

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

CARACTERIZACIÓN DEL GRADIENTE ALTITUDINAL DE OZONO Y SU IMPACTO EN BOSQUES ALEDAÑOS A LA CIUDAD DE MÉXICO

EDUARDO VILLASEÑOR GONZÁLEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE :

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

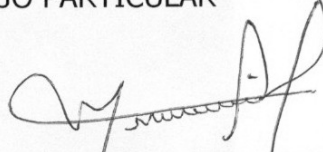
2011

La presente tesis titulada "**Caracterización del gradiente altitudinal de ozono y su impacto en bosques aledaños a la Ciudad de México**", realizada por el alumno **Eduardo Villaseñor González** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
FORESTALES**

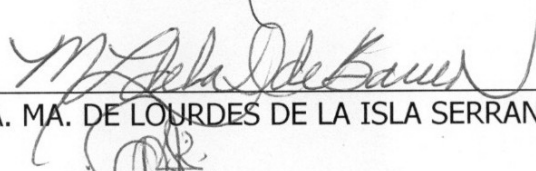
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



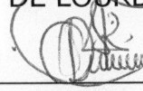
DR. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR



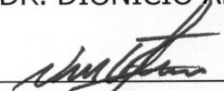
DRA. MA. DE LOURDES DE LA ISLA SERRANO

ASESOR



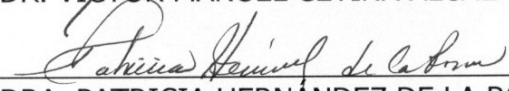
DR. DIONICIO ALVARADO ROSALES

ASESOR



DR. VÍCTOR MANUEL CETINA ALCALÁ

ASESOR



DRA. PATRICIA HERNÁNDEZ DE LA ROSA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Febrero de 2011

El presente trabajo se realizó gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Proyecto 61559-2006. Fisiología del Proceso de Declinación de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones. Parte del financiamiento provino de la Línea Prioritaria de Investigación 8: Impacto y Mitigación del Cambio Climático. La estancia en España fue financiada por el proyecto GALOPA: Caracterización de Gradientes Altitudinales de Ozono en Comunidades Pascícolas, con fondos de la fundación BBVA de España, a través del Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales de la Universidad Autónoma de Barcelona y el Centro de Investigaciones Medioambientales y Tecnológicas, dependiente del Ministerio de Educación y Ciencia español.

Agradecimientos

Al Dr. Miguel Ángel López López por su apoyo para las salidas a campo y sus instrucciones en las evaluaciones preliminares de sitios con potencial para ser estudiados, por su paciencia y su gran calidad humana; por el apoyo brindado en momentos difíciles

A la Dra Ma. De Lourdes Bauer por escuchar mis inquietudes para expandir mi conocimiento sobre los daños producidos por el ozono y otros contaminantes en las zonas forestales.

Al Dr. Dionicio Alvarado Rosales por su apoyo con instrumental de manejo delicado y su confianza en mi capacidad para operarlo.

A los doctores Patricia Hernández de la Rosa y Víctor Manuel Cetina Alcalá por su incansable labor y las numerosas horas que dedicaron a la revisión de la tesis y sus valiosos comentarios.

A los doctores Josep Peñuelas Reixach y Angela Ribas Artola de la Universitat Autònoma de Barcelona por el tiempo y paciencia que tuvieron para iniciarme en el manejo de los muestreadores pasivos y los criterios para la selección de sitios donde ubicarlos independientemente de la zona de estudio.

A los doctores Benjamín Sánchez Gimeno, Rocío Alonso, Victoria Bermejo, Susana Elvira, Javier Sanz y Fernando Martín, del Centro de Investigaciones Medioambientales y Tecnológicas de España por su interés y disposición a ayudarme a despejar dudas y por los materiales brindados para su aplicación en México.

A mis padres y hermanos quienes me brindaron apoyo en momentos difíciles para continuar con mis estudios, tanto en este doctorado como en tiempos ya un poco lejanos, cuando comenzaba a dar mis primeros pasos en la formación universitaria.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo.

	Contenido	Página
	Índice de Figuras.....	vii
	Índice de Cuadros	x
I.	Resumen	1
II.	Abstract	3
III.	Introducción general.....	5
1.	Capítulo 1. Concentración de ozono en gradientes altitudinales en bosques de <i>Abies religiosa</i> en dos regiones del valle de México ...	9
1.1.	Resumen	9
1.2.	Abstract	9
1.3.	Introducción.....	10
1.4.	OBJETIVOS	13
1.5.	HIPÓTESIS	13
1.6.	MATERIALES Y MÉTODOS	13
1.6.1.	Área de Huixquilucan	14
1.6.2.	Área Cerro Tláloc	15
1.6.3.	Selección de sitios	16
1.6.4.	VARIABLES evaluadas	17
1.7.	RESULTADOS	21
1.7.1.	Concentraciones y gradientes altitudinales	21
1.7.2.	Comparación de medias de la concentración promedio de ozono entre campañas para cada una de las áreas de estudio	28
1.8.	DISCUSIÓN.....	33
1.9.	CONCLUSIONES	36
1.10.	LITERATURA CITADA	37
2.	Capítulo 2 Índices de exposición al ozono ambiental y daño a la salud de <i>Abies religiosa</i> ...	41
2.1.	Resumen	41
2.2.	Abstract	42
2.3.	INTRODUCCIÓN	43
2.4.	OBJETIVOS	47

2.5.	HIPÓTESIS	47
2.6.	MATERIALES Y MÉTODOS	47
2.6.1.	Monitoreo continuo	48
2.6.2.	Distribuciones horarias de ozono	49
2.6.3.	Procedimientos de cálculo para el AOT40	50
2.6.4.	Aplicación de la Escala de Miller modificada por Alvarado	51
2.6.5.	Correlaciones entre índices de ozono.....	56
2.7.	RESULTADOS	56
2.7.1.	Campaña estación lluviosa	56
2.7.2.	Campaña fría-seca	60
2.7.3.	Campaña seca cálida	63
2.7.4.	Censo de oyameles y escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989).....	67
2.7.5.	Correlación entre índices SUM00, AOT40, SUM60 y SUM80 de las tres campañas contra calificación de cada sitio en la Escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989)	68
2.8.	DISCUSIÓN.....	76
2.9.	CONCLUSIONES	81
2.10.	LITERATURA CITADA	82
3.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	86
ANEXO A	Promedios de AOT40, SUM00, SUM60 y SUM80 para 21 días usando datos de las tres campañas	87
ANEXO B	Distribuciones horarias de ozono por monitoreo continuo	90

	Índice de Figuras	Página
Figura 1.	Localización de las áreas de estudio, Monte de las Cruces (MC) y Cerro Tláloc (MT).....	14
Figura 2.	Área del Monte Las Cruces (MC), cerca de Huixquilucan, Estado de México, mostrando la ubicación de los sitios de estudio.	15
Figura 3.	Área del Cerro Tláloc (MT), cerca de San Pablo Ixayoc, Texcoco, Estado de México	16
Figura 4.	Sistema de protección en campo para los monitores continuos	19
Figura 5.	Concentración de ozono vs altitud, en el Monte de Las Cruces, Huixquilucan, Estado de México. Septiembre-Octubre 2007 (sin considerar datos de 3300 msnm).....	22
Figura 6.	Concentración ozono vs altitud, en el Monte de Las Cruces Huixquilucan, Estado de México. Septiembre-Octubre 2007 (con datos de 3,300 msnm).....	22
Figura 7.	Concentración ozono vs altitud, en el Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México. Septiembre-Octubre 2007.....	23
Figura 8.	Concentración de ozono vs altitud, en el Monte de Las Cruces, Huixquilucan, Estado de México. Noviembre-Diciembre 2007.....	24
Figura 9.	Concentración de ozono vs altitud, en el Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México. Noviembre-Diciembre 2007.....	25
Figura 10.	Concentración de ozono vs altitud, en el Monte de Las Cruces, Huixquilucan, Estado de México. Abril 2008.....	26

Figura 11.	Concentración de ozono vs altitud, en Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México. Abril 2008.	27
Figura 12.	Árbol con síntomas severos (mortalidad de ramas, poco follaje).....	52
Figura 13.	Rama mostrando el follaje de años anteriores totalmente bronceado. Este follaje no realiza fotosíntesis y comúnmente se desprende del tallo en forma prematura	53
Figura 14.	A la izquierda un ejemplar de A. religiosa con escaso crecimiento y copa menor al 20%. A la derecha, en el óvalo, se observan árboles de Abies religiosa en muy buen estado de cobertura de copa y salud	54
Figura 15.	Comparación de SUM00 entre las dos áreas de estudio, en la campaña lluviosa	56
Figura 16.	Comparación de AOT40 entre las dos áreas de estudio, en la campaña lluviosa	57
Figura 17.	Comparación de SUM60 entre las dos áreas de estudio, en la campaña lluviosa	58
Figura 18.	Comparación de SUM80 entre las dos áreas de estudio, en la campaña lluviosa	59
Figura 19.	Comparación de SUM00 entre las dos áreas de estudio, en la campaña seca fría	60
Figura 20.	Comparación de AOT40 entre las dos áreas de estudio, en la campaña seca fría	61
Figura 21.	Comparación de SUM60 entre las dos áreas de estudio, en la campaña seca fría	61
Figura 22.	Comparación de SUM80 entre las dos áreas de estudio en la campaña seca fría	62
Figura 23.	Comparación de SUM00 entre las dos áreas de estudio en la campaña cálida seca	63
Figura 24.	Comparación de AOT40 entre las dos áreas de estudio en la campaña cálida seca	64

Figura 25.	Comparación de SUM60 entre las dos áreas de estudio, en la campaña cálida seca	65
Figura 26.	Comparación de SUM80 entre las dos áreas de estudio, en la campaña cálida seca	65
Figura 27.	SUM00 vs daño en la escala de Miller en el área del Cerro Tláloc (MT).....	69
Figura 28.	SUM00 vs daño de la escala de Miller en el área del Monte de Las Cruces (MC).....	70
Figura 29.	AOT40 vs daño de la escala de Miller en el área del Cerro Tláloc (MT).....	71
Figura 30.	AOT40 vs daño de la escala de Miller en el área del Monte de Las Cruces (MC).....	72
Figura 31.	SUM60 vs daño de la escala de Miller en el área del Cerro Tláloc (MT).....	72
Figura 32.	SUM60 vs daño de la escala de Miller en el área del Monte de Las Cruces (MC).....	74
Figura 33.	SUM80 vs daño de la escala de Miller en área del Cerro Tláloc (MT)	74
Figura 34.	SUM80 vs daño de la escala de Miller en área de Monte de Las Cruces (MC).....	75

Índice de Cuadros		Página
Cuadro 1.	Prueba de t para comparación de medias de las observaciones entre MT y MC en la campaña lluviosa	23
Cuadro 2.	Prueba de t para comparar las medias entre el área MT y MC durante la campaña seca fría	25
Cuadro 3.	Prueba de t para comparación de las medias entre MC y MT en campaña seca cálida	27
Cuadro 4.	Análisis de comparación de medias de la concentración promedio de ozono entre la campaña de verano y la de invierno para las muestras tomadas en el Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México	29
Cuadro 5.	Análisis de comparación de medias de la concentración promedio de ozono entre la campaña de verano y la de invierno para las muestras tomadas en el Monte de las Cruces, Huixquilucan, Estado de México	29
Cuadro 6.	Análisis de comparación de medias entre la campaña de verano y la de primavera para las concentraciones de ozono promedio en Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México	30
Cuadro 7.	Análisis de comparación de medias entre la campaña de verano y la de primavera para las concentraciones de ozono promedio en Monte de las Cruces, Huixquilucan, Estado de México	31
Cuadro 8.	Análisis de comparación de medias entre la campaña de invierno y la de primavera para las concentraciones de ozono promedio en Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México	32

Cuadro 9.	Análisis de comparación de medias entre la campaña de invierno y la de primavera para las concentraciones de ozono promedio en Monte de las Cruces, Huixquilucan, Estado de México	32
Cuadro 10.	Calificación de la salud del oyamel de acuerdo a la escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989)	55
Cuadro 11.	Promedios de calificación utilizando la escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989) para Oyameles en las áreas Monte de las Cruces (MC) y Cerro Tláloc (MT).....	67

Abreviaturas, siglas y definiciones

AOT: Accumulation Over a Threshold. En español, acumulación sobre un umbral.

AOT40: Se refiere a la acumulación sobre un umbral de 40 ppb_v

AOT40_{21d}: Es una acumulación sobre 40 ppbv en un periodo de 21 días. Puesto que el valor crítico es de 5 ppm*h para 180 días, el valor correspondiente a 21 días es $(5/180)*21 = 0.58333$ ppm*h

EPA: Environmental Protection Agency

Flux: Se define como el flujo instantáneo de masa. Sus unidades son de masa sobre unidad de área y tiempo

IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

NAAQS: National Ambient Air Quality Standard, de los Estados Unidos.

ppb_v :Partes por mil millones en volumen de una sustancia o compuesto.

Ppm*h: Partes por millón-horas. Es una unidad compuesta derivada de la suma de ppbv durante cada hora del periodo de acumulación del AOT ó SUM correspondiente. Como se obtienen miles de ppb*h, y 1000 ppb = 1 ppm, se usa ppm para evitar el uso de números grandes.

UNECE: United Nations Economic Commission for Europe.

SUM: Es similar al AOT, pero se emplea así para diferenciarlo. Se puede usar cualquier umbral, por lo que hay SUM00, SUM20, SUM60, etc.

SIMAT: Sistema de Monitoreo Automático de contaminantes en la Ciudad de México

I. Resumen

El Valle de México presenta problemas de contaminación atmosférica que comenzaron en los años 50 y se han agravando hasta constituir un problema serio para la salud de sus habitantes y los ecosistemas que la rodean. Diversas políticas y programas para disminuirla se han implementado de manera masiva desde finales de la década de los 80, tomando en cuenta criterios de salud humana, sobre los cuales se basa el índice IMECA. Dicho índice no contempla los daños a los ecosistemas que, por disminución de la productividad y cambio en la composición de especies a largo plazo, producen las concentraciones de menos de la mitad del IMECA 100.

El presente trabajo tuvo dos objetivos principales

1. Caracterizar los gradientes altitudinales de concentración de ozono en dos áreas de estudio contrastantes en la geografía del Valle de México, en áreas montañosas de Huixquilucan (Monte de las Cruces) y Texcoco (Cerro Tláloc), en el Estado de México.
2. Correlacionar las concentraciones de exposición acumulada al ozono en un periodo de tiempo contra la salud en los bosques más susceptibles.

Se realizaron campañas de medición de concentraciones de ozono en tres épocas del año, la seca-cálida, la de lluvias y la seca-fría, las cuales presentan diferencias en la humedad y temperatura, la radiación solar es alta a lo largo del año, y con ello se presenta un alto potencial para la formación de ozono troposférico. Cada campaña tuvo una duración de tres semanas.

Se realizó también una estimación del impacto, medido mediante correlación de la exposición acumulada al ozono contra la salud de árboles de oyamel (*Abies religiosa*), que ha tenido la presencia de ozono en los bosques. Se utilizaron cuatro umbrales de concentración, en cero, 40, 60 y 80 ppb_v (se refiere a partes por mil millones en volumen) para calcular la exposición acumulada

Para la selección de sitios en campo se buscaron y geo-referenciaron áreas en cañadas y pendientes con exposición abierta hacia la Ciudad de México, con puntos de medición cada 100 metros de elevación desde los 3,100 a los 3,500 metros, que es donde predomina el oyamel. Se utilizaron muestreadores pasivos para las lecturas en campo. Se realizaron calibraciones contra lecturas de monitores continuos. Finalmente, se llevaron a cabo comparaciones entre las medias por área de estudio, por áreas para una misma época y entre épocas para una misma área.

En el área de Huixquilucan se caracterizó, en las tres épocas estudiadas, un gradiente altitudinal de ozono, el cual se incrementa conforme aumenta la altitud. En el área del Cerro Tláloc este gradiente sólo tuvo una correlación significativa en la época lluviosa. La comparación de medias muestra que únicamente en invierno las medias de concentración de ozono son comparables entre las dos áreas de estudio, y que entre la estación lluviosa y la seca fría no hay variación significativa de las concentraciones medias de ozono en cada área de estudio.

Para la evaluación del estado de salud de los árboles se empleó una escala visual de daño que fue validada por Alvarado (1989) para *Abies religiosa* en el Valle de México y que toma en cuenta la retención de follaje, mortalidad de ramas, vigor de la copa y síntomas o signos de enfermedad o decaimiento.

La exposición acumulada al ozono contra la salud de los oyameles en los diferentes sitios no mostró correlaciones altas. Es posible que a la declinación del oyamel observada entre 1982 y 1990 en la zona hayan sobrevivido los ejemplares de oyamel estudiados y que estos pudieran desarrollar alguna forma o mecanismo de tolerancia al ozono.

Palabras Clave: ozono en bosques, *Abies religiosa*, Valle de México, Salud forestal, ozono *vs* altitud

II. Abstract

The Valley of Mexico has problems of air pollution which began in the 50's and have worsened due to their impacts in human and ecosystem health. Various policies and programs have been implemented to decrease the pollution levels since late 1980, taking into account human health criteria on which IMECA index is based. This index does not take into account the damage to ecosystems that concentrations of less than half the IMECA 100 can produce, such as reduced productivity and changes in species composition in the long term.

In this paper two main objectives were drawn

1. To characterize the altitudinal gradients of concentration of ozone in two contrasting study areas in the geography of the Valley of Mexico, in mountainous areas of Huixquilucan (Las Cruces) and Texcoco (Cerro Tláloc), both localities in the State of Mexico.
2. To correlate concentrations of cumulative exposure to ozone over a period of time against tree health in more susceptible forests of *Abies religiosa*.

Three campaigns were conducted to assess ozone concentrations in three seasons, the dry-warm, the rainy season and dry-cold, which have differences in moisture and temperature, with high solar radiation throughout the year, and thus a high rate of tropospheric ozone formation. Each campaign lasted three weeks.

An estimate was made for the impact, measured by correlation of cumulative exposure to ozone to the health of fir trees (*Abies religiosa*), which has had the presence of ozone on the forests. Four thresholds for accumulation were used, zero, 40, 60 and 80 ppb (refers to parts per billion by volume) to calculate the cumulative exposure to ozone.

For the selection of sites, placemarks were located and georeferenced in field areas in ravines and slopes with open exposure to Mexico City, with measurement points every 100 meters in elevation from 3,100 to 3,500 meters, where the fir dominates. Passive samplers were used for

readings in the field. Calibrations were made against continuous monitor readings. Comparisons were conducted between the averages of the studied areas for the same season and between seasons for the same study area.

In the area of Huixquilucan an altitudinal gradient of ozone was characterized in the three seasons studied, which increases with altitude. In the area of Cerro Tláloc this gradient had a significant correlation only in the rainy season. The comparison of means shows that only in winter averages of ozone concentration are comparable between the two study areas. Between rainy and cold dry seasons no significant variation in ozone concentrations was found in each study area.

For the evaluation of the health of the trees a visual scale of damage that was validated in 1989 (Alvarado) for *Abies religiosa* in the Valley of Mexico was used, which takes into account the retention of foliage, death of branches, crown density and symptoms or signs of disease or decay.

Cumulative exposure to ozone did not show high correlations with the health of the *Abies religiosa* trees in the different sites. It is possible that some fir specimens have survived the decline of fir forests observed between 1982 and 1990 in the area studied and they have developed a mechanism to tolerate ozone's presence.

Keywords: ozone in forests, *Abies religiosa*, Valley of Mexico, Forest health, ozone *vs* altitude

III. INTRODUCCIÓN GENERAL.

El ozono troposférico es un contaminante secundario, que se forma en presencia de altas cantidades de radiación ultravioleta, presente en las grandes ciudades, cuyos precursores son principalmente los hidrocarburos que provienen del uso de combustibles, solventes, fugas de gas y la industria; y los óxidos de nitrógeno que son producto de la oxidación del nitrógeno atmosférico por las elevadas temperaturas en los motores de combustión interna, principalmente. Mucho se ha estudiado el daño que ocasiona el ozono a la salud humana y se le ha incluido en trabajos y estudios sobre el ecosistema urbano y la salud de los habitantes en una determinada ciudad, pero poco se ha hecho por incluir como parte del ecosistema urbano, al menos en la Ciudad de México, a los bosques que proporcionan un gran beneficio al regular los escurrimientos de las lluvias, ser hábitat de muchas especies animales y vegetales y poco a poco han cobrado gran importancia como sitios recreativos.

La actividad de las ciudades en su uso intensivo de combustibles fósiles propicia que se forme el ozono y sus precursores, que en la montaña y los bosques, por procesos de reacción fotoquímica donde la radiación ultravioleta del sol constituye el principal catalizador de las reacciones, incrementa notablemente su concentración y ocasiona daños al bosque. A principios de los 80 las cañadas y áreas del parque nacional Desierto de los Leones y del parque nacional del Ajusco, localizados al suroeste y sur de la ciudad de México, respectivamente, perdieron sus bosques de oyamel (*Abies religiosa*) por un fenómeno de declinación que los llevó a su muerte. El oyamel es uno de los árboles más bellos y densos de los bosques mexicanos, con una gran importancia por su denso follaje que atrapa agua a partir de la condensación de la humedad de las nieblas, aun cuando no haya lluvia. Dicha densidad de follaje evita que crezcan las hierbas en el piso forestal, proporciona una sombra que refresca las áreas donde crece y es muy apreciado, cuando su talla es chica, de 1 a 2 metros, como árbol de navidad. También se usa para madera, para elaboración de chapas y las partes resinosas se venden en los

mercados, por su alta volatilidad, como coadyuvantes para el encendido de fogatas.

El índice IMECA considera buena la calidad del aire cuando está por debajo de los 100 puntos, equivalentes a 110 ppb de ozono en volumen. El índice es adecuado para los seres humanos y los organismos animales, que tienen la capacidad de neutralizar sus efectos antes de que alcance los alveolos pulmonares. En los árboles el proceso de intercambio gaseoso es diferente, pues en lugar de un tracto respiratorio húmedo y alargado, se tienen estomas a través de los cuales pasa el ozono a los espacios internos de las hojas en una distancia de décimas o centésima de milímetro. Una vez ahí produce daños severos a la estructura de proteínas y pigmentos fotosintéticos que permiten a la planta sintetizar su alimento a partir de la luz solar, y a paredes celulares de las células estomáticas, que producen incapacidad para retener agua.

La fitotoxicidad del ozono se ha encontrado alta a concentraciones de 40 ppb_v para muchas especies herbáceas y arbóreas, entre ellos el género *Picea* que tiene algunas similitudes con el género *Abies* (Rzedowski, 1978), por lo cual existe la posibilidad que el oyamel sea sensible a dicha concentración. Por esta razón, se utilizan índices que miden la exposición acumulada al ozono en un periodo de tiempo, sin considerar umbrales (SUM00); o considerándolos, sobre 40 ppb_v en horas del día (AOT40), sobre 60 ppb_v todo el día (SUM60) y sobre 80 ppb_v todo el día (SUM80).

En el AOT40 se compara particularmente cómo están los bosques del Valle de México comparados con los sitios que peores episodios de contaminación por ozono han tenido en países europeos, EEUU y Canadá, pues dicho índice, generado en el ámbito de la Convención de Transporte Interfronterizo de Contaminantes de Largo Plazo, que forma parte de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, ha sido ampliamente utilizado en estudios en todo el mundo.

En una primera parte, este trabajo aborda la caracterización de los gradientes altitudinales de la concentración de ozono en las zonas montañosas del Monte de las Cruces, en Huixquilucan, Estado de México (área MC), y en la vertiente occidental del Monte (o Cerro) Tláloc, (área MT) en Texcoco, Estado de México. Ambos sitios están separados por 62 km en línea recta y constituyen dos puntos opuestos, en el sentido que MC queda expuesto de manera directa a los vientos que provienen la mayor parte del año desde la Ciudad de México, mientras que MT tiene algunos días en que los flujos zonales transportan, en horas de la mañana, la contaminación a sus faldas, pero por su mayor altura se dan incursiones de flujos de vientos a escala continental, así como días en que los vientos no permiten que los contaminantes sean transportados de manera directa.

En el Valle de México existen tres épocas del año claramente diferenciadas entre sí. La época seca-cálida, que comienza entre febrero y marzo y se prolonga hasta mayo, ocasionalmente hasta mediados de junio, la lluviosa que normalmente comienza en la primera quincena de junio y termina con una mayor variabilidad según haya fenómenos como El Niño, La Niña, la Oscilación de Atlántico Norte. La estación seca fría, que se caracteriza por tener temperaturas bajas con heladas en horas de la madrugada, gran estabilidad atmosférica e incursiones ocasionales de fuertes vientos del norte comienza entre la segunda y tercera semana de noviembre y dura hasta enero.

La variabilidad climática mencionada llevó al diseño de un estudio considerando las tres épocas del año. La limitación en la disponibilidad de muestreadores pasivos limitó la duración de cada campaña a 21 días de exposición, para cubrir todos los sitios identificados y obtener datos de cada uno de ellos.

Con la finalidad de conocer la variabilidad de las concentraciones promedio de ozono entre las regiones de estudio (MC y MT) y dentro de cada región entre épocas diferentes del año, se realizan análisis de comparación de medias.

En el segundo capítulo, se calculan las exposiciones acumuladas al ozono utilizando concentraciones de umbral, a partir de las cuales se considera que existe fitotoxicidad del ozono. Aunque hacen falta estudios para determinar ese umbral para cada especie, en la literatura sobre este tema se abordan de manera amplia los umbrales de concentración de 40 ppb (horas diurnas), 60 ppb y 80 ppb (para todo el día las dos últimas). Con base en estos valores, se determinan valores de exposición acumulada sin considerar un umbral (SUM00) y con los umbrales mencionados, de los que se derivan los índices AOT40, SUM60 y SUM80 respectivamente.

Para la evaluación de la salud de los oyameles, se aplicó la escala de Miller modificada y validada por Alvarado (1989) sobre la declinación del oyamel en el Desierto de los Leones y el Ajusco. La escala considera la retención de acículas por años, hasta tres años de antigüedad, la mortalidad de ramas, el porcentaje de copa y la aparición de síntomas como ataque de descortezadores, presencia de hongos, muerte progresiva o descendente y la muerte total.

Se correlacionaron los valores de exposición acumulada contra el valor en la escala de calificación de salud mencionada en el párrafo anterior, buscando el índice que mejor correlación tuvo para ambas variables.

Capítulo 1. Concentración de ozono en gradientes altitudinales en bosques de *Abies religiosa* en dos regiones del valle de México.

1.1. Resumen

Se llevó a cabo la caracterización de los gradientes altitudinales en tres temporadas de medición, la seca cálida, lluviosa y seca fría, con 21 días de duración cada una. Para ello se utilizaron muestreadores pasivos de ozono, calibrados con monitores continuos alimentados con baterías eléctricas en dos zonas contrastantes del Valle de México, las cuales son Monte de las Cruces (MC) y Cerro Tláloc (MT). Las concentraciones de ozono medidas en cada sitio se correlacionaron contra la altura y se evaluó la significancia de dicha correlación. Aunque las concentraciones de ozono son prácticamente las mismas en las dos áreas de estudio, debido a la orografía y las corrientes locales de aire, el sitio MC presenta buenas correlaciones de ozono, directamente proporcionales con la altura. En MT no se observan de manera clara los gradientes altitudinales de ozono, excepto en la época de lluvia. Las pruebas de comparación de medias con un nivel de confianza del 95% muestran que hay diferencia de medias entre áreas de estudio para las épocas seca cálida y lluviosa, mientras que en la seca fría tienen una media similar. Al interior de las áreas de estudio, las medias entre épocas son diferentes al comparar lluvias contra seca cálida y seca fría contra seca cálida. Al realizar la comparación de medias entre la época de lluvias y seca fría, los resultados muestran que la media es similar.

Palabras clave: Gradientes altitudinales de ozono, Valle de México, Sierra Nevada, Sierra de Las Cruces, distribución geográfica del ozono

1.2. Abstract

A characterization of the altitudinal gradients was carried out in three seasons of measurement: the dry warm, wet and dry cold season, everyone of them lasting 21 days. For this purpose, passive ozone samplers and continuous battery-powered monitors were put in two contrasting study areas of the Valley of Mexico, which are Monte de las Cruces (MC) and Cerro Tláloc (MT). The ozone concentrations measured

at each site were correlated against the height and assessed the significance of that correlation. Although ozone concentrations are substantially the same in the two study areas due to local terrain and air currents, the site MC has good correlations to ozone which increases as height also does. In MT the altitudinal gradients of ozone were not clearly observed, except in the rainy season. The mean comparison tests with a confidence level of 95% shows difference in the ozone concentration means between study areas for the dry warm and rainy seasons, while that mean was similar for both areas in the dry cold season. Within the same study area, means between seasons are different when comparing warm versus rainy and warm dry versus dry cold seasons. Comparison between rainy and cold dry shows that means are similar.

Keywords: Ozone altitudinal gradients, Valley of Mexico, Sierra Nevada, Sierra de Las Cruces, ozone geographic distribution

1.3. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire de la ciudad de México puede ser la causa primaria de la declinación forestal en el parque Desierto de los Leones. El papel de otros factores, como falta de manejo forestal, extracción de agua excesiva, plagas y posibles patógenos es secundario, aunque puede contribuir y acelerar el proceso de declinación y muerte del bosque de oyamel (Alvarado *et al.*, 1993)

El impacto que tiene el ozono troposférico sobre el crecimiento y vigor de las masas forestales ha sido estudiado para extensas zonas en Europa y Norteamérica. Los estudios llevados a cabo en Europa muestran que muchas especies forestales son sensibles a las concentraciones de ozono prevaletentes en sitios de estudio (Karlsson *et al.*, 2000, 2002, 2003; Matyssek, 2004; Muzika, 2004; Paoletti, 2005; Augustaitis, 2008); por su parte, los estudios realizados en Norteamérica y México han llegado a conclusiones similares (Bauer y

Krupa, 1990; Coleman et al., 1996; Ollinger *et al.*, 1997; Bertrand *et al.*, 1999; Manning, 2005; Felzer *et al.*, 2004; López-López *et al.*, 2006, Bauer y Hernández-Tejeda, 2007; Bytnerowicz *et al.*, 2008)

En 1985, se detectó por primera vez un problema de declinación forestal en México en el Desierto de los Leones (Alvarado, 1989). El problema era similar a los encontrados en Europa (Heliotis *et al.*, 1988), Estados Unidos y Canadá (Chevone y Linzon, 1988). Una declinación similar pudo ser observada en bosques de oyamel localizados al sur y suroeste de la ciudad de México, tales como el Ajusco y los Dinamos de la delegación Contreras.

A pesar del mejoramiento reciente de la calidad del aire en la ciudad de México, el Valle de México sigue siendo un área altamente contaminada. Las concentraciones de ozono estuvieron en un nivel más alto que el estándar aceptado por la OMS durante 300 días en 2009 (GDF, 2009). El valle está rodeado de montañas altas al este, sur y oeste, y al norte por cordilleras discontinuas más bajas. Esta situación orográfica, además de tender a confinar la contaminación, propicia flujos de aire complejos con consecuencias en la calidad del aire para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

Jazcilevich *et al.* (2003) encontraron un patrón de viento vertical circular que se reveló durante marzo de 1997. Este dato mostró que la contaminación que se emite en la superficie es transportada primero del centro de la ZMCM hacia el Ajusco, donde existe una convección vertical que lleva a los contaminantes por arriba de los 900 metros sobre el piso del valle, siendo transportados posteriormente hacia el noreste por arriba de la trayectoria que siguieron originalmente, y descendiendo finalmente por advección en la esquina noreste de la ZMCM en horas de la madrugada y mañana del día siguiente.

En diversas partes del mundo se han apreciado incrementos de la concentración de ozono conforme se incrementa la altura. En las montañas la alta radiación solar tiene un serio impacto en la

fotoquímica de la formación de O₃ (Stevenson, 2005). Además, las diferencias en la recirculación local debidas a la orografía (por ejemplo, sistemas de valle-montaña) pueden cambiar las tasas de mezcla de los compuestos fotoquímicos (Ribas y Peñuelas, 2006; Sanz *et al.*, 2007).

Las tasas de mezcla de O₃ y sus efectos en plantas y animales (su toxicidad) pueden variar de acuerdo con las condiciones locales en diferentes altitudes y algunos autores han reportado que la absorción de O₃ en árboles de la misma edad se incrementa con la altura (Wieser *et al.*, 2006).

Para la medición de ozono en el campo, el uso de muestreadores pasivos resulta atractivo dado que son baratos, fáciles de usar y no requieren suministro de electricidad para operar. Para efectos de investigaciones ecológicas, por razones logísticas y económicas, los muestreadores se utilizan para medir en periodos de una o dos semanas, y en algunos casos hasta de un mes la exposición acumulada o integrada del ozono ambiental.

El muestreo pasivo se consigue al colocar un adsorbente que atrapa todo el gas que entra al muestreador, forma un complejo químico estable que posteriormente es analizado en el laboratorio donde se determina la cantidad total adsorbida (Krupa, 2001).

1.4. OBJETIVOS

Determinar el comportamiento de la concentración de ozono respecto a la altitud

Comparar el comportamiento de la concentración de ozono en regiones geográficamente opuestas del Valle de México

Analizar el comportamiento de los gradientes altitudinales de la concentración de ozono en tres épocas diferentes del año en las dos regiones

1.5. HIPÓTESIS

Las laderas de las montañas en la región suroeste exhiben la mayor concentración de ozono al encontrarse en la zona donde se estancan los contaminantes

La concentración de ozono se incrementa directamente con la altitud

En la época lluviosa, la radiación disminuye en la tropósfera y se presentan altos niveles de convección atmosférica, por lo que las concentraciones de ozono serán las menores en esta temporada

1.6. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en dos zonas geográficamente opuestas del Valle de México, las cuales se ubican en el municipio de Huixquilucan, Estado de México (área MC) y en la vertiente occidental del cerro Tláloc, en Texcoco, Estado de México (área MT).

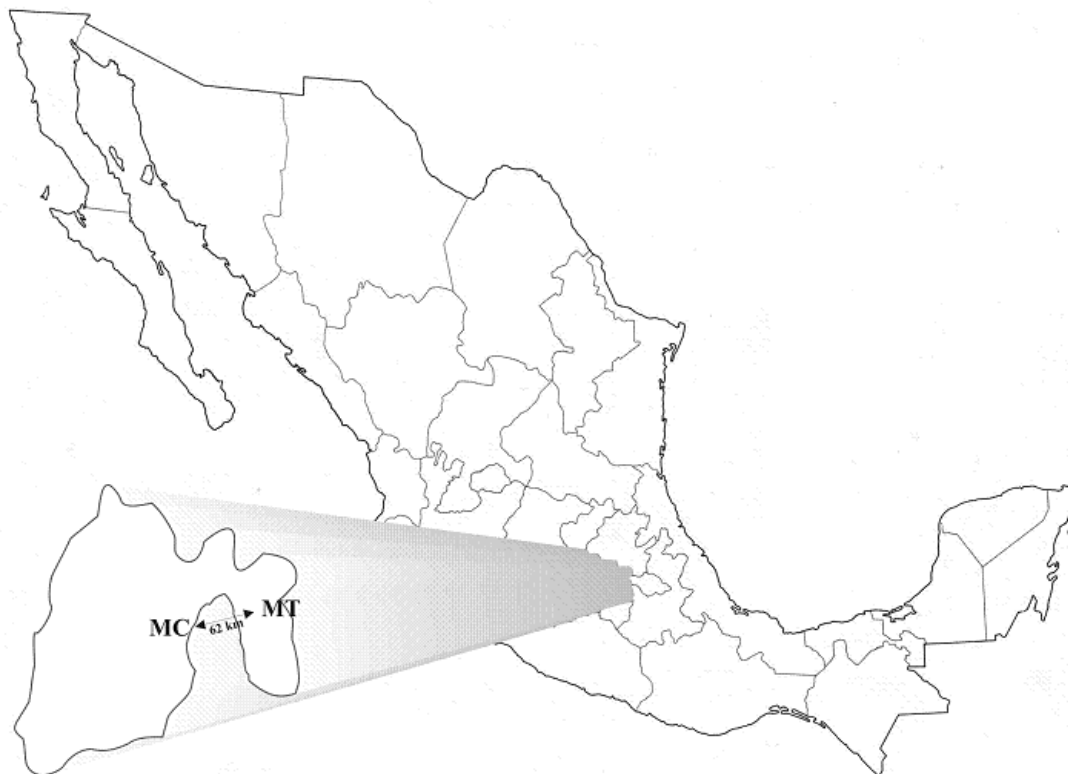


Figura 1. Localización de las áreas de estudio, Monte de las Cruces (MC) y Cerro Tláloc (MT)

1.6.1. Área de Huixquilucan

Esta área queda comprendida entre las coordenadas $19^{\circ}17'08''\text{N}$ a $19^{\circ}19'66''$ de latitud norte y $99^{\circ}19'16''$ a $99^{\circ}23'02''$ de longitud oeste. El área está localizada aproximadamente a 15 km al suroeste de la Ciudad de México y a 6.5 km del llamado Cementerio I en el Desierto de los Leones, donde ha aparecido una declinación severa. La altitud del área varía entre 3,050 a 3,412 msnm. La pendiente media es de 30% con declive hacia el noroeste. La temperatura media se sitúa entre 8 y 10°C , y la precipitación anual se encuentra entre 1,200 y 1,500 mm. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1968), el clima en la zona es C(e), templado frío, húmedo con inviernos benignos.

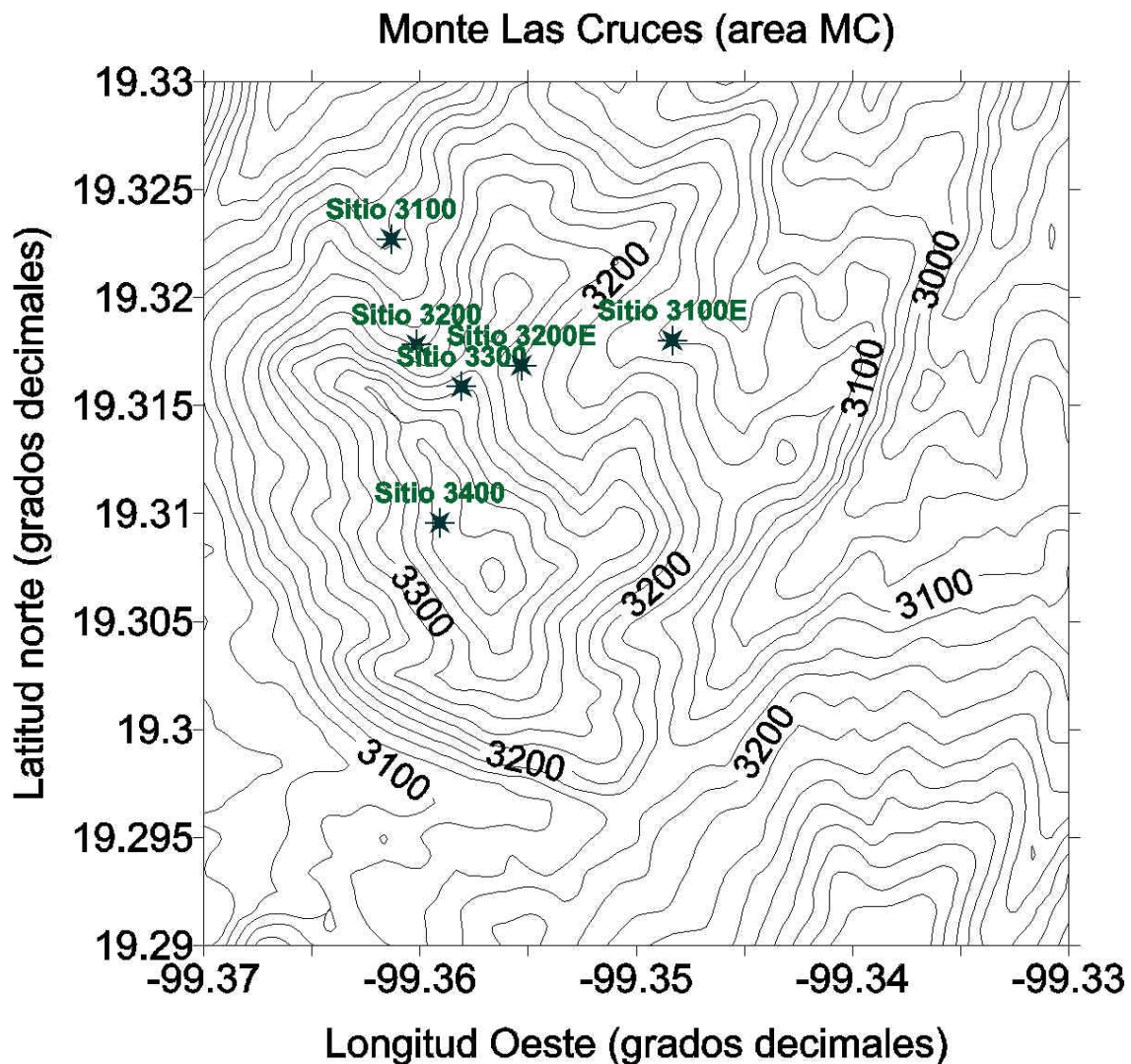


Figura 2. Área del Monte Las Cruces (MC), cerca de Huixquilucan, Estado de México, mostrando la ubicación de los sitios de estudio.

1.6.2. Área Cerro Tláloc

Se localiza en la región fisiográfica conocida como Sierra Nevada al oriente del Estado de México. La elevación del cerro es de 4,120 msnm y sus laderas muestran graves problemas de erosión en toda la región (Palma, 1996). El área de estudio se localiza en la vertiente occidental del Cerro Tláloc entre las latitudes $19^{\circ} 26' 12.5''$ N y $19^{\circ} 26' 27''$ N y entre las longitudes $98^{\circ} 45' 26.2''$ O y $98^{\circ} 45' 54''$ O. La elevación del área de estudio varía entre 3,100 y 3,500 msnm.

En las laderas montañosas el clima es de tipo C(w2) (w) b(i'); templado subhúmedo, con una precipitación media anual entre 900 y 1200 mm, régimen de lluvias en verano, temperatura media anual entre 10 y 14 °C

con una oscilación térmica de 5 a 7 °C. Las fluctuaciones climáticas se deben a la orografía (Ortiz y Cuanalo, 1977).

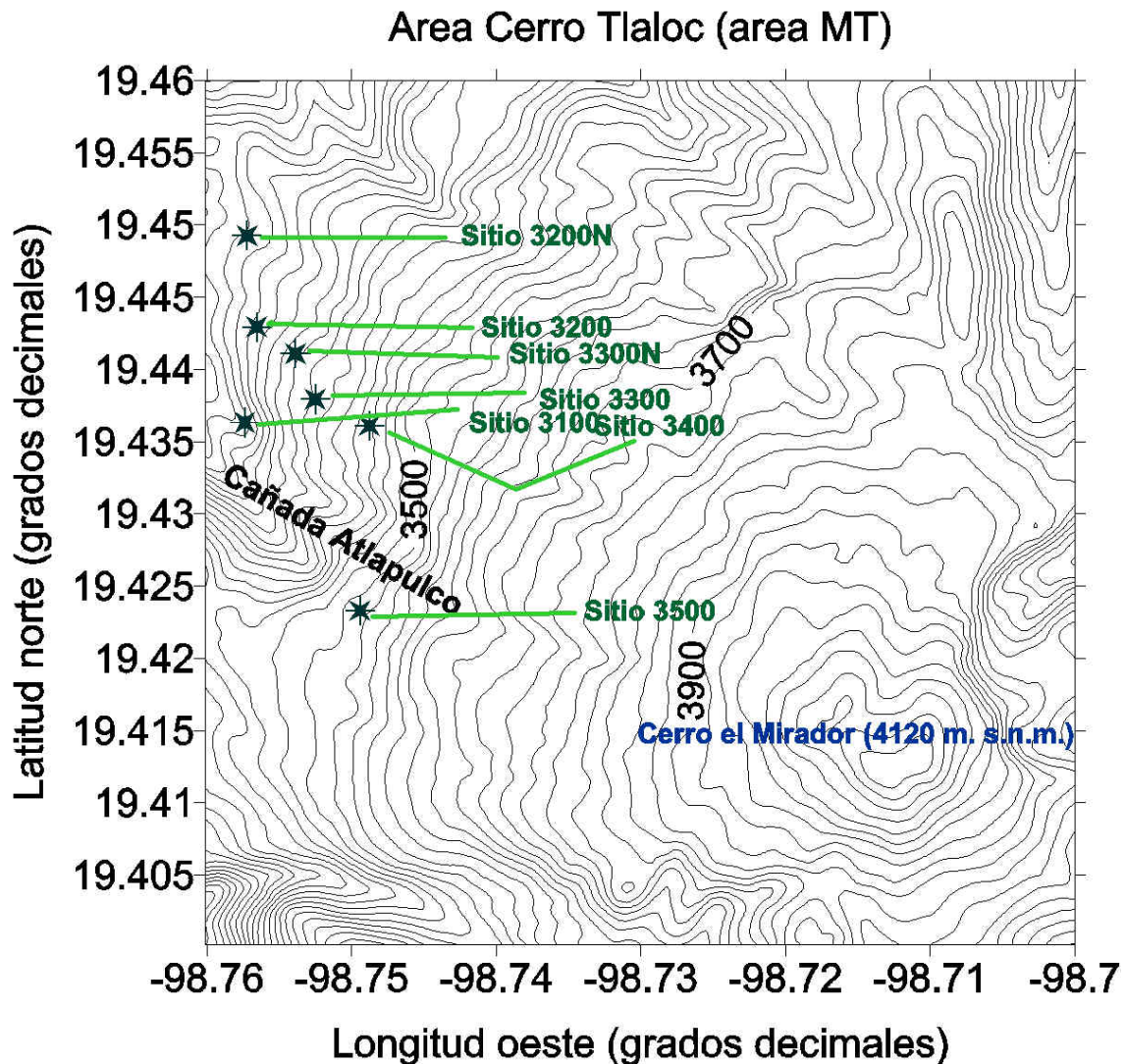


Figura 3. Área del Cerro Tlaloc (MT), cerca de San Pablo Ixayoc, Texcoco, Estado de México

1.6.3. Selección de sitios

Se efectuaron recorridos de campo en las zonas de estudio descritas, con la finalidad de determinar la existencia de rodales de oyamel y la accesibilidad a las mismas. A partir de los 3,000 metros de altura se observó un incremento notable en la dominancia de *A. religiosa* y a partir de los 3,100 metros los rodales se presentaron puros. Hasta la altura de 3,500 metros continuo este estado, antes de comenzar la codominancia con *Pinus hartwegii* a partir de los 3,600 metros.

Se establecieron sitios de muestreo en zonas cercanas a los caminos de terracería en ambas zonas, de los 3,100 a los 3,500 metros de altitud con los sitios separados cada 100 metros. La ubicación de los sitios en el terreno se hizo utilizando un equipo GPS (Garmin etrex vista HCX) con precisión de ± 3 metros, con señal de al menos siete satélites del sistema.

1.6.4. Variables evaluadas

1.6.4.1. Ozono

Para la medición en campo se realizaron una pre-campaña para validar datos y obtener funciones de distribución horaria en una estación del SIMAT (Santa Úrsula) y tres campañas en campo con muestreadores pasivos marca Radiello©. Las campañas fueron diseñadas para cubrir las temporadas lluviosa, seca-fría y seca-cálida ya que cada una ofrece situaciones diferentes de circulación, distribución y concentración de los contaminantes en las zonas montañosas que rodean al Valle de México.

Se llevaron a cabo tres campañas de monitoreo de ozono, la campaña de la estación lluviosa se llevó a cabo del 17 de septiembre al 12 de octubre de 2007, la seca-fría del 14 de noviembre al 5 de diciembre de 2007 y la seca-cálida del 2 al 23 de abril de 2008.

1.6.4.2. Ubicación y tipo de los muestreadores

Para cada sitio se procuró que los muestreadores estuvieran en una zona semiabierta del dosel, con exposición directa a los vientos, para evitar posibles sesgos en la cuantificación del ozono por interferencias con otros compuestos del dosel, la humedad relativa debajo de copas y la sombra que proporcionan. Para todos los sitios se encontraron lugares adecuados con buena circulación de aire y en las zonas a barlovento de la ciudad. En el caso del cerro Tláloc se tuvo la dificultad de que para los sitios ubicados a 3,400 y 3,500 msnm hubo que seguir el desnivel de una barranca con pendientes superiores a 100%,

quedando dichos sitios más alejados y en condiciones de acceso más difícil que para la parte baja.

El muestreador empleado fue el cartucho quemiasorbente Radiello®, el cual pertenece a los muestreadores pasivos de flujo radial desde una capa cilíndrica de polietileno poroso (diámetro del poro <0.18 mm) en una matriz de recorrido tortuoso que alarga la ruta que debe recorrer una partícula por muchas veces el espesor de la cubierta. Esto favorece un proceso de difusión y el gradiente que impulsa al ozono a continuar entrando es la diferencia de concentraciones entre el ambiente y la del interior del muestreador, que es prácticamente cero, dado que todo el ozono está reaccionando con 4,4'-dipiridil-etileno, que por reacción ácida con el ozono forma 4-piridil-aldehído, el cual es estable hasta por 60 días dentro del cartucho. Por el mecanismo de reacción, ésta es específica para el ozono y ningún otro oxidante del tipo XO_n ni otros compuestos orgánicos interfieren en la cuantificación de ozono. El 4-piridil-aldehído formado se extrae en laboratorio con una solución ácida (5 ml de H_2SO_4 por litro de agua) y se hace reaccionar con una solución de 25 g/l de 3 metil-2-benzo-tiazolinona hidrazona para producir un colorante diazoico amarillo que se cuantifica en el espectrofotómetro a 430 nm.

Mayor detalle en (http://www.radiello.com/english/o3_en.htm).

1.6.4.3. Muestreo continuo

Con la finalidad de obtener datos horarios para el análisis se instalaron, en la campaña seca-cálida, muestreadores continuos, alimentados por una batería automotriz junto a los muestreadores de la parte más baja y más alta en cada sitio, con el sistema de protección contra robo que se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Sistema de protección en campo para los monitores continuos

1.6.4.4. Curva patrón

En la pre-campaña que se llevó a cabo en la estación Santa Úrsula del SIMAT del 12 de julio al 2 de agosto de 2007 se realizó una exposición de una, dos y tres semanas por cuadruplicado en una zona que se ubica entre las que registran las concentraciones más altas de ozono fotoquímico en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Posteriormente se realizó el análisis de concentración de ozono adsorbido y se encontró linealidad entre el tiempo de exposición y la concentración adsorbida, es decir, los muestreadores pasivos no mostraron saturación por ozono en 21 días de exposición.

1.6.4.5. Análisis de datos

Se realizaron análisis de regresión con el estadístico de Fisher para determinar la significancia de la variación del ozono respecto a la altura. Se realizaron correlaciones para el ozono contra la altitud en cada una de las regiones estudiadas del Valle de México, para cada una de las tres campañas.

Para las medias de los sitios, se utilizó la prueba t para medias con poblaciones con varianzas diferentes. Se realizaron las comparaciones de medias para cada una de las tres campañas.

Para cada campaña se realizaron las comparaciones entre las medias para determinar si existen diferencias estadísticas significativas entre las medias de la concentración de ozono, por zona de estudio y entre las diferentes épocas del año estudiadas.

1.7. RESULTADOS

1.7.1. Concentraciones y gradientes altitudinales

1.7.1.1. Campaña de medición en meses lluviosos

En la campaña de los meses con lluvias, realizada del 17 de septiembre al 12 de octubre de 2007, las concentraciones de ozono tuvieron un incremento respecto a la altitud en las áreas de estudio MT y MC. El rango de concentraciones en el área MT varió de 86 a 105 μg de ozono/ m^3 en promedio. En el área MC la variación comprendió de 98 a 123 μg de ozono/ m^3 en promedio.

En la Figura 5 se muestran las concentraciones de ozono medidas por cuadruplicado para cada altitud en el área MC, con la ecuación de tendencia, el coeficiente de determinación R^2 y el nivel de significancia de la regresión, el cual muestra que la regresión fue altamente significativa ($P < 0.0001$). Para todos los sitios se midió por cuadruplicado. El sitio de 3,300 msnm se excluye de esta gráfica, por haber quedado en medio de una masa con dosel cerrado de *Pinus ayacahuite* y *Abies religiosa*. En la Figura 6 se muestran los datos para 3,300 metros y se nota la disminución de la correlación y la significancia al incluir los datos mencionados.

Las concentraciones medidas por cuadruplicado para el área de Cerro Tlálóc se muestran en la Figura 7, la cual muestra una correlación altamente significativa ($P < 0.0005$) entre la altura y la variación de la concentración de ozono.

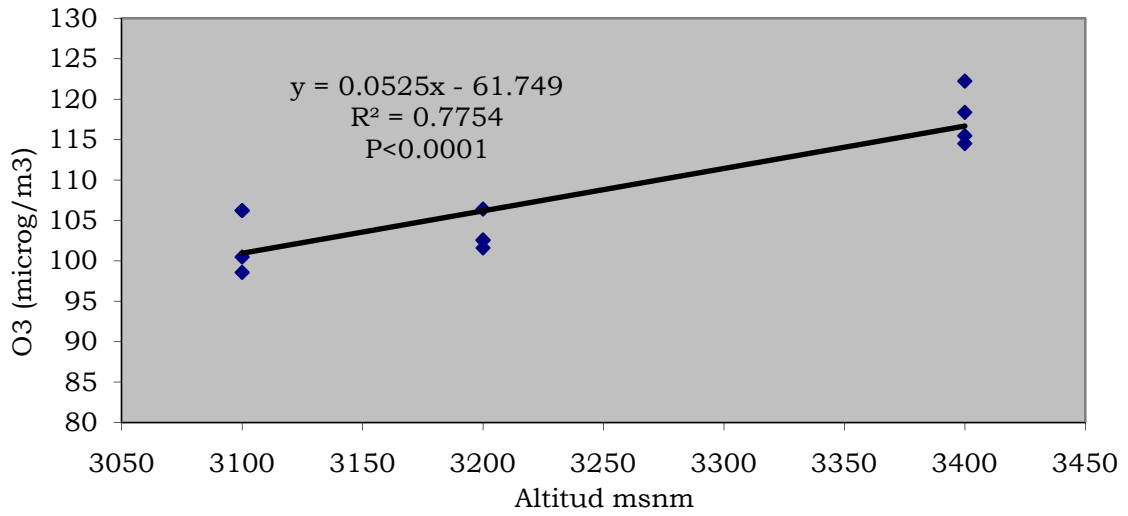


Figura 5. Concentración de ozono *vs* altitud, en el Monte de Las Cruces, Huixquilucan, Estado de México. Septiembre-Octubre 2007 (sin considerar datos de 3300 msnm)

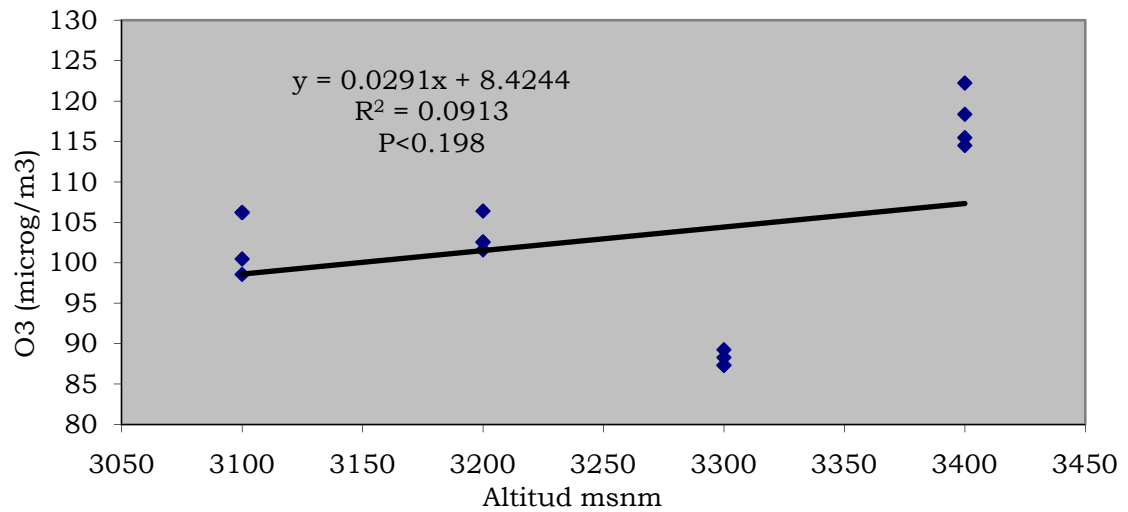


Figura 6. Concentración ozono *vs* altitud, en el Monte de Las Cruces Huixquilucan, Estado de México. Septiembre-Octubre 2007 (con datos de 3,300 msnm)

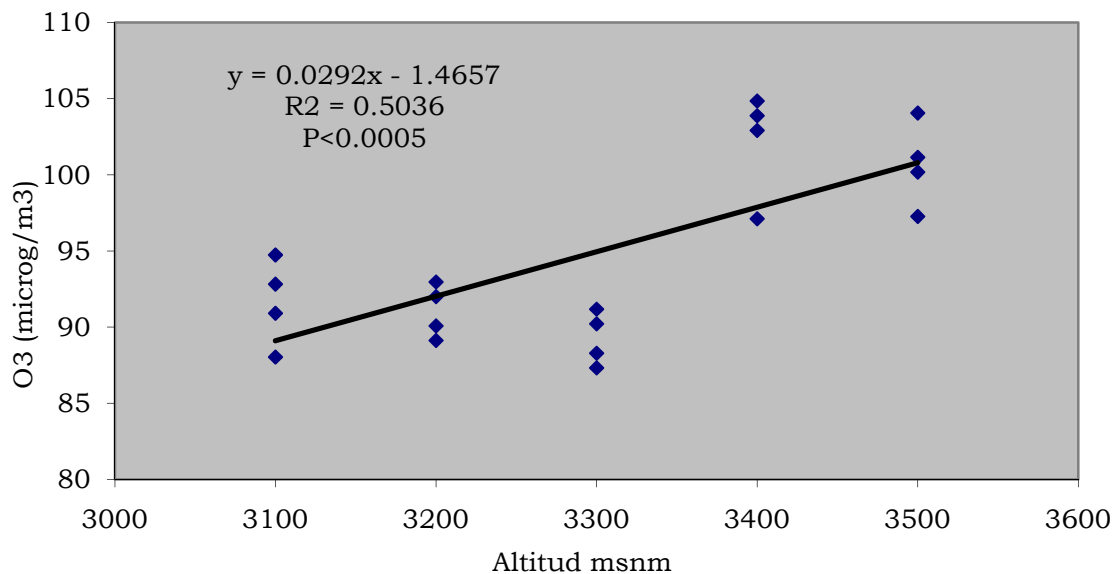


Figura 7. Concentración ozono vs altitud, en el Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México. Septiembre-Octubre 2007

En el Cuadro 1, la prueba de t para comparar medias de dos muestras, donde la muestra son las lecturas en cada área de estudio, con varianza distinta rechaza la hipótesis de medias iguales ($P(T \leq t) = 0.015$), con un coeficiente de confianza igual a $1 - P(T \leq t) = 0.985$, es decir, las medias difieren de manera significativa.

Cuadro 1. Prueba de t para comparación de medias de las observaciones entre MT y MC en la campaña lluviosa

Análisis Sep.-Oct. 2007	Área MT	Área MC
Media	95.06318632	102.7456315
Varianza	37.39972243	131.5282669
Observaciones	19	15
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	20	
Estadístico t	-2.34454649	
$P(T \leq t)$ una cola	0.014742385	
Valor crítico de t (una cola)	1.724718218	
$P(T \leq t)$ dos colas	0.02948477	
Valor crítico de t (dos colas)	2.085963441	

1.7.1.2. Campaña de medición en meses secos-fríos

En esta campaña, que se llevó a cabo del 14 de noviembre al 5 de diciembre de 2007, se presentó un alto número de días con heladas en las montañas, las concentraciones de ozono respecto a la altura mostraron un incremento directamente proporcional respecto a la altitud en el área de estudio MC, con una correlación entre la variación en la concentración de ozono respecto a la altitud altamente significativa ($P < 0.0001$), como se muestra en la Figura 8, pero en MT se observó una tendencia contraria (Figura 9) y el análisis de regresión no muestra indicios de correlación alguna ($P < 0.98$). Las mediciones se llevaron a cabo por triplicado en todos los sitios. En esta campaña se colocaron 3 muestreadores pasivos adicionales en un sitio a 3,200 metros de altitud, alejado de la zona de la barranca de Atlapulco, en el área MT (Figura 3, sitio 3200N) y sus resultados se muestran en la Figura 9. El rango de concentraciones que se presentaron en el área MT estuvo comprendido entre 85 y 111 μg de ozono/ m^3 en promedio. En el área MC el rango de concentraciones se situó entre 90 y 122 μg de ozono/ m^3 en promedio.

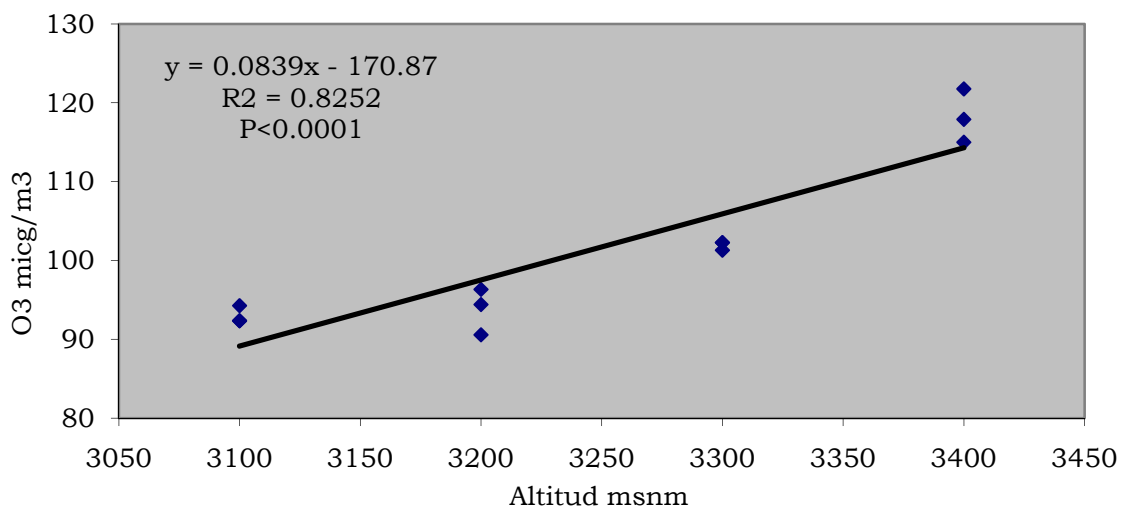


Figura 8. Concentración de ozono *vs* altitud, en el Monte de Las Cruces, Huixquilucan, Estado de México. Noviembre-Diciembre 2007

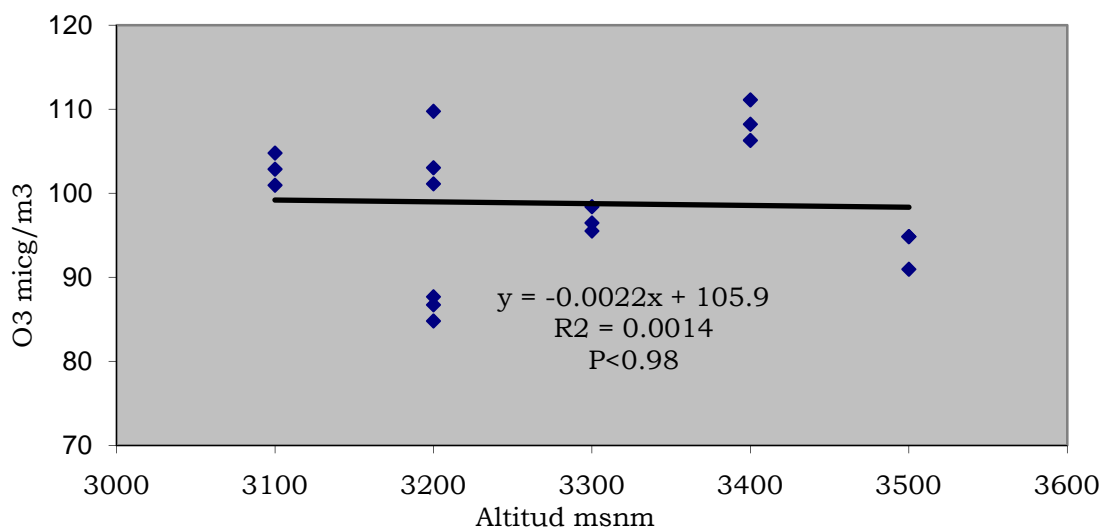


Figura 9. Concentración de ozono *vs* altitud, en el Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México. Noviembre-Diciembre 2007

La prueba de t para comparar las medias de las lecturas de las dos áreas de estudio, que presentan varianza distinta (Cuadro 2), acepta la hipótesis de medias iguales ($P(T \leq t) < 0.155$). El coeficiente de confianza es de 0.845, corroborando que las medias no difieren de manera significativa.

Cuadro 2. Prueba de t para comparar las medias entre el área MT y MC durante la campaña seca fría

Análisis Nov.-Dic. 2007	Área MT	Área MC
Media	98.56197043	102.5749361
Varianza	65.94468428	118.2817663
Observaciones	17	11
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	17	
	-	
Estadístico t	1.049092529	
P($T \leq t$) una cola	0.154410979	
Valor crítico de t (una cola)	1.739606716	
P($T \leq t$) dos colas	0.308821958	
Valor crítico de t (dos colas)	2.109815559	

1.7.1.3. Campaña cálida-seca

En esta campaña, desarrollada del 1° al 22 de abril de 2008, las concentraciones de ozono respecto a la altura tuvieron un incremento directamente proporcional a la altura en las dos áreas de estudio del Valle de México. En todos los sitios fueron colocados tres muestreadores. En el área MT (Figura 11) se observó un aumento menos pronunciado, con una correlación no significativa ($P < 0.31$). La variación en las concentraciones promedio de ozono en el área MT se ubicó entre 95 y 117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En el área MC la variación estuvo comprendida entre los 106 a 134 μg de ozono/ m^3 en promedio (Figura 10), con una correlación significativa ($P < 0.024$). En esta gráfica se aprecia un solo punto para el sitio a 3,100 metros de altitud. Cuando se fue a campo a retirar los muestreadores pasivos se encontraron elementos de vandalismo.

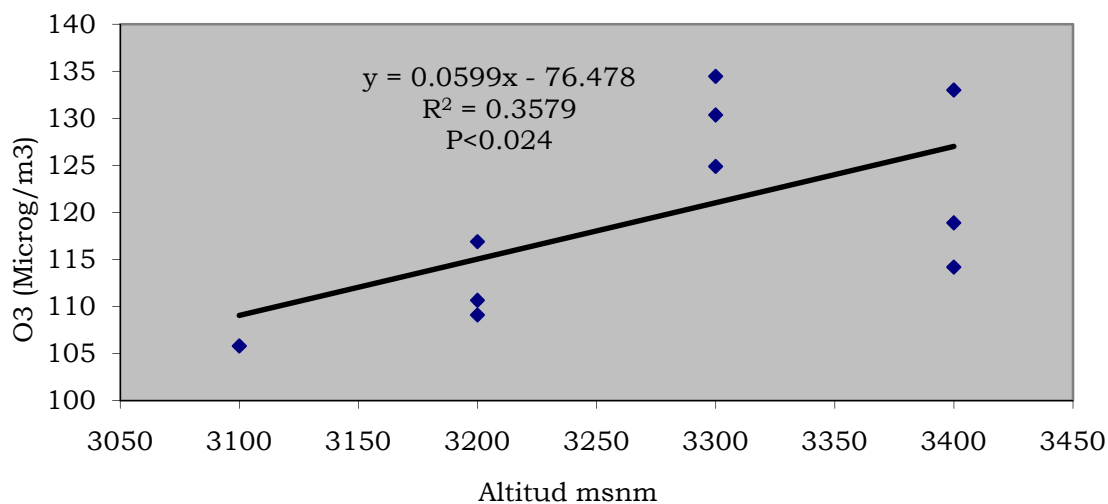


Figura 10. Concentración de ozono vs altitud, en el Monte de Las Cruces, Huixquilucan, Estado de México. Abril 2008

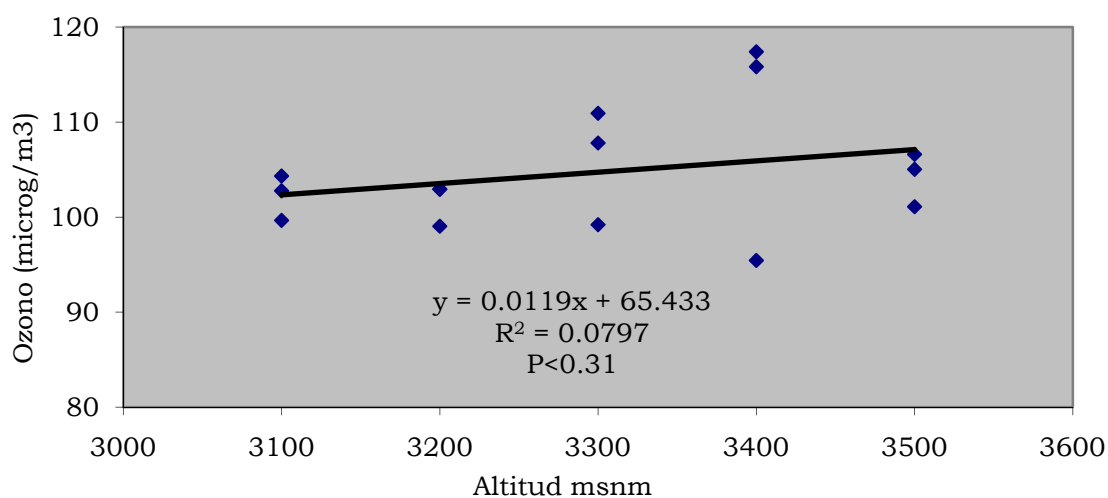


Figura 11. Concentración de ozono *vs* altitud, en Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México. Abril 2008

La prueba de t para comparación de medias entre los dos sitios rechaza la hipótesis de medias idénticas ($P(T \leq t) < 0.0003$), con un coeficiente de confianza de 0.9997, por lo cual la diferencia de media entre los dos sitios resulta altamente significativa

Cuadro 3. Prueba de t para comparación de las medias entre MC y MT en campaña seca cálida

Análisis Abril de 2008	Área MT	Área MC
Media	105.0969484	121.3935312
Varianza	38.96467793	92.81396458
Observaciones	14	9
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	12	
Estadístico t	-4.503287104	
P($T \leq t$) una cola	0.000361253	
Valor crítico de t (una cola)	1.782287548	
P($T \leq t$) dos colas	0.000722507	
Valor crítico de t (dos colas)	2.178812827	

1.7.2. Comparación de medias de la concentración promedio de ozono entre campañas para cada una de las áreas de estudio

Se muestran los resultados de la prueba de t para comparación de medias de los datos de concentración promedio de ozono para el área Monte Tláloc (MT) y para el área Monte Las Cruces (MC). Cada comparación se realiza entre las medias para una misma área de estudio en dos campañas diferentes para conocer si existe una variación significativa entre las medias de los datos de concentración promedio de ozono registrados. Se realizan comparaciones entre las campañas Verano-Invierno, Verano-Primavera e Invierno-Primavera.

1.7.2.1. Comparación realizada entre campañas lluviosa (verano) y seca fría (invierno)

Para la región MT, el valor crítico de t (valor absoluto) es mayor que el estadístico, por ello éste estadístico cae dentro de la región de aceptación de la hipótesis nula, con coeficiente de confianza de 0.84 para MT, valor que corrobora que aunque existe una diferencia de medias, esta es poco significativa (Cuadro 4). En el caso de la región MC se tiene un resultado similar, con un coeficiente de confianza de 0.03, indicando que la diferencia de medias es tan poco significativa que las medias se pueden asumir idénticas (Cuadro 5).

Cuadro 4. Análisis de comparación de medias de la concentración promedio de ozono entre la campaña de verano y la de invierno para las muestras tomadas en el Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México

	<i>Verano</i>	<i>Invierno</i>
Media	95.06318632	98.56197043
Varianza	37.39972243	65.94468428
Observaciones	19	17
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	30	
	-	
Estadístico t	1.446877709	
P(T<=t) una cola	0.079150062	
Valor crítico de t (una cola)	1.697260851	
P(T<=t) dos colas	0.158300124	
Valor crítico de t (dos colas)	2.042272449	

Cuadro 5. Análisis de comparación de medias de la concentración promedio de ozono entre la campaña de verano y la de invierno para las muestras tomadas en el Monte de las Cruces, Huixquilucan, Estado de México

	<i>Verano</i>	<i>Invierno</i>
Media	102.7456315	102.5749361
Varianza	131.5282669	118.2817663
Observaciones	15	11
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	22	
Estadístico t	0.03863365	
P(T<=t) una cola	0.484765458	
Valor crítico de t (una cola)	1.717144335	
P(T<=t) dos colas	0.969530916	
Valor crítico de t (dos colas)	2.073873058	

1.7.2.2. Comparación realizada entre campañas lluviosa (verano) y seca cálida (primavera)

En el caso de la comparación de medias para las dos áreas de estudio entre la estación lluviosa (verano) y la cálida seca (primavera), tanto el sitio MT como el MC tienen medias estadísticamente diferentes en la campaña lluviosa contra la cálida seca. En el caso del Cerro Tláloc, el coeficiente de confianza es de 1 (Cuadro 6), lo que indica que las medias no sólo son diferentes, sino que el grado de significancia estadística de dicha diferencia es muy alto. El área situada en Monte de las Cruces presentó un resultado similar, con un coeficiente de confianza de 0.9998 (Cuadro 7).

Cuadro 6. Análisis de comparación de medias entre la campaña de verano y la de primavera para las concentraciones de ozono promedio en Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México

	<i>Verano</i>	<i>Primavera</i>
Media	95.06318632	105.0969484
Varianza	37.39972243	38.96467793
Observaciones	19	14
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	28	
	-	
Estadístico t	4.603031687	
P(T<=t) una cola	4.10259E-05	
Valor crítico de t (una cola)	1.701130908	
P(T<=t) dos colas	8.20519E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2.048407115	

Cuadro 7. Análisis de comparación de medias entre la campaña de verano y la de primavera para las concentraciones de ozono promedio en Monte de las Cruces, Huixquilucan, Estado de México

	<i>Verano</i>	<i>Primavera</i>
Media	102.7456315	121.3935312
Varianza	131.5282669	92.81396458
Observaciones	15	9
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	19	
	-	
Estadístico t	4.269007584	
P(T<=t) una cola	0.000207326	
Valor crítico de t (una cola)	1.729132792	
P(T<=t) dos colas	0.000414652	
Valor crítico de t (dos colas)	2.09302405	

1.7.2.3. Comparación realizada entre campañas seca fría (invierno) y seca cálida (primavera)

En la comparación de medias entre la estación seca fría (invierno) y seca cálida (primavera), la hipótesis de medias diferentes es aceptada tanto para MT como para MC, derivado de que en ambos casos el valor absoluto del estadístico de prueba es mayor que el valor crítico P(T<=t) para una distribución de dos colas. Ver Cuadro 8 (área MT) y Cuadro 9 (área MC), mismos que permiten calcular los coeficientes de confianza para MT en 0.9915 y para MC 0.9997. Estos valores indican que las medias son significativamente diferentes.

Cuadro 8. Análisis de comparación de medias entre la campaña de invierno y la de primavera para las concentraciones de ozono promedio en Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México

	<i>Invierno</i>	<i>Primavera</i>
Media	98.56197043	105.0969484
Varianza	65.94468428	38.96467793
Observaciones	17	14
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	29	
	-	
Estadístico t	2.531817209	
P(T<=t) una cola	0.00851141	
Valor crítico de t (una cola)	1.699126996	
P(T<=t) dos colas	0.017022821	
Valor crítico de t (dos colas)	2.045229611	

Cuadro 9. Análisis de comparación de medias entre la campaña de invierno y la de primavera para las concentraciones de ozono promedio en Monte de las Cruces, Huixquilucan, Estado de México

	<i>Invierno</i>	<i>Primavera</i>
Media	102.5749361	121.3935312
Varianza	118.2817663	92.81396458
Observaciones	11	9
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	18	
	-	
Estadístico t	4.100159869	
P(T<=t) una cola	0.000335991	
Valor crítico de t (una cola)	1.734063592	
P(T<=t) dos colas	0.000671982	
Valor crítico de t (dos colas)	2.100922037	

1.8. DISCUSIÓN

El incremento en la concentración de ozono por cada 100 m de aumento en la altitud fue de 7 ppb en las dos áreas de estudio si se considera la parte más alta respecto a la parte más baja. En la época seca fría, este incremento fue de 5 ppb por cada 100 m. Ribas y Peñuelas (2006), encontraron que la concentración de ozono se incrementó en 2 ppb por cada 100 m de elevación, un resultado similar a las 1.3 ppb por 100 m reportadas para las montañas de la región occidental del estado de Washington, USA (Cooper y Peterson, 2000). En el estudio de Ribas y Peñuelas, el ozono fue estudiado en una latitud de 42° N, en un transecto entre los 1,000 y 2,400 m y en el estado de Washington la zona estudiada se ubica a 48° de latitud Norte, entre los 200 y 2000 m.

En el caso del Valle de México, esta se ubica a 19 ° de latitud Norte y el transecto altitudinal se ubica entre los 3,000 y 3,500 m. La latitud influye en la intensidad de los gradientes de concentración de ozono, tal como Gerosa *et al.*, (2007) lo documentaron para Europa central. En meteorología se ha documentado que el índice de radiación ultravioleta, que es la radiación encargada de formar ozono a partir del óxido nitroso y el oxígeno es muy alta en el Ecuador y los trópicos, y en las latitudes medias suele ser de moderada a baja la mayor parte del año. Los reportes de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), dependiente del ministerio del medio ambiente de España, reportan consistentemente un índice de luz UV 3 veces mayor en la cima del pico Teide, en Canarias, a 3,178 msnm respecto a los que hay en las playas de la misma isla.

En la época seca fría, cuando la disminución de la incidencia de rayos UV presenta su menor valor, debido a la declinación del sol (40°) respecto al azimuth, coincidió con el incremento de 5 ppb por cada 100 m de elevación, que fue el menor de todas las campañas. En las campañas de lluvia y cálida seca el sol se encontró más alto al medio

día, con un ángulo de 19° de declinación para la época lluviosa y 14° de declinación para la de primavera

(Los valores de declinación solar se calcularon utilizando un sitio en internet (<http://www.fourmilab.ch/cgi-bin/Earth/action?opt=-p>) que incorpora todos los parámetros de la órbita terrestre para conocer, en un día y hora determinada, el paralelo sobre el cual el sol incide de manera perpendicular a la tierra.). En las campañas lluviosa y de primavera se incrementó la concentración de ozono a una tasa de 7 ppb/100 m de elevación, es decir, el gradiente es más grande cuando el sol tiende a incidir de manera perpendicular a la superficie terrestre. Esta elevada incidencia de radiación solar y la altitud podrían estar produciendo un gradiente con mayor incremento en la concentración de ozono en el Valle de México respecto a la altitud que en lugares de países templados y a menor altitud.

De acuerdo con la comparación de medias entre el verano y el invierno en las dos zonas de estudio (Cuadros 4 y 5 sección 1.6.2.1) las medias se pueden considerar iguales. Esto puede deberse a que en el verano, las lluvias y nublados constantes en las zonas montañosas bloquean parte de la radiación ultravioleta, evitando que los precursores para la formación del ozono reaccionen, y por otra, la humedad elevada reacciona con los precursores directos, principalmente óxidos de nitrógeno, los cuales forman ácido nítrico que reacciona con otras partículas formando aerosoles y sales que se depositan en el suelo (Vega *et al.*, 1995).

Las concentraciones de ozono encontradas en este trabajo para la zona MT, que está fuera de la trayectoria de los contaminantes, fueron mucho mayores de lo que se esperaba. A partir de 1997 se ha encontrado (Jazcilevich *et al.*, 2003; García, 2007) que las corrientes de aire en la ZMCM tienden a fluir en horas de la tarde hacia las montañas del Ajusco, son llevadas por convección vertical a alturas mayores de la capa de mezcla que se ubica a 900 metros por arriba del piso de la ZMCM (García, 2007), recorren una trayectoria hacia el noreste por los

vientos de gran altura y tras ponerse el sol comienzan a descender por advección térmica en la zona opuesta de la cuenca de México.

García (2007), encontró que además, en la zona de Cuajimalpa y Huixquilucan, donde se ubica el área MC convergen los flujos de la Cuenca de México y la Cuenca de Toluca, llevando los contaminantes y sus precursores a alturas de 2,000 a 4,000 metros por encima del nivel de la cuenca de México. En horas de la madrugada una parte de los contaminantes descienden en la zona donde se originó el ascenso de los contaminantes y otra parte que es transportada hasta los llanos de Apan, a casi 100 km de la zona y también hacia la Sierra Nevada, donde baja y se deposita, incluyendo la zona donde se ubica el área MT. Ello significa que a primeras horas de la mañana, una cantidad apreciable de precursores del ozono se encuentran en la zona oriental de la cuenca de México, en la región boscosa, listas para reaccionar con la luz solar y formar ozono.

La parte de ozono que desciende sobre la zona de Cuajimalapa y Huixquilucan explica porqué, en primeras horas de la madrugada, se observa un pequeño pico (entre las 01 y las 03 horas) en la concentración de ozono en esa área y otras zonas aledañas, donde el área MC queda comprendida. (Anexo A).

A primeras horas de la mañana se registra una alta emisión de hidrocarburos biogénicos (aceites esenciales, terpenos) de la vegetación que favorecen aun más la síntesis de ozono troposférico en áreas alejadas de las ciudades y que reciben precursores como los óxidos de nitrógeno (Peñuelas y Staudt, 2010).

1.9. CONCLUSIONES

Las concentraciones de ozono en el verano en las zonas montañosas no difieren de las que se encuentran en otras épocas del año, con excepción de la primavera.

Aunque el área del Cerro Tláloc no se ubica en la zona de viento abajo del Valle de México, con frecuencia las concentraciones de ozono son tan altas como en las montañas del Ajusco y sierra de Las Cruces.

El gradiente altitudinal de ozono está bien caracterizado en el área del Monte de las Cruces.

En el macizo del Cerro Tláloc no se pudo caracterizar un gradiente altitudinal de concentración de ozono.

1.10. LITERATURA CITADA

Alvarado R.D. 1989. Declinación y muerte del bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Valle de México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. 78 p.

Alvarado R.D.; De Bauer L.I.; Galindo A. J. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environ. Pollution*, 80: 115-121

Augustaitis A; Bytnerowicz A. 2008. Contribution of ambient ozone to Scots pine defoliation and reduced growth in the Central European forests: A Lithuanian case study. *Environ. Pollution*, 155: 436-445

Bauer L.I.; Krupa S.V. 1990. The Valley of Mexico: Summary of observational on its air quality and effects on vegetation. *Environ. Pollution*, 65: 109-118.

Bauer L.I.; Hernández-Tejeda T. 2007. A review of ozone-induced effects on the forests of central Mexico. *Environ. Pollution*, 147: 446-453

Bertrand A.; Robitaille G.; Nadeau P; Castonguay Y. 1999. Influence of ozone on cold acclimation in sugar maple seedlings. *Tree Physiology*, 19: 527-534

Bytnerowicz A., Arbaugh M., Schilling S., Witold F., Alexander D. 2008. Ozone distribution and phytotoxic potential in mixed conifer forests of the San Bernardino Mountains, Southern California. *Environ. Pollution*, 155: 398-408

Chevone, B. I., Linzon, S. N.: 1988, Tree Decline in North America. *Environ. Pollution*, 50: 87-100

Cocheo, V., Boaretto, C., Sacco, P. 1996. High uptake rate radial diffusive sampler suitable for both solvent and thermal desorption. *American Industrial Hygiene Association Journal* 57: 897-904.

Coleman M.D.; Dickson R.E.; Isebrands J.G.; Karnosky D.F. 1996. Root growth and physiology of potted and field-grown trembling aspen exposed to tropospheric ozone. *Tree Physiology*, 16: 145-152

Cooper S.M.; Peterson D.L. 2000. Spatial distribution of tropospheric ozone in western Washington, USA. *Environ. Pollution*, 107: 339-347

GDF. 2009.

http://www.sma.df.gob.mx/simat2/informe2009/pdf/informe2009_calidaddelaire.pdf

Felzer B.; Kicklighter D.; Melillo J.; Wang C.; Zhuang Q; Prinn R. 2004. Effects of ozone on Net Primary Production and carbon sequestration in the conterminous United States using a biogeochemistry model. *Tellus*, 56B pp 230-248

Fuhrer J., Achermann B. (eds) 1994 Critical Levels for Ozone. UNECE Workshop Report, Schriftenreihe der FAC Berne-Liebefeld.

Fuhrer J., Achermann B. (eds) 1999 Critical Levels for Ozone – Level II. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, Berne. Environmental Documentation No. 115.

García E. 1968. Los climas del Valle de México. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, Estado de México, 63 p.

García R.A. 2007. Modelación de la calidad del aire y la meteorología en el Valle de México. En: VI simposio de contaminación atmosférica, Colegio Nacional y Universidad Autónoma Metropolitana. pp xvii

Gerosa G.; Ferretti M.; Bussotti F.; Rocchini D. 2007. Estimates of ozone AOT40 from passive sampling in forest sites in South-Western Europe. *Environ. Pollution*, 145: 629-635

Heliotis D.F.; Karandinos G.M.; Whiton C.J. 1988. Air Pollution and the Decline of the Fir Forest in Parnis National Park, Near Athens, Greece. *Environ. Pollution*, 54: 29-40

Hernández T.T. 1984. Efecto de los gases oxidantes sobre algunas especies del género *Pinus* nativas del Valle de México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. México. 109 pp

Hernández T.T.; De Bauer L.I. 1986. Photochemical oxidant damage on *Pinus hartwegii* at the “Desierto de los Leones” D.F. *Phytopathology*, 76 (3), pp 377

Jáuregui O.E. 1958. El aumento de la turbiedad del aire en la ciudad de México. *Rev. Ing. Hidr. En Mex.* Vol. 12 (3) 10 p.

Jáuregui O.E.; Luyando E. 1992. Patrones de flujo de aire superficial y su relación con el transporte de contaminantes en el Valle de México. Registro 4.1.74 en el Centro de Ciencias de la Atmosfera de la UNAM: 51-78

Jazcilevich A.D.; García A.R.; Ruíz S.L.G. 2003. A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico. *Atmos. Environ.* 37: 183-193

Jazcilevich A.D.; García A.R.; Caetano E. 2005. Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the valley of Mexico. *Atmos. Environ.* 39: 5481-5489

Karlsson P.E.; Pleijel H.; Pihl-Karlsson G.; Medin E.L.; Skärby L. 2000. Simulations of stomatal conductance and ozone uptake to Norway spruce saplings in open-top chambers. *Environ. Pol.* 109: 443-451

Karlsson P.E.; Medin E.L.; Selldén G.; Wallin G.; Ottosson S.; Pleijel H.; Skärby L. 2002. Impact of ozone and reduced water supply on the biomass accumulation of Norway spruce saplings. *Environ. Pollution.* 119: 237-244

Karlsson P.E., Selldén G., Pleijel H. (eds) 2003 Establishing Ozone Critical Levels II. UNECE Workshop Report, IVL report B 1523, IVL Swedish Environmental Research Institute, Gothenburg, Sweden. <http://www.ivl.se>

Krupa S.; Nosal M.; Peterson D.L. 2001. Use of passive ambient ozone (O₃) samplers in vegetation effects assessment. *Environ. Pol.* 112: 303-309

López L.M.A.; Velázquez M.A.; Acosta M.J.; Estañol B.E. 2006 Biomass distribution in declining sacred-fir seedlings. *Interciencia [en línea]*, vol. 31, no 6. Cita en <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/AertPdfRed.jsp?iCve=33911711>. ISSN: 0378-1844

Manning W.J. 2005. Establishing a cause and effect relationship for ambient ozone exposure and tree growth in the forest: Progress and an experimental approach. *Environ. Pollution*, 137: 443-454

Matyssek R.; Wieser G.; Nunn A.J.; Kozovits A.R.; Reiter I.M.; Heerdt C.; Winkler J.B.; Baumgarten M.; Häberle K.H.; Grams T.E.E.; Werner H.; Fabian P.; Havranek W.M. 2004. Comparison between AOT40 and ozone uptake in forest trees of different species, age and site conditions. *Atmos. Environ.* 38: 2271-2281

Murray R. 1976. *Estadística, teoría y 875 problemas resueltos*. Ed McGraw-Hill. Colombia. pp 167-169.

Muzika R.M.; Guyette R.P.; Zielonka T.; Liebhold A.M. 2004. The influence of O₃, NO₂, and SO₂ on growth of *Picea abies* and *Fagus sylvatica* in the Carpathian Mountains. *Environ. Pollution*, 130: 65-71

Ollinger V.S.; Aber D.J.; Reich B.P. 1997. Simulating ozone effects on forest productivity: Interactions among leaf, canopy, and stand-level processes. *Ecological Applications*. 7, (4): 1237-1251

Ortiz S., C.A. y H.E. Cuanalo de la C. 1977 Levantamiento fisiográfico del área de influencia de Chapingo. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, Estado de México. 83 p.

Paoletti E. 2005. Ozone slows stomatal response to light and leaf wounding in a Mediterranean evergreen broadleaf, *Arbutus unedo*. *Environ. Pollution*. 134: 439-445

Palma T.A. 1996. Tipología del uso forestal de la tierra de la región norte de la Sierra Nevada y su cartografía. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. 103 p.

Peñuelas J., Staudt M. 2010. BVOCs and global change. *Trends in Plant Science* 15: 133-144.

Ribas A.; Peñuelas J. 2006. Surface ozone mixing ratio increase with altitude in a transect in the Catalan Pyrennes. *Atmos. Environ.* 40: 7308-7315

Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México, D.F. 432 p

Sanz M.J.; Calatayud V.; Sánchez-Peña G. 2007. Measures of ozone concentrations using passive sampling in forests of South Western Europe. *Environ. Pollution*, 145: 620-628

Stevenson D., Doherty R., Sanderson M., Johnson C., Collins B., Derwent D. 2005. Impacts of climate change and variability on tropospheric ozone and its precursors. *Faraday Discussions*; 130: 41-57.

Vega, E.; Romero, D.; Barbiaux, M.; García, I.; Ruiz, M.E. Problemática de las Partículas Suspendidas en la Atmósfera de la Ciudad de México, Reporte # GCA9505, 1995. Instituto Mexicano del Petróleo, México, DF, México.

Wieser G.; Manning W.J.; Tausz M.; Bytnerowicz A. 2006. Evidence for potential impacts of ozone on *Pinus cembra* L. at mountain sites in Europe: An overview. *Environ. Pollution*, 139: 53-58

Capítulo 2 Índices de exposición al ozono ambiental y daño a la salud de *Abies religiosa*.

2.1. Resumen

La contaminación por ozono y la exposición a este contaminante produce daños en la salud de los árboles. En Europa, Estados Unidos y Canadá se ha evaluado la pérdida de productividad y vigor en diversas especies de árboles, tanto para cultivos de maple (*Acer saccharum*) como para otras especies forestales. En las áreas montañosas cercanas al Valle de México hubo una alta mortalidad de especies, principalmente *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* en los años 80. El propósito de este trabajo fue definir a partir de qué concentración de ozono en el aire se presentan efectos adversos en árboles de *Abies religiosa* (oyamel).

Se correlacionan los índices SUM00, AOT40, SUM60 y SUM80 contra la salud de árboles de oyamel en dos áreas de estudio contrastantes en el Valle de México, Monte de las Cruces, en Huixquilucan, Estado de México (área MC) y Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México (área MT). En cada área se ubicaron sitios a partir de 3100 msnm, con 100 metros de incremento al siguiente sitio hasta llegar al límite altitudinal de distribución de *Abies religiosa* o la cima del área estudiada.

En cada sitio se muestrearon los ejemplares de *A. religiosa* y se evaluaron conforme a una escala desarrollada por Miller (1963) y modificada por Alvarado (1989) para medir la salud de un árbol.

El nivel crítico de exposición al ozono es de 5 ppm*h (partes por millón-horas) para periodos de 6 meses. Para ajustar este valor a periodos de medición de tres semanas (21 días), se obtuvo el valor correspondiente de valor crítico para ese lapso de tiempo, siendo 0.5833 ppm*h

Se realizó un análisis del comportamiento de cada índice por área respecto a la altura, por época del año y considerando los tres valores anuales para cada área en la regresión. En el área MC se presenta correlación entre el daño a la salud y la exposición al ozono. En el área

MT, no hay correlación entre los daños a la salud y los índices de exposición acumulada, lo cual sugiere que el impacto del ozono en esta área no depende sólo de la altura, sino de procesos complejos asociados a la geografía de la zona. Debido a las características de la población de oyameles que aun viven en las áreas de estudio y la compleja interacción de diferentes factores, un enfoque en las dosis absorbidas a través de los estomas resultará de mayor utilidad en la estimación de impactos del ozono sobre las masas forestales en el Valle de México.

Palabras clave: Escala de Miller, daño *Abies religiosa*, exposición al ozono, AOT40

2.2. Abstract

Ozone pollution and exposure of trees to the pollutant is harmful to trees' health. In Europe, the United States and Canada the loss of productivity and vigor in various tree species has been assessed, for maple (*Acer saccharum*) and other forest species. In the mountainous areas near the Valley of Mexico there was high mortality of species, especially *Abies religiosa* and *Pinus hartwegii* in the 80's. The purpose of this study is to define which concentration of ozone in the air has higher correlation with the adverse effects on *Abies religiosa* (fir) trees.

The SUM00, AOT40, SUM60 and SUM80 indexes were correlated against fir trees' health in two opposite areas in the Valley of Mexico. These areas are Monte de las Cruces, in Huixquilucan, Estado de México (MC area) and Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México (MT area). In each area sites were located from an altitude of 3100 meters, stepping up every 100 meters, up to the superior limit of the *Abies religiosa* distribution or the summit of a mountain in lower elevations.

For each site in a study area, all *A. religiosa* trees in a circular, 1000 square meters stand were accounted and evaluated according to a scale, developed by Miller (1963) and modified by Alvarado (1989) to assess the general health status of a tree. The critical values of

accumulated exposure to ozone were adjusted to fit a 21 day exposure, derived from a 180 day exposure value.

A regression analysis of the behavior of each accumulated ozone exposure index with respect to altitude was carried out, taking into account the three seasonal annual values for each study area. In MC area there is correlation of the damage in trees' health and the exposition to ambient ozone alone. In MT area there is no correlation between observed damages to trees' health and the indexes of accumulated exposure. This fact implies that ozone impacts on fir's health in this area do not depend only on changes in altitude but on complex processes associated with the zone's geography. Due to fir's population characteristics in the studied areas and the interaction between many factors, an approach on absorbed dose through stomata will result in a better assessment of ozone impacts in forested areas at the Valley of Mexico

Keywords: Miller scale, *Abies religiosa* damage, ozone exposure, AOT40

2.3 INTRODUCCIÓN

La evaluación del daño por ozono a los árboles y la cuantificación del mismo constituye una de las tareas científicas más complejas de la ciencia forestal actual, pues los árboles en zonas forestales están sometidos a una gran cantidad de factores bióticos y abióticos, que son independientes entre sí, pero en conjunto determinan la sensibilidad y susceptibilidad a los efectos de la exposición a largo plazo a contaminantes y otros agentes estresantes.

Con la finalidad de comprender la relación entre la concentración de ozono en la atmósfera y sus efectos en los árboles y en diversos tipos de vegetación, durante la década de los 90, se introdujo el concepto de niveles críticos de ozono por la UNECE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa) (Fuhrer, 1994; Kärenlampi y Skärby, 1996) y se definieron como el índice de exposición AOT40. El propósito

del desarrollo de este índice fue predecir riesgos por la exposición al O₃ más que validar las relaciones causa-efecto en las plantas. Para los árboles forestales, el nivel crítico AOT40 se fijó como 10 ppm*h (partes por millón-horas) para un periodo de exposición de 6 meses (independientemente de la especie y región), sin tomar en cuenta la exposición por debajo de 40 ppb_v y la nocturna. Recientemente el nivel crítico fue reducido a 5 ppm*h (UNECE, 2004)

El cálculo del índice se realiza durante el semestre en que los árboles se encuentran más activos, que es normalmente de abril a agosto. Durante las horas diurnas con radiación solar mayor de 50 W m⁻² (normalmente una hora después de salir el sol y hasta una hora antes de ponerse), las concentraciones de O₃ se suman si exceden de 40 ppb_v y la diferencia entre la concentración medida y la concentración umbral de 40 ppb_v se acumula a lo largo de toda la temporada de medición.

En 1997 la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos publicó, bajo el estándar secundario de los Estándares Nacionales de la Calidad del Aire Ambiental (NAAQS), en el apartado referente al ozono, el índice W126, el cual, aunque busca dar mayor peso a las concentraciones mayores de ozono, no tiene una base biológica y no permite definir niveles críticos para la protección a la vegetación (Feldman y Langworthy, 2008). En Canadá el ministerio de medio ambiente, en el capítulo 8, sección 8.3.2. de sus Objetivos de la Calidad del Aire Ambiental Nacional menciona como más apropiado para las circunstancias de dicho país el índice SUM60, calculado de la misma manera que el AOT40, pero con un umbral más alto, de 60 ppb_v, que representa una pérdida del rendimiento en las cosechas del 10%. La Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) también considera los índices SUM60 y SUM80, en los cuales los umbrales son 60 y 80 ppb_v, respectivamente.

La sensibilidad al ozono varía entre especies y de acuerdo con las condiciones ambientales y de sitio donde se desarrolla una especie arbórea. La principal variable fisiológica que determina la sensibilidad y

tolerancia a las concentraciones de ozono elevadas en el medio ambiente es la conductancia estomática, que se expresa normalmente como el flux de agua a través de una unidad de superficie foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). En diferentes estudios se aborda la influencia de la disponibilidad del agua y su déficit en la apertura estomática. (Karlsson *et al.*, 2000, 2002, 2003; Matyssek *et al.*, 1995 2004; Alonso *et al.*, 2005; Paoletti, 2005; Ribas *et al.*, 2005; Wieser *et al.*, 2006; Elvira *et al.*, 2007)

El ozono parece tener un efecto nocivo cuando a bajas concentraciones se introduce en una planta bien irrigada, sin estrés, produciéndose un flujo constante del exterior hacia el interior de la hoja, donde los principales daños son producidos al aparato fotosintético y a las paredes celulares de las células guarda de los estomas, causando incapacidad a la planta para evitar la pérdida excesiva de agua (Paoletti, 2005).

Con los antecedentes descritos y ante la falta de estudios en esta área para México, en este capítulo se estudia la relación entre la exposición acumulada al ozono y el daño que presentan los árboles de *Abies religiosa* en dos áreas en extremos opuestos en las montañas que rodean al Valle de México, en tres épocas del año, una de las áreas se sitúa en Monte de las Cruces, Huixquilucan, Estado de México (área MC), situada viento abajo en el Valle de México y la otra área en las faldas de la vertiente occidental del Cerro Tláloc (también se le conoce como Monte Tláloc), área que se localiza viento arriba y se supone está libre de la influencia de la contaminación que genera la ciudad de México.

En cada área se establecieron sitios en alturas separadas cada 100 metros desde los 3,100 hasta los 3,500 metros de altitud, que es donde se distribuye *Abies religiosa* (Rzedowski, 1978). Utilizando las concentraciones determinadas para el gradiente altitudinal caracterizado para cada área en el Capítulo 1, se derivaron las concentraciones de exposición acumulada (excedencias sobre un

umbral de concentración dado) para cero ppb_v, 40 ppb_v con luz diurna (radiación mayor a 50 watts por metro cuadrado), 60 ppb_v y 80 ppb_v, las cuales permitieron calcular los índices SUM00, AOT40, SUM60 y SUM80, respectivamente.

El daño a la salud de los árboles de *Abies religiosa* se determinó mediante el uso de una escala que cuantifica atributos de posición social del árbol, retención de follaje, porcentaje de copas y aparición de signos o síntomas de enfermedades. La escala fue desarrollada por Miller (1963) para *Pinus ponderosa* y modificada y validada por Alvarado (1989) para *Abies religiosa*.

Se realizaron correlaciones entre la salud de los árboles evaluados y la exposición acumulada de ozono para estimar el impacto que tiene en la salud de los árboles de *Abies religiosa*.

2.4. OBJETIVOS.

Establecer la correlación entre el daño en los árboles de *Abies religiosa* y la exposición al ozono.

Determinar el daño a la salud de los árboles de *Abies religiosa* en las áreas de estudio mediante el uso de una escala visual

Utilizar diferentes índices que toman en cuenta la exposición acumulada al ozono para correlacionarla con los daños que se observan en la salud de *Abies religiosa*

2.5. HIPÓTESIS

Entre más alta sea la exposición acumulada al ozono en un sitio, mayor será el daño que se observe en el arbolado de *Abies religiosa*

El índice de exposición al ozono que mejor se correlacione con el daño que presentan los árboles de *Abies religiosa* será el que se encuentre más cercano a la concentración de ozono en el ambiente a partir de la cual el árbol sufre daños.

2.6. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para el cálculo de los diferentes índices de exposición al ozono se utilizaron los datos de concentración de ozono obtenidos para los sitios comprendidos dentro de las áreas de estudio descritas en el Capítulo 1. De acuerdo con la metodología propuesta para el cálculo del índice AOT40, se realizó la suma de las excedencias de concentración de ozono cuando se rebasaron concentraciones de 40 partes por mil millones en volumen (ppb_v) en los sitios de medición.

El cálculo de los índices de exposición al ozono se realizó con los datos de tres campañas de tres semanas de duración en diferentes estaciones del año. Los periodos a caracterizar fueron la época lluviosa, que se hizo coincidir con la llegada de las ondas tropicales y sistemas meteorológicos procedentes del mar Caribe y Golfo de México que propiciaron abundantes lluvias entre el 17 de septiembre y el 12 de octubre de 2007, seguido por un monitoreo de tres semanas en época seca fría, en la cual las inversiones térmicas fueron frecuentes con

temperaturas al amanecer por debajo de cero grados y comprendió del 14 de noviembre al 5 de diciembre de 2007 y la época seca cálida, con mucha estabilidad atmosférica y altas temperaturas, la cual comprendió del 2 al 23 de abril de 2008. El AOT40 corresponde a periodos de tres semanas, y aunque lo usual es reportarlo para periodos de seis meses, en un estudio Ribas y Peñuelas (2003) definieron un valor crítico de exposición acumulada de 1.28 ppm*h para la fitotoxicidad del ozono en plantas de *Nicotiana tabacum* variedad Bel-W3 en 15 días de exposición.

A diferencia de las variaciones drásticas en las concentraciones horarias promedio en los países de clima templado, donde parte del otoño y primavera y todo el invierno hay nublados constantes, lluvias y la incidencia de los rayos solares es muy oblicua (Miller *et al.*, 1994), en el Valle de México se tiene una alta insolación a lo largo de todo el año. Esto mantiene las concentraciones de ozono prácticamente en los mismos valores, por lo cual si se ajusta el valor crítico de seis meses al correspondiente a un periodo de 21 días (AOT40_{21d}), el promedio de los AOT40_{21d} de las tres estaciones puede estimar con un buen margen de aproximación el AOT40 que se mediría para seis meses.

2.6.1. Monitoreo continuo

Durante los meses de marzo y abril de 2008 se colocaron cuatro sitios de medición de ozono utilizando monitores continuos H2B. La principal ventaja de estos monitores es que miden la concentración de ozono como función de la absorbancia de la luz ultravioleta de 253.7 nm. Las calibraciones se llevan a cabo en laboratorio y la precisión de la detección de ozono varía muy poco.

Se recolectaron lecturas suficientes para tener una confianza del 99% y un error del 1% en las distribuciones horarias de ozono que se generaron para corregir las lecturas de los muestreadores pasivos, conforme a la ecuación:

$$n = \frac{N^2 Z_{\alpha/2}^2 S^2}{N^2 d^2 + Z_{\alpha/2}^2 S^2}$$

Donde n = número de observaciones requeridas para tener un error determinado con una confianza dada,

N = Número de observaciones totales

$Z_{\alpha/2}$ = Estadístico Z para el nivel de confianza dado en una distribución normal

S^2 = Varianza de los datos

d = (1 – error determinado)

Los muestreadores pasivos tienen diferentes tasas de absorción del ozono que varían con la temperatura y la humedad relativa principalmente y de manera un poco menor con la altitud (Delgado, 2004) Se realizó un análisis de regresión entre las concentraciones medidas por los monitores continuos y las concentraciones medidas utilizando los muestreadores pasivos, para obtener la ecuación de ajuste en cada área de estudio. De esta forma se realizó una corrección a las concentraciones registradas con los muestreadores pasivos para disminuir lo más posible los sesgos en las concentraciones de ozono que se utilizan para el análisis. En el ANEXO B se encuentran las gráficas de la variación de la concentración horaria de ozono medida en continuo.

2.6.2. Distribuciones horarias de ozono.

Las lecturas de los muestreadores continuos permitieron obtener el perfil horario de concentraciones y la fracción correspondiente a cada hora del promedio de concentraciones diario, para los sitios MC y MT. Con base en las concentraciones horarias promedio obtenidas en continuo se calculó un promedio para 24 horas. Posteriormente, cada valor de concentración horaria se expresó como una fracción del promedio para 24 horas. Puesto que los muestreadores pasivos sólo permiten estimar la concentración promedio diaria, se multiplicó por la

fracción correspondiente a cada una de las 24 horas del día de ese promedio (Krupa *et al.*, 2001, 2003; Tuovinen, 2002), con la finalidad de obtener una estimación del comportamiento horario de la concentración de ozono en cada uno de los sitios dentro de las áreas de estudio. Una vez obtenida dicha estimación del comportamiento horario, es posible realizar análisis con índices como AOT40, SUM60 y similares.

2.6.3. Procedimientos de Cálculo para el AOT40.

Para cada sitio dentro de las áreas de estudio MC y MT, ya conocida su distribución promedio de concentraciones horarias, se sumaron las concentraciones que excedieron 40 ppb_v por cada hora, en las horas comprendidas entre las 8 de la mañana y las 7 de la tarde, que es cuando la radiación solar supera los 50 watts por metro cuadrado y se considera que los árboles comienzan a efectuar el intercambio gaseoso con fines fotosintéticos. Las excedencias horarias se toman como la concentración registrada por arriba del umbral y se le restan 40 ppb_v para acumular únicamente la excedencia sobre el umbral que define el índice AOT40 durante las tres semanas de duración del muestreo.

$$AOT40 = \sum_{i=1}^N (c_i - c_0), \text{ si } RAD > 50 \text{ W/m}^2 \text{ y } c_i > 40 \text{ ppb}$$

Donde:

i = i -ésima hora el periodo de cálculo

c_i = concentración de ozono en la i -ésima hora

c_0 = concentración del umbral de ozono

RAD = radiación solar

El SUM60 se calcula de manera similar, aunque considerando también las concentraciones nocturnas y restando a cada promedio horario excedido de 60 ppb dicha cantidad. En general, cualquier SUM N o AOT N se calcula acumulando la excedencia sobre el umbral de n partes por billón para cada promedio horario por la duración del periodo.

Puesto que se calcula un índice para 21 días y no para seis meses, se ajusta la proporción del valor crítico para bosques definido para el AOT40, que es de 5 ppm*h (partes por millón-horas) para seis meses, a su equivalente a 21 días que son 0.583 ppm*h. El SUM60, que es el índice que más usa el ministerio del medio ambiente de Canadá tiene valores críticos de 4.4 a 6.6 ppm*h (Health Canada, http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/naaqo-onqaa/ground_level_ozone_tropospherique/summary-sommaire/reference-identification-determination-eng.php)

2.6.4. Aplicación de la Escala de Miller modificada por Alvarado

Derivado de los trabajos de Miller (1963) orientados a desarrollar una escala visual que permita obtener una evaluación rápida de la condición de salud del arbolado en un área con disturbios por contaminación, y con el antecedente de su uso por investigadores mexicanos para la evaluación del daño al arbolado en zonas cercanas a la Ciudad de México (Bauer y Tejeda, 1984; 1986), incluyendo una variación para evaluar los daños a *A. religiosa*, se aplicó la escala modificada por Alvarado (1989) para la determinación de la salud de los árboles de los sitios estudiados. Para ello se consideraron los árboles en un área circular de 0.1 ha (1000 m²) con centro en el punto donde se localizó el muestreador pasivo de ozono. Para cada árbol se determinaron 4 atributos que incluye la escala:

Posición social.- La mayoría de los árboles sufren un deterioro severo por la toxicidad del ozono, lo que los lleva a perder biomasa en todos los compartimentos y como consecuencia, quedar en una posición de árboles suprimidos o muertos.



Figura 12. Árbol con síntomas severos (mortalidad de ramas, poco follaje)

Retención de acículas.- El oyamel produce nuevas acículas entre marzo y abril de cada año, con una morfología que adopta con dos yemas creciendo lateralmente respecto al tallo y una siguiendo la trayectoria del tallo, generan una sucesión de ramas con follaje abundante (CONAFOR, 2005). Sin embargo, cuando el árbol está afectado por ozono, el follaje puede presentar un amarillamiento o bronceado (López *et al.*, 1996), que lleva a la secesión de las acículas del año inmediato anterior en los casos más graves



Figura 13. Rama mostrando el follaje de años anteriores totalmente bronceado. Este follaje no realiza fotosíntesis y comúnmente se desprende del tallo en forma prematura

Porcentaje de copa que presenta el árbol.- Como resultado de la disminución en la capacidad de producción de fotosintatos, los árboles carecen de recursos para mantener las ramas más viejas y gruesas que demandan un alto grado de suministro de fotosintatos del follaje para mantenerse. Al estar limitados los árboles, estas ramas no pueden ser mantenidas y terminan muriendo dejando copas irregulares y poco pobladas. El oyamel tiene una morfología y densidad de copa muy característica, y es fácil advertir si un ejemplar tiene una alteración.



Figura 14. A la izquierda un ejemplar de *A. religiosa* con escaso crecimiento y copa menor al 20%. A la derecha, en el óvalo, se observan árboles de *Abies religiosa* en muy buen estado de cobertura de copa y salud

Observación de la presencia de signos o síntomas.- Los signos se refieren a la presencia de cuerpos fructíferos de hongos o malformaciones, canchales y en general heridas o malformaciones. Los síntomas abarcan la presencia de clorosis, ya sea total, moteado o bandeado, necrosis, bronceados y secreción de líquido con olor fétido en la base de los árboles.

El daño a la salud de los árboles depende de varios factores, como la presencia de otros contaminantes, principalmente óxidos de nitrógeno, nitratos de peroxiacetilo, contaminación del suelo con metales pesados, presencia de insectos y patógenos en la zona de estudio.

En la selección de sitios no se encontró presencia de insectos o patógenos. Aunque el aire de los sitios lleva una cantidad considerable de otros contaminantes, los síntomas observados en el follaje corresponden a los descritos para el ozono (Lopez *et al.*, 1996; 2006). Aún cuando otros contaminantes han estado presentes en el área, como los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y metales pesados, los hallazgos sobre la declinación forestal asociada al ozono en áreas cercanas a la ciudad de México (Bauer y Krupa, 1976; 1990; Bauer y Hernández-Tejeda, 1984) indican que el ozono ha sido el contaminante

que ha ocasionado el daño más fuerte y el principal contaminante aéreo que desencadenó la declinación de las masas de *A. religiosa* en las cañadas donde las acumulaciones de ozono alcanzan concentraciones muy altas.

La escala permite asignar un valor cuantitativo a variables cualitativas, agrupándolas por rangos. Alvarado (1989) validó la escala desarrollada originalmente por Miller (1963) para *Pinus ponderosa*, quedando adaptada así para calificar la salud y vigor del oyamel.

Cuadro 10. Calificación de la salud del oyamel de acuerdo a la escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989)

Valor	Posición Social	Retención de follaje	Porcentaje de copa	Vigor
0	Dominante	Más de 3 años	Mayor al 80 %	No hay signos o síntomas (SS)
1	Co-dominante	Dos a tres años	Entre 40 y 80 %	Presenta un SS
2	Suprimido	Un año	Entre 20 y 40 %	Dos SS
3	Muerto	Ralo, año actual	Menor al 20 %	Tres SS
4		Sin hojas		Más de 3 SS o muerte descendente
5				Muerto
6				Desaparecido

Conforme a esta escala un árbol totalmente sano y sin problemas tiene una calificación de cero. De acuerdo con esta escala, hasta una calificación de 3 representa un árbol sano, de 4 a 7 con algunas afectaciones en su salud, de 8 a 11 seriamente afectado, más de 12 corresponde a un ejemplar en muy mal estado o muerto.

2.6.5. Correlaciones entre índices de ozono.

Se presentan en formato gráfico los índices por campaña y área de estudio, así como su tendencia en el gradiente altitudinal para cada área de estudio (Monte de las Cruces y Cerro Tláloc). Para la regresión entre el valor de cada índice y la calificación de la salud del árbol bajo el criterio de la escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989), se tomaron los valores obtenidos de AOT40_{21d} para cada sitio dentro de las dos áreas de estudio, en las tres campañas, y se correlacionaron utilizando análisis de regresión para obtener el coeficiente de determinación y el valor crítico de Fisher (significancia) de la correlación entre variables.

2.7. RESULTADOS

2.7.1. Campaña estación lluviosa

Para esta campaña, todos los sitios en las áreas de estudio fueron estudiados por cuadruplicado, es decir, en cada sitio se colocaron 4 muestreadores.

SUM00

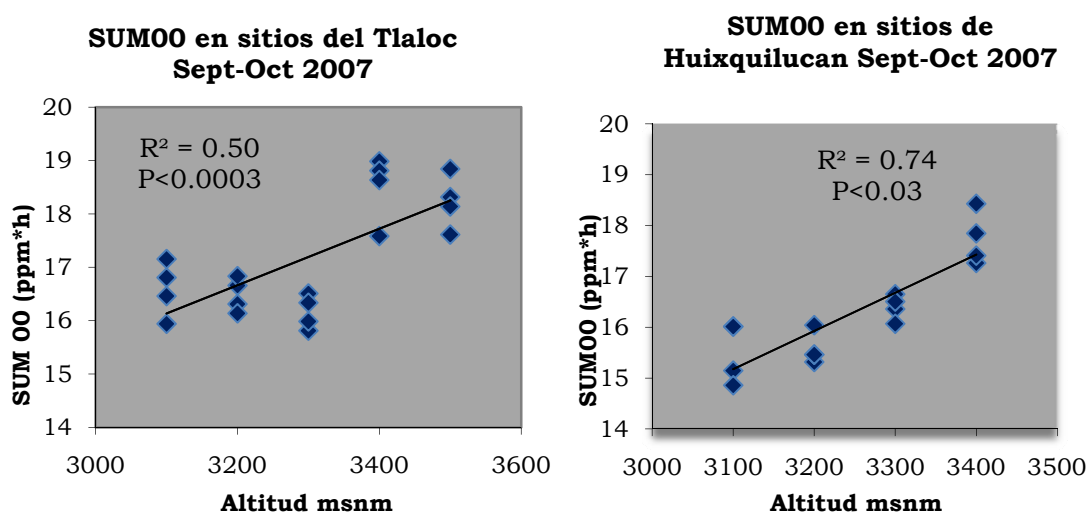


Figura 15. Comparación de SUM00 entre las dos áreas de estudio, en la campaña lluviosa

Como se muestra en la Figura 15, hay una tendencia al incremento del índice conforme aumenta la altitud, con un coeficiente de determinación más alto (0.74) en el área de Huixquilucan (MC) que en

Tlálloc (MT) (0.50). En ambas áreas la significancia de la correlación entre la variable SUM00 respecto a la altitud fue alta en MC y en MT

AOT40

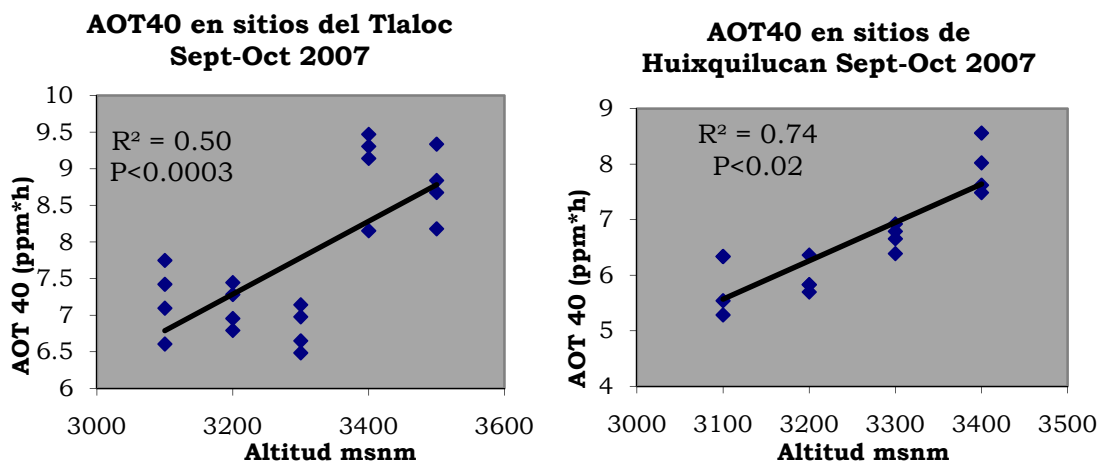


Figura 16. Comparación de AOT40 entre las dos áreas de estudio, en la campaña lluviosa

En la Figura 16, tanto en MT como en MC, el AOT40 para 21 días se ubica en valores de 6 a 9.5 ppm*h. Esto es algo considerable si se toma en cuenta que es la época de lluvias y que el valor crítico correspondiente es de 0.583 ppm*h, valor que corresponde a un periodo de 21 días si se toma en cuenta que para 180 días el valor de exposición acumulada al ozono sobre el cual ya se tienen riesgos para los bosques es de 5 partes por millón-horas (5 ppm*h) (UNECE, 2004). Existe una buena correlación entre la altitud y el incremento en los valores de exposición acumulada, lo cual coincide con los resultados encontrados para el gradiente altitudinal de concentraciones de ozono para la época lluviosa en las dos áreas de estudio (Ver Capítulo 1). En la Figura 16 también se aprecia que la variación en la exposición acumulada debida al incremento en la altitud tiene una significancia muy alta ($P < 0.0003$) en MT y alta ($P < 0.02$) en MC

SUM60

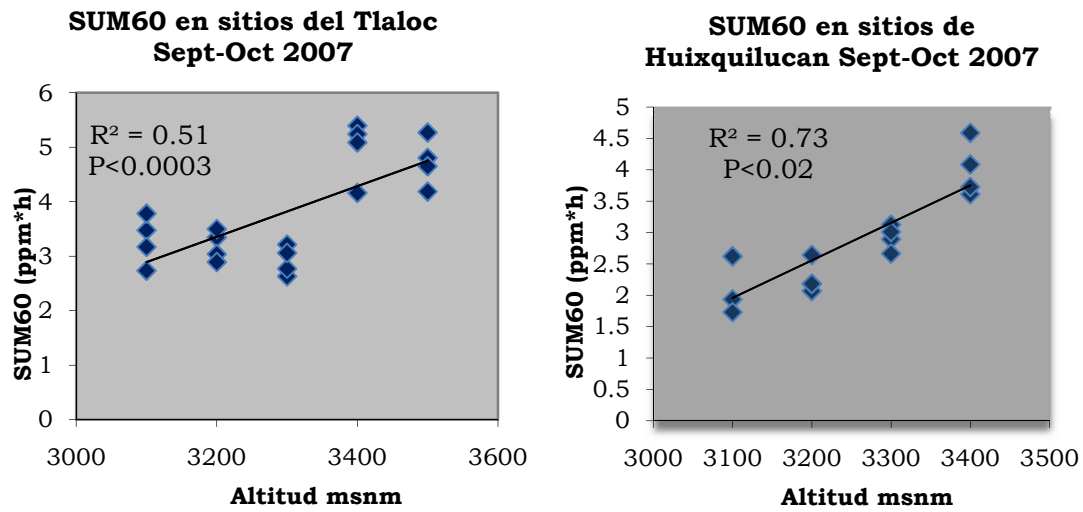


Figura 17. Comparación de SUM60 entre las dos áreas de estudio, en la campaña lluviosa

En la Figura 17 se observa que la correlación entre la exposición acumulada al ozono sobre un umbral de 60 ppb_v respecto a la altitud en las dos áreas de estudio tiene una correlación buena en MC y un poco menor, aunque sigue siendo moderadamente buena (el 51% de la variación en el índice se explica por el incremento en la altitud). La significancia de la regresión es muy alta en MT ($p < 0.0003$) y alta en MC ($p < 0.03$)

SUM80

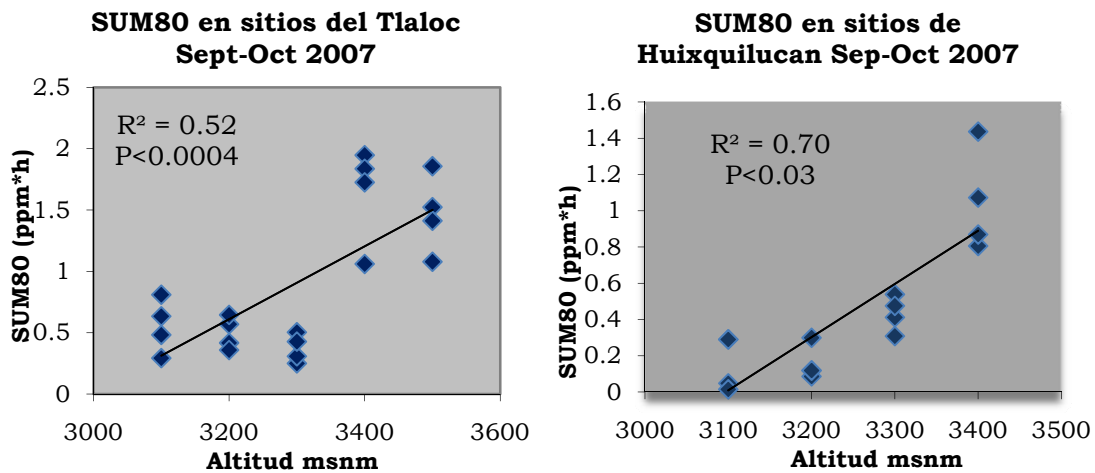


Figura 18. Comparación de SUM80 entre las dos áreas de estudio, en la campaña lluviosa

Al incrementarse el umbral a 80 ppb_v, algunos puntos tienen un valor de cero carga sobre el umbral. Conforme se incrementa el umbral de la concentración de ozono, se pueden sobrepasar las concentraciones en una localidad y no se podrá medir ninguna acumulación. Ese es el caso del SUM80, en los sitios a 3,100 y 3,200 metros de altitud en el área MC, donde la integración de las lecturas de 3 muestreadores estuvieron muy cercanas a cero y uno tuvo cero en el sitio a 3,100 msnm. La correlación entre la exposición acumulada al ozono con el umbral de 80 ppb_v tuvo buenos valores, $r^2 = 0.52$ y $r^2 = 0.70$ para las MT y MC, respectivamente (Figura 18). La significancia de la regresión fue alta en MC ($p < 0.03$) y muy alta en MT ($p < 0.0004$).

2.7.2. Campaña fría-seca

Durante esta campaña, cada sitio en cada una de las áreas de estudio fue medido por triplicado, es decir, utilizando tres muestreadores en cada sitio en cada una de las dos áreas.

SUM00

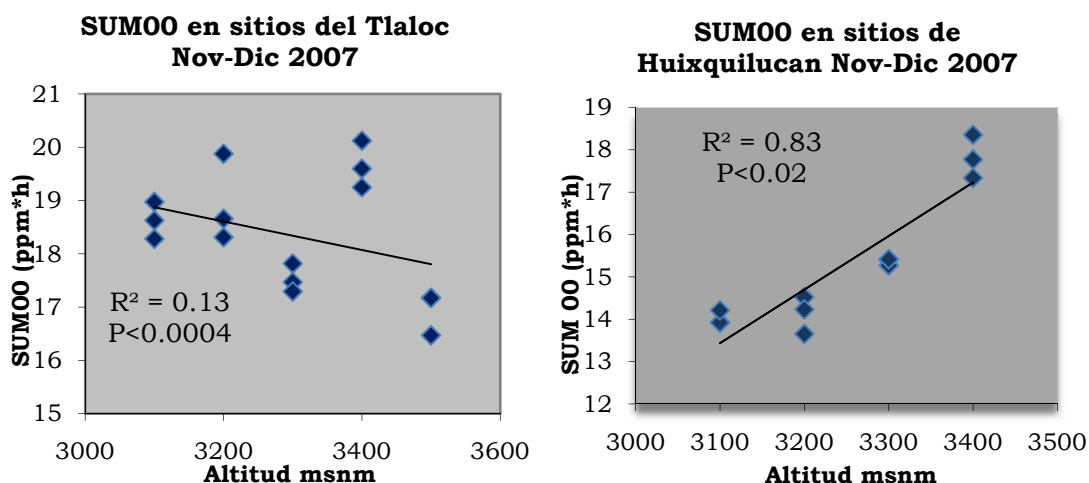


Figura 19. Comparación de SUM00 entre las dos áreas de estudio, en la campaña seca fría

En la Figura 19 se observa, para MT y MC, que la tendencia de las concentraciones de exposición acumulada al ozono respecto a la altura siguen la tendencia del gradiente altitudinal de ozono en cada área de estudio. La correlación en el sitio MT es baja ($r^2 = 0.13$), aunque en dicha correlación hay una disminución de la exposición acumulada al ozono que está asociada de manera altamente significativa con la altitud ($p < 0.0004$). En el área MC, la correlación es alta ($r^2 = 0.83$), con una tendencia contraria, puesto que la exposición acumulada al ozono se incrementa con la altitud. La significancia de la correlación para esta área es alta ($p < 0.02$).

AOT40

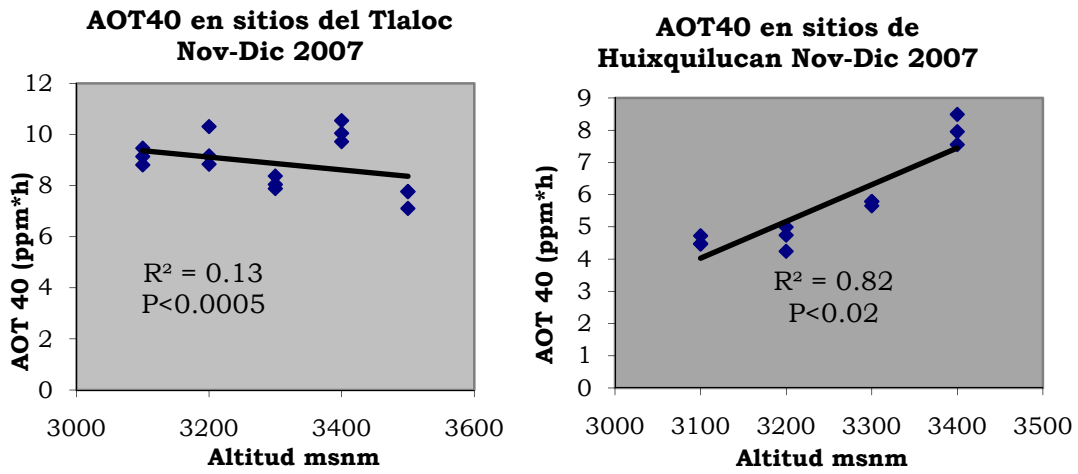


Figura 20. Comparación de AOT40 entre las dos áreas de estudio, en la campaña seca fría

En la Figura 20 se observa la tendencia de la correlación entre la exposición acumulada al ozono cuando se establece un umbral de 40 ppb_v, sobre el cual se acumulan las excedencias de ozono en los 21 días de análisis. Entre las áreas MT y MC hay tendencias en el incremento de la exposición acumulada respecto a la altitud. La correlación es baja para el área MT ($r^2 = 0.13$) y alta para el área MC ($r^2 = 0.82$). La significancia de la regresión es muy alta en el área MT ($p < 0.0005$) y alta para el área MT.

SUM60

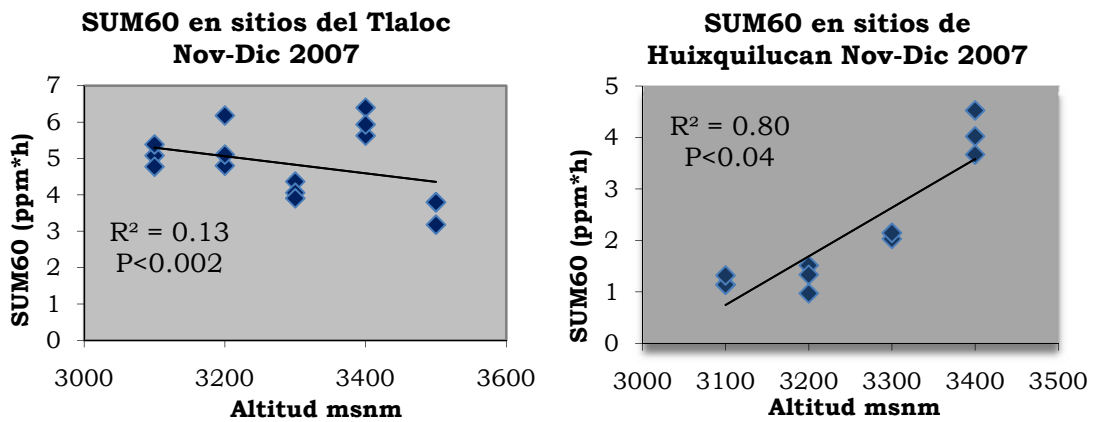


Figura 21. Comparación de SUM60 entre las dos áreas de estudio, en la campaña seca fría

La tendencia entre las dos áreas que se muestra en la Figura 21, cuando el umbral se sitúa en 60 ppb_v, muestra las tendencias contrarias en el comportamiento de la concentración de exposición acumulada al ozono. La correlación, aunque baja en el área MT ($r^2 = 0.13$) tiene una significancia muy alta, mientras en el área MC hay una correlación alta ($r^2 = 0.8$), con una significancia alta ($p < 0.04$).

SUM80

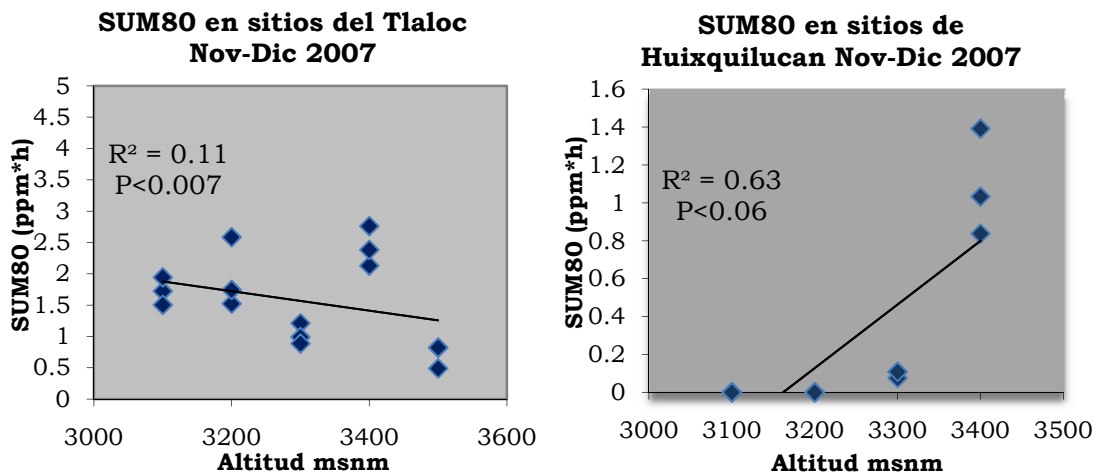


Figura 22. Comparación de SUM80 entre las dos áreas de estudio en la campaña seca fría

De manera similar a lo ocurrido en la campaña lluviosa, cuando el umbral de concentración de ozono se sitúa en 80 ppb_v para calcular una exposición acumulada en el tiempo de muestreo, se observa que en los sitios a altitudes de 3,100 y 3,200 metros en el área MC (Figura 22) las cargas de ozono (exposiciones acumuladas a ese contaminante) son de cero. Para esta área en particular no hubo un solo momento en el tiempo de muestreo en que se registraran concentraciones mayores a 80 ppb_v. La línea de tendencia se ha dejado a propósito para ilustrar como el coeficiente de determinación r^2 pierde valor, situándose en 0.63 para MC y la significancia de la regresión dejó de ser alta. En la primera gráfica de la Figura 22 se observa el comportamiento para el área MT, el cual mostró la misma tendencia contraria respecto al área MC en el incremento de la carga de ozono conforme aumenta la altitud. Como en

toda la campaña, la correlación fue baja ($r^2 = 0.11$), aunque altamente significativa ($p < 0.007$).

2.7.3. Campaña seca cálida

En esta campaña los sitios en cada área de estudio fueron analizados por triplicado. En el caso de Huixquilucan (MC), se decidió añadir un muestreador extra oculto en otra zona cercana. Sucedió que al final de la campaña se encontraron destruidos en su totalidad los muestreadores pasivos en el sitio a 3100 metros en el área MC, quedando a salvo el que estaba oculto.

SUM00

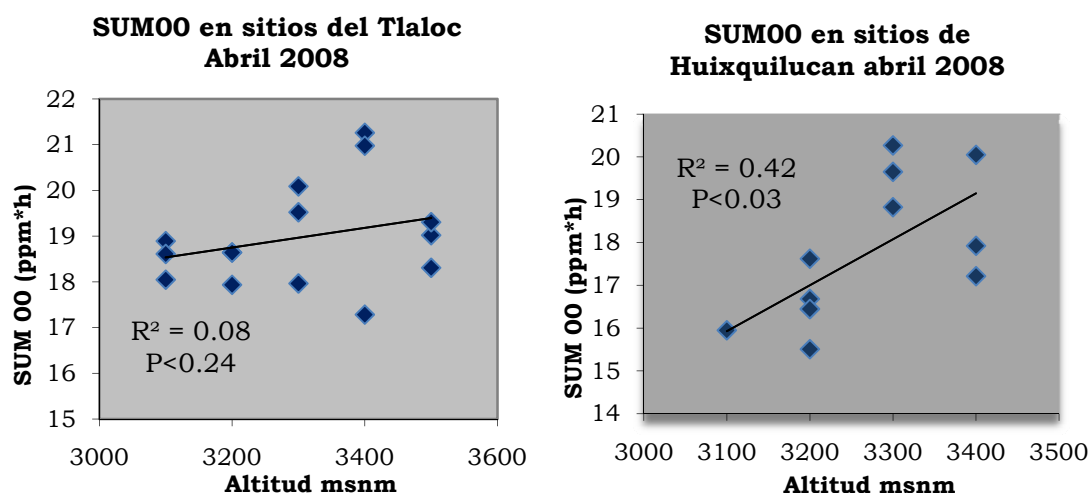


Figura 23. Comparación de SUM00 entre las dos áreas de estudio en la campaña cálida seca.

Como se ilustra en la Figura 23, en esta campaña las dos áreas tuvieron tendencia a incrementar la concentración de exposición acumulada al ozono conforme aumenta la altitud. Las lecturas en ambos sitios presentan una dispersión mayor que en las campañas anteriores. En la Figura mencionada se observa que la correlación fue muy baja en el área MT ($r^2 = 0.08$) y en MC fue mayor ($r^2 = 0.42$). La significancia es baja ($p < 0.24$) para MT y alta para MC ($p < 0.03$).

AOT40

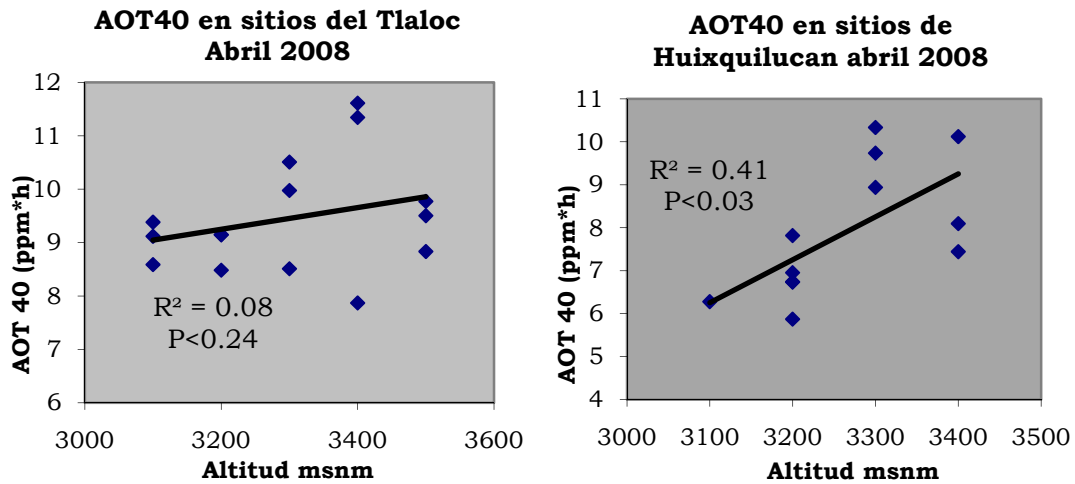


Figura 24. Comparación de AOT40 entre las dos áreas de estudio en la campaña cálida seca

En la determinación de la exposición acumulada al ozono en 21 días de la campaña a concentraciones diurnas por encima de 40 ppb_v, en la Figura 24 se observa una tendencia similar a la observada para SUM00 (Figura 23). Se destaca la gran dispersión de datos alrededor de la línea de ajuste en el área MT y que, aunque con menor dispersión, se aprecia para MC. La correlación es muy baja ($r^2 = 0.08$) en MT y $r^2 = 0.41$ para MC, con baja significancia para el modelo de regresión en MT ($p < 0.24$) y alta significancia ($p < 0.03$) para el caso del área MC.

SUM60

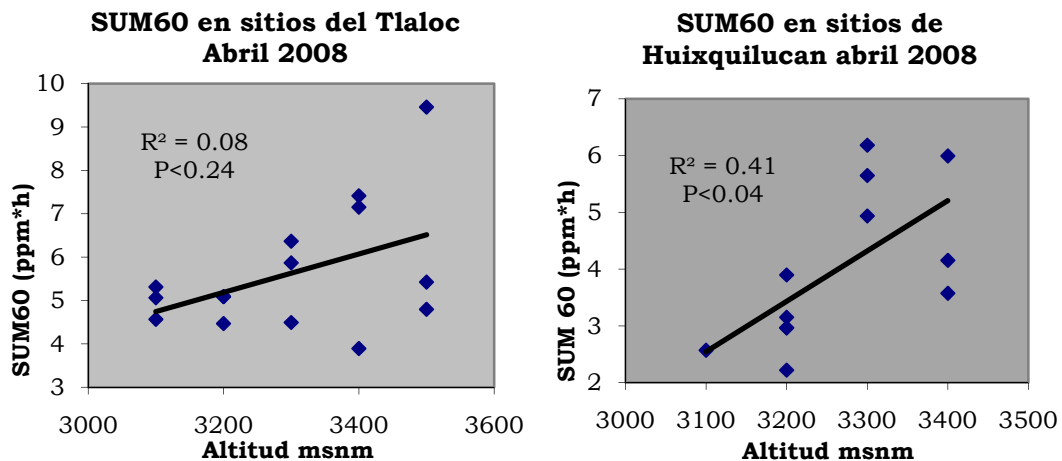


Figura 25. Comparación de SUM60 entre las dos áreas de estudio, en la campaña cálida seca

Al utilizar el índice SUM60, la tendencia al incremento en la exposición acumulada a mayor altitud, como se muestra en la Figura 25, se presenta en ambas áreas de estudio y se observa que la correlación y la significancia son bajas ($r^2 = 0.08$ y $p < 0.24$, respectivamente) para el área MT, mientras el área MC presenta una mejor correlación con una significancia alta ($r^2 = 0.41$ y $p < 0.04$, respectivamente).

SUM80

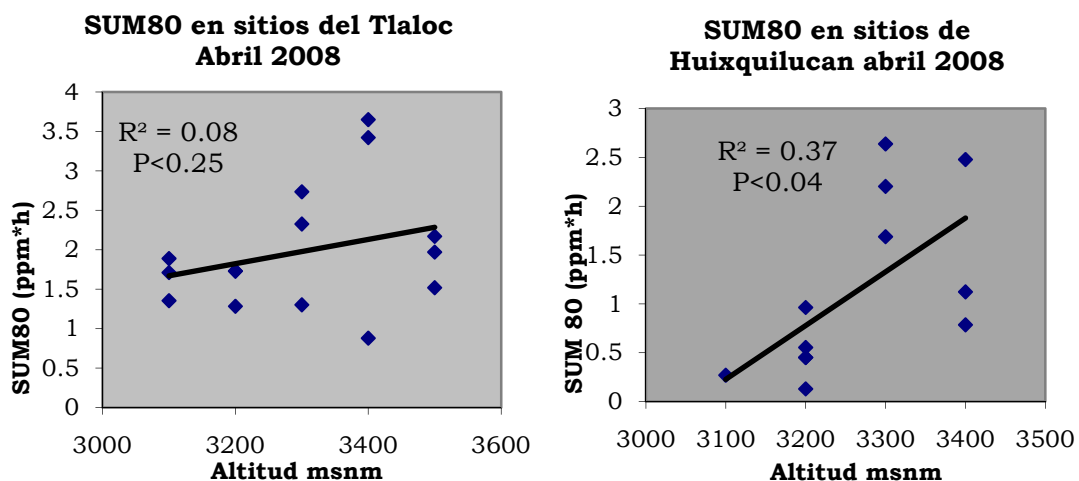


Figura 26. Comparación de SUM80 entre las dos áreas de estudio, en la campaña cálida seca

Cuando el cálculo de la exposición acumulada al ozono durante el periodo de estudio se llevó a cabo considerando concentraciones superiores a 80 ppb_v, el modelo de regresión lineal no sufrió cambios en el área MT, manteniéndose una correlación muy baja ($r^2 = 0.08$) y una significancia baja ($p < 0.25$) (Figura 26). En el área MC la correlación entre dicha exposición acumulada al ozono y la altitud disminuyó, con un coeficiente de determinación (r^2) de 0.37 y una significancia en la regresión alta, con $p < 0.04$. Para este índice SUM80, en las campañas previas no se sobrepasó el valor de 1.6 partes por millón-horas (ppm*h), mientras en esta campaña se sobrepasaron las 2.5 ppm*h.

En resumen, las concentraciones más altas de ozono se encuentran en los meses de primavera, que tienen una alta insolación, poca o nula nubosidad. En el caso del Cerro Tláloc, por su orografía compleja la circulación del aire y la distribución de contaminantes puede seguir patrones que no permiten una correlación entre cargas de exposición al ozono y la altura.

2.7.4. Censo de oyameles y escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989)

El Cuadro 11 muestra la calificación obtenida conforme a la escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989) para los árboles que se encontraron en los sitios de muestreo de 0.1 ha. El promedio de las calificaciones por atributo y la suma de los promedios se presentan en el Cuadro 11, incluyendo en la calificación total, entre paréntesis, el número de ejemplares censados

Cuadro 11. Promedios de calificación utilizando la escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989) para Oyameles en las áreas Monte de las Cruces (MC) y Cerro Tláloc (MT)

Lugar (msnm)	Cerro Tláloc (MT)				
	Posición social	Retención de follaje	Porcentaje de copa	Vigor	Calificación total
3100	0.25	0.875	0.75	1.625	3.5 (8)
3200	0.27	0.72	0.82	2.27	4.09 (11)
3300	0.55	0.89	1.11	2.22	4.78 (9)
3400	0.66	1.17	0.5	2	4.33 (6)
3500	0	0.46	0.23	1	1.69 (13)
Lugar (msnm)	Monte Las Cruces (MC)				
	Posición social	Retención de follaje	Porcentaje de copa	Vigor	Calificación total
3100	0.875	1.625	1.25	2.25	6 (8)
3200	0	2	2.25	2	6.25 (4)
3300	0.3	2	2.4	2.6	7.3 (10)
3400	0.14	2.28	2.71	2.57	7.71 (7)

En el área del Cerro Tláloc, por calificación total, el Cuadro 11 indica que en el sitio a 3,300 metros de altitud fue donde la salud de los oyameles se encuentra más dañada en los rodales evaluados, presentando en general un daño ligero a moderado en su salud (4.78 de 16, donde 16 es muerto). El resto del arbolado en los rodales evaluados en el cerro Tláloc presenta el mismo tipo de daño, excepto para 3,100 metros, donde es ligero y 3,500 metros, donde el daño es muy leve.

En el área de Monte de Las Cruces, el daño es moderado a fuerte, incrementándose conforme se incrementa la altitud. La retención de

follaje y el porcentaje de copa fueron los atributos de la escala que más influyeron la calificación total por altitud.

2.7.5. Correlación entre índices SUM00, AOT40, SUM60 y SUM80 de las tres campañas contra calificación de cada sitio en la Escala de Miller (1963) modificada por Alvarado (1989)

Considerando un promedio de las tres campañas para cada índice utilizado (ANEXO A) se llevó a cabo una regresión lineal entre el valor de calificación promedio para cada sitio como variable dependiente y el valor de la concentración de exposición acumulada para cada índice como la variable independiente.

La correlación entre los valores de SUM00, AOT40, SUM60 y SUM80 con el valor del daño en *A. religiosa* en los sitios de estudio en Huixquilucan (MC), tiene un coeficiente de determinación que se ubica en 0.52 para los primeros tres índices, con valores de P menores a 0.01 (Figuras 28, 30 y 32) y baja ligeramente a 0.46 para el SUM80 disminuyendo ligeramente la significancia al ubicarse en $P < 0.15$ (Figura 34).

En los sitios del cerro Tláloc la correlación tiene coeficientes de determinación de cero para fines prácticos y no hay significancia en la regresión (Figuras 27, 29, 31 y 33).

SUM00

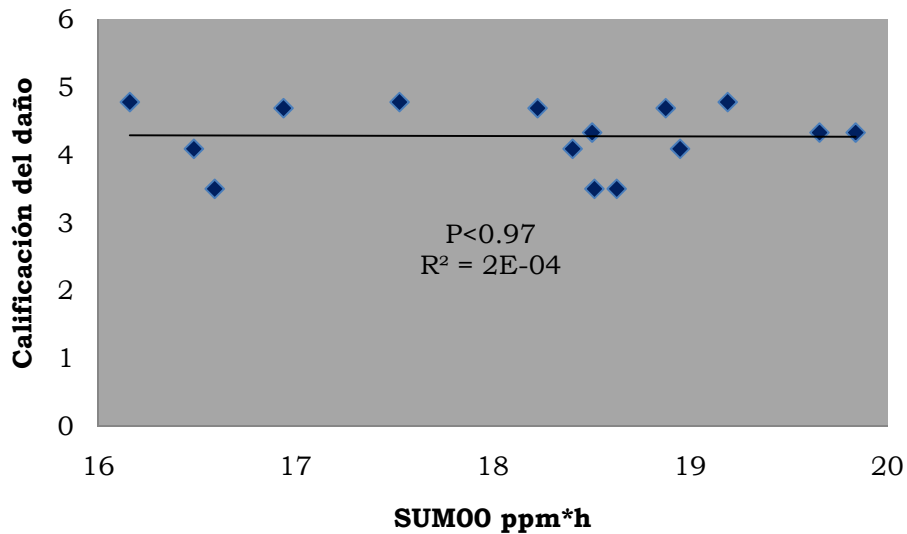


Figura 27. SUM00 vs daño en la escala de Miller en el área del Cerro Tláloc(MT)

La Figura 27 muestra la calificación de daño en los oyameles ubicados en los sitios de estudio dentro del área del Cerro Tláloc contra la concentración de exposición acumulada al ozono, expresada como partes por millón-horas, utilizando el índice SUM00, el cual no contempla umbral alguno. El coeficiente de correlación ($r^2 = 0.0002$) indica que no existe una correlación entre la exposición al ozono expresada como SUM00 y la salud. En el ANEXO A, Cuadro II, se ubican los valores que sirvieron para realizar la gráfica. La significancia de la regresión es casi inexistente ($p < 0.97$).

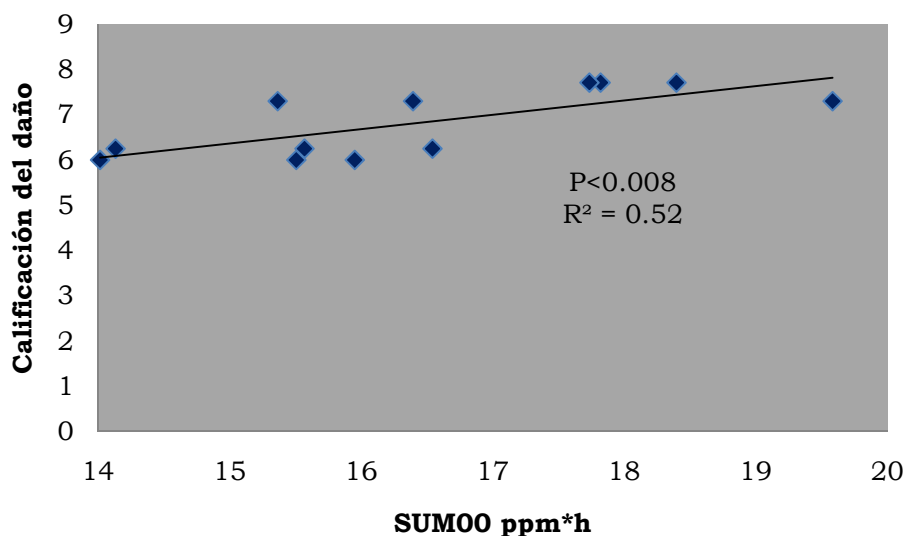


Figura 28. SUM00 vs daño de la escala de Miller en el área del Monte de Las Cruces (MC)

En la Figura 28, los datos provienen del Cuadro I, ANEXO A, y se muestra la calificación del daño en la escala de Miller modificada por Alvarado (1989) respecto al valor de exposición acumulada al ozono. En esta área de estudio la salud de los oyameles presenta una correlación moderada ($r^2 = 0.52$) y la significancia del modelo de regresión es muy alta ($p < 0.008$), lo que permite predecir qué grado de daño se observaría con mayores cargas críticas de exposición con alto grado de certidumbre.

AOT40

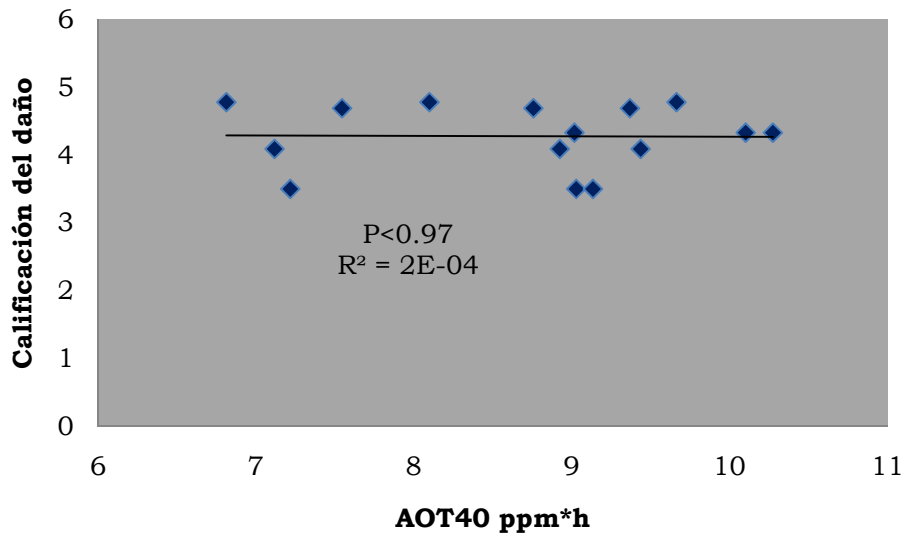


Figura 29. AOT40 *vs* daño de la escala de Miller en el área del Cerro Tláloc(MT)

Al subir el umbral a 40 ppb_v sobre el cual se pueden acumular las excedencias de ozono se obtuvieron los datos que se encuentran en el Cuadro IV del ANEXO A, los cuales se presentan de forma gráfica en la Figura 29. Para el área del Cerro Tláloc (MT) los datos de calificación del daño no presentan correlación con el índice AOT40 ($r^2 = 0.0002$) y no hay significancia del modelo para predecir cambios en la variable dependiente ($p < 0.97$).

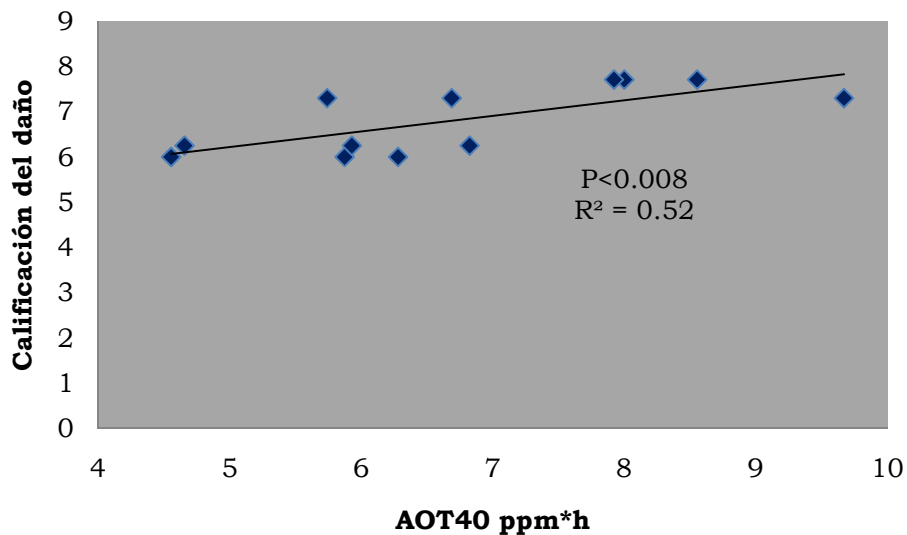


Figura 30. AOT40 vs daño de la escala de Miller en el área del Monte de Las Cruces (MC)

Utilizando las concentraciones de exposición acumulada al ozono derivadas del índice AOT40, se muestra en la Figura 30 la gráfica de los datos que corresponden por calificación de daño a un valor de exposición AOT40 (Cuadro III, ANEXO A). El análisis de regresión muestra una correlación moderada ($r^2 = 0.52$) y una significancia del modelo para predecir cambios en la variable independiente (calificación del daño) muy alta.

SUM60

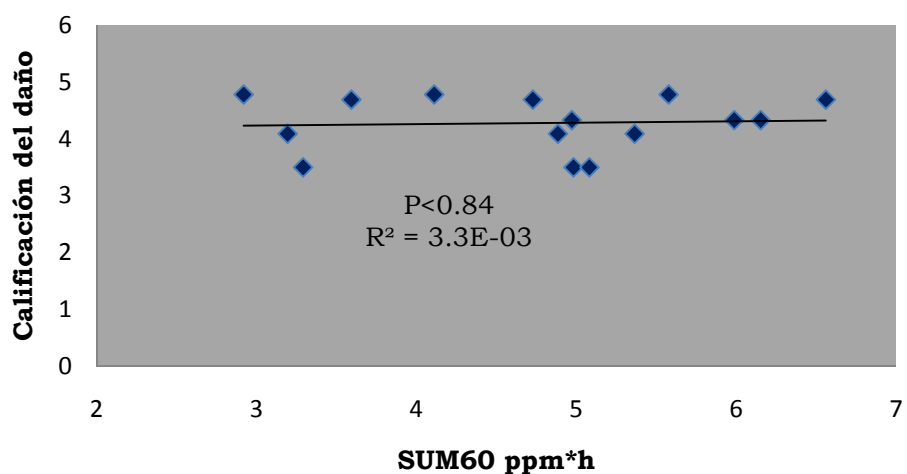


Figura 31. SUM60 vs daño de la escala de Miller en el área del Cerro Tláloc (MT)

Para el caso del índice SUM60, que se calcula sumando las excedencias sobre 60 ppb_v de ozono, en la Figura 31 se muestra la gráfica del comportamiento de la calificación del daño contra la exposición acumulada al ozono, en el área del Cerro Tláloc. Como se observa en la Figura 30, no existe correlación entre los valores de calificación del daño y las concentraciones de exposición al ozono ($r^2 = 0.0033$) y la significancia del modelo para predecir el cambio en la salud de los oyameles no es alta ($p < 0.84$)

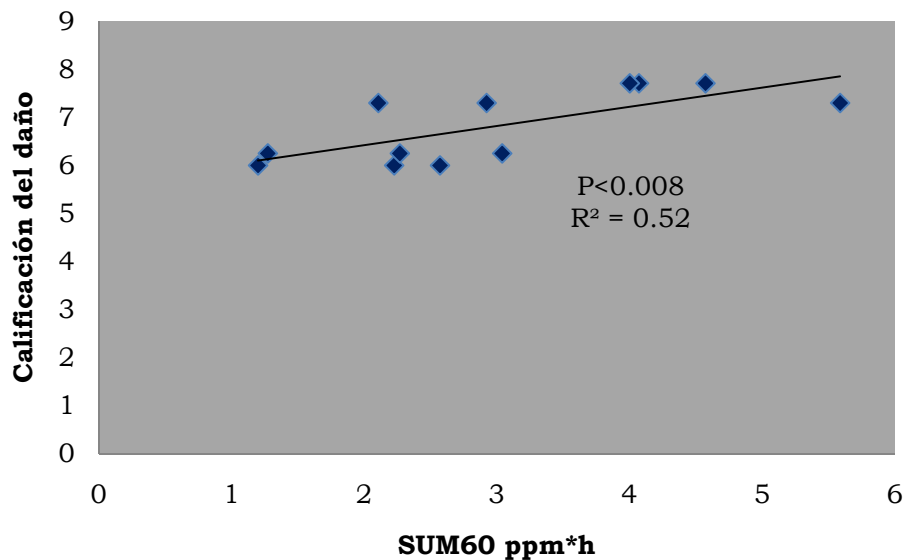


Figura 32. SUM60 vs daño de la escala de Miller en el área del Monte de Las Cruces (MC)

Utilizando el mismo índice SUM60, en el caso del área de estudio en Monte de Las Cruces, en Huixquilucan (MC), en la Figura 32 se observa que el coeficiente de determinación de la regresión muestra una correlación de $r^2 = 0.52$, con una significancia del modelo de regresión muy alta ($p < 0.008$).

SUM80

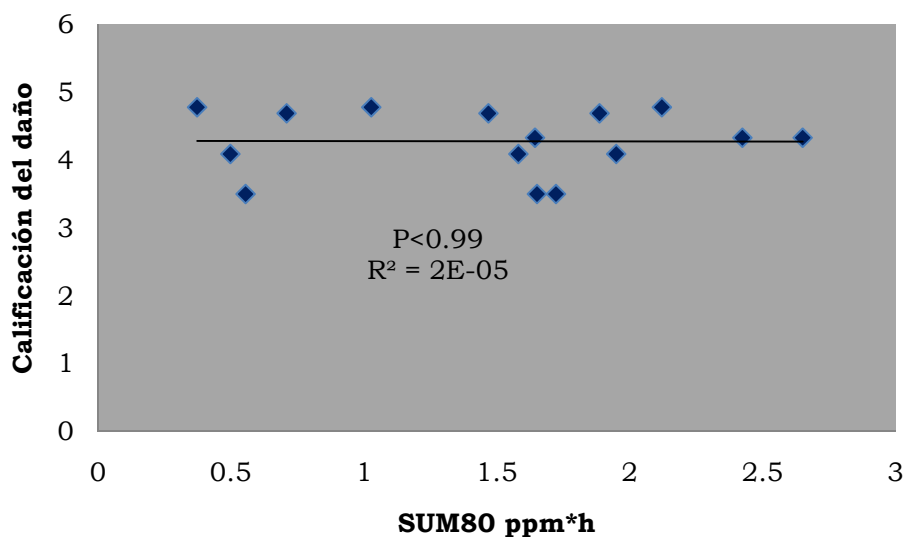


Figura 33. SUM80 vs daño de la escala de Miller en área del Cerro Tláloc (MT)

Al utilizar el índice SUM80, que acumula la exposición al ozono sobre 80 ppb_v, y correlacionarlo contra la calificación del daño en *Abies religiosa* en el área del Cerro Tláloc (MT), se obtiene la gráfica que se muestra en la Figura 33. Como se observa, no existe correlación alguna, el coeficiente de determinación (r^2) se puede considerar cero y no existe ningún tipo de significancia del modelo para explicar la variación de la calificación del daño por el cambio en el índice SUM80 ($p < 0.99$).

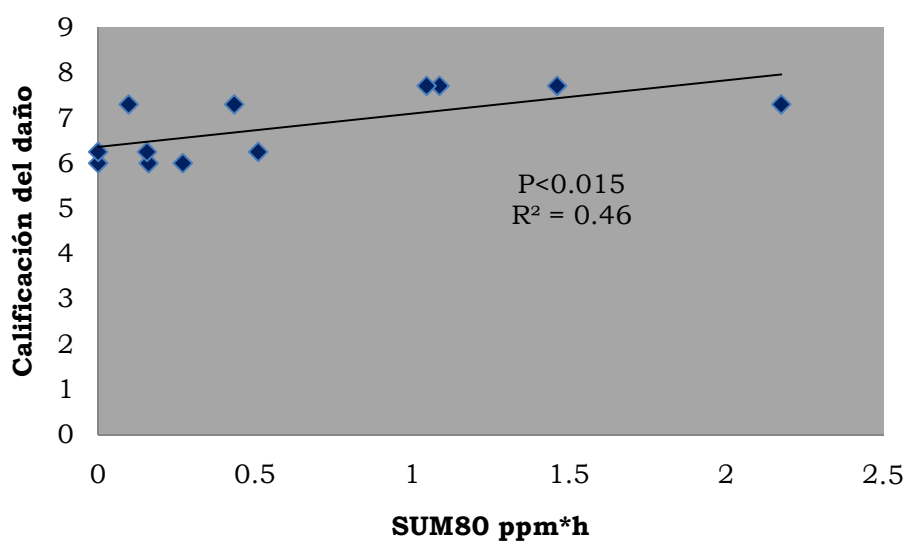


Figura 34. SUM80 vs daño de la escala de Miller en área de Monte de Las Cruces (MC)

En el área ubicada en Monte de las Cruces (MC), la regresión para la calificación del daño contra la exposición acumulada al ozono conforme al índice SUM80 produjo la gráfica que se ilustra en la Figura 34. La correlación es ligeramente buena ($r^2 = 0.46$) y la significancia del modelo para predecir cambios en la calificación del daño conforme se modifica el índice SUM80 es muy alta ($p < 0.015$).

2.8. DISCUSIÓN

La proporción de AOT40_{21d} calculada para los sitios de estudio en la ZMCM presenta excedencias entre 13 y 19 veces las cargas críticas para la vegetación en bosques.

Como se señala en el Capítulo 1, debido a la fuerte variación en las corrientes de aire y los flujos locales de masas de aire que se presentan por la orografía y altitud del Valle de México, se encontraron datos que aparentemente contradicen lo que parece obvio, esto es tener mayores concentraciones de ozono en el sitio MC que en MT.

Las gráficas de los cuatro índices empleados arrojan mayores cargas críticas sobre el área de estudio MT que en MC principalmente en la campaña de la estación seca fría (Figuras 19 a 22) y en la seca cálida (Figuras 23 a 26), sin embargo, la variación con la altura no muestra una buena correlación en las campañas fría seca (Figuras 19 a 22) y cálida seca para el área MT y en el caso de la cálida seca los modelos de regresión no fueron significativos en dicha área ($p \approx 0.25$) (Figuras 23 a 26).

En la época seca fría se forman con frecuencia capas de inversión térmica que se rompen en altas horas de la tarde (Jáuregui, 1958). En la época de primavera son frecuentes los vientos del sur con velocidades de 25 a 30 km/h después de las 13 ó 14 horas (Jáuregui, 2000). Estos datos sugieren una circulación del aire muy compleja en el Cerro Tláloc que introduce otros factores que modifican los perfiles de concentración de ozono y su distribución en el área, los cuales no fueron caracterizados ni analizados en esta tesis.

En cuanto a la salud de los oyameles los datos de regresión entre la escala de Miller modificada por Alvarado (1989) y la calificación del daño, indican que en Huixquilucan (MC) existe correlación entre el daño observado y la exposición al ozono (Figuras 28, 30 y 32). En general, el aspecto de las masas de oyameles en la zona aun guarda relación con la

declinación que se presentó a mediados de los años 80 (Bauer y Hernández Tejeda, 1984; 1986; 2007; Bauer y Krupa, 1990).

La falta de correlación y significancia en el área de Cerro Tláloc (MT) (Figuras 27, 29, 31 y 33) puede estar asociada a factores mucho más complejos. Aún cuando la salud de los oyameles es buena en la zona, la presencia de hierbas y arbustos en el sotobosque es mayor de lo que cabría esperarse, pues de acuerdo con los estudios llevados a cabo para caracterizar la zona boscosa con masas compactas de oyamel, su denso follaje mantiene libre de hierbas y arbustos el piso forestal (Rzedowski, 1978; Sánchez-González y López-Mata, 2003).

Aun cuando no fue evaluada en este trabajo, la depositación de nitrógeno en exceso es mayor en la zona poniente que en la zona oriente del Valle de México (Fenn *et al.*, 1999). Es posible que ese exceso de fertilización con Nitrógeno provocara sinergias entre varios agentes nocivos para las masas de oyamel, como son ataques de patógenos, limitaciones de absorción de nutrientes que se inmovilizan al aumentar el pH por efecto del ácido nítrico que se forma, crecimiento de brotes y yemas que no se detiene para entrar en dormancia en otoño, lavado foliar de nutrientes, competencia con otras especies que normalmente no son tan agresivas con limitación de N y un debilitamiento muy agudo de la salud de los árboles. El hallazgo durante los recorridos de campo de abundante número de plantas del género *Alnus* y *Lupinus*, que son fijadoras de nitrógeno, sugieren que el sitio MT no tiene una cantidad excesiva de nitrógeno. Estas plantas fijadoras de nitrógeno se presentan en mayor medida en zonas que sufren deficiencias de este elemento en el suelo, pues en donde no existen limitaciones, otros arbustos y hierbas que no pueden desarrollarse en condiciones deficitarias de nitrógeno presentan un gran crecimiento y existe una mayor competencia (Fisher y Binkley, 2000)

En la Figura I del ANEXO B, se observa que la concentración de ozono se dispara a más de 50 ppb_v en horas nocturnas y puede tener algún grado de influencia en una mayor absorción de ozono (Matyssek *et al.*,

2004) respecto a los bosques ubicados en el sitio MT que no rebasan las 20 ppb_v.

En algunos ejemplares muestreados en la zona MT se encontró lo que parece ser el inicio de una muerte descendente y algunos síntomas asociados con poco desarrollo del follaje y mortalidad de ramas. Es decir, hay un impacto que puede estar relacionado con el ozono y los mismos procesos que llevaron a la declinación del oyamel en el suroeste del Valle de México se pueden estar dando en la zona de Cerro Tláloc (Flores, 2010) y las áreas ubicadas al oriente del Valle, sin embargo, su intensidad no ha sido tan aguda y los árboles posiblemente han tenido la oportunidad de adaptarse. La presencia de líquido café a negro con fuerte olor a madera podrida en la base de los árboles que se ha descrito en otros trabajos (Alvarado, 1989; Manzanilla, 1974) y que recientemente se ha documentado para el área del Cerro Tláloc (Flores, 2010), podría estar indicando que existe un fenómeno de declinación quizá incipiente.

Otro factor muy importante a considerar es la vertiente. En Huixquilucan es común tener una elevada humedad relativa y con frecuencia niebla que puede durar varias horas de la mañana, en cualquier época del año, debido a la dirección prevaleciente de los vientos que llegan desde el Golfo de México. En el Cerro Tláloc la vertiente es opuesta y el fenómeno de las nieblas no es tan frecuente.

La conductancia estomática, que se ha demostrado es la variable que permite que entre mayor cantidad de ozono a los espacios internos de la hoja y que es donde se producen las reacciones adversas, es inversamente proporcional al déficit en la presión de vapor y el potencial hídrico del suelo (Bergh *et al.*, 1999; Ribas y Peñuelas, 2005). Huixquilucan presenta una mayor pluviosidad que el cerro Tláloc (Capítulo 1), por lo cual el potencial hídrico del suelo en el área MC puede ofrecer mayor disponibilidad de agua a los árboles, permitiéndoles absorber mayores cantidades de ozono en esa área de estudio que en el área MT.

En cuanto a la salud de *Abies religiosa*, es posible que los ejemplares estudiados, especialmente en el área MC, hayan desarrollado mecanismos de desintoxicación del ozono y los radicales libres, mediante un metabolismo más activo en la producción de antioxidantes como el ascorbato (Heath *et al.*, 2009), guayacol, tocoferol, carotenoides y xantanas, así como un incremento en la actividad de enzimas denominadas peroxidasas (Herbinger *et al.*, 2005). Alvarado y Hernández-Tejeda (2002) coinciden en un desarrollo de tolerancia o resistencia en los oyameles que quedaron tras la declinación que se observó en áreas cercanas (Desierto de los Leones) en los años 80.

En cuanto a los índices utilizados, varios estudios han mencionado que el uso de índices de exposición a concentraciones externas de ozono, como el AOT40, para estimar el daño a la vegetación no son los mejores, ya que el ozono que actúa en el árbol es la dosis acumulada absorbida a través de los estomas, la cual depende de factores como la luz, el estrés hídrico, temperatura, estatus nutrimental, radiación solar y estado de salud del árbol (Matyssek *et al.*, 1995; 2004; Bertrand *et al.*, 1999; Karlsson *et al.*, 2000; 2002; 2003; Ribas *et al.*, 2005; Paoletti, 2005; Herbinger *et al.*, 2005; Alonso *et al.*, 2005; Wieser *et al.*, 2006; Elvira *et al.*, 2007). En estos estudios y en muchos más, que están tomando en cuenta el nivel II de aproximación para la definición de riesgos por exposición al ozono, se considera que se obtienen mejores resultados al considerar la dosis acumulada de ozono, resultado de la integración en un periodo de tiempo del flux de ozono en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Para evaluar el impacto de un cierto estrés, es importante entender como interactúa con otros estreses que ocurren simultáneamente. El déficit de agua en el suelo es un factor importante que limita el crecimiento forestal (Bergh *et al.*, 1999). Se ha demostrado que las concentraciones moderadamente elevadas de ozono interfieren con el cierre de estomas durante la sequía (Wallin y Skärby, 1992; Pearson y Mansfield, 1993). Sin embargo, no hay estudios que hayan mostrado que este efecto tuvo consecuencias negativas para el crecimiento de los

árboles. De hecho, el estrés hídrico ha demostrado, al menos en parte, contrarrestar los efectos negativos del ozono sobre el crecimiento (Temple *et al.*, 1993; Pearson y Mansfield, 1994; Broadmeadow y Jackson, 2000). En el Valle de México las dos áreas de estudio presentan alta radiación solar y humedad relativa baja, durante la mayor parte del año (SMN, 2010). Los niveles encontrados de AOT40 de 13 a 19 veces superiores el nivel crítico de 0.583 ppm*h que es el correspondiente para periodos de 21 días, con base en 5 ppm*h para 180 días, son muy superiores a los encontrados por diversos autores para la época de estiaje en zonas de clima templado (Karlsson *et al.*, 2003; Wieser *et al.*, 2006; Sanz *et al.*, 2007; Augustaitis y Bytnerowicz, 2008). A la fecha no existen estudios que usen este u otros índices en regiones comprendidas en los trópicos, como lo es el Valle de México.

Por otra parte, el índice AOT40 considera sólo la exposición diurna, siendo que muchas especies de árboles abren sus estomas aun durante la noche por diversos procesos metabólicos, y con ello estarían absorbiendo una dosis de ozono que, de acuerdo a su capacidad de desintoxicación pueden compensar en mayor o menor medida (Matyssek *et al.*, 2004). En algunas áreas aledañas a la ciudad de México pueden repuntar las concentraciones de O₃ hasta las 60 ppb_v en primeras horas de la madrugada.

2.9. CONCLUSIONES

En el área del Monte de las Cruces (MC), se presenta una correlación entre el daño en los árboles de *Abies religiosa* y la presencia de ozono en el ambiente.

En el área del Cerro Tláloc (MT), no existe correlación entre la presencia de ozono y el daño en los árboles de *Abies religiosa*.

Existen factores diferentes al ozono que podrían explicar los daños al arbolado de *Abies religiosa* en el área del Cerro Tláloc.

2.10. LITERATURA CITADA

Alonso R.; Elvira S.; Bermejo V.; Gimeno B.S. 2005. Does drought stress protect *Quercus ilex* from ozone effects? Different response of subsp. *ilex* and subsp. *ballota*. Workshop: Critical levels of ozone: further applying and developing the flux-based concept Obergurgl, Austria, Nov 15-19 2005. http://www.unigraz.at/pphwww/mitarb/mike/obergurgl/abstracts/poster_1.pdf

Alvarado Rosales D. y Hernández Tejeda T. 2002. Decline of Sacred Fir in the Desierto de los Leones National Park. En: Fenn M.E.; Bauer L.I.; y Hernández Tejeda T. Eds. Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin. Pp. 243-260. Springer-Verlag. New York

Bertrand A.; Robitaille G.; Nadeau P; Castonguay Y. 1999. Influence of ozone on cold acclimation in sugar maple seedlings. *Tree Physiology*, 19: 527-534

Broadmeadow M.; Jackson B. 2000. Growth responses of *Quercus petraea*, *Fraxinus excelsior* and *Pinus sylvestris* to elevated carbon dioxide, ozone and water supply. *New Phytologist*, 146: 437-451

Bergh J.; Linder S.; Lundmark T.; Elfving B. 1999. The effect of water and nutrient supply on the productivity of Norway spruce in northern and southern Sweden. *Forest Ecology and Management*. 119: 51-62

Delgado Saborit, J. M. 2004. Validación e implementación de técnicas de captación pasiva para el estudio de los niveles y efectos del ozono troposférico y dióxido de nitrógeno en un área costera mediterránea. Tesis doctoral, Universidad Jaume, Castellón de la Plana, España. Diciembre 2004. 564 p.

Elvira S.; Alonso R.; Gimeno B.S. 2007. Simulation of stomatal conductance for Aleppo pine to estimate its ozone uptake. *Environ. Pollution*, 146: 617-623

Fenn M.E., De Bauer L.I.; Quevedo-Nolasco A.; Rodríguez-Frausto C. 1999. Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the Valley of Mexico. *Water, Air and Soil Pollution*, 113:155-174

Feldman H.; Langworthy L. 2008. Ozone standards: what is requisite? EM magazine, a publication of the Air and Waste Management Association. January, 2008: 15-21

Fisher R. y Binkley D. 2000. Ecology and management of forest soils. 3rd edition. John Wiley and Sons. New York. 489 p.

Flores Nieves P. 2010. Impacto del proceso de declinación sobre la productividad primaria neta en bosques de *Abies religiosa*. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados 64 p.

Heath R.L.; Lefhon A.S.; Musselman R.C. 2009. Temporal processes that contribute to nonlinearity in vegetation responses to ozone exposure and dose. *Atmospheric Environment*. Vol. 43: 2919-2928

Herbinger K.; Then Ch.; Löw M.; Haberer K.; Alexous M.; Koch N.; Remele K.; Heerdt C.; Grill D.; Rennenberg H.; Häberle K.-H.; Matyssek R.; Tausz M.; Wieser G. 2005. Tree age dependence and within-canopy variation of leaf gas exchange and antioxidative defence in *Fagus sylvatica* under experimental free-air ozone exposure. *Environ. Pollution*. 137: 476-482

Hernández T.T. 1984. Efecto de los gases oxidantes sobre algunas especies del género *Pinus* nativas del Valle de México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. México. 109 pp

Hernández T.T.; De Bauer L.I. 1986. Photochemical oxidant damage on *Pinus hartwegii* at the "Desierto de los Leones" D.F. *Phytopathology*, 76 (3): 377

Jáuregui O.E. 1958. El aumento de la turbiedad del aire en la ciudad de México. *Rev. Ing. Hidr. en Mex.* Vol. 12 (3) 10 p.

Jáuregui O.E. 2000. El clima de la Ciudad de México. Colección Temas Selectos de la Geografía de México, 1.4.1. Instituto de Geografía, UNAM. 131 p.

Karlsson P.E.; Pleijel H.; Pihl-Karlsson G.; Medin E.L.; Skärby L. 2000. Simulations of stomatal conductance and ozone uptake to Norway spruce saplings in open-top chambers. *Environ. Pollution*. 109: 443-451

Karlsson P.E.; Medin E.L.; Selldén G.; Wallin G.; Ottosson S.; Pleijel H.; Skärby L. 2002. Impact of ozone and reduced water supply on the biomass accumulation of Norway spruce saplings. *Environ. Pollution*. 119: 237-244

Karlsson PE, Selldén G, Pleijel H (eds) 2003 Establishing Ozone Critical Levels II. UNECE Workshop Report, IVL report B 1523, IVL Swedish Environmental Research Institute, Gothenburg, Sweden. <http://www.ivl.se>

Krupa S.; Nosal M.; Peterson D.L. 2001. Use of passive ambient ozone (O₃) samplers in vegetation effects assessment. *Environ. Pollution*. 112: 303-309

Krupa S.; Nosal M.; Ferdinand J.A.; Stevenson R.E.; Skelly J.M. 2003. A multi-variate statistical model integrating passive sampler and meteorology data to predict the frequency distributions of hourly ambient ozone (O₃) concentrations. *Environ. Pollution*. 124: 173-178

Health Canada. 2010

(http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/naaqo-onqaa/ground_level_ozone_tropospherique/summary-sommaire/reference-identification-determination-eng.php)

Manzanilla, H. 1974. Investigaciones epidométricas y silvícolas en bosques mexicanos de *Abies religiosa*. México: Dirección General de Información y Relaciones Públicas. 165 p.

Matyssek R.; Günthardt M.; Maurer S.; Keller T. 1995. Nighttime exposure to ozone reduces whole-plant production in *Betula pendula*. *Tree Physiol*. 15: 159-165

Miller P.; Bauer M.I.; Quevedo A.; Hernández T. 1994. Comparison of ozone exposure characteristics in forested regions near México City and Los Angeles. *Atmospheric Environment* 28: 141-148.

Miller P.R.; Parmeter Jr J.R.; Taylor O.C.; Cardiff E.A. 1963. Ozone injury to the foliage of *Pinus ponderosa*. *Phytopathology* 53: 1072-1076

Matyssek R.; Wieser G.; Nunn A.J.; Kozovits A.R.; Reiter I.M.; Heerdt C.; Winkler J.B.; Baumgarten M.; Häberle K.-H.; Grams T.E.E.; Werner H.;

- Fabian P.; Havranek W.M. 2004. Comparison between AOT40 and ozone uptake in forest trees of different species, age and site conditions. *Atmos. Environ.* 38: 2271-2281
- Ribas A.; Peñuelas J.; Elvira S.; Gimeno B.S. 2005. Contrasting effects of ozone under different water supplies in two Mediterranean tree species. *Atmospheric Environment*. Vol. 39: 685-693
- Ribas A.; Peñuelas J. 2003. Biomonitoring of tropospheric ozone phytotoxicity in rural Catalonia. *Atmos. Environment*, 37: 63-71
- Sánchez-González A. y L. López Mata. 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales Int. Biol. UNAM. Ser. Bot.* 74: 47-71
- Tuovinen J.P. 2002. Assessing vegetation exposure to ozone: is it possible to estimate AOT40 by passive sampling? *Environ. Pollution*, 119: 203-214
- UNECE 2004. UNECE Convention on Long Range Transboundary Air Pollution. (<http://icpvegetation.ceh.ac.uk>)
- Wieser G.; Manning W.J.; Tausz M.; Bytnerowicz A. 2006. Evidence for potential impacts of ozone on *Pinus cembra* L. at mountain sites in Europe: An overview. *Environ. Pollution*, 139: 53-58

3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

La concentración de ozono en el ambiente de las zonas montañosas evaluadas presenta:

Un gradiente altitudinal de concentraciones de ozono que se incrementan proporcionalmente con la altitud

El gradiente altitudinal de concentraciones de ozono está bien caracterizado para el área de estudio en la región suroeste del Valle de México (área del Monte de las Cruces) en las tres épocas del año.

En el área del Cerro Tláloc no pudo caracterizarse un gradiente en tres épocas del año.

Los daños a la salud evaluados en los árboles de *Abies religiosa* no fueron explicados en su totalidad por la exposición crónica al ozono.

Con base en los hallazgos de esta tesis se recomienda:

Conducir investigaciones regionales que abarquen múltiples cañadas y cimas, con el objeto de tener un mapa completo de los daños y riesgos que se presentan en las zonas forestales que rodean al Valle de México y extenderlo a las cuencas contiguas (Morelos, Puebla-Tlaxcala y Toluca)

Desarrollar el modelo de conductancia estomática propuesto por Emberson *et al.* (2000a, b) y desarrollado para *Pinus halepensis* por Elvira *et al.* (2007) para caracterizar su comportamiento en las especies forestales que se encuentran en los bosques aledaños al Valle de México.

ANEXO A Promedios de AOT40, SUM00, SUM60 y SUM80 para 21 días usando datos de las tres campañas

En la siguiente serie de cuadros se resume para cada campaña y sitio dentro de las dos áreas de estudio, cómo se comportaron las cargas de exposición al ozono en 21 días, y un promedio para las tres campañas, con el encabezado AVG 21 D.

Cuadro I SUM00 (promedios por altitud)(ppm*h) para Monte de Las Cruces

Campaña				
Altitud	Seca cálida	Seca fría	Lluvias	AVG 21 D
3100	15.95	14.02	15.51	15.16
3200	16.54	14.13	15.57	15.41
3300	19.58	15.37	16.39	17.11
3400	18.40	17.82	17.73	17.98

Cuadro II SUM00 (promedios por altitud)(ppm*h) para Cerro Tláloc

Campaña				
Altitud	Seca cálida	Seca fría	Lluvias	AVG 21 D
3100	18.52	18.63	16.59	17.91
3200	18.40	18.95	16.49	17.95
3300	19.19	17.53	16.16	17.63
3400	19.84	19.66	18.50	19.33
3500	18.88	16.94	18.23	18.01

Cuadro III AOT40 (promedios por altitud)(ppm*h) para Monte de Las Cruces

Campaña				
Altitud	Seca cálida	Seca fría	Lluvias	AVG 21 D
3100	6.28	4.56	5.87	5.57
3200	6.82	4.66	5.93	5.80
3300	9.67	5.74	6.69	7.37
3400	8.55	8.00	7.92	8.16

Cuadro IV AOT40 (promedios por altitud)(ppm*h) para Cerro Tlálloc

Campaña				
Altitud	Seca cálida	Seca fría	Lluvias	AVG 21 D
3100	9.03	9.14	7.22	8.46
3200	8.92	9.44	7.12	8.49
3300	9.66	8.10	6.81	8.19
3400	10.27	10.10	9.02	9.80
3500	9.37	7.55	8.76	8.56

Cuadro V SUM60 (promedios por altitud)(ppm*h) para Monte de Las Cruces

Campaña				
Altitud	Seca cálida	Seca fría	Lluvias	AVG 21 D
3100	2.57	1.20	2.23	2.00
3200	3.04	1.27	2.27	2.19
3300	5.59	2.11	2.92	3.54
3400	4.57	4.07	4.00	4.22

Cuadro VI SUM60 (promedios por altitud)(ppm*h) para Cerro Tlálloc

Campaña				
Altitud	Seca cálida	Seca fría	Lluvias	AVG 21 D
3100	4.98	5.08	3.29	4.45
3200	4.88	5.36	3.19	4.48
3300	5.58	4.11	2.92	4.20
3400	6.15	5.99	4.97	5.70
3500	6.56	3.59	4.73	4.96

Cuadro VII SUM80 (promedios por altitud)(ppm*h) para Monte de Las Cruces

Campaña				
Altitud	Seca cálida	Seca fría	Lluvias	AVG 21 D
3100	0.27	0.00	0.16	0.14
3200	0.51	0.00	0.16	0.22
3300	2.18	0.10	0.43	0.90
3400	1.46	1.09	1.05	1.20

Cuadro VIII SUM80 (promedios por altitud)(ppm*h) para Cerro Tláloc

Campaña				
Altitud	Seca cálida	Seca fría	Lluvias	AVG 21 D
3100	1.65	1.72	0.56	1.31
3200	1.58	1.95	0.50	1.34
3300	2.12	1.03	0.37	1.17
3400	2.65	2.42	1.64	2.24
3500	1.89	0.71	1.47	1.35

ANEXO B. Distribuciones horarias de ozono por monitoreo continuo

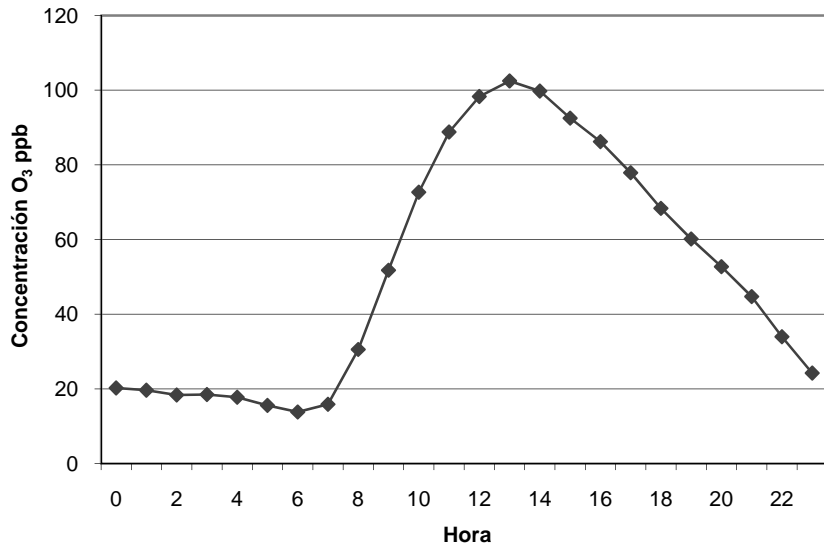


Figura I. Distribución de concentraciones promedio horarias en el área MT

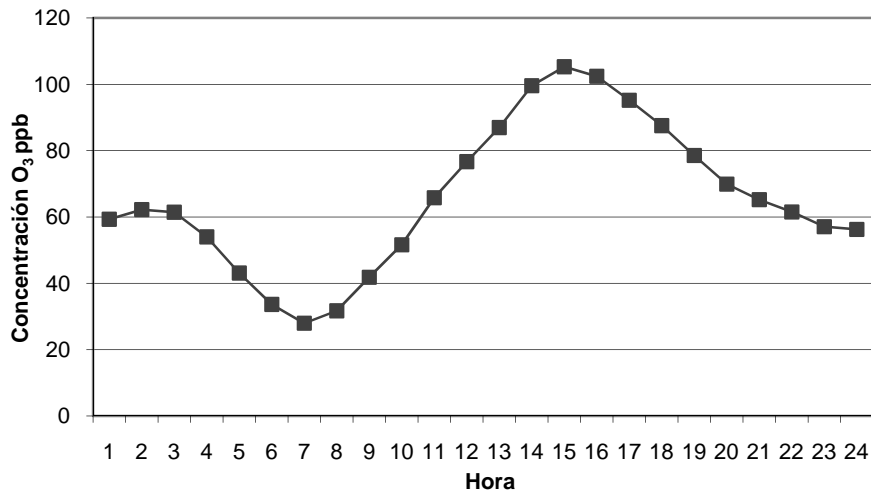


Figura II. Distribución de concentraciones promedio horarias en el área MC.

Obsérvese el pico entre las 01 y las 03 horas