y fosfolípidos de la membrana modificando la integridad estructural (Nobel citado por Grajales, 2000).

En términos de fotosíntesis total del árbol, la velocidad fotosintética en árboles dañados por ozono es reducida debido a los niveles disminuidos de clorofila, así como también a la senectud temprana de las acículas de *Abies religiosa* y *Pinus ponderosa* (Rosas, 2006; Grulke, 1999).

### **e) Función estomática**

La respuesta de los estomas al ozono a 0.20 ppm es muy diversa, en algunas especies se mantienen abiertos los estomas mientras que otras especies se cierran y aun en otras más no ocurre ningún cambio. Pero arriba de 0.20 ppm se encuentra que en la mayoría de los estomas se cierran (Darral, 1989).

Zhang *et al.*, (2001), menciona que la regulación estomática debe ser un factor importante que controla la sensibilidad de las plantas al ozono. Sin embargo la función estomática por si misma puede ser afectada por el ozono. Cuando las plantas cierran sus estomas, la incorporación de ozono se ve disminuida, pero al mismo tiempo también se disminuye la entrada del CO<sub>2</sub>, lo que a su vez estresa adicionalmente a la planta provocando, como consecuencia efectos detrimentales tanto en su crecimiento como en la producción de fotoasimilados ( McKee y Woodward, 1994). Panek (2001), ha sugerido que el mejor parámetro fisiológico para indicar la sensibilidad de las plantas al ozono es la relación entre la fotosíntesis y la conductancia estomática.

### **f) Senescencia**

Una vez que los órganos de la planta han madurado adquiriendo sus características singulares, éstos van perdiendo turgencia, aumentando su sensibilidad a las condiciones del medio, lo cual influye en el equilibrio metabólico desfasándolo hacia el catabolismo, con lo que tiene lugar la biodegradación de macromoléculas a un grado tal que da inicio al envejecimiento, o mejor conocida como senectud, seguida por la abscisión es decir la caída de órganos maduros como frutos, flores u hojas (Grajales, 2000; Seoáñez, 2002).

La senectud es una etapa del desarrollo programado de las plantas, por lo que se encuentra programada genéticamente y por ende sujeta a regulación, tanto por factores endógenos, tales como la edad, los niveles de fitohormonas (principalmente etileno), y el desarrollo reproductivo; así como por factores ambientales, entre ellos las altas temperaturas, la sequía, el estrés oxidativo (radiación UV, y O<sub>3</sub>), deficiencia nutrimental, infección por patógenos, daño mecánico y exceso de sombra (Azcon, 2000).

Franzaring *et al.*,(2000), estudiaron la respuesta al ozono de especies desarrolladas en suelos húmedos y encontraron que *Eupatorium canabium*, *Plantago lanceolata* y *Molinia caerulea* presentaron senectud prematura debido al ozono, pero explican que el mecanismo fisiológico por el que se presenta, aún no es claro, ya que involucra múltiples procesos complejos y altamente regulados, los que resultan en la retranslocación de los fotoasimilados de las hojas viejas a otras partes de la planta.

La senectud prematura debida al ozono puede tener fuertes implicaciones como el acortamiento de la fase vegetativa y la disminución del vigor general. Por otra parte, en un ecosistema, la senectud prematura ocasionada por el ozono puede conducir a desventajas claras no solo para la comunidad de plantas sino para el ecosistema completo (Franzaring *et al.*, 2000).

#### **g) Nivel de ecosistema**

En el caso de los ecosistemas forestales, los altos niveles de ozono en la troposfera modifican la dinámica del bosque, entre otras cosas, por sus efectos en la sucesión ecológica al reducir la supervivencia del banco de semillas, alterar el patrón de crecimiento y aumentar la tasa de mortalidad por descortezadores en individuos debilitados (González- Medina, 2010).

Las investigaciones más recientes indican que antes de que se presente cualquier síntoma visual, se producen reducciones en el crecimiento de las plantas. Tales efectos son referidos como daño invisible, daño subliminal o daño latente puesto que no son observados tan rápidamente como los síntomas visuales. Las investigaciones realizadas para algunos cultivos principales como maíz, frijol y trigo en Estados Unidos de 1982 a 1987, permitieron observar una disminución del 14% en su rendimiento (Sandermann, 1996).

El impacto del ozono en los ecosistemas forestales, es más difícil de determinar que en los cultivos agrícolas, ya que hay muchos factores implicados en un ecosistema forestal, las especies maderables que pueden vivir cientos de años; así como la especies herbáceas que completan su ciclo biológico en un año. En caso de cultivos agrícolas, debido a que crecen en suelos relativamente uniformes, con disposición de nutrientes y agua para su desarrollo. Por otra parte, los árboles en un ecosistema forestal crecen en terrenos heterogéneos, en condiciones de poca disponibilidad nutrimental e hídrica, generalmente con estrés biótico y están sometidos a competencia interespecífica de otras especies de

plantas. Por lo tanto, el estudio de ecosistemas forestales presenta más obstáculos y variables que aquellos de cultivos agrícolas (Sanderman, 1996 y 2000).

Uno de los aspectos más difíciles del estudio de los contaminantes ambientales es determinar la dosis a la que la planta se expone, ya que es altamente variable y depende de numerosos factores, como la concentración del contaminante, la duración y la frecuencia de la exposición (Hernández, 1984). Las exposiciones intermitentes con altas dosis pueden tener menos efectos detrimentales en las plantas, que las exposición de bajas concentraciones por periodos más largos (Zuccarini, 2009).

La constitución genética de las plantas también es un factor que interviene en la respuesta al daño por ozono, ya que se sabe de algunas plantas más tolerantes que otras, tal es el caso de los cultivos Bel B, Bel C y Bel W-3 de Tabaco, resistente, intermedia e hipersensible al efecto de este oxidante fotoquímico (Sanderman, 1996).

El impacto de la contaminación atmosférica sobre los ecosistemas forestales oscila en un rango de beneficio a detrimental. Stern (1984) citado por Grajales (2000) clasifica tres categorías de impacto:

1. Dosis baja
2. Dosis intermedia
3. Dosis alta

En la categoría 1 se considera que las bajas dosis de contaminantes favorecen la función de los ecosistemas forestales en el sentido de que actúan como sumideros de los contaminantes, removiendo de alguna forma los gases de la atmosfera como los hidrocarburos, el sulfuro de hidrogeno y los óxidos de nitrógeno. En la categoría 2, ocurre una reducción en el crecimiento, cambios en las especies forestales y susceptibilidad a las plagas. Las investigaciones de laboratorio y de campo han mostrado que el ozono como principal oxidante fotoquímico cambia la composición forestal (presencia y dinámica de especies) y altera la susceptibilidad de las especies a las plagas. También se ha visto que con dosis intermedias se puede afectar a las especies en sus ciclos reproductivos, la utilización de nutrientes, la producción de biomasa y la susceptibilidad a enfermedades. En la categoría 3, se provoca la destrucción o daño severo del ecosistema forestal, aunque esta categoría se ha observado en ecosistemas cercanos a industrias. En general, estas tres categorías son el resultado de la respuesta fisiológica, celular y metabólica de las plantas en función de los agentes contaminantes, particularmente el ozono.

Chappelka y Samuelson (1997), clasifican la respuesta de los ecosistemas forestales al daño por contaminantes atmosféricos, según sea la dosis: alta, intermedia o baja, en plantas con un cuadro sintomatológico agudo, crónico y mortal el cual a su vez puede inducir degradación severa del equilibrio del ecosistema.

Zuccarini (2009), clasifica los daños por ozono en:

- a) Efectos agudos; son causados por exposiciones a altas concentraciones del contaminante por periodos cortos, los cuales producen síntomas visuales como: clorosis, necrosis, abscisión de hojas, flores y frutos, epinastia de hojas y tallos.
- b) Efectos crónicos; son aquellos causados por la exposición de bajas concentraciones del contaminante durante periodos largos y que producen los siguientes síntomas: retraso o perturbación del crecimiento y desarrollo, lo cual resulta en disminución del crecimiento, rendimiento o calidad de plantas agrícolas y hortícola; clorosis o necrosis en la punta de las hojas y finalmente muerte de los órganos.

#### h) Mecanismos de resistencia al ozono

Las plantas muestran variaciones interespecíficas e intraespecíficas en su sensibilidad al ozono. Se ha propuesto que uno de los mecanismos es la producción de antioxidantes como el ascorbato y alfatocoferol; así como la producción de enzimas tales como peroxidasas, catalasas, glutatión reductasa y superóxido dismutasa. De hecho esta capacidad de las plantas es natural como consecuencia de los procesos metabólicos asociados a reacciones de oxidoreducción que se identifican en el transporte de electrones fotosintético y mitocondrial (Grajales, 2000, Paoletti, 2010, Zuccarini, 2009).

La vía más estudiada para la detoxificación de radicales hidroxilos en las plantas es la vía Haliwell-Ashada en donde el radical superóxido es transformado a peróxido de hidrógeno por acción de la enzima superóxido dismutasa. Luego, la enzima ascorbato peroxidasa reduce el peróxido de hidrógeno en agua para reproducir en agua para producir deshidroascorbato y luego ascorbato, usando glutatión, regulado por la enzima glutatión oxidasa y reductasa (Azcon, 2000, Zuccarini, 2009).

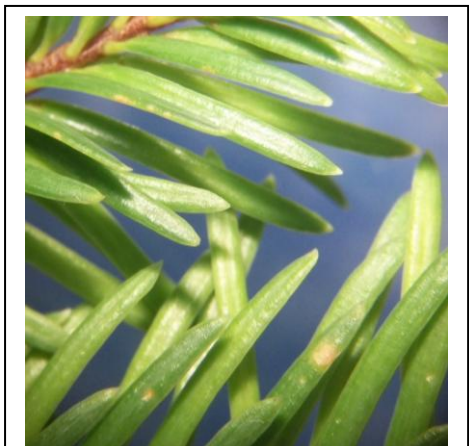
Cuando la planta no es capaz de sostener a una rapidez suficiente esta vía metabólica es cuando se hace sensible al ataque de los radicales libres, producidos normalmente durante el metabolismo primario y aumentados por el efecto del ozono (Ocutt y Nilsen, 2000). Se sabe que las plantas



responden al estrés por O<sub>3</sub> activando la vía metabólica llamada biosíntesis de compuestos fenilpropanoides, los cuales constituyen un tipo de metabolitos secundarios que forman parte de mecanismos vitales de protección de la planta inducidos por el ataque de patógenos, el exceso de ozono y la radiación UV, entre otros. Estas condiciones estresantes para la planta inducen la expresión de genes que codifican varias enzimas de la vía metabólica anteriormente mencionada, como la fenilalanina-amonioliasa (PAL); la p-cumarato AcCoA ligasa; la chalcona sintasa; la chalcona isomerasa ó la cinamil alcohol deshidrogenasa. Dentro de los fenilpropanoides se hallan las cumarinas, los psoralenos y los ácidos salicílico, cinámico, p-cumárico, cafeico, ferúlico y sinápico. Estos ácidos suelen estar conjugados a polisacáridos de pared celular formando b-glucósido del ácido salicílico o ésteres ferúlicos o cinámico. A partir del ácido p-cumárico se forman otros fenilpropanoides de estructura más compleja como las antocianinas y otros. El contenido intracelular de diferentes metabolitos secundarios pertenecientes al grupo de los fenilpropanoides aumenta en las hojas o en la raíz como consecuencia del estrés por ozono (cuadro 1).

<b>Cuadro 1.</b> Metabolitos secundarios (fenilpropanoides).		
Fenilpropanoides	Localización celular	Función
Antocianinas	Solubles en la vacuola	Protegen fotosistema II
Psoralenos, ácido clorogénico, lignina y suberina	Conjugados a polisacáridos de pared celular	Incrementan rigidez y resistencia de la pared celular
Ácido salicílico	Conjugado a polisacáridos de pared celular	Biomarcador de estrés. Incrementa los peróxidos para inducir la producción de proteínas de resistencia
Ácidos fenólicos y sus ésteres, pterocarpanos, estilbenos, cumarinas, auronas	Conjugados a polisacáridos de pared celular	Actividad antimicrobiana (fitoalexinas)

Los niveles de  $O_3$  para especies sensibles son variables; algunos autores reportan que aparecen necrosis con exposiciones a 0.2 ppm durante 4 horas, mientras que otros indican que con 0.02 ppm entre 4 y 8 hora, o 0.05 ppm durante 1-2 horas, es suficiente para que aparezcan síntomas externos de la perturbación (Seoáñez, 2002) (figura 6).



**Figura 6:** Daño causado por ozono en renuevo de *Abies religiosa* del Parque Nacional Zoquiapan

En lo que se refiere a la sensibilidad de las especies ante el P.A.N (Peroxiacetilnitrato) como predecesor del  $O_3$  los investigadores no están totalmente de acuerdo. Posiblemente la sensibilidad varia, como en otros tipos de contaminación, según la especie a cultivar y el individuo (Pardos, 2006). La concentración de P.A.N comienza a ser perjudicial, en daños externos, a partir de 0.05 ppm, aunque con 0.01 ppm, o incluso a concentraciones inferiores, aparecen síntomas de envejecimiento de los tejidos. Según Seoáñez, 2002, el periodo de contaminación para provocar alteraciones, a una concentración de 0.05 ppm, es de 4

horas.

#### **j) Enmascaramientos y sinergismos de $O_3$**

El ozono puede producir efectos externos que fácilmente se confunden con los provocados por el  $SO_2$ . La araña roja y algunos otros ácaros producen manchas similares a las del ozono, y en las coníferas, los incendios forestales pueden dejar las acículas con una coloración parecida a un ataque de ozono (Sandermann, 1996). Exposiciones medias diarias de  $130 \mu g/m^3$  de  $SO_2$  durante el periodo de crecimiento, pueden causar daños en las coníferas más sensibles. Estos daños se caracterizan por la aparición de necrosis apicales de color rojo o anaranjado. Entre los óxidos de nitrógeno solo el  $NO_2$  es tóxico para las plantas, a pequeñas concentraciones y largo tiempo de exposición. Los daños se manifiestan por la aparición de necrosis y clorosis de color negro o marrón rojizo en las hojas.

### 5.3 Descripción de *Abies religiosa*

La distribución geográfica del género *Abies* se extiende desde Alaska hasta Centro América (Madrigal, 1967). Para el caso particular de México, se reconocen ocho especies de este género: *Abies concolor*, *A. duranguensis*, *A. guatemalensis*, *A. hickelii*, *A. mexicana*, *A. oaxacana*, *A. religiosa* y *A. vejari* (Martínez, 1963), de las cuales seis están restringidas en su distribución al territorio nacional (Hernández, 1984).

Los representantes del género *Abies*, se caracterizan por ser árboles corpulentos, siempre verdes, resinosos, de copa simétrica y aguda, con hojas lineares y persistentes. Con respecto a su distribución en el centro de México, los bosques de *Abies* se encuentran en el Cordillera Volcánica Transmexicana (CVT), formando masas puras o bien asociadas a especies de *Pinus* (*P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. hartwegii*, *P. ayacahuite* var. *veitchii*) y algunas latifoliadas como *Alnus glabrata*, *A. firmifolia*, *Arbutus xalapensis* y *Quercus* spp. Para el caso específico del Valle de México, dominan las partes altas de las montañas que rodean a este y su conservación es indispensable para la calidad de vida del área metropolitana de la Ciudad de México (Nieto de Pascual, 1995).

Rzedowski (1983) solo reconoce seis especies del género *Abies* distribuidas en nuestro país de las ocho que reconoce Martínez (1953), pero en la región central solo se presenta *Abies religiosa*, según menciona Santillán (1991) citados por Nava (2006).

Santillán (1991), señala que las masas de oyamel son áreas protegidas de vientos y de insolación intensa, entre pendientes de 17 a 60%; requieren de condiciones de elevada humedad en el suelo y en la atmósfera, con precipitaciones superiores a 1000 mm, siendo el rocío un factor decisivo en su distribución. Sus límites altitudinales son 2100 y 3660 msnm, con temperaturas medias anuales de 7 a 15°C, con más de 60 días de heladas, equivalente a un clima general de invierno seco (Cw) de acuerdo a García (1973) citados por García, (2000).

Madrigal (1964), señala que la floración se da en diciembre, llegando a la polinización en marzo-abril del siguiente año. Los conillos fecundados maduran hacia noviembre y en diciembre del mismo año se da la diseminación. En general la reproducción inicia a los 25 años. El mismo autor señala que después de un incendio y en corto tiempo, la regeneración de *Abies religiosa* se presenta formando masas puras,

agregando que los incendios son poco frecuentes en este bosque, debido a las condiciones de humedad del suelo y a la poca vegetación herbácea.

De las ocho especies registradas para el género *Abies*, la especie más estudiada y la más frecuente en el centro de México, es *Abies religiosa*, en donde forma bosques relativamente extensos y puros (Hernández, 1986). Se distribuye en las zonas montañosas del Distrito Federal así como de los Estados de Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, México, Guerrero y Tlaxcala (Martínez, 1963)

## 6 MATERIAL Y MÉTODO

La información de referencia del área de estudio fue tomada de la página web del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas.

### 6.1 Descripción de la zona de estudio

El estudio se realizó en los parajes Cañada el Quesero y Huiluapan del Parque Nacional Zoquiapan y Km 14 y 16 del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, figura (7).



**Figura 7.** Localización de las áreas de estudio y parajes en donde se realizó el registro de los índices de ozono y senescencia. Imagen: Google Earth, 2012.

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Zoquiapan, cuenta con una superficie de 45,097, 25,679 ha para Izta-popo y 19,418 ha para Zoquiapan. La superficie del P.N. Izta-popo, Zoquiapan, está ubicado entre las coordenadas geográficas extremas del 19°15'00" y 19° 25'16.21" de Latitud Norte y 98° 38'58.28" y 98°46'37071" de Longitud Oeste.

### 6.1.1 Fisiografía

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas forma parte de la provincia fisiográfica Eje Volcanico Transmexicano, presenta importantes elevaciones entre las cuales destacan el Iztaccíhuatl y el Popocatepetl con alturas de 5,280 y 5,482 m respectivamente, otras elevaciones notables son: Tláloc (4,120 m.) Yoloxóchitl (3,900 m), Los Potreros (3,600 m) Telapón (4,060 m) Papayo (3,600 m), la mesa (2,800 m), El Tejolote (3,020 m) y El Tesoyo (2,660 m).

### 6.1.2 Suelos

El suelo representativo del área es Andosol Mólico, que se formó a partir de las cenizas volcánicas, este tipo de suelo es de baja cohesión, por lo que es muy susceptible de erosión y es al mismo tiempo un suelo muy favorable para la recarga de los mantos freáticos.

### 6.1.3 Clima

De acuerdo a la estación meteorológica de San Pedro Nexapa su clave climática es Cb(w)kig, revelando un clima templado subhúmedo con lluvias de verano; temperatura media anual de 13.5°C, con temperatura del mes más frío de 11.4°C en diciembre y enero y en el mes más cálido de 15.9°C en mayo. La precipitación anual es de 910 mm, con un porcentaje de lluvia invernal de 5 %. El relieve desempeña un papel decisivo en la distribución de las temperaturas medias, el calor del aire disminuye al aumentar la latitud hacia el Norte. Las mínimas se registran en las porciones más altas del Popocatepetl, en estas partes se registran los climas ETHw frío y EFHw muy frío.

### 6.1.4 Vegetación

Como consecuencia de la gran diversidad de hábitats existen varios tipos de vegetación los cuales responden a los gradientes altitudinales y a la topografía. De acuerdo con la clasificación de Rzedowski los principales tipos de vegetación son: **Bosque de Pino** en donde se presentan básicamente 2 estratos: uno superior, arbóreo y otro inferior con pastos amacollados, escasos arbustos y hierbas. En la parte mas alta predominan el *Pinus hartwegii*, seguido de *Pinus montezumae*, y *Pinus pseudostrobus*.; acompañados algunas veces por *Pinus leiophylla* y *Pinus teocote*. A veces se presentan conviviendo con *Quercus*, *Juniperus* o *Alnus*. **Bosque de Oyamel** siendo predominante *Abies religiosa*;

acompañado en ocasiones por *Pinus ayacahuite*, *Alnus*, *Quercus*, *Prunus*, y *Cupressus*. **Bosques Mixtos** en donde podemos apreciar combinaciones de Pino-Aile y Aile-Pino o bien el de Pino-Encino.

Páramo de Altura es el estrato vegetal inferior, que se encuentra a una altitud mayor de 4,000 msnm, es formado por gramíneas amacolladas de los géneros *Muhlenbergia*, *Festuca* y *Calamagrostis*. A partir del páramo de altura se encuentran las características de un ecosistema de tundra. **Bosque Mesófilo de Montaña** se presenta en manchones discontinuos; se caracteriza por la diversidad de especies vegetales y de fauna, y por la convivencia de elementos característicos de la flora neártica y neotropical dando como resultado el 44.13 % de las 2,071 especies reconocidas para el valle de México. **Estrato arbustivo** entre los arbustos se encuentran los géneros *Baccharis*, *Senecio*, *Eupatorium*, *Cirsium* y *Eryngium*. **Estrato herbáceo** destacan los generos: *Penstemon*, *Commelina*, *Begonia*, *Gnaphalium* y *Lupinus*.

### 6.1.5 Fauna

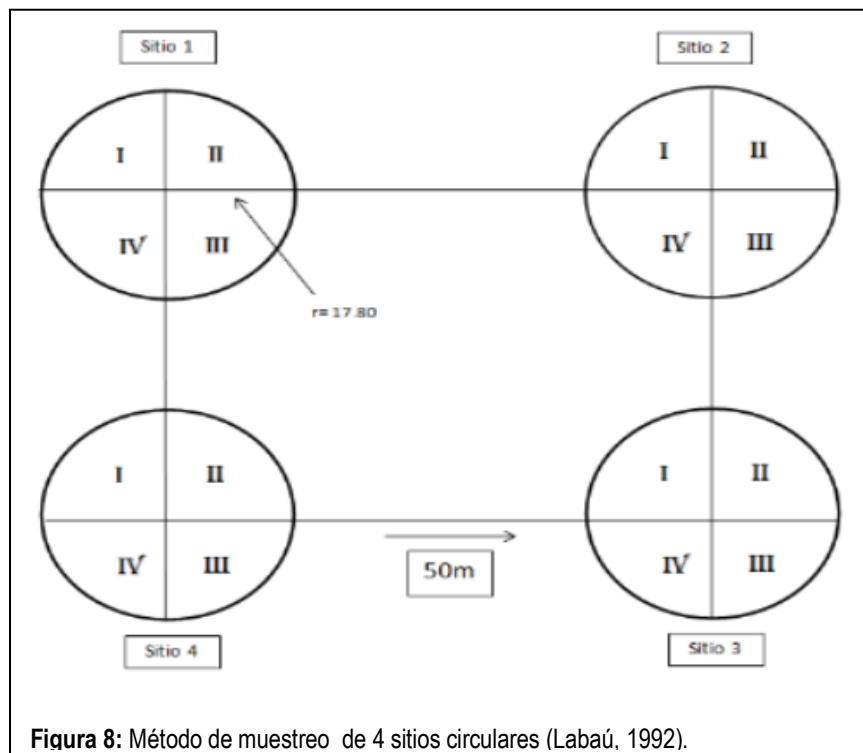
Se tienen registradas 16 familias, 37 géneros y 52 especies de mamíferos, alcanzando el 30% en el país, los que se encuentran en mayor cantidad son los roedores presentándose cinco familias y 21 especies, seguidos de los carnívoros, con cuatro familias y 11 especies, le siguen los murciélagos con dos familias y 10 especies, los conejos están representados con una familia y tres especies e integran el 5.8%. Los órdenes Marsupialia, Xenarthra y Artiodactyla; con una familia y una especie cada una. Existen algunas especies endémicas como: *Romerolagus diazi*, *Pappogeomys merriami* y *Neotomodon alstoni* y *Reithodontomys chrysopsis*. Con respecto a la avifauna, la zona destaca debido a que el 75 % de las especies reportadas son residentes, las aves que presentan mayor rango de dispersión son aquellas que tienen gran capacidad de vuelo; (Familias Cathartidae, Accipitridae y Falconidae, Apodidae, Hirundinidae, Corvidae). Por otro lado están aquellas que en sus hábitats no requieren de gran desplazamiento familias: Phasianidae, Formicariidae. En cuanto a reptiles y anfibios se encuentran los géneros: *Phrynosoma*, *Pseudoeurycea*, *Chiropterotriton*, *Sceloporus*. Los anfibios se registran, sobre todo hacia los 3,000 msnm, en los cuerpos de agua, se encuentran géneros *Hyla* y *Rhyacosideran*. En el bosque de Oyamel en la cota de los 3,200 msnm se cuenta con la visita anual de mariposas monarca.

## 6.2. Fase de gabinete

Se realizó una revisión del manual de la Red de Seguimiento de Daños en los Montes (RED CE NIVEL II) para el muestreo del daño por ozono. Utilizando mapas de cada zona de estudio (Zoquiapan e Iztaccíhuatl-Popocatépetl) se ubicaron y seleccionaron los parajes de muestreo determinados por la presencia de bosques en los cuales la especie dominante es *Abies religiosa*. De igual forma se hizo una revisión bibliográfica acerca de indicadores de salud forestal y daño por ozono en vegetación.

### 6.2 Muestreo en campo

Se realizó la caracterización ecológica del área (**Anexo 1**) previo al establecimiento de los círculos de acuerdo al método propuesto por (Labaú, 1992) ex profeso para indicadores de salud en vegetación arbórea, realizando un cuadrante de 50m X 50m en campo para la ubicación de los vértices centrales de los círculos (Figura 8 y 9), cada círculo con un radio de 17.8m para ser seccionado en cuadrantes (I, II, III, IV, figura 8 y 9) y así poder registrar el daño por ozono en los árboles, los cuadrantes permitieron el levantamiento sistemático de los daños en todos los árboles y así evitar errores de repetición o saltarnos algún individuo. Cada círculo abarcó un área de 314.16 m para muestrear en total 1.26 ha por zona.





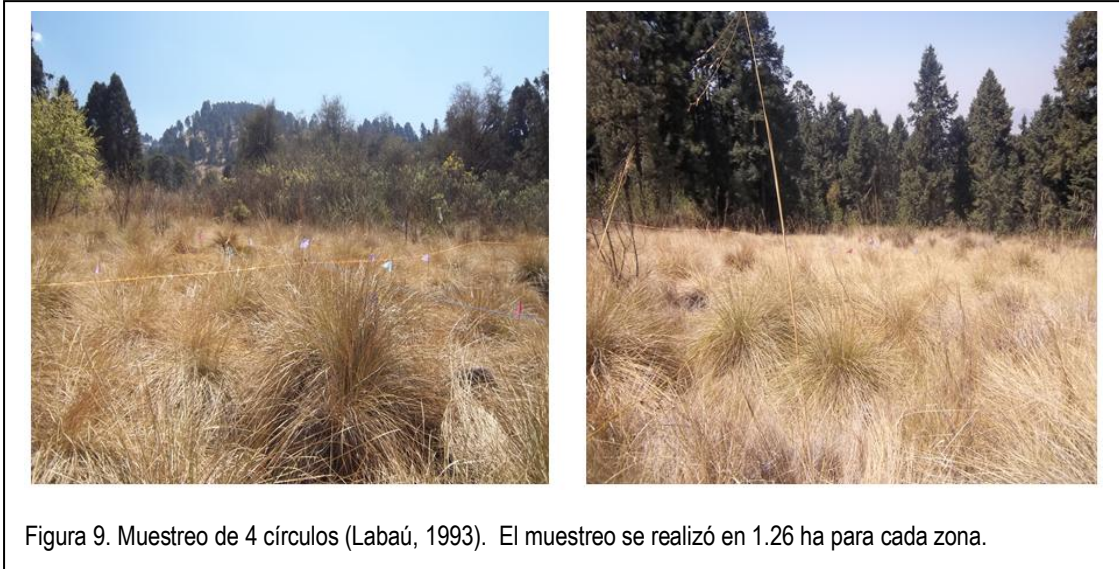


Figura 9. Muestreo de 4 círculos (Labaú, 1993). El muestreo se realizó en 1.26 ha para cada zona.

### 6.3.1.1 Evaluación del daño foliar por O<sub>3</sub> en Abies religiosa

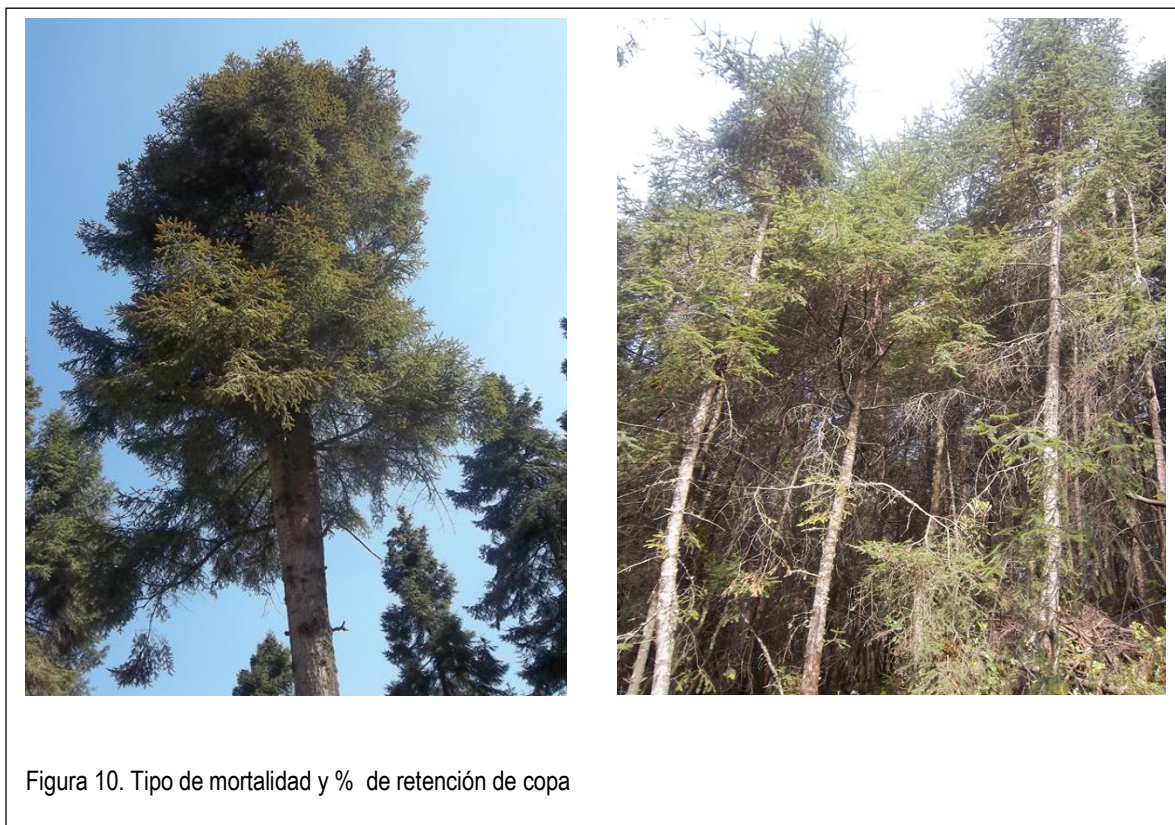
La valoración de síntomas por daño foliar representado por el moteado clorótico se estimó para cada clase de edad en porcentaje y al porcentaje se le asignó una puntuación correspondiente (clase) (Cuadro 2), evaluándose de acuerdo a la plantilla establecida por RED CE NIVEL II (Anexo 2) analizando 5 ramas en 4 puntos diferentes por árbol y haciendo un registro fotográfico de las acículas sintomáticas.

**Cuadro 2.-** Clases de daño a determinar en las coronas de los árboles.

<b>Clase</b>	<b>Definición</b>
0	Sin daños
1	1-5% de la superficie afectada
2	6- 25 % de la superficie afectada
3	26-50 % de la superficie afectada
4	51 – 75 % de la superficie afectada
5	Más de 75 % de la superficie afectada

### 6.3.1.2 Evaluación de daño en las copas por defoliación

Se evaluaron los parámetros de tipo de mortalidad y porcentaje de retención de las copas (figura 10) de acuerdo al modelo elaborado por la SAHAR (1984) Anexo 3.



### 6.3.1.3 Evaluación de la senescencia

La senescencia del follaje se evaluó a través del coteo de los nodos en las ramas (figura 11), se analizaron 5 ramas por árbol, con cada nodo se separa verticilos anuales de agujas o fascículos de aguja que son correspondientes a un año de crecimiento (Sandermann, *et al.* 1997).



Figura 11. Senescencia del follaje a través del conteo de los nodos en las ramas.

### 6.3 Fase de laboratorio

Los datos fueron capturados y organizados en una hoja Excel. Después fueron exportados al Statistical Package Social Science (SPSS V.20) relación que pudiera existir entre el tipo de mortalidad, porcentaje de retención de copa, senescencia y ozono. Lo que se hizo a través de análisis de correlación tau b de Kendall.

## 7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La contaminación producida por  $O_3$ , no deja residuos que puedan ser detectados por técnicas analíticas, como lo es en el caso de la contaminación por fluoruros o por dióxido de azufre; por tanto, los daños visibles (moteado clorótico) en hojas o acículas son la única evidencia fácilmente detectable en campo. Aunque los daños visibles no incluyen todas las posibles formas de daños a los árboles y vegetación natural (como los cambios fisiológicos antes de que se presente daño, reducción en el crecimiento), la observación de síntomas típicos sobre la parte aérea de las plantas en el campo ha resultado ser una herramienta valiosa para la evaluación del impacto del  $O_3$  ambiental. La determinación para daño foliar en *Abies Religiosa* (Kuntn) se registro mediante una plantilla estandarizada internacional por la Comisión Forestal Europea (RED CE NIVEL II).

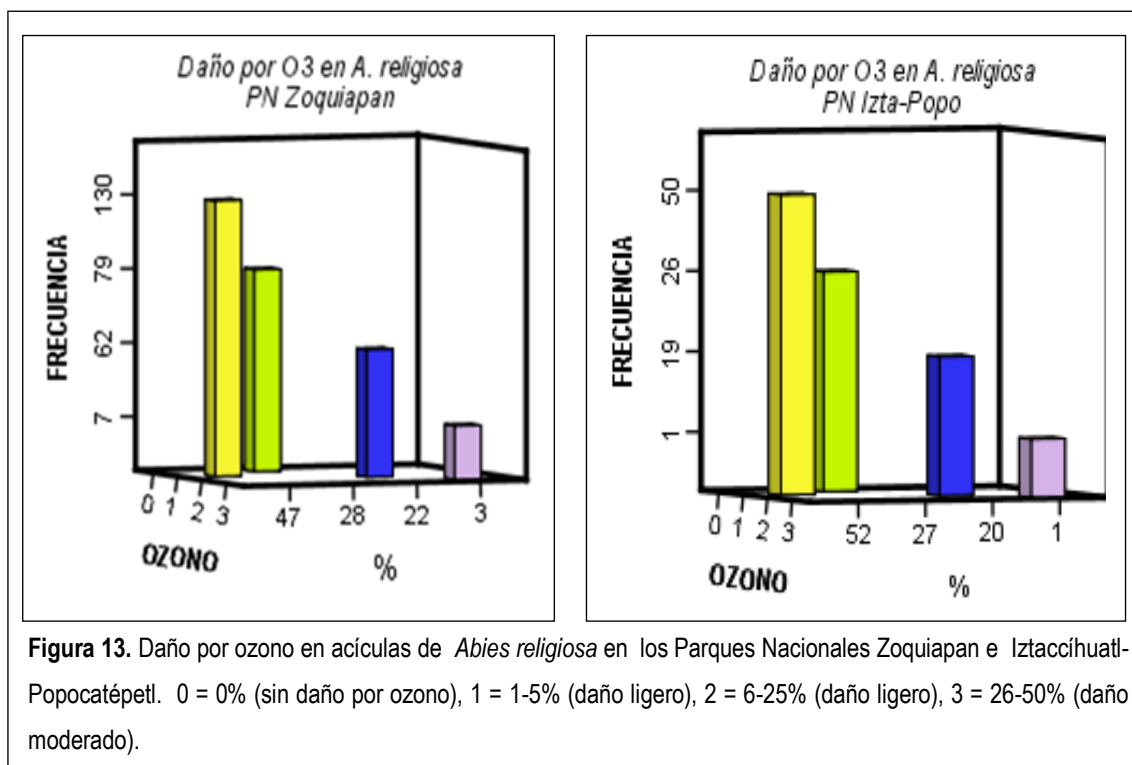
Los síntomas del daño por ozono observados en *Abies religiosa* en los parajes Cañadas de El Quesero, Huiluapan y Vuelta oscura del Parque Nacional Zoquiapan y los parajes ubicados en Km 14 y 16 del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl que fueron registrados son: manchas blancas o amarillas (figura 12), produciendo posteriormente lesiones rojizas o marrón para finalmente volver totalmente necróticas las acículas, con senectud y abscisión prematura, similar a lo que lo describe Alvarado (1993).



**Figura 12.** Moteado clorótico y necrosis en acículas de *Abies religiosa* de los Parques Nacionales Zoquiapan e Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

En la figura 13 se muestra el daño registrado por ozono en las acículas y su frecuencia, en el Parque Nacional Zoquiapan (PNZ) se realizó la evaluación a 348 árboles (en 1.26 ha) en los parajes ya

mencionados, el 47% de ellos (130 individuos) presentaron un daño ligero (clase 1), el 28% (79 árboles) se encontraron sin daño por ozono en sus acículas correspondiendo a la clase 0, el 22% (62 árboles) mostraron un daño ligero correspondiendo a la clase 2, y el 3% (7 árboles) se encontraron en estado moderado clase 3. Otra observación relevante es que fue el paraje que presentó mayor densidad arbórea. Manzanilla (1974), reporta para un bosque natural de *Abies religiosa* una densidad de 556 árboles por hectárea con DAP mayor a 10 cm, lo cual contrasta con lo encontrado por Ávila (2000) para bosques de *Abies hickleyi* en el Pico de Orizaba donde reporta densidades de 155 a 615 individuos ha<sup>-1</sup>, mientras que lo encontrado para este estudio fue una densidad de 348 individuos en 1.26 ha de los cuales 257 tienen DAP mayor a 10 cm y 91 individuos con DAP menor a los 10 cm para Zoquiapan y una densidad de 117 árboles en 1.26 ha para el Parque Iztaccíhuatl-Popocatepetl, de los cuales 55 individuos tienen un DAP mayor a 10 cm y 62 que presentaron un DAP menor a 10 cm.



En el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl se encontraron 117 árboles en 1.26 ha, el 52% de los árboles muestreados presentaron **daño ligero** (clase 1 de ozono), 27% (26 individuos) no tuvieron daño (categoría 0), 20% (19 árboles) presentaron daño ligero, ubicándose en la clase 2, y solo 1% (1 individuo) presentó daño moderado por lo que se ubico en la clase 3.

Estos resultados pueden atribuirse a diversos factores entre ellos la constante emisión gases derivados de la alta actividad de vehículos de motor que transitan en la carretera México-Puebla, la presencia de una planta improvisada de asfalto y a la cercanía con la Ciudad de México. Los vientos que circulan durante el otoño e invierno van causando daño a la vegetación a lo largo de su trayectoria, afectando áreas de barlovento, especialmente cañadas donde se encajonan dichos vientos. La deposición seca del ozono en combinación con otros contaminantes sobre las hojas o acículas producen una capa cerosa que tapa los estomas, interrumpiéndose el proceso del intercambio de gases, respiración y fotosíntesis, así también se modifica la osmosis, el pH intracelular que afecta los controles metabólicos y la condición nutricional y con ello, el metabolismo en general provocando los síntomas y daños observados que se registraron en campo.

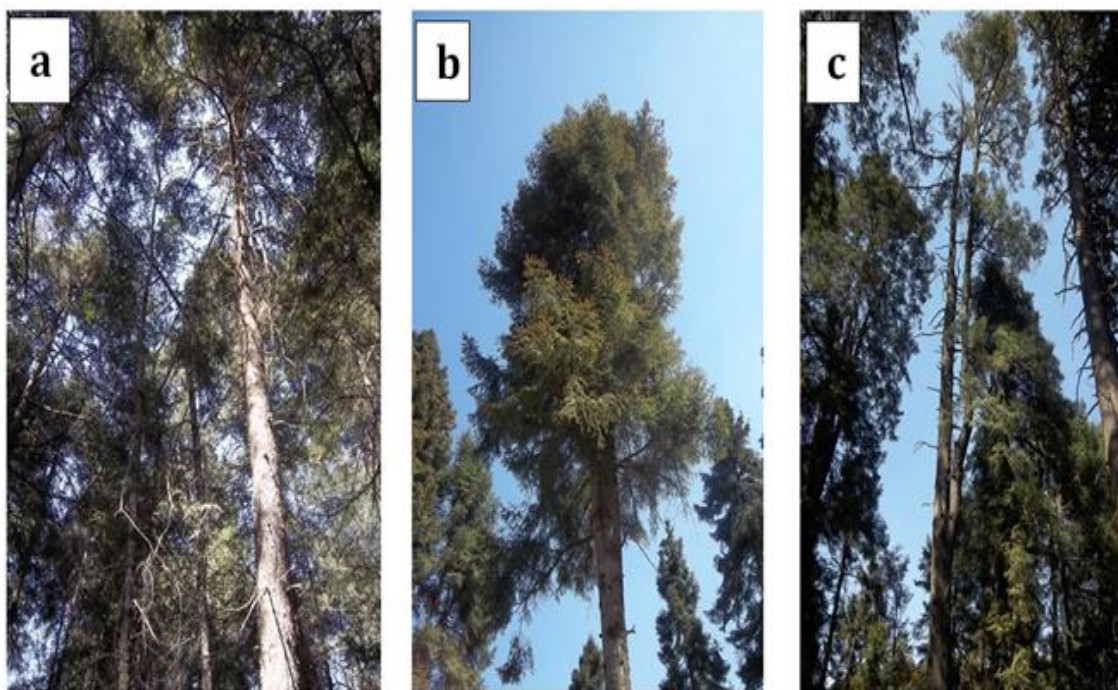
Para el caso del PNZ los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Grajales (2002), para el mismo sitio con una severidad moderada de un 30% de daño, el mismo autor reporta para el PRCDL (Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones) una incidencia completa en 10 plantas de 10, con síntomas de hasta un 70% clasificando un daño severo por ozono en las acículas de *Abies religiosa*. Esta diferencia de daños puede deberse a que los niveles y concentración de ozono en el PNZ son menores a los reportados para PRCDL, así como al efecto acumulativo que tiene el ozono en las plantas y al etapa de desarrollo y crecimiento en la que se encuentran los árboles.

Grajales (2002), igualmente reporta que existe una disminución importante en la producción de clorofilas cuando el árbol se encuentra en etapa vegetativa y con exposición a umbrales tóxicos de ozono (0,0400 ppm) provocando un daño más severo en el árbol. De igual forma Rosas (2006), reporto serios daños visibles en el follaje de *Abies religiosa*, y manchas cloróticas en acículas y hojas de *Pinus leiophylla* y *Quercus rugosa* en el Desierto de los Leones, lesiones que atribuye al aire contaminado proveniente de la ciudad de México.

En bosques naturales existe poca información entre el nivel de exposición al ozono y el daño en el arbolado por la dificultad de estimar la concentración de este contaminante en entornos altamente variables y de gran extensión (González, 2010). La defoliación es un parámetro básico para cuantificar el estado aparente de salud del arbolado y se define como la pérdida de hojas o acículas que sufre el árbol en la parte de su copa. Significa tanto reducción de retención de hojas o acículas como pérdida prematura en comparación con los ciclos normales (ICP-Forests, 2009). La importancia de las copas radica en que se encargan de convertir la radiación solar en fotosintatos que el árbol utiliza para su

crecimiento, reparación y mantenimiento (González, 2010). Las copas nos dan una idea rápida de la salud general del árbol. Copas llenas y saludables nos indican que el carbono está siendo almacenado, el árbol está creciendo, y que no hay impactos serios de patógenos, aeropoluantes o insectos (Erisman *et al.*, 1994; Rustand *et al.*, 1994; Whelan *et al.* 1998; citado por Pérez, 2004). La defoliación es el principal parámetro dentro del muestreo. Se trata de una estimación por árbol de la falta de follaje, responde a muchos factores de estrés y es fácilmente evaluable. Esto hace que la defoliación sea un valioso indicador global del estado de los bosques.

El tipo de mortalidad es la forma de la pérdida de follaje dentro de la copa, puede aportar importante información acerca de las causas de la defoliación (Figura. 14).

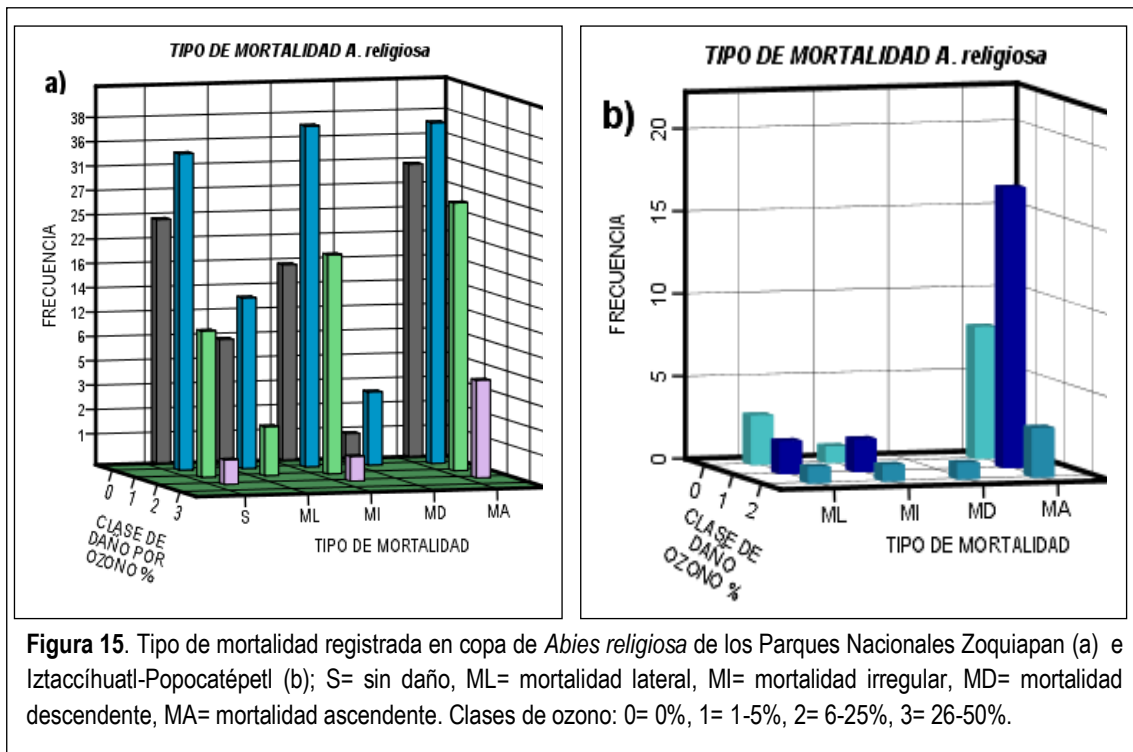


**Figura 14.** Tipo de mortalidad en las copas de *Abies religiosa* en los Parques Nacionales Zoquiapan e Iztaccíhuatl-Popocatepetl a= mortalidad irregular, b= mortalidad ascendente, c= mortalidad lateral y descendente.

Colbeck y Mackenzie, (1994) (citados por Granados, 2001) sugieren que la caída de hojas asociada a la declinación forestal se debe a altos niveles de ozono, lo cual ocasiona un incremento en los niveles de peróxido de hidrógeno y fotooxidación. Algunos de los efectos son daños a la membrana celular, amarillamiento de las hojas, senescencia acelerada de las hojas viejas, caída de árboles como consecuencia del ataque por patógenos, hongos e insectos y formación de un dosel delgado como

síntomas visibles de decaimiento secundario (Innes, 1993, citado por Percy K.E, 2003, Manning y Krupa, 1992; Runeckles y Krupa, 1994).

El tipo de defoliación es un indicador que aporta buena información cuando los árboles tienen la copa regular y bien desarrollada, en la figura 15, podemos observar el tipo de mortalidad con respecto al ozono que se registro en nuestros sitios de estudio. Para el caso del Parque Zoquiapan (figura, a) el tipo de mortalidad irregular y ascendente son las que se presentan con mayor frecuencia con 38 árboles (14%) cada uno ambos ubicados en la clase 1 de ozono, 36 de los individuos (13%) tienen el 100% de sus copas con clase 1 de daño por ozono, en el nivel 0 de ozono la mortalidad ascendente es la que domina, se continúa con los niveles 2 y 3 de ozono siendo de igual forma la mortalidad ascendente la que prevalece, para el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (figura, b) el tipo de mortalidad dominante es la ascendente para los 3 niveles de ozono registrados en estos parajes, siendo la de mayor frecuencia la clase 1 de ozono seguido por el nivel 0 (11% de los individuos) y 2 (9%).



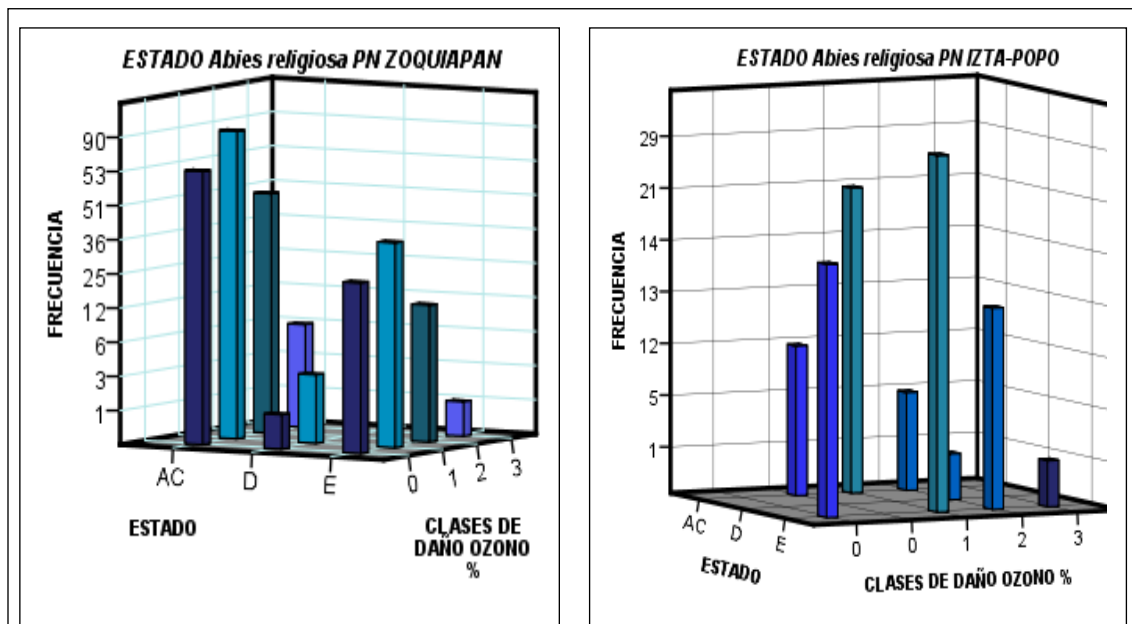
Los resultados muestran que la mortalidad irregular (MI) y ascendente (MA) en las copas de *Abies religiosa* son los patrones dominantes en los parajes de PNZ y la mortalidad ascendente (MA) en los parajes del Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl, para el caso de la mortalidad irregular es directamente atribuible a un daño por deposición seca de contaminantes atmosféricos, y más



específicamente al ozono dada su fuerte condición oxidante lo que provoca lesiones en las cutículas de las acículas causando lixiviación de iones (Ca, Na, K, Mg) lo cual modifica la caída de la lluvia a través de las ramas de los árboles dando como resultado un estado de copa en condición accidentada, **figura 16 y 17**.

Percy (2003) dice que más del 80% de la contaminación total fluye durante la deposición seca, entrando por los estomas en las células causando los daños ya mencionados. La mortalidad ascendente esta asociada a la deposición ácida la que se relaciona con deficiencia nutrimental y síntomas de daño tales como la pérdida de hojas debido a la lixiviación de calcio y magnesio del suelo, lo cual provoca a su vez la movilización de iones de aluminio y otros metales pesados que dañan las raíces de los árboles, lo que influye en la recarga de nutrimentos y agua. La mortalidad descendente (MD) de igual forma está asociada a los contaminantes atmosféricos, especialmente ozono (Somers *et al.*, 1998, citado por González, 2010; Miller *et al.*, 1994). De acuerdo con Granados (2001), el bosque de *Abies* presenta una mortandad del 50 al 100% de sus copas afectando principalmente a los árboles jóvenes.

La **figura 16**, muestra el estado (parámetro evaluado de acuerdo al SPCAN, 2001) y porcentaje de ozono en las copas de *Abies religiosa*. Observe que para el paraje de Zoquiapan 200 de los árboles muestreados presentan copas accidentadas (AC) de los cuales, 90 (32%) tienen un daño ligero por



**Figura 16.** Estado (condición) de las copas en *Abies religiosa* de los Parque Nacionales Zoquiapan e Iztaccíhuatl-Popocatepetl; Estado: AC= estado accidentado, D= despuntado, E= entero; Clases para ozono: 0 = 0% (sin daño por ozono), 1 = 1-5% (daño ligero), 2 = 6-25% (daño ligero), 3 = 26-50% (daño moderado).

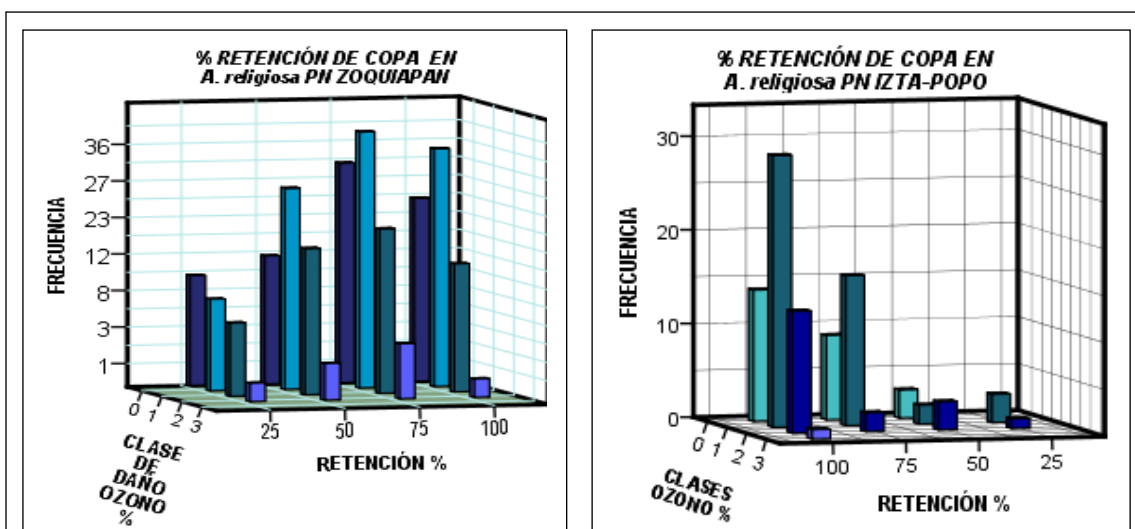
ozono (clase 1), 53 (19%) no muestran daño alguno por este contaminante, 51 (18%) corresponden a un daño ligero por O<sub>3</sub> de clase 2 y 6 con daño moderado por ozono de clase 3; 4 (1%) árboles muestran copas despuntadas (D) de ellos 3 exhiben un daño ligero por ozono de clase 1 y 1 individuo no presenta daño por ozono; y 74 (27%) árboles lucen copas enteras (E), 36 (13%) de estos presentan un daño ligero por O<sub>3</sub> de clase 1, 25 (9%) no exhiben daño por O<sub>3</sub>, 12 (4%) muestran daño ligero de clase 2 y sólo 1 muestra daño moderado de clase 3. Para el paraje Iztaccíhuatl- Popocatepetl, 38 (21%) árboles presentaron copas accidentadas (AC) de ellos 21 (18%) muestran lesiones ligeras por ozono de clase 1, 12 (10%) no presentan daños y 5 (4%) más tienen daños ligeros de clase 2; se encontró únicamente 1 individuo con su copa despuntada (D) con un daño ligero de clase 2; 57 (32%) árboles más exhiben sus copas enteras (E) de estos, 29 con daño ligero por ozono de clase 1, 14 sin daño, 13 con daño ligero de clase 2 y 1 con daño moderado de clase 3.



**Figura 17.** Estado de las copas que presenta *Abies religiosa* en los Parque Nacionales Zoquiapan e Izta-Popo.

La retención está muy relacionada con la salud del arbolado autores como Waring (1987) y Blank *et al.* (1988) afirman que un árbol saludable comúnmente presenta copas simétricamente distribuidas a lo largo del tallo y que es un buen indicador para evaluar su salud. La edad y los contaminantes atmosféricos son factores que influyen en la retención de hojas, pese a que la edad puede ser un factor importante para la pérdida de la copa nuestros resultados muestran que la pérdida de follaje se debe a otra causa, que en este caso puede ser ozono ya que el 84 % de los individuos muestreados en nuestros sitios de estudio son árboles jóvenes y solo el 16% son árboles adultos.

La **figura 18** presenta el porcentaje de retención de copa con respecto al moteado clorótico que exhibe *A. religiosa* en nuestros lugares de estudio, obteniendo como resultado para Parque Nacional Zoquiapan que la mayoría del arbolado presenta un daño ligero por ozono de clase 1 (1-5%) para tres de los porcentajes de retención que son 50, 75 y 100% siendo el más alto el de 75%.



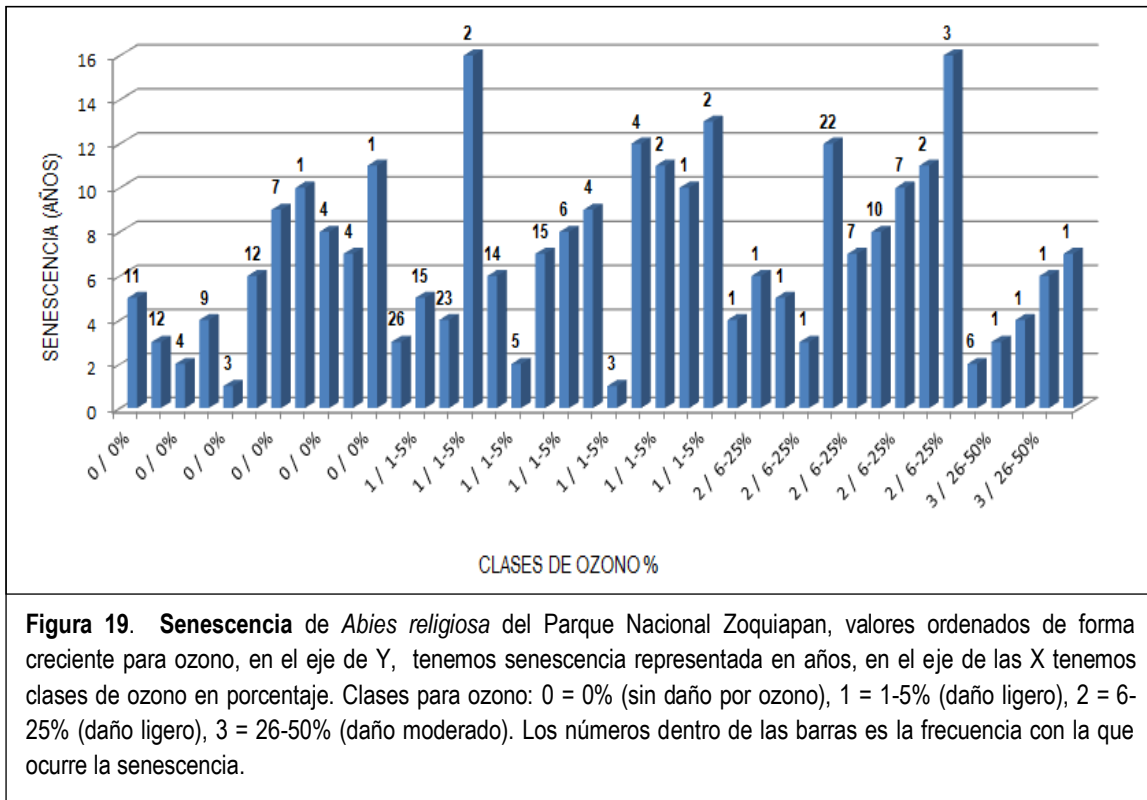
**Figura 18.** Porcentaje de Retención de follaje en las copas de *Abies religiosa* en los Parques Nacionales Zoquiapan e Iztaccíhuatl-Popocatepetl; Clases para ozono: 0 = 0% (sin daño por ozono), 1 = 1-5% (daño ligero), 2 = 6-25% (daño ligero), 3 = 26-50% (daño moderado).

Para los parajes del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, 29 individuos presentan el 100% de retención de su corona con presencia de daño ligero por ozono de clase 2 (6-25%). Granados (2001), dice que los árboles en declinación sólo conservan sus hojas por dos años, en contraste con árboles sanos que las conservan hasta por seis años, con pocas ramas vivas siendo el ápice el último en morir. Aunque por otro lado Rosas (2006) concluye para uno de sus trabajos en el Desierto de los Leones, que *Abies religiosa* presentó serios daños visibles por ozono en el follaje del año anterior en contraste con

los brotes del follaje nuevo, esto hace pensar en daños ocasionados por aire contaminado, ya que las hojas de oyamel duran 3 años antes de caerse.

Estudios en *Abies vejari* realizados por Martínez (1963) reportan que a medida que incrementa su edad el porcentaje de retención de su copa disminuye, a la edad de 20 años esta especie retiene el 74% de copa y a la edad de 40 años, retiene 67% de ella. Ewers y Schmid (1982) citados por Sandermann (1997), relacionan la retención del follaje con la elevación en la que un árbol crece, afirman que árboles en elevaciones más altas consistentemente conservan su follaje hasta 40 años como es el caso de *Pinus bristlecone* y *P. longeva*. La pérdida de área foliar, debido a estrés por contaminantes aéreos son inducidos a través de mecanismos por muerte celular, ya que los contaminantes causan senescencia prematura y la pérdida de follaje en las copas de los árboles, estos procesos afectan la apariencia de la copa provocando su transparencia, esto en conjunto es usado como indicador de daño por contaminación atmosférica.

En muchas especies de coníferas, la senescencia del follaje puede medirse contando los nodos en las ramas, con cada nodo se separa verticilos anuales de agujas o fascículos de aguja correspondientes a un año de crecimiento (Sandermann, *et al.* 1997) tomando en cuenta esta descripción las **figuras 19 y 20** nos presentan los años de senescencia foliar a través del conteo de nodos y la clase para ozono que se registro en los parajes estudiados en Zoquiapan la senescencia mayor representada es la de 4 y 3 años seguidas por la de 5 y 6 años, para la longevidad de 4 años, 9 individuos (4%) no presentaron daño por ozono, 23 (9%) tienen daño ligero de clase 1 y 22 (8%) con daño ligero de clase 2, para la senescencia con nodos que retienen acículas vivas por 3 años, 12 árboles (5%) se presentan sin daño, 26 (10%) con daño ligero de clase 1, 7 (3%) exhiben daño ligero de clase 2 y 3 individuos presentan daño moderado por ozono de clase 3, para la senescencia con nodos que retienen acículas vivas por 5 años 11 árboles (5%) no tienen daño visible por ozono, 15 presentan daño ligero de clase 1 y 10 tienen un daño ligero de clase 2, para el paraje Iztaccíhuatl-Popocatépetl encontramos que la senescencias con mayor frecuencia son las 3, 4, 5, 6 y 9 años, la senescencia de 3 años esta representada con 7 árboles (8%) sin daños visibles por ozono, 16 (17%) con daño ligero de clase 1 y 6 con daño ligero de clase 2, para la longevidad de 4 años, 9 árboles (7%) tienen daño ligero de clase 1 y 1 con daño moderado de clase 3, para nodos que retienen acículas vivas por 5 años, 7 (8%) no presentan daño, para senescencia de 6 años, 4 individuos no muestran daño, y para senescencia de 9 años, 5 árboles tienen daño ligero de clase 2.



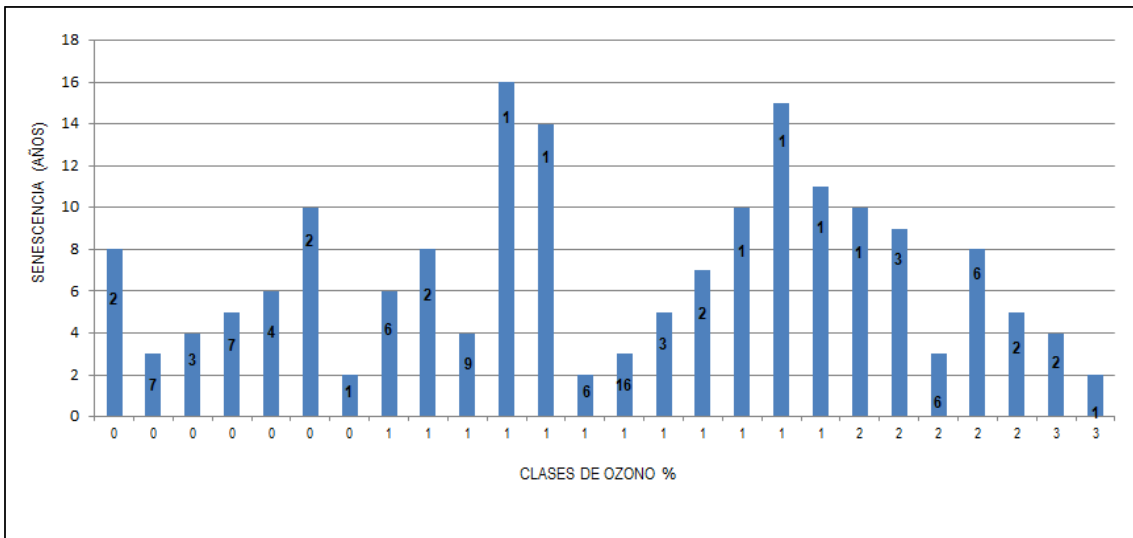
En las áreas no contaminadas, se puede esperar que *pinos ponderosa* retenga follaje durante tres o cuatro años, un promedio de cuatro verticilos anuales retenidas en un momento dado (Miller *et al.*, 1969; Acobson & Hill, 1970, citado por Sánchez, 1992, Sandermann, *et al.* 1997). Tomando en cuenta que *Abies religiosa* es una especie más sensible a los contaminantes aéreos podemos deducir que los lugares muestreados se encuentran influenciados por vientos contaminados que están afectando los rodales de oyamel estresándolos y acelerando los procesos de senescencia foliar. Los radicales libres que se forman en el interior de las acículas en contacto con O<sub>3</sub> intervienen en procesos de señal intra e intercelular, y en altas concentraciones pueden inducir procesos de muerte celular, ya sea programada (senescencia) o no.

Si las hojas se dañan, se secan y caen prematuramente por acción del aire contaminado, lo árboles defoliados se debilitan progresivamente y son presa fácil de los descortezadores. La reducción en la longevidad de las acículas se reconoce como un indicador de estrés por contaminación del aire para especies de coníferas. El ozono da lugar a reducción del crecimiento con disminución del peso seco de raíces y ramas y superficie foliar media, con una senescencia precoz (Matyssek y Sandermann, 2001, U.S. EPA, 1978). También los cambios de color en las hojas se asocian con senescencia, tales como

cambios de color durante el otoño y cambios similares pueden ocurrir durante el verano en presencia de contaminantes del aire (Heck and Stafford, 1977; Bauer and Hernández, 1986 y 1984, Rosas, 2006)

El análisis de correlación tau - b de Kendall del **Anexo 4**, muestra una relación significativa entre la retención y la clase de ozono registrada para el estado con un coeficiente de (.865,  $p < 0.01$ ), entre retención de Izta-Popo y la retención de Zoquiapan con coeficiente de (.912,  $p < 0.01$ ), entre retención de Izta-Popo y el ozono para estado de salud de Zoquiapan con coeficiente de .840,  $p < 0.01$ , y para la retención y ozono del estado de salud en Zoquiapan con coeficiente .868,  $p < 0.01$ .

También existe relación significativa entre ozono registrado para el estado en Izta-Popo con la retención y estado que presenta Zoquiapan con (coeficientes de .834 y .653 respectivamente,  $p < 0.05$ ), ozono registrado para estado en Izta-Popo y el estado de Zoquiapan ( $r = .572$ ,  $p < 0.05$ ), estado de salud, estado y retención de Izta-Popo con ( $r = .578$  y  $.575$ ,  $p < 0.05$ ), estado de salud y retención de Zoquiapan ( $r = .530$ ,  $p < 0.05$ ), estado de Izta-Popo y ozono registrado para el estado de salud de Zoquiapan con coeficiente de .652,  $p < 0.05$ , y el estado y retención de Zoquiapan con coeficiente de .625,  $p < 0.05$ . Con esta relación entre variables confirmamos que a pesar de que los vientos que provienen de la Ciudad de México impactan primero en Zoquiapan, el efecto de los contaminantes provocan las mismas alteraciones fisiológicas en las masas de oyamel de Zoquiapan que en las de Iztaccíhuatl-Popocatepetl donde los contaminantes acarreados por estos vientos impactan posteriormente.



**Figura 20. Senescencia de *Abies religiosa* del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, valores ordenados de forma creciente para ozono, en el eje de Y, tenemos senescencia representada en años, en el eje de las X tenemos clases de ozono en porcentaje. Clases para ozono: 0 = 0% (sin daño por ozono), 1 = 1-5% (daño ligero), 2 = 6-25% (daño ligero), 3 = 26-50% (daño moderado). Los números dentro de las barras es la frecuencia con la que ocurre la senescencia.**

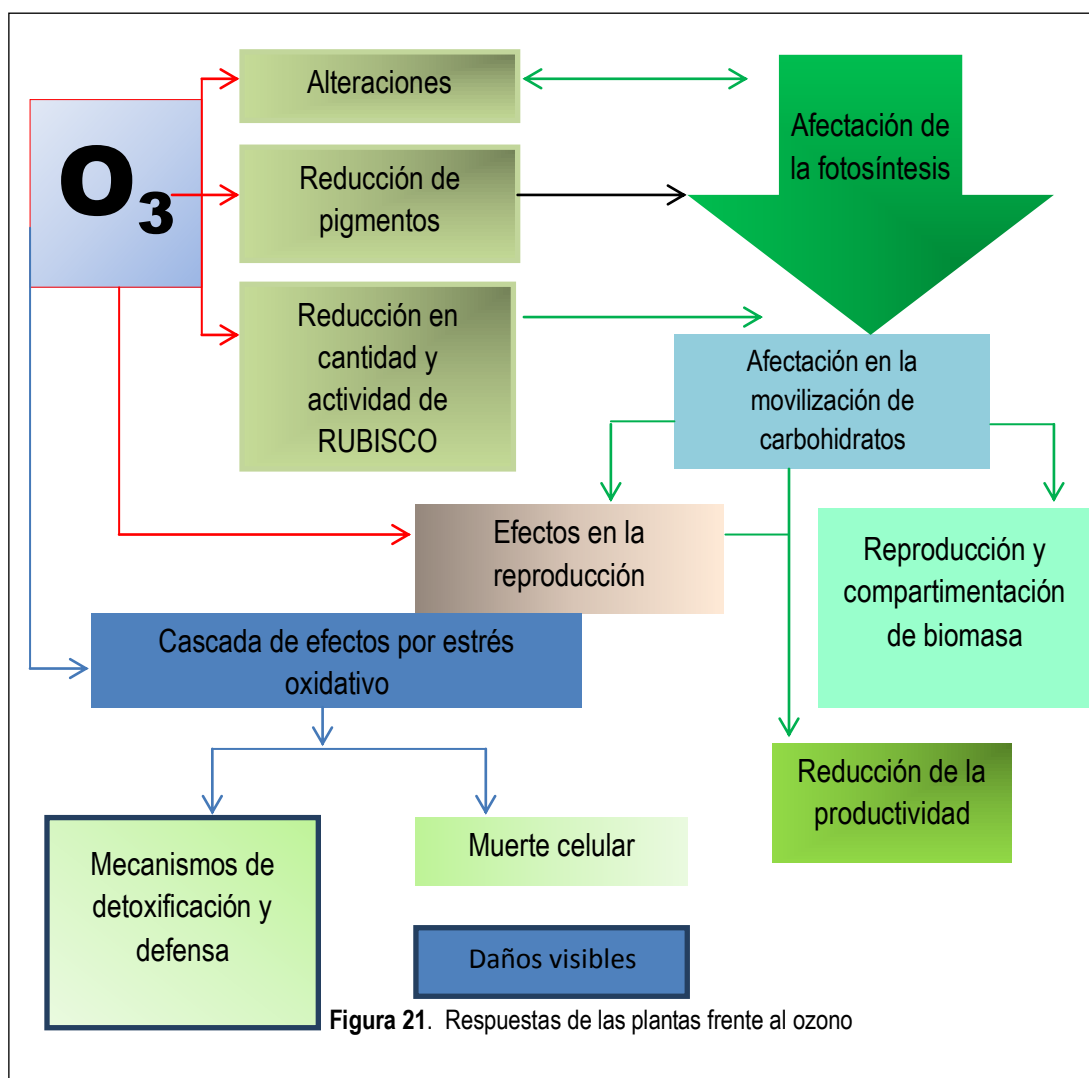
La correlación de Kendall que presenta el **cuadro 3**, dice que existe una correlación significativa entre los rangos de ozono registrados en ambos parques con un coeficiente de .680 a un nivel de confianza del 99%. También hay una correlación significativa entre el ozono registrado en Izta-Popo y la senescencia que presenta Zoquiapan con un coeficiente de .510 y nivel de confianza del 99%, con lo cual se puede suponer que las concentraciones de O<sub>3</sub> que llegan a las dos zonas son similares.

**Cuadro 3.** Análisis de correlación de Kendall aplicada para las variables de senescencia y clases de ozono para los Parques Nacionales Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Zoquiapan

		Ozono Izta-popo	Senescencia Izta-popo	ozono Zoquiapan	senescencia Zoquiapan
ozono izta-popo	Correlation Coefficient	1.000	.000	<b>.680**</b>	<b>.510**</b>
	Sig. (2-tailed)	.	1.000	.000	.001
	N	27	27	27	27
senescencia izta- popo	Correlation Coefficient	.000	1.000	.099	-.068
	Sig. (2-tailed)	1.000	.	.552	.629
	N	27	27	27	27
ozono Zoquiapan	Correlation Coefficient	<b>.680**</b>	.099	1.000	.054
	Sig. (2-tailed)	.000	.552	.	.636
	N	27	27	47	47
senescencia Zoquiapan	Correlation Coefficient	<b>.510**</b>	-.068	.054	1.000
	Sig. (2-tailed)	.001	.629	.636	.
	N	27	27	47	47

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

En la actualidad se considera que el ozono es el contaminante mas relevante para cultivos y vegetación natural como son los bosques (Krupa *et al.*, 2000) siendo uno de los principales causantes de la declinación forestal. Los cambios en el ozono troposférico se vinculan a la calidad del aire y al cambio climático. Se ha comprobado la correlación que existe entre el aumento del ozono con la temperatura, estas condiciones anómalas de calor y de estancamiento del aire se asocian con niveles excepcionalmente elevados de ozono en la superficie, provocando un cambio importante en el microclima de la vegetación someténdola a estreses como son pérdidas en la humedad del suelo y del ambiente y temperaturas más elevadas esto se refleja en una marcada reducción del área foliar que se considera como un mecanismo adaptativo de las plantas por déficit hídrico, ya que implica una reducción de la tasa de transpiración. La figura 21 resume la respuesta de las plantas al ozono.

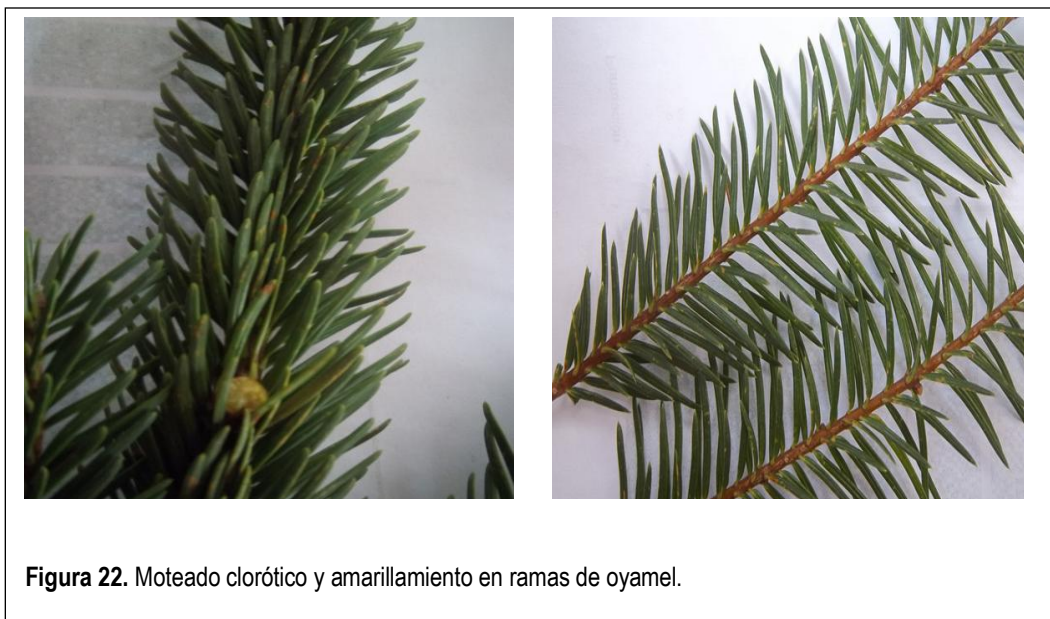




Tomando en cuenta que *Abies religiosa* es una especie que requiere condiciones de alta humedad y temperaturas templadas se puede decir, que estos factores al verse afectados por los cambios provocados por la presencia de contaminantes atmosféricos emitidos de la Ciudad de México, transportados por los vientos, siendo las áreas de barlovento de las más afectadas, especialmente en cañadas donde se estacionan dichos vientos y donde se establecen los bosques de oyamel, estos se encuentran sometido a un estrés que es el causante de los daños que presenta el follaje, cuando los mecanismos de defensa y reparación del árbol se vieron superados.

Los síntomas que presentan los bosques a través de las etapas de declinación de los árboles hasta llegar a la muerte, tomando en cuenta los planteamientos de autores como Waring (1987) pueden enmarcarse en las siguientes observaciones: Moteado clorótico y amarillamiento de las ramillas o follaje maduro, caída gradual del follaje, ocasionando una copa irregular o asimétrica con porciones muertas, decaimiento del follaje superior de la copa, reducción del crecimiento del árbol; disminución del crecimiento de los brotes y renuevos, así como del entrenudo y más tarde la muerte del follaje.

**\*Moteado clorótico y amarillamiento de las ramillas o follaje maduro:** parámetro evaluado y encontrado en campo para árboles de oyamel para este estudio figura 22, el 72 y 73 % de los individuos muestreados presentan daños por ozono de ligero (clase 1 y 2) a moderado (clase 3), por lo que se presume se debe a la exposición principal a ozono, el ozono en combinación con  $\text{SO}_2$ , en menor medida a otros contaminantes como  $\text{NO}_x$ , fluoruros y otros factores como lluvia y neblina ácida.



**Figura 22.** Moteado clorótico y amarillamiento en ramas de oyamel.

**\*Caída gradual del follaje, ocasionando una copa irregular o asimétrica con porciones muertas y decaimiento del follaje superior de la copa.** Figura 23. De acuerdo con los datos recogidos en campo tenemos que, para el estado de salud (tipo de mortalidad) y estado de las copas la mayoría de ella presenta una mortalidad irregular (MI) y ascendente (MA), con un estado accidentado (AC), con una retención promedio de entre 50% y 75% de su follaje. Actualmente se ve al ozono como principal agente de declinación forestal (Innes, 1993, citado por Percy K.E, 2003), la presencia de este elemento ocasiona el cierre estomático, un incremento en los niveles de peróxido de hidrógeno y fotooxidación lo que produce daños a la membrana celular, amarillamiento de las hojas, senescencia acelerada de las hojas y formación de un dosel delgado y con síntomas visibles de un decaimiento secundario (Krupa, 1992 y 1994, Seoáñez, 2002, Pardos, 2006).



**Figura 23.** Decaimiento del follaje en *Abies religiosa*.

**\*Reducción del crecimiento del árbol disminución del crecimiento de los brotes y renuevos, así como del entrenudo y más tarde la muerte del follaje:** El ozono se ha documentado como causa de la senescencia, abscisión prematura, moteado y necrosis de las hojas en especies arbóreas. En general, el ozono tiene un efecto negativo en la productividad, que se correlaciona con un descenso en el contenido de clorofila, fotosíntesis, prematura abscisión de las hojas y descensos en la adquisición y acumulación de carbono (WHO, 2000). El cierre estomático para evitar la absorción de ozono reduce la asimilación de carbono y, como consecuencia, los niveles de azúcares en la planta se ven reducidos (ambos, azúcares solubles y almidón). Esta reducción puede ser debida a la inhibición de la síntesis o a

la alteración de los procesos de translocación de estos compuestos, afectando al crecimiento y a la distribución de fotosintatos provocando la senescencia prematura de las hojas (Sandermann, 1996). Miller (1965) reportó para *Pinus ponderosa* que los pinos que han sido afectados por ozono retienen un máximo de sólo dos clases de edad de agujas. Los resultados de senescencia en cuanto a nodos que retienen acículas vivas, obtenidos para este estudio tenemos que las clase de edad que mas se presentan son por 3 y 4 años de retención esto puede explicarse a que la mayoría de los árboles son jóvenes aunque se registraron árboles que retienen clases de agujas de 10 hasta 20 años sin embargo para este caso los eventos son muy esporádicos y también puede influir la altitud en la que se ubican estos bosques, como lo refieren Ewers y Schmid (1982) que afirman que, árboles en elevaciones más altas consistentemente conservan su follaje hasta 40 años como es el caso de *Pinus bristlecone*.

Cuando el follaje se reduce aumenta la transparencia de la copa esto provoca más incidencia de la radiación solar, por lo tanto, aumento de la temperatura a escala microhábitat, al suceder esto el albedo del suelo aumenta provocando una mayor evaporación y más vapor produce más calor por que tiene un efecto invernadero.

Los claros que se abren por la pérdida de follaje permitiendo el paso directo de luz, esto consiente que invadan y se establezcan otras especies como *Buddleia cordata*, *Salix cana*, *Baccharis conferta* y varias especies de gramíneas como *Stipa ichu*, *Epicampes macroura*, *Bromus pendulinus*, *Festuca amplissima* y *Muehlenbergia robusta* (Rosas, 2006), el paso directo de luz hace que la humedad del suelo se reduzca impidiendo la regeneración natural de *A. religiosa* ya que los bríznales necesitan un suelo con suficiente humedad y casi nada de luz, otro de los daños que se provoca por los claros abiertos en las copas es que al establecerse especies herbáceas y arbustivas se aumenta el riesgo de incendios y se acelera el proceso de erosión del suelo lo que lleva a una pérdida en la viabilidad de las semillas, viéndose reducido el porcentaje de germinación y por lo tanto la regeneración natural de la especie. La radiación solar directa en combinación con el ozono afecta el proceso de fotosíntesis disminuyéndola en un 14-30% ( Yoder *et al*, citado por Smith *et al*, 2001). En términos de fotosíntesis total del árbol, la velocidad fotosintética en arboles dañados por ozono es reducida debido a los niveles disminuidos de clorofila, así como también a la senectud temprana de las acículas de *Abies religiosa*. La senectud prematura debida al ozono afecta considerablemente la fase vegetativa y la disminución del vigor general, resultado de retranslocación de los fotoasimilados de las hojas dañadas a otras partes de la planta. Por otra parte, la senectud prematura puede conducir a desventajas claras para un

ecosistema completo, modificando la dinámica del bosque, entre otras cosas, por sus efectos en la sucesión ecológica al reducir la supervivencia del banco de semillas, alterar el patrón de crecimiento y aumentar la tasa de mortalidad por descortezadores en individuos debilitados (González, 2010).

Actualmente no existe en México ningún reporte de trabajos realizados respecto a indicadores que permitan evaluar el estado de salud de los bosques de oyamel, en materia de daño por ozono ni de longevidad del follaje (senescencia) como otro indicador de decline, el cual pueda tomarse como referencia; sin embargo, como se cita en la literatura revisada e investigaciones generadas para otras especies y en diferentes países además del ozono y la senescencia, existen otros factores que pueden afectar la salud de *Abies religiosa*.

## 8 CONCLUSIONES

De los resultados se estableció que el método estandarizado es una buena herramienta y de fácil manejo para determinar el daño foliar por O<sub>3</sub>. Es un instrumento para la evaluación de este indicador de salud forestal.

*Abies religiosa* es una especie sensible al O<sub>3</sub> por que más del 70% de árboles muestreados en Zoquiapan e Iztaccíhuatl-Popocatepetl registraron daño foliar (moteado clorótico) de clases 1 a 3, por este resultado se propone como especie bioindicadora.

La zona que presentó menor densidad de árboles es Iztaccíhuatl-Popocatepetl con 117 individuos en 1.2 ha, convirtiéndose en una zona con mayor susceptibilidad a la contaminación atmosférica, establecimiento de especies invasoras como (*Buddleia cordata*, *Salix cana*, *Baccharis conferta*, *Stipa ichu*, *Epicampes macroura*, *Bromus pendulinus*, *Festuca amplissima* y *Muehlenbergia robusta*).

El análisis de Kendall muestra una correlación significativa entre las clases de ozono registradas en ambos parques con un coeficiente de .680, así como una correlación media para el ozono (clases) registrado en Izt-Popo y la senescencia que presenta Zoquiapan en un coeficiente de .510, con estos resultados suponemos que la concentración de O<sub>3</sub> es similar para las dos zonas. A pesar de esto y que la longevidad foliar que se presento con más frecuencia fueron las de 3 y 4 años para ambas zonas Iztaccíhuatl -Popocatepetl presenta mayor afectación por defoliación.

Más del 70% de arboles muestreados presentan moteado clorótico, mortalidad ascendente e irregular y una retención de copa (50 a 75%), estas condiciones en el bosque crean un aumento en el paso de la radiación solar lo cual permite el establecimiento de especies herbáceas y arbustivas, limitando la regeneración natural.

## 9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar análisis nutrimental en acículas de *Abies religiosa* para corroborar que el moteado clorótico es por ozono y no por deficiencia de nutrimentos.
- Se sugiere un análisis foliar a nivel histológico para comprobar el daño a nivel celular para las zonas estudiadas.
- Se propone reforestar las zonas con *Abies religiosa*, ya que la reforestación que se llega a encontrar es realizada con pinos.
- Los programas de reforestación deben estar encaminados a mantener la copas de los árboles en retención mayor de 75%.
- Proponer programas para disminución de emisiones de precursores de ozono ( $\text{NO}_x$ ).
- Realizar la equivalencia de los indicadores de salud forestal (RED-II) para el manual de indicadores básicos del desempeño ambiental de México:2005 SEMARNAT.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado R. D. 1989 Declinación y muerte del bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del valle de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, México.
- Alvarado R., D and Hernández-Tejeda T (2002) Decline of sacred-fir in the Desierto de los Leones National Park. In Fenn ME, LI de Bauer, Hernández- Tejeda T (Eds.) Urban air pollution and forest. Resources at risk in the Mexico City air basin. Springer. New York, USA.
- Alvarado. R. D.; De la Isla .B. M.L; Galindo. A.J. (1993). Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental pollution*. 80. 115-121.
- Álvarez D. Laguna G. Rosas I. (1998). Macroscopy and microscopic symptoms in *Abies religiosa* exposed to ozone in a forest near Mexico City. *Environmental Pollution* 103: 251-159.
- Anders C. (1988), "Interview: the Effects" *México Journal*, vol. II (2), 3-4, October 10.
- Andrade C. (1989). El Ozono en la atmósfera, *Revista creces*. Noviembre. Chile.
- Ávila Bello, C. H., (2000). Ecología poblacional de *Abies hickelii* en el Pico de Orizaba, Veracruz. Colegio de Postgraduados. Informe final SNIBCONABIO proyecto No. L172. México D. F.
- Azcon B. J., (2000). Fundamentos de la fisiología vegetal. McGraw Interamericana, Madrid, España pp.481- 497.
- Blank, L.W.; Roberts, T.M.; Skeffington, R.A. (1988). New perspectives on forest decline. *Nature* 336: 27-30.
- Bortier K., Ceulemans R., and Temmerman L. (1999). Effects of tropospheric ozone on woody plants. In: Agrawal, S: B: and M. Agrawal (Edit). *Environmental pollution and plant responses*. Lewis Publishers. U.S.A. pp 153-163.
- Bravo H., Perrin F., Rosas R., R. Torres, (1998), Importancia de la contaminación atmosférica por ozono en la zona metropolitana de la ciudad de México.
- Bravo, A.; R. Sosa E. y R. Torres J. (1991). Ozono y lluvia ácida en la ciudad de México. *Ciencias*. (Méx.) 22: 33-40. In: M. L. Saavedra R. 2001. Desordenes nutrimentales en rodales de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schltld. *Et Cham.*, del Desierto de los Leones, D.F. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- Briseño F. Y. (1989). Contaminación atmosférica de origen fotoquímico.
- Chappelka A. & Samuelson L. J. (1998). Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United States: a review. *New Phytology* 139: 91-108.

- Coleman M.D., Isebrands J.G., Dickson R.E., Karnosky D.F. (1995). Photosynthetic productivity of aspen clones varying in sensitivity to tropospheric ozone. *Tree Physiol.* 15, 585-592.
- Cunningham W. D., Swanson E. S. (1977). Ozone induced changes in bean leaf cellular membrane structure. A freeze-fracture electron microscopic study. *Plant Physiol.* 59 Suppl. 124 (Abstr).
- Darrall N. M. (1989). The effect of air pollutants on physiological processes in plants. *Plant, Cell and Environment* 12: 1-30.
- Delgado S. J.M, (2005), Validación e implementación de técnicas de captación pasiva para el estudio de los niveles y efectos de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno en un área costera mediterránea.
- Dirección General de Gestión Ambiental del Aire de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, (2001). Agenda de Trabajo 2001-2006. México. D.F.
- Edras M. S. C., Okanga F I, Zaharia I L and Khan A Q. (2000). Phytoalexins from crucifers: synthesis, biosynthesis, and biotransformation; *Phytochemistry* 53 161–176.
- European Environment Agency (EEA). 1998. Capítulo 5. Ozono troposférico.
- Fenn M. E., Haember R., Tonnesen G. S., Baron J. S. Grossman-Clarke S., Jaffe D. A. Copeland S., Geiser L., Rueth H. M. and Sickman O. (2003). Nitrogen emission deposition and monitoring in the western Unites states. *Bioscience.* 53(4): 392-420.
- Fenn M. E., Poth M .A., Aber J. D., ., Baron J. S., Bormann B. T., Jonson D. W., Lemly A. D., McNulty S. G., Ryan D. F. and Stottlemyer R. (1998). Nitrogen excess in North American Ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecol. Applic.* 8 (3):706-733.
- Franzaring J., Tonneijk A. E., Kooiman A.W., Dueck T. A. (2000). Growth responses to ozone in plant species from wetlands. *Environmental and Experimental Botany* 44: 39-48.
- García G. R., (2000), Comportamiento de la dinámica sucesional de *Abies religiosa* (HBK) SCHL. *et.* CHAM., y *Pinus hartwegii* LINDL., en la estación forestal experimental Zoquiapan, Estado de México, Tesis de Ingeniero forestal, Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Giacomo B., Forino L. M. C., Tagliasacchi M. A., Rodolfo Bernardi R. and Durante M. (2010). Ozone damage and tolerance in leaves of two poplar genotypes. *Caryología* 63 (4): 422- 434.
- Gimeno D. L., (2008), Impacto del ozono troposférico sobre la anatomía foliar de *Abies pinsapo* BOISS. I: Estudio de la distribución de daños.



- González- Medina R. E., Briseño M. M. y Alvarado R. D. (2010). Exposición a ozono en relación a vitalidad en bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham) forest. *Madera y Bosques* 16 (4) 7-19.
- Grajales C.C., (2000), Comportamiento del Sotobosque en respuesta al ozono. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. México.
- Granados S.D., López R.G.F., (2001), Declinación Forestal, *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, año/vol. 7. Número 001, pp. 5-13.
- Grulke N. E. (1999). Physiological responses of Ponderosa pine to gradient of environmental stresses. In: Miller, P. R., McBride, J. R. Oxidants air pollution impacts in the Montana forest of southern California: A case study of the San Bernardino mountains ecological studies. Vol. 134. Springer, New York, pp 126-163.
- Health-Canada and Environment-Canada, (1999). National ambient air quality objectives for ground-level ozone. Federal-Provincial Working Group on Air Quality Objectives and Guidelines. Health Canada & Environment Canada.
- Hernández T. T., *et al.* (2009), Los Bosques de la Ciudad de México. ADNECO Ambiental
- 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.
- Hernández-Tejeda, T. y L. I. de Bauer. (1989). La supervivencia vegetal ante la contaminación atmosférica. Centro de Fitopatología. Colegio de Postgraduados. México.
- Innes, J.L., (1993). Forest health. Its assessment and status. CAB Int. Wallingford, UK.
- Izuta T. (2006) Ozone threat to Japan's forest. Tropospheric ozone, a growing threat. Acid Deposition and Oxidant Research Center. Available at: [www.adorc.gr.jp/ozone/ozone1.pdf](http://www.adorc.gr.jp/ozone/ozone1.pdf)
- Jáuregui, E. (1958). El aumento de la turbiedad del aire en la Ciudad de México. *Ing. Hidr.* En México. 4 (1958): A77-A81.
- Kangasjärvi J., Talvinen J., Utriainen M., & Karjalainen R., (1994). Plant defense systems induced by ozone. *Plant, Cell and environment* 17:783-794.
- Krupa S. V. (1999). Polución, población y plantas (versión en español por Ma. De Lourdes de la Isla de Bauer), APS. Colegio de postgraduados. México. Pp. 1-184.
- Krupa S. V. (2000). Ultraviolet-B radiation, ozone and plant biology. *Environmental Pollution*. 110:193-194.

- Krupa, S.V and Manning, W.J., (1992). Experimental methodology for studying the effects of ozone on crops and trees. In: *Surface Level Ozone Exposures and Their Effects on Vegetation*. A.S. Lefohn (ed.). Lewis Publishers, Chelsea, MI. pp. 93-156.
- Krupa, S.V., Grünhage, L., Jäger, H.-J., Nosal, M., Manning, W.J., Legge, A.H. and Hanewald, K. (1994). Ambient ozone (O<sub>3</sub>) and adverse crop response: A unified view of cause and effect. *Environ. Pollut.* 87: 119-126.
- Küppers, M., Klumpp, G., (1988). Effects of ozone, sulfur dioxide and nitrogen dioxide on gas exchange and starch economy in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst). *Geo- Journal* 17, 271–275.
- López L., M. A., J. Velázquez M.; A. Velázquez M., V. González R. y V. M. Cetina A. (1998). Estado nutrimental de *Abies religiosa* en un área con problemas de contaminación ambiental. *Agrociencia* Vol. 32 (1): 53-59.
- López M. (1995). Resistencia de las plantas. Trillas México. Pp 77-81.
- Madrigal–Sánchez, X. (1967). Contribución al conocimiento de la ecología de los bosques de oyamel [*Abies religiosa*(H.B.K.) Schlecht. & Cham] en el Valle de México. Boletín Técnico 18. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, México, D. F. 94
- Manual RED CE DE NIVEL II, (2002). Red de Parcelas Permanentes Para El seguimiento Intensivo y continuo de los Ecosistemas Forestales .Comisión Forestal Europea.
- Manzanilla, H. (1974). Investigaciones epidométricas y silvícolas en bosques mexicanos de *Abies religiosa*. Dirección General de Información y Relaciones Públicas, Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D. F.
- Martínez, M. (1963). Las pináceas mexicanas, tercera edición. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- McKee I. F., Woodward F. I. (1994). The effect of growth at elevated CO<sub>2</sub> concentrations on photosynthesis in wheat. *Plant, Cell and Environment* 17: 853-859.
- Middleton, J., Kendrick, J. J. and Schwalm, H., (1950). Injury to herbaceous plants by smog or air pollution. *Plant Dis. Rep.*, 34: 245-252.
- Musselman R. C. and Lef S. A. (2007). The Use of Critical Levels for Determining Plant Response to Ozone in Europe and in North America. *Forest Ecosystems The Scientific World JOURNAL* 7: 15–21.
- Nava L. M.A., (2006), Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración, en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena, D.F., Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias UNAM, México, D.F.

- Nieto de Pascual P. C. (1995). Estudio sinecológico del bosque de oyamel de la cañada de Contreras, Distrito Federal. *Revista Ciencia Forestal en México* 77:3–34.
- Omrod D. P., Nilsen E. T. (1995). Physiological responses of plants and crops to ozone stress in *Handbook of plant and Crop Physiology* edit by Mohammad Pessarakli. Marcel Dekker Inc. E. U. pp 753-759.
- Orcutt D. M., Nilsen E.T., (2000). *Physiology of plants under stress*. John Willey & Sons Inc. U.S.A. pp. 518-533.
- Panek J. A., and Goldstein H. A. (2001). Response of stomatal conductance to drought in ponderosa pine: implications for carbon and ozone uptake. *Tree Physiology* 21, 337–344
- Paoletti E., Grulke N. E. (2010). Ozone exposure and stomatal sluggishness in different plant physiognomic classes. *Environmental Pollution* 158: 2664-2671.
- Pardos J. A., (2006), la contaminación atmosférica y los ecosistemas forestales. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For. UPM. España*. Pp 55-70.
- Pérez S. M., (2004). Transferencia de nutrimentos hacia el piso forestal por efecto del escurrimiento foliar de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegi*, en *Desierto de los Leones, D. F.* Tesis de maestría en ciencias. Montecillo Texcoco, Estado de México.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). (2000). *Perspectivas del medio ambiente mundial 2000. GEO-2000*. Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp 398.
- Polle A., Junkermann W. (1994). Inhibition of apoplastic and symplastic peroxidase activity from Norway Spruce by the photooxidation hydroxymethyl hidroperoxide. *Plant Physiology* 104:617-621.
- Rosas P. I. Ruiz S. G. (2006). *Calidad del aire y la relación ciudad-bosque en la Cuenca Atmosférica del Valle de México*. Reporte Final. Proyecto SEMARNAT-CONACYT C01-0881/A1. UNAM.
- Sánchez B. G. (1992). Daños visibles por ozono en acículas de *Pinus Halepensis* Mill. En *Grecia y España*. *Ecología* 6: 131-134. Icona, Madrid.
- Sandermann H. Jr. (1996). Ozone and Plant Health. *Annu. Rev. Phytopathology*: 34:347-66.
- Sandermann H. Jr., (2000). Ozone biotic disease interactions: molecular biomarkers as a new experimental tool. *Environmental Pollution*. 108: 327-332.
- Sandermann H., Wellburn A., Heath L. R., (1997), *Forest Decline and Ozone: A Comparison of Controlled Chamber and Field Experiments*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Sanz S. M.J., Sánchez P. G, Calatayud L. V., Minaya G. M.T., Cerveró A. J. (2001). *La Contaminación Atmosférica en los bosques*. Guía para la identificación de daños visibles causados por Ozono. Dirección general de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Medio Ambiente.

- Schutt, P. and B. Cowling E. (1895). Waldsterben, a general decline of forest in Central Europe: Symptoms, development and possible causes. *Plant Disease* 69(7): 548-558.
- Seoáñez C. M. (2002), Tratado de la contaminación atmosférica: problemas, tratamiento y gestión, Mundi-Prensa Libros.
- Skärby L., Ro-Poulsen H., Florence A. M., Sheppard W. and Sheppard L. J. (1998). Impacts of ozone on forest: a European perspective. *New Phytology* 139: 109-122.
- Smith F. W., Long N. J. (2001). Age-related decline in forest growth: an emergent property. *Forest Ecology and Management* 144: 175-181.
- Smith W. H. (1990). Air pollution and forest: Interaction Between Air Contaminants and forest Ecosystems. Springer-Verlag, New York. Pp 93-97.
- Takemoto K. B., Bytnerowicz A., Fenn M. E. (2001). Current and future effects of ozone and atmospheric nitrogen deposition on California's mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management* 144: 159-173.
- Taylor G.E, D. W. Johnson and Ch. P. Andersen, (1994), Air pollution and forest ecosystems a regional to global perspective. *Ecological Application* 4(4) 662-689.
- Tingey, D. T., R. C. Fites, and C. Wickliff. (1976). Differential Foliar Sensitivity of Soybean cultivars to ozone Associate with differential enzyme Activities. *Physiol. Plant* 37: 69-72.
- Villaseñor G.E., (2011), Caracterización del gradiente altitudinal de ozono y su impacto en Bosques aledaños a la Ciudad de México, Tesis de Doctor en Ciencias, Colegio de Postgraduados, México.
- Waring, R.H. (1987). Characteristics of trees predisposed to die, stress causes distinctive changes in photosynthate allocation, *BioScience* 37 (8): 569-574.
- Webber J. A., Tingey D. T., Andersen C. P. (1994). Plant response to air pollution. In: *Plant – Environment Interactions* by Robert E. Wilkison. Dekker. E.U. pp. 357-389.
- Zhang J., Ferdinand J. A., Vanderheyden D. J., Skelly J. M., Innes J. L. (2001). Variation of gas exchange within native plant species of Switzerland and relationships with ozone injury: an open-top experiment. *Environmental Pollution* 113: 177-185.
- Zuccarini P., (2009). Tropospheric ozone as a fungal elicitor. Department of Crop Biology, – Section of Plant Physiology, University of Pisa, Pisa, Italy.

## 11 ANEXOS

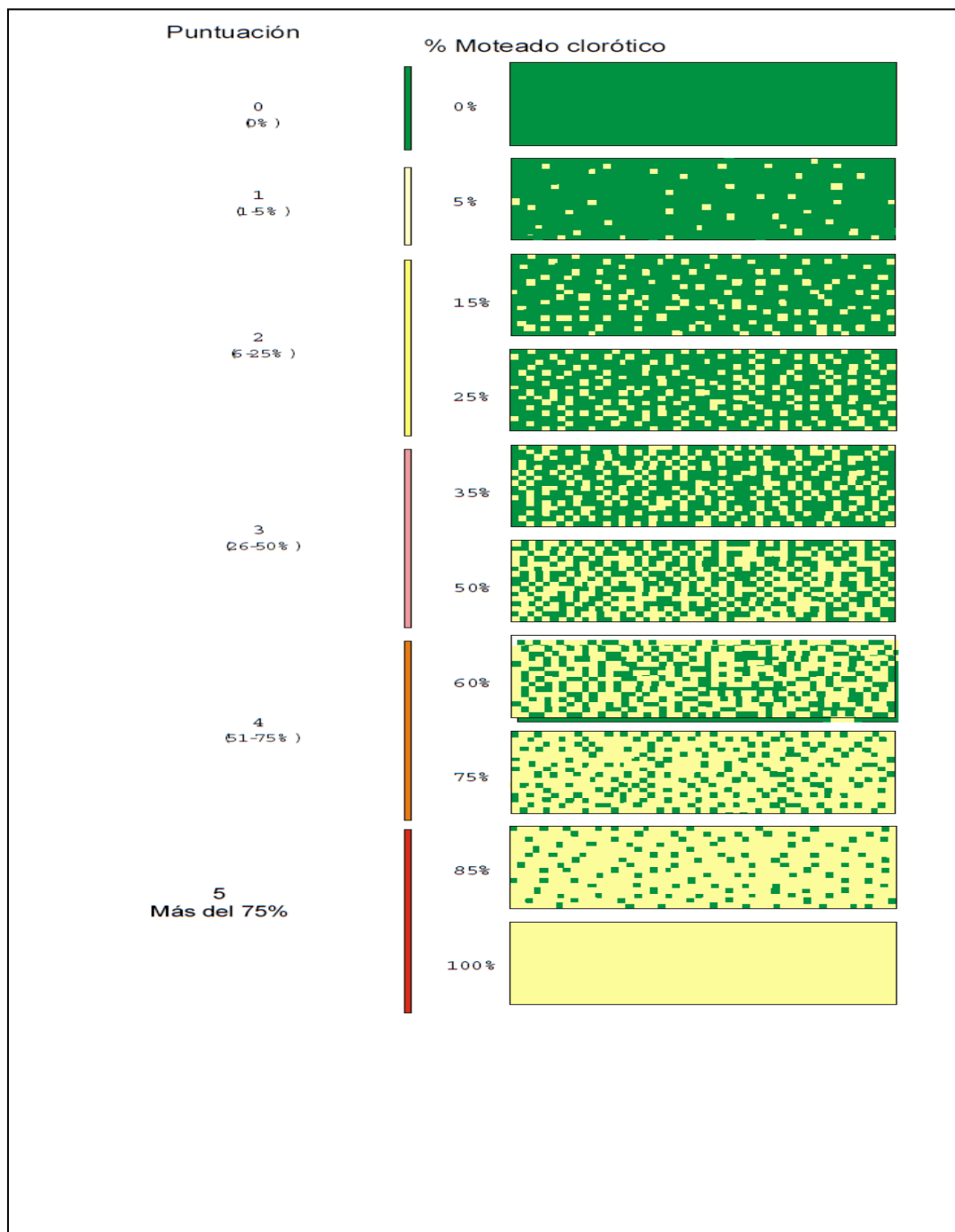
ANEXO 1: Caracterización Ecológica de las zonas de muestreo.

sitio N°	Localidad	coordenadas	fecha de muestreo
4	Izta-Popo	19°05'47"N 98°40'57"O	18-feb-11
5	Izta-Popo	19°05'01"N 98°40'53.32"O	04-mar-11
6	Zoquiapan (Huiluapan)	19°21'36"N 98°44'25" O	11-mar-11
7	Zoquiapan	19°21'29.24"N 98°44'25.79"O	01-abr-11
8	Zoquiapan (vuelta oscura)	19°21'27"N 98°44'24" O	08-nov-11
9	Izta-Popo (km 14)	19°05'01"N 98°40'51" O 98°44'20.70"O	22-nov-11

LOCALIDAD	Izta-Popo	Izta-Popo	Zoquiapan (Huiluapan)	Zoquiapan	Zoquiapan (vuelta oscura)
EXP.	CW (km16)	NW			
ALT(msnm)	3362	3322	3539	3524	3524
PENDIENTE		27°	17°	12°	40°
EROSION	moderada	ligera	ligera	nula	nula
VEGETACIÓN					
% DE COB.EST.	15	25	60%	65%	75%
ARBOREO	10	40	10%	10%	10%
ARBUSTIVO	75	35	30%	25%	15%
HERBACEO	10	25	5	0	5
DAÑO EN VEGETACION ARBOREA	Descortezado, tocones	plagado,lagrim eado ,derribado,toco nes, descortezado	podrido,plagado,derriva do, tocones.	resinado,tocones,derriva do.	ocoteado,quemado,tocon es, despuntados.
PRESENCIA DE INCENDIOS	ligero	nulo	nulo	nulo	ligero














REGENERACION NATURAL	nulo	Pino y oyamel	nulo	oyamel	nulo
PRESENCIA DE CONOS	nulo	regular	Nulo	Regular	Poco
<b>SUELO</b>					
COLOR	claro	marrón oscuro	marrón oscuro	negro	negro
CONDICION HÍDRICA	poco húmedo	húmedo	poco húmedo	húmedo	muy húmedo
GEOFORMA	ladera	cañada	ladera	ladera	cañada
MICRO RELIEVE	cañada	irregular	irregular	convexo	accidentado
ACT.ANT.	tala	reforestación con pino	pastoreo	Actividades Recreativas/saneamiento	saneamiento

ANEXO 2: Patrón estandarizado internacional por la Comisión Forestal Europea (RED CE NIVEL II).





ANEXO 3: Modelo elaborado por la SAHAR (1984) para evaluación de tipo de mortalidad y porciento de retención

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

S = SALUDABLE  
MP = MUERTO EN PIE

LABORATORIO DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA  
FES-ZARAGOZA UNAM

#### Anexo 4. Correlación de las variables para estado de salud de las copas de *Abies religiosa*

		ZONA1 O3 ESTADO	ZONA1 ESTADO	ZONA1 O3 SALUD	ZONA1 SALUD	ZONA1 O3 RETENCIÓN	ZONA1 RETENCIÓN	ZONA2 RETENCIÓN	ZONA2 O3 RETENCIÓN	ZONA2 O3 SALUD	ZONA2 SALUD	ZONA2 O3 ESTADO	ZONA2 ESTADO
ZONA1 O3 ESTADO	Correlation Coefficient	1.000	.287	-.137	.578	.091	.865**	.834*	.298	.700**	.083	-.089	.653**
	Sig. (2-tailed)	.	.391	.679	.075	.783	.009	.017	.351	.044	.791	.784	.049
	N	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
ZONA1 ESTADO	Correlation Coefficient	.287	1.000	.200	.391	-.100	.501	.344	.328	.652	-.138	.245	.308
	Sig. (2-tailed)	.391	.	.560	.247	.771	.145	.343	.324	.072	.674	.469	.372
	N	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
ZONA1 O3 SALUD	Correlation Coefficient	-.137	.200	1.000	.174	-.364	.229	.000	.458	.104	.220	.572**	-.246
	Sig. (2-tailed)	.679	.560	.	.550	.222	.428	1.000	.113	.740	.436	.048	.410
	N	8	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ZONA1 SALUD	Correlation Coefficient	.578	.391	.174	1.000	.000	.575**	.530	.274	.433	.184	.466	.177
	Sig. (2-tailed)	.075	.247	.550	.	1.000	.042	.070	.332	.159	.505	.099	.545
	N	8	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ZONA1 O3 RETENCIÓN	Correlation Coefficient	.091	-.100	-.364	.000	1.000	.038	.182	.286	.209	.111	-.258	.000
	Sig. (2-tailed)	.783	.771	.222	1.000	.	.881	.490	.263	.433	.658	.373	1.000
	N	8	8	10	10	12	12	12	12	12	12	10	10
Kendall's tau_b	Correlation Coefficient	.865**	.501	.229	.575**	.038	1.000	.912**	.168	.840**	-.036	.324	.465
	Sig. (2-tailed)	.009	.145	.428	.042	.881	.	.000	.506	.001	.884	.248	.109
	N	8	8	10	10	12	12	12	12	12	12	10	10
ZONA2 RETENCIÓN	Correlation Coefficient	.834*	.344	.000	.530	.182	.912**	1.000	.000	.868**	.030	.116	.625**
	Sig. (2-tailed)	.017	.343	1.000	.070	.490	.000	.	1.000	.000	.886	.689	.038
	N	8	8	10	10	12	12	16	16	16	16	10	10
ZONA2 O3 RETENCIÓN	Correlation Coefficient	.298	.328	.458	.274	.286	.168	.000	1.000	.243	-.193	.297	-.232
	Sig. (2-tailed)	.351	.324	.113	.332	.263	.506	1.000	.	.263	.363	.289	.423
	N	8	8	10	10	12	12	16	16	16	16	10	10
ZONA2 O3 SALUD	Correlation Coefficient	.700**	.652	.104	.433	.209	.840**	.868**	.243	1.000	-.081	.099	.566
	Sig. (2-tailed)	.044	.072	.740	.159	.433	.001	.000	.263	.	.693	.746	.074
	N	8	8	10	10	12	12	16	16	17	17	10	10
ZONA2 SALUD	Correlation Coefficient	.083	-.138	.220	.184	.111	-.036	.030	-.193	-.081	1.000	.104	.196
	Sig. (2-tailed)	.791	.674	.436	.505	.658	.884	.886	.363	.693	.	.705	.491
	N	8	8	10	10	12	12	16	16	17	17	10	10
ZONA2 O3 ESTADO	Correlation Coefficient	-.089	.245	.572**	.466	-.258	.324	.116	.297	.099	.104	1.000	-.232
	Sig. (2-tailed)	.784	.469	.048	.099	.373	.248	.689	.289	.746	.705	.	.423
	N	8	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ZONA2 ESTADO	Correlation Coefficient	.653**	.308	-.246	.177	.000	.465	.625**	-.232	.666	.196	-.232	1.000
	Sig. (2-tailed)	.049	.372	.410	.545	1.000	.109	.038	.423	.074	.491	.423	.
	N	8	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Zona 1 (Iztaccihuatl-Popocatepetl), Zona 2 (Zoquiapan).