



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
LABORATORIO DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA**

**Aplicación de la escala Red-II, daño por ozono: para la
evaluación del moteado clorótico en Pinus spp. en el
Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México, México.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

PRESENTA:

ERNESTO RUIZ VILLAVICENCIO

DIRECTOR: M. EN C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ

SEPTIEMBRE 2015



México, D. F.



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.

IN MEMORIAM

† Pedro Villavicencio Torres

Abuelo solo puedo decir que TE AMOOOO!!! Y aún Te Extraño ☹️

† Martha Ubaldo

Gracias porque a tu manera me demostraste tu cariño y cuidaste de mí 😊

† Guadalupe Ruiz

Abuelo aun no he tenido el placer de conocerte, pero de una u otra forma te

llevo conmigo, ya llegará el día en que podamos platicar 😊

†Max †Ottawa †Pipi

Gracias por cada día de alegrías, por cada ladrido, cada mordida, movimiento

de cola, cacerías y travesuras, los extraño muchísimo ☹️

DEDICADO A:

A mi mamá Carolina, por todo el amor que me has dado desde el primer día que llegue a este mundo, por tu apoyo incondicional, tus charlas sobre tus actividades del día, tu trabajo y hasta de las telenovelas jaja, te agradezco tantos momentos en los que con tus ocurrencias me has hecho reír, no hay duda que de ti saque lo extrovertido, gracias por tu esfuerzo diario, incluyendo tu labor en casa, por eso y mucho mucho más....Gracias Bondis, Te Amo Ma!!

A mi papá José, por todo el amor que me has dado y tu apoyo incondicional, se que te fue complicado al principio estar a mi lado, pero no cambio absolutamente nada de lo que he vivido a tu lado, gracias por todo tu esfuerzo para sacar a la familia adelante, gracias por las charlas sobre tu trabajo, sobre futbol y cualquier tema en general, muchas... Gracias Homer, Te Amo Pa!!

A mi hermana Carina por todo su cariño y apoyo, porque sin ella mi vida no estaría completa, porque además de ser mi hermana eres mi amiga y mi cómplice en algunas travesuras, aunque en algunas otras tu eres la victima de esas travesuras jaja...Gracias por aguantarme, Te Amo Patas!!

A mis abuelita María Luisa, gracias por todo su amor desde que nací, gracias por cuidarme todos esos años que viví contigo, por compartir sus experiencias, atesoro cada platica, La Amo abuela!!!

A toda la familia Villavicencio, en particular a mis tíos: Pedro, Luis, Gabriel, Hugo y a mi tía Esther por cuidarme en horribles años de cambiar pañales jaja, por todo su apoyo, por esas reuniones donde no paro de reír ☺ se que la mayoría de las palabras que se escuchan en esas reuniones son altisonantes, pero me encantan jaja.

A toda la familia Ruiz, en Particular a mis tíos: Francisco, Cirilo, Gregorio†, Cruz, Hermenegildo, Alfredo, Mauricio y a mi tía Silvia, por su cariño, su apoyo y aguantar todas mis travesuras ☺

A todos mis Primos, especialmente: Carlos, Alberto, Fernando, Hugo y Linnette, por todo su cariño y apoyo, por su compañía, por vivir y compartir tantas aventuras conmigo (aún nos faltan muchas más), saben que los Quiero Muchísimo SPR's!!!

A Mayra por tu amistad, cariño, apoyo incondicional, compañía, paciencia y sobre todo tu Amor!!, gracias por compartir tantos momentos conmigo, por tus risas, travesuras y ocurrencias
TE AMOOO MAY!! 😊

A la Pandilla: Allan (abuelo), Alberto (Rastek), Misael (Mifu) y Jorge (Coco), gracias por tantas aventuras y locuras juntos, gracias por su amistad, por los “tonys” 😊, gracias porque aunque no llevemos la misma sangre... Son Mis Hermanos.

A Mis cachorras: Sora alias “Zorrita o Gordelia”, a Mina alias “Minita wey” y a Kira alias “Kiritas”, porque sin importar lo terrible que fuese mi día, ustedes siempre me dibujan una sonrisa al llegar a casa!! 😊

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México que desde que ingrese a la preparatoria ha sido mi segunda casa, por brindarme tantos conocimientos, permitirme conocer a personas y vivir experiencias inolvidables.

Al M. en C. Germán Calva Vásquez por abrirme las puertas de su laboratorio, por el apoyo y confianza para realizar este proyecto, por las charlas, por compartir la mesa conmigo, por sus consejos, su amistad, sin duda alguna un excelente profesor y un magnifico amigo. De todo corazón Gracias Jefe!!! 😊

A la M. en C. María Beatriz Martínez Rosales por su apoyo a todo lo largo de mi carrera en la Facultad.

Al Dr. Ricardo Torres Jardón por su apoyo y colaboración para el enriquecimiento de este proyecto, y por abrirme las puertas en su equipo de trabajo para realizar mi servicio social.

A mis sinodales: M. en C. Armando Cervantes Sandoval, Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes, Dra. Esther Matiana García Amador y Biól. Aida Zapata Cruz Aida por el gran aporte para el enriquecimiento de este proyecto.

A mis queridos amigos y hermanos de laboratorio de Contaminación Atmosférica: Elias (gordo), Anayeli (Churpi), Yareli (Morro), Veronica (Jefa) e Ivonne. Gracias por el apoyo en las salidas de campo, los buenos momentos, las risas y hacer del laboratorio un excelente lugar de trabajo, sin duda alguna los voy a extrañar!! 100% CHURPIOS. 😊

A mis compañeros de carrera: Mario, Victor, Norma, Lisset, Fernando (Monsieur), Rulo, Laura, Mike, Karlita, Iguano, Francisco (Pacha), seguramente olvido mencionar a varios, pero a todos, muchas Gracias!!

Y a mi amiga Berenice que es estos últimos meses se ha ganado mi cariño y admiración, Gracias por las charlas carnala!!!

Y a todas las personas que forman o formaron parte de mi vida, ya que gracias a ell@s soy el ser humano de hoy en día.

ÍNDICE TEMÁTICO

RESUMEN.....	XII
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	4
3. Planteamiento del problema.....	13
4. Justificación.....	17
5. OBJETIVOS.....	21
5.1. Objetivo General.....	21
5.2. Objetivos Particulares.....	21
6. Hipótesis.....	22
7. Marco Teórico.....	23
7.1 Concentraciones y daños.....	23
7.2 Programas enfocados en la mejora de la calidad del aire de la ZMVM.....	26
7.3 Daño por Ozono troposférico en las plantas (moteado clorótico).....	29
7.4 Indicadores de Calidad Ambiental.....	33
7.5 Escala RED CE NIVEL-II (índice de porcentaje de ozono y moteado clorótico).....	34
8. Área de estudio.....	37
8.1 Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl (PNIP).....	38
8.1.1. Localización.....	38
8.1.2. Fisiografía.....	39
8.1.3. Ozono a nivel suelo.....	39
8.1.4. Hidrología.....	40
8.1.5. Clima.....	40
8.1.6. Fauna.....	41
8.1.7. Vegetación.....	42
8.2 Bosque Templado.....	43
8.3 Bosque de Pino.....	44
8.3.1 Genero <i>Pinus</i> spp.....	45

8.3.2 Ciclo de vida.....	46
8.3.3 Estructuras Reproductivas.....	47
8.3.4 Distribución.....	47
9. Material y Método.....	48
9.1. Muestreo en Campo.....	48
9. 2. Trabajo de Laboratorio.....	50
9.2.1. Evaluación del daño foliar por O ₃ en <i>Pinus</i> spp.....	50
10. Resultados y Discusión.....	52
10.1. Registro del daño por ozono con escala RED CE II.....	52
10.2. Relación del daño por ozono respecto a los períodos de muestreo.....	57
10.2.1. Periodo Húmedo (Paso de Cortes).....	58
10.2.2. Periodo Seco (San Rafael).....	58
10.3. Validez estadística del daño por ozono con escala RED CE II	60
11. CONCLUSIONES.....	68
12. RECOMENDACIONES.....	70
13. BIBLIOGRAFÍA.....	71
14. ANEXOS.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escala de moteado clorótico por ozono.....	3
Figura 2. Mapa de vientos dominantes en la Cuenca del Valle de México.....	8
Figura 3. Comportamiento de ozono en la ZMVM 1990-2003.....	10
Figura 4. Modelación de concentración de ozono con programa PROAIRE.....	11
Figura 5. Concentraciones de ozono estación meteorológica CCA-UNAM.....	12
Figura 6. Modelo global concentraciones de ozono troposférico 2014.....	13
Figura 7. Modelo de concentraciones para ozono en la ZMVM 2011.....	15
Figura 8. Diagrama daño por ozono en la vegetación.....	17
Figura 9. Concentraciones de ozono en la ZMVM 1990-2008.....	18
Figura 10. Ubicación geográfica de las principales industrias en la ZMVM.....	23
Figura 11. Contaminación atmosférica de la Ciudad de México.....	25
Figura 12. Ciclo simplificado del ozono y procesos relacionados.....	25
Figura 13. Esquema de la depositación de ozono en <i>Pinus spp</i>	30
Figura 14. Respuesta estomática de las acículas frente al ozono.....	31
Figura 15. Moteado clorótico en acículas de pino.....	32
Figura 16. Modelación de concentraciones (ppb) de O ₃ troposférico año 2030.....	35
Figura 17. Ubicación de los parajes Paso de Cortes y San Rafael.....	37
Figura 18. Mapa del Parque Nacional Izta-Popo, Zoquiapan.....	38
Figura 19. Fauna del Parque Nacional Izta-Popo.....	41
Figura 20. Mapa de distribución del bosque templado en México.....	44
Figura 21. Franjas ecológicas y vegetación característica del P.N. Izta-Popo.....	45
Figura 22. Esquema de acícula de pino.....	46
Figura 23. Ciclo de vida de <i>Pinus spp</i>	46
Figura 24. Recolección de acículas de <i>Pinus spp</i> . en campo.....	48
Figura 25. Observación en campo del moteado clorótico.....	49
Figura 26. Evaluación daño por ozono con escala Red-II.....	50
Figura 27. Moteado clorótico presente en <i>Pinus spp</i> . del PNIP.....	51
Figura 28. Daño por ozono en <i>Pinus spp</i> . en el PNIP 2013.....	53
Figura 29. Concentraciones de ozono estación meteorológica UAM-Xochimilco.....	56

Figura 30. Daño por ozono presente en las acículas de <i>Pinus spp</i>	57
Figura 31. Daño por ozono en el Paraje Paso de Cortes 2012.....	60
Figura 32. Daño por ozono en el Paraje San Rafael 2013.....	62
Figura 33. Diagrama de agrupación por número y porcentaje de la Escala Red-II.....	65
Figura 34. Registro de la dispersión de los datos periodo vs. Porcentaje de daño.....	67

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Concentraciones de ozono y sus precursores en la ZMVM de 1999.....9

Cuadro 2. Tipos de vegetación en el Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan.....43

RESUMEN

El ozono troposférico genera daños en la vegetación, depositándose de manera visual en las acículas de los pinos, propiciando senescencia prematura, inhibición de procesos biológicos y/o necrosis foliar. El género *Pinus spp.* Presente en el Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México es considerado sensible al depósito de ozono.

Se registró el daño visible en las acículas de *Pinus spp.* provocado por el ozono troposférico en dos parajes del Parque Nacional Izta-Popo Estado de México. El método visual aplicado fue la Escala RED-II que registra el daño por ozono con una escala de puntuación (amarillamiento) y el estado de salud del bosque de coníferas, dicha escala fue desarrollada por la Comisión Europea del Ambiente. Los parajes Paso de Cortes (abril 2012) y San Rafael (septiembre 2013) se eligieron por estar en la circulación de vientos Norte-Noroeste de la Cuenca del Valle de México, y por el gradiente altitudinal en la cual el género *Pinus* se distribuye.

Los datos se ordenaron y se clasificaron de acuerdo al paraje y periodo (húmedo y seco). La elección del árbol fue al azar y a partir del primero se aplicó en método del vecino más cercano. El muestreo de acículas de *Pinus spp.* fue aleatorio de acuerdo a lo descrito en el “Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of The Effects of Air Pollution on Forests” part VIII: Assessment of Ozone Injury”.

Las variables consideradas para el estudio fueron las propuestas por la Escala Red-II: Puntuación y Porcentaje del moteado clorótico. La validación estadística y las gráficas fueron realizadas en los paquetes estadísticos Statical Package Social Science (SPSS V.15.0.1). y Statgraphics Centurion XVI.I.

Los análisis realizados indican una mayor depositación de ozono troposférico en las acículas de *Pinus spp.* en el periodo seco. El 45.7% de las acículas presentó un daño “Puntuación 5” de acuerdo a la Escala Red-II, lo que corresponde a un daño entre el 85 y 100% en las acículas recolectadas. Esto en comparación con el periodo húmedo el cual registro un 36% de daño “Puntuación 1” el cual corresponde a un 5% de daño en las acículas. Se Demuestra que *Pinus spp.* presenta una sensibilidad a la actividad fotoquímica del ozono troposférico, generando mayor decline forestal, afectando al bosque templado del Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México. Por lo que la

Escala Red-II propuesta por la Comisión Europea del Ambiente probó ser una herramienta, practica, económica y confiable para establecer una evaluación sobre el estado salud de copa de *Pinus spp.* y determinar el grado de daño por ozono troposférico, proponiendo al género *Pinus* como una especie bioindicadora de salud ambiental.

1. Introducción

El ozono troposférico (O_3) que participa en la contaminación atmosférica está considerado en la actualidad como el oxidante más reactivo y fitotóxico, debido a su amplia distribución geográfica y a los efectos dañinos a la salud humana (concentraciones dañinas incluso por debajo de las 0.05 ppm); especialmente el daño a la vegetación, al funcionamiento de ecosistemas y pérdida de la biodiversidad.

A partir de los años 50's del siglo pasado se han realizado estudios por investigadores respecto a los indicios de las altas concentraciones de ozono dentro de los que destacan *González & Medina (2010)*, *Bravo & Torres (2002)*, *Jáuregui (1993)*, *Miller et al. (1989)*, *Tejeda & De Bauer (1984)*, *Jacobson & Hill (1970)*, *Critchfield & Little (1966)* y *Middleton et al. (1950)*, algunos han estudiado la química atmosférica de la ciudad de México y otros el deterioro de los bosques, los síntomas más aparentes son el desarrollo anormal de procesos de clorosis en las hojas, reducción en el crecimiento de los árboles y debilitamiento progresivo de las masas forestales, sintomatología que aumenta o disminuye debido a la sensibilidad de cada especie [Miller & Millecan (1971); Miller (1983)].

Dos aspectos relevantes son: la detección y efecto del daño en los bosques, ya que en la actualidad se han desarrollado equipos electrónicos como el "Airpointer" (RECORDUM, 2015) (ANEXO I), el cual evalúa la concentración de Ozono útil para usar en las ciudades, determinan su concentración *in situ* y analizan si las concentraciones de ozono se encuentran dentro de los límites Normativos de la zona de estudio, siendo que la mayoría de los países contemplan un límite de 0.075 ppm determinado por la EPA (2008).

A pesar del avance tecnológico, actualmente no existe un equipo suficientemente capaz de realizar la evaluación del daño que se presenta en la vegetación, para tales casos, existen índices internacionales (Planeta Viviente (Living Planet Index), la Huella Ecológica (Ecological Footprint) y el Índice de Sustentabilidad Ambiental (Environmental Sustainability Index) (Recuadro *Índices de sustentabilidad ambiental.*), los cuales establecen los niveles de daños presentes en la vegetación, y cuantifican los daños de acuerdo a intervalos de medición. Las afectaciones se presentan de manera visual en la vegetación, tal es el caso de la decoloración de las hojas mejor conocida como clorosis o moteado clorótico.

Uno de estos índices internacionales que existen en la actualidad es la “Escala RED-II”, la cual se desarrollo la Comisión Europea del Ambiente desde el 2010 y se utiliza para determinar el daño por Ozono que se presenta en la vegetación en los bosques y se cubran zonas con gran amplitud.

La Escala “Red-II” (figura 1) tiene como base el porcentaje del moteado clorótico registrado en las especies vegetales como encinos, abetos, cedros y pinos de Europa, que presentan un grado de puntuación por amarillamiento particular del moteado clorótico, lo anterior como resultado de la absorción a los altos niveles de Ozono en la atmósfera a través de los estomas de las hojas.

En base a patrones de coloración el rango de porcentaje establecido en la escala internacional RED-II, oscila entre el 0% y el 100%; asignando el 0% a una hoja con coloración totalmente verde, sin ningún tipo puntuación por Ozono (organismo sano), por otra parte el 100% se le ataño a un tejido vegetal completamente carente de vida, con una coloración amarillenta o café rojizo en su totalidad.

Derivan dos aspectos relevantes de las escalas de daño por ozono. El principal es que se pueden cubrir grandes áreas del bosque y la segunda, que los sensores electrónicos representan altos costos para un país como lo es México, que solo invierte un 0.08% del producto interno bruto (BIP) en investigación, por lo que los programas ambientales de conservación no reciben el apoyo económico necesario.

□

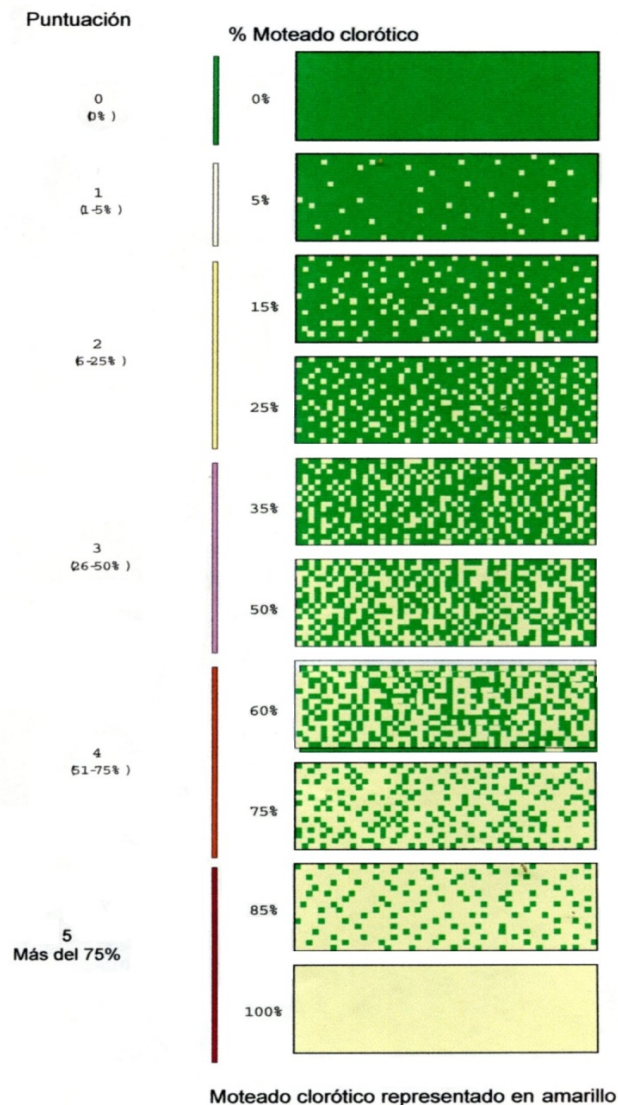


Figura 1. Escala De Moteado Clorótico por Ozono. UNECE. 2010.

2. Antecedentes

La existencia del ozono troposférico se registró en los años 40's gracias al científico alemán Schönbein, a partir de ahí comenzaron a realizarse estudios sobre el comportamiento del gas y sus efectos en el planeta.

Middleton *et al.*(1950) observó, determinó y documentó por primera vez los daños producidos en la vegetación por ozono en Los Ángeles California. Concluyendo que el daño por ozono se expresa a través del moteado clorótico en las hojas de *Pinus spp.*, el cual se manifiesta con la aparición de manchas amarillas-anaranjadas en las acículas jóvenes de los pinos.

Para 1958 Richards citado por Percy *et al.* (2003) demostró que el Ozono era el constituyente del smog que causaba el daño foliar en las uvas de California. Por otra parte Heggstad y Middleton en 1959 citados por Percy *et al.* (2003) reportan un daño extensivo en los cultivos en el este de los Estados Unidos.

De acuerdo con la Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2015), en México existen 91 especies descritas del genero *Pinus*. El género *Pinus* posee una distribución geográfica restringida al territorio nacional. Sin embargo constituyen elementos dominantes o codominantes en la vegetación actual.

Miller *et al.*, (1969), Jacobson y Hill (1970) Reportan que en los bosques de Estados Unidos se ha comprobado que las concentraciones ambientales entre 0.15 a 0.30 ppm de ozono son responsables del moteado clorótico, desarrollándose desde el ápice hasta la base de las acículas en algunas especies de pino en el sur de California.

De acuerdo con Flores *et al.* (1971), el conjunto de los bosques de coníferas ocupa cerca del 15% del territorio del país, más de 9/10 de esta superficie corresponde a los de *Pinus* y *Quercus*.

De Bauer *et al.* (2006) reporta un análisis en el año de 1976, sobre el impacto de la contaminación del aire en bosques en la parte Central de México, la cual contempla diferentes efectos. Uno de estos efectos dramáticos es la presencia de ozono ya que induce los síntomas por daño foliar en muchos bosques y plantas nativas de la región, provocando decline y muerte en árboles de oyamel, por exposición a elevados niveles de ozono y los largos periodos de exposición al contaminante.

Hernández y De Bauer reportan en el año de 1984 que en la Ciudad de México, particularmente en el área del Ajusco, se observa la presencia de moteado clorótico en especies arbóreas, incluidas los pinos, viéndose afectados por altas concentraciones de ozono presentes en el ambiente.

De acuerdo con Volz *et al.* (1988), Marengo *et al.* (1994) citados por Sandermann (2000) las concentraciones de ozono troposférico ha aumentado de dos a cinco veces desde el siglo pasado,

con lo que se excede enormemente el alrededor del 25% de aumento de dióxido de carbono troposférico durante ese periodo de tiempo, contribuyendo más al aumento de la actividad fotoquímica del ozono considerado por Guderian *et al.* (1985) y Miller *et al.* (1989) como el agente más fitotóxico dentro del grupo de contaminantes aéreos.

Sánchez *et al.* (1992) y González *et al.* (2010) Explican que de manera sistemática el ozono entra en las hojas por medio de los estomas destruyendo la clorofila, permitiendo la acumulación inusual de almidones, que suelen atraer insectos defoliadores como *Zadiprion falsus*, causando defoliación recurrente y senescencia prematura.

De acuerdo con Sánchez *et al.* (1992), la pérdida progresiva de vigor en las acículas de pinos en España y Grecia se debe a la exposición de ozono a concentraciones superiores a las establecidas por la EPA (2008), la cual establece un nivel máximo de 0.075 ppm. Lo anterior previo a la aparición de daño severo el follaje y alteración en su productividad.

Garfias y González (1992) presentan estándares de calidad de aire para la ciudad de México en base a redes de monitoreo en la ciudad, obteniendo el análisis de gases como: CO, SO₂, Hidrocarburos, NO₂ y O₃ colocando a este último con un promedio anual en 0.11 ppm, por arriba de las concentraciones promedio de los Estados Unidos, las cuales oscilan en 0.08 ppm (EPA, 2015).

Alvarado et al. (1993) reporta daños en hojas de *Abies religiosa*, indicando la presencia del daño tanto en hojas jóvenes como adultas, daños que se expresan en lesiones en color marrón-rojizas, lesiones que predisponen la clorosis, senectud y necrosis en el árbol y son provocadas por ozono.

En el año de 1993 el Diario Oficial de la Federación establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-020-SSA-1993). *“Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono (O₃). Valor normado para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población”*. La cual establece un límite máximo de 0.11 ppm el cual no debe ser rebasado una sola hora al día o una vez al año (DOF, 1993).

Jáuregui en 1993 reporta que los síntomas de daño por ozono presente en las especies arbóreas de la ZMVM están afectadas por el patrón de vientos que circulan de norte a sur y de este a oeste en el Valle de México (figura 6), ya que el ozono y sus precursores pueden alcanzar distancias considerables dependiendo la velocidad de los vientos.

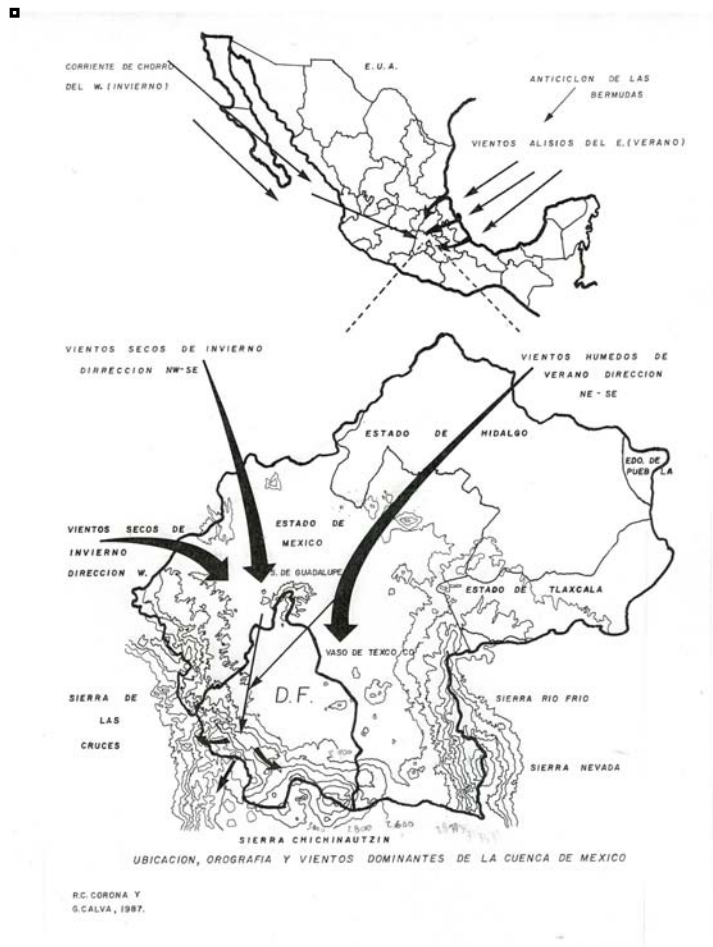


Figura 2. Mapa de vientos dominantes en la Cuenca del Valle de México.
Tomado de Corona y Calva 1987

Alvarado & Hernández en el 2002, determinaron la relación entre el daño por ozono y parásitos (insectos y plantas), en el P.N. desierto de los Leones, aun cuando no se he reportado para el PNIP, lo que da lugar a un mayor decline forestal.

Grajales reporta en el año 2002 que las concentraciones de ozono aumentan en épocas de gran insolación con bajo régimen de vientos, temperatura, humedad atmosférica, concentración de gases e inyección de nuevas emisiones atmosféricas.

En el año 2002 Bravo & Torres reportan que las concentraciones de ozono en la ciudad de México eran superadas entre 4 y 5 veces al día en un lapso de 300 días al año, llegando a presentarse incluso concentraciones de hasta 0.46 ppm en el Parque Desierto de los Leones de acuerdo a la USDA-Forest Service en 1998. Dichas concentraciones sobrepasan en gran medida el límite de la (NOM-020-SSA-1993) estableciendo su límite máximo como 0.11 ppm, el cual teóricamente no debía ser excedida en el año.

Para el año 2006 el ozono históricamente presente en la ZMVM, comienza una tendencia aparentemente descendente, esto en los periodos de los años 90's y hasta 2005, periodo en el cual el ozono demuestra niveles máximos en 1991 y 1992, oscilando entre 0.30 a 0.34 ppm (promedio horario) y manteniéndose entre 0.25 y 0.27 ppm (promedio horario) de 1993 a 1996.

Esto lo confirma Gaffney *et al.* (1999) (Cuadro 1), manteniéndose la concentración de ozono por debajo de los 0.3 ppm. Sin embargo para 2011 y de acuerdo con la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) establece un promedio de 0.33 ppm para la misma zona (cuadro 1).

Cuadro 1. Concentraciones de Ozono y sus precursores en la ZMVM de 1999. Gaffney *et al.* 1999.

Pollutant	Concentration	Metric tons per day	Mega-tons per year
NO _y	50 ppb	710	0.26
Ozone	200 ppb	3000	1.1
PAN	20 ppb	750	0.27

Sin embargo es importante señalar que incluso los niveles alcanzados entre 1993 y 1996 eran superiores a los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-020-SSA1-1993), los cuales oscilaban entre 0.08 y 0.11 ppm (promedio horario), de acuerdo con los valores obtenidos a través de los promedios de las treinta concentraciones máximas anuales (RAMA, 1996) (figura 7).

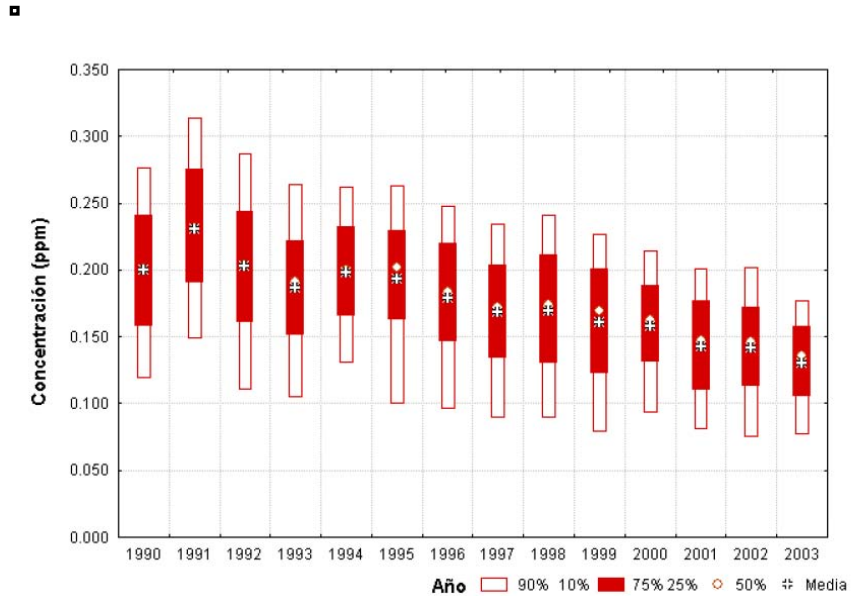


Figura 3. Comportamiento de Ozono en la ZMVM 1990-2003. SMA-GDF ,2006.

En el año 2008 y de acuerdo con el Programa PROAIRE, en la figura 8 se puede observar las concentraciones de ozono para la ZMVM las cuales oscilan entre 0.123 y 0.185 ppm observando un nivel superior a lo permitido por la (NOM-020-SSA1-1993), aún a pesar de la implementación de diversos programas para disminuir los niveles de O₃ en el ambiente.

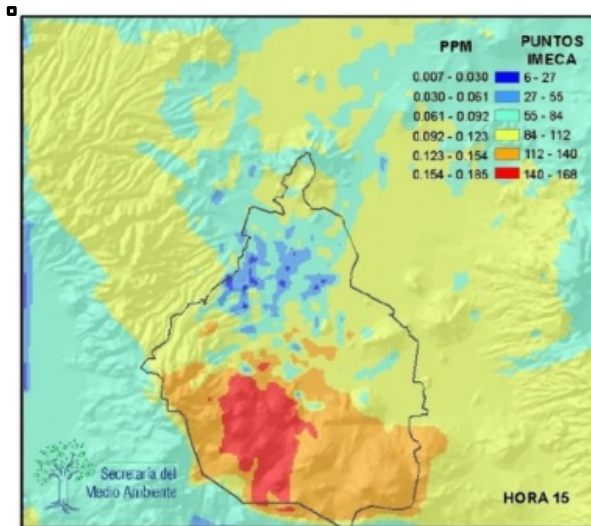


Figura 4. Modelación de concentración de Ozono con Programa PROAIRE 2008. UAM Azcapotzalco.

Percy en el año 2003 establece el aumento del daño durante la depositación seca, periodo en el que el ozono por acción calorífica presenta un mayor grado de actividad.

En el año 2014 la (NOM-020-SSA1-1993) sufre una modificación y se da por anulada, entrando en vigor en ese mismo año la (NOM-020-SSA1-2014) "Salud ambiental. Valor limite permisible para la concentración de ozono (O_3) en el aire ambiente para su evaluación", de carácter obligatorio en todo el territorio nacional. Teniendo como valor máximo 0.095 ppm, valor que no debería ser rebasado (DOF, 2014).

Hasta el mes de julio de 2015 y a pesar de las modificaciones legales, se continúan presentando niveles por arriba del límite permisible de la (NOM-020-SSA1-2014) registrando niveles de ozono de 0.105 ppm. (figura 9), los niveles son más altos a los recomendados por la Organización de la Salud, la cual refiere que incluso a concentraciones menores de 0.05 ppm se puede presentar un daño a la salud.

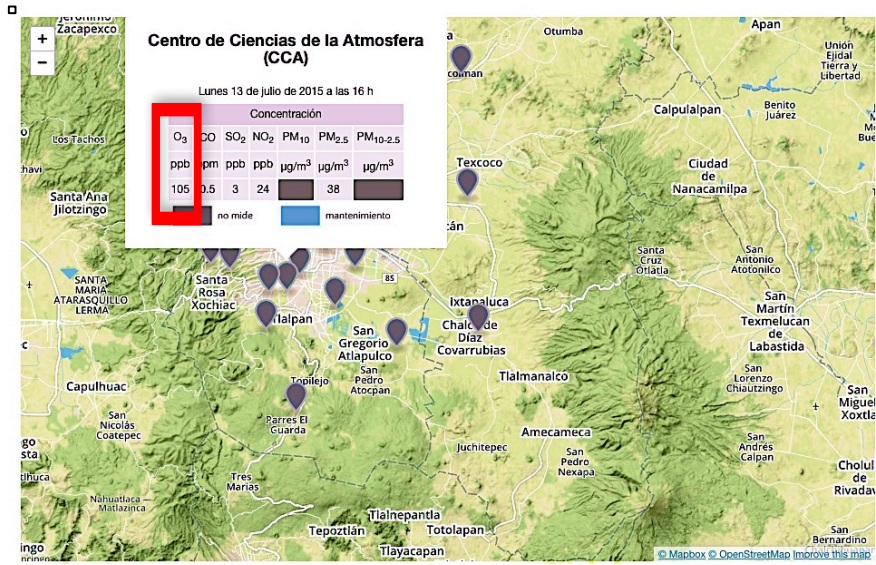


Figura 5. Concentración de ozono estación meteorológica CCA-UNAM. Sistema de Monitoreo de la Ciudad de México .2015 <http://www.aire.df.gob.mx>

3. Planteamiento del Problema

La troposfera como parte de la atmosfera se extiende desde la superficie hasta una altura de 10 km, es aquí donde se da la mayor parte de la vida en el planeta tierra y es en esta misma capa donde se presenta una alta generación de Ozono troposférico, el cual es considerado un gas dañino para los seres vivos, el ozono troposférico se produce mediante reacciones químicas entre compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO) en presencia de radiación solar Zuk *et al.* (2007), los valores a nivel mundial de acuerdo con la NASA, oscilan entre 25 ppb y 35 ppb. (0.2 y 0.35 ppm) (figura 2).

Estos compuestos se conocen como los precursores de la formación de ozono. Los NOx son principalmente emitidos por la industria y los vehículos automotores, por otra parte la fuente primordial de la producción de CO es el Metano (CH4), mientras que los COV son generados por quema de combustibles, madera y gas natural.

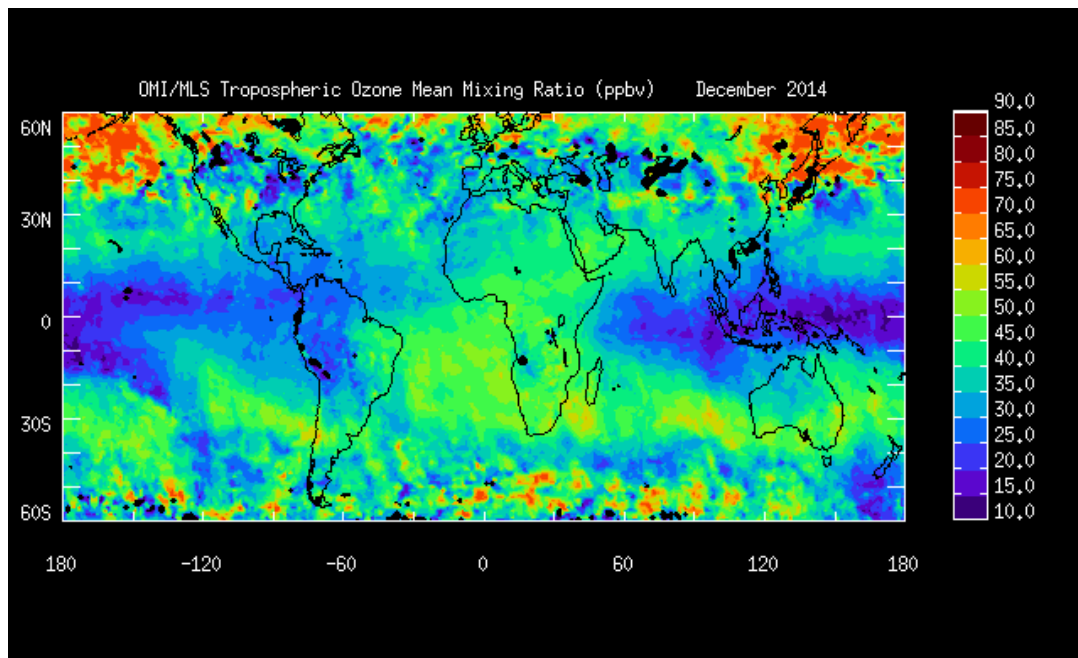


Figura 6. Modelo global de ozono troposférico diciembre 2014, NASA, USA. <http://acd-ext.gsfc.nasa.gov>.

Los niveles de ozono registrados en cierta localidad están determinados por: transporte y depósito. Debido al equilibrio dinámico en su formación los factores fotoquímicos, meteorológicos y la cubierta vegetal del suelo son determinantes en su síntesis.

El transporte, depósito y las concentraciones heterogéneas del Ozono está establecido principalmente por los procesos meteorológicos que están asociados a un relieve complejo, primordialmente por el régimen de vientos de ladera y valle.

En la actualidad la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) como uno de los complejos urbanos más grandes en el mundo, está afectado continuamente por problemas de contaminación del aire incluido el ozono (figura 3) y otros más contaminantes. Esta se genera debido a múltiples fuentes; el O_3 como gas dañino presente continuamente en ZMVM en niveles superiores a 300 ppb considerados altos según la EPA (2008), en particular durante los meses de invierno a finales de febrero y marzo.

Para que se generen estos niveles de ozono, se requieren hidrocarburos reactivos; así como los niveles elevados de emisiones de óxido de nitrógeno al producir el OH y radicales peróxido que son claves para la formación de ozono urbano (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

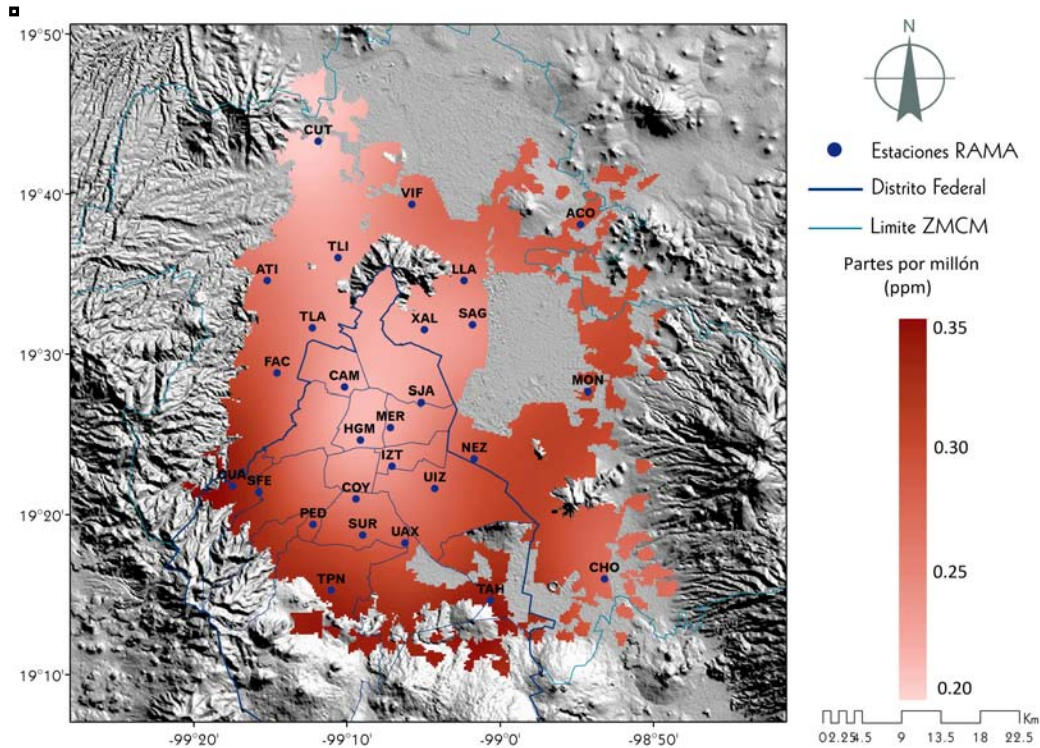


Figura 7. Modelo de concentración para Ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México. RAMA 2011.

El transporte de ozono propicia un registro más elevado en las zonas más altas en la ciudad, dirigiéndose principalmente a la zona sur de la ciudad, (Jáuregui, 1989; Bravo & Torres, 2002), a través del flujo de aire el ozono se traslada hasta la zona elevada del Parque Nacional Ixta-Popo, para posteriormente depositarse en la vegetación y suelo, dañando la salud del bosque.

A pesar del avance tecnológico, el registro de la concentración de contaminantes dentro de un área forestal tiene un alto grado de dificultad, debido a que los equipos automáticos requieren una alta inversión económica rebasando incluso un millón de pesos mexicanos, requerir más aditamentos como son: adquisición y certificación del software, calibración con ayuda de gases específicos, reparación o compra de piezas en caso de descompostura, la fragilidad de los mismos,

las dificultades que genera el mover los equipos a zonas de difícil acceso, así como el monitoreo periódico en campo para evitar alguna falla.

Además de únicamente registrar las concentraciones del ambiente y no las que se depositan en la vegetación para el caso específico del ozono, dada la experiencia europea de esta situación y ante las dificultades económicas del México y el uso de un alto recurso humano y materiales para el estudio a realizar. Por lo anterior es necesario aplicar un método analítico en los bosques de México, para lo cual se debe contar con un indicador de daño en la vegetación de carácter internacional, ante ello se procedió a la aplicación de la escala internacional RED-II.

4. Justificación

El ozono troposférico presente en la atmósfera, se encuentra en zonas montañosas a través de la depositación, genera daño en la vegetación de los árboles reduciendo el proceso de fotosíntesis en las acículas de los pinos Bonneau *et al.* (1989), afectaciones en la reproducción, metabolismo, propiciando el aumentando de mortalidad en estos organismos (figura 4). En los últimos años está considerado como el contaminante más relevante para los cultivos y vegetación natural de los bosques (González, 2009; Krupa, 2000) actuando como principal agente del decline forestal.

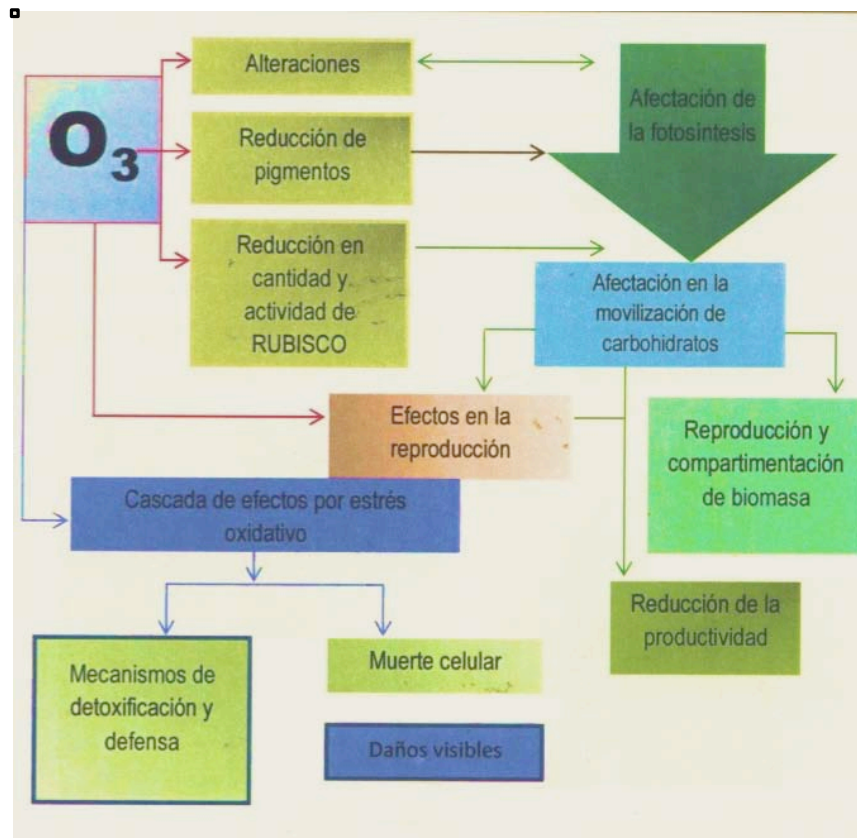


Figura 8. Diagrama daño por ozono en la vegetación. Tomado de Martínez 2012.

Las alteraciones en el ozono troposférico se vinculan con el cambio climático y la calidad del aire. Se ha demostrado la correlación entre el aumento del ozono respecto a la temperatura, las condiciones anormales que se generan a partir de la correlación provocan un cambio en el

microclima, generando estrés en la vegetación, provocando pérdida de humedad del suelo, del ambiente y temperaturas más altas (Grajales, 2002). Lo anterior demuestra una reducción del área foliar, el cual se considera un mecanismo adaptativo por déficit hídrico, implicando disminución de la tasa de transpiración. Los aportes ácidos afectan en primer lugar a las hojas, incluso puede modificar la permeabilidad al agua y a los iones de una acícula ya formada.

Existen numerosos reportes del aumento de la contaminación desde mediados de 1980, época en que inician los primeros estudios sobre la extensa mortalidad de las masas boscosas en el Parque Nacional Desierto de los Leones en la Ciudad de México.

En la figura 5 se puede observar la aparente disminución de concentraciones de contaminantes atmosféricos de 1996 a 2008 CENICA (1996) (ANEXO III), desafortunadamente en los bosques naturales existe poca información entre el nivel de exposición al ozono y el daño en el arbolado por la dificultad de estimar su concentración altamente variable y de gran extensión (González-Medina 2010).



Figura 9. Concentraciones de Ozono en la ZMVM 1990-2008. Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008 (ANEXO III).

El Parque Nacional Izta-Popo se encuentra a 130 kilómetros de la Ciudad de México, dada esta cercanía y asociado con los vientos dominantes de la región, el Parque Nacional presenta un deterioro en su vegetación, principalmente en el género *Pinus spp.*, primordialmente por bioacumulación de Ozono en el parque y la sensibilidad arbórea que posee la especie.

El análisis de moteado clorótico en las hojas de los pinos puede establecer un índice de salud en la vegetación tanto en campo como en laboratorio, ya que hasta ahora los experimentos se han concentrado en explicar los mecanismos que conducen a la lesión observada en estudios experimentales; falta caracterizar y analizar los síntomas observados en el campo en una escala regional. En México existen 323,305 km² de Bosques Templados los cuales tienen condiciones de temperatura, precipitación y radiación específicas y por ello, se debería monitorear y diagnosticar los daños a la vegetación.

El estudio permitirá estimar el riesgo potencial para los ecosistemas de México que se encuentran expuestos a elevadas concentraciones de ozono ambiental, ampliando información previa de los Bosques afectados y permitirá establecer nuevas estrategias para el mejoramiento en la salud de la vegetación, logrando un mayor amortiguamiento respecto a los niveles de contaminantes atmosféricos, los daños provocados a la vegetación y pérdida de biomasa forestal.

La plantilla de registro por ozono propuesta por la Comisión Europea del Ambiente, será útil para observar y registrar el daño presente en acículas de *Pinus spp.* con dichos registros se podrá indagar sobre el probable daño que existe en los arboles. Sin embargo es de suma importancia tener en cuenta que la escala propuesta por la Comisión Europea del Ambiente se elaboró de acuerdo a las concentraciones presentes en Europa, las cuales no rebasan las 0.1 ppm, mientras

que en México las concentraciones de ozono registradas llegan alcanzar hasta las 0.35 ppm, este factor podría generar que la escala no sea 100% adecuada para México debido a los diferentes niveles de exposición a los que se enfrenta *Pinus spp.* de México comparado con los Pinos de Europa.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Evaluación del daño por moteado clorótico por ozono troposférico, con la Escala Internacional Red-II emitida por la Comisión Europea del Ambiente en hojas de *Pinus spp.*, en el Parque Nacional Izta-Popo.

5.2 Objetivos particulares

- Registrar el daño por ozono utilizando el patrón y porcentaje para determinar el daño en copa de *Pinus spp.*

- Establecer relación entre el daño por O₃ en las acículas con respecto a los periodos húmedo-seco y el depósito atmosférico en las hojas, en base al daño en copa de *Pinus spp.*

- Realizar la validez estadística de la Escala RED-II.

6. Hipótesis

En la actualidad la recuperación de los bosques templados hablando en costos económicos, oscilan entre 400 mil a un millón de pesos mexicanos por hectárea (PRONATURA, 2015). Por ello es necesario encontrar nuevos, efectivos y económicos métodos de estudio, para lograr la recuperación de áreas perdidas. Ante estos eventos se han comenzado a utilizar plantas como agentes bioindicadoras que permitan mejor conocimiento sobre la salud de los bosques, la mayoría de ellas presentan respuestas específicas a contaminantes particulares.

El ozono troposférico agente altamente dañino para la vegetación, se dispersa a través de los vientos y regula su actividad a la temperatura del ambiente, está presente en la ZMVM en grandes concentraciones, que a través de los vientos se mueven hacia la zona del Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl, propiciando un posible daño a los arboles *Pinus spp.* sensible al ozono.

Por lo anterior el uso de la Escala Red-II puede ser alternativa de estudio, la cual además de ser económica y efectiva, está respaldada por la Comisión Europea del Ambiente (2010), esta opción de estudio permitirá la evaluación del daño por moteado clorótico en *Pinus spp.* en el Parque Nacional Izta-Popo de acuerdo a los periodos húmedo (Septiembre 2012) – seco (Abril 2013), generando registros sobre la depositación de ozono, la salud de los árboles y un mejor estudio sobre la salud del bosque de *Pinus spp.*, y del Parque Nacional Izta-Popo.

7. Marco Teórico

7.1 Concentraciones y daños

Las concentraciones superadas en la Zona Metropolitana del Valle de México en las últimas décadas, las cuales superan las 0.11 ppm, concentraciones superadas a los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana, (NOM-020-SSA-2014). Siendo estas desde hace décadas anteriores resultado de reacciones químicas en el planeta influenciadas por la radiación solar, expresadas por las altas concentraciones de óxido nítrico, altos niveles de ozono y lluvia ácida (Briseño, 1989).

En la ciudad de México al igual que en otras urbes en el mundo, generan emisiones de gases por actividad de la industria pesada (figura 10) y por las fuentes móviles (vehículos a motor). Dentro de los contaminantes primarios que participan en estos procesos se encuentran: los Óxidos Nítricos (NO_x), compuestos orgánicos volátiles, COV's, Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO_2), metano (CH_4) constituyen gran parte de la contaminación fotoquímica en la troposfera (Andrade, 1989).

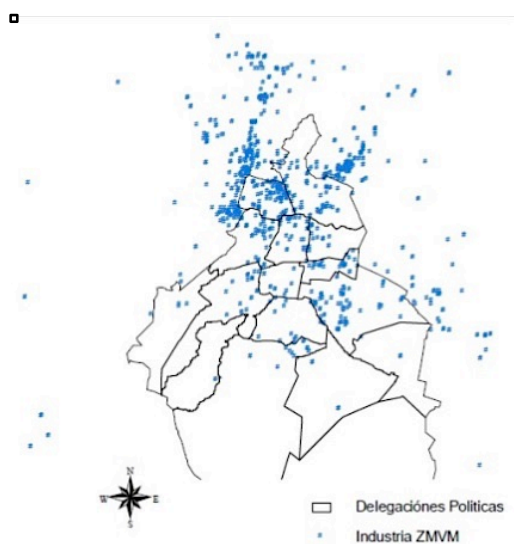


Figura 10. Ubicación Geográfica de las principales industrias en la ZMVM, 2010. UAM Azcapotzalco.

La fotólisis de los óxidos de nitrógeno provoca en la troposfera la acumulación de ozono, en donde los aldehídos, hidrocarburos, monóxidos de carbono generan la aceleración de reacciones químicas en la atmósfera (Wellburn 1994; citado por Martínez 2012).

Las concentraciones de ozono aumentan en épocas de gran insolación con bajo régimen de vientos, temperatura, humedad atmosférica, concentración de gases e inyección de nuevas emisiones atmosféricas (Grajales, 2002). El 10% del ozono en la atmósfera terrestre se encuentra en la troposfera, la primera capa de la atmósfera de la Tierra. El ozono en esta misma capa es considerado como ozono dañino y se encuentra en menor concentración en la estratosfera, con concentraciones de alrededor de 0.10 a 0.20 partes por millón (ppm).

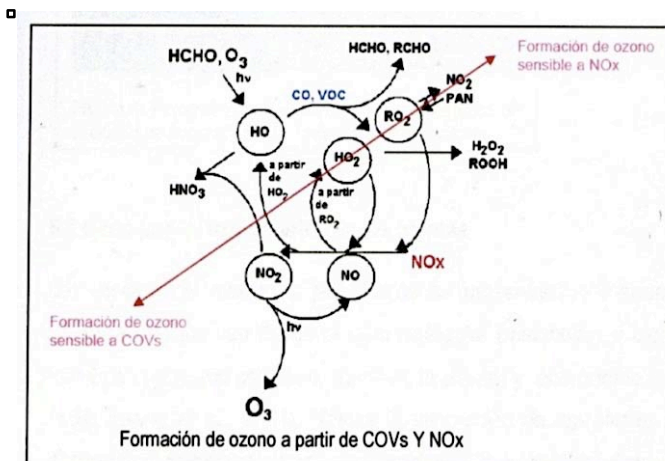
Con respecto a las concentraciones que ocasionan decline en el crecimiento y productividad vegetal se han reportado rangos que oscilan entre 0.05 y hasta 0.45 ppm, los cuales se superan de 4-5 veces por día, 360 días del año (Bravo y Torres, 2002) durante períodos de exposición que puedan ser de semanas, aumentando la concentraciones de contaminantes en el ambiente (figura 11). Pero en algunas coníferas cuando la exposición es por largos periodos, con 0.01 ppm de ozono es suficiente para que el daño se presente. Ya que incluso en estas pequeñas dosis, esta molécula puede ser muy dañina.



Figura 11: Contaminación atmosférica de la Ciudad de México. <http://www.excelsior.com.mx/comunidad.2013>

Las concentraciones presentes son resultado de reacciones químicas en conjunto con la radiación solar de otros contaminantes primarios como: Compuestos orgánicos volátiles no metálicos (COVNM), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y metano (CH₄) (Andrade, 1989).

El Ozono como contaminante secundario se forma a través de reacciones fotoquímicas (figura 12):



Los NO_x y Compuestos Orgánicos volátiles (COVs) tras sufrir oxidaciones iniciadas por el radical OH producen NO₂ en exceso, y:

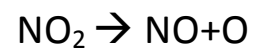
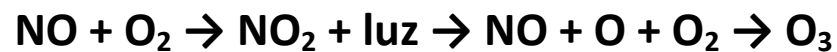


Figura 12. Ciclo simplificado del ozono y procesos relacionados. Martínez 2012.

- a) El oxígeno atómico (O) liberado, reacciona con el oxígeno molecular (O₂), presente en el aire.
- b) El ozono producido vuelve a reaccionar con el NO de la primer reacción:



El ciclo del Ozono incluye los procesos de formación y destrucción del mismo, el ciclo solo comprende el ozono que se encuentra de manera general en la atmosfera, y no toma en cuenta el producido por fuentes de origen antropogénico. (Chapman, 1930).

7.2 Programas enfocados en la mejora de la calidad del aire de la ZMVM

La presencia del ciclo fotoquímico del ozono en la ZMVM ya había sido detectado desde final de los años 50's (Bravo *et al.* 1958). En la década de los 80's los patrones y composición de las emisiones de precursores de ozono han cambiado significativamente en las zonas pertenecientes a la ZMVM; sin embargo la flota vehicular ha crecido en combustible típicamente industrial como el combustóleo y el diesel, lo mismo que el consumo de gasolinas (SEDUE, 1989).

Estudios de monitoreo realizados en los 70's hasta la mitad de los 80's señalan que el nivel de ozono no representaba un problema importante de contaminación atmosférica en comparación con otros contaminantes como las partículas, Pb y SO₂ (Bravo & Torres, 1985).

Es a partir del año de 1986 cuando los niveles de ozono comenzaron a aumentar coincidiendo con el cambio de gasolinas y en este mismo año se inició el registro de los niveles de contaminación con la instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

De 1986 a 1987 se pusieron en marcha las 21 acciones para reducir la contaminación del aire y las 100 medidas necesarias, que incluía medidas como la sustitución de combustóleo con alto contenido en azufre por gas natural en las centrales termoeléctricas, y la reducción de plomo en las gasolinas, además surgió el programa voluntario de un día sin auto.

Entre 1990 a 1995, se implementó el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA), el cual se enfocó en la reducción de las emisiones de plomo, óxidos de azufre, monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, para ello las estrategias se concentraron en la mejora de la calidad de los combustibles, la reducción de emisiones en vehículos automotores, modernización tecnológica y control de emisiones en industrias y servicios mediante la introducción de catalizadores de dos y tres vías y suministro de gasolina sin plomo.

De acuerdo a los registros de los años 90's, y aún a pesar del descenso que el ozono ha mostrado, el máximo registro alcanzado en la ZMVM data de 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. Sin embargo es importante señalar que los valores de ozono han sobrepasado la Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993 (RAMA, 1996).

En 1993 se inició la comercialización de diesel con bajo contenido de azufre, se completó la sustitución de combustóleo por gas natural y se cerró definitivamente la Refinería 18 de marzo en la Delegación Azcapotzalco. Con las medidas implementadas en el PICCA se lograron reducciones sustanciales de plomo y dióxido de azufre y monóxido de Carbono. Para 1994 y pese a los esfuerzos, los niveles de Ozono en la ZMVM aumentaron y es en este año cuando el inventario de emisiones integra a la atmósfera de la ZMVM en sus registros.

En esa misma década cuando se registran aproximadamente 451,614 toneladas de partículas suspendidas totales en el ambiente, 126,646 de bióxidos de nitrógeno y 1,025,760 de hidrocarburos, siendo estos dos últimos los principales precursores de ozono (RAMA, 1996). En el año 1995 las partículas menores de diez micras han rebasado la norma de 50 ug/m³ media aritmética anual durante los 12 meses del año (RAMA, 1996). Es entre 1990 y 1998 cuando se aplicó 96 veces el Programa de Contingencias Ambientales por ozono y por primera vez en mayo de 1998 se presenta una contingencia por partículas suspendidas (INE, 1996) citado por Fernández (1999).

De 1995 a 2000 con el propósito de ampliar, reforzar y dar continuidad al PICCA surgió PROAIRE Programa para mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México, enfocado a la reducción de concentraciones de ozono, para lo cual las medidas implementadas fueron dirigidas hacia la reducción de sus precursores (óxidos de nitrógeno e hidrocarburos) SEMARNAP (1996).

Por lo anterior las estrategias se concentraron en la reducción de emisiones en la industria, disminución de emisiones por kilómetro en vehículos automotores, mediante la introducción de tecnologías automotrices con menos emisiones de contaminantes, mejoras a las gasolinas,

combustibles industriales y domésticos, destacando: la eliminación del tetraetilo de plomo (TEP) en las gasolinas y la incorporación de un compuesto hidrogenante como el metil-terbutil éter (MTBE), y el establecimiento de valores máximos en el contenido de aromáticos, olefinas y benceno, la disminución de azufre y aromáticos en el diesel industrial y la sustitución del combustóleo ligero por gasóleo industrial cuyo contenido de azufre es menor.

Los resultados fueron: Una reducción de plomo en un 99% respecto al año de 1988, los niveles de dióxido de azufre (SO₂) se redujeron muy por debajo de los indicados por la norma, los niveles de monóxido de carbono (CO) fueron reducidos significativamente, y los niveles de ozono (O₃) comenzaron a disminuir, en comparación con la tendencia que se tenía a principios de la década de los noventa.

7.3 Daño por Ozono troposférico en las plantas (Moteado Clorótico)

En el bosque de pino la acumulación de ozono genera un daño en las acículas de los arboles, el cual es conocido como Moteado Clorótico, se presenta de manera visual causando defoliación recurrente y necrosis foliar. El daño por ozono se presenta a partir de 0.04 ppm de acuerdo con (Manning & Feder, 1980) (figura 13). Si bien existen otros bioelementos como: N, P, K, Fe, S, Mn, Zn, Mg, Ca, Cu, Mo, B, Cl que presentan síntomas de deficiencia en la vegetación (Larcher, 1977) (ANEXO IV). El ozono presenta un patrón específico de daño expresado por puntuaciones amarillas y/o café-rijo presentes en las hojas (González, 2009). Estos daños están relacionados a las altas concentraciones de ozono (SNIA, 2002). La lesión generada puede llegar a nivel de raíz, incluso podría provocar la disminución del flujo de carbohidratos, generando la limitación de micorrizas, mermando la nutrición del árbol (Grant, 1996). Los daños por ozono en las plantas se puede

clasificar en 4 tipos de lesiones: pigmentación, clorosis foliar, blanqueado y necrosis bifacial (Gidi *et al.* 1990).

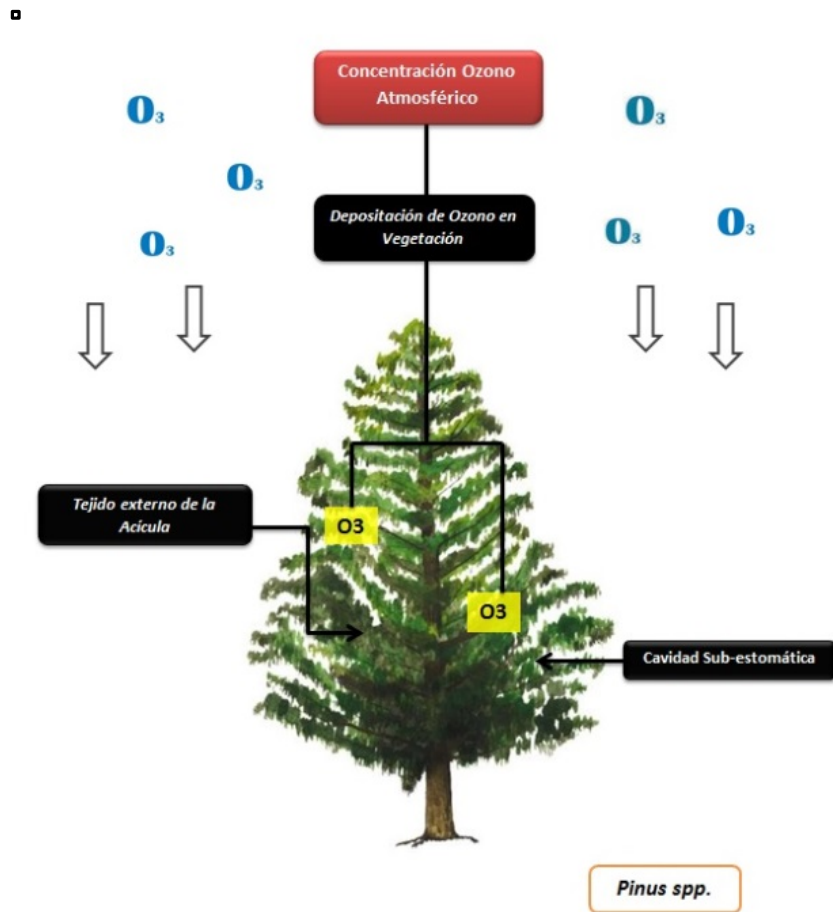


Figura 13. Esquema de la deposición de ozono en *Pinus spp.* Lab. Contaminación Atmosférica Fes Zaragoza UNAM. 2015

A nivel celular el ozono se introduce en la hoja por los estomas y una vez en la cavidad estomática, es disuelto rápidamente dentro de la capa húmeda de la superficie celular del mesofilo (González, 2009) (figura 14). Enseguida el ozono o sus productos reaccionan rápidamente con los componentes celulares (Sandermmman, 2000). Con una dosis es suficiente para causar pérdida de

biomasa a través del daño foliar visible, senescencia prematura, disminución del vigor y mortalidad (Rebbek, 1996).

Una vez que el ozono entra en fase líquida, sufre transformaciones que dan origen a gran variedad de radicales, incluyendo peróxido y radicales hidroxilo. El ozono altera funcionamiento de la membrana celular, estructura celular, organelos, solubilidad y pH en la zona de absorción (Treshow, 1984). Reduce los procesos fotosintéticos y de respiración (Pell *et al.* 1973; Barnes 1972) citados por Treshow (1984), inhibiendo al nitrato reductasa en glicina en hojas, alterando cloroplastos y reduciendo la absorción de dióxido de carbono (Cibrián *et al.* 2007; Floyd *et al.*, 1989) citados por Sandermann (2000), favoreciendo el ataque de especies defoliadoras y descortezadoras como coleópteros.

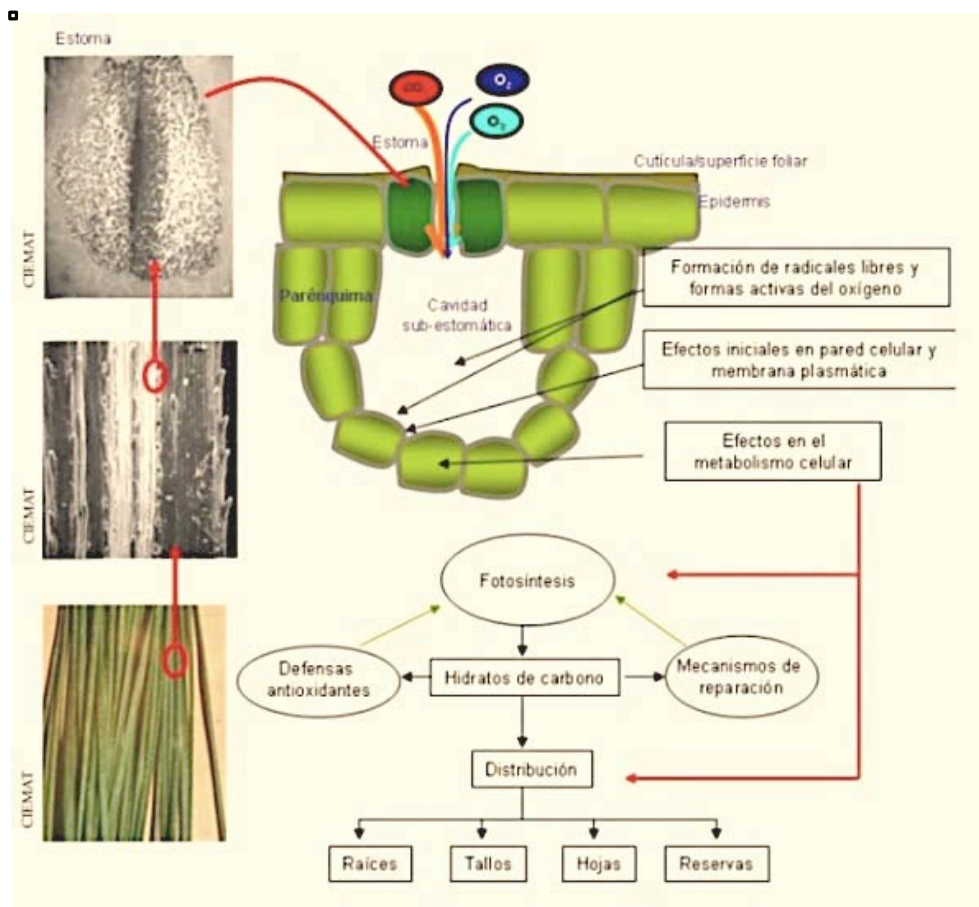


Figura 14. Respuesta estomática de las acículas frente al ozono. CIEMAT 2010.



Figura 15. Moteado clorótico en acículas de pino. Lab. de Contaminación Atmosférica, Fes Zaragoza UNAM. 2013.

En la figura 15 se observa la presencia en *Pinus spp.* el moteado clorótico, el cual aparentemente aparece con mayor frecuencia solo en acículas mayores de 1 año en adelante, principalmente en las áreas expuestas a la luz y en menor grado en la zona de sombra. Y el síntoma se extiende con el aumento de la edad de la acícula, además reduce la producción de conos, el tamaño y el peso de las semillas. Inclusive afecta la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas sufren también efectos negativos del descenso de pH [Smith (1990) citado por Pardos (2006)].

La contaminación por ozono, a diferencia de fluoruro o la contaminación por dióxido de azufre no dejan residuos elementales, o detectadas por técnicas analíticas. Por lo tanto, las lesiones visibles inducidas por ozono en las acículas son la única evidencia fácilmente detectable en el campo como resultado de estrés oxidativo, que conduce a una cascada de efectos fisiológicos y morfológicos adversos.

7.4 Indicadores de Calidad Ambiental

En la actualidad la alta emisión de contaminantes deteriora la calidad del aire y genera daños sobre la salud de las poblaciones y ecosistemas (WMO, 2007). Ante los problemas ambientales que presentan los ecosistemas, particularmente los bosques, existen indicadores de salud o indicadores ambientales.

Los indicadores ambientales, se han desarrollado para entender, describir y analizar distintos fenómenos: como el clima, la pérdida de suelos y el riesgo de especies principalmente. Si bien el uso de indicadores ambientales se ha extendido, no existe una definición única del concepto y éste varía de acuerdo a la institución y a los objetivos específicos que se persiguen (SEMARNAT, 2005).

Unas de las definiciones más conocidas y aceptadas provienen de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA), que desde hace varios años utilizan un conjunto de indicadores como información base para realizar evaluaciones periódicas del desempeño ambiental de los diferentes países que integran las organizaciones.

Según la OCDE, un indicador ambiental es un parámetro o valor derivado de parámetros que proporciona información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro en sí mismo (SNIA, 2011).

De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental (EPA) los índices de calidad ambiental funcionan para determinar si los agentes biológicos del medio ambiente mejoran o disminuyen respecto a su

calidad “ecológica” en su ecosistema, esto establecido en un lapso de tiempo determinado MacDonald (1972). Por otra parte Thomas (1972) menciona que el objetivo principal de los indicadores ambientales es desarrollar un método científico capaz de establecer y reflejar con precisión los cambios ambientales que se están generando en los ecosistemas. Prediciendo futuros cambios, daños o alteraciones ambientales.

Los Indicadores de Calidad Ambiental poseen la cualidad de proporcionar una descripción detallada sobre el estado de salud de la zona de estudio, debido a que establecen relación de manera sistemática.

Uno de los indicadores naturales que existen en nuestro planeta son las plantas, usada en muchos casos como bioindicadores del depósito atmosférico, principalmente por su sensibilidad a la depositación y por su amplia distribución, una de las especies sensibles al daño es el género *Pinus spp.* (Gutiérrez *et al.* 2014) La depositación de los contaminantes ocurre en la superficie de las hojas, generando disminución foliar Simon *et al.* (2011), aumentando la acumulación de los contaminantes influyendo en forma directa o indirecta en la calidad ambiental, recuperación y/o el bienestar humano (Escobedo *et al.* 2008).

7.5 Escala RED CE NIVEL-II (índice de porcentaje de ozono y moteado clorótico)

El principal objetivo de la evaluación de lesiones visibles de ozono es evaluar el efecto del ozono troposférico en los lugares donde se tenga registro o presencia de altos niveles de ozono para estimar el riesgo potencial para los ecosistemas.

La escala RED CE NIVEL-II (UNECE, 2010) Comisión Europea Ambiental propone un índice el cual pueda permitir la evaluación sintomática visible en campo del moteado clorótico inducido por ozono, principalmente descrito para acículas de coníferas; resultado de la exposición crónica a ozono y es representando como zonas verdes o amarillas en las acículas.

La escala es utilizada como un indicador de calidad ambiental en Europa ya que constituye una evaluación del posible riesgo de daño para los ecosistemas forestales tanto actuales como a futuro. Establece una estandarización de los daños visibles, a través de simulaciones visuales y programación computacional, permitiendo la documentación sobre la presencia de conductores ambientales que puedan afectar la salud del bosque y sus posibles efectos a mediano y largo plazo (figura 16), esto en vista de los modelos computacionales que establecen el aumento en las próximas décadas en las concentraciones de ozono (UNECE, 2010).

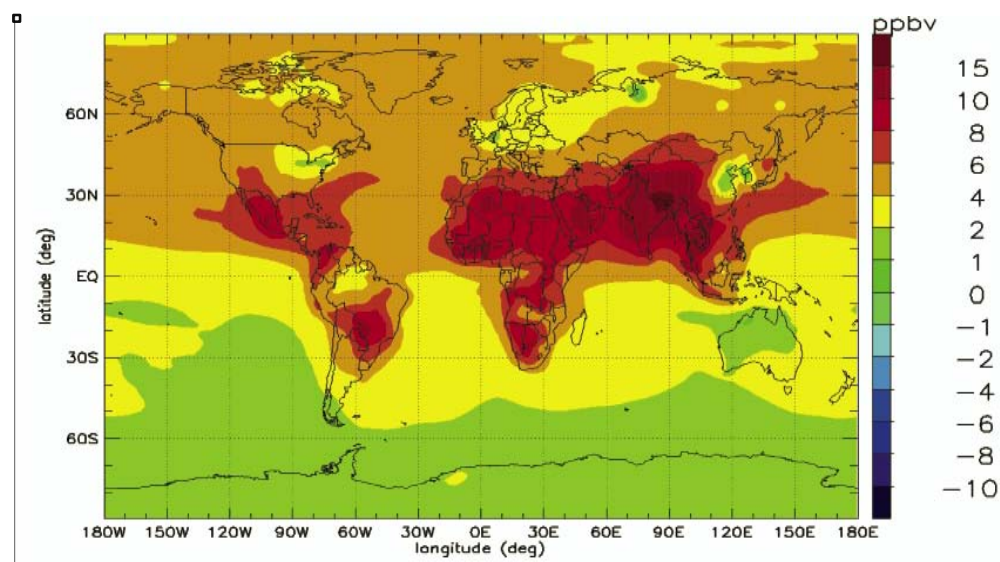


Figura 16. Modelación de concentraciones (ppb) de O₃ Troposférico para el año 2030. CIEMAT 2010.

El análisis que realiza la escala RED-II si bien es de carácter pasivo, ha resultado ser una herramienta valiosa para la evaluación del impacto de las exposiciones ambientales de ozono en las especies sensibles. Debido a la naturaleza compleja del diagnóstico y las restricciones dadas de la inversión, los resultados de la evaluación deben ser considerados como resultados semi-cuantitativos.

8. Área de Estudio

Se eligió el Parque Nacional Ixta-Popo por ser un Área Nacional Protegida con bajos índices de contaminación proveniente de las zonas urbanas.

Las zonas de estudio son los parajes de San Rafael y Paso de Cortés en el Estado de México, Elegidos por su altitud, en la cual se encuentra geográficamente distribuido el género *Pinus spp.* a una altitud de entre 3000 a 4000 msnm (figura 17).

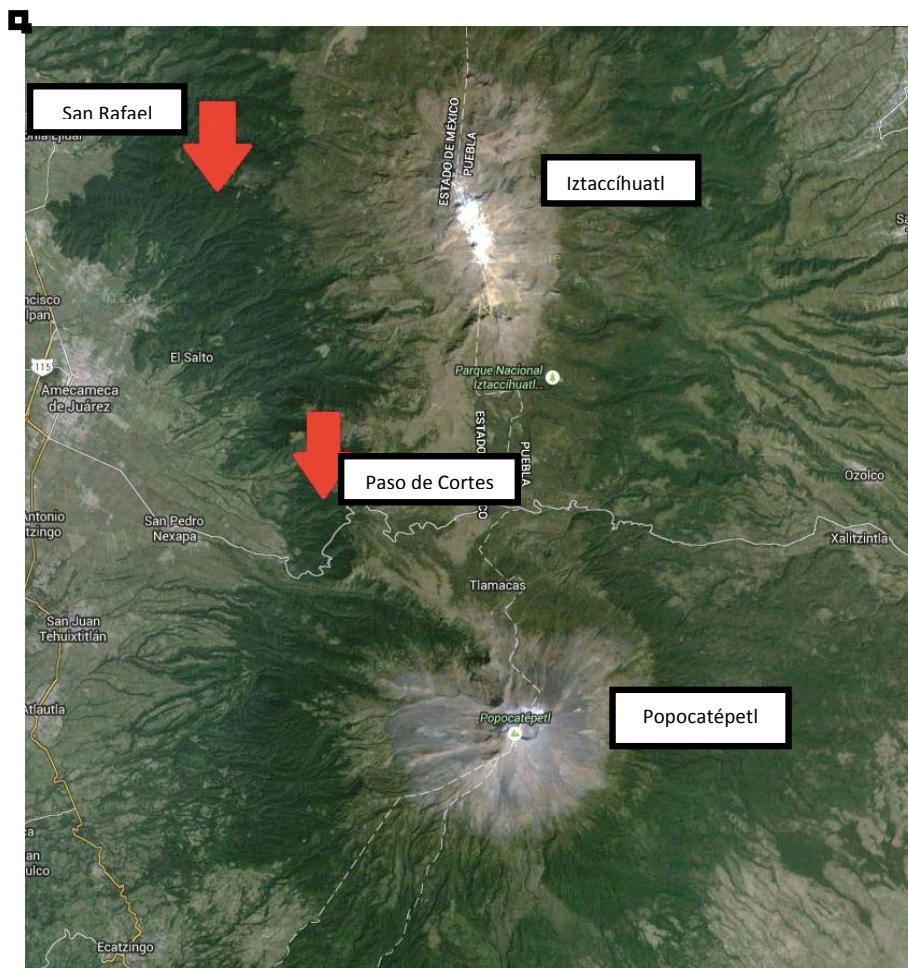


Figura 17. Ubicación geográfica de los Parajes Paso de Cortés y San Rafael, Parque Nacional Ixtaccíhuatl – Popocatepetl. ©Google, INC. 2015.

8.1. Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl (PNIP)

8.1.1 Localización

El Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl se encuentra en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transversal, ocupando una parte sustancial de la Sierra Nevada. Se localiza entre las siguientes coordenadas extremas 18°59'00.43" y 19°28'09.44" de Latitud Norte y 98°34'55.88" y 98°46'40.95" de Longitud Oeste (figura 18). Abarca una superficie de 39, 819. 086 hectáreas divididas entre el Estado de México, con 28 307. 487112 Hectáreas (71.09%); Puebla con 11 072. 918088 hectáreas (27.81%); y Morelos con 438.6808 hectáreas (1.10%). Sus geo-formas (sierra, conos volcánicos y laderas) son de origen volcánico, predominando rocas basálticas y andesitas. Su rango altitudinal va desde los 3000 a los 5, 480 msnm (CONANP, 2013).

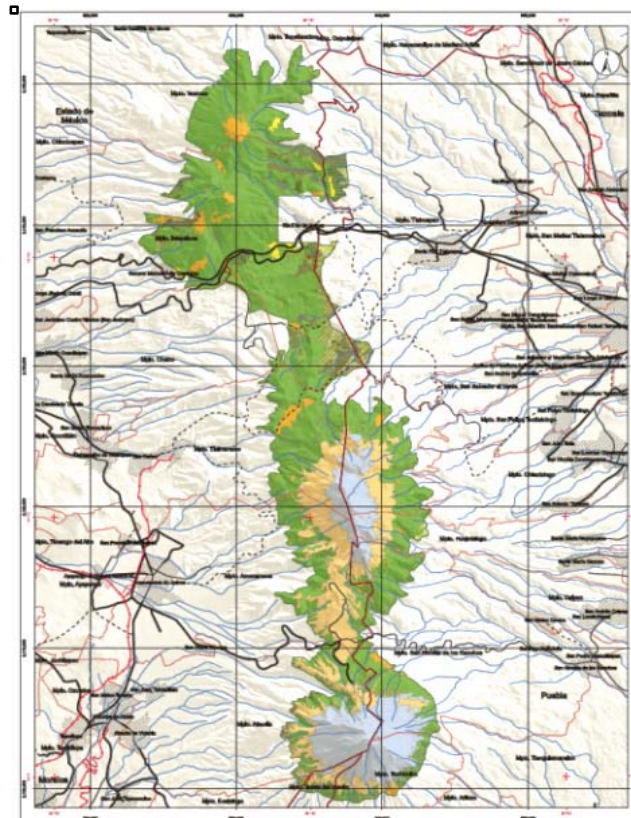


Figura 18. Mapa del Parque Nacional Izta–Popo, Zoquiapan CONAFOR 2015.

8.1.2 Fisiografía

La Sierra Nevada, que forma parte del Eje Volcánico Transversal, es un macizo montañoso de alrededor de 100 km que va de norte a sur separando las cuencas de México y Puebla; sobre ella se encuentra la tercera cumbre más alta del país: el Iztaccíhuatl (5,230 msnm). Muy cerca, a 14 kilómetros hacia el sur, está el volcán Popocatepetl con 5,452 msnm (la segunda cumbre más alta de México); estos dos volcanes son los que dan nombre al parque nacional (INIFAP, 2012).

8.1.3 Ozono a nivel del suelo

En la región adyacente a las grandes elevaciones, dispuestas de sur a norte, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón y Tláloc, debido a la continua actividad volcánica con la consecuente presencia de derrames y emisión de cenizas, el material parental de los suelos está compuesto por rocas ígneas extrusivas de pómez, por la acumulación de cenizas volcánicas de diferentes etapas de actividad volcánica y por sedimentos de origen volcánico. La múltiple superposición de capas de tefras (pómez) y cenizas, además de los efectos del intemperismo hídrico y eólico y del clima, ejercen efectos diferenciales sobre los procesos de formación de los suelos característicos de esta región que son los andosoles, los cuales debido a su composición y a la acción combinada de estos factores pueden ser vítricos, húmicos, mólicos y ócricos (SEMARNAT, 2013).

La relación entre las diferentes fases de formación de los suelos, la fisiografía y la vegetación predominante, de acuerdo con su altitud muestra que a elevaciones de 2 mil 900 a 3 mil metros sobre el nivel del mar, en el bosque de Abies, los suelos están bien desarrollados, poseen un contenido de materia orgánica de ocho al 11 por ciento y textura migajón arenosa; en el bosque de pino, a altitudes de 3 mil 400 a 3 mil 800 metros, el suelo es de textura migajón arenosa, de

color café oscuro a negro, con bajo contenido de materia orgánica (dos a ocho por ciento) y presenta los efectos de la acción del intemperismo en el material parental; a elevaciones de 4 mil metros, en el páramo de altura, se observan afloramientos de rocas ígneas (pómez) y cenizas volcánicas, con fragmentos de suelo en laderas con fuerte pendiente; el suelo es negro, de textura arenosa, lo cual lo hace más susceptible al arrastre por la acción del viento y el agua o por la misma gravedad.

8.1.4 Hidrología

Los recursos hídricos que nacen en el parque nacional son originados principalmente por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial, abundante en la región, de casi 1 000 mm anuales. Las corrientes; éstas últimas son innumerables durante la época de lluvias. También se produce gran filtración de agua que va a alimentar corrientes subterráneas. Los ecosistemas de la Sierra efectúan los procesos que permiten la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen buena parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, del Valle de Puebla y del Valle Cuautla-Cuernavaca (Vargas, 1997).

8.1.5 Clima

La zona de estudio pertenecen a un clima templado subhúmedo, con régimen de lluvias en verano, su temperatura media anual es de 13.2°C. el mes más frío es enero con una temperatura de 10.9°C y el mes más cálido es abril con 15.4°C. La precipitación anual es de 1092 mm, donde Febrero es el mes más seco con 8.6 mm y Julio el más lluvioso con 228.8 mm. El porcentaje de lluvia invernal es de 3.57%. El cociente de precipitación y temperatura (P/T) es de 82.7. Por sus condiciones de temperatura se considera templado con verano fresco largo (Perry *et al.* 1998).

La zona se ve afectada en la época fría del año por sistemas de tiempo propios de las altitudes medias, como los frentes fríos e invasión de masas de aire polar continental; en el verano influyen los sistemas meteorológicos propios de la zona tropical como los huracanes y ondas las tropicales.

Su topografía y ubicación permite una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68°C por cada 100 metros.

La altitud del Parque Nacional Izta-Popo se ubica en la región de vientos alisios, zona en la que predominan las circulaciones de tipo convectivo local, haciendo posible una gran estabilidad meteorológica durante la mayor parte del año (CONANP, 2013). Los vientos dominantes son de norte a sur en el invierno y durante los meses de agosto a septiembre, los cuales varían de oeste a este de marzo a julio, así como también en octubre y noviembre (Noyola & Méndez, 2012).

8.1.6 Fauna

En el Parque Nacional se distribuyen ocho órdenes, 15 familias y 48 especies de mamíferos; una de ellas es endémica: el Zacatuche o Teporingo (*Romerolagus diazi*), que se encuentra en peligro de extinción.



Figura 19. Fauna del Parque Nacional Izta- Popo. 2015 <http://iztapopo.conanp.gob.mx>

La musaraña oscura (*Sorex vagrans*) y el tejón o tlalcoyote (*Taxidea taxus*), están amenazadas mientras que la rata canguro (*Dipodomys phillips*), se encuentra protegida de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana Nom-059-Semarnat-2010 Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio–Lista de especies en riesgo (SEMARNAT, 2013).

Los roedores son los mejor representados, incluyen tuzas, ardillas y ratones; le sigue el orden de los carnívoros, gato montés, zorros, zorrillos, coyotes y mapaches, entre otros; los quirópteros (murciélagos) ocupan el tercer lugar; con menos especies se encuentran los insectívoros (musarañas), y finalmente los lagomorfos (conejos) (Figura 19).

8.1.7 Vegetación

El parque nacional Izta-Popo es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro de México. La distribución de la vegetación en esta zona atiende a la altitud. La vegetación presente en los bosques de coníferas son la vegetación dominante, seguidas por la pradera de alta montaña o pastizal alpino y vegetación herbácea, de no más de 50 cm de altura, que colinda con las nieves perpetuas (Hernández & Granados, 2006). En el cuadro 2 se observan las especies dominantes en el Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan.

Cuadro 2. Tipos de vegetación en el Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl-Zoquiapan. Vargas 1997.

Vegetación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan		
Estado de México	Estado de Morelos	Estado de Puebla
<p>Abies religiosa, Pinus hartwegii, P. pseudostrobus, P. rudis, P. teocote, P. leiophylla y Quercus laurina.</p> <p>Cornus disciflora, Garrya laurifolia, Ilex toluicana, Meliosa dentata, Oreopanax xalapensis, y Prunus brachybotrya.</p> <p>Zacatal: Festuca toluensis, F. livida, F. amplissima, Calamagrotis toluensis, Muhlenbergia quadridentata, Trisetum spicatum, Agrostis toluensis y Poa orizabensis.</p>	<p>Pinus hartwegii, P. ayacahuite, P. michoacana cortuta, P. pseudostrobus, P. macrocarpa, Abies religiosa, Cupressus lindleyi;</p> <p>En sitios de mayor altitud se localiza el Pinus ocarpa, en altitudes entre 2,700 y 3,200 metros.</p> <p>En altitudes de 3,000 a 3,500 metros se localiza la siguiente vegetación: Pinus lawsoni, P. leiophylla, P. ocarpa, P. pringlei y P. teocote.</p> <p>Especies de encino: Quercus mexicana, Q. crassopes, Q. rugosa y Q. macrophyll.</p> <p>Otras especies de árboles forestales: Clethra mexicana, Arbutus xalapensis, A. glandulosa, Arctostaphylos arguta, Buddleia cordata, B. americana y Dodonaea viscosa.</p>	<p>-Pinus ayacahuite</p> <p>-Alnus mexicana</p> <p>-Bosques de oyamel</p> <p>-Bosques de pino</p> <p>-Bosques de pino-encino</p> <p>-Zacatal</p>

8.2 Bosque Templado

Los bosques Templados son muy frecuentes en las zonas de clima templado y frío del hemisferio boreal, la caracterización climática del bosque puede aproximarse a los límites entre 10 y 20°C de temperatura media anual y entre 600 y 1000 mm de lluvia al año (Rzedowski, 1986).

En México se encuentran presentes con amplia diversidad florística, ecológica. En la figura 20 se observa la distribución del bosque Templado en México constituyendo el 16% en el territorio nacional (CONABIO*, 2015), con aproximadamente 10 millones de hectareas de superficie (CONANP, 2014) y se les encuentra prácticamente desde el nivel del mar hasta el límite de la vegetación arbórea; prosperan en regiones de clima semiárido, semi-húmedo y francamente húmedo.



Figura 20. Mapa Distribución del Bosque Templado en México, 2015.
<http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/mapas.html>.

8.3 Bosque de *Pinus*

A pesar de que existen numerosas especies vegetales en el Parque Nacional Ixta-Popo, el bosque de coníferas es el ecosistema más representativo, ya que los bosques de pino se caracterizan por ser bosques maduros en buen estado de conservación. Presentan una alta densidad sobre todo en las zonas aledañas al Popocatepetl, en gran parte por la restricción de acceso al volcán y en la zona de las cañadas gracias a condiciones micro-climáticas, al bajo impacto de actividades antropogénicas.

La morfología y disposición de sus hojas, poseen fisonomía particular y los bosques que forman presentan un aspecto que difícilmente puede confundirse con el de otros tipos de vegetación.

El grueso de masa forestal de pinos mexicanos se desarrolla a altitudes entre 1500 y 3000 msnm (figura 21). A elevaciones mayores los pinares también son frecuentes y constituyen el único tipo de bosques que alcanza el límite superior de la vegetación arbórea (Rzedowski, 1986). En el centro y sur del país la línea altitudinal se sitúa en unos 4 000 m (Beaman, 1962) pudiendo sobrepasar localmente la cota de 4100m.

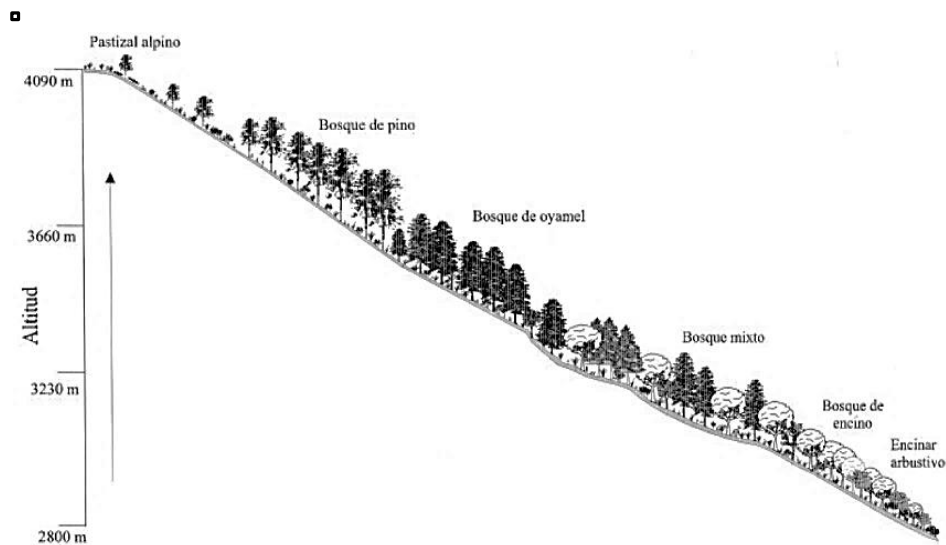


Figura 21. Franjas ecológicas y vegetación característica del Parque Nacional Izta-Popo. Hernández *et al.* 2006.

8.3.1 Genero *Pinus* spp.

El género *Pinus* es una especie monoica posee ramas verticiladas o también llamadas ramas opuestas. En la figura 22 se observa la conformación de las hojas, estas pueden ser lineares o aciculares, alternas, solitarias o agrupadas en fascículos en la extremidad de braquiblastos (*Pinus*) o sobre macroblastos (*Picea*, *Abies*, *Tsuga*, *Pseudotsuga*), en macro y braquiblastos (*Cedrus* y *Larix*).

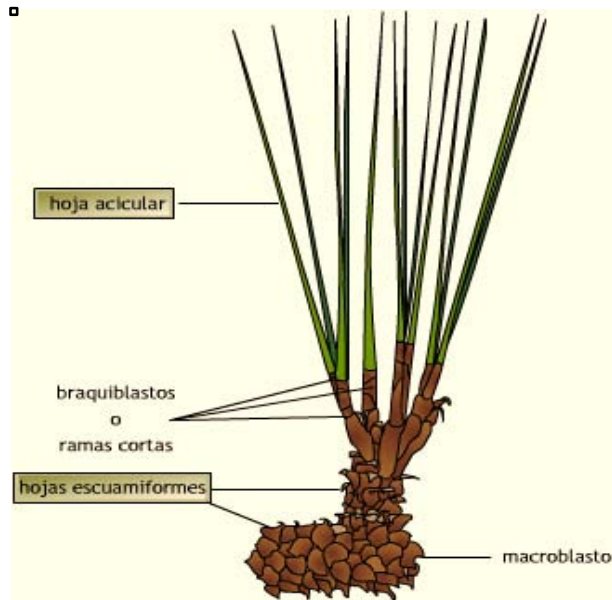


Figura 22. Esquema de Acícula de Pino
<http://www.biologia.edu.ar/botanica.2012>

8.3.2 Ciclo de vida: Transcurren cerca de 12 a 14 meses de intervalo entre la polinización de los óvulos y la fertilización. El ciclo completo de *Pinus* se extendería a 3 años, la mayoría de las Coníferas a 2 años (figura 23).



Figura 23. Ciclo de vida de *Pinus spp.* <http://botael.blogspot.mx>

8.3.3 Estructuras reproductivas

Estróbilos micro-esporangiados: compuestos de numerosos microporofilos, cada uno con dos sacos polínicos en la cara inferior. Los granos de polen son grandes y poseen dos sacos aeríferos.

Estróbilos mega-esporangiados: formados por escamas biovuladas, protegidas por brácteas tectrices, a veces muy desarrolladas. Semillas ápteras o aladas.

8.3.4 Distribución

Familia con 9 géneros y cerca de 200 especies, limitada casi enteramente al hemisferio norte, tanto del Nuevo como del viejo mundo. Los pinares mexicanos forman el pilar más fuerte de la industria forestal del país. Aproximadamente, un 60% de las especies de pinos mexicanos tienen importancia comercial, y ahora más del 80% del total de productos forestales del país son obtenidos de los pinos.

Los pinos en México presentan una cobertura nacional de aproximadamente 10 millones de hectáreas (CONANP, 2014), están distribuidos principalmente a lo largo de la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Eje Neo-volcánico, Sierra madre del Sur, Macizo de Oaxaca, Sierra Madre de Chiapas y las sierras de Juárez y San Pedro Mártir en B.C.N. (Eguiluz, 1982).

El rango altitudinal para éste género es muy amplio, variando desde 120 msnm en Quinta Roo hasta 4000 msnm en los volcanes más altos del Eje Neo-volcánico. Los pinares en México, como en otras partes del mundo, tienen un hábitat serrano, poblando montañas y pendientes en barrancos de las sierras mencionadas.

9. Material y Método

Se realizó la revisión del “Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of The Effects of Air Pollution on Forests” part VIII: Assessment of Ozone Injury. Se utilizaron mapas de la zona de estudio (Parque Nacional Izta-Popo), se eligieron los parajes “San Rafael y Paso de Cortés”, seleccionados en base a la presencia de bosques cuya especie dominante es el bosque de pino. Además se realizó una revisión bibliográfica acerca del daño por ozono en la vegetación, indicadores ambientales de salud forestal y vientos dominantes en la cuenca del valle de México.

9.1 Muestreo en Campo

Se seleccionaron dos parajes del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Paso de Cortes en abril 2012 (período húmedo) y San Rafael en septiembre 2013 (período seco), que están afectados por la depositación de Ozono troposférico, influenciado por la Contaminación proveniente de la Ciudad de México. Se tomó en cuenta la altitud de los parajes de acuerdo a la altura donde se encuentran el género *Pinus spp.* 3000-4000 msnm (Perry Jr. *et al.* 1991). Se tomaron las coordenadas geográficas de ambas zonas de estudio.



Figura 24. Recolección de acículas de *Pinus spp.* en campo. Lab. de Contaminación Atmosférica Fes Zaragoza, UNAM 2012.

Se recolectaron muestras de hojas en 20 árboles en ambos parajes, los arboles fueron elegidos aleatoriamente (figura 24), cada uno de los muestreos con tres repeticiones por árbol (Clark & Evans, 1954; citado por Baddi *et al.* 2012). Para lo cual se utilizaron envases de polietileno de alta densidad, etiquetados y ordenados de acuerdo al número de árbol, para un mejor control de las muestras.

Las muestras fueron recolectadas a alturas aleatorias y lo más alejada del tronco, respecto a la presencia de ramas y hojas en cada árbol (figura 25). En total se colectaron un total de 60 muestras y se contabilizaron 7,642 acículas para el período septiembre 2012 (húmedo) y 8,479 acículas para el período abril de 2013 (seco). Se llenó la ficha de datos de campo correspondientes y se transportó al laboratorio para la determinación del Moteado Clorótico por Ozono.



Figura 25. Observación en Campo del Moteado Clorótico. Lab. de Contaminación Atmosférica Fes Zaragoza, UNAM 2012.

9.2 Trabajo de Laboratorio

9.2.1 Evaluación del daño foliar por O₃ en *Pinus spp.*

Se utilizó la escala RED CE NIVEL-II (UNECE, 2010) (Anexo II) para evaluar el daño foliar presente en las acículas de *Pinus spp.*, para lo cual se utilizó la Escala que permitió conocer el grado de puntuación, promedio de puntos y el porcentaje del daño presentes en las acículas por ozono expresado a través del Moteado clorótico en las hojas (figura 26).

□

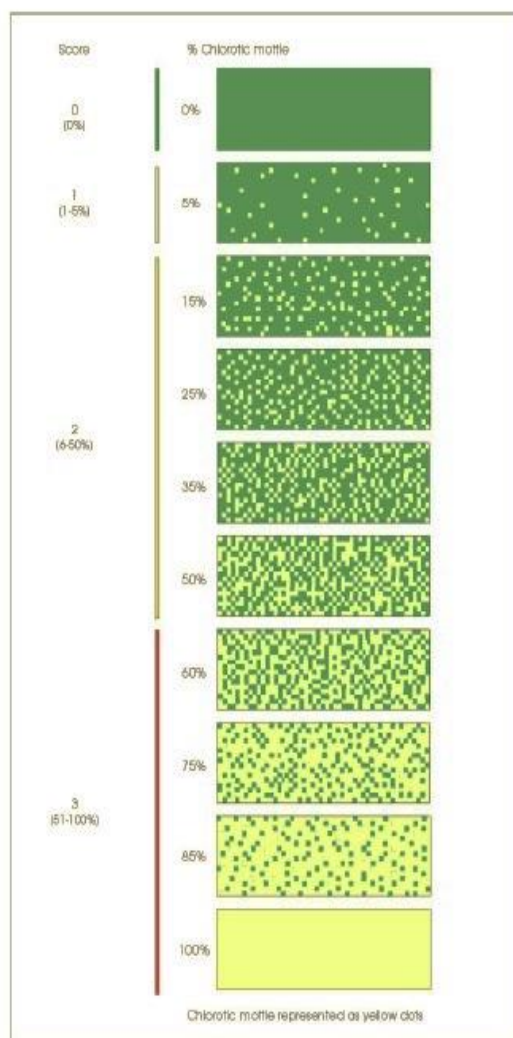


Figura 26. Evaluación daño por ozono con escala RED II. Lab. de Contaminación Atmosférica, Fes Zaragoza UNAM. UNECE, 2010.

Se tomó acícula por acícula, buscando igualar la puntuación de las hojas de pino con la plantilla de la escala y se colocaron formando un conjunto uniforme de hojas (figura 27). Se observó el patrón de manchas tomando en cuenta, si el color del moteado era amarillo y/o café rojizo o presentaba una coloración verde característica de la acícula sana, y por presencia de ozono en la acícula. Posterior a ello, se anotó la puntuación de cada una de ellas y el porcentaje de moteo clorótico que presentaron.

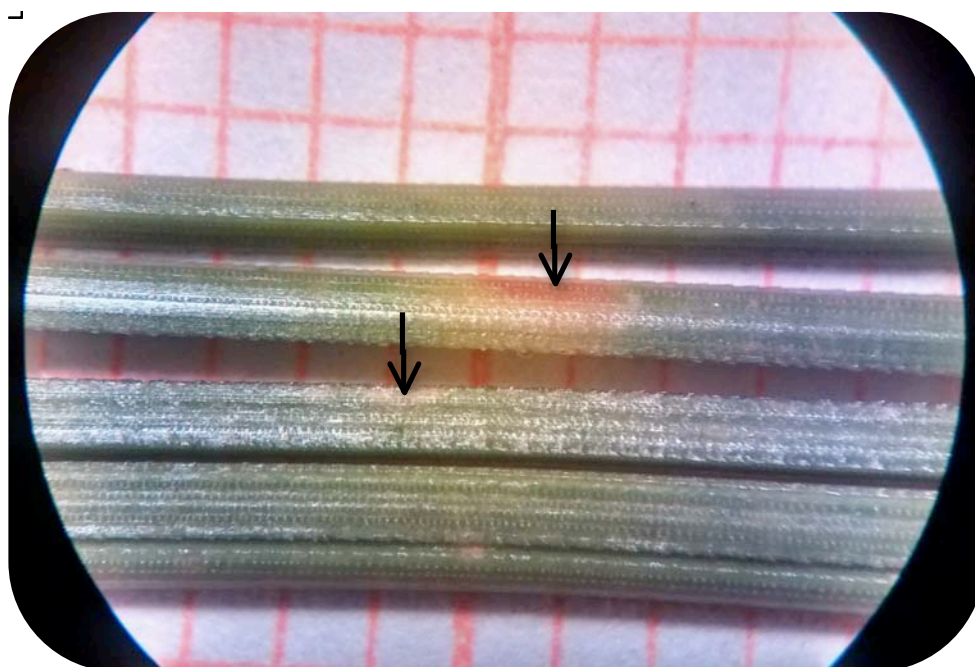


Figura 27. Moteado clorótico presente en *Pinus spp.* del PNIP. Lab. de Contaminación Atmosférica, Fes Zaragoza UNAM 2013.

Los índices y porcentajes de puntuación obtenidos fueron capturados y ordenados en una hoja de Excel. Posterior a ello se exportaron al programa estadístico SPSS V.15.0.1 y Statgraphics Centurion XVI.I para establecer la posible relación entre el daño por ozono en las acículas de pino, los vientos dominantes de la ZMVM, los períodos húmedo-seco en el Parque Nacional Izta-Popo.

Para obtener esta posible relación, se realizaron pruebas de medidas de dispersión y Prueba T-Student para muestras independiente y se estableció un comparativo entre ambos parajes.

10. Resultados y Discusión

10.1 Registro del daño por ozono con escala RED-II

A mediados de los años 70's el ozono troposférico en Europa afectaba a los bosques en dicha zona, por ello elaboraron la escala RED-II elaborada por la Comisión Europea del Ambiente. Con el mismo fin la escala se probó evaluando el depósito de ozono troposférico y el daño causado a las hojas de *Pinus sylvestris* en el Parque Nacional Izta-Popo, en los parajes Paso de Cortés y San Rafael.

La evaluación permitió la observación y el registro de lesiones visibles en las acículas de *Pinus spp.*, manifestando aparición de manchas en las acículas, principalmente en tonalidades amarillas y/o anaranjadas, esto se presentó en ambos parajes de estudio, el tono amarillento se presentó con mayor frecuencia en hojas jóvenes, mientras que en las hojas adultas, se presentó principalmente tonalidades anaranjado-rojizo. Coloraciones reportadas por Middleton *et al.* (1950), en la zona de los Ángeles California USA, las cuales indican la depositación y daño por ozono en las hojas de *Pinus spp.* y que Alvarado *et al.* en (1993) reporta al moteado clorótico como la causa y predisposición de los arboles a una clorosis, senectud y necrosis foliar.



Figura 28. Daño por ozono en *Pinus spp.* en el PNIP. Lab Contaminación Atmosférica. 2013.

Lo anterior predispone que en el Parque Nacional Izta-Popo se encuentra un alto índice de depositación de ozono en los pinos, tal como ocurrió en los Ángeles California en 1950 (Middleton *et al.*, 1950), el daño masivo en cultivos en el este de los Estados Unidos reportado por Haggstad y Middleton en 1959 citado por Percy *et al.* en 2003, al norte de California USA reportado por Sally *et al.* 2007 y la pérdida de vigor en 1992 en las acículas de Pinos en España y Grecia según lo reportado por Sánchez *et al.*, 1992.

Las afectaciones a la vegetación anteriormente mencionadas tienen presencia desde los años 80's en México. Estudios igualmente visuales realizados por Hernández y De Bauer en 1984, han manifestado daño por ozono troposférico en la vegetación de la Ciudad de México, particularmente en el Área del Ajusco, causando perdida de vegetación arbórea. El deterioro por ozono troposférico en *Pinus spp.* en el Parque Nacional Izta-Popo son resultado de las altas

concentraciones de ozono que de acuerdo con Richards en 1958 citado por Percy *et al.* 2003, forma parte del smog, el cual causó daño foliar en las uvas de California USA.

Actualmente este registro óptico continua siendo el único método de registro del depósito de ozono troposférico en la vegetación de Europa, Asia África y América del Norte. En el caso en particular de este estudio, los daños se atañen principalmente por la actividad antropogénica de la ZMVM, destacando la industria, la actividad vehicular y la circulación de los vientos dominantes que de acuerdo con Jáuregui en 1993, presentan una dirección de norte a sur y de este a oeste, dirigiendo toda esta masa de contaminantes a la zona del Parque Nacional Izta-Popo, la cual se encuentra hacia el sur-este de la ZMVM.

La depositación de ozono en el Parque Nacional Izta-Popo propicia que el género *Pinus* presente la pérdida de especies, afectando su índice de cobertura de copa y su distribución se vea más restringida, la cual únicamente se desarrolla en un plano altitudinal entre los 1500 y 3000 msnm., todo el daño mencionado, podría repercutir de manera global en todo el ecosistema de la región.

El daño registrado en las acículas de *Pinus spp.* afecta a la hoja de manera sistemática, entrando por la cavidad de los estomas de las hojas, por difusión pasa entre las células en empalizadas, llegando hasta la grana y tilacoides, afectando la clorofila, lo anterior de acuerdo con Sánchez *et al.* 1992 y Strauss *et al.* 1990; además de afectar el pH de las mismas, propiciando decline foliar y necrosis del árbol.

El ozono degrada la cera de la cutícula, particularmente elementos no saturados de la cera, especialmente durante el periodo que abre los estomas y cuando la fotosíntesis se encuentra en fase oscura, destruyendo la producción de moléculas de ATP y cloroplastos (Wellburn, 1991).

El ozono troposférico producido en la ciudad de México que ha estado presentado en las últimas décadas en la ZMVM, ha tenido concentraciones que oscilan entre 0.30 ppm a 0.34 ppm, estas en conjunto con la dirección de los vientos dominantes, han ocasionado que el ozono troposférico se mueva hacia la zona del Parque Nacional Izta-Popo y se deposite en las acículas de *Pinus spp.*, las concentraciones antes mencionadas no deberían presentarse un solo día del año, sin embargo Bravo & Torres en 2002 reportan concentraciones de ozono en la ciudad de México de hasta 0.46 ppm, siendo muy superiores a los establecidos por la (NOM-020-SSA1-1993) ahora llamada (NOM-020-SSA1-2014).

Actualmente y a pesar de las modificaciones a la (NOM-020-SSA1-2014), las concentraciones de ozono troposférico continúan superando el límite de la Norma Oficial Mexicana (NOM-020-SSA1-2014), teniendo límite 0.095 ppm y que de acuerdo con la Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, se sobrepasan con concentraciones de 0.122 ppm, variando las mismas a lo largo del día (figura 29), estas concentraciones siguen estando muy por arriba del límite máximo de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud que tiene como límite máximo 0.05 ppm.

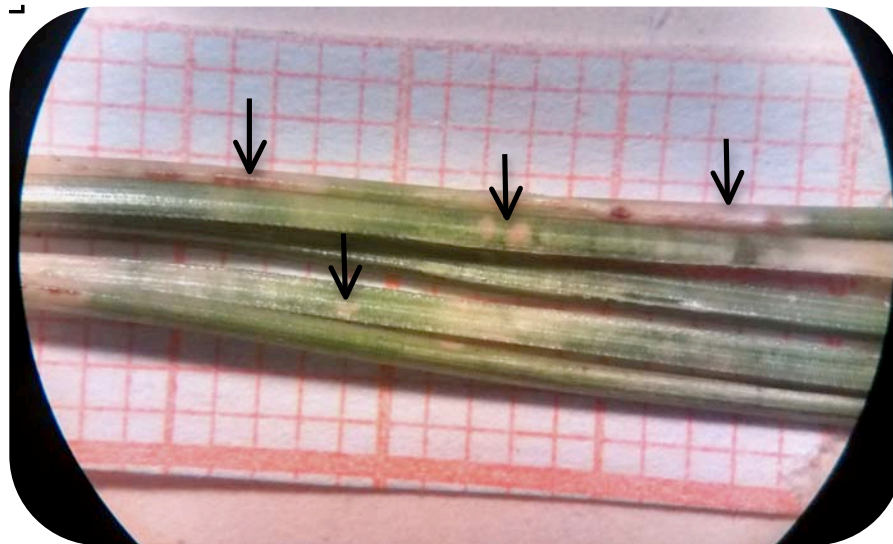


Figura 30. Daño por ozono presente en las acículas en *Pinus spp.* Parque Nacional Izta-Popo. Lab. de Contaminación Atmosférica Fes Zaragoza, UNAM 2013.

10.2 Relación del daño por ozono respecto a los períodos de muestreo

En estudios realizados bajo condiciones controladas se han contemplado diversos factores ambientales como: luz, cantidad de ozono y temperatura. Mientras que en campo además de los factores mencionados se deben considerar otros factores como: el tiempo de exposición, la frecuencia, la tolerancia genética de cada especie, humedad, radiación, suelo y condiciones nutrimentales (Halbwachs, 1984).

Lo anterior para establecer un panorama más claro respecto al periodo húmedo-seco y su posible relación o diferencia respecto al daño por moteado clorótico.

Para observar si existía alguna diferencia respecto a los periodos de estudio se realizó una base de datos en el programa de computo Excel, los datos se ordenaron de acuerdo a periodo húmedo-

seco y niveles de daño en las hojas, este último representado en porcentaje de acuerdo a la presencia en las acículas de *Pinus spp.*

10.2.1 Periodo Húmedo (Paso de Cortes)

Del total de las acículas registradas, se realizó el estudio de acuerdo al periodo de muestreo, las cuales para el período húmedo en el **Paraje Paso de Cortes** se obtuvo que el 7.07% de las hojas analizadas (541 acículas) no presentan daño, **36.1% (2,759 acículas) presentan un daño nivel 1**, el **28.46% (2,175 acículas) daño nivel 2**, el 15.61% (1,193 acículas) daño nivel 3, el 4.61% (353 acículas) daño nivel 4 y el **8.12% (621 acículas) daño nivel 5**.

10.2.2 Periodo Seco (San Rafael)

En el período seco en el **Paraje San Rafael** se obtuvo un **11.87% de las hojas analizadas (1,007 acículas) no presentan daño por ozono**, el **19.27% (1,634 acículas) daño nivel 1**, el 8.50% daño nivel 2, el **9.22% (782 acículas) daño nivel 3**, el 5.42% (460 acículas) daño nivel 4 y el **45.7% (3,875 acículas) daño nivel 5**. De ambas zonas de estudio el paraje de San Rafael se muestreó un número mayor de acículas recolectadas, presentando un mayor follaje en el bosque de *Pinus spp.*, respecto al paraje **Paso de Cortes**.

Alvarado & Hernández en el 2002, utilizaron la escala propuesta por Miller en 1973, la cual presenta tres parámetros: Daño ligero (DL), Daño moderado (DM), Daño severo (DS) y Daño muy severo (DMS) en hojas de *Abies religiosa* en el P.N. del Desierto de los Leones, sus resultados demuestran que el daño encontrado en las hojas principalmente es DM con el 37.68% a 42% de daño. Los resultados son referencia sobre el estado de salud del P. N. Desierto de los Leones. Sin

embargo Alvarado solo toma parámetros de carácter cualitativo, además de analizarse otra especie arbórea y en zona de estudio, por ello no se puede contemplar que exista una relación directa con el presente trabajo.

Cibrián *et al.* en el 2007, Reconoce los daños provocados por ozono en especies forestales arbóreas, síntomas del daño y establece posibles concentraciones a partir de las cuales se presenta dicha lesión en las hojas, las cuales oscilan entre 0.1 ppm a 0.33 ppm, sin embargo no establece un índice del daño que se presenta en las mismas, ya sea de carácter cualitativo o semi-cuantitativo como lo es la Escala Red-II.

Hernández T. en el 2014, presenta los resultados obtenidos en 1998, debido al estudio en *Pinus hartweggi* y el daño por ozono que presentó, utilizo la misma escala propuesta por Miller (1973) y utilizada por Alvarado en el 2002. Establece un 44% daño severo (DS) y 56% daño moderado (DM) en el Ajusco con un promedio de 49 ppb de ozono troposférico, en el P.N desierto de los Leones observó un 6% de daño muy severo (DMS) , 47% (DS) y 47% (DM) con concentraciones de ozono promedio de 48 ppb, mientras que Zoquiapan presento un 33% (DS), 67% (DM) y 0% daño ligero (DL) con promedio de ozono en el ambiente de 37 ppb. Estos resultados exhiben el daño presente de ozono en *Pinus hartweggi*, pero al igual que Alvarado en el 2002, únicamente utiliza parámetros cualitativos y no contempla la misma zona del presente estudio. Cabe destacar que los estudios mencionados únicamente establecen periodos de estudio anuales y no establecen un comparativo por periodos estacionales.

10.3 Validez estadística del daño por ozono con escala Red-II

Se realizaron los análisis estadísticos para **Puntuación, Periodo y Daño en porcentaje** en las acículas de *Pinus spp.*, para ambos parajes de estudio. Se utilizaron los programas estadísticos SPSS 15.0.1 y Statgraphics Centurion XVI.I y se obtuvieron los siguientes resultados:

En la figura 31 se observa el comportamiento de puntuación versus daño por ozono en las acículas en **Paso de Cortes**, se obtuvo un **36% de daño en acículas con puntuación 1**, y un **28.46% puntuación 2**, lo que representan que en dicho Paraje y período se presenta un **daño de ligero a medio**.

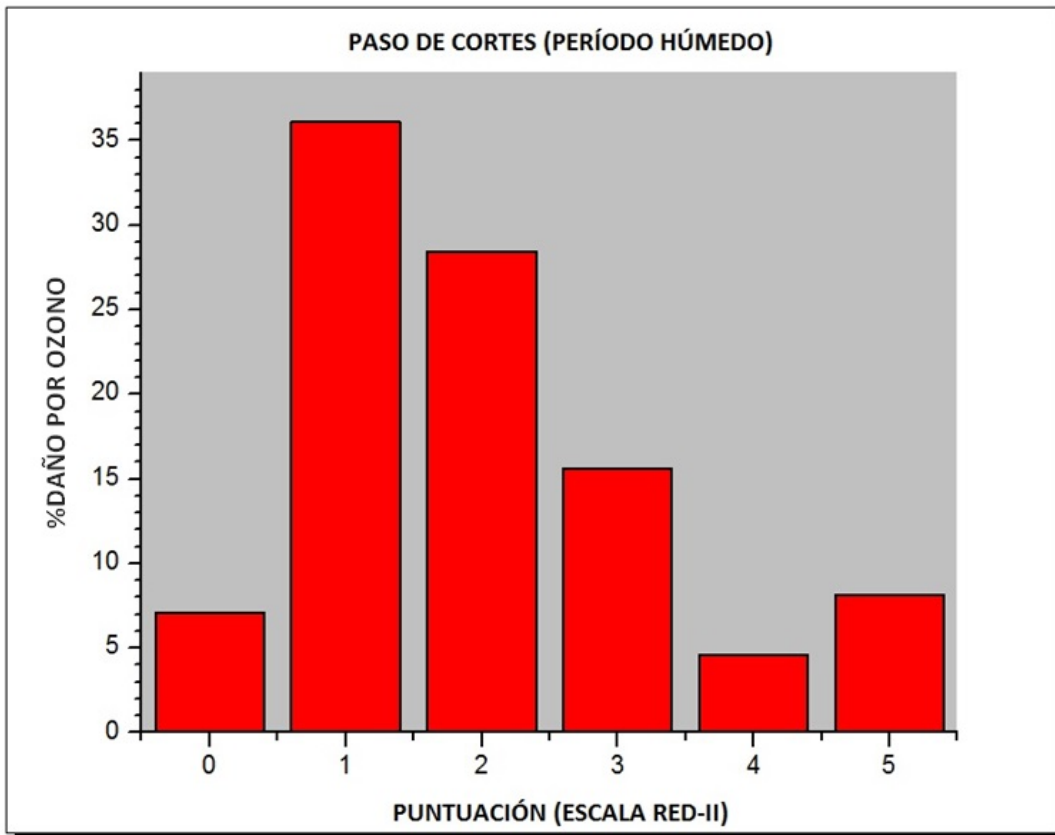


Figura 31. Daño por Ozono en el Paraje Paso de Cortes 2012 (húmedo) en el Parque Nacional Izta-Popo. Puntuación 0 a 1=daño ligero, 2 a 3= daño medio, 4 a 5= daño total y/o tejido muerto. Lab. Contaminación Atmosférica 2015.

El anterior comportamiento puede generarse debido a la disminución de la actividad fotoquímica en el ambiente (Grajales, 2002 & Percy *et al.* 2003), ya que en este periodo tienden a presentarse con mayor frecuencia los días lluviosos con un promedio de 70 mm a 200 mm en la ZMVM (CONAGUA, 2012), propiciando nublados en la región, disminuyendo los niveles de radiación y propiciando menores concentraciones de ozono troposférico en el aire y por consecuencia una menor depositación del mismo en las acículas en *Pinus spp.*

La información anterior se puede ratificar con la actividad estomática que presenta *Pinus spp.*, ya que los estomas son influenciados por la cantidad de agua disponible en el ambiente. La abertura estomática aumenta con la turgencia de las células oclusivas, que en cuanto cesa la turgencia los estomas se cierran, durante este período los estomas tiene un proceso de cierre que dura entre 10 y 15 minutos (Larcher, 1977), propiciando un menor tiempo de exposición del ozono sobre las acículas, disminuyendo la posibilidad que el ozono penetre el tejido vascular y generar un daño severo a las hojas y por consiguiente al género arbóreo.

En la figura 32 se observa el comportamiento de puntuación versus daño por ozono en las acículas en **San Rafael**, se obtuvo un **45.7% de daño en acículas con puntuación 5**, y un **19.27% puntuación 1**, lo que representan que en dicho Paraje y período se presenta un **daño ligero y un daño total** de manera principal.

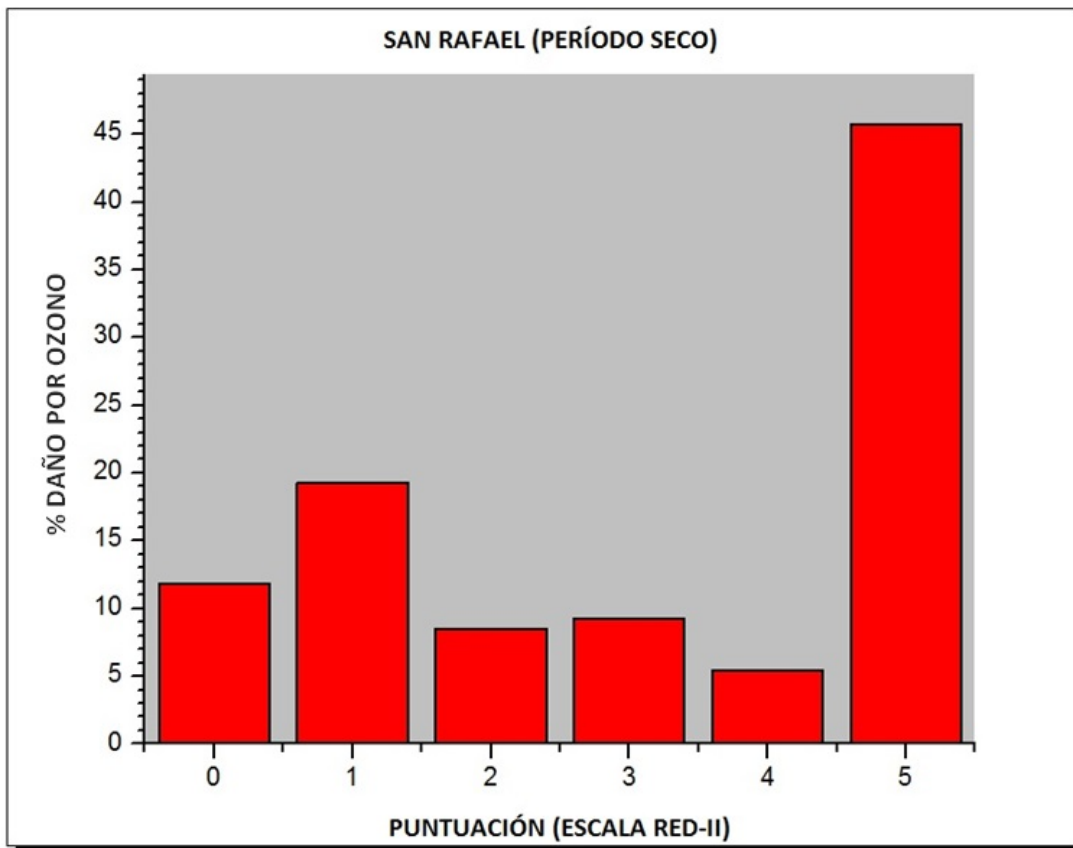


Figura 32. Daño por Ozono en el Paraje San Rafael 2013 (seco) en el Parque Nacional Izta-Popo. Puntuación 0 a 1=daño ligero, 2 a 3= daño medio, 4 a 5= daño total y/o tejido muerto. Lab. Contaminación Atmosférica 2015.

El 45.7% del daño registrado corresponde a un daño total (puntuación 5), este daño puede presentarse debido a que la acción fotoquímica que da origen al ozono troposférico en el ambiente es mayor durante el periodo seco, generado principalmente por actividad antropogénica, lo anterior por el aumento de las temperaturas durante este mismo periodo, esto como parte natural del ciclo estacionario del planeta. Todo los factores anteriores generan una mayor concentración de ozono troposférico, debido a que en este mismo período las acículas de *Pinus spp.* abren sus estomas con mayor velocidad debido a las altas temperaturas y a la escasa agua que se encuentra en forma de gas en el ambiente (Larcher, 1977), lo que favorece a una mayor penetración del ozono troposférico dentro de las hojas, entrando no solo con mayor

frecuencia, si no en concentraciones más elevadas respecto al periodo húmedo, presentando un mayor índice de daño en las hojas de *Pinus spp.* del Parque Nacional Izta-Popo durante este periodo.

La tendencia anterior se puede confirmar con lo reportado con Percy (2003), el cual establece que más del 80% de la contaminación total fluye durante la depositación seca, periodo en el que el ozono por acción de la radiación solar presenta un mayor grado de actividad. Lo que podría considerarse como un comportamiento similar en las acículas de *Pinus spp.* para el Parque Nacional Izta-Popo.

Este posible comportamiento se genera por acción del ozono como gas, entrando por los estomas en las células, causando afectaciones en procesos de respiración, generación de clorofila, fotosíntesis, osmosis, actividad metabólica, nutrición, actividad estomática e intercambio de gases, lesiones en las cutículas foliares causando lixiviación de iones (Na, Ca, K, Mg) (Willburn, 1991 Sandermmman, 2000), modificando la caída de la lluvia a través de las ramas como resultado de una copa en condición accidentada.

Por otra parte el 19.27% de daño con puntuación 1 registrado, se puede asociar al continuo reverdecimiento de *Pinus spp.*, por lo tanto son hojas aún más jóvenes que han sido ligeramente expuestas a elevadas concentraciones de ozono.

Los resultados obtenidos se pueden atribuir a la elevada emisión de gases atmosféricos de la ZMVM. Los cuales sobrepasan los límites permitidos por la en ese entonces NOM-020-SSA1-1993), ahora (NOM-020-SSA1-2014) la cual en ese periodo tenía como valor máximo 0.11 ppm,

este valor máximo se veía sobrepasado de 4 a 5 veces por día, durante 360 días del año (Bravo & Torres (2002).

El comportamiento del daño presente en ambos periodos (seco-húmedo) no se tiene registrado en algún análisis previo para el Izta-Popo o algún otro Parque Nacional en el país, debido a que existe escasa información entre los niveles de exposición al ozono y el daño presente en la copa de los árboles, probablemente por la dificultad de estimar la concentración del contaminante en entornos altamente variables y de gran extensión (González, 2010). Otra situación es que la síntesis del ozono está vinculada a emisión de No_x y esto solo sucede en las ciudades como Guadalajara, Monterrey y el Distrito Federal.

Ante la pérdida de follaje, la luz solar pasa de manera más directa hacia el suelo de los bosques, permitiendo el establecimiento de otras especies vegetales como *Trisetum spicatum*, *Festuca toluensis* y *Agrostis toluensis* disminuyendo la zona de crecimiento y distribución de los bosques de coníferas, propiciando la pérdida de masa forestal en el Parque Nacional Izta-Popo.

El daño a la vegetación de acuerdo con Colbeck y Mackenzie (1994) citado por Granados (2010) provoca la caída de las hojas, disminuyendo la copa en *Pinus spp.*, daño que está asociado al decline forestal, el cual está considerado como indicador de salud para los bosques. Salud que se está viendo afectada por la actividad humana de la región y que aun a pesar de grandes esfuerzos institucionales continua presentándose en el Parque Nacional Izta-Popo, área considerada Reserva Natural Protegida debido a su extensión, conservación e importancia ecológica para nuestro país.

En la figura 32 se puede observar que del total de registros de las acículas por escala numero y porcentaje, se determino con el diagrama de agrupación con un 45,3% del total de acículas

analizadas, determinando entre el índice 5 al 15% de la escala Red-II. En orden decreciente, el siguiente porciento fue 18.3 % del total de acículas analizadas y se ubico en el 25% y 35% de la escala RED-II. A manera de conclusión se determinó que los dos primeros nodos contienen el mayor número de registros en puntuaciones de ozono en las acículas, cuyo valor de $p \geq 0.0000$, la prueba de ji cuadrada confirma que las muestras pertenecen a la misma población.

□

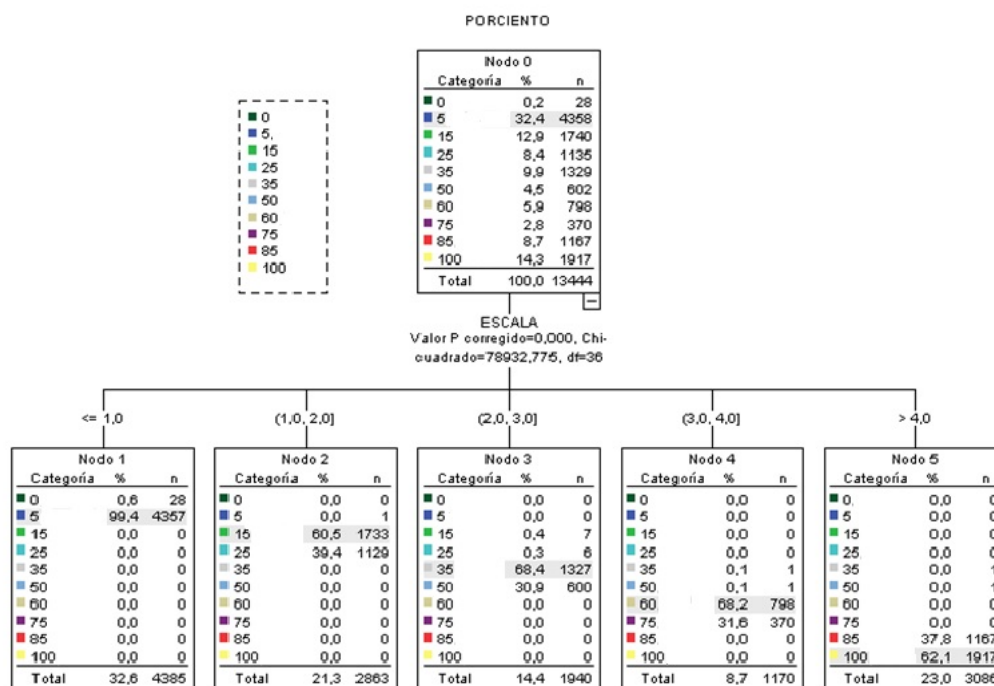


Figura 33. Diagrama de agrupación por numero y porcentaje de la Escala Red-II. Lab. Contaminación Atmosférica. Fes Zaragoza. UNAM. 2015.

Esta variación de Puntuación puede presentarse como se ha comentado anteriormente por el cambio de hojas que ocurre anualmente en los árboles, dañando de manera ligera a las hojas nuevas o jóvenes y las hojas maduras presentar un daño severo por tener mayor tiempo de exposición al ozono troposférico del ambiente.

En la Figura 33 se presentan los datos registrados para todo el estudio, se pueden observar los Nodos, que representan la variable “Puntuación de la Escala RED-II”, que va de cero a cinco, y en cada uno de ellos, se presentan en porcentaje el total de datos registrados para ambos parajes en el Parque Nacional Izta-Popo, logrando observarse que el 32.62% a nivel global del estudio, presenta una Puntuación 1, lo que indica que las acículas de *Pinus spp.* presentan principalmente un daño ligero para ambos períodos de estudio. También se observa que el 23% del compendio registrado, presenta Puntuación 5, lo que refiere que existe una amplia tendencia a encontrar hojas prácticamente carentes de vida.

En la figura 34 se muestra la dispersión de los registros del moteado en acículas de pino por efecto de ozono, podemos observar que prácticamente no hay dispersión en los registros del nivel uno y dos de la escala 1 (la marcas registran en número de observaciones), y cuyo registro está por debajo del 10% (eje de las abscisa). Para el resto de las escalas dos, tres y cuatro los registros de mínimo moteado jalan la media hasta coincidir con la desviación estándar. Así mismo queda los tangibles los registros out side, cuya magnitud aparece al margen dentro de las caja.

▫ **PORCIENTO**

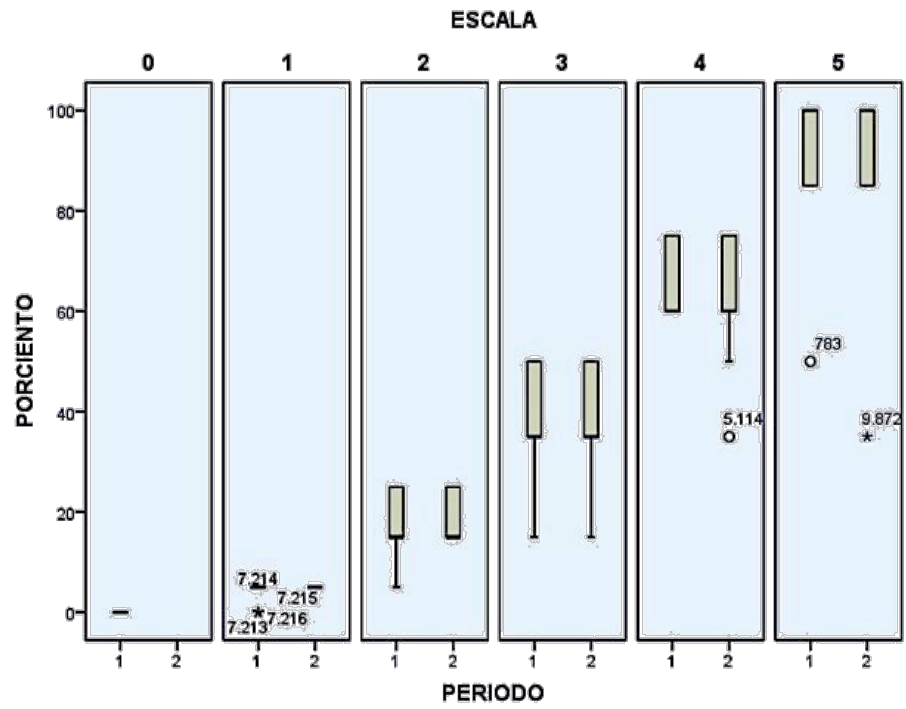


Figura 34. Registro de la dispersión de los datos Periodo vs. Porcentaje de daño. Lab. de Contaminación Atmosférica, Fes Zaragoza 2015.

11. Conclusiones

- La Escala RED-II permitió la evaluación del estado de salud en *Pinus spp.* por efecto del ozono troposférico en el Parque Nacional Izta-Popo., logrando demostrar que existe un daño foliar en los arboles, daño que se ratifica con el mapa de dispersión del ozono en la ZMVM. Lo anterior pese a que la Escala Red-II no fue elaborada considerando las concentraciones de ozono presentes en México, las cuales oscilan entre 0.11 ppm y hasta 0.45 ppm.
- Los registros más recientes de ozono en México superan a los registrados en la comunidad Europea, los cuales que oscilan entre 0.07 a 0.10 ppm OMS (2005), con lo cual se demuestra a nivel normativo que la NOM-021-SSA1 se sobre pasa de manera cotidiana en la ZMVM, siendo esta una norma únicamente de carácter referencial y sin ejecución.
- Los niveles de daño registrados en el paraje de San Rafael en el mes de abril 2013 (período seco), son superiores a los niveles registrados en el paraje de Paso de Cortes en el mes de septiembre (periodo húmedo), lo que refiere que la actividad fotoquímica del ozono troposférico es mayor en el periodo de secas.
- El género *Pinus spp.* presenta sensibilidad ante el depósito de ozono troposférico, por lo cual debería ser considerada como un indicador ambiental del Bosque Templado y en el caso particular del Parque Nacional Izta-Popo.
- El ozono troposférico no es el único contaminante atmosférico que se deposita en las hojas de los árboles y en general en la vegetación forestal. Sin embargo el daño que se

registro es únicamente expresado por el ozono en las hojas y por ello se deben de aplicar nuevas herramientas de estudio: como lo es el uso de la Escala Red-II para la determinación de los daños en campo presentes en la vegetación, lo que lograría obtener una herramienta práctica, valiosa, económica, complementaria para el mapeo y monitoreo del estado de salud de los bosques y partir de ahí establecer nuevas estrategias para la recuperación y mejoramiento de los bosques en México.

12. Recomendaciones

La Escala RED-II es una alternativa para el análisis sobre el estado de salud de los bosques en México. Sin embargo se exhorta a la re-calibración de la misma, para registrar información más veraz, de acuerdo a las concentraciones de ozono presentes en el país y no generalizar los daños a la vegetación en un solo patrón, tomando en cuenta que las comunidades vegetales se comportan dependiendo de las condiciones ambientales presentes en su entorno.

El aumento del número de muestras y periodos de tiempo, para monitorear de manera constante y clara el comportamiento del daño por ozono presente en *Pinus spp.*, ampliando más a detalle el estado de salud del Parque Nacional Izta-Popo.

Hacer estudios sobre moteo clorótico considerando ambos periodos de estudio (húmedo-seco) para un mejor registro del comportamiento del depósito por ozono en los parajes Paso de Cortes y San Rafael.

Hacer de la escala RED-II un índice de salud ambiental básico, aplicándolo a estudios en los Bosques de México, siendo esta una herramienta sencilla de transportar, fácil de manejar, con un muy bajo costo y además avalada por instituciones internacionales.

Analizar otros Bosques en el país, con el propósito de conocer con mayor amplitud y exactitud la salud de los bosques en el país. Logrando un mayor conocimiento científico en el área ambiental, con el cual se logre generar y aplicar nuevas estrategias para la recuperación de los bosques de México.

13. Bibliografía

Alvarado R. D., De la Isla B., Galindo A. J. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental Pollution*. 80. pp. 115-121.

Alvarado R. D., T. T. Hernández. 2002. Decline of sacred fir in the Desierto de los Leones National Park. *In: Urban air pollution and forests: resources at risk in the Mexico City air basin*. Feen M., Bauer, L.I. and Hernández, T. (eds). Springer-Verlag, N.Y.

Andrade, C. 1989. El ozono en la atmósfera, *Revista Creces*. Noviembre Depto. De Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. Santiago de Chile. Chile.

Badii M. H., A. Guillen, E. Cerna, J. Landeros, J. Valenzuela. Y. Ochoa. 2012. Estimación Poblacional por Muestreo de Distancia. *Rev. International Journal of Good Conscience*. 7(1) 85-96. UNLA. Coahuila, México.

Beaman, J. H. 1962. The Timberline of Iztaccíhuatl and Popocatépetl, México. *Ecology* 43: 377-385.

Bonneau M., Landmann G., 1989. ¿De qué está enfermo el bosque?. *Revista Mundo Científico (La Recherche)*. pp. 190 – 205. Barcelona, España.

Bravo, H. A., Pérez, M., Siliceo, M. L. 1958. Muestreo y análisis de gases en la atmósfera, Reporte Técnico, Dirección de Higiene Industrial, S. S. A., México, d. F.

Bravo, H. A., Torres J. R. 1985. Ozone Monitoring and Night Concentration Events at the Campus of the University of México. Paper 85-590 B. 4, 78th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association.

Bravo H. A., Torres J. R. 2002. Air pollution levels and trends in the México City Metropolitan Area. *In Fenn, M.E., de Bauer, L.I., Hernández-Tejeda, T. (Eds), Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Ecological Studies Series, vol. 156. Springer-Verlag, New York, pp. 121-159.

Briseño F. Y. 1989. Contaminación atmosférica de origen fotoquímico. Ciencia y Desarrollo; 15(88):pp. 67-73. México.

Calva V, G., Corona R. C. 1987. Reporte técnico de la oficina de factores físicos de la COCODER

CENICA. 1996. Primer informe sobre la calidad del aire en ciudades mexicanas 1996. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA). Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP, México.

Chapman, S. 1930. A Theory of Upper-Atmospheric Ozone. Memoirs of the Royal Meteorological Society. Great Britain. Vol. III No. 26. pp. 103 – 125

Cibrián, T. D., D. Alvarado R., S. E. García D. 2007. Enfermedades Forestales en México/ Forest Diseases in Mexico. Universidad Autónoma Chapingo; CONAFOR-SEMARNAT, México; Forest Service USDA, EUA; NRCAN Forest Service, Canadá y Comisión Forestal de América del Norte, COFAN, FAO. Chapingo, México. pp. 28-41.

CIEMAT. 2010. El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación. Unidad de contaminación Atmosférica. Madrid España.

CONABIO. 2015. http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/gran_familia/plantas/pinos.html

CONABIO*.2015. <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado.html>

CONAGUA. 2012. Reporte anual del clima en México 2012. Servicio Meteorológico Nacional. <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/analisis/reporte/Anual2012.pdf>

CONANP. 2013. Programa de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. México. pp125 Disponible en: http://iztapopo.conanp.gob.mx/documentos/programa_de_manejo_izta_popo.pdf

CONANP. 2014. http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/2014/Tutuacafinal.pdf

Critchfield, W., B. & E. L. little, Jr. 1966. Geographic distribution of the pines of the world. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Misc. Publ. 991. Washington, D.C. pp. 97

De Bauer, L. I., Hernández-Tejeda, T. 2006. A Review of Ozone-induced Effects on the forests of Central Mexico. Instituto de Recurso Naturales. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. México. pp. 446-453.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 1993. Norma Oficial Mexicana. “Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono (O3). Valor normado para la concentración de ozono (O3) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población”. NOM-020-SSA1-1993. Secretaria de Salud- Diario Oficial de la Federación. México. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/020ssa13.html>

Diario Oficial de la Federación (DOF). 2014. Norma Oficial Mexicana. “Salud ambiental. Valor permisible para la concentración de ozono (O3) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. NOM-020-SSA1-2014. Secretaria de Salud- Diario Oficial de la Federación. México. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/5451/SALUD/SALUD.html>

EPA. 2015. http://www.epa.gov/ttn/catc/cica/airq_s.html

EPA. 2008. Acuerdo de minuta 2008. National Ambient Air Quality Standards for Ozone. USA.

Eguiluz T. 1982. Clima distribución del género *Pinus* en México. *Ciencia Forestal* 38(7), Julio-Agosto, México.

Escobedo, F., Chacalo, A. 2008. Estimación Preliminar de la Descontaminación Atmosférica por el Arbolado Urbano de La Ciudad de México. *Interciencia*, Vol. 33. No. 1. Venezuela. pp. 29-33.

Fernández, G. O. (1999). Patrones de exposición a PM10 y ozono en una cohorte de niños escolares de la ciudad de México. *Salud Pública de México*.

Finlayson-Pitts, B. J., & Pitts Jr, J. N. 1986. Atmospheric chemistry. Fundamentals and experimental techniques. Wiley New York., U.S.A.

Gaffney, J. S., Marley, N. A., Cunningham, M.M., Doksey, P. V. 1999. Measurements of peroxyacyl nitrates (PANS) in Mexico City: implications for megacity air quality impacts on regional scales. *Atmospheric Environment* 33: 5003-5012. USA.

Garfias, J., González, R. 1992. Air Quality in México City. Subsecretaría de Ecología, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Facultad de Química. UNAM. D.F. México.

González, F. I. 2009. Flujos estomáticos de ozono y sus efectos sobre la vegetación: Relaciones dosis respuesta. Tesis doctoral inédita. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Ecología. Madrid. España.

González-Medina, R. E., M Mendoza B. y Alvarado-Rosales D. 2010. Exposición a ozono en relación a vitalidad en un bosque de oyamel (*Abies religiosa* (kunt) Schl. & Cham). Rev. Madera y Bosques 16 (4): 7-19 (CONACYT), Ciudad de México, México.

Gidi, B. I., Cicero, F. P., Flores A. L., Hernández T. T., Alegre, G. A., Delgadillo, R., B. 1990. Biomonitorio Prospectivo de Ozono en la Lona Metropolitana del Valle de México. Colegio de Postgraduados de Chapingo. Campus Montecillo, Montecillo Texcoco, Estado de México. México. pp. 113-126.

Grajales, C. C. 2002. Comportamiento del sotobosque en respuesta al ozono. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, México: 2002.

Grant, William B. 1996. A brief overview of the effects of air pollution (acid deposition and ozone exposure) on trees and forests. Forest List Server. Metla Finland.

Guderian R., Becker K. H., Löbel J., Fricke W., Schurath, U. 1985. Air pollution by photochemical oxidants: formation, transport, control and effects on plants. Spring-Verlag. Ecological studies 52. pp. 123. Heidelberg. Germany.

Gutierrez, E., Trejo, I. 2014. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. Instituto de Geografía. UNAM. Rev. Mexicana de Biodiversidad 85: 179-188.

Halbwachs, G. 1984. Organismal Response of Higher Plants to Atmospheric Pollutants: Sulphur Dioxide and Fluoride. Botanisches institute der Universität für Bonderkultur, Gregor Mendel-Strasse 33, A-1180 Wien, Austria.

Hernández G, M. A., Granados, S. D. 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y El Impacto Ecológico-Social De Su Deterioro. Universidad Autónoma Chapingo. México. Rev. Chapingo. Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. 12, núm. 2. pp. 101-109

Hernández T, T. 2014. Monitoreo e impacto del ozono atmosférico en follaje y polen de Pinus hartweggi Lindl. Del Valle de México. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. Estado de México. 25-45 p.

Hernández T, T.; L. I. De Bauer. 1984. Evolución del Daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* y *P. montezumae* var. *Lindleyi* en el Ajusco, D.F. Centro de Fitopatología. Colegio de Postgraduados Chapingo México. Rev. Agrociencia. Volumen 56. pp. 183-194.

INIFAP. 2012. Ecosistemas Forestales en cordilleras Latinoamericanas y herramientas para la adaptación de la gestión al cambio climático. México.

Jacobson, J. S., Hill, D. C., 1970. Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial Atlas. Pittsburgh, Air Pollution Control Association.

Jáuregui, O.E. 1989. The dust storms of Mexico City. Int. J. Climatol. 9, 169-180.

Jáuregui, O.E. 1993. Algunas consideraciones del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. UNAM. Rev. Int. Contam. Ambient, 9 (3): pp. 12-24, Ciudad de México, México.

Krupa, S.V., Tuttle, C.P., Andersen, F. L., Booker, K. O., Burkey, A. H. 2000. Ambient ozone and plant health. USA. Plant Disease 85 (1): 5-11

Krupa, S.V. 1977. Impact of air pollutants on terrestrial vegetation (Course notes). Department of plant pathology, University of Minnesota, St. Paul, MN., U.S.A. pp. 173.

Larcher, W. 1977. Ecofisiología vegetal. Ed. Omega. Universidad de Innsbruck. Barcelona. España. 118-131 p.

MacDonald G. J. F. 1972. Uses of Environmental Indices in Policy Formulation. Indicators of Environmental Quality. Environmental Science Research Volume 1, Washington, D.C. USA. p 15-21.

Manning J. W., Feder A. W. 1980. Biomonitoring Air Pollutants with Plants. Applied Science Publishers Ltd. London. England. pp. 142.

Martínez H. E. 2012. Tesis Registro del daño por ozono y senescencia en *Abies religiosa* en dos parajes de Parques Nacionales: Iztaccíhuatl- Popocatepetl y Zoquiapan. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. pp. 62.

Middleton, J., Kendrick, J. J. and Schwalm, H., 1950. Injury to herbaceous plants by smog on air pollution. *Plant Dis. Rep.*, 34: pp. 245-252.

Miller, P.R. 1983. Ozone effects in the San Bernardino National Forest. In: *Air pollution and the productivity of the forests, symposium proceedings* (pp. 161-197). State College, PA, Pennsylvania State University Press.

Miller P. R., Parmeter, J. R., Brigitta H. F., Martínez C. W.1969. Ozone Dosage Response of Ponderosa Pine Seedlings. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 19:6, pp. 435-438. University of California. USA.

Miller, P.R., Millecan, A.A. 1971. Extent of oxidant air pollution injury to some pines and other conifers in California. *Plant disease Reporter*. 55: 555-559.

Miller, P.R. 1973. Oxidant-induced community change in a mixed conifer forest. En: *Air pollution damage to vegetation*. J. A. Naegele (Ed). *Adv. Chem. Ser.* 122: 101-117. Am. Chem. Soc. Whashington, U.S.A.

Miller, P.R., McBride, JR, Schilling, SL, Gomez, AP. 1989. Trend of ozone damage to conifer forests between 1974 and 1988 in the San Bernardino Mountains of southern California. In: Olson, RK, Lefohn, AS Eds. (1989) *Effects of Air Pollution on Western Forests*. Air & Waste Management Association, Pittsburgh, pp. 309-323.

Noyola R. J.; Méndez, L. G. 2012. Tlalmanalco. *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. Disponible en: <http://e-local.gob.mx/work/templates/encino/EMM15mexico/municipios/15103a.html>

Pardos, J. A. 2006. *La contaminación atmosférica y los ecosistemas forestales*. Escuela Tecnológica Superior de Ingenieros de Montes. Unidad Politécnica de Madrid. España.

Percy, K.E., Legge, A. H., Krupa, S. V. 2003. Tropospheric ozone: A continuing threat to global forests?. *Air Pollution, Global Change and Forests in the New Millennium*. Elsevier. Uk.

Perry, J. P. Jr., A. Graham y M. D. Richardson. 1998. The history of pines in México and Central America. *In:* M. D. Richardson (ed). Ecology and Biogeography of *Pinus*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. pp: 137-149.

PRONATURA. 2015. www.pronaturaveracruz.org/ecoforestal.

RAMA. 1996. Secretaria del Medio Ambiente., Red Automática de Monitoreo Atmosférico. Tendencias del Ozono en las estaciones de la Red Automática de Monitoreo de la Ciudad de Mexico, Enero 1986- septiembre 1996.

Rebbeck, J. 1996. Chronic Ozone Effects on Three Northeastern Hardwood Species: Growth and Biomass. USDA Forest Service. Vol. 26. Canada. pp. 1788-1798.

Rzedowski J. 1986. La vegetación de México. Ed. Limusa. México. pp. 432

Sally J. Campbell, Ron Wanek, and John W. Coulston. 2007. Ozone Injury in West Coast Forests: 6 Years of Monitoring. United States Department of Agriculture (USDA). Forestry Sciences Laboratory. Portland, Oregon. USA. pp. 53

Sánchez G. B., Velissariou D., Barnes J. D., Inclán R., Peña J. M., Davison A., 1992. Daños visibles por ozono en acículas de *Pinus Halepensis Mill.* en Grecia y España. Revista Ecología No. 6. Madrid, España. pp. 131 - 134.

Sandermann Jr., H. 2000. Ozone/biotic disease interactions: molecular biomarkers as a new experimental tool. Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit. Institut für Biochemische Pflanzenpathologie. Oberschleißheim, Germany.

SEDUE. 1989. Consulta para el programa nacional de conservación ecológica y de protección al ambiente 1988-1994: lineamientos, documento de la Secretaría de Desarrollo urbano y Ecología, México, D.F.

SEMARNAP. 1996. Programa para Mejorar la Calidad del Aire en Valle de México. 1995-2000. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, Secretaria de Salud. pp. 47-53.

SEMARNAT. 2005. Índices Básicos del Desempeño Ambiental de México. SEMARNAT. México.

SEMARNAT. 2011. Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010.

SEMARNAT. 2013. Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatépetl. México, D.F. 185p

Simon, E., Braun, M., Vidic, A., Bogyó, D., Fábíán, I., Tóthmérész, B. 2011. Air pollution assessment based on elemental concentration of leaves tissues, foliage dust along, and urbanization gradient in Vienna. Department of ecology, University of Debrecen, H-4010 Debrecen Hungary. *Environmental Pollution* 2011, May: 159 (5) 1229-33.

SNIA. 2011. Índices Básicos del Desempeño Ambiental de México. SEMARNAT. México. Disponible: http://app1.semarnat.gob.mx/geia/indicadores_2011/conjuntob/00_conjunto/marco_conceptual.html

Strauss, W., Mainwaring, S. J. 1990. Contaminación del Aire: Causas Efectos y Soluciones. Depto. de Ciencias industriales. Universidad de Melbourne. Ed. Trillas. México.

Tejeda, H. T. 2014. Monitoreo e impacto del ozono atmosférico en follaje y polen de *Pinus hartwegii* LINDL. Del Valle de México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillos Texcoco, Estado de México. pp. 1-45.

Thomas, W. A. 1972. Indicators of Environmental Quality: An Overview. Environmental Program, Oak Ridge National Laboratory, Environmental Indices Group, Oak Ridge, Tennessee, USA. pp. 1-5

Treshow, M. 1984. Diagnosis of Air Pollution Effects and Mimicking Symptoms, Department of Biology, University of Utah, Salt Lake City, Utah. USA.

UNECE. 2010. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. United Nations Economic Commission for Europe. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests). Part VIII-Assessment of Ozone Injury. Hamburg. Germany. 22p

Vargas M. F. 1997. Parques Nacionales de México. Volumen: II Zonas Norte y Sur. INE-SEMARNAP. pp. 760

Wellburn, A. 1991. Air pollution and acid rain: the biological impact. Longman Scientific & technical Editions, ltd. Singapore. 274 p.

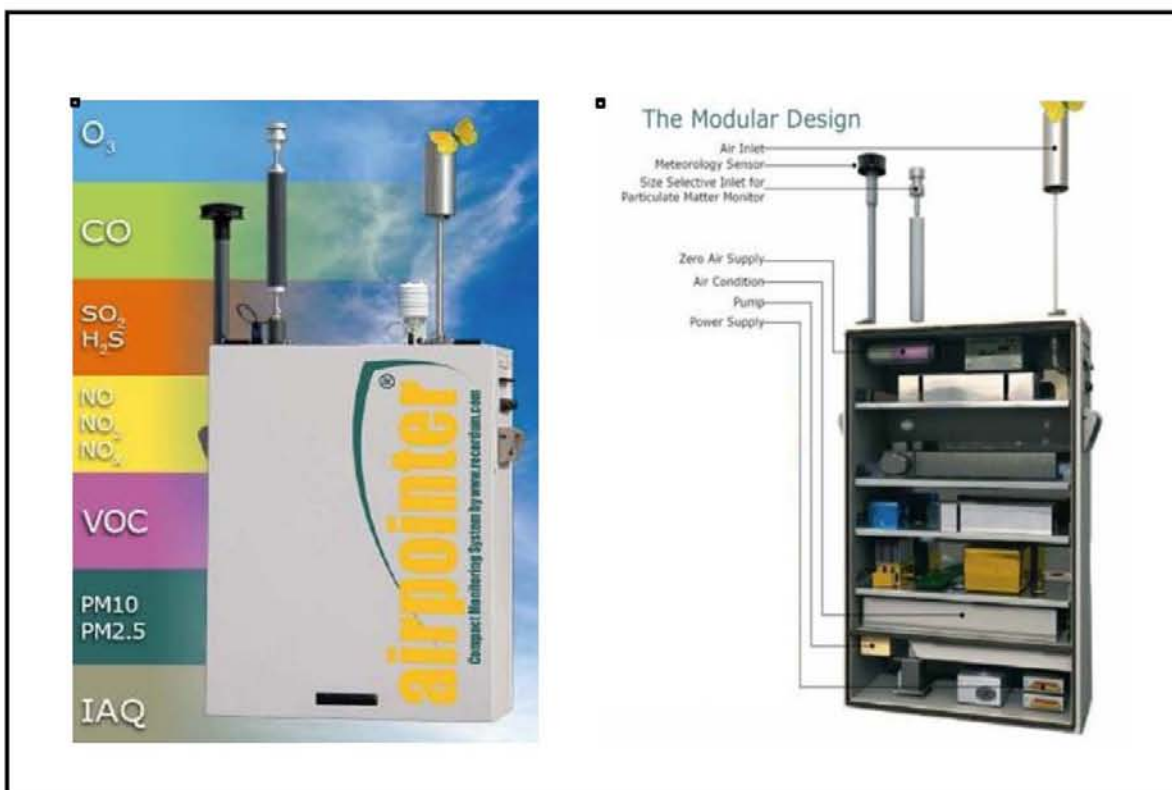
WMO. 2007. *Scientific assessment of ozone depletion: 2006*, Global ozone research and monitoring project—report núm. 50. Switzerland. 2007.

Zuk M. M., Tzintzun C. G., Rojas B. L. 2007. Tercer Almanaque de datos y Tendencias de la Calidad del Aire en Nueve Ciudades Mexicanas. INE-SEMARNAT. pp. 116.

ANEXOS

ANEXO I. SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO AIRPOINTER®

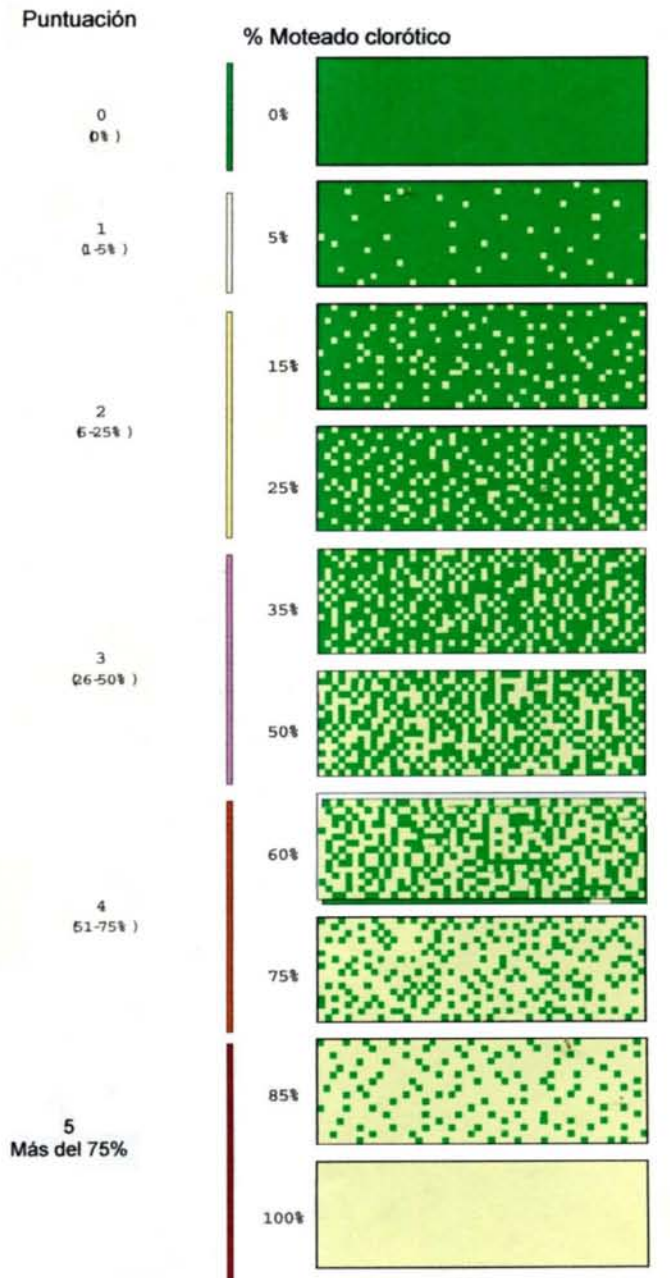
(RECORDUM, 2015).



ANEXO II.

ESCALA RED CE NIVEL-II (UNECE, 2010).

□



Moteado clorótico representado en amarillo

ANEXO III.

GRAFICA CONCENTRACIONES DE OZONO EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO 1990-2008. (SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE DEL DISTRITO FEDERAL, 2008).



ANEXO IV.

TABLA DE NUTRIENTES, CAPTACIÓN, DISTRIBUCIÓN, INCORPORACIÓN Y MODO DE ACTUACIÓN (FINCK, 1969, *En Larcher, 1977*).

Bioelementos	Compuesto en que se encuentra en el suelo	Disponibilidad en el suelo	Captación como	Incorporación a la planta	Función en la planta	Enriquecimiento preferencial	Posibilidad de distribución	Sintomas de deficiencia
K	Feldespato, mica y arcilla	Adsorbido > disuelto	K ⁺	Disuelto como ion (sobre todo en las vacuolas) y adsorbido	Efectos coloido-químicos (requiere hidratación); sinergismo con NH ₄ ⁺ , Na ⁺ ; antagonismo con Ca ²⁺ . Activación enzimática (fotosíntesis)	Zonas de división, tejidos jóvenes, parénquima cortical, lugares con metabolismo activo	Buena	Dificultades en la economía hídrica (sequía), raquitismo en las hojas (marchitas)
Mg	Carbonatos (dolomita), silicatos (augita, anfíboles, olivina, sulfatos, cloruros)	Soluble > adsorbido, deficiencia en suelos ácidos	Mg ²⁺	Como ion disuelto y absorbido formando complejos, en forma orgánica con la clorofila y pectanas, componente de enzimas	Regulación de la hidratación (antagonismo con Ca ²⁺), metabolismo energético (fotosíntesis, transferencia de fosfatos), sinergismo con Mn, Zn	Hojas	Buena parte	Rigidez, clorosis intercostales de hojas adultas
Ca	Carbonatos, yeso, fosfatos, silicatos (feldespatos, augita)	Adsorbido > disuelto, deficiencia en suelos muy ácidos	Ca ²⁺	Como ion, como sal disuelta, cristalizado e incrustado, como quelato, en unión orgánica con pectanas	Regulación de la hidratación (antagonismo con K ⁺ , Mg ²⁺), activador enzimático	Hojas, cortezas de árboles	Muy mala	Crecimiento en división dañado (células pequeñas)
Cu	Sulfuros, sulfatos, carbonatos	Adsorbido, móvil en condiciones ácidas > básicas, fijación fuerte al humus	Cu ²⁺ y quelatos de Cu	Formación de complejos, componente enzimático	Metabolismo energético (fotosíntesis, oxidasa), metabolismo del N, metabolismo secundario	Ramas leñosas	Mala	Sequías agudas, clorosis de hojas jóvenes
Mo	Molibdatos, en silicatos	Adsorbido, móvil en condiciones básicas > ácidas	MoO ₄ ²⁻	En compuestos órgano-metálicos, componente enzimático	(reductasas), Metabolismo del N del P		Mala	Dificultades en el crecimiento y deformación de los vástagos
B	Turmalina y boratos	Adsorbido > disuelto, disponibilidad en ácido > básico	HBO ₃ ⁻ , H ₂ BO ₃ ⁻	Formación de complejos con hidratos de carbono, formación de ésteres	Transporte de hidratos de carbono y su metabolismo, activación del crecimiento (crecimiento del tubo polínico)	del tallo Hojas, ápices	Mala	Dificultades en el crecimiento (necrosis meristemáticas), poca ramificación radical, necrosis del floema, dificultad en la fructificación
Cl	Sales, silicatos	Disuelto > adsorbido	Cl ⁻	Como ion libre, almacenado casi siempre en vacuolas	Efectos coloidoquímicos (fuertemente hidratante), activación enzimática (fotosíntesis)	Hojas	Buena	

(CONTINUACIÓN) ANEXO IV.

TABLA DE NUTRIENTES, CAPTACIÓN, DISTRIBUCIÓN, INCORPORACIÓN Y MODO DE ACTUACIÓN (FINCK, 1969, *En Larcher, 1977*).

Bioelementos	Compuesto en que se encuentra en el suelo	Disponibilidad en el suelo	Captación como	Incorporación a la planta	Función en la planta	Enriquecimiento preferencial	Posibilidad de distribución	Síntomas de deficiencia
Fe	Sulfuros, óxidos, fosfatos, silicatos (argita, anfíboles, biotita)	Adsorbido > móvil, fijado en suelos calcáreos	Fe ³⁺ , quelatos de Fe (II)	En uniones metalo-orgánicas, componente de enzimas	Metabolismo energético (oxidorreducción) y metabolismo del N	Hojas	Mala	Clorosis intercostales hasta coloración blanca de las hojas jóvenes (nerviación verde en las hojas)
Mn	Oxidos amorfos (pirulósita), carbonatos, en silicatos	Adsorbido > soluble, mejores disponibilidades en suelos ácidos, enriquecimiento en condiciones reductoras	Mn ²⁺ , quelatos de Mn	En compuestos organometálicos y complejos, componente de enzimas	Metabolismo energético (oxidasa, fotosíntesis, transferencia de fosfatos), metabolismo del N; sinergismo con Mg, Zn	Hojas	Mal en parte	Inhibición del crecimiento, necrosis
Zn	Fosfatos, carbonatos, sulfuros, óxidos, en silicatos	Adsorbido > disuelto, movilización en condiciones ácidas > básicas	Zn ²⁺ , quelatos de Zn	Formación de complejos	Activador enzimático, metabolismo energético (deshidrogenasas), síntesis proteica, formación de compuestos para el crecimiento	Raíz, vástago	Mala	Inhibición del crecimiento, coloración del follaje, dificultades en la fructificación
N	Compuestos orgánicos, ácido nítrico	Suministros por descomposición microbiana, NH ₄ ⁺ adsorbido a minerales de arcilla y humus, NO ₃ ⁻ en disolución	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ (urea)	Libre como ion NO ₃ ⁻ (vacuolas), en compuestos orgánicos, en proteínas, ácidos nucleicos, metabolitos secundarios	Componente importante del protoplasma y de las enzimas	Brotos jóvenes, yemas, semillas, órganos de reserva	Buena, sobre todo en forma orgánica	Crecimiento raquíptico o enano, rigidez, esclerosis. Relación vástago-raíz a favor de la raíz, amarilleo temprano de las hojas.
P	Compuestos orgánicos, fosfatos de Ca, Fe y Al	Como PO ₄ ³⁻ , HPO ₄ ²⁻ , poco soluble, adsorbido y formando quelatos; suministro bajo por microorganismos	HPO ₄ ¹⁻ /HPO ₄ ²⁻	Como ion libre, en unión primaria, nucleótidos, fosfátidos, fitina	Metabolismo energético y síntesis (fosforilación)	En órganos reproductores más que en los vegetativos (granos de polen)	Buena en forma orgánica	Dificultades en los procesos reproductores (retraso en la floración), rigidez, coloración bronce violeta de hojas y tallo
S	Compuestos orgánicos, minerales sulfurosos, sulfatos de Ca, Mg, Na	SO ₄ ²⁻ muy soluble, poco adsorbido	SO ₄ ²⁻ del suelo (SO ₂ de la atmósfera)	Como ion libre, en compuestos como SH o grupos SS y como éster en proteínas, coenzimas y metabolitos secundarios	Componente del protoplasma y enzimas	Hojas, semillas	Buena en forma orgánica, mal en iónica	Semejante a la deficiencia en N