

Universidad Nacional Autónoma de México  
División de Estudios de Postgrado  
de la Facultad de Ingeniería



# “Análisis de la Tendencia y Comparación de la Contaminación Atmosférica por Ozono para la Ciudad de México y Los Angeles, California, EUA”.

Tesis de Maestría en Ingeniería  
Área: Ambiental

Biól. Mónica del Carmen Jaimes Palomera

**FACULTAD DE  
INGENIERIA**



**U N A M**

Director de Tesis: Dr. Humberto Bravo Álvarez  
Codirector : Dr. Rodolfo Sosa Echeverría.

México, D.F.

2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## MIEMBROS DEL JURADO

- DR. HUMBERTO BRAVO ÁLVAREZ
- DRA. TELMA CASTRO ROMERO
- M.C. VICENTE FUENTES GEA
- DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA
- DR. ARMANDO AGUILAR MARQUEZ

DEDICATORIA

**A mi Mamá Luz María Palomera Coronado**  
Por su apoyo incondicional,  
su ejemplo de vida y que  
me ha enseñado el  
camino a seguir.

**A mis hermanos: Raúl, Mauricio, Ricardo, Lulú y Mayte**  
Con los que he compartido los mejores momentos de mi vida.

**A todos mis sobrinos que me han llenado de amor y felicidad.**  
Luli, David, Jorge, Morris, Kayla, Evi, Hanna, Nalani, Dominique, Arantxa, y Blossom.

**A mis amigos que en todo momento me han apoyado y motivado a continuar.**

**A NSJ**

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Humberto Bravo Álvarez, Jefe de la Sección de Contaminación Ambiental (SCA) del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, y al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, por la dirección de mis estudios de Maestría, y por su apoyo total en mi formación profesional.

Al Biol. Pablo Sánchez Alvarez por su apoyo y ayuda en los trámites de mi tesis, a todos los que forman parte del equipo de la Sección de Contaminación Ambiental del CCA.

A los miembros del Jurado: Dra. Telma Castro Romero, M en C Vicente Fuentes Gea y Dr. Armando Aguilar Marquez, por sus valiosas aportaciones y recomendaciones al trabajo final de tesis.

A la M en I. Francis Soler, que me oriento durante mis estudios en la DEPMI y que sin su ayuda no hubiera podido concluir mi maestría, al Dr. Alfonso García Gutiérrez, por haber sido mi tutor y uno de mis mejores profesores en la DEPMI, a la memoria del M en I Augusto Villarreal Arana, porque su ejemplo y enseñanzas siempre perduren.

A mis amigas de Prado, especialmente a Nane Moya, Begoña Hevia, Lety Hinojosa y a la memoria de Adriana García Álvarez por sus consejos, apoyo y motivación durante todo este tiempo. Al P. Antonio Argüelles, P. Carlos Cantú, y al P. Fernando Vera, por su apoyo, guía y consejos espirituales que me han llenado mi vida.

A mis compañeros y amigos de la Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SMA del DF. En especial al Biól. Roberto Muñoz Cruz, Guadalupe Granados Gutiérrez, Act. Cristina Ortuño Mojica, I. Rocio Carmona Martir, M. en C. Rafael Ramos, que sin su apoyo y comprensión no hubiera podido terminar mi tesis y con un agradecimiento especial para el Geog. Vicente Pérez Nuñez, por su apoyo con los mapas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México que me ha formado. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca que me asigno para realizar mis estudios de posgrado.

A mis amigos de la SEP: Enrique Ledesma, Marco A. Delgado, Tere Ramos, Dalila Pinson, Lucy Méndez, Raúl Domínguez y Margarita Basañez que me brindaron su amistad y apoyo para estudiar la maestría.

A mi papá Raúl Jaimes Martínez , a todos mis familiares, Tíos, primos, cuñados que me han apoyado de mil maneras para que concluyera mi tesis.

A todos mis amigos de los Scouts que han recorrido conmigo todos estos años de mi vida.

## INDICE

INDICE .....	a
Lista de Figuras.....	III
Lista de Tablas .....	V
Lista de Mapas.....	V
Glosario de Términos .....	VI
RESUMEN .....	1
I. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Importancia y Justificación.....	6
1.2 Meta.....	6
1.3 Objetivos .....	6
II. ANTECEDENTES.....	7
2.1 La contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). .....	7
2.2 Mecanismos de Formación del Ozono .....	9
2.3 Efectos del ozono.....	12
2.3.1 El caso de la Ciudad de México.....	14
2.3.2 El caso de la Ciudad de los Ángeles .....	15
III. DESCRIPCIÓN DE LAS REGIONES DE ESTUDIO .....	17
3.1 ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (ZMCM) .....	18
3.1.1 Contaminación Atmosférica por Ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México .....	19
3.2 LOS ÁNGELES, South Coast Air Basin (SoCAB).....	24
3.2.1 Contaminación Atmosférica por Ozono en Los Ángeles (SoCAB.) .....	25
IV. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA TENDENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO.....	29
4.1 Indicadores Usados para Analizar la Tendencia de la Calidad del Aire.....	32
V. SISTEMAS DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	36
5.1 Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) Gobierno del Distrito Federal .....	36
5.2 Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.....	44
5.3 Los Ángeles, California (SoCAB) .....	45
VI. METODOLOGÍA.....	49
6.1 Datos.....	49
6.2 Indicadores.....	49
6.3 Métodos Estadísticos .....	50
6.3.1 Tendencia de la concentración de Ozono.....	50
6.3.2 Análisis de las violaciones a la norma de calidad del aire de Ozono .....	51
6.3.3 Análisis de las estrategias de control .....	53

VII. RESULTADOS .....	54
7.1 Tendencia de la concentración de Ozono.....	54
7.1.1 Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).....	54
7.2.1 Los Ángeles, South Coast Air Basin (SoCAB) .....	59
VIII. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	63
8.1 Análisis de las Violaciones a la Norma de Calidad del Aire de Ozono, para México y los Ángeles.....	63
8.2 Análisis del 2° y 4° Máximo en las Concentraciones de Ozono .....	65
8.3 Comparación de la Norma Horaria y la Norma Promedio Móvil de 8 horas para Ozono.....	66
8.4 Comparación de los valores de Ozono en días laborables - fines de semana y Comportamiento de los días de la semana .....	69
8.4.1 Caso ZMCM.....	69
8.4.2 Caso Los Ángeles, California (SoCAB).....	74
8.5 Efecto Piston.....	79
IX. ESTRATEGIAS DE CONTROL.....	83
9.1 Zona Metropolitana de la Ciudad de Mexico .....	84
9.2 Los Ángeles, California (SoCAB) .....	88
X. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	94
10.1 Discusión referente a la ZMCM.....	94
10.1.1 Tendencia .....	94
10.1.2 Violaciones a la norma.....	95
10.1.3 Efecto Pistón.....	96
10.2 Discusión referente a los Ángeles (South Coast Air Basin).....	96
10.2.1 Tendencia .....	96
10.2.2 Violaciones a la norma.....	96
10.2.3 Efecto Pistón.....	97
10.3 Discusión de la Comparación entre los valores en la ZMCM y Los Ángeles (SoCAB) .....	98
XI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
11.1 Conclusiones.....	99
11.2 Recomendaciones .....	101
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	102

## Lista de Figuras

**Figura 2.1.** Evolución de la contaminación atmosférica en la ZMCM

**Figura 2.2.** Ciclo del Ozono de la emisión a la deposición

**Figura 3.1** Mapa de Zona Metropolitana de la Ciudad de México (3,450 km<sup>2</sup> 16 delegaciones del Distrito Federal y 18 municipios conurbados del Estado de México)

**Figura 3.2** Área que cubre la South Coast Air Basin (SoCAB) la zona de estudio de Los Ángeles.

**Figura 5.1.** Red Automática de Monitoreo Atmosférico

**Figura 5.2.** Diagrama típico de un analizador de ozono.

**Figura 5.3.** Estación de monitoreo atmosférico en el Pedregal

**Figura 5.4.** Estación de monitoreo en el Centro de Ciencias de la Atmósfera.

**Figura 5.5.** Equipo de monitoreo en el Centro de Ciencias de la Atmósfera.

**Figura 5.6.** Mapa de localización de la red de monitoreo de la South Coast Air Basin (SoCAB), Los Ángeles Cal.

**Figura 5.7.** Estación de monitoreo en Riverside (California).

**Figura 5.8** Equipo de monitoreo en Riverside (California).

**Figura.7.1.** Promedio de los 30 valores máximos anuales de las 7 estaciones de la ZMCM

**Figura.7.2.** Valor del 2º máximo anual del promedio horario en 7 estaciones de la ZMCM

**Figura.7.3.** Valor del 4º máximo trianual del promedio horario de 7 estaciones de la ZMCM

**Figura.7.4.** Promedio de los 30 valores máximos anuales de las 6 estaciones de la SoCAB (Los Ángeles, CAL.)

**Figura.7.5.** Valor del 2º máximo anual del promedio horario en 6 estaciones de la SoCAB (Los Ángeles, CAL.)

**Figura.7.6.** Valor del 4º máximo trianual del promedio horario en 6 estaciones de la SoCAB (Los Ángeles, CAL.)

**Figura 8.0** Número de días al mes en los que se rebasan los valores límite de las normas de ozono para la ZMCM y la SoCAB de 1986 a 2000

**Figura 8.1.** Valores anuales horarios y diarios arriba del límite permisible de ozono para la ZMCM

**Figura 8.2.** Valores anuales horarios y diarios de ozono arriba de los límites permisibles para la SoCAB para la norma nacional de 0.12 Nacional y la norma local de 0.09.

**Figura 8.3.** Número de días en los que se viola la norma en el South Coast Air Basin (SoCAB, Los Ángeles)

**Figura 8.4.** Número de días en los que se viola la norma en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)

**Figura 8.5.** Número de días del promedio mensual de ozono para la ZMCM en los que se rebasa el valor límite permisible (0.11) y la nueva norma propuesta por EUA de promedio móvil de 8 horas (0.080).

**Figura 8.6.** Número de días del promedio mensual de ozono para la SoCAB en los que se rebasa el valor límite permisible tanto para la norma local (0.09ppm), la nacional (0.12 ppm) como la nueva norma propuesta por EUA de promedio móvil de 8 horas (0.080).

**Figura 8.7** Comportamiento mensual de las concentraciones máximas diarias en los días laborables y fines de semana en la ZMCM (1986-2000)

**Figura 8.8.** Comportamiento de las concentraciones máximas diarias en los días de la semana en la ZMCM (1986-2000)

**Figura 8.9.** Comportamiento mensual de las concentraciones máximas diarias de ozono en los días laborables y fines de semana en la SoCAB (1986-1999)

**Figura 8.10.** Comportamiento de las concentraciones máximas diarias de ozono según el día de la semana en la SoCAB (1986-1999).

**Figura 8.11.** Cambios de 1987 a 2000 en las concentraciones del promedio horario de Ozono en el Pedregal.

**Figura 8.12.** Cambios de 1986 a 2000 en las concentraciones del promedio horario de Ozono en Glendora.

## Lista de Tablas

**Tabla 3.1.** Comparación entre la ZMCM y la SoCAB

**Tabla 4.1.** Métodos estadísticos utilizados para evaluar la tendencia.

**Tabla 5.1.** Distribución de las 32 estaciones de monitoreo que conforman la RAMA.

**Tabla 5.2.** Estaciones que conforman la Red de Monitoreo de Los Ángeles (SoCAB).

**Tabla 7.1.** Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para el TOP 30 (ZMCM).

**Tabla 7.2.** Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para el 2° max (ZMCM).

**Tabla 7.3.** Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para el 4° max (ZMCM).

**Tabla 7.4.** Media de los promedios horarios máximos para ozono en la ZMCM de las 7 estaciones evaluadas con el valor de la prueba de Wilcoxon sobre la comparación entre medias por año.

**Tabla 7.5.** Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall (SoCAB).

**Tabla 7.6.** Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para el 2° máximo (SoCAB).

**Tabla 7.7.** Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall (SoCAB).

**Tabla 7.8.** Media de los promedios horarios máximos para ozono en la SoCAB de las 6 estaciones evaluadas con el valor de la prueba de Wilcoxon sobre la comparación entre medias por año.

**Tabla 8.1** Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para los días en los que se rebasa el valor de sus respectivas normas para LA y MEX

## Lista de Mapas

**Mapa 8.1** Comportamiento de los días laborables y fines de semana en las 6 estaciones de la ZMCM

**Mapa 8.2** Comportamiento de los días de la semana en las 6 estaciones de la ZMCM

**Mapa 8.3** Comportamiento de los días laborables y fines de semana en las 6 estaciones de los Ángeles (SoCAB)

**Mapa 8.4** Comportamiento de los días de la semana en las 6 estaciones de los Ángeles (SoCAB)

**Mapa 8.5** Comportamiento del efecto pistón de las 6 estaciones de la ZMCM

**Mapa 8.6.** Comportamiento del efecto pistón en las 6 estaciones de la SoCAB

## Glosario de Términos

**CR.** Estación Crestine.

**CAM.** Comisión Ambiental Metropolitana de la Ciudad de México.

**CARB.** California Air Resources Board.

**CCA.** Estación Centro de Ciencias de la Atmósfera.

**CES.** Estación Cerro de la Estrella.

**CMPCCAVM.** Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación del Valle de México.

**COV.** Compuestos orgánicos Volátiles.

**GL.** Estación Glendora.

**HA.** Estación La Habra.

**HC.** Hidrocarburos

**HCNM.** Hidrocarburos no Metano

**IMP.** Instituto Mexicano del Petróleo

**LG.** Estación Lake Gregory.

**MER.** Estación Merced.

**nmca:** Norma Mexicana de Calidad del Aire

**NNCA:** Norma Nacional de Calidad del Aire

**NO<sub>2</sub>.** Dióxido de Nitrógeno.

**NO<sub>x</sub>.** Oxidos de Nitrógeno totales.

**O<sub>3</sub>.** Ozono.

**PED.** Estación Pedregal.

**PEMEX.** Petróleos Mexicanos.

**PICCA.** Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica de la ZMCM.

**PLA.** Estación Plateros.

**Ppb.** partes por billón

**Ppm.** partes por millón

**PROAIRE.** Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000.

**RE.** Estación Redland.

**RU.** Estación Rubidoux.

**SB.** Estación San Bernardino.

**SoCAB.** South Coast Air Basin.

**SIMAT.** Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México

**TLA.** Estación Tlalnepantla.

**Top30.** Promedio de los 30 valores máximos diarios en un año de Ozono.

**UNAM.** Universidad nacional Autónoma de México.

**USEPA.** United States Environmental Protection Agency.

**XAL.** Estación Xalostoc.

**ZMCM.** Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

**ZMLA.** Zona Metropolitana de la Ciudad de Los Ángeles.

## RESUMEN

Las Ciudades de México y Los Ángeles representan dos de las áreas más contaminadas del mundo con graves problemas de ozono, es por ello importante estudiar y comparar estas dos ciudades, en cuanto a su calidad del aire, así como por las medidas y estrategias de control aplicadas. Estas dos ciudades tienen diferencias en su población; estado de desarrollo, conocimiento de sus problemas de contaminación; diferentes estrategias de control aplicadas. Además ambas tienen una red automática de monitoreo de la calidad del aire, operando por más de una década, por lo cual se cuenta con suficiente información de calidad del aire para su evaluación.

Para el caso de México es importante aprovechar la experiencia generada en otros países, en este caso Estados Unidos y de una Ciudad con un problema similar que es la contaminación atmosférica por ozono, en la cual se han enfrentado problemas similares, logrando grandes avances y continuando el proceso de su solución. Lo anterior para optimizar recursos económicos, así como ganar tiempo para dar solución a una situación que a la fecha constituye un riesgo para la salud de alrededor de 20 millones de habitantes en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

Debido a la alta contaminación por ozono que tienen tanto, la Ciudad de México, como la Ciudad de Los Ángeles, se desarrolló este trabajo para evaluar la tendencia y comparar la contaminación atmosférica por Ozono en ambas ciudades. Identificando la problemática de cada ciudad, con sus diferencias y similitudes, de una manera objetiva.

La evaluación de tendencia se realizó seleccionando estaciones de monitoreo que representan a las diferentes regiones de la ZMCM y esto permite dar una evaluación, tanto temporal como espacial del comportamiento del ozono, identificando las zonas con mayor riesgo para los habitantes de la ZMCM. Se seleccionaron 7 estaciones de monitoreo buscando representatividad por estar distribuidas en toda la ZMCM y contar con un registro histórico igual o mayor a 10 años: Tlalnepantla (TLA), Xalostoc (XAL), Merced (MER), Pedregal (PED), Cerro de la Estrella (CES), Plateros (PLA) y la estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA). Para Los Ángeles se seleccionaron estaciones de la South Coast Air Basin (SoCAB) que representan a cada uno de los condados que forman la "Costa Sur": San Bernardino (SB), Rubidoux (RU), Redland (RE), La Habra (HA), Glendora (GL) y Lake Gregory (LG).

Para observar la tendencia del Ozono se utilizaron los indicadores del TOP 30<sup>1</sup>, 2º máximo<sup>2</sup> y el 4º máximo<sup>3</sup> y se comparó con las normas de calidad del aire que considera que no debe rebasarse la concentración de 0.11

---

<sup>1</sup> Es el promedio de los 30 valores máximos de un año

<sup>2</sup> El segundo valor máximo de los datos horarios anuales

<sup>3</sup> El cuarto valor más alto en tres años de los datos horarios

ppm como promedio de una hora 1 vez en un periodo de tres años, para la ZMCM y en el caso de La SoCAB es 0.09 ppm como promedio de una hora 1 vez en un año. En el caso del promedio móvil de 8 horas que es la nueva norma de ozono propuesta para EUA (0.08 ppm como promedio móvil de 8 horas, no debe ser excedido el 4 máximo en tres años) y la propuesta de norma en México (el valor del quinto máximo anual del promedio móvil de 8 horas no debe exceder 0.08 ppm) se tomó el valor del TOP 30, el 4 máximo en tres años, y el 5° máximo anual para México.

Las pruebas estadísticas utilizadas fueron: la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la determinación de la normalidad, la prueba de Mann-Kendall que es una prueba no paramétrica que evalúa la existencia de tendencia a través del tiempo de cualquier contaminante, la distribución libre de Wilcoxon para dos muestras, para comparar la concentración entre años para identificar la existencia de la tendencia de un año a otro.

En la ZMCM se observa un comportamiento creciente en los primeros años de monitoreo y después de 1991 ó 1992 donde alcanza el máximo valor, posteriormente comienza un decremento en las concentraciones hasta el año 2000. Al aplicar los métodos de Mann-Kendall y Wilcoxon al indicador TOP-30 para la ZMCM, se encontró que no hay una tendencia en la mayoría de las estaciones en todo el periodo de estudio 1986 a 2000, sin embargo al hacer dos cortes según el comportamiento de las concentraciones, se observa en muy pocas estaciones tendencia creciente que sea significativa (esto puede deberse al número de datos que se tomaron para este intervalo), pero en el segundo corte en todas las estaciones, se encuentra un comportamiento homogéneo y una tendencia decreciente significativa, con un porcentaje promedio de la tasa de cambio de 28.18%, este resultado sugiere que en los últimos 10 años se ha presentado una disminución en las concentraciones de ozono en la ZMCM, comparando estos resultados con los obtenidos para la SoCAB, presenta un comportamiento decreciente desde el inicio del periodo de prueba 1986 hasta el 2000 en la SoCAB, se encontró una tendencia decreciente significativa, con un promedio en la tasa de cambio para las 6 estaciones de 45.5%, esto significa que han disminuido las concentraciones de ozono en casi un 50%, y llegando las concentraciones del 2000 muy cerca del valor de la norma nacional de los Estados Unidos (0.12 ppm).

Al igual que el TOP-30 al aplicarles la prueba de Mann-Kendall a los indicadores: 2° máximo y 4° máximo trianual, para la ZMCM muestran tendencia decreciente de 1991 a 2000 y para la SoCAB presentan el mismo comportamiento del TOP-30, sin embargo si se evalúa lo que menciona la norma para la ZMCM con estos resultados no se cumple con el límite de 0.11 ppm para un año, ya que el 2° máximo en todas las estaciones es mayor al límite y en el caso de periodo de tres años también se rebasa. Esto mismo ocurre para los datos de la SoCAB donde el valor de la norma nacional (0.12 ppm) y el de la norma local (0.09 ppm), no se cumple.

La prueba de Wilcoxon ratifica los datos obtenidos con el método de Mann-Kendall para la ZMCM y la SoCAB, mostrando con mayor detalle los años en los que se presenta incremento, decremento o estabilidad de las concentraciones de ozono.

Al aplicar la prueba de Mann-Kendall a los días en los que se rebasa el valor límite de la norma (mensual) para la ZMCM se observa que hay tendencia y homogeneidad en cada mes, esto significa que se comportan de la misma manera no importando la época del año. Sin embargo la tasa de cambio es de “cero” esto significa que a través de los años no se ha presentado un incremento o decremento significativo, sino que ha tenido una tendencia constante en el número de días en los que se rebasa el valor límite permisible en forma mensual.

Para el número de días en los que se rebasan los valores límites permisibles en Los Ángeles en la norma local de California de 0.09 tiene la misma tasa de cambio que la presentada para la norma nacional de los Estados Unidos (0.12 ppm), esto significa que cada año se presenta un decremento de 0.33 en las concentraciones, mostrando que si hay una disminución significativa de estos días para las dos normas.

La comparación de la norma horaria y la norma promedio móvil de 8 horas para ozono, se encontró que para la ZMCM más de la mitad de los días con concentraciones altas tienen una gran duración y el mes más crítico es enero para el límite de 0.08 ppm, mientras que para la norma horaria de 0.11 ppm, mayo es el mes más crítico. En la SoCAB el verano es la época más crítica para ambos límites y cuando se presentan concentraciones altas la mayoría son de gran duración.

En el análisis Mann-Whitney para la ZMCM de días laborables y fines de semana, al comparar si existe un comportamiento diferente entre ellos se encuentra una diferencia significativa, esto significa que las concentraciones que se presentan en los días laborables son mayores que en los fines de semana. Así mismo en el análisis temporal, se encontró que las concentraciones que se registran los fines de semana se comportan de la misma manera en cualquier época del año, ya que no hay diferencia significativa al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . En cuanto a los días de la semana, se encontró una diferencia significativa, siendo Mayo y Septiembre los meses donde los días de la semana se comportan diferente a los del resto del año. En la SoCAB se encontró que hay diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) entre los días laborables y fines de semana, sin embargo aquí se presentó el comportamiento inverso a los encontrados en la ZMCM, ya que los fines de semana presentaron mayor concentración, que los días laborables. Con lo que respecta a la temporalidad, en ambos casos se comportan prácticamente de la misma manera no importando si es día laborable o fin de semana, agrupándose: enero y diciembre; febrero, marzo y noviembre; abril, mayo y octubre; finalizando con junio, julio, agosto y septiembre.

El análisis por día de la semana para la ZMCM con la prueba de Kruskal-Wallis ( $\alpha=0.05$ ), se encontró que había diferencia entre los días, al aplicar comparaciones múltiples, sólo hay diferencias significativas entre: martes y lunes; martes y sábado, por último el domingo tiene diferencias con todos los días, encontrando las concentraciones más bajas los domingos durante todo el periodo(1986 a 2000). Estos resultados sugieren que es el domingo el día que pesa más en el análisis de días laborables contra fines de semana, mostrando la diferencia entre estos.

Al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis para los días de la semana en la SoCAB se encontró que hay diferencias entre los días, con la prueba de Mann-Whitney la diferencia que existe entre el sábado y domingo con los otros días de la semana fue significativa, así mismo no hay una diferencia importante entre sábado y domingo sugiriendo esto que se comportan de la misma manera, al igual que los días de la semana restantes. Estos resultados confirman lo encontrado en las comparaciones entre días laborables y fines de semana.

En el trabajo de Bravo et al, (2001) se encontró por primera vez el comportamiento de la concentración de ozono “el efecto pistón<sup>4</sup>”, que evalúa a través del tiempo la eficiencia de las medidas de control, en este caso se realizó en 5 estaciones de la ZMCM, en el caso de la estación más crítica (Pedregal), muestra que los intervalos de concentraciones mayores a 0.181 ppm han tenido un decremento considerable, sin embargo, las concentraciones de 0.041 a 0.170 han tenido un incremento, esto es, las concentraciones intermedias son difíciles de abatir, ya que según el efecto pistón las altas se reducen primero, sin embargo se llega a un punto donde bajar las concentraciones intermedias es sumamente difícil, e inclusive tienen incrementos. Lo anterior muestra que algunas de las estrategias de control no han sido tan eficientes como se esperaba. En tanto para la SoCAB, en Glendora una de las estaciones históricamente críticas de esta área, se observa, cómo todas las concentraciones, tanto intermedias como altas han tenido un decremento significativo, y solo las concentraciones menores a 0.050 ppm se han incrementado. Con lo cual, las estrategias de control en la SoCAB han sido eficientes para bajar los niveles de contaminación.

---

<sup>4</sup> *Este comportamiento muestra que las altas concentraciones decrecen y se reducen rápidamente a través del tiempo, mientras que las concentraciones medias aumentan o disminuyen muy lentamente.*

## I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica se ha convertido en un problema mundial en las grandes áreas urbanas. En los países en desarrollo especialmente en ciudades como Santiago de Chile, Sao Paulo y la Ciudad de México se tienen actividades industriales no planificadas y concentración urbana que producen el deterioro del entorno natural, además de una creciente utilización de vehículos automotores, uso de gasolinas no adecuadas y la destrucción de áreas forestales, agrícolas y la concentración industrial han originando una enorme cantidad de elementos contaminantes que contribuyen al deterioro del aire que respiramos, causando daños a la salud y severos desajustes en el ambiente. (Hernández, et al 1988)

Un caso que ha llamado la atención es la contaminación atmosférica por ozono debido a su efecto en la salud, por los altos niveles, su duración y frecuencia en la atmósfera. La presencia de este contaminante se ha observado en diferentes ciudades de países altamente industrializados de Europa, Japón y Estados Unidos, así como en países en vías de desarrollo. Se trata de un problema de difícil solución, cuando no se aplican estrategias de control adecuadas y se agrava cuando se presentan condiciones climáticas propicias a la contaminación. (Restrepo I., 1992)

Es por ello importante conocer y diagnosticar adecuadamente la tendencia del ozono, así como evaluar su comportamiento con respecto a las medidas de control, para reducir su concentración en la atmósfera.

El monitoreo atmosférico es una herramienta útil en la evaluación de la calidad del aire. y proporciona la información necesaria para el establecimiento o revisión de políticas de regulación y control. El monitoreo a largo plazo empleando procedimientos consistentes y prácticas adecuadas de calidad, provee además información importante para científicos y tomadores de decisiones sobre el estado de la composición química y la dinámica de la atmósfera (U. S. Environmental Protection Agency 1998c).

México busca con el monitoreo de la calidad del aire generar información que permita caracterizar y dimensionar los problemas de contaminación atmosférica para poder implementar estrategias de control eficientes. A pesar de los esfuerzos que se han venido dando para combatir la contaminación atmosférica por ozono, esta no ha disminuido. Por el contrario, desde mediados de los años 80 los niveles de este contaminante se han elevado considerablemente hasta llegar a valores potenciales de daños significativos a la salud (Bravo *et al* 1987; 1988; 1997a). Desde 1987 a la fecha se tienen alrededor de 330 días al año por arriba de la norma de calidad del aire para ozono, por lo cual se requiere de medidas urgentes que consideren los aspectos técnico científicos para la solución de este grave problema de contaminación atmosférica en la ZMCM (Aldana *et al* 1999a).

## 1.1 IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN

Las Ciudades de México y Los Ángeles representan dos de las ciudades más grandes, más pobladas y más contaminadas del mundo con graves problemas de ozono, y de ahí la importancia de estudiar y comparar estas dos ciudades; por su población, estado de desarrollo, conocimiento de sus problemas de contaminación y diferentes estrategias de control aplicadas. La existencia de mas de una década de operación de sus redes automáticas de monitoreo de la calidad del aire, permite evaluar y comparar la información de su calidad del aire asegurando un número de datos representativos.

México debe aprovechar la experiencia generada en otras ciudades del mundo, en este caso en una ciudad (Los Ángeles) con un problema de calidad del aire similar al de la Ciudad de México. En Los Ángeles es evidente el avance logrado en mejorar la calidad del aire, por lo cual, es importante conocer y aprender del problema en Los Ángeles para optimizar recursos económicos, así como ganar tiempo para dar solución a una situación que a la fecha constituye un riesgo para la salud de los habitantes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

## 1.2 META

Evaluar y comparar la tendencia de la contaminación atmosférica por Ozono en la SoCAB y en la ZMCM. Identificando la problemática de cada ciudad, con sus diferencias y similitudes.

## 1.3 OBJETIVOS

- Determinar la tendencia de la concentración de Ozono en la atmósfera en la ZMCM y SoCAB de 1986 a 2000.
- Evaluar el cumplimiento de sus respectivas Normas de Calidad del Aire.
- Comparar la eficiencia de los programas de control con la tendencia de la concentración de Ozono a través del tiempo (1986 a 2000) en las dos ciudades.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (ZMCM).

El problema de la contaminación atmosférica en la ZMCM se hizo evidente en la década de los sesenta y ha alcanzado en la actualidad dimensiones considerables. No obstante cabe mencionar que desde los años setenta se han venido dando algunas acciones para atender este problema. En 1978, el Departamento del Distrito Federal, en coordinación con la extinta Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, llevó a cabo la Primera Reunión de Expertos, invitando a especialistas de diversos países, a fin de evaluar los programas y acciones que debían llevarse a cabo para controlar el problema del deterioro atmosférico originado por oxidantes fotoquímicos y otros contaminantes. (Aldana et al 1999a)

En 1979, se establece el Programa Coordinado para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México 1979-1982.

Años más tarde en 1986, debido a los altos valores de ozono que se presentaron en la ZMCM, se proponen las Veintiún Medidas para Controlar la Contaminación en el Valle de México, mismas que meses después se ven ampliadas en el Programa “Cien Acciones Necesarias en Ecología” de alcance Nacional y cubriendo además otros problemas ambientales.

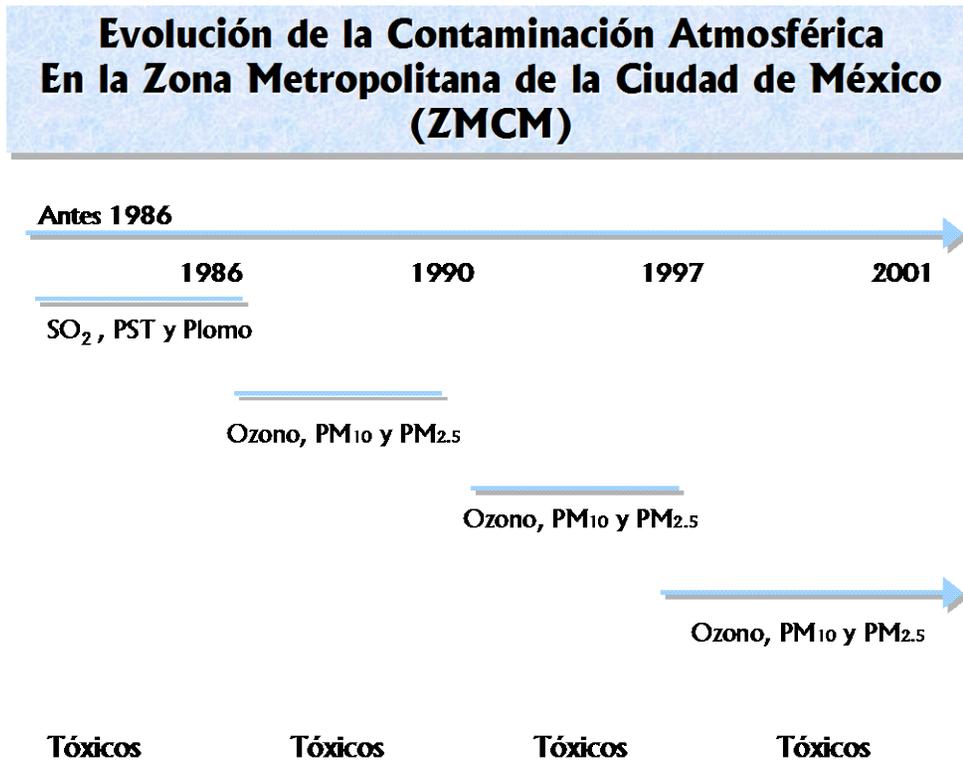
Para 1989, se presenta el Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México (PICCA), contando con un apoyo económico sustancial de diversas agencias internacionales (DDF 1989).

Desde 1987 a la fecha se rebasó en la ZMCM la norma de calidad del aire para ozono en un promedio de 330 días al año (PROAIRE 1996, Bravo et al 1998). Además los datos más recientes muestran una tendencia a rebasar la norma anual de partículas (partículas suspendidas totales-PST y fracción respirable-PM<sub>10</sub> (INE 1996)).

Para hacer frente a este problema, en marzo de 1996 se presentó el Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México, 1995-2000 (PROAIRE). En dicho programa se reconoce un incremento dramático en el comportamiento de las concentraciones máximas diarias de ozono a partir de 1986. Se puede señalar que no ha cumplido con las expectativas creadas puesto que a la fecha no se ha logrado el efectivo control en el principal problema de contaminación atmosférica del área: las frecuentes altas concentraciones de ozono, partículas suspendidas totales y partículas fracción respirable (Aldana et al 1999a).

De manera esquemática se presenta la evolución de la contaminación atmosférica en la ZMCM en la Figura 2.1

Figura 2.1.- Evolución de la contaminación atmosférica en la ZMCM. (H.Bravo et al 2001)



A pesar que se han realizado esfuerzos y de que se han destinado recursos para atacar el problema de la contaminación atmosférica en la ZMCM, es fácil demostrar que se ha tenido poco éxito con respecto a ozono, debido entre otros factores a situaciones como la siguientes:

- La falta de verdadera voluntad política para resolver los problemas de fondo donde la contaminación o el deterioro ambiental sólo es la consecuencia de problemas más graves por los que atraviesa la Ciudad de México.
- Los recursos asignados para llevar a cabo las acciones propuestas han sido escasos e inoportunos
- La carencia de evaluaciones técnicas serias y completas de las acciones propuestas, o a su instrumentación precipitada aún en contra de la opinión de especialistas, que en su momento se opusieron a ellas por considerarlas no científicamente fundamentadas.
- La falta de seguimiento de cada una de las medidas. A este respecto se podrían mencionar ejemplos como:

La disminución del contenido de plomo en las gasolinas en 1986 y la sustitución del combustóleo en las dos plantas termoeléctricas de la ZMCM por gas natural, así como el cierre de las instalaciones de Loreto y Peña Pobre, medidas todas ellas enfocadas a reducir los niveles de óxidos de azufre, partículas y plomo, pero cuyo efecto colateral fue el incremento de las concentraciones de precursores de ozono. Dichos aspectos fueron advertidos

antes de la instrumentación de las medidas cuyos resultados se han demostrado en estudios posteriores a la implantación de tales acciones.

El uso de gasolinas oxigenadas en vehículos sin convertidor catalítico que redujo sustancialmente la emisión de monóxido de carbono y de plomo, incrementando asimismo los niveles de contaminantes precursores de ozono (Bravo et al 1997b, 2000a y b).

El hacer obligatorio y permanente una medida buena de carácter temporal (Un día sin auto) y el consecuente incremento de vehículos en circulación.

Se puede afirmar que en las acciones llevadas a cabo hasta el presente, no se ha considerado la complejidad de la química atmosférica de la ZMCM, por cual estas han dado como resultado un incremento neto de las concentraciones de ozono representando un serio problema de salud pública (Bravo et al 1993, 1997a, 1998a).

## **2.2 MECANISMOS DE FORMACIÓN DEL OZONO**

El Ozono ( $O_3$ ) es un gas oxidante producido naturalmente en cantidades muy pequeñas ( $\approx 0.010$  ppm). La molécula de ozono es compuesta por tres átomos de oxígeno, en contraste con la molécula normal de oxígeno ( $O_2$ ), el cual ocupa el 21% del aire. El ozono se forma cuando un átomo de oxígeno, O, producido usualmente en la troposfera por la fotodisociación de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), se combina con una molécula de oxígeno para formar el ozono. El ozono fue descubierto por Shönbein a mediados del siglo XXIX y fue el primero en detectarlo en el aire (Committee on Tropospheric Ozone Formation and Measurement, et al, 1991).

En la naturaleza la mayor cantidad de ozono se encuentra en la estratosfera donde juega un papel crítico al absorber la radiación ultravioleta emitida por el sol.

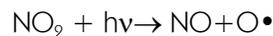
En zonas rurales se puede detectar como consecuencia de reacciones fotoquímicas a partir de trazas naturales de óxidos de nitrógeno y metano, o bien por la intrusión de ozono estratosférico a las capas bajas de la troposfera por medio del efecto de las corrientes de chorro (jet stream), y complicados mecanismos meteorológicos. En estos lugares las concentraciones de  $O_3$  son bajas y son una parte integral de la tropósfera limpia, en contra parte la presencia del ozono en altas concentraciones es perjudicial para los seres vivos (Committee on Tropospheric Ozone Formation and Measurement, et al, 1991).

El ozono formado en la capa inferior de la troposfera en altas concentraciones (hasta los 17 kilómetros de altura y 7-8 kilómetros en los polos), es un contaminante secundario producto de la relación de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos reactivos y la luz ultravioleta. El ozono es altamente oxidante y forma parte de una mezcla compleja de contaminantes fotoquímicos asociados a radicales libres como acroleína, los peroxiacetilnitratos y los aldehídos (Committee on Tropospheric Ozone Formation and Measurement, et al, 1991).

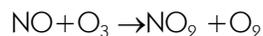
La formación del O<sub>3</sub> y otros oxidantes es una compleja función no lineal de muchos factores, incluyendo la temperatura, la intensidad y la distribución del espectro de luz solar, la mezcla atmosférica y las condiciones relativas de la meteorología, así como la concentración de los precursores en el aire, la relación entre COV y NO<sub>x</sub>, y la reactividad de los precursores orgánicos. Cuando hidrocarburos reactivos y óxidos de nitrógeno se emiten en la atmósfera y son expuestos a radiación ultravioleta, producen la formación de estos nuevos compuestos (oxidantes fotoquímicos) incluyendo ozono y otros oxidantes. El ozono ha sido identificado como el componente más abundante en los niveles de oxidantes. Las concentraciones de oxidantes dependen de la duración e intensidad de la radiación solar y de la temperatura. Una característica que complica el estudio de los oxidantes es el que sus concentraciones en la atmósfera dependen de reacciones químicas, y por lo tanto, se presentan después que sus precursores (EPA, 1996)

Las fuentes de emisión de precursores antropogénicos son, en primer lugar los automóviles (NO<sub>x</sub>, HCNM); industria ligera y pesada (NO<sub>x</sub>, HCNM) y gasolineras (HCNM), así como todas las actividades en las que se emplean solventes orgánicos: pintura, limpieza, etc. (Bravo, et al 1988).

El ciclo de formación del ozono comienza con el NO<sub>2</sub> que absorbe eficientemente la energía ultravioleta del sol, esta interacción genera la reacción fotolítica al romperse la molécula del NO<sub>2</sub> dando lugar a la formación del ozono.



donde M= representa N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> u otras moléculas que absorben los excesos de la reacción



La molécula de NO<sub>2</sub> se rompe y forma NO y O, con lo cual se inicia el mecanismo de formación natural del ozono. El átomo libre de oxígeno (O•) se une al oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) formando una molécula de ozono (O<sub>3</sub>). El ozono reacciona a su vez con el óxido nítrico y se disocia para formar de nuevo oxígeno molecular y bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), cerrándose así el ciclo. Los compuestos orgánicos volátiles pueden alterar este ciclo, ya que reaccionan más rápidamente con el óxido nítrico que con el ozono e impiden que éste se disocie, aumentando su concentración en la atmósfera. De acuerdo con el ciclo fotolítico el O<sub>2</sub> y el NO deberían destruirse en las mismas cantidades, pero no sucede de este modo debido a que intervienen ciertos hidrocarburos que provocan una reacción más extensa. Las moléculas de O<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> tienen una gran capacidad para reaccionar por medio de la

oxidación de los hidrocarburos reactivos; la oxidación de la molécula de  $O_2$  es muchas veces más rápida que la de  $O_3$ . Así, los hidrocarburos no metano (HCNM), se combinan más fácilmente con las moléculas disponibles de oxígeno atómico ( $O\bullet$ ) de la descomposición de  $NO_2$  y se forman radicales libres, que oxidan el  $NO$  a  $NO_2$  reiniciando con ello el ciclo. La concentración de ozono oscila de acuerdo con la intensidad de la radiación solar (considerando los precursores constantes), por eso se observa mayor concentración por el medio día. (Bravo, et al 1988, EPA, 1998)

Los factores meteorológicos que pueden influir en los niveles de la concentración de ozono son la radiación ultravioleta, temperatura, velocidad del viento, humedad, mezclado atmosférico y el transporte atmosférico.

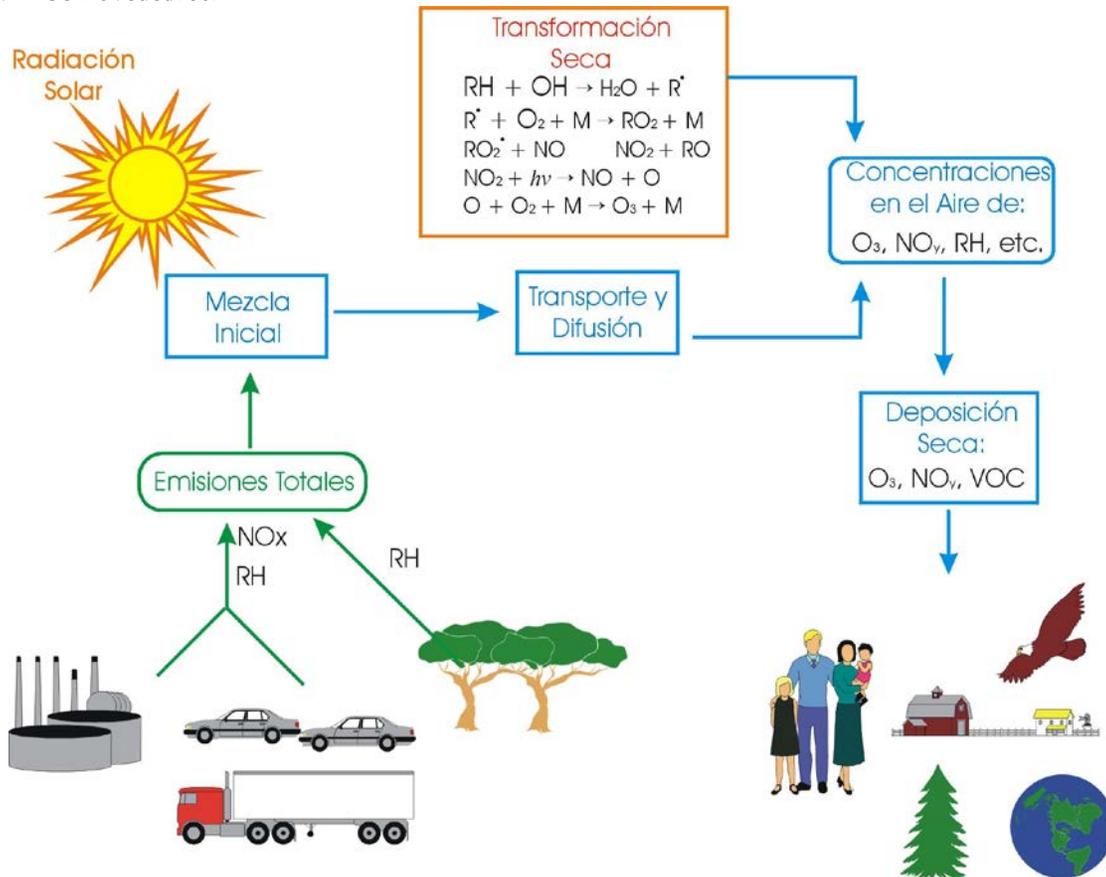
La radiación ultravioleta juega un papel importante en el proceso fotoquímico de la formación del ozono. La intensidad de la luz solar (específicamente la porción UVB de la luz solar) varía con la estación, latitud y altitud. Rao y Zurbenko (1997) presentan un estudio donde la correlación de radiación solar y la producción de ozono es alta. En cuanto a la temperatura es uno de los parámetros más estudiados en la tendencia del ozono y en varios estudios se ha encontrado una fuerte correlación de este parámetro y el ozono (Davidson, 1993; Cox, et al, 1993; Korsog, et al, 1991; EPA, 1996; Rao, et al, 1997).

Es posible que en una escala estacional, la correlación entre temperatura y Ozono puede ser una correlación indirecta de la variabilidad de la radiación UV, sin embargo, es insuficiente para explicar la correlación entre las dos variables día a día.

Cambios en la tasa de fotólisis y en la concentración de  $H_2O$  se relacionan, ya que ambos se unen para el abastecimiento de radicales  $OH$ , los cuales determinan la tasa de producción del Ozono en la atmósfera limpia y contribuyen en la producción de Ozono en las atmósferas contaminadas. Una reducción en la tasa de fotólisis o  $H_2O$  podría reducir la fuente de radicales  $OH$ . Cálculos hechos por Sillman, Samson y Masters (1992) demuestran una diferencia entre las tasas de hidrólisis entre verano y otoño encontrando un impacto significativo en la tasa de producción de ozono en la simulación fotoquímica urbana.

**Figura 2.2.** Ciclo del Ozono de la emisión a la deposición (adaptado de "Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution", pag 27, 1992)

Donde: RH = COV's reactivos.



R•=Radicales orgánicos.

M= cuerpo inerte (ejem: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)

### 2.3 EFECTOS DEL OZONO

Cuando hay acumulación de ozono o bien de otros oxidantes (como peróxidos), en las capas bajas de la atmósfera se producen efectos nocivos para la salud: irritación en los ojos y membranas mucosas, la primera vez que se observó este fenómeno fue en Pasadena, un suburbio de Los Angeles, Cal. (Committee on Tropospheric Ozone Formation and Measurement, et al, 1991)

Se han realizado estudios sobre los efectos del ozono en la salud durante muchos años. Hasta ahora, se ha encontrado que el ozono puede causar varios tipos de efectos en los pulmones: infecciones respiratorias agudas, tos, flemas, silbilancias, atrofia de mucosa nasal, irritación de ojos, disminución de la función ventilatoria (que se refiere al volumen de aire que se inhala en la aspiración profunda y la velocidad en la que se exhala), puede hacer

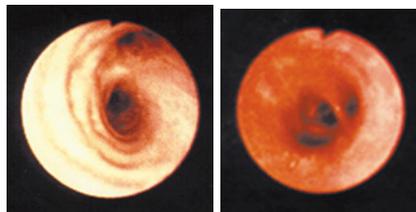
más difícil la respiración profunda y vigorosa. Algunos de estos síntomas pueden perdurar por unas cuantas horas después de la exposición al ozono (COMISIÓN AMBIENTAL METROPOLITANA, 2000).

En general, a medida que las concentraciones de ozono aumentan, los efectos de salud son más serios y más personas son admitidas a los hospitales por problemas respiratorios. Cuando los niveles de ozono son muy altos, toda la población debe reducir su exposición al ozono (COMISIÓN AMBIENTAL METROPOLITANA, 2000).

La disminución de la función ventilatoria o pulmonar reducida es un serio problema para los trabajadores al aire libre, los atletas competitivos, y otras personas que se ejercitan al aire libre (EPA, 2000).

Cuando los niveles de ozono son altos, algunos asmáticos sufren ataques de asma que requieren atención médica o el uso de medicamentos adicionales. Una razón por la que esto sucede es que el ozono hace a las personas más sensitivas a los alérgenos, los cuales son los agentes más comunes que provocan los ataques de asma. (Los alérgenos provienen de los insectos, del polvo, las cucarachas, las mascotas, los hongos, y el polen). Además, los asmáticos son afectados más severamente por la capacidad pulmonar reducida y la irritación que el ozono causa en su sistema respiratorio (EPA, 2000; Committee on Tropospheric Ozone Formation and Measurement, et al, 1991).).

El ozono puede inflamar y dañar el recubrimiento del pulmón. Algunos científicos han comparado el efecto del ozono en la membrana que recubre el interior del pulmón con el efecto del sol al quemar la piel. El ozono daña las células que recubren los espacios de aire en el pulmón. Al cabo de unos cuantos días, las células dañadas son repuestas y las células muertas se descartan—de una manera parecida a la piel que se escama después de una quemadura de sol. Si este tipo de daño ocurre repetidamente, el pulmón puede cambiar permanentemente de manera que puede causar efectos a largo plazo en la salud, afectando su calidad de vida (EPA, 2000).



*El ozono puede dañar el revestimiento de los pulmones. Estas fotografías muestran una vía respiratoria pulmonar saludable (izquierda) y una vía inflamada (derecha). Tomado de EPA-452/K-00-001*

El ozono puede empeorar las enfermedades pulmonares crónicas, tales como el emfisema y la bronquitis. Algunos de estos efectos se consideran de corto plazo, porque cesan una vez que el individuo ya no está expuesto a los niveles elevados de ozono. Sin embargo, se cree que el daño a corto plazo por la exposición al ozono puede dañar permanentemente el pulmón. Por ejemplo, los impactos del ozono sobre los pulmones en el desarrollo de los niños, a través de los años puede resultar en una función pulmonar reducida cuando lleguen a la edad adulta. Además, la exposición al ozono puede acelerar el deterioro de la función pulmonar que ocurre como resultado

natural del proceso de envejecimiento. Actualmente en otros países se están haciendo investigaciones para entender mejor los posibles efectos de la exposición al ozono a largo plazo. La posibilidad de que el ozono pueda inducir a un incremento en la tasa de mortalidad es un tema que aún esta en discusión (Comisión Ambiental Metropolitana 2000).

### **2.3.1 El caso de la Ciudad de México**

Los efectos crónicos por exposición a ozono se han obtenido principalmente de estudios transversales, esto es, estudios en los que se evalúa a una población una sola vez; pero como hay mucha información relacionada con la exposición real de este grupo al contaminante que se quiere estudiar, los resultados no son del todo aceptables. Al igual que en otros países los estudios que se han realizado en México son en el corto plazo. En 1986, Namihira estudió la función respiratoria de niños y niñas entre 6 y 14 años de edad que vivían en San Lorenzo Tezonco, al sureste de la ciudad de México y Xalostoc, zona industrializada en el noreste y observó una ligera disminución en los valores normales para estas funciones en los niños de Xalostoc. La interpretación de este estudio se limita por la falta de mediciones de exposición ambiental en la población. Castillejos (1992) refiere cambios en las pruebas de función respiratoria de niños que viven en el suroeste de la Ciudad de México, pero no tan marcados como se hubiera esperado, por la exposición a este contaminante en la zona de estudio. Por otro lado Fortoul (1995,1996), en un estudio en niños en un campo de verano en el suroeste de la Ciudad reporta que cuando los niños jugaban en los días con niveles elevados de ozono, su función respiratoria disminuía, mientras que los días con ozono, por abajo de la Norma Mexicana de Calidad del Aire, la función respiratoria no se modificaba. Calderón, et al., (1992) realizan un estudio sobre los cambios histopatológicos que presenta la mucosa nasal en los habitantes de la ZMCM, encontrando cambios severos en periodos cortos de exposición, sugiriendo que el ozono juega un papel sinérgico pero no es el único ya que la atmósfera de la ZMCM tiene muchos compuestos tóxicos y potencialmente cancerígenos.

En resumen se puede concluir que la exposición a niveles registrados en la ZMCM, aun en los individuos sanos experimentan efectos como irritación severa y cambios de las mucosas, resequedad y cefaleas. En individuos asmáticos y con otros padecimientos respiratorios se puede presentar una disminución significativa de la capacidad pulmonar y otros padecimientos asociados (DDF, 1996).

En estudios recientes sobre el efecto de los contaminantes en la salud y la cuantificación económica del mejoramiento de la calidad del aire en la ZMCM, se estimó la relación y el efecto de la contaminación sobre la salud de las personas usando diferentes estimadores como: estimación de funciones de exposición-respuesta, incremento de la admisión a hospitales, visitas a salas de urgencias, aumento de los síntomas respiratorios, etcétera. De este estudio se concluye que existe una relación entre el aumento de enfermedades respiratorias y el

número de muertes asociadas con la exposición a ozono y a partículas. Observando que de cada aumento de 0.010 ppm en los niveles de ozono se puede tener un incremento de 0.6% en los casos de mortalidad aguda y un incremento de 1% en los casos de mortalidad prematura. Cabe señalar que la mortalidad atribuible a la contaminación atmosférica, ocurre principalmente en individuos que ya tienen alguna enfermedad cardíaca, respiratoria, en personas de edad avanzada y niños (Comisión Ambiental Metropolitana, 2001).

### **2.3.2 El caso de la Ciudad de los Ángeles**

La Ciudad de Los Ángeles comparte problemas similares con la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en ambas existe el problema de la contaminación por ozono y partículas. En Los Ángeles se han llevado a cabo un sin número de estudios sobre los efectos en la salud ocasionados por los contaminantes. En 1989 se encontró que el 98% de los habitantes de la región de Los Ángeles (SoCAB) están expuestos a un aire insalubre y que los niños son especialmente vulnerables, y 1600 personas murieron prematuramente a causa de la exposición a la contaminación (Kleinman M.T. "Health Effects of Air Pollution", <http://www.aqmd.gov/>, acceso en enero 2003).

En 1987 la Universidad del Sur de California, examinó los pulmones de 152 personas jóvenes que murieron a causa de accidentes y homicidios. Encontrando una ligera inflamación de los espacios pulmonares en el 75% del grupo, con un 27% de estos con daño severo. Alrededor del 54% tuvieron al menos un sitio del aparato respiratorio donde se encontró alguna enfermedad severa. Esta fue la primera prueba del daño a la salud por exposición a largo plazo de contaminación atmosférica ((Kleinman M.T. "Health Effects of Air Pollution", <http://www.aqmd.gov/>, acceso en enero 2003).

En 1992 el California Air Resources Board, comenzó un estudio con más de 9,600 estudiantes de primaria, secundaria y preparatoria, dándoles seguimiento por 10 años para evaluar el daño potencial a la salud por exposición continua al ozono, partículas finas y lluvia ácida. Se estudió a un grupo religioso que son abstemios al tabaco (adventistas del séptimo día) de los cuales el 62% vivían en la SoCAB, encontrando una relación entre la exposición de largo plazo a la contaminación del aire con el desarrollo de enfermedades crónicas específicas (asma, enfermedades respiratorias, bronquitis y en algunos casos un riesgo mayor a desarrollar cáncer)(Kleinman M.T. "Health Effects of Air Pollution", <http://www.aqmd.gov/>, acceso en enero 2003).

Un estudio realizado por la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA) sobre enfermedades respiratorias, observó a los residentes de tres áreas del Sur de California (Long Beach, Glendora y Lancaster) que tienen diferentes niveles de contaminación del aire. Este estudio tuvo una duración de años dando seguimiento a las personas que participaron en él, encontrando que los residentes de las zonas más contaminadas Long Beach y Glendora, tuvieron mayores síntomas de enfermedades respiratorias como bronquitis y asma (Kleinman M.T. "Health Effects of Air Pollution", <http://www.aqmd.gov/>, acceso en enero 2003).

La UCLA desarrollo un estudio con atletas, detectando que pueden ser más vulnerables a los efectos del ozono por la exposición prolongada a altas concentraciones de ozono, cuando practican sus deportes. Otros estudios muestran que la exposición prolongada a bajas concentraciones de ozono son suficientes para causar la inflamación de los pulmones (Kleinman M.T. "Health Effects of Air Pollution", <http://www.aqmd.gov/>, acceso en enero 2003).

Estudios con niños expuestos a la contaminación por ozono en el verano tienen gran susceptibilidad a las infecciones porque la exposición crónica al smog provoca daños al sistema inmunológico de los niños (Kleinman M.T. "Health Effects of Air Pollution", <http://www.aqmd.gov/>, acceso en enero 2003).

### III. DESCRIPCIÓN DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

La ZMCM y la Cuenca de Aire de la SoCAB que abarca toda la Zona Metropolitana de Los Angeles son dos ciudades susceptibles a sufrir problemas de contaminación atmosférica por sus características topográficas, climáticas y su localización geográfica.

La SoCAB está localizada a una latitud de 34 ° N, Los Angeles tiene un rango de clima tipo Mediterráneo comparado con otros lugares de los Estados Unidos. Los cielos soleados del sureste, su topografía y su localización geográfica son factores muy importantes para determinar el problema de la contaminación atmosférica. Durante el verano la radiación solar alcanza el máximo y el “Patrón de brisa marina” promueve el transporte de masas de aire de oeste a este. Las montañas que rodean al norte y al este provocan el estancamiento del aire en el este y en el valle. Las fuentes de emisión del área oeste tienen impacto en los receptores del área este. Se ha observado daño en la vegetación que se encuentra en las montañas de San Bernardino a 100 Km de las principales fuentes de emisión.

La ZMCM se encuentra en un altiplano rodeado de montañas a 2,240 metros sobre el nivel del mar en promedio y cubre un área de 3,540 km<sup>2</sup> que representa el 37% de la cuenca del Valle de México, cuenta con prominencias topográficas aisladas como el Cerro de la Estrella, el Peñón y el Cerro de Chapultepec, entre otros. Su ubicación en la latitud 19.20° N y 99°05' O, la hace especialmente susceptible de recibir radiación solar de altos niveles de energía a través del año. Por otra parte, las condiciones climáticas, las cuales en invierno incluyen una ausencia de vientos y masas estacionarias de aire frío, favorecen las condiciones para las inversiones térmicas, lo cual es más frecuente durante los meses de invierno, rompiéndose normalmente al medio día. La ciudad es de un clima moderado con un promedio de temperatura de 15°C (12 °C en enero, 17 °C en mayo). La temporada de lluvias es de junio a septiembre con una precipitación de 725 mm por año, y la temporada seca el resto del año. Los vientos dominantes provienen del norte, aunque la ventilación es pobre debido a las montañas, lo cual no facilita la dispersión de los contaminantes. Se encuentra limitada al este por el lago de Texcoco, y al oeste y sur por altas montañas con un promedio de altura de 3000 m, con elevaciones que superan los 5,400 m sobre el nivel del terreno (Comisión Ambiental Metropolitana, 2001).

Comparando las dos ciudades la población de la ZMCM se incremento de 3 millones en 1950 a 18 millones en 2000; LA creció de 3.3 millones a cerca de 10 millones en el mismo periodo. Los condados de Los Ángeles, Orage, Riverside y San Bernardino tienen 15 millones de personas (CARB 2001). Si esto incluye la geografía y los fenómenos meteorológicos, los contaminantes y la química atmosférica. En la Tabla 3.1 se presenta la comparación de algunos indicadores entre las dos zonas urbanas. También hay una gran diferencia en el

Producto Interno Bruto (PIB) per cápita la densidad poblacional y la fracción de vehículos equipados con dispositivos de control de las emisiones.

**Tabla 3.1.** Comparación entre la ZMCM y la SoCAB

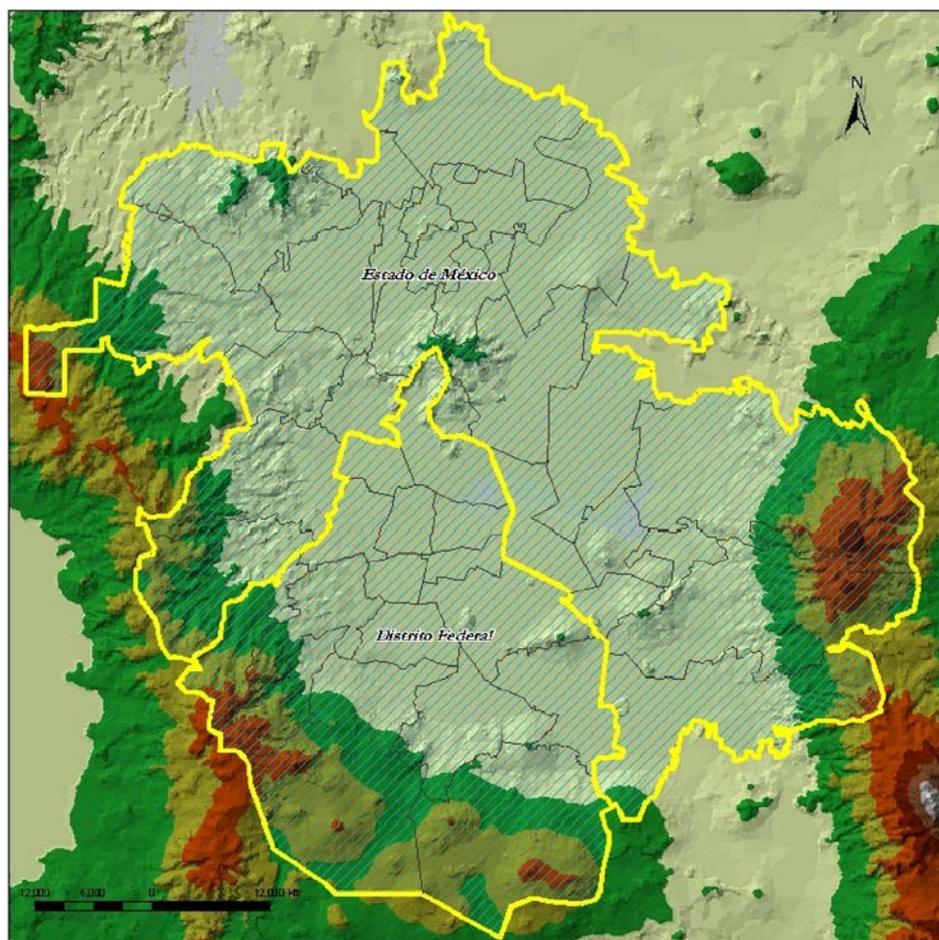
Parámetro	ZMCM	Los Ángeles
Población (2000)	18 millones	15 millones
Área Total (km <sup>2</sup> )	3,540	27,800
Área Urbanizada (Km <sup>2</sup> )	1,500	17,500
Densidad Poblacional (hab/km <sup>2</sup> )	12,000 (zona centro) 2,700 (zona periferal)	840
PIB per capita (2000) en US dólar	7,750	32,700
Consumo de Energía (petajoules)	720	4,100
Consumo de combustible (gasolina) Litros por día (1999)	18 millones	76 millones
Consumo de combustible (diesel) litros por día (1999)	Total = 5.3 millones Automotores = 4.4 millones	10 millones
Flota vehicular (1999)	3.5 millones	9.3 millones
Promedio de la edad de los vehículos (años)	~10	~10
Control tecnológico de emisión vehicular (1998)		
Pre-control	50%	1%
Control temprano	22%	8%
Tier 0	28%	66%
Tier 1	~0%	25%
VKT (kilómetros por día)	153 millones	512 millones
Concentración Pico de Ozono (ppm) en 1999	0.321	0.176
Concentración pico de PM10 (µg/m <sup>3</sup> ) en 1999	202	139
Emisiones de NOx (toneladas/año)	206,000 (1998)- 80% por vehículos	400,000 (2000)- 80% por vehículos
Emisiones de COV (toneladas/año)	475,000 (1998) – 405 por vehículos	362,000 (2000)- 40% por vehículos

Tomado y adaptado de "Air Quality in the Mexico Megacity" An Integrated Assessment", Molina L.T, Molina M.J., Kluwer Academic Publishers, MIT, USA, 2002

### 3.1 ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (ZMCM)

La ZMCM tiene una flota mayor de 3,500,000 vehículos, lo cual da en promedio un vehículo por cada 5.14 habitantes. El uso del servicio público de transporte es del 80%. Se ha calculado que las emisiones directas con las que cada habitante contribuye son de 3,700,000 toneladas por año de contaminantes, y si se incluye la erosión y otros procesos de degradación de la naturaleza, la emisión total estimada es de 4,400,000 toneladas por año de contaminantes. En cuanto a las emisiones de las fuentes móviles se trata básicamente de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas.

**Figura 3.1** Mapa de Zona Metropolitana de la Ciudad de México (3,450 km<sup>2</sup> 16 delegaciones del Distrito Federal y 18 municipios conurbados del Estado de México)



### **3.1.1 Contaminación Atmosférica por Ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.**

La contaminación atmosférica fotoquímica en la ZMCM, representada principalmente por el ozono y las partículas suspendidas menores a 10 micras de diámetro, constituye un gran problema que afecta la salud y cuya solución no se ha logrado con el rigor que se requiere, tomando en cuenta estrategias de control adecuadas a las condiciones naturales, técnicas, sociales, económicas y culturales de nuestro país. (Bravo, H., 1997)

La presencia del ciclo fotoquímico del ozono en la ZMCM fue detectado desde finales de los años 50's (Bravo et al., 1958). Sin embargo desde la década de los 80's los patrones y composición de las emisiones de precursores de ozono han cambiado significativamente. La planta industrial ha crecido en tasas muy pequeñas e inclusive ha habido reubicación de algunas industrias, aunque la flota vehicular por su parte ha crecido también. Asimismo, aumentó el consumo de combustible típicamente industrial, como el combustóleo y el diesel, lo mismo que el consumo de gasolina (SEDESOL, 1992)

En los 60's y 70's mientras otros países comenzaban a preocuparse por las emisiones de vehículos e industrias a sus atmósferas, los habitantes de México no veían una razón para considerarla, porque en los 70's los automotores eran responsables sólo del 50% de la contaminación atmosférica y la industria era considerada como la principal responsable de la contaminación (Bravo y Magaña, 1979).

En otoño de 1986 los niveles de ozono en la ZMCM se dispararon a una magnitud y frecuencia antes no conocidos. Esto se explica porque se emitieron a la atmósfera nuevos hidrocarburos reactivos y más óxidos de nitrógeno, relacionado claramente con el cambio de gasolinas y combustóleo, realizado por PEMEX en esa misma fecha (Bravo et al 1987). PEMEX señaló que esta medida de cambio de gasolina se debió a que los niveles de plomo encontrados en las partículas suspendidas totales se encontraban por arriba de la norma de calidad de aire de este contaminante ( $1.5 \text{ mg/m}^3$  promedio aritmético trimestral) y la gasolina anterior a 1986 estaba constituida básicamente por gasolinas primarias con alto porcentaje de parafinas de bajo octano, por lo que necesariamente se requería adicionar tetraetilo de plomo para elevar el octanaje. El problema ambiental asociado fue el exceso de plomo en la atmósfera. También los niveles de bióxido de azufre se encontraban muy por arriba de los niveles máximos recomendados en la Norma de Calidad de Aire Mexicana, se decretó la reducción del uso de combustible con alto contenido de azufre (combustóleo), y se recomendó el gas natural como combustible alternativo en las termoeléctricas dentro del valle.

La nueva gasolina reformada (alto porcentaje de olefinas y aromáticos) de alto octano, disminuía drásticamente el requerimiento de tetraetilo de plomo. Sin embargo se pasó por alto la experiencia de otros países de programar a corto y mediano plazo la sustitución de combustibles con plomo acompañada de la introducción paulatina de vehículos con convertidor catalítico y del cambio gradual en las refinerías de los procesos de producción de gasolinas sin tetraetilo de plomo con nuevas formulaciones (Bravo,1995). Teniendo como consecuencia inmediata el incremento de las emisiones de hidrocarburos reactivos a la atmósfera y de óxidos de nitrógeno; obviamente bajaron los niveles de plomo en la atmósfera, pero el precio fue la aparición de niveles de ozono a una magnitud y frecuencia antes no conocidos.

La evolución histórica de esos niveles por arriba de la Norma Mexicana de Calidad del Aire para ozono (0.11 ppm máximo en una hora, en un día al año) antes del cambio de la gasolina, y después hasta 1995, se documenta en los trabajos de monitoreo efectuados por la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

A fines de 1986 también se anunció que las termoeléctricas localizadas en la cuenca de México cambiarían el combustóleo por gas natural a fin de reducir los niveles de bióxido de azufre. Esta medida dio el resultado previsto en cuanto a la reducción de este contaminante. Sin embargo, nuevamente la falta de estudio adecuado

de las consecuencias de un cambio de combustible en las emisiones producidas por una combustión a alta temperatura, dio como fruto el incremento sensible en las emisiones de óxidos de nitrógeno. La combinación de hidrocarburos reactivos con los nuevos niveles de óxidos de nitrógeno y la radiación solar UV favorecieron en mayor escala la frecuencia de ocurrencia de más niveles altos de ozono y de aerosoles (nitratos).

En una acción de PEMEX por reducir niveles de emisión de CO e hidrocarburos totales (HCT), se introduce a finales de 1988 un aditivo oxigenado, el metil-terbutil-eter (MTBE), a la gasolina NOVA-PLUS y EXTRA que se distribuía en la ZMCM. La justificación del uso del MTBE fue la posible reducción de emisiones de CO y HCT por los escapes de vehículos automotores que no contaban con convertidor catalítico, según la promoción de las compañías extranjeras productoras del aditivo.

Sin embargo, aún hasta 1990 no había sido autorizado el uso (MTBE) en los Estados Unidos como consecuencia de que todavía no se conoce con certeza que posibles efectos pueda tener la combustión de este aditivo en la fotoquímica atmosférica de zonas urbano, a pesar de la virtud de que permite eliminar la totalidad del uso del plomo como aditivo antidetonante (ARCO, 1989).

Un nuevo problema surgió de esta acción, la combustión del MTBE produce principalmente formaldehído (HCHO), el cual es un precursor muy importante del ozono, especialmente a las primeras horas de la mañana y al atardecer. Los niveles de ozono a horas antes inusuales como 9:00 a 10:00 hrs. son ahora comunes en la ZMCM, con lo cual se incrementó significativamente el número de horas con O<sub>3</sub> por arriba de la norma de calidad de aire mexicana para el Ozono el promedio de concentración en una hora no mayor de 0.11 ppm (no debe exceder por una hora al día en un año) (Bravo, et. al 1990).

En 1990 se establece en forma permanente el programa "Hoy no circula", con el cual se retiraban de circulación 500 mil vehículos al día. Este tipo de programa, por experiencia internacional, sólo ha funcionado para casos de emergencia y en forma temporal, pero nunca en forma permanente que fue lo que ocurrió en México, el resultado fue que una gran cantidad de vehículos anteriores a 1990 entraran en circulación

El resultado ha sido negativo. La circulación vehicular, ha aumentado. Estudios oficiales indican que el número de altas en el registro de placa permanente y ventas en el D.F. aumentó de 1987 a 1990.

El consumo de gasolina también es un indicador del efecto de dicho programa. La tasa de consumo presentó una sensible baja cuando en el invierno de 88-89 se implemento el programa. Sin embargo al final de la temporada se restableció a la tasa de crecimiento normal.

A principios de 1991 se lanza una intensa campaña anunciándose la introducción de una gasolina "diferente" (Magna-Sin) para uso exclusivo de vehículos automotores modelos 1991 con convertidores catalíticos. De nuevo

se comete el error al instruir al público consumidor de que esta gasolina es optativa para vehículos 1986-1990. El uso de gasolina Magna-Sin, formulada con gasolina totalmente reformada, con altísimo porcentaje de aromáticos y olefinas está prohibido emplearla en vehículos sin catalizador, porque las emisiones de ROG más reactivos y de NOx quedan totalmente fuera de control.

En 1992 se presenta un incremento de vehículos en circulación, un incremento en las ventas de la gasolina Magna-Sin y un decremento importante en la venta de gasolina Nova con plomo y MTBE. Asimismo, se presenta una anomalía meteorológica natural de ocurrencia extraordinaria de lluvia en la Cuenca de México, (Bravo et .al., 1993). Como consecuencia, los niveles de ozono registrados disminuyen a valores similares a los de 1989. También se inicia por parte de PEMEX a finales de 1992 el control de varias especificaciones de la gasolina Magna-Sin como contenido de aromáticos y olefinas y presión de vapor "Reid". Asimismo, para finales de ese año más de 30 tanques de almacenamiento de combustibles de PEMEX cuentan ya con dispositivos de control de emisiones evaporativas lo cual implica una reducción sensible de hidrocarburos emitidos a la atmósfera.

En 1993 prácticamente se duplica el consumo de Magna-Sin en la ZMCM reduciéndose la venta de gasolina Nova en poco más del 20% con relación al año de 1992. Asimismo se incrementa el número de vehículos nuevos con catalizador y ya casi se ha terminado la instalación de membranas internas flotantes en los tanques de almacenamiento de las terminales de PEMEX en la ZMCM. Como consecuencia la ocurrencia de niveles de ozono fue similar a la de 1992 a pesar de ser un año normal respecto a lluvias.

En 1994 el consumo de gasolina Magna-Sin continúa incrementándose; el consumo de gasolina Nova ya no se presenta a la magnitud de la tasa de 1993 pero continúa a la baja; ya no hay tasa de ventas de vehículos nuevos de los años anteriores y se complica el tráfico vehicular como consecuencia de la ineficiencia operativa del programa "Hoy no circula" (Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, 1994).

No obstante, técnicamente se espera que los catalizadores de los vehículos modelos 1991-92 empiecen a perder efectividad por acumulación de kilometraje, algunos fabricantes de convertidores catalíticos afirman que la vida media de un catalizador en operación normal es de cinco años o 50,000 kilómetros, lo que ocurra primero, esto implica que para los vehículos 1991 para el año de 1996, la operatividad y eficiencia del convertidor catalítico instalado ya se habrá agotado, quizá antes por el alto contenido de azufre en las gasolinas (500 ppm en la ZMCM y hasta 1000 ppm en los estados), lo cual combinado con el escenario descrito en el párrafo anterior lleva a que los niveles de ozono vuelvan a tomar una tendencia positiva a niveles mayores que 1992 y 1993.

El balance energético de la ZMCM indica que el consumo de gasolina por parte de los usuarios de vehículos automotores privados representa el mayor gasto relativo de la energía usada por el sector transporte. Los

vehículos particulares consumen alrededor de diecinueve veces más energía que R-100, nueve veces más que el transporte colectivo de ruta fija (peseros), sesenta y dos veces más que el metro y noventa y cuatro veces más que los trolebuses.

En relación con los criterios urbanos se puede considerar que el uso del automóvil es causa y resultado a la vez de la creciente expansión de la mancha urbana. Este proceso de expansión produce la necesidad de viajar distancias más largas para ir a trabajar, desde las áreas suburbanas con densidades relativamente bajas de población, en las cuales resulta sumamente difícil y costosa la dotación de un transporte público adecuado. Adicionalmente, las vialidades ocupan una superficie cada vez mayor del espacio urbano disponible, estimándose que hoy día casi el 30% de la ZMCM está cubierta por vialidades.

La iniquidad social del automóvil se acentúa al considerar aspectos ambientales, pues, además, su limitada contribución en términos de viajes-persona-día (vpd), los autos son responsables de más del 50% en peso de las emisiones contaminantes producidas por el sector transporte. En cuanto a la carga contaminante expresadas en Unidades de Toxicidad Equivalente, por cada vpd, los autos privados emiten cinco y media veces más que los colectivos, siete veces más que los autobuses suburbanos y trece veces más que los autobuses de la Ruta-100, sin embargo en este estudio no se consideran las características de la gasolina disponible (Quadri, et al., 1992).

Es a principios de los noventa en que se acepta finalmente a nivel gobierno de la Ciudad de México la existencia del problema de la contaminación fotoquímica por ozono en la ZMCM, y se da a conocer el Programa Integral para el Control de la Contaminación Atmosférica (PICCA), en la cual se establecen en una primera fase 41 compromisos entre los diversos sectores de la sociedad, de las cuales se desprenden 12 programas y/o acciones directas para el control del ozono y sus precursores. Del conjunto de medidas inscritas dentro de dicho programa la más importante en su efecto directo con relación al control del problema del ozono fueron los compromisos de PEMEX sobre el suministro de combustibles limpios, con especificaciones para ser utilizados en automóviles con convertidor catalítico, lo cual a la vez implicaba que a partir de 1991 los vehículos saldrían de fábrica con el equipo ya instalado. Asimismo, se continuaría con el suministro de gasolina con MTBE en gasolinas con bajo contenido de plomo y se iniciaría la instalación de recuperadores de vapores de hidrocarburos en terminales de almacenamiento y distribución de combustibles. Sin embargo, la gasolina Magna-Sin sólo podría consumirse en vehículos equipados con catalizadores. La combinación de varios escenarios ocasionó que un buen número de los vehículos equipados con catalizador a partir de 1991 tuviera inservible su convertidor, ya que el plomo de la gasolina que por necesidad tuvieron que cargar en algún momento de ese año envenenó los metales nobles del dispositivo. La consecuencia ambiental fue la emisión sin control de NOx e hidrocarburos reactivos.

Los Programas propuestos por PICCA fueron retomados y actualizados por PROAIRE: Modernizando el Programa de Verificación Vehicular con equipo BAR 90. En 1996 se exento del programa “Doble hoy No Circula” a los automóviles con una emisión de HC menor a 200 ppm y el primero de octubre se reformuló la gasolina Magna-Sin; en diciembre se introdujo la gasolina PEMEX Premium, la cual es 5% menos reactiva en la formación de O<sub>3</sub>. En 1997 se inició la exención del Programa “Hoy No Circula” para vehículos ligeros que no excedieran 100 ppm de HC y se estableció un límite de 200 ppm para taxis y microbuses.

Pero según los análisis realizados por el gobierno del Distrito Federal hasta 1997 se mantuvo constante la tendencia del ozono en los últimos años. (DDF, 1997)

De los mil 400 millones de dólares invertidos en medidas directas para controlar el problema del ozono sólo han sido efectivos para bajar temporalmente la frecuencia de ocurrencia de picos de este contaminante. La calidad del aire no es mejor cuando se aplica y se compara con la norma de calidad del aire para ozono. (Bravo, 1997)

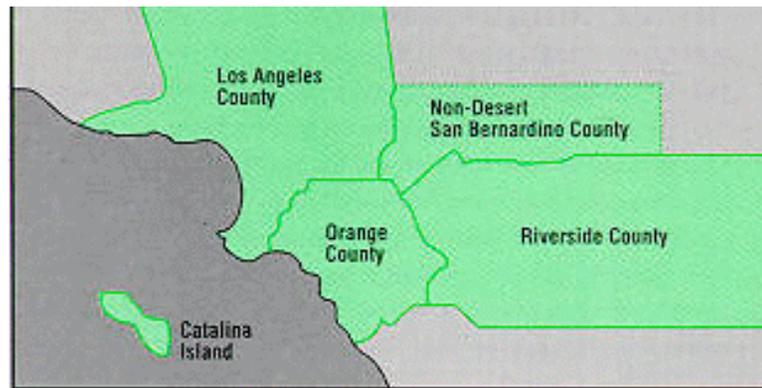
### **3.2 LOS ÁNGELES, SOUTH COAST AIR BASIN (SoCAB)**

Es un área de aproximadamente 17,500 km<sup>2</sup>, los cuales incluyen los condados de Orange, Los Ángeles, parte de Riverside y San Bernardino, esta situada latitud 34°00' Norte y Longitud 118°15' Oeste. Esta rodeada de montañas en el este y norte, al oeste y sur se encuentra el Océano Pacífico. Durante el verano bajo la influencia a gran escala de una débil inversión que atrapa una capa de aire frío marino. Los contaminantes emitidos de diferentes fuentes son empujadas tierra adentro durante el día por la brisa marina superficial

El área metropolitana de Los Ángeles es conocida por sus propuestas de regulación de los contaminantes como “South Coast Air Basin (SoCAB)”, está bajo la jurisdicción de la “South Coast Air Quality Management District” están incluidos todos los condados y distritos de control de contaminación de Los Ángeles y Orange creado en 1947, los esfuerzos sobre la regulación de la calidad del aire que se han hecho, no se ven en ninguna otra agencia de control de los Estados Unidos. La SoCAB tiene una población arriba de los 15 millones de habitantes, siendo una de las áreas urbanas del continente más grande. En términos del transporte, existen más de 10 millones de vehículos registrados en la SoCAB. Menos del 20% de la población utiliza el transporte público. El total de emisiones en la cuenca se estima en 3.2 millones de toneladas por año de contaminantes. Se estima que la mitad de los hidrocarburos, tres cuartas partes de los óxidos de nitrógeno y casi todo el monóxido de carbono es emitido por las fuentes móviles en la cuenca.

El smog fotoquímico de Los Ángeles es un problema bien conocido, sí bien la situación a mejorado de una alta concentración de 0.680 ppm en 1955 a 0.300 ppm en 1992. A pesar de este mejoramiento dramático, la concentración de ozono, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y partículas finas, Los Ángeles sigue siendo una de las ciudades con alta contaminación en los Estados Unidos.

Figura 3.2 Área que cubre la South Coast Air Basin (SoCAB) la zona de estudio de Los Ángeles.



### 3.2.1 Contaminación Atmosférica por Ozono en Los Ángeles (SoCAB)

En los años 40's un periodo de rápida industrialización en Los Ángeles por lo que la población es atacada por gas que irritaba los ojos, disminuía la visibilidad y producía un desagradable olor. En 1947 se hicieron estudios sobre el aire y se menciona que la contaminación era producida por las industrias pesada, vehículos automotores, incineradores, fundidores, humo producido por ollas que protegían la siembra del frío.

En ese mismo año la industria petrolera contrató al Instituto de Investigación de Stanford (SRI) para que hiciera otra investigación sobre las causas de la contaminación descubriendo que los días brumosos eran causados por un fenómeno natural conocido como inversión de temperatura en la vertical de la atmósfera (inversión térmica).

Los resultados de este estudio fueron que los materiales naturales como polen, fibras, sal y polvo eran componentes importantes de la bruma, pero también reconoció que la industria y los vehículos motorizados contribuían al problema con partículas de carbón, polvo metálico, productos de petróleo y vapor de agua.

En los 50's el Instituto y otros investigadores examinaron la química atmosférica de Los Ángeles. Automóviles, fabricas y otras fuentes producen contaminantes primarios como hidrocarburos, monóxido de carbono, metales pesados y vapor de agua. Cuando estos compuestos se exponen a radiación solar intensa reaccionan produciendo contaminantes secundarios como ozono, dióxido de carbono, varios compuestos orgánicos y partículas ácidas de nitratos y sulfatos.

En 1953 temiendo que Los Angeles se convirtiera en otro Londres con bruma se forma un comité de contaminación del aire y propusieron 5 ideas para reducir la contaminación a corto plazo: reducción de los hidrocarburos en la transferencia de los productos de petróleo, hicieron estándares para el escape o emisiones de los automóviles, estimular el uso de gas licuado en camiones y camionetas en lugar de diesel.

Se sugirió también, para largo plazo el desarrollo de un programa de control de contaminación para los automóviles y construyeron un sistema rápido de tránsito y comenzaron un programa de cooperación para regular las industrias fuentes de contaminación.

Después de este reporte llamado "Beckman report", los condados cercanos de Orange, Riverside y San Bernardino comenzaron con sus propios programas de control. Durante los últimos 40 años estas regiones experimentaron un explosivo crecimiento en población y en tráfico vehicular.

En 1975 los gobiernos regionales decidieron consolidar sus esfuerzos para el programa de control de la contaminación. Así después de dos años la legislación de California forzó a una alianza entre los programas locales y se creó el "South Coast Air Quality Management District (AQMD)".

Inicialmente la AQMD era responsable de las fuentes fijas de contaminación del aire y la "California Air Resources Board" estaba asignada a las fuentes móviles. Al principio no se hizo mucho ya que se requería de leyes. La AQMD adoptó un plan de calidad de aire en 1979 y 1982, pero estos eran solo ejercicios teóricos. Al mismo tiempo la "Federal Clean Air Act" solicitaba que todas las ciudades americanas deberían cumplir con los estándares, esto sería algo imposible para Los Angeles. Sin embargo los ambientalistas y algunos grupos de negocios atacaron a la AQMD por su complacencia. Así la AQMD sería la responsable desde ahora de que se cumplieran los estándares locales, estatales y federales. Se concentran en reducir las mayores fuentes productoras de contaminación atmosférica: partículas de incineración de basura, emisiones de la industria y contaminantes de los vehículos motorizados.

Para ello la industria se equipó de recuperadores de vapores, de productos de petróleo en la transferencia, eliminar solventes que juegan un papel importante en la formación de ozono o instalar equipo que los recupere no emitiéndolos a la atmósfera. Para recompensar a las industrias que usan la tecnología limpia se motiva la expansión de estas industrias y se buscan financiamientos. Se han innovado muchas tecnologías haciendo una comparación de la tecnología usada en 1976 con la de 1990 la contaminación generada en la manufactura de un producto ha bajado hasta un 80%, sin embargo hay otros tipos de emisiones que no se ha reducido como se desea. Con respecto a las fuentes móviles Los Angeles están enfocados en 3 áreas principales: promover el uso de gasolinas limpias, el uso de transporte público y una ingeniería exhaustiva de purificación.

En 1960 los requerimientos oficiales de la gasolina era disminuir el contenido de olefinas, iban por buen rumbo, sin embargo durante un tiempo se perdió en Los Angeles el programa de gasolina limpia y hasta la década de los 80's se volvió a retomar y se introdujo la legislación sobre gasolina limpia.

Otro esfuerzo para reducir las emisiones fue el de los convertidores catalíticos que a principios de 1975 en California se requería que todos los carros nuevos tuvieran convertidor, sin embargo se detectó que el convertidor se estropeaba con el kilometraje del carro y que muchos automovilistas lo quitaban de sus carros y otros envenenaban su convertidor con el uso de gasolinas inapropiadas ya que estas eran más baratas.

Otro esfuerzo fue el del programa de inspección en 1976 pero este solo se pedía si se vendía el automóvil, esto no estaba bien implementado y hacía que los propietarios hicieran largas filas para la inspección.

La legislatura en California desarrolló un programa nuevo de inspección cuando la EPA (Environmental Protection Agency) impuso sanciones. Bajo el nuevo programa de "Smog Check" todos los carros de California tenían que ser inspeccionados una vez cada dos años en un taller certificado. Otro plan fue el de compartir el automóvil con otras personas del mismo trabajo o escuela limitando ciertos carriles a estos automóviles compartidos, sin embargo algunos automovilistas se opusieron a la idea. Sin embargo, se aplicó a 5,200 sitios de trabajo, que contaban con 1.2 millones de empleados. Este programa eliminó cerca de 90,000 viajes por día y redujo las emisiones.

Actualmente los vehículos motorizados y la industria que opera en California son de las más limpias del mundo. Un carro en California emite un décimo de la contaminación que emitía un carro nuevo en 1970. La industria utiliza electricidad o quemadores de gas natural. Las plantas manufactureras y las compañías de construcción usan pinturas, solventes o adhesivos que están formulados para minimizar la contaminación. El sureste de California ha hecho grandes esfuerzos por reducir la contaminación.

El estado de California ha hecho cambios significativos en las propiedades químicas de la gasolina. La meta es reducir las emisiones de los vehículos auto motores que contribuyen significativamente a los problemas de contaminación tanto urbanos como estatales. En la fase 1 con el programa de reformulación de gasolinas (RFG), efectivo en 1992, para reducir la presión de vapor Reid (PVR) de la gasolina cambió de 9.0 a 7.8 psi durante la temporada de verano que es cuando se forma mayormente el ozono. La fase 2 se desarrolló en 1996, se hicieron fuertes cambios en las propiedades de la gasolina. Estos cambios incluían: reducción de la temporada de verano de PVR a 7.0 psi máximo; reducción del benceno, aromáticos totales, olefinas y contenidos sulfurados en la gasolina; adición de oxidantes, por ejemplo metil-ter-butil-éter (MTBE); y reducción en la temperatura de la cual el 50 al 90% del volumen de la gasolina puede ser destilada. Según el estudio de Kirchstetter, T y Harley R. (1997) encontraron cambios significativos en la composición química de la gasolina en el área de San Francisco Bay entre 1995 y 1996. La radiactividad de la gasolina líquida y vapores decrece cerca de un 20%. Se observó un pequeño decremento probable entre 3 y 8% en descarga reactiva.

La contaminación tiene serios efectos sobre la salud por lo que los gastos por enfermedades según cálculos de la AQMD han sido de \$9.4 billones, durante los últimos años. Si los residentes de Los Angeles cumplieran las normas de ozono, ellos reducirían significativamente sus gastos médicos como una consecuencia de dolor de cabeza, tos, ojos irritados y otras enfermedades crónicas.

Estas estadísticas han captado la atención de los gobiernos federales, estatales y la “federal Clean Air Act”, la cual fue modificada en 1990. La EPA le dio a la SoCAB hasta 2010 para cumplir con los estándares de salud, para lo cual debe reducir las emisiones 5% por año.

Desde 1998 y durante los próximos 12 años el plan desarrollado por la SoCAB busca reducir la contaminación desarrollando nuevas y limpias tecnologías (ARB 1999). Se ha dividido en tres fases esperando reducir a cero las emisiones de vehículos usando carros eléctricos. Al año 2000 se habían invertido 40 millones de dólares para cerca de 250 proyectos para reducir las emisiones. Para poder lograr la meta trabajan en conjunto las agencias gubernamentales y las corporaciones privadas. Uno de los incentivos más poderosos de las agencias gubernamentales es el desarrollo de tecnología limpia, además que cada industria responde a sus emisiones tanto del equipo como de su operación, dando incentivos o multas económicas; tiene apoyo permanente a las empresas para que adquieran equipo para reducir emisiones a través de créditos, etc. Es importante mencionar la conciencia ciudadana sobre la calidad del aire que desean respirar, es por esto, que tanto los residentes como los industriales reconocen la necesidad de resolver sus problemas de contaminación y todos cooperan para lograrlo.

#### IV. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA TENDENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO

Muchos de los estudios de monitoreo e investigaciones están enfocadas a cuantificar la cantidad de contaminantes en el ambiente y a monitorear los niveles de tendencia y los niveles del problema. Otros buscan como determinar los efectos de los contaminantes sobre el hombre y su ambiente.

Si estos estudios proveen de información necesaria para reducir y controlar la contaminación ambiental, es esencial que estén diseñados científicamente. Los análisis estadísticos maximizan la cantidad de información que puede ser extraída de los estudios sobre monitoreo (Gilbert R.O., 1987).

Actualmente se utilizan muchos métodos estadísticos para obtener la tendencia de los contaminantes como: los métodos gráficos que son de gran utilidad para observar los datos a grandes rasgos, por ejemplo la gráfica de caja que se basa en los percentiles, métodos aplicando estadísticos como el Mann-Kendall para evaluar la tendencia, estadística básica que nos da una idea del comportamiento de los contaminantes, etc. (Committe on Tropospheric Ozone Formation and Measurement, et al, 1991).

Las gráficas de tendencias pueden mostrar comportamientos cíclicos causados por diferentes factores como: variaciones climáticas por estaciones anuales, meteorología, cambio en los patrones de tráfico vehicular durante el día, etc. Los ciclos no son tendencias, ya que estos no indican cambios a largo plazo, pero si afectan las gráficas de tendencias, por lo que se usan métodos que corrijan o discriminen este tipo de ciclos, para poder observar con certeza la tendencia del contaminante (Gilbert R.O., 1987).

Los estudios de tendencia de la concentración del ozono de varios años pueden indicar si los métodos de control de emisiones han tenido el efecto deseado. Sin embargo el análisis de datos de monitoreo atmosférico para ozono en las mayores ciudades de E.U.A. indican que el número de días en los cuales la concentración de ozono rebasa la NAAQS (promedio de la concentración en 1 hora de 120 partes por billón) varia de un año a otro. La EPA ha considerado como principal medida estadística para la tendencia del ozono, la compuesta por el promedio del segundo valor máximo diario de una hora de concentración en un año, observándose su variación considerando año con año. Una porción sustancial de esta variabilidad que presenta la tendencia del ozono se puede atribuir no solo al cambio de año con año en las emisiones de los precursores, sino también a las fluctuaciones naturales del clima. La meteorología induce a una variabilidad marcada que dificulta algunas veces identificar la tendencia de la concentración del ozono que pueden resultar de los cambios en cantidad, tipo, y distribución geográfica de las emisiones precursoras Óxidos de Nitrógeno e Hidrocarburos aromáticos.

En Estados Unidos se usan dos clases de estimadores para evaluar la tendencia de contaminantes anuales:

- Indicadores de concentración (el segundo máximo horario de la concentración de ozono)

- Los indicadores umbrales (el número de días en los cuales el máximo horario diario de 120 ppb es rebasado).

La EPA realizó un estudio sobre la tendencia del ozono en 431 sitios de E.U.A. encontrando un decremento de 1983 a 1986, ya que en 1987 y 1988 se incrementó la concentración en un 38% y en 1989 volvió a decrecer esta tendencia, encontrando que el valor más alto de la década fue en 1988, esto se debió a la variación meteorológica.

La formación del ozono depende en gran parte de las condiciones meteorológicas y esto ha sido estudiado durante muchos años, encontrando como factor limitante a la temperatura, ya que el promedio del segundo valor más alto del máximo horario, es altamente sensible a las fluctuaciones meteorológicas. Esta medida enmascara la tendencia lo cual no permite determinar la eficiencia de un programa para reducir la concentración de ozono. Una opción es relacionar las mediciones de las fluctuaciones meteorológicas. Las condiciones que pueden producir altas concentraciones de ozono incluyen altas temperaturas, bajas velocidades de viento, radiación solar intensa, y ausencia de precipitación.

Las características de los contaminantes y los factores que influyen sobre ellos han promovido el desarrollo de métodos que permitan evaluar su tendencia considerando la variación meteorológica. Algunos de los Investigadores que han explorado métodos para ajustar la tendencia del ozono por la influencia de la meteorología son:

Storchenius y Hudischewskj (1990) que aplicó un método de clasificación para agrupar los días dentro de categorías de acuerdo con los niveles de ozono y las condiciones meteorológicas similares para cada grupo definido.

Walkim (1990) usa el análisis de la regresión estándar para calcular los efectos de la meteorología diaria sobre los niveles de ozono.

Kolaz y Swinford (1990) Categorizan los datos como favorable y no favorable basados en las condiciones meteorológicas.

Korsog y Wolff (1991) examina la tendencia de las concentraciones de ozono de 1979 a 1978 en 8 centros de poblaciones grandes en el Noroeste de los Estados Unidos, usando un método robusto de regresión que remueve la variabilidad de las condiciones meteorológicas.

Cox y Chu (1993) su método se basa en la distribución de probabilidad de Weibull, donde la escala del parámetro permite la fluctuación de día a día dependiendo de las condiciones meteorológicas favorables para la formación de ozono.

Walcek (1997) Usó un mecanismo de reacción química atmosférica aplicada a parcelas cercanas a la superficie (“un modelo de caja”), la sensibilidad de las proporciones de la formación del ozono y las concentraciones de isopreno todas incrementaban en los días calientes y todo influía en la proporción de la formación de ozono. Sus resultados sugieren que aun está incierto el control de ciertos factores importantes que influyen en la formación del ozono como la nubosidad y como este factor impacta la frecuencia de la fotólisis. En estudios pasados solo se atendía como quitar el efecto de la temperatura en el ozono. Tal vez un mejor factor a normalizar en la tendencia del ozono en áreas contaminadas podría ser la cobertura de las nubes como una variable meteorológica.

Rao, Zalewsky y Zurbenko (1995) usan el filtro Kolmogorov-Zurbenko en una evaluación de variaciones temporales y espaciales de las concentraciones de ozono utilizando los datos para algunas locaciones de monitoreo en el noreste de Estados Unidos. Los resultados indicaron una tendencia decreciente en las concentraciones de ozono durante los periodos de 1983 a 1992 en la mayoría de las locaciones del noreste de Estados Unidos.

Milanchus, Rao y Zurbenko (1998) presentan una técnica que usa la relación entre el ozono y las variables meteorológicas para construir un ajuste meteorológico a los niveles de ozono en series de tiempo. Para esto se usaron varios métodos para separar las series de tiempo de ozono y datos meteorológicos a largo plazo (clima y políticas relacionadas), estaciones climáticas (radiación solar) y de corto plazo (relacionada al tiempo) cada componente es examinado. Se correlaciona entre componentes base (suma de datos meteorológicos de largo plazo y variaciones estacionales) concentraciones de ozono y variables meteorológicas, las correlaciones entre los componentes de corto plazo (efectos tiempo) concentraciones de ozono y variables meteorológicas son estudiadas independientemente. El resultado de este estudio reveló que la combinación de radiación solar y humedad relativa funciona mejor como un filtro de estaciones y variaciones climáticas para los componentes base de las datos de la concentración de ozono. La combinación de temperatura y depresión del punto de rocío actúa mejor modelando la relación de efecto-tiempo sobre los componentes de corto plazo para los datos de los niveles de ozono. Este método es capaz de explicar cerca de 65% de variación en los datos de ozono y variables meteorológicas en varias locaciones examinadas.

Tabla 4.1. Métodos estadísticos utilizados para evaluar la tendencia

NOMBRE DE LA PRUEBA	PROPOSITO DE LA PRUEBA	VARIABLES	ESTADÍSTICO	CRITERIOS PARA EL RESULTADO
Distribución de Weibull	Describir la distribución del promedio horario máximo anual con parámetros de meteorología.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promedio horario máximo</li> <li>Temperatura máxima superficial</li> <li>Humedad relativa</li> <li>Mezcla de altura</li> <li>Cobertura de nubes</li> </ul>	$Pr ob[y > Y] = \exp\left\{-\left(\frac{Y}{\sigma_i}\right)^\lambda\right.$	Prob = prob de que la conc. de O <sub>3</sub> diario exceda a Y. σ <sub>i</sub> = escala del día i. λ = parámetro de forma
	Reporte de los efectos de la variación diaria en condiciones meteorológicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Valores diarios máximos de O<sub>3</sub> de c/u áreas urbanas se empatan con su condiciones meteorológicas.</li> </ul>	$\sigma = \exp\left(\sum \beta_j * M_{ij} + \zeta * T\right)$	β <sub>j</sub> = coeficiente de regresión j. M <sub>ij</sub> = parámetro meteorológico j del día i. ζ = tasa anual de tendencia. T = año.
Regresión lineal	determinar la relación entre la concentraciones de ozono y los parámetros meteorológicos (elegir los más fuertes)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promedio horario máximo</li> <li>Parámetros meteorológicos</li> </ul>	Gráficas y líneas de regresión Concentración de ozono vs. Meteorología	
Bootstrap	Estimar el error estándar de los parámetros, por el efecto de no independencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concentración de ozono y meteorología.</li> </ul>	Muestreo de bloques de 3 días hasta completar un año.	
Mann-Kendall	Pruebas de hipótesis de tendencia o no tendencia. Muestreo de tendencia en las concentraciones de O <sub>3</sub> son estadísticamente detectables	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promedio horario máximo de las concentraciones de ozono, diario.</li> <li>Promedio horario máximo de una semana por región.</li> </ul>		= 0.05 H <sub>0</sub> : no hay tendencia. H <sub>A</sub> : existe tendencia.

#### 4.1 INDICADORES USADOS PARA ANALIZAR LA TENDENCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

En las áreas urbanas el deterioro de la Calidad del Aire se puede entender desde diversas connotaciones, para la sociedad en su conjunto una "BUENA" Calidad del Aire puede percibirse cuando en el horizonte visible se distinguen las montañas, porque el cielo se ve limpio y no afecta a la salud. Desde el punto de vista de la política ambiental, la norma de calidad del aire se aplica como el nivel de contaminante aceptado, que protege la salud si es primaria y si es secundaria para proteger ecosistemas naturales, animales, etc. (Proaire, 1995)

Un indicador resume y representa la calidad del aire en el mismo sentido que el Down Jones Industrial Average (DJIA) resume y representa las condiciones de las acciones en le mercado bursátil. Un indicador es basado en los datos de la calidad del aire y el DJIA en el patrón del precio del mercado. (CARB, 1993)

Para el CARB la identificación de indicadores obedece a criterios específicos del Código de Salud de los EUA, que señalan la necesidad de contar con Indicadores de Progreso (homologo al enfoque de Indicadores de Estado) en cada Distrito, los cuales deben tener un período de evaluación tri-anual, considerando un nivel de confianza que asegure este progreso y satisfaga ciertos requerimientos. Además señalan cambios anuales de progreso (como la reducción de emisiones de ciertos contaminantes, etc.), de manera que permita justificar la modificación de políticas ambientales. (CARB, 1993)

Se puede considerar que la obtención de indicadores de Calidad del Aire tiene los siguientes objetivos:

**INFORMACIÓN PÚBLICA:** Permite informar a la población el estado de la Calidad del Aire en un periodo esperado de tiempo, por medio de los medios masivos de comunicación (periódico, televisión, radio). Aplicando para hacer esta información más fácil de entender al público, los índices de calidad del aire: en Estados Unidos es el Pollutant Standard Index (PSI) y en México índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA).

**ANÁLISIS DE TENDENCIA:** Permite evaluar la efectividad de las medidas de control y proporcionan información para comparar con otras regiones del país.

**EVALUACIÓN DE MODELOS:** Deben permitir comparar el efecto potencial de las estrategias de control, como sería la selección de una estrategia que conlleve al indicador más bajo. Los modelos deben ser alimentados con información confiable para obtener resultados confiables.

**1. Calidad de los datos:** La confiabilidad de los datos debe estar respaldada por un sistema de aseguramiento de calidad

**2. Definición objetiva:** La definición de un indicador debe especificar los datos a usar, el método de estimación de datos perdidos y el método para el cálculo del indicador. Esto asegura que sea consistente al evaluar diferentes períodos de tiempo.

**3. Representatividad de la calidad del aire:** Un indicador debe resumir el estado de la Calidad del Aire en un área específica, sobre todo aquellas con problemas para cumplir con las normas de salud, considerando las fuentes de emisión y densidad de población. Se consideran 3 características que representan el potencial para varios efectos en salud: las concentraciones pico o “hot spot” (concentraciones que rebasan la norma de calidad en presencia, duración y nivel de concentración), la población expuesta y el área expuesta.

**4. Exactitud:** La confiabilidad de un indicador determina que se use para medir un progreso en la Calidad del Aire a consecuencia de la reducción de emisiones. Esta confiabilidad se debe en parte a como responde a las variaciones meteorológicas, ya que algunos indicadores son más sensibles que otros a estas variaciones, por lo que en ocasiones un indicador muestra degradación y otro mejora.

Los Indicadores permiten tener un diagnóstico de la calidad del ambiente, la cantidad y el estado del recurso. Su actualización permite evaluar los avances en el mediano y largo plazo, por lo que deben basarse en la comparación, uniformidad y mejoramiento de los indicadores existentes. Ello permite realizar publicaciones periódicas con indicadores ambientales que facilitan la retroalimentación de los sectores relacionados y fomentar así el trabajo coordinado de la administración pública con grupos no gubernamentales, instituciones académicas y el sector privado, identificando la carencia de información en algunos temas. (CARB, 1993)

Usualmente la interpretación cualitativa de la tendencia de un contaminante, con calificativos como “ligera declinación” o “decremento”, asume una relación lineal entre el tiempo y los valores del indicador, es decir, relaciones de causa y efecto inexistentes, al no considerar la incertidumbre debida a otras variables, como pueden ser las meteorológicas. (CARB, 1993)

Se requiere la caracterización de la incertidumbre asociada a este tipo de variables y contar con elementos para interpretar de manera cuantitativa el “progreso” de la calidad del aire en función de la reducción de emisiones. Esto contempla evaluar la “Variabilidad Natural” del fenómeno en estudio, es decir, la variabilidad que causan factores independientes al “progreso” del contaminante (CARB, 1993)

Algunos de los indicadores más usados para la calidad del aire del ozono es la concentración máxima alcanzada en una hora (p<sub>hm</sub>) observada durante un año, el número de días por año durante los cuales se rebasa la norma, y la media anual diaria de la concentración máxima. Estos y otros indicadores son los más usados para la información al público y los análisis de tendencia.

La primera y segunda concentración máxima del año. Estos indicadores se obtienen con la primera y la segunda concentración máxima anual registrada. Conceptualmente son simples y de fácil interpretación, ambos caracterizan la presencia de concentraciones pico o “hot spot”, lo que asume que su presencia se dará en sitios donde se esperan concentraciones altas. El CARB los recomienda para el ozono, el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Es importante para determinar la violación a la norma de ozono que menciona que no debe rebasarse una vez al año. Al encontrar un registro del 2º máximo mayor al límite de la norma, por ejemplo para ozono de 0.110 ppm, esto significa que no se cumplió con la norma. Por su naturaleza extrema no se recomienda usar métodos para estimar datos faltantes.

Violaciones. Este indicador se obtiene como una frecuencia de horas o días en que una concentración establecida es rebasada, la cual es usualmente una norma de protección a la salud. Por su forma permite caracterizar las concentraciones pico o “hot spot”, siendo más estable que los indicadores basados en concentraciones máximas y permite observar cuando un área está cercana a lograr los límites permisibles de contaminación, que es cuando los niveles alcanzados estén por debajo de la norma.

Existen indicadores de calidad del aire de ozono más sensibles para analizar la tendencia y uno que se recomienda específicamente para ozono es el “Top 30” que es la media de las 30 concentraciones máximas de un año. Conceptualmente es simple y de fácil interpretación, caracteriza la presencia de concentraciones pico o “hot spot”, por lo que sus valores máximos se esperan en sitios donde se registran concentraciones altas. En el análisis de su tendencia se puede encontrar una asociación estrecha con cambios de las emisiones, su forma permite atenuar la influencia de las variaciones meteorológicas anuales.

## V. SISTEMAS DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

### 5.1 RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO (RAMA) GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL

Los primeros estudios tendientes a evaluar la calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Z.M.C.M.), fueron realizados por la Secretaría de Salubridad y Asistencia a finales de los años 50's, a través de la Dirección de Higiene Industrial. Sin embargo, fue hasta 1966 cuando estos estudios se cristalizaron con la primera red de monitoreo atmosférico que monitoreaba bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), polvo sedimentable y partículas suspendidas (PST), para 1967 se contaba con 14 estaciones, gracias a un convenio con la Organización Panamericana de Salud. Esta red empleó una metodología no adecuada para evaluar la calidad del aire en la ZMCM. (SEDUE, 1987; CMPCCVM, 1992).

Es a principios de la década de los setenta cuando se operó de manera continúa una estación piloto para la medición en tiempo real de CO y  $\text{SO}_2$ . A partir de 1974 se integra y entra en operación la primera red automática para el monitoreo continuo de la calidad del aire con enlace telemétrico a un centro de operaciones, este sistema estuvo integrado por 20 estaciones que contaban con monitores para la determinación de  $\text{O}_3$ , CO,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y PM10. Este sistema se complementó con estaciones meteorológicas que registraban la velocidad, dirección del viento, temperatura y humedad relativa, el cual operó deficientemente hasta el año de 1980.

Al crearse la Subsecretaría del Ambiente y dentro del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (Proyecto de Mejoramiento Ambiental) se adquirieron 48 estaciones de monitoreo de tipo manual, instalándose 22 de ellas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y las restantes en el interior del País. Estas estaciones contaban con equipos automáticos y manuales entre los que destacan los muestreadores de alto volumen para la determinación de partículas suspendidas totales y burbujeadores de gases para la determinación de los niveles de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$  entre los más importantes. Los métodos para la determinación de química húmeda utilizados, eran los de West y Gaeke. Esta red, (Red Phillips) de fabricación Holandesa, estaba constituida de 20 estaciones fijas y dos móviles. De las primeras, 5 contaban con monitores de partículas,  $\text{SO}_2$ , CO,  $\text{NO}_x$  y  $\text{O}_3$  (presentan problemas de interferencia graves); y de equipo para medir parámetros meteorológicos para el registro de la dirección y velocidad del viento, humedad relativa y la temperatura; en las 15 estaciones restantes únicamente se contaba con monitores de CO y  $\text{SO}_2$ . De estas 20 estaciones solamente se instalaron 16, sin haberse integrado totalmente por problemas técnicos que presentó la instalación y operación de los monitores de  $\text{NO}_x$ . Por otra parte las estaciones móviles estaban equipadas con instrumental meteorológico y monitores de  $\text{SO}_2$  y CO y colectores de polvos. La poca información de esta red, que era obtenida en forma continua, se procesaba en una microcomputadora que generaba reportes, horarios y diarios. Los métodos de determinación utilizados por esta red eran de tipo coulométrico para  $\text{CO}_2$  y el CO, químicoluminiscente para  $\text{O}_3$  y de atenuación beta para los analizadores de partículas menores de 5 micras (CMPCCAVM, 1992).

Debido a la poca efectividad de la red instalada, se procedió al diseño de una nueva red de monitoreo automático, la cual es precursora de la RAMA actual. Esta red fue instalada por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología durante 1984-85. La Red Automática de Monitoreo Atmosférico(RAMA), se diseñó siguiendo los criterios de redes de monitoreo atmosférico establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA).

Como resultado de los estudios de diseño de la RAMA se recomendó la ampliación y complementación de 10 estaciones para la medición de dirección y velocidad del viento, humedad y temperatura, así como la adquisición y operación de dos radares acústicos a fin de conocer en tiempo real el perfil vertical de temperatura en la Ciudad.

Según los criterios de operación y mantenimiento, con el objeto de redimensionar la red, se acordó agrupar las estaciones individuales en 25 estaciones combinadas. La distribución se realizó en dos magnitudes, la macroubicación de las 25 estaciones se generó sobre la base de áreas residenciales, industriales y comerciales, con énfasis en fuentes estacionarias de emisión de contaminantes, de la Red Manual de Monitoreo. La microubicación y la ubicación de las tomas y puertos de muestreo se fundamentaron en criterios establecidos por la EPA y las Naciones Unidas, las estaciones tanto de la Red Manual como Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, se encuentran ubicadas en la mayoría de los casos en instalaciones públicas y oficiales.

La selección de la instrumentación se basó principalmente en la tecnología existente en los Estados Unidos, aunque se probó instrumentación de Japón y Alemania. Pero, los criterios se definieron considerando el cumplimiento de la certificación del principio o método de detección, ya sea como método de referencia o equivalente establecidos por la US-EPA.

La configuración de la red fue la siguiente:

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>NUMERO</b>	<b>CRITERIO APLICADO</b>
Partículas suspendidas totales	15	EPA
Bióxido de azufre	15	PNUMA-OMS-OMN/EPA
Óxidos de nitrógeno	15	ONU/EPA
Ozono	10	ONU/EPA
Monóxido de carbono	15	EPA

La RAMA fue proyectada en tres etapas, integración, ampliación, reforzamiento y consolidación; la integración se inicia en 1984 con 25 estaciones, y es hasta 1991 cuando se amplió y refuerza para tener una mayor cobertura territorial y analítica. Se instalaron adicionalmente 7 estaciones, ubicadas preferentemente en los municipios del Estado de México conurbados con el Distrito Federal. Lo anterior con el objeto de evaluar la interacción y formación de contaminantes secundarios, especialmente el ozono y primarios como los óxidos de nitrógeno,

dióxido de azufre y material particulado en tiempo real. La etapa de consolidación se estableció a partir de 1993, con la incorporación de un sistema de control y aseguramiento en tiempo real de la información generada, y la introducción de nuevas metodologías y tecnologías para la determinación de compuestos volátiles orgánicos y compuestos tóxicos gaseosos.

A mediados de los 90's la RAMA tenía contemplada la ampliación de la red hacia zonas perimetrales a la mancha urbana identificadas como fuentes de área de aporte significativo de contaminantes, tal es el caso del corredor Tula-Vito-Apasco, y de zonas potencialmente receptoras como el Corredor Biológico Ajusco-Chihinautzin, para contar con 37 estaciones automáticas, 19 estaciones de monitoreo manual, 10 estaciones meteorológicas y 2 unidades móviles, sin embargo esto no se realizó (CMPCCAVM, 1994 y 1995).

**Tabla 5.1.** Distribución de las 32 estaciones de monitoreo que conforman la RAMA. (ver figura 5.1)

Zona	Estación	Clave	Parametro	Delegación o Municipio
Noroeste	Azcapotzalco	AZC	O <sub>3</sub> ,CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	Del. Azcapotzalco, D.F.
	Cuitláhuac	CUI	CO	Del. Azcapotzalco, D.F.
	Instituto Mexicano del Petróleo	IMP	CO	Del. Gustavo A. Madero, D.F.
	Tacuba	TAC	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,H <sub>2</sub> S,M	Del. Miguel Hidalgo, D.F.
	Vallejo	VAL	CO, SO <sub>2</sub>	Del. Gustavo A. Madero, D.F.
	Atizapán	ATI	CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> ,NO <sub>x</sub>	Atizapán, Méx.
	ENEP- Acatlán	EAC	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,M	Naucalpan, Méx.
	Tlalnepantla	TLA	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,M,PM10	Tlalnepantla, Méx.
	Tultitlán	TLI	CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> ,NO <sub>x</sub> , PM10	Tultitlán, Méx.
Noreste	Aragón	ARA	CO, SO <sub>2</sub>	Del. Gustavo A. Madero, D.F.
	La Villa	LVI	PM10,SO <sub>2</sub>	Del. Gustavo A. Madero, D.F.
	Chapingo	CHA	O <sub>3</sub> , CO	Texcoco, Méx.
	La Presa	LPR	SO <sub>2</sub>	Tlalnepantla, Méx.
	Laureles	LLA	SO <sub>2</sub>	Ecatepec, Méx.
	Nezahualcóyotl	NET	CO,SO <sub>2</sub> , PM10	Cd. Nezahualcóyotl, Méx.
	San Agustín	SAG	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,M	Ecatepec, Méx.
	Villa de las Flores	VFI	CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> ,NO <sub>x</sub> , PM10	Coacalco, Méx.
	Xalostoc	XAL	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,M,PM10	Ecatepec, Méx.
Centro	Benito Juárez	BJU	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	Del. Benito Juárez, D.F.

Zona	Estación	Clave	Parametro	Delegación o Municipio
	Hangares	HAN	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,M	Del. Venustiano Carranza, D.F.
	Insurgentes	MIN	CO	Del. Cuauhtémoc, D.F.
	Lagunilla	LAG	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	Del. Cuauhtémoc, D.F.
	Merced	MER	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,M,PM10,H <sub>2</sub> S	Del. Venustiano Carranza, D.F.
Suroeste	Cuajimalpa	CUA	O <sub>3</sub>	Del. Cuajimalpa, D.F.
	Pedregal	PED	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,M,PM10	Del. Alvaro Obregón, D.F.
	Plateros	PLA	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,M	Del. Alvaro Obregón, D.F.
	Santa Ursula	SUR	SO <sub>2</sub>	Del. Coyoacán, D.F.
	Tlalpan	TPN	O <sub>3</sub>	Del. Tlalpan, D.F.
Sureste	Cerro de la Estrella	CES	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,M,PM10	Del. Iztapalapa, D.F.
	Taxqueña	TAX	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	Del. Coyoacán, D.F.
	Tláhuac	TAH	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ,PM10	Del. Xochimilco, D.F.
	UAM-Iztapalapa	UIZ	O <sub>3</sub> , CO,SO <sub>2</sub> ,NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	Del. Iztapalapa, D.F.

#### Simbología

O<sub>3</sub> Ozono

CO Monóxido de Carbono

SO<sub>2</sub> Bióxido de Azufre

H<sub>2</sub>S Ácido Sulfhídrico

MET Parámetros Meteorológicos:

Velocidad del viento

Dirección del viento

Temperatura

Humedad relativa

NO<sub>2</sub> Bióxido de Nitrógeno

NO<sub>x</sub> Óxidos de Nitrógeno

PM10 Partículas menores a 10 micrómetros

#### Unidades de Reporte

ppm (partes por millón)

ppm

ppm

ppm

m/s

Grados

Grados centígrados

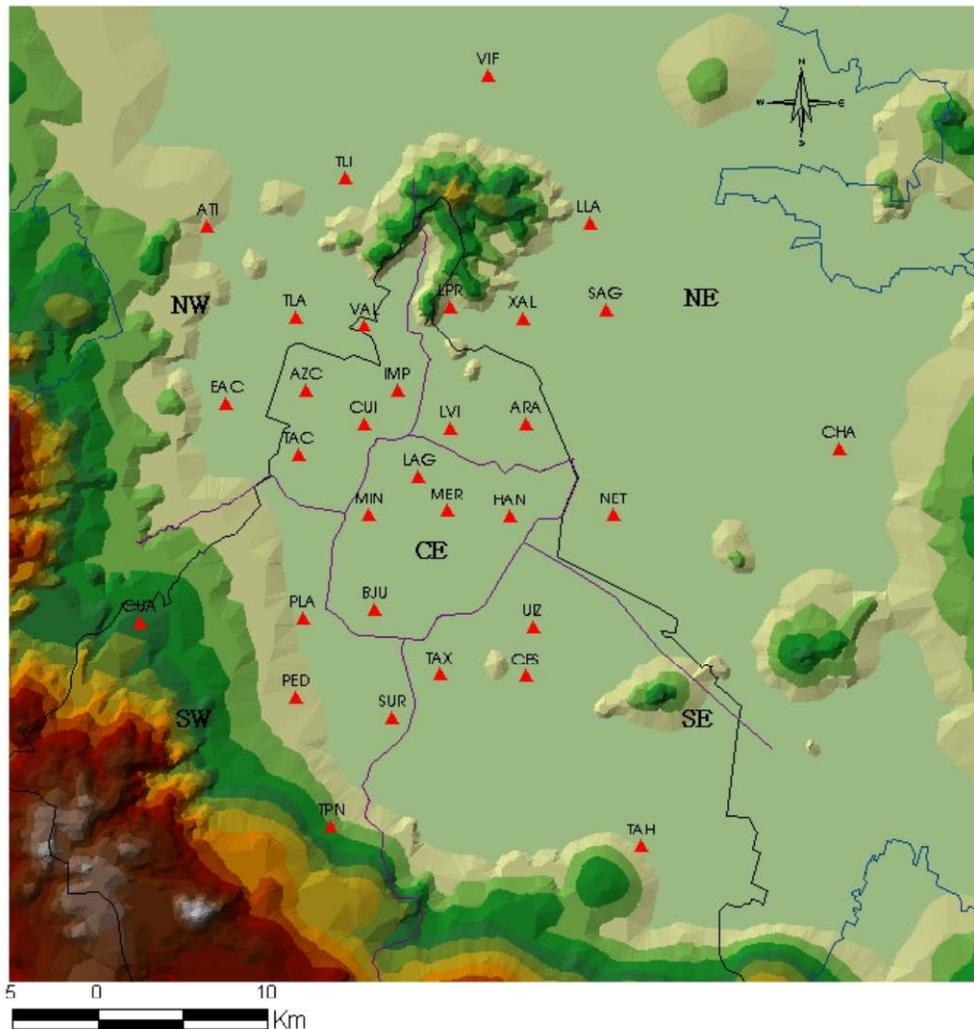
Humedad relativa porcentual

ppm

ppm

µg/m<sup>3</sup>

Figura 5.1. Red Automática de Monitoreo Atmosférico



Los equipos de monitoreo que conforman a cada una de las estaciones de la RAMA incluyendo algunos de los existentes en la estación de monitoreo del Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM), se caracterizan por presentar principios de detección específica para cada contaminante analizado. Como el ozono es el contaminante de interés, se describe brevemente a continuación:

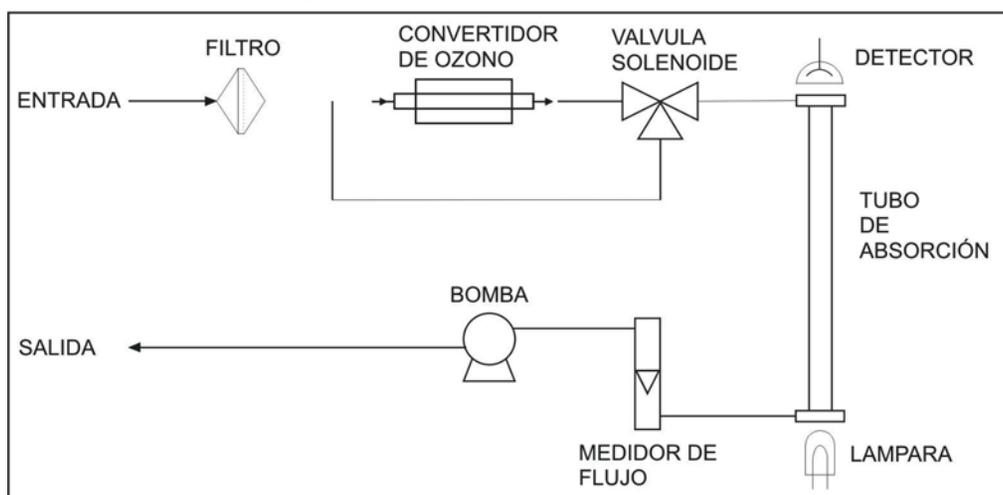
La determinación de ozono de los equipos instalados en la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), se realiza con analizadores automáticos continuos que reportan la información en tiempo real. El principio de operación de éstos se basa en la absorción de la luz ultravioleta en la región de 254 nanómetros debida a la resonancia electrónica de la molécula del ozono. La luz es generada por una lámpara de mercurio colocada en uno de los extremos de una celda de borosilicato (ver Figura 5.2).

Durante la medición, la celda se llena de manera alternada con una muestra de aire y una muestra de aire filtrado a través de un catalizador para la remoción de ozono.

La concentración de ozono se calcula de la relación entre las intensidades del haz de luz a través de ambas celdas (Ley de la absorción de Beer-Lambert). La medición de las intensidades se realiza en intervalos de 8 o 10 segundos, dependiendo del tipo de instrumento.

Algunos compuestos pueden presentar interferencias significativas cuando se encuentran en altas concentraciones en el aire ambiente (algunos compuestos aromáticos volátiles y el vapor de mercurio) (tomado de <http://www.sma.df.gob.mx/imecaweb> fecha de acceso enero del 2003).

**Figura 5.2** Diagrama típico de un analizador de ozono.



El cuadro siguiente muestra los principios de operación y los contaminantes medidos en la red automática.

CONTAMINANTE	PRINCIPIO DE OPERACIÓN
Ozono	Fotometría en el rango de ultravioleta
Óxidos de nitrógeno (NO,NO <sub>2</sub> ,NO <sub>x</sub> )	Quimiluminiscencia
Bióxido de azufre	Fluorescencia pulsante
Monóxido de carbono	Espectroscopia no dispersiva por correlación
Hidrocarburos	Espectrometría Diferencial de Absorción Óptica
Partículas suspendidas fracción respirable	Atenuación de radiación beta.

Como complemento se cuenta con una red de estaciones meteorológicas, cada estación cuenta con sensores meteorológicos de tipo convencional para la dirección, velocidad del viento, sensor de temperatura y humedad, los cuales se interconectan teleméricamente al Sistema Central de Control, enviando la información en tiempo real.

**Figura 5.3.** Estación de monitoreo atmosférico en el Pedregal



Se complementa la red con una unidad de medición de vientos de altura, consistente en una torre meteorológica y dos radares acústicos, con los cuales se obtiene información de las condiciones de mezclado de la atmósfera. Además, se utiliza la información que proporciona el Servicio Meteorológico Nacional.

El cuadro siguiente muestra los principios de operación y los parámetros medidos por la red meteorológica.

PARÁMETRO	PRINCIPIO DE OPERACIÓN
Velocidad del viento	Veleta convencional
Dirección del viento	Anemómetro convencional
Temperatura	Sensor tipo capacitor de película delgada de termistor
Humedad relativa	Sensor tipo capacitor de película delgada de polímero
Temperatura de capa de mezclado	Radar acústico.

Adicionalmente se operan tres radares acústicos del tipo monoestático, con los cuales se determina la altura de la capa de mezclado mediante el envío de impulsos acústicos en sentido vertical hacia la atmósfera y la recepción de su eco (Estación de Radiosondeo del Aeropuerto, SENEAM, y la Estación Palacio Legislativo de la RAMA).

La información generada en cada una de las estaciones es transmitida por un sistema de comunicación a través de módem y líneas telefónicas privadas que envían la información a una computadora central de manera continua y constante al Sistema Central de control, por lo que la comunicación entre el y el resto de la red se mantiene prácticamente ininterrumpida. Opera durante las 24 hrs, todos los días del año, por lo que los datos de la calidad del aire son constantes y en tiempo real. En el Sistema Central de control, se procesa, almacena y se generan diversos reportes como: promedio continuo, variaciones diarias, valores diarios de contaminantes, el IMECA, valores de viento.

La Red Automática de Monitoreo (RAMA), que se crea en el año de 1982, ha tenido cambios, hasta la fecha esta constituida por 32 estaciones de monitoreo, distribuidas en la ZMCM de la siguiente manera: 21 corresponden al

Distrito Federal y 11 al Estado de México. De las 32 estaciones 19 monitorean al ozono. Estas distribuidas estratégicamente en la mancha urbana, cada uno de los sitios de monitoreo, cuenta con el equipamiento necesario para efectuar las mediciones de los contaminantes derivados de la actividad y uso del suelo del entorno de cada estación.

Por la configuración de la red, es posible mantener una vigilancia constante del comportamiento espacial y temporal de los contaminantes gaseosos más comunes y significativos en la cuenca atmosférica urbana, estando en posibilidad de diseñar, establecer, ejecutar y evaluar medidas de control y abatimiento, o en su caso poner en marcha los planes y programas de prevención de episodios en Contingencias Atmosféricas.

En enero de 1992 se forma la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México (CMPCCAVM), integrada por autoridades gubernamentales, especialistas y representantes de todos los sectores involucrados en la problemática, para intercambiar opiniones y posiciones sobre el tema. La Comisión Metropolitana estuvo presidida por el Jefe del Departamento del Distrito Federal durante el periodo de 1992-1994 y a partir de 1994, su presidencia recae en el Gobernador del Estado de México y en 1996 su presidente es el titular de la SEDESOL. Cuenta con un Secretariado Técnico y un Consejo Asesor. La integración y gestión de los programas se realiza por medio del Secretariado Técnico. Los programas se deben presentar al Consejo Asesor para su discusión y aprobación por consenso. El consejo asesor debe ser continuamente informado de los avances de los programas.

El objetivo de la Comisión Metropolitana es proporcionar de manera sistemática y permanente información que permita detectar la presencia y tendencia de contaminantes en la atmósfera y factores meteorológicos que determinen la calidad del aire en la ZMCM y poder evaluar las estrategias de control aplicadas a partir de la información generada por el sistema de evaluación de la calidad del aire. En marzo de 1996 se firma el Convenio General de Concertación Ambiental, con el objeto de llevar a cabo el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000, siendo las dependencias responsables el Departamento del Distrito Federal, el Gobierno del Estado de México, Secretaría de Medio ambiente, Recursos Naturales y Pesca y Secretaría de Salud. A partir de este momento la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, se reestructura conformando lo que actualmente se reconoce como la Comisión Ambiental Metropolitana. Es a partir de este momento que a partir de la asimilación de las causas de fondo de la contaminación atmosférica y el inventario de emisiones que se establecen las metas a desarrollar durante el siguiente lustro. Estas metas pretenden tener la cobertura general de los aspectos sobre los cuales hay posibilidades de incidir para modificar el estado de la calidad del aire, a excepción de la acción de las variables exógenas, tales como lo son las condiciones atmosféricas (DDF, 1996).

En el 2000 se establece el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) sistema de evaluación de la calidad del aire el cual, se integra por 5 subsistemas, siendo estos: la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA), la Red Meteorológica (REDMET), Red de Depósito Atmosférico (REDDA) y la Unidad Móvil.

## 5.2 SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DEL CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM

En el año de 1976 se instala y comienza a operar la estación de monitoreo de contaminantes atmosféricos de la Universidad Nacional, ubicada hasta la fecha en Ciudad Universitaria (Bravo, et al, 1976), y se realiza por vez primera un estudio piloto de campo para obtener de una manera simultanea y continua datos de parámetros meteorológicos, de calidad del aire relativo a contaminantes tales como: el ozono, hidrocarburos totales, óxido nítrico y radiación ultravioleta de dos sitios diferentes de la Ciudad, asimismo se contó con el apoyo de una unidad Móvil especialmente diseñada y equipada para tal efecto.

**Figura 5.4.** Estación de monitoreo del Centro de Ciencias de la Atmósfera.



La medición de ozono se realizó mediante un monitor Beckman con principio de detección de reacción de químicoluminiscencia del etileno y ozono. Dicho analizador opera de acuerdo a las recomendaciones, método de referencia y criterios establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, 1977) y recientemente de acuerdo con Norma Oficial Mexicana NOM-036-ECOL-1993, misma que establece los métodos de medición para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. El analizador de ozono marca Beckman Modelo 906 se encuentra

midiendo la concentración de ozono en Ciudad Universitaria desde el año de 1984 hasta el año de 1995 en el cual se cambio por un analizador Thermo Electron Mod. 43 con un principio de detección de fotometría ultravioleta, el mismo que opera hasta la fecha en forma continua. La información generada es registrada en un graficador analógico de tiempo real. A partir de esta información se determinan los promedios aritméticos horarios de ozono. Dicha información es utilizada posteriormente para determinar las concentraciones máximas horarias y las violaciones a la norma de calidad del aire, por día, mes y año, con el objeto de determinar el análisis de tendencia. Lo anterior con la finalidad de evaluar las tendencias en los niveles de calidad del aire para el contaminante ozono en la zona suroeste de la ZMCM.

**Figura 5.5.** Equipo de monitoreo del Centro de Ciencias de la Atmósfera

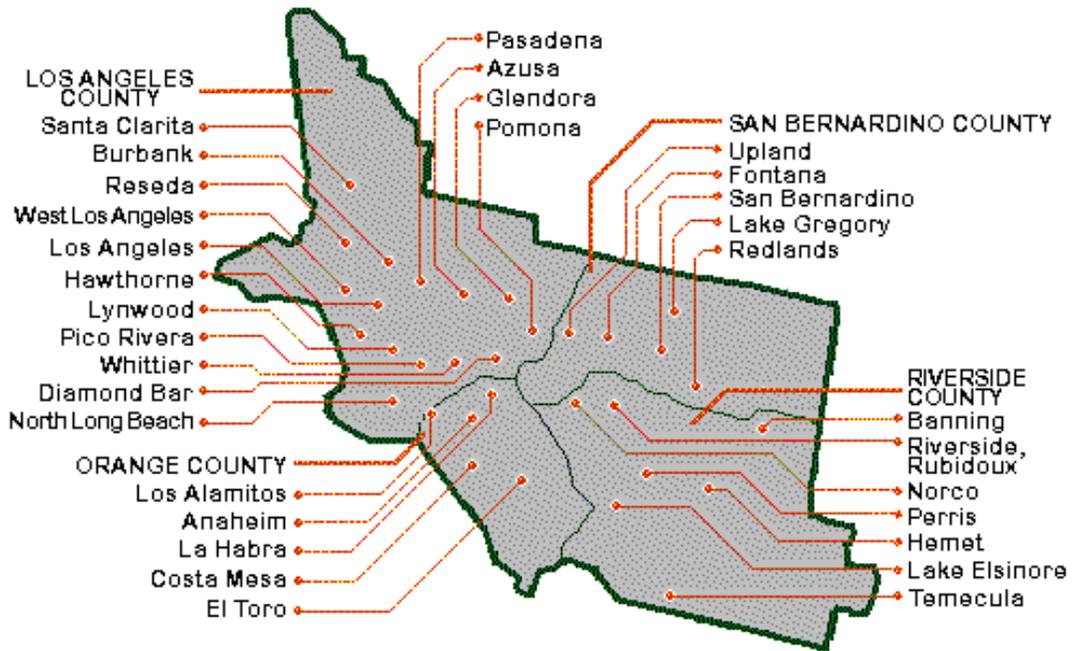


### 5.3 LOS ÁNGELES, CALIFORNIA (SoCAB)

El South Coast Air Quality Management District (AQMD) es el encargado por ley de monitorear la calidad del aire; y esto a través de un programa de planeación, regulación, asistencia, aplicación de las normas, monitoreo, avance tecnológico y educación pública, procurar una calidad del aire adecuada.

La AQMD es la Agencia de Control de la Contaminación del Aire para la región de los cuatro condados que incluyen: Los Ángeles, Orange y parte de los condados de Riverside y San Bernardino. Esta área abarca más de 12,000 millas cuadradas y es hogar de más de 14 millones de personas cerca de la mitad de la población de todo el estado de California. Es la segunda área urbana más poblada de los Estados Unidos.

Figura 5.6. Mapa de localización de la red de monitoreo de la South Coast Air Basin (SoCAB), Los Ángeles Cal.



La AQMD es la responsable de controlar las emisiones de fuentes estacionarias de contaminación del aire. Esto incluye a cualquier planta de energía y refinerías, estaciones de gas. Cerca del 40% de la contaminación del aire procede de fuentes estacionarias tanto negocios como residencias. El otro 60% procede de fuentes móviles carros, camiones y tráiler, también incluye el equipo de construcción, locomotoras, trenes y aviones. El estándar de emisiones de fuentes móviles es establecido por el estado o agencias federales como la "California Air Resources Board" y la agencia de protección del ambiente (EPA), también por las agencias locales como la AQMD.

Figura 5.7. Estación de monitoreo de Riverside (California).



La AQMD conduce inspecciones periódicas para asegurar que se cumplan con los requerimientos. Provee entrenamiento para ayudar a los propietarios de negocios a entender los requerimientos y cumplir con las nuevas reglas. Muchos negocios reconocen su responsabilidad y las cumplen. Pero es necesario que la AQMD aplique acciones para que se cumplan las reglas. La ley del Estado da penas substanciales a los peores contaminadores que van desde 50,000 dólares por día y/o un año de cárcel por cada día de violación. La AQMD monitorea continuamente la calidad del aire en más de 30 locaciones a través de los cuatro condados. Este sistema ayuda y notifica a las escuelas, la prensa y al público cuando la calidad del aire no es adecuada.

El distrito tiene una red de 32 estaciones de monitoreo en la SoCAB (South Coast Air Basin) es la porción no desértica de los condados de Los Ángeles, Riverside, San Bernardino y todo el condado

**Figura 5.8** Equipo de monitoreo de Riverside (California).



**Tabla 5.2.** Estaciones que conforman la Red de Monitoreo de Los Ángeles, California (SoCAB)

	Condado	sitio de monitoreo	Dirección
1	Los Angeles	Azusa	803 N. Loren Ave., Azusa
2		Burbak	228 W. Palm Ave., Burbak
3		Diamond Bar	21865 E. Copley Dr., Diamond Bar
4		Glendora	840 Laurel, Glendora
5		Hawthorne	5234 W. 120th St., Hawthorne
6		Los Angeles	1630 N Main St, Los Angeles

	Condado	sitio de monitoreo	Dirección
7		Lynwood	11220 Long Beach Blvd., Lynwood
8		North Long Beach	3648 N. Long Beach Blvd., Long Beach
9		Pasadena	752 S. Wilson Ave., Pasadena
10		Pico Rivera	3713 San Gabriel River Pkwy, Pico Rivera
11		Pomona	924 N. Garey Ave., Pomona
12		Reseda	18330 Gault St., Reseda
13		Santa Clarita	San Fernando Rd, Santa Clarita (Newhall)
14		West Los Angeles	Va Hospital, West Los Angeles
15		Whittier	14427 Leffingwell Rd., Whittier
16		<b>Orange</b>	Anaheim
17	Costa Mesa		2850 Mesa Verde Dr East, Costa Mesa
18	El Toro		23022 El Toro Rd., El Toro
19	La Habra		621 W. Lambert, La Habra
20	Los Alamitos		5660 Orangewood Ave., Los Alamitos
21	<b>Riverside</b>	Banning	135 N. Allesandro, Banning
22		Hemet	880 State St., Hemet
23		Lake Elsinore	506 W Flint St., Lake Elsinore
24		Norco	Norconian-US Nfac, Norco
25		Perris	237 ½ N. " D" St., Perris
26		Riverside-Rubidoux	5888 Mission Blvd., Rubidoux
27		Temecula	30250 Rancho California Rd., Temecula
28	<b>San Bernardino</b>	Fontana	14360 Arrow Blvd., Fontana
29		Crestline-Lake Gregory	Lake Gregory-Lake Dr, Crestline
30		Redlands	500 N. Dearborn, Redlands, Ca. 92373
31		San Bernardino	24302 4th St., San Bernardino, Ca
32		Upland	Arb, 1350 San Bernardino Rd., Upland

## VI. METODOLOGÍA

### 6.1 DATOS

La evaluación de tendencia se realizó seleccionando siete estaciones de monitoreo que representan a las diferentes regiones de la ZMCM y esto permitió dar un panorama general del comportamiento del ozono a través del tiempo, identificando las zonas con mayor riesgo para los habitantes de la ZMCM. Las estaciones seleccionadas, además cuentan con un buen desempeño histórico de registro de datos: Tlalnepantla (TLA), Xalostoc (XAL), Merced (MER), Pedregal (PED), Cerro de la Estrella (CES), Plateros (PLA) y la estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) UNAM. Para Los Ángeles se seleccionaron 6 estaciones de SoCAB que representan a cada uno de los condados que forman la South Coast: San Bernardino (SB), Rubidoux (RU), Redland (RE), La Habra (HA), Glendora (GL) y Lake Gregory (LG).

El periodo de años utilizados para cada grupo es el siguiente:

- RAMA: Se utilizaron los datos de 1986 a 2000, sin embargo los datos confiables son a partir de 1989, que es el año en el que se auditó la calibración de los equipos de monitoreo por la Environmental Pollution Agency de Estados Unidos (EPA).
- SoCAB: A partir de 1986 a 2000.
- CCA: Se utilizaron los datos de 1984 a 2000.

### 6.2 INDICADORES

En México, la SSA expidió en el año 2000 el proyecto para modificar la NOM-020-SSA1-1993, en la que se establecen 2 límites permisibles; el primero definido como el promedio horario de la concentración de ozono, el cual debe ser menor o igual a 0.110 ppm y no debe ser rebasado más de una vez al año; y el segundo como el promedio de ocho horas de la concentración de ozono, el cual debe ser menor o igual a 0.080 ppm, tomado como quinto máximo en un periodo de un año y no debe ser rebasado más de una vez al año.

a) Para determinar la Tendencia del Ozono se utilizaron los indicadores siguientes:

- TOP 30. Este indicador es la media de las 30 concentraciones máximas de un año.
- 2° máximo. Es el segundo valor más alto del año registrado en los datos horarios.
- 4° máximo. Es el valor del 4° máximo de los datos horarios en un período de tres años.

b) Para determinar la violación a las normas se utilizaron los siguientes indicadores:

**Caso 1:** Valor límite de 0.11 ppm para la ZMCM, 0.09 y 0.12 ppm para la SoCAB para el promedio horario.

- Número de horas que se rebasa el valor límite
- El número de días en los que se rebasa el valor límite.
- Concentraciones máximas diarias para los días laborables (lunes a viernes) y fines de semana (sábado y domingo).
- Concentraciones máximas diarias para cada día de la semana.
- Análisis del 2° máximo como el segundo valor más alto del año registrado en los datos horarios.
- Análisis del 4° máximo como el cuarto valor más alto de los datos horarios en un período de tres años.

Caso 2: Valor límite de 0.080 ppm para el promedio móvil de 8 horas tanto para la ZMCM como la SoCAB.

- El número de días en los que se rebasa el valor límite.

c) Para determinar la efectividad de las estrategias de control sobre las concentraciones de ozono se utiliza:

- Concentraciones horarias por año de las 6 estaciones de la RAMA y las 6 estaciones de la SoCAB.

## 6.3 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

La primera prueba estadística que se aplica es la de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) para determinar el tipo de pruebas estadísticas a utilizar. Esta prueba cuantifica la discrepancia entre la distribución de los datos y la distribución ideal de Gauss, si existe discrepancia se utilizan las pruebas no paramétricas.

### 6.3.1 Tendencia de la concentración de Ozono

Las pruebas estadísticas no paramétricas utilizadas para determinar la tendencia para el Ozono en las ZMCM y SoCAB son las siguientes:

**El método de Mann-Kendall** es una prueba no paramétrica que evalúa la existencia de tendencia a través del tiempo de cualquier contaminante (basado en el método de Gilbert, 1987). La prueba se puede aplicar a datos que no siguen una distribución normal y soporta múltiples observaciones por periodo de tiempo. No tiene límites en el tamaño de las bases de datos. Mide la tendencia por estación de monitoreo, no por grupos de estaciones, ya que para determinar la tendencia en una región, se debe aplicar la prueba de homogeneidad de tendencias. Y puede aplicarse si se tienen datos faltantes.

Estadístico Mann-Kendall:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(Y_j - Y_i)$$

**El método de Wilcoxon** La distribución libre de Wilcoxon para dos muestras se utilizo para comparar la concentración del promedio horario máximo entre años para cada sitio y poder identificar si había tendencia de

una año a otro. La distribución libre implica que se asume que los datos no tienen una determinada distribución. **La prueba de Wilcoxon** contrasta con la bien conocida prueba t que compara la media de dos poblaciones que esta asume que los datos tienen una distribución normal.

Se adoptó el nivel de significancia de 0.05 para determinar si un par representaba una diferencia verdadera. Esto es que si la prueba reportaba un P valor menor a 0.05 entonces se declaraba que la diferencia era inconsistente con la hipótesis nula lo que significa que ambas poblaciones son iguales. Se adopto este procedimiento garantizando de que si la hipótesis nula de un par dado era realmente verdadera, entonces la probabilidad de rechazar erróneamente podría ser menor al 0.05 (Rueda, 1988)

### **6.3.2 Análisis de las violaciones a la norma de calidad del aire de Ozono**

Se aplico el método de Mann-Kendall sobre el número de violaciones a la norma para determinar si existe tendencia en la disminución de los días en los que se sobrepasa el valor límite de la norma.

Para comparar las violaciones a la norma tanto para el valor límite de 0.11 ppm como el de exposición (promedio móvil de 8 horas) de 0.080 se utilizó la correlación de Spearman, para determinar la asociación entre estos dos límites en los días donde se rebasa ambos límites. **El coeficiente de correlación de Spearman** es el método no paramétrico para detectar asociación lineal entre dos variables y al mismo tiempo llevar a cabo pruebas de hipótesis, con la única restricción de que la escala de medida fuese al menos ordinal, ya que en lugar de usar los valores se usan rangos de las variables (Rueda, 1988).

El estadístico del coeficiente de Spearman se denota de la siguiente manera:

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n [R(X_i) - R(Y_i)]^2}{n(n^2 - 1)}$$

Las hipótesis que se establecen son:

Ho: Las  $X_i$  y  $Y_i$  son independientes.

Há: Existe tendencia en aparear a valores de  $X$  con valores de  $Y$ .

Para comparar los días de laborables (lunes-viernes) con respecto a los fines de semana (sábado-domingo) y el comportamiento por día de la semana, (lunes a domingo) se aplicaron las pruebas de Mann-Whitney y Kruskal-Wallis.

**La prueba de Mann-Whitney.** Es para situaciones con muestras independientes, no necesariamente del mismo tamaño, lo que se trata de averiguar es, si las dos muestras provienen de la misma población. Las muestras se

ordenan de menor a mayor (sin perder la identificación de cada elemento) para la hipótesis  $H_0: E(X) = E(Y)$  contra  $H_a: E(X) \neq E(Y)$ , sea sostenible, debe esperarse que el número de veces que una  $Y_j$  precede a una  $X_i$  en el arreglo combinado de ambas muestras, no sea ni muy grande ni muy chico, se tendrá que la distribución de  $Y$  es la misma que la de  $X$  (Rueda 1988).

La estadística de prueba es:

$$T = \sum_{i=1}^n R(X_i) - \frac{n(n+1)}{2}$$

Esta prueba se utilizó la comparar días laborables con fines de semana.

**Prueba de Kruskal-Wallis.** Es una extensión de la prueba de Mann-Whitney de 2 a  $k$  datos independientes. Al igual que la prueba de Mann-Whitney el número de datos de la muestra puede ser diferente. Los datos se ordenan de menor a mayor y se les asignan rangos. (Rueda 1988, Gilbert 1987)

Las hipótesis a probar son:

$H_0$ : Las poblaciones de las que proceden las  $k$  muestras tienen la misma media.

$H_a$ : Al menos una población tiene media diferente a otra población.

La estadística de prueba es:

$$T = \frac{12}{N(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1), \text{ con } N = \sum_{i=1}^k n_i$$

Con esta prueba se comparó los días laborables contra fines de semana por mes.

Así como la comparación por día de la semana.

**Prueba de Friedman.** Es la extensión de la prueba de los signos para dos poblaciones aquí se contemplan  $k$  poblaciones. Puede haber datos perdidos y la distribución no necesita ser normal o simétrica. Las hipótesis a probar son:

$H_0$ : No hay tendencia de ninguna población a tener mayor o menor valores que las otras  $k$  poblaciones.

$H_a$ : Al menos una población tiende a tener mayor o menor valores que una o más de las otras  $k$  poblaciones.

La estadística de prueba es:

$$Fr = \left[ \frac{12}{nk(k+1)} \sum_{j=1}^k R_j^2 \right] - 3n(k+1)$$

n=bloques, k=tratamientos (Rueda 1988, Gilbert 1987)

Esta prueba se utilizó para comparar los días de la semana por mes.

### 6.3.3 Análisis de las estrategias de control

Se utilizó, el método llamado “efecto pistón” desarrollado por Lefohn, et al (1997) se le llama así por el efecto que se observa en las concentraciones de los contaminantes a través del tiempo. Se calcula la frecuencia de las concentraciones horarias de ozono por años, posteriormente se obtiene la mediana de la diferencia relativa en porcentaje de las frecuencias de concentración por cada par de años ( $a_1, a_2$ ) de todo el periodo a observar y se estima el cambio para cada intervalo ( $bin_x$ ), se obtiene de la siguiente manera:

a = año, bin = intervalo x = valor del rango que se esta evaluando

$$\text{Diferencia relativa} = \{[(a_2 bin_x - a_1 bin_x) / (a_1 bin_x)] / (a_2 - a_1)\} * 100$$

para el  $bin_x$  y el  $a_2 > a_1$

Este indicador muestra los cambios de la distribución de las concentraciones horarias a través del tiempo. Permitiendo evaluar las estrategias de control aplicadas para reducir los niveles de contaminación por ozono.

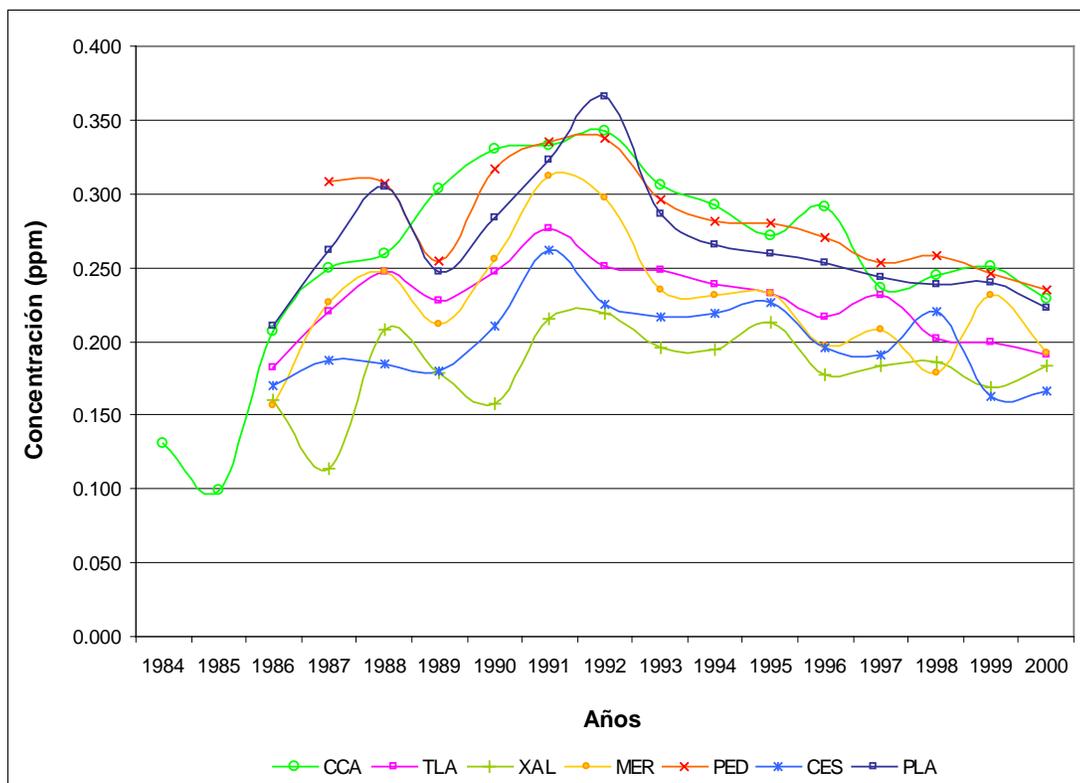
## VII. RESULTADOS

### 7.1 TENDENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO

#### 7.1.1 Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)

En la Figura 7.1 se observa el comportamiento de la tendencia de  $O_3$  mediante el indicador del TOP 30, mostrando en todas las estaciones un incremento de  $O_3$  a partir de 1984, llegando en la mayoría de las estaciones al valor máximo entre 1991 y 1992, para posteriormente mostrar un decremento hasta el 2000, pero la concentración no es menor a lo encontrado en 1984.

Figura.7.1. Promedio de los 30 valores máximos anuales de las 7 estaciones de la ZMCM



A fin de evaluar estadísticamente la tendencia del Ozono en las ZMCM se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para el indicador TOP 30. En la Tabla 7.1 se muestran las estaciones y el periodo de tiempo en el que se presentó tendencia significativa.

En el periodo completo de 1986 a 2000, la única estación que presentó tendencia fue Pedregal (PED), sin embargo esta información se toma con reserva, sobre todo la de los primeros años registrados, ya que el comportamiento de esta estación no coincide con las 6 restantes, incluyendo la estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera que esta a muy corta distancia de esta estación.

En el segundo periodo de 1986 a 1991 el indicador alcanza el máximo valor y presenta un comportamiento creciente, al evaluar la tendencia solo en 3 estaciones se presentó tendencia significativa con un porcentaje en la tasa de cambio de 35 a 152%, este último corresponde a la estación del CCA, que tiene un periodo de muestreo mayor de 1984 a 1991, esto significa un incremento del 152% de las concentraciones de ozono registradas en 1984 contra las registradas en 1991. Para las otras dos estaciones este incremento no es tan alto teniendo en promedio un 45%. Este comportamiento indica que durante estos años se presentó un cambio significativo en el ambiente que provocó el incremento en las concentraciones. En las otras estaciones no se presentó una tendencia significativa, sin embargo la tasa de cambio también tiene un incremento.

El último periodo abarca del valor máximo encontrado en 1991 al final del periodo 2000. En todas las estaciones se encontró una tendencia decreciente significativa, lo cual, indica cambios en el ambiente que modifica el comportamiento de las concentraciones de ozono, encontrando en promedio de 28% de decremento, aunque el mayor porcentaje de decremento se presenta en la zona centro con la estación MER.

Tabla 7.1 Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para el TOP 30 (ZMCM).

Periodo	Parámetros de la prueba de Mann-Kendall	XAL	MER	CES	PED	TLA	PLA	CCA
1986 a 2000	Presencia de Tendencia	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO**
	Pendiente	-	-	-	-0.0071	-	-	-
	Porcentaje de la tasa de cambio	-	-	-	-30.21%	-	-	-
1986 a 1991	Presencia de Tendencia	NO	NO	NO	NO	SI	SI*	SI***
	Pendiente	-	-	-	-	0.0163	0.0224*	0.0281
	Porcentaje de la tasa de cambio	-	-	-	-	34.76%	65.47%*	152.5%
1991 a 2000	Presencia de Tendencia	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI****
	Pendiente	-0.0044	-0.0124	-0.0085	-0.0108	-0.0082	-0.0077*	-0.0142
	Porcentaje de la tasa de cambio	-18.89%	-38.96%	-29.80%	-30.10%	-27.40%	-21.54%*	-30.26%

\* Para esta estación los cortes se hicieron de 1986 a 1992 y de 1992 a 2000, ya que en este año presentó el valor más alto de concentración.

\*\* Periodo de 1984 a 1999

\*\*\* Periodo de 1984 a 1992

\*\*\*\* Periodo 1992 a 1999

Es importante hacer notar que la tasa de cambio de dos estaciones (XAL y CES) durante todo el periodo 1986 a 2000 es positiva, esto significa que la tendencia en estas dos estaciones sería creciente, esto es, que en vez de disminuir la contaminación en estas dos zonas estaría incrementándose, sin embargo la tendencia no fue significativa.

En el caso del indicador 2º máximo (Figura 7.2) no se observa un comportamiento tan claro como en el TOP-30, sin embargo los cortes para el método de Mann-Kendall son los mismos que para el TOP-30, se observa una

tendencia creciente de 1986 a 1991 y otra decreciente de 1991 a 2000; cabe hacer notar que la estación TLA presenta el valor máximo en 1988.

Figura.7.2. Valor del 2º máximo anual del promedio horario 7 estaciones de la ZMCM

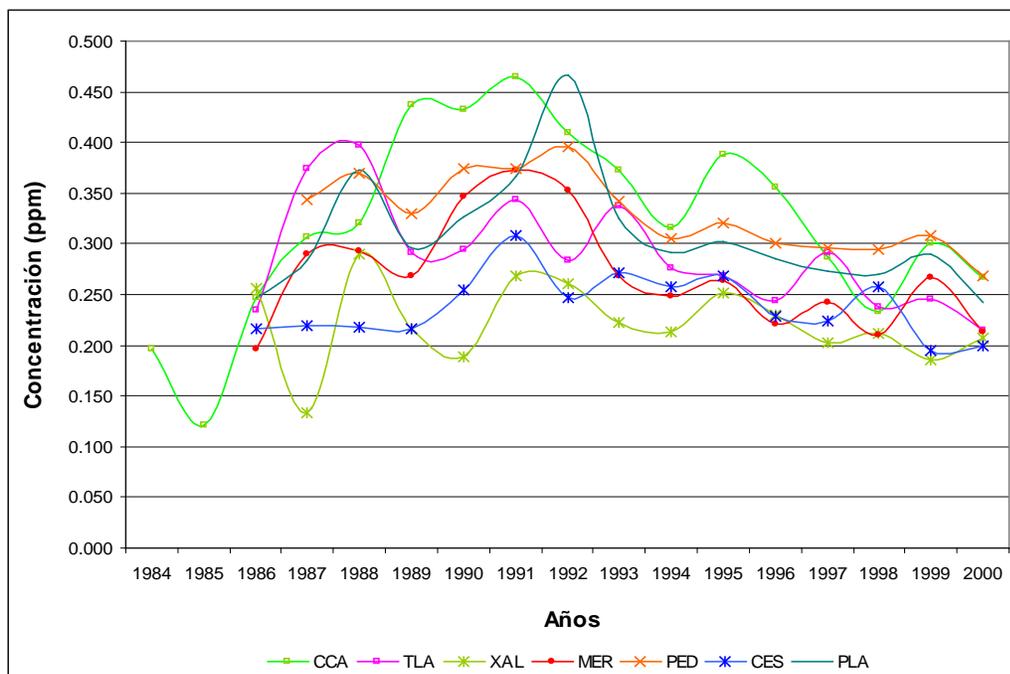


Tabla 7.2 Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para el 2º max (ZMCM).

Periodo	Parámetros de la prueba de Mann-Kendall	XAL	MER	CES	PED	TLA	PLA	CCA
1986 a 2000	Presencia de Tendencia	-	-	-	SI	SI	-	**
	Pendiente	-	-	-	-0.0071	-0.0080	-	-
	Porcentaje de la tasa de cambio	-	-	-	-26.70%	-22.50%	-	-
1986 a 1991	Presencia de Tendencia	-	SI	-	-	-	SI*	SI***
	Pendiente	-	0.0262	-	-	-	0.0300	0.0452
	Porcentaje de la tasa de cambio	-	31.81%	-	-	-	76.27%*	202.79%
1991 a 2000	Presencia de Tendencia	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI****
	Pendiente	-0.0078	-0.0099	-0.0103	-0.0110	-0.0107	-0.0117*	-0.0218
	Porcentaje de la tasa de cambio	-22.82%	-29.73%	-31.03%	-27.77%	-29.95%	-27.74%*	-45.20%

\* Para esta estación los cortes se hicieron de 1986 a 1992 y de 1992 a 2000, ya que en este año presento el valor más alto de concentración.

\*\* Periodo de 1984 a 2000

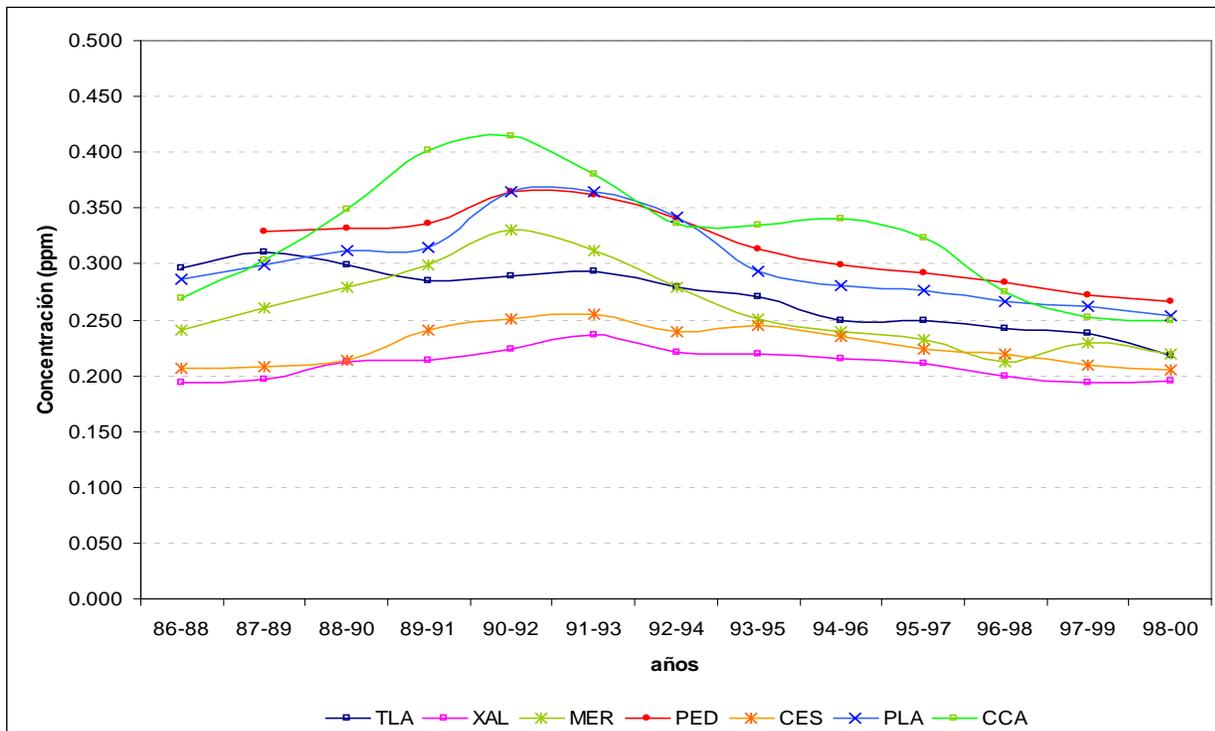
\*\*\* Periodo de 1984 a 1991

\*\*\*\* Periodo 1992 a 2000

Al aplicar la prueba de Mann-Kendall se observa que al considerar todo el periodo, solo dos estaciones muestran tendencia decreciente (negativa) TLA y PED, esta última al igual que en el análisis del TOP-30 debe tomarse con reserva, ya que los años de 1986 a 1989 los datos no son muy confiables (por el número de datos y el comportamiento tan irregular de los datos registrados). En el primer corte(1986-1991), tres estaciones presentan

tendencia creciente significativa MER , PLA y CCA con un alto porcentaje para esta última, teniendo un incremento en las concentraciones de 202%. Al igual que el TOP-30 al pasar la cresta del valor más alto se presenta una tendencia decreciente en todas las estaciones con un 30% en promedio, al compararlo con el TOP-30, hay un mayor decremento con el indicador del 2º máximo.

Figura.7.3. Valor del 4º máximo trianual del promedio horario de 7 estaciones de la ZMCM



El 4º máximo trianual, presenta un comportamiento suavizado (Figura 7.3), donde 5 de las 7 estaciones tienen tendencia decreciente significativa durante los 14 años de estudio con un promedio de la tasa de decremento del 29 % (Tabla 7.3), es el único indicador que permite obtener una tendencia a lo largo del periodo, ya que la cresta de 1991 no es tan marcada y no influye en el cálculo del estadístico. Sin embargo, se obtuvieron las tendencias de los dos cortes, encontrando que 5 de las 7 estaciones tienen tendencia significativa creciente con una tasa promedio de 49% en el periodo trianual de 1986-1988 a 1990-1992, este valor es muy alto por los valores presentados en la estación del CCA, si no se considera esta estación, el promedio es de 25%. En el periodo 1990-1992 a 1998-2000, todas las estaciones presentaron tendencia con una tasa decreciente promedio de 29%.

Los resultados muestran una tendencia ha disminuir las concentraciones de ozono en el valor límite de 0.110 ppm, sin embargo debemos considerar lo que nos marca la norma y a pesar de este comportamiento

decreciente de las concentraciones el 4° máximo trianual están por arriba de 0.200 ppm que es el doble de lo que indica la norma mexicana de calidad del aire para ozono en México.

Tabla 7.3 Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para el 4° max (ZMCM).

Periodo	Parámetros de la prueba de Mann-Kendall	XAL	MER	CES	PED	TLA	PLA	CCA
1986 a 2000	Presencia de Tendencia	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
	Pendiente	-	-0.0055	-	-0.0086	-0.0077	-0.0061	-0.0106
	Porcentaje de la tasa de cambio	-	-26.98%	-	-31.43%	-22.31%	-25.40%	-40.27%
1986 a 1991	Presencia de Tendencia	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
	Pendiente	0.0082	0.0203	0.0113	-	-	0.0126	0.0382
	Porcentaje de la tasa de cambio	13.97%	33.59%	27.22%	-	-	26.19%	148.64%
1991 a 2000	Presencia de Tendencia	SI						
	Pendiente	-0.0055	-0.0123	-0.0072	-0.0136	-0.0099	-0.0130	-0.0154
	Porcentaje de la tasa de cambio	-16.90%	-36.35%	-22.98%	-33.81%	-28.59%	-33.34%	-34.15%

### Prueba de Wilcoxon para los máximos diarios

Para comparar si existe una tendencia de año con año de las estaciones se aplicó la prueba de Wilcoxon para los datos diarios de cada estación en el periodo de 1986 a 2000 en las estaciones de la RAMA y de 1984 a 2000 para la estación del CCA.

En la Tabla 7.4 se observan los valores de la media de cada año y el valor de la prueba: **(+)** cuando es significativo el incremento de las concentración promedio, **(-)** cuando es significativo con un decremento en la concentración promedio y **(0)** si no se presenta ningún cambio entre las concentraciones de esos años.

Tabla 7.4. Media de los promedios horarios máximos para ozono en la ZMCM de las 7 estaciones evaluadas con el valor de la prueba de Wilcoxon sobre la comparación entre medias por año.

AÑO	CCA Media	Wil	PED media	Wil	CES Media	Wil	MER media	Wil	PLA media	Wil	TLA media	Wil	XAL media	Wil
1984	0.071													
1985	0.065	-												
1986	0.082	0			0.089		0.064		0.115		0.066		0.082	
1987	0.134	+	0.140		0.098	0	0.116	+	0.147	+	0.088	+	0.063	-
1988	0.154	+	0.171	+	0.096	0	0.125	0	0.158	+	0.113	+	0.092	+
1989	0.179	+	0.135	-	0.103	+	0.101	-	0.151	0	0.112	0	0.096	0
1990	0.194	+	0.179	+	0.122	+	0.142	+	0.162	+	0.118	+	0.082	-
1991	0.200	0	0.193	0	0.153	+	0.168	+	0.195	+	0.156	+	0.125	+
1992	0.193	0	0.160	-	0.135	-	0.147	-	0.165	-	0.133	-	0.119	0
1993	0.178	-	0.159	0	0.125	-	0.140	0	0.153	0	0.120	-	0.112	-
1994	0.192	+	0.160	0	0.125	0	0.149	+	0.163	+	0.125	0	0.113	0
1995	0.212	+	0.161	0	0.125	0	0.136	-	0.130	-	0.115	-	0.109	0
1996	0.162	-	0.157	0	0.115	-	0.115	-	0.147	+	0.113	0	0.089	-
1997	0.139	-	0.147	-	0.107	-	0.113	0	0.121	-	0.108	0	0.094	+
1998	0.165	+	0.144	0	0.118	+	0.094	-	0.131	+	0.103	0	0.096	0
1999	0.148	-	0.146	0	0.096	-	0.120	-	0.138	0	0.093	-	0.084	-
2000	0.133	-	0.140	0	0.100	0	0.118	0	0.131	0	0.098	0	0.093	+

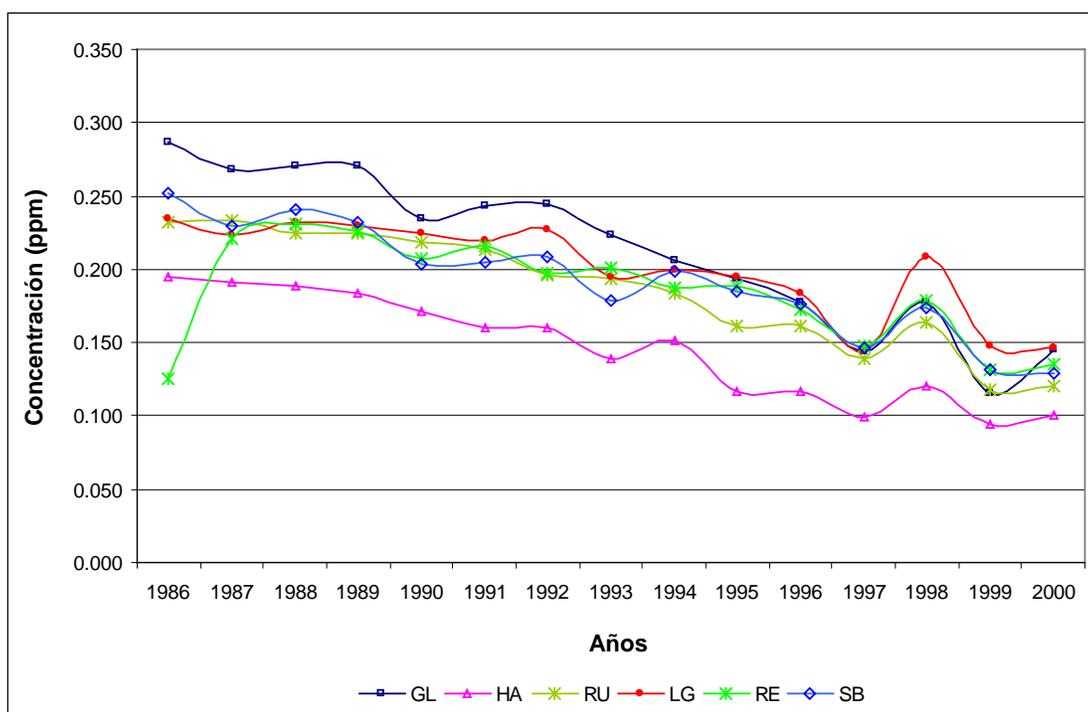
En la tabla se observa que en todas las estaciones, en los primeros años del periodo presentan un comportamiento creciente significativo entre las concentraciones de un año a otro, esto confirma lo obtenido con la prueba de Mann-Kendall para la tendencia. A partir de 1992 se comienza a ver un decremento paulatino en todas las estaciones y con una tendencia de estabilización en los últimos años.

### 7.2.1 Los Angeles, South Coast Air Basin (SoCAB)

#### Prueba de Mann Kendall para el TOP 30

Con esta prueba identificamos si existe una tendencia en los datos observados, sin embargo como se muestra en la Figura 7.4 todas las estaciones presentaron un incremento en 1998.

Figura.7.4. Promedio de los 30 valores máximos anuales de las 6 estaciones de la SoCAB (Los Angeles, CAL.)



Las estaciones muestran un comportamiento decreciente durante todo el periodo (Tabla 7.5), por lo que al aplicar la prueba de Mann-Kendall, se observa una tendencia decreciente significativa en todas las estaciones con un porcentaje de la tasa de cambio en promedio de 45.5%, esto significa que se han disminuido las concentraciones de ozono en un 50% durante 15 años.

Tabla 7.5 Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall (SoCAB)

Periodo	Parámetros de la prueba de Mann-Kendall	GL	HA	RU	LG	RE	SB
1986 a 2000	Presencia de Tendencia	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Pendiente	-0.0112	-0.0078	-0.0087	-0.0061	-0.0073	-0.0079
	Porcentaje de la tasa de cambio	-51.84%	-52.88%	-47.67%	-33.98%	-42.72%	-43.69%

El comportamiento que se observa con el 2° máximo de las estaciones de Los Angeles (Figura 7.5) es prácticamente igual a la que presento el TOP-30. Al aplicar la prueba de Mann-Kendall a este indicador presenta una tendencia decreciente significativa con un promedio del porcentaje de la tasa de cambio de 45% que es similar al del indicador TOP-30 (Tabla 7.6) , es importante hacer notar que los valores del 2° máximo se han acercado al valor de la norma nacional de una hora para Estados Unidos (0.12 ppm)

Figura.7.5. Valor del 2° máximo anual del promedio horario 6 estaciones de la SoCAB (Los Angeles, CAL.)

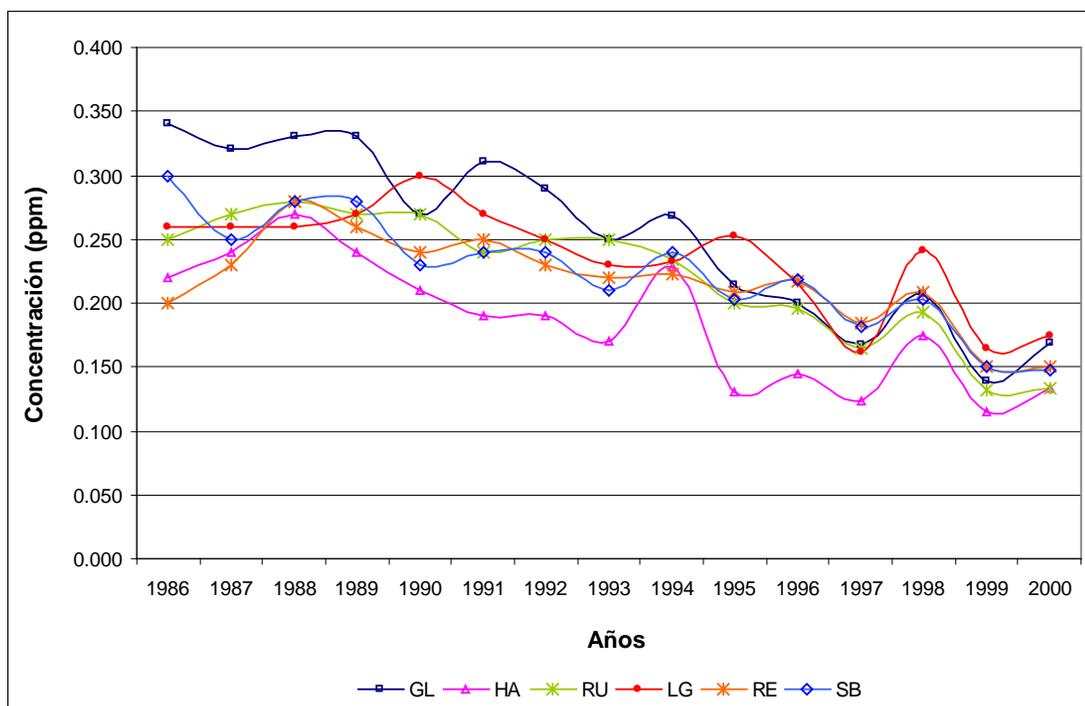


Tabla 7.6 Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para el 2° máximo (SoCAB)

Periodo	Parámetros de la prueba de Mann-Kendall	GL	HA	RU	LG	RE	SB
1986 a 2000	Presencia de Tendencia	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Pendiente	-0.0145	-0.0099	-0.0100	-0.0079	-0.0067	-0.0093
	Porcentaje de la tasa de cambio	-54.93%	-53.40%	-45.16%	-36.28%	-35.00%	-43.93%

Al analizar los datos del 4° máximo trianual se observa el mismo comportamiento de la tendencia decreciente, obteniendo de la prueba de Mann-Kendall que su decremento es significativo, a pesar que se observan mas suaves las curvas (Figura 7.6). La estación Lake Gregory tiene una tendencia de 0 esto significa que hay una tendencia constante, que se puede interpretar como estabilización en las concentraciones del 4° máximo (Tabla 7.7) . Otra observación es que las concentraciones son más altas que las del 2° máximo con una tendencia hacia la norma horaria nacional de 0.12 ppm.

Figura.7.6. Valor del 4º máximo trianual del promedio horario de 6 estaciones de la SoCAB (Los Angeles, CAL.)

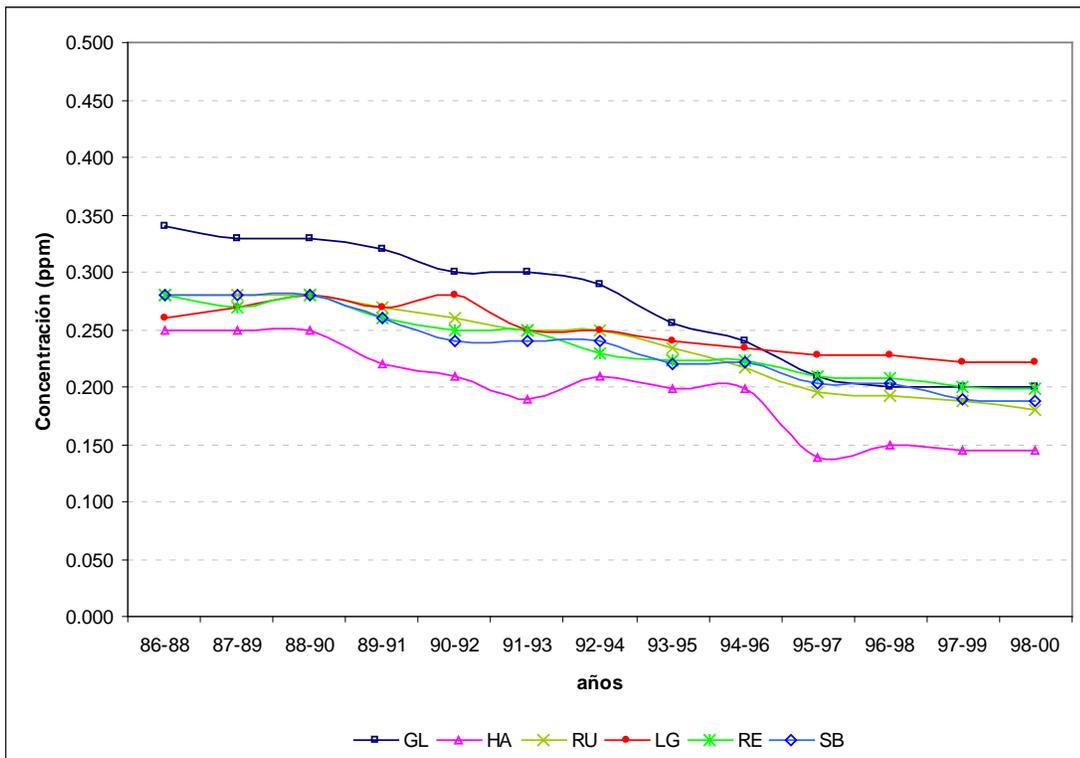


Tabla 7.7 Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall (SoCAB)

Periodo	Parámetros de la prueba de Mann-Kendall	GL	HA	RU	LG	RE	SB
1986 a 2000	Presencia de Tendencia	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Pendiente	-0.0135	-0.0100	-0.0100	0.0000	-0.0073	-0.0029
	Porcentaje de la tasa de cambio	-51.61%	-52.23%	-44.87%	0.00%	-36.96%	-16.13%

#### Prueba de Wilcoxon para los máximos diarios

En la Tabla 7.8 se observan los valores de la media de cada año y el valor de la prueba (+) cuando es significativo con incremento en las concentración promedio, (-) cuando es significativo con un decremento en la concentración promedio y (0) si no se presenta ningún cambio entre las concentraciones de esos años.

El comportamiento de todas las estaciones es semejante con decrementos paulatinos y periodos de estabilidad y con muy pocos incrementos, quizá debidos a efectos meteorológicos.

**Tabla 7.8.** Media de los promedios horarios máximos para ozono en la SoCAB de las 6 estaciones evaluadas con el valor de la prueba de Wilcoxon sobre la comparación entre medias por año.

AÑO	SB media	Wil	RU Media	Wil	RE media	Wil	LG media	Wil	HA media	Wil	GL media	Wil
1986	0.115		0.094		0.092		0.115		0.076		0.115	
1987	0.095	0	0.115	0	0.095	0	0.094	-	0.115	+	0.109	-
1988	0.099	0	0.097	0	0.115	0	0.101	+	0.073	0	0.113	0
1989	0.095	0	0.096	0	0.094	0	0.102	0	0.071	0	0.103	-
1990	0.082	-	0.089	+	0.084	-	0.093	-	0.067	-	0.093	-
1991	0.082	0	0.088	0	0.089	+	0.090	0	0.064	0	0.091	0
1992	0.084	0	0.082	-	0.089	0	0.094	0	0.061	-	0.097	0
1993	0.079	0	0.081	0	0.091	0	0.090	0	0.057	0	0.090	0
1994	0.084	+	0.081	0	0.080	-	0.090	0	0.056	0	0.083	0
1995	0.076	-	0.075	-	0.080	0	0.079	-	0.054	0	0.079	0
1996	0.076	0	0.072	0	0.076	0	0.077	0	0.050	-	0.069	-
1997	0.071	-	0.070	0	0.072	-	0.069	-	0.046	-	0.063	-
1998	0.063	-	0.065	-	0.068	-	0.079	+	0.044	-	0.060	-
1999	0.061	0	0.060	-	0.064	0	0.075	0	0.045	+	0.051	-
2000	0.058	-	0.059	0	0.065	0	0.070	-	0.046	0	0.057	+

## VIII. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

### 8.1 ANÁLISIS DE LAS VIOLACIONES A LA NORMA DE CALIDAD DEL AIRE DE OZONO, PARA MÉXICO Y LOS ÁNGELES.

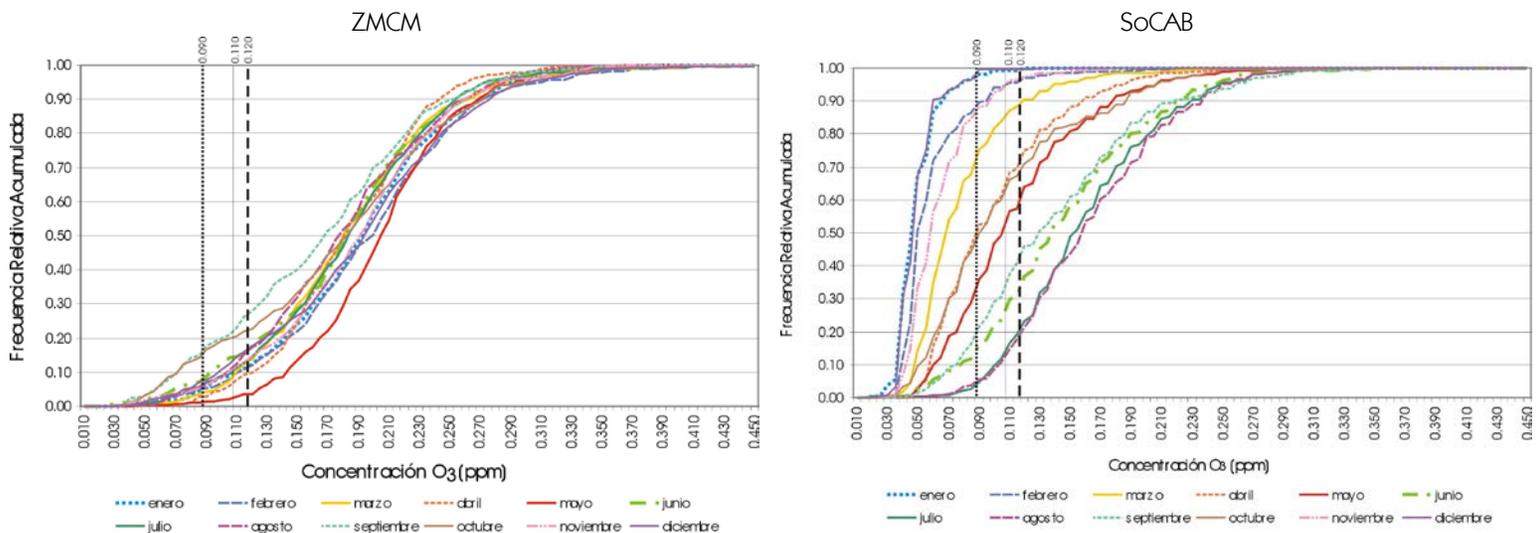
En el análisis de las violaciones a las normas de ozono se obtuvo el promedio mensual de 1986 a 2000, para evaluar el mes más crítico en ambas ciudades.

En la ZMCM el número de días en los que se rebasa el valor límite se presenta durante todo el año, siendo septiembre en promedio de los 15 años el que tiene el menor número de días. En la SoCAB tienen una época muy marcada que es la que corresponde al verano cuando la radiación solar dura más tiempo, en esta época presentan en promedio más de 20 días por arriba del valor límite tanto estatal como federal para ozono, en cambio en México durante todos los meses del año se presentan en promedio más de 20 días por arriba de la norma de calidad del aire para ozono (Figura 8.0).

Al aplicar la prueba de Mann-Kendall a los días en los que se rebasa el valor límite para la ZMCM se observa que hay tendencia y homogeneidad en cada mes, esto significa que se comportan de la misma manera no importando el mes del año. Sin embargo la tasa de cambio es de "0" esto significa que a través de los años no se ha presentado un incremento o decremento significativo, sino que ha tenido una tendencia constante (Tabla 8.1).

En los Ángeles los días en los que se rebasa el valor límite de la norma local de California de 0.09 tiene la misma tasa de cambio que la norma nacional de 0.12 ppm, esto significa que cada año se presenta un decremento de 0.33 en las concentraciones, mostrando que sí hay una disminución en los días en los que se rebasa la norma de calidad del aire para ozono.

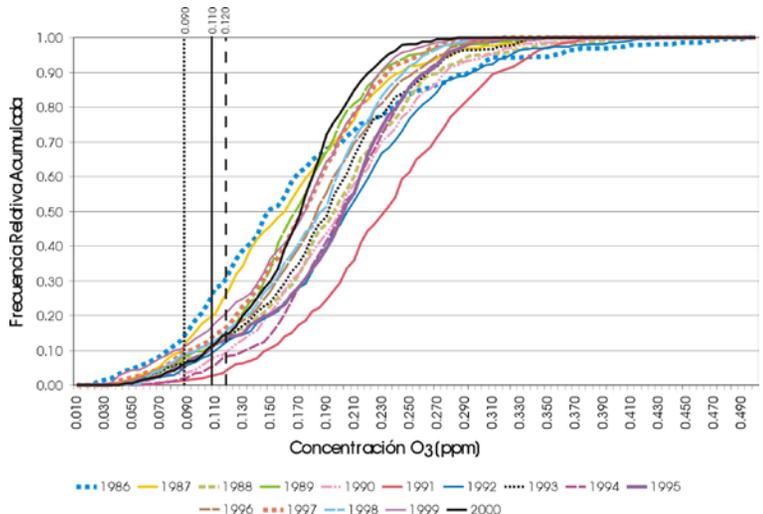
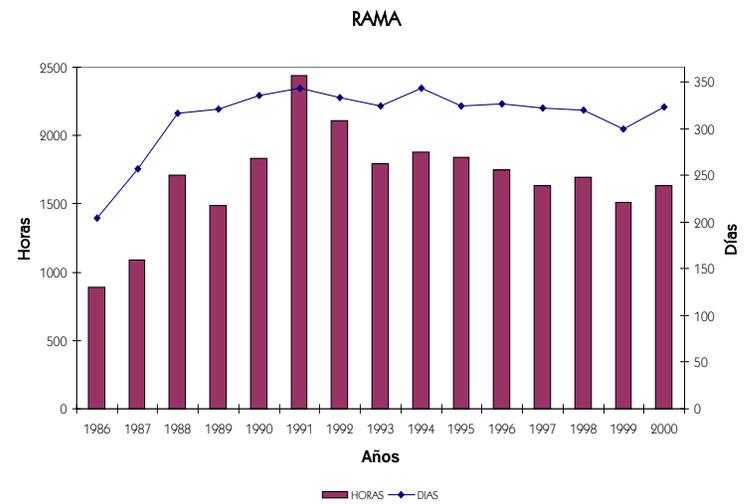
Figura 8.0 Distribución mensual de la concentración máxima diaria de ozono para la ZMCM y la SoCAB de 1986 a 2000



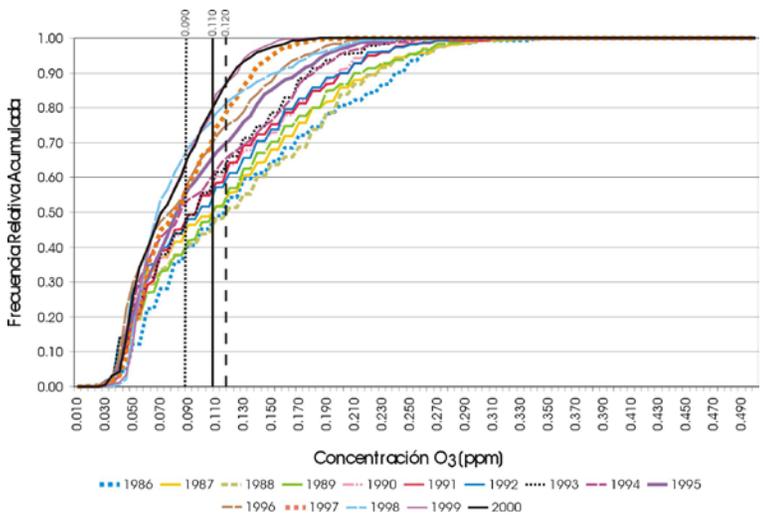
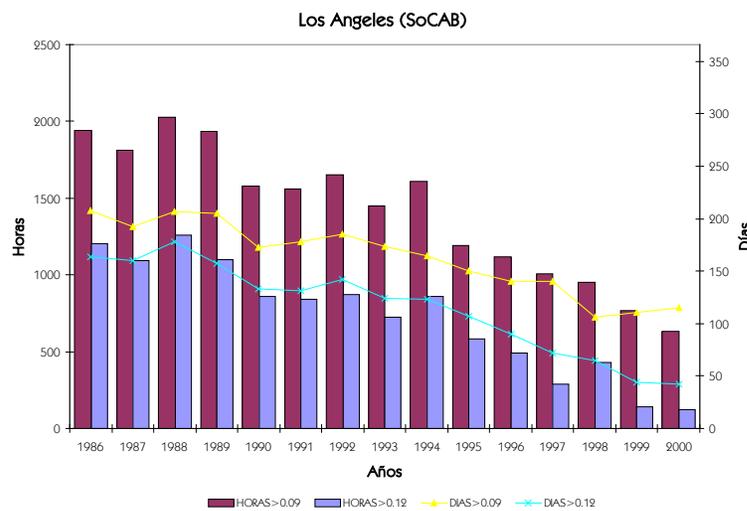
**Tabla 8.1** Resultados obtenidos en la prueba de Mann Kendall para los días en los que se rebasa el valor de sus respectivas normas para LA y MEX

Periodo 1986 a 2000 (nivel de confianza 95%)	ZMCM 0.11	SoCAB 0.09	SoCAB 0.12
Homogeneidad	SI	SI	SI
Presenta Tendencia	SI	SI	SI
TASA DE CAMBIO 1986-2000	0	-0.333	-0.333

**Figura 8.1.** Valores anuales horarios y diarios arriba del límite permisible de ozono para la ZMCM y distribución de la concentración máxima diaria.



**Figura 8.2.** Valores anuales horarios y diarios de ozono arriba de los límites permisible para la SoCAB para la norma nacional de 0.12 Nacional y la norma local de 0.09 y distribución de la concentración máxima diaria.



## 8.2 ANÁLISIS DEL 2º Y 4º MÁXIMO EN LAS CONCENTRACIONES DE OZONO

La norma mexicana de Calidad del Aire para Ozono (nmca) menciona que no debe rebasarse más de una hora en una año el límite de 0.11 ppm, sin embargo si observamos la gráfica 7.2 del capítulo anterior, en todas las estaciones se muestra el segundo máximo anual, con valores mayores de 0.130 ppm, esto significa que durante estos años se ha violando la norma de ozono en la ZMCM.

Para la Ciudad de Los Ángeles el segundo máximo no debe rebasar los límites, para la norma local de California de 0.09 ppm y la norma nacional de 0.120 ppm. Sin embargo para ambos límites se rebasa, por lo tanto ambas Ciudades incumplen sus normas de calidad del aire para ozono (sin considerar el número de veces al año).

Para el 4º máximo se menciona que en 3 años no debe rebasarse el límite de 0.11 ppm para la Ciudad de México, 0.09 ppm y 0.12 ppm para La Ciudad de Los Ángeles, sin embargo para ambas Ciudades se rebasa este límite (con diferente frecuencia y por lo tanto diferente número de días).

En el análisis de los días y el número de horas en los que se rebasan sus respectivas normas de calidad del aire para ozono en la ZMCM y la SoCAB se observa claramente en las figuras 8.4 y 8.5 como en la ZMCM hay una tendencia constante, no se observa un decremento significativo, sin embargo en la información de la SoCAB para ambos límites, el local (0.09 ppm) y el nacional (0.12 ppm) hay un decremento significativo según la prueba de Mann-Kendall.

**Figura 8.3.** Número de días en los que se viola la norma en el South Coast Air Basin (SoCAB, Los Ángeles)

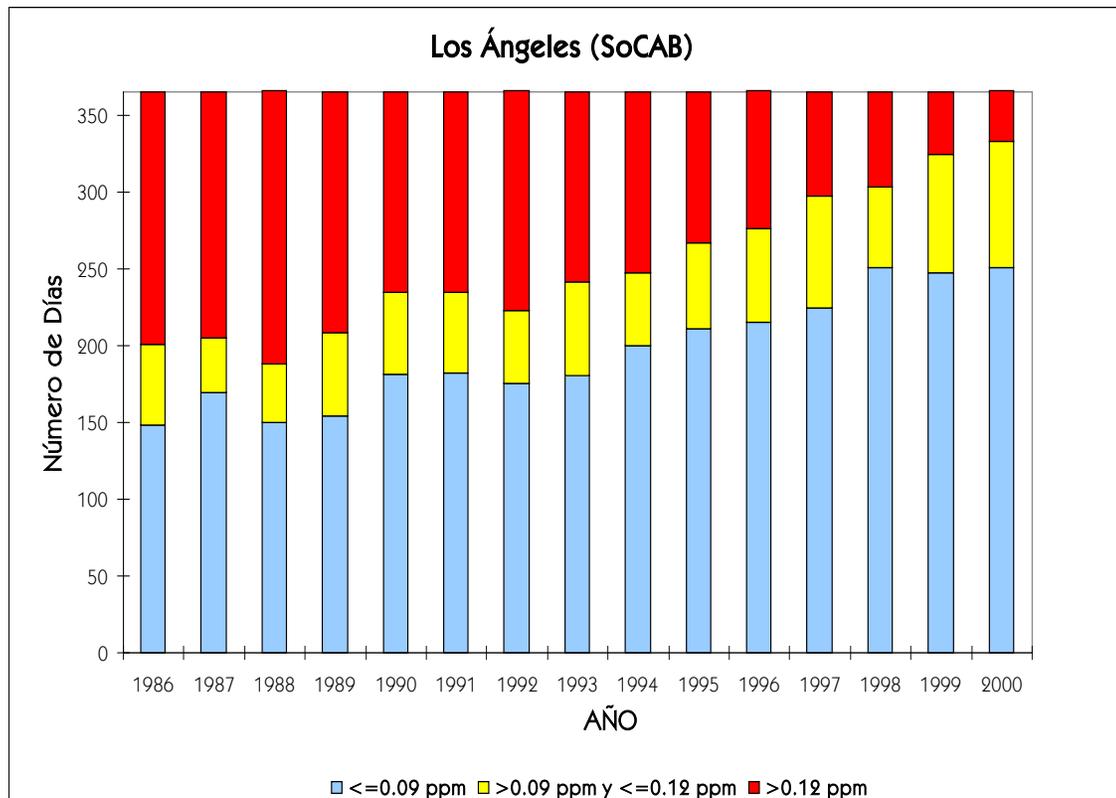
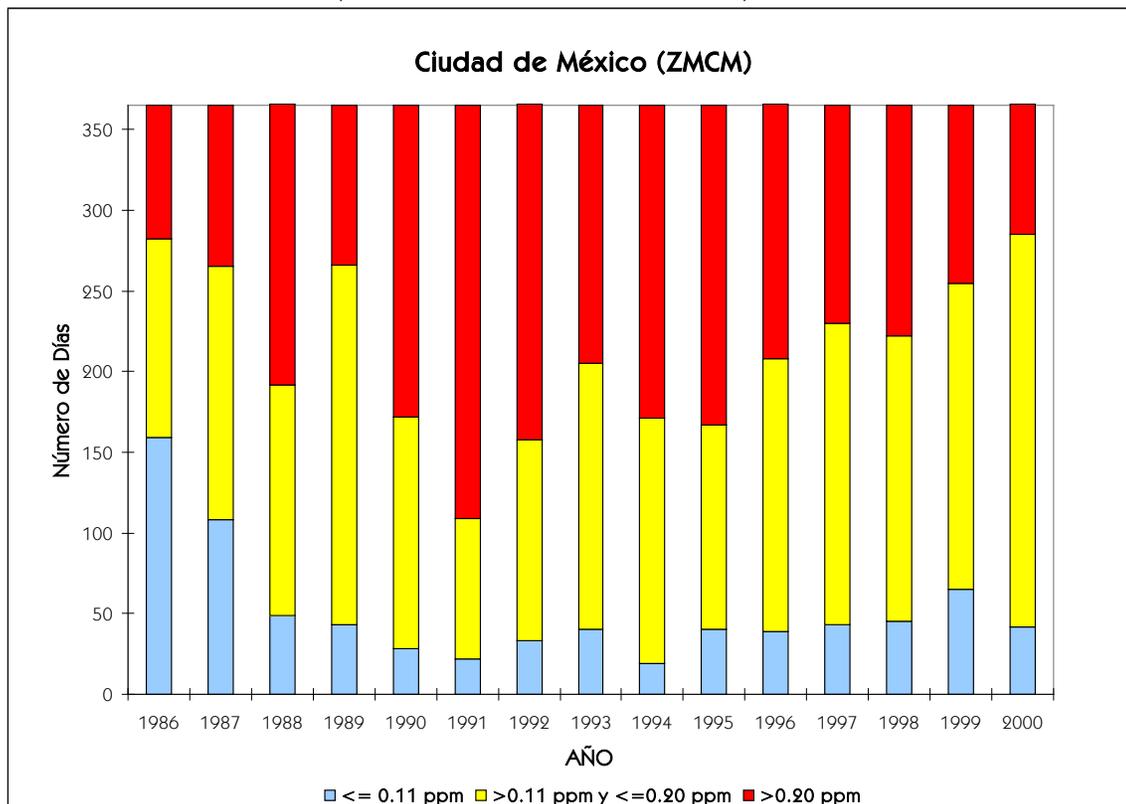


Figura 8.4. Número de días en los que se viola la norma en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)



En las Figuras 8.3 y 8.4 se observa el comportamiento de intervalos de concentración para el número de días en los que se rebasa el valor límite permisible. Observando un incremento en los días limpios para la SoCAB y un decremento en los días limpios para la ZMCM. En ambas figuras se observa que el intervalo intermedio se incrementa y el intervalo con valores altos decrece. Para la ZMCM este comportamiento sugiere la evaluación del efecto pistón e identificar los intervalos de las concentraciones que se han incrementado y las que han decrecido a través del tiempo.

### 8.3 COMPARACIÓN DE LA NORMA HORARIA Y LA NORMA PROMEDIO MÓVIL DE 8 HORAS PARA OZONO

Recientemente la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) llevó a cabo una revisión de su norma nacional de 0.120 ppm, como promedio horario, ya que en diversos estudios encontraron efectos severos en la salud en concentraciones por abajo de este valor, además de los resultados obtenidos en estudios de exposición a altas concentraciones de ozono, en los que se observó una relación con el incremento de las admisiones en los hospitales (EPA, 1996).

De esta manera la USEPA realizó una revisión de su norma, para lo cual se llevaron a cabo una serie de trabajos de integración y de consulta nacional, además de estudios de costo efectividad, que aportaron elementos para definir el mejor límite alcanzable ante una inversión económica adecuada.

El resultado de este trabajo fue el establecimiento de una nueva norma de protección a la salud por ozono, con un límite de 0.080 ppm como promedio de 8 horas. Al considerar el tiempo de exposición esta norma da una nueva dimensión de la importancia del efecto del ozono sobre la salud (EPA, 1996a).

La vigencia de esta norma comenzó en junio de 1997 y el indicador para evaluar el cumplimiento se definió como el promedio de la 4ª concentración máxima anual en 3 años (EPA, 1997; Husar, 1996).

En México, la SSA expidió en el año 2000 el proyecto para modificar la NOM-020-SSA1-1993, en la que se establecen 2 límites permisibles; el primero definido como el promedio horario de la concentración de ozono, el cual debe ser menor o igual a 0.110 ppm y no debe ser rebasado más de una vez al año; y el segundo como el promedio de ocho horas de la concentración de ozono, el cual debe ser menor o igual a 0.080 ppm, tomado como quinto máximo en un periodo de un año y no debe ser rebasado más de una vez al año.

También establece que el cumplimiento del límite de 0.110 ppm en cada sitio de monitoreo, se considerará cuando en cada día se registren al menos el 75% de los valores horarios posibles (18 horas). Así mismo, cuando no se cumple este requisito y se cuenta con un registro que sea mayor a 0.110 ppm, se considerará como un día en que se excedió la norma.

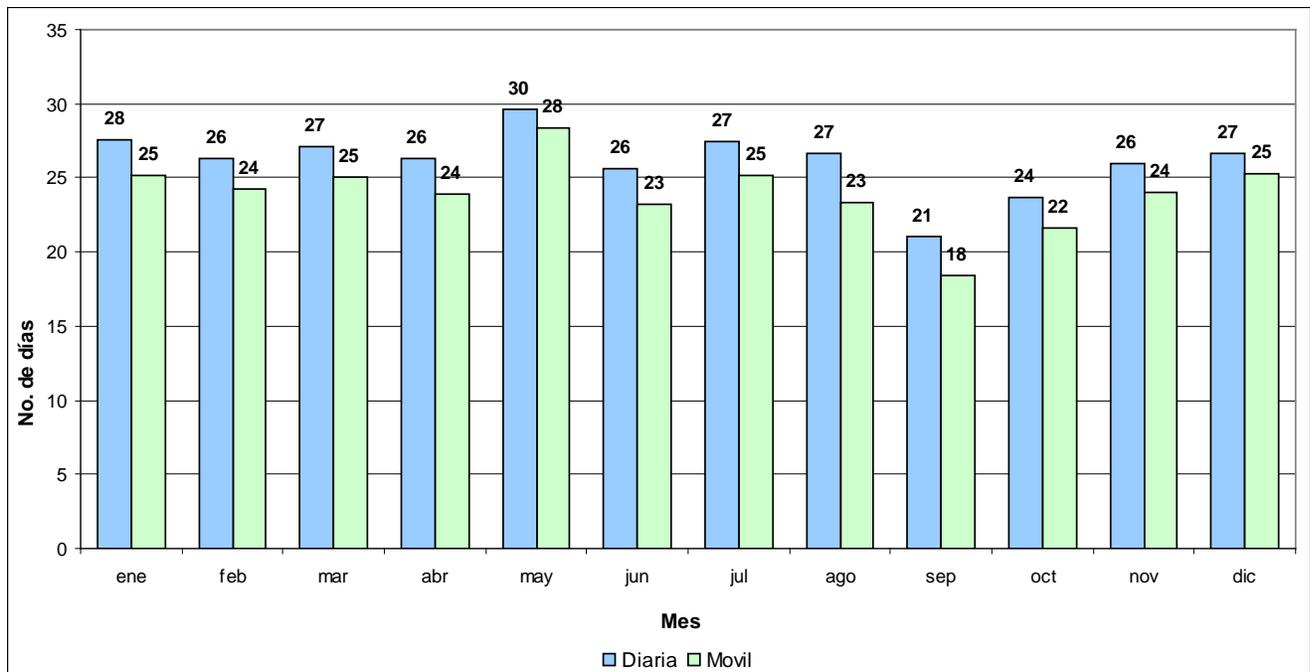
En el caso del límite de 0.080 ppm, también establece que su cumplimiento en cada sitio de monitoreo, se considerará cuando en cada día se registren al menos el 75% de los valores horarios posibles (18 horas). Así mismo, cuando no se cumple este requisito y se cuenta con un promedio máximo de ocho horas mayor al valor del límite, se considerará como un día en que se excedió esta norma. La evaluación de la calidad del aire respecto de este límite es anual, de tal forma que cada sitio de monitoreo debe cumplir con al menos el 75% de los datos posibles del año (274 datos) y el indicador será el valor del quinto máximo anual.

Con esta propuesta la SSA prevé evitar que las ciudades del país que comienzan a tener problemas de ozono, registren periodos largos de exposición en concentraciones que afecten la salud, en tanto que ciudades como México y Guadalajara, podrán continuar evaluando la presencia de concentraciones altas en periodos de tiempo corto y conocer su situación respecto del promedio de 8 horas.

Los resultados obtenidos de este análisis comparando mensualmente el número de días en los que se rebasa el valor límite permisible para ambas normas, se encontró una estrecha relación entre ambos límites como lo muestra el análisis de correlación de Spearman con un coeficiente de correlación significativo de **0.891** (con un nivel de

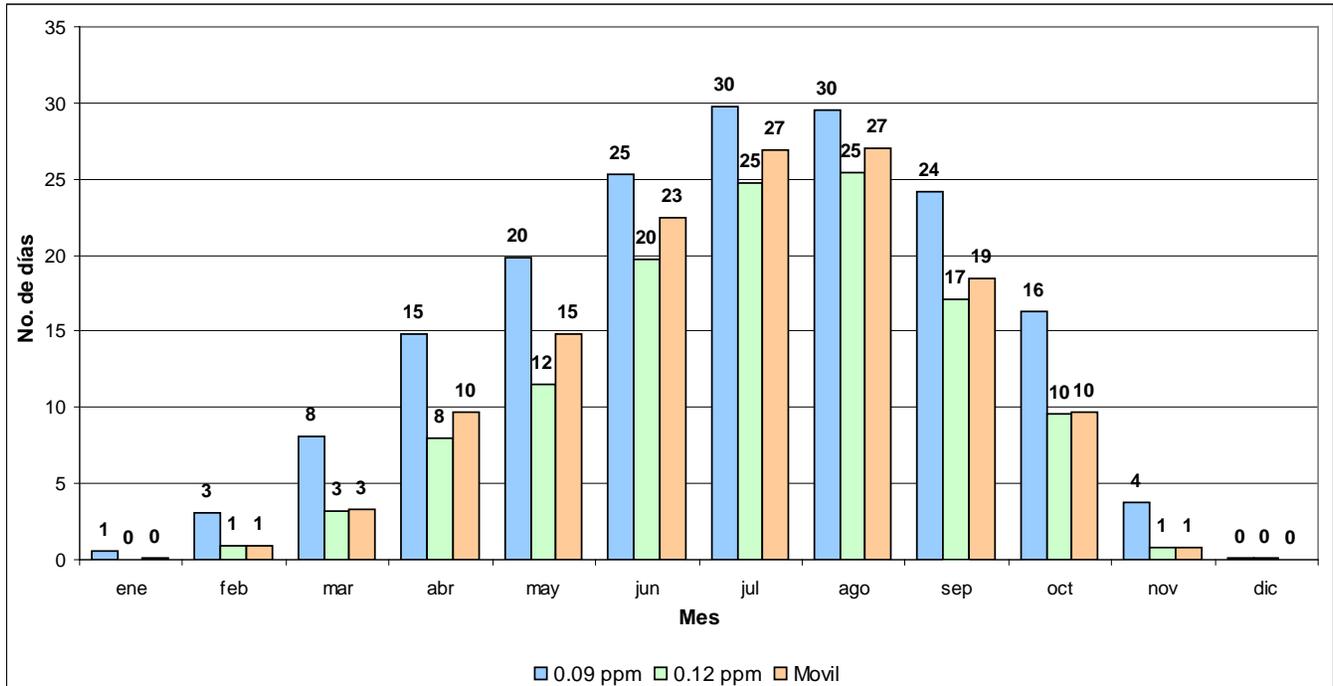
significancia de  $\alpha=0.05$ ). Sin embargo el comportamiento en algunos meses es diferente, por ejemplo el mes más crítico para el límite de 0.08 ppm es enero y esto sugiere que hay una mayor duración de las concentraciones arriba de la norma que en mayo, a pesar de ser el mes más crítico para la norma de 0.11 ppm. El mes donde la duración de las concentraciones arriba de la norma de 0.11 ppm son bajas es septiembre que es un mes muy lluvioso y esto evita que la exposición al ozono sea de mayor duración como se muestra en la figura 8.5.

**Figura 8.5.** Número de días del promedio mensual de ozono para la ZMCM en los que se rebasa el valor límite permisible (0.11) y la nueva norma propuesta por EUA de promedio móvil de 8 horas (0.080).



Los resultados obtenidos para la SoCAB con el límite de California de 0.090 y el límite del promedio móvil de 0.080 también tienen una estrecha relación significativa (con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ ) entre ambos límites como lo muestra el análisis de correlación de Spearman **0.973** e inclusive es mayor que el obtenido en el análisis de la ZMCM, sugiriendo que cuando se excede el límite local la exposición a las concentraciones altas puede ser de 8 horas o más. En la SoCAB los meses críticos para ambos límites son de junio a septiembre que es el verano en los Estados Unidos y hay mayor radiación solar, como se observa en la figura 8.6.

**Figura 8.6.** Número de días del promedio mensual de ozono para la SoCAB en los que se rebasa el valor límite permisible tanto para la norma local (0.09ppm), la nacional (0.12 ppm) como la nueva norma propuesta por EUA de promedio móvil de 8 horas (0.080).



Los resultados obtenidos para la SoCAB en el límite nacional de 0.12 ppm y el límite del promedio móvil de 0.080 ppm, muestran una relación significativa (con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ ) entre ambos límites como lo muestra el análisis de correlación de Spearman obteniendo un coeficiente de correlación de **0.976**, En este caso se sugiere que los días que presentan concentraciones altas tienen una duración mayor a 8 horas y hay menos días en los que se rebasa el valor límite nacional de 0.12 ppm.

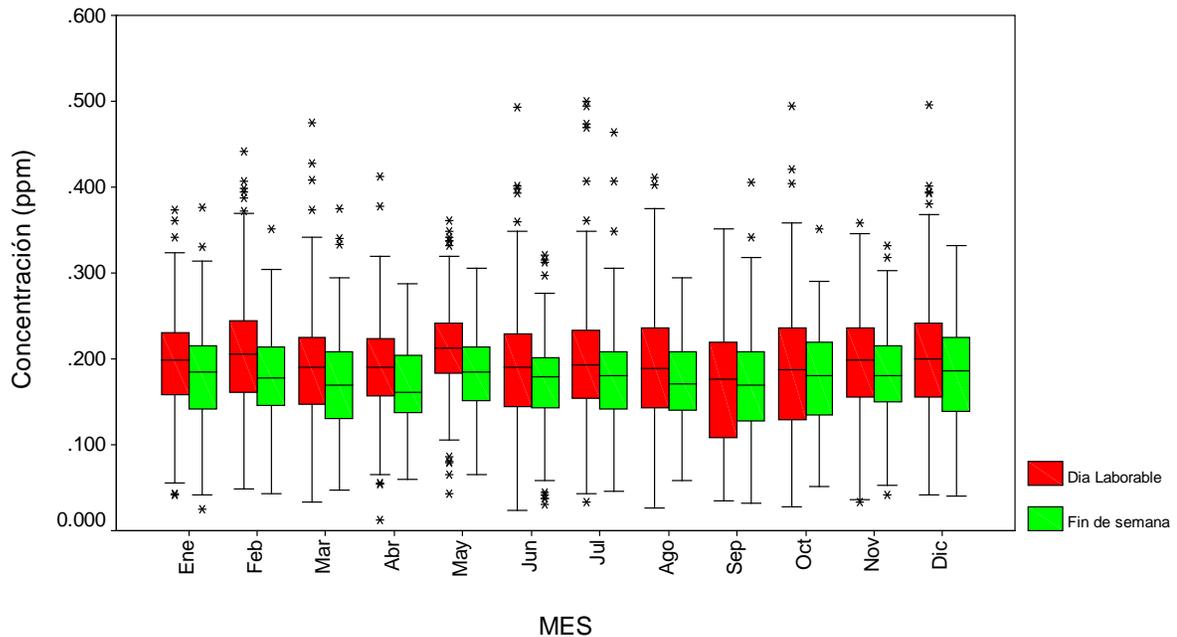
## 8.4 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE OZONO EN DÍAS LABORABLES - FINES DE SEMANA Y COMPORTAMIENTO DE LOS DÍAS DE LA SEMANA

### 8.4.1 Caso ZMCM

*1. Comparación de días laborables – fines de semana.* Comparando las concentraciones máximas diarias de los días laborables y fines de semana de toda la ZMCM y aplicando la prueba de Mann-Whitney, se encuentra una diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ), donde las concentraciones de los días laborables son mayores que las del fin de semana. Así mismo en el análisis temporal (por mes del año) al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , se encontró que no hay diferencia en las concentraciones que se registran los fines de semana en cualquier época del año. En cuanto a los días laborables, se encontró una diferencia significativa, siendo Mayo y Septiembre los meses donde los días laborables se comportan diferente a los del resto del año apoyando los resultados obtenidos en los días donde se rebasa el valor límite permisible, siendo mayo el mes

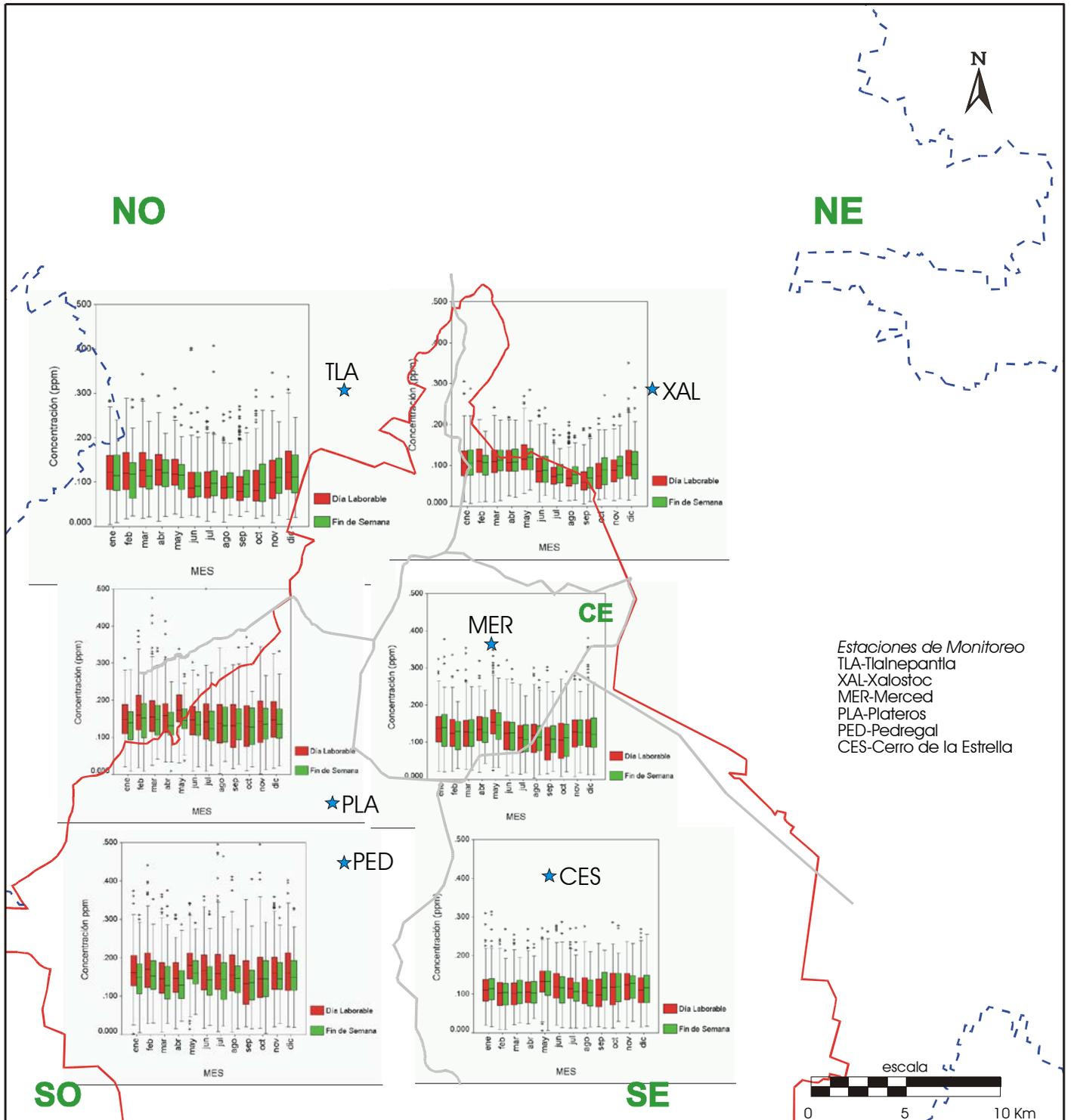
con mayor días arriba de la norma y septiembre es el mes con menor número de días arriba de la norma (ver figura 8.7).

**Figura 8.7** Comportamiento mensual de las concentraciones máximas diarias en los días laborables y fines de semana en la ZMCM (1986-2000)



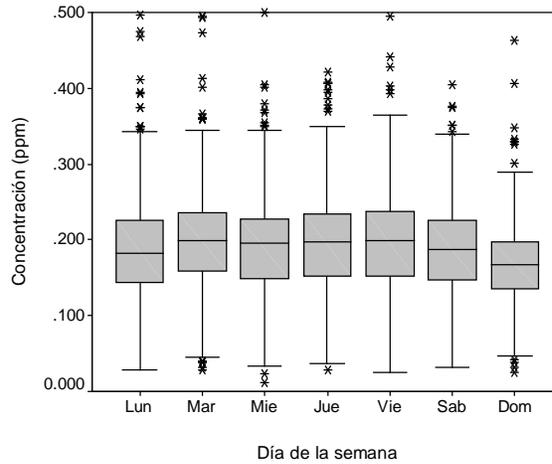
Al hacer el mismo análisis por estación (6 estaciones seleccionadas), solo se encontró que las estaciones XAL, PLA y PED tienen diferencias en el comportamiento de los días laborables y fines de semana con respecto a la época del año. Para XAL existen dos temporadas muy marcadas para ambos parámetros (días laborables y fines de semana), la época de secas: meses secos calientes (altas temperaturas) donde mayo tiene un comportamiento muy parecido a marzo y abril; y los meses secos fríos enero, febrero y diciembre. La segunda temporada es la época de lluvias donde los dos meses extremos de la época junio y noviembre son significativamente parecidos y julio, agosto, septiembre y octubre tienen el mismo comportamiento. En PED tanto en días laborables como fines de semana se encuentran dos meses muy marcados mayo mes con las concentraciones más altas y septiembre con las concentraciones más bajas para los meses restantes el comportamiento de las concentraciones es el mismo. En la estación PLA para los días laborables mayo, febrero, marzo y abril presentan las concentraciones más altas en los días de la semana y los meses restantes el comportamiento de las concentraciones es semejante. En los fines de semana las concentraciones no presentan diferencias significativas.

Mapa 8.1 Comportamiento de los días laborables y fines de semana en las 6 estaciones de la ZMCM



*II Comparación de los días de la semana.* Al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis ( $\alpha=0.05$ ) para las concentraciones máximas diarias de los días de la semana (lunes a domingo) para la ZMCM, se encontró diferencia significativa entre: martes - lunes; martes - sábado, y el domingo tiene diferencias con todos los días y registra las concentraciones más bajas; entre los otros días de la semana no hay diferencias entre ellos (viernes, miércoles y jueves).

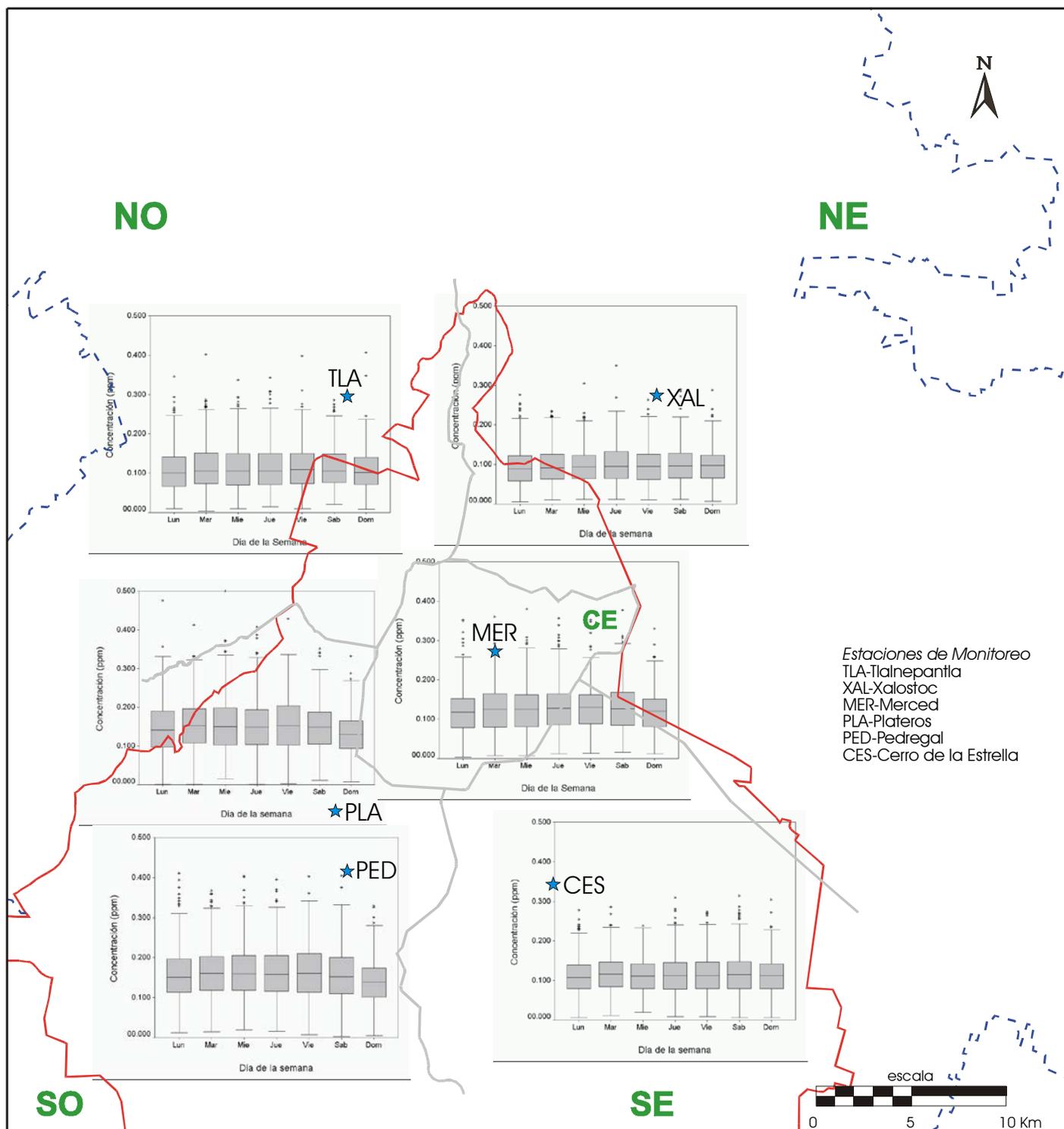
**Figura 8.8.** Comportamiento de las concentraciones máximas diarias en los días de la semana en la ZMCM (1986-2000)



En el caso del análisis por estación (6 estaciones: PLA, XAL, TLA, CES, MER y PED). Las estaciones XAL y CES no presentaron diferencias significativas en el comportamiento de las concentraciones por día de la semana.

Para la estación TLA, se encontró diferencia entre: martes - domingo y viernes - domingo, ya que martes y viernes son los días con concentraciones más altas y los domingos con las más bajas (ver Mapa 8.2). La estación MER presenta diferencias entre Lunes-Jueves y domingo con el jueves, viernes y sábado. El domingo y el lunes para esta estación son los días con concentraciones más bajas y del jueves al sábado son los días con concentraciones más altas. Las estaciones PED y PLA presentan el mismo comportamiento en sus días de la semana encontrando diferencias del domingo con todos los días de la semana de lunes a sábado, y esta diferencia se observa claramente en estas dos estaciones, ya que el domingo presenta las concentraciones más bajas (ver mapa 8.2).

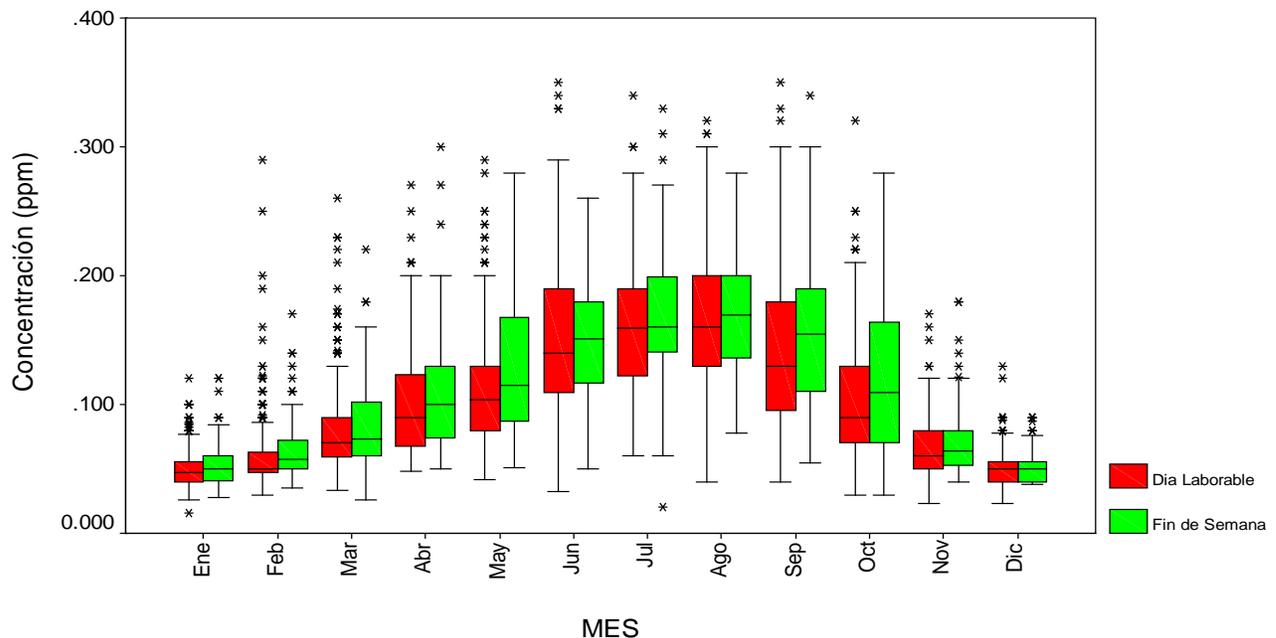
Mapa 8.2 Comportamiento de los días de la semana en las 6 estaciones de la ZMCM



### 8.4.2 Caso Los Ángeles, California (SoCAB)

1. *Comparación de días laborables – fines de semana.* Comparando las concentraciones máximas diarias de los días laborables y fines de semana de Los Ángeles (SoCAB) y aplicando la prueba de Mann-Whitney, se encontró que hay diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ), sin embargo aquí se presentó el comportamiento inverso a lo encontrado en la ZMCM, en la cual los fines de semana presentaron mayor concentración, que los días laborables. Con lo que respecta a la temporalidad, en ambos casos se comportan prácticamente de la misma manera durante el año, no importando si es día laborable o fin de semana, formando 4 grupos: i) enero y diciembre; ii) febrero, marzo y noviembre; iii) abril, mayo y octubre; finalizando con iv) junio, julio, agosto y septiembre. Observando que los meses con radiación solar más alta (equivalente al verano, grupo iv) presentan las concentraciones más altas.

Figura 8.9. Comportamiento mensual de las concentraciones máximas diarias de ozono en los días laborables y fines de semana en la SoCAB (1986-1999)



Al hacer el mismo análisis por estación (6 estaciones) se encuentran algunas variaciones. Para la estación LG, se encontró tanto para días laborables como fines de semana que: enero-diciembre, mayo-septiembre y julio-agosto, se agrupan por un comportamiento parecido en sus concentraciones, así mismo para el fin de semana se encontró otro tipo de agrupaciones: abril-octubre y junio-julio-agosto. Para la estación GL se agrupan: enero-diciembre, febrero-noviembre, abril-mayo-octubre, junio-julio-septiembre y julio agosto; tanto para el día laborable como el fin de semana, aquí presentan el mismo comportamiento a pesar de la diferencia en concentración. En la HA para los días laborables se agrupan: ene-dic, feb-nov, abr-may-jun-oct, y jul-ago-sep. Se sigue el comportamiento gausiano, esto es, el mes extremo izquierdo de la curva enero se agrupa con el mes

extremo derecho de la campana diciembre, teniendo como la parte más alta de la campana los meses del verano junio, julio y agosto. Prácticamente en todas las estaciones se presenta este fenómeno. Esta estación es la que presenta la curva gaussiana mas achatada y en el comportamiento del fin de semana se agrupan de la siguiente manera: ene-dic, feb-nov (ambos extremos de la gaussiana) y mayo-junio-julio-agosto-septiembre-octubre en el mismo grupo, no encontrando diferencia entre las concentraciones de estos 6 meses.

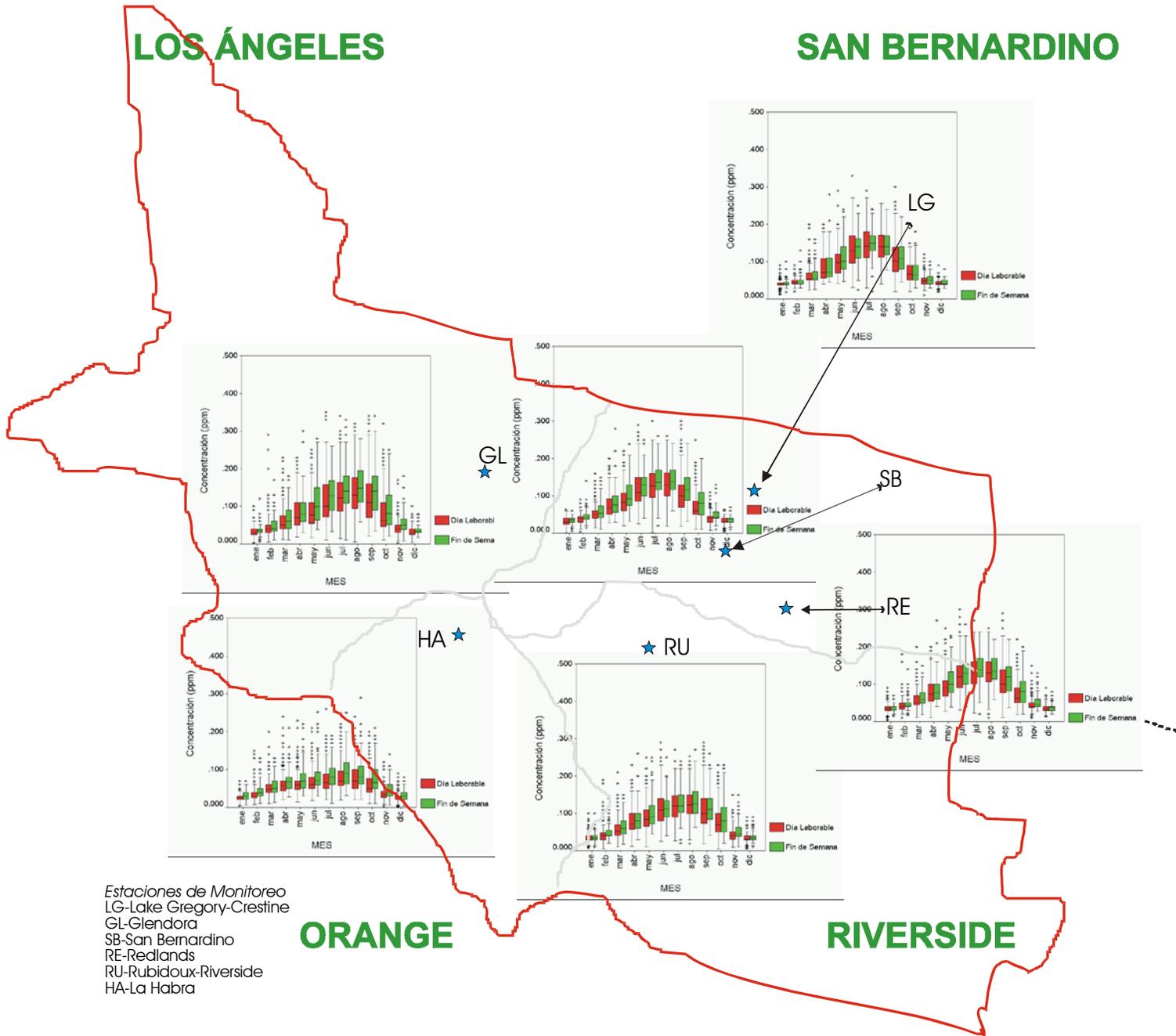
Para RE se agrupan de la misma manera de campana de extremo a extremo hasta la punta: ene-dic, feb-nov, abr-oct, may-sep (exclusiva de fines de semana). Para ambos parámetros días laborables y fines de semana. En RU y SB ocurre la agrupación parecida: ene-dic, feb-nov, abr-may-oct y jun-jul-ago-sep. Con el mismo comportamiento de grupos en parejas y en ambos casos días laborables y fines de semana. (Ver Mapa 8.3)

Mapa 8.3 Comportamiento de los días laborables y fines de semana en las 6 estaciones de los Ángeles (SoCAB)



**LOS ÁNGELES**

**SAN BERNARDINO**



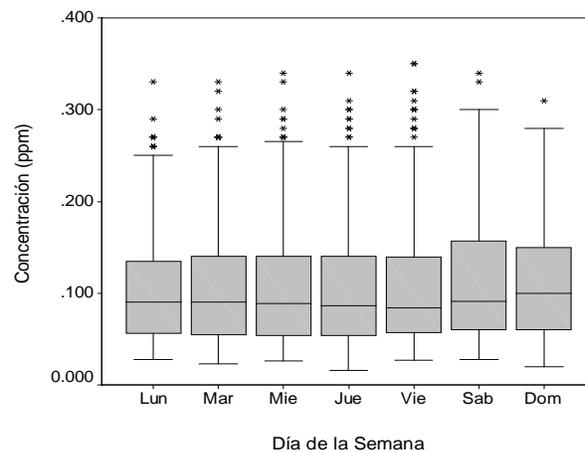
Estaciones de Monitoreo  
 LG-Lake Gregory-Crestine  
 GL-Glendora  
 SB-San Bernardino  
 RE-Redlands  
 RU-Rubidoux-Riverside  
 HA-La Habra

**ORANGE**

**RIVERSIDE**

*II Comparación de los días de la semana.* Al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis ( $\alpha=0.05$ ) para las concentraciones máximas diarias de los días de la semana (lunes a domingo) para Los Ángeles, se encontró que hay diferencias entre los días, observando que entre el sábado y domingo con los otros días de la semana, la diferencia es significativa, así mismo entre sábado y domingo no hay diferencia sugiriendo que se comportan de la misma manera, al igual que los días de la semana restantes, entre ellos no se encontró diferencia significativa. Estos resultados confirman lo encontrado en las comparaciones entre días de la semana y fines de semana.

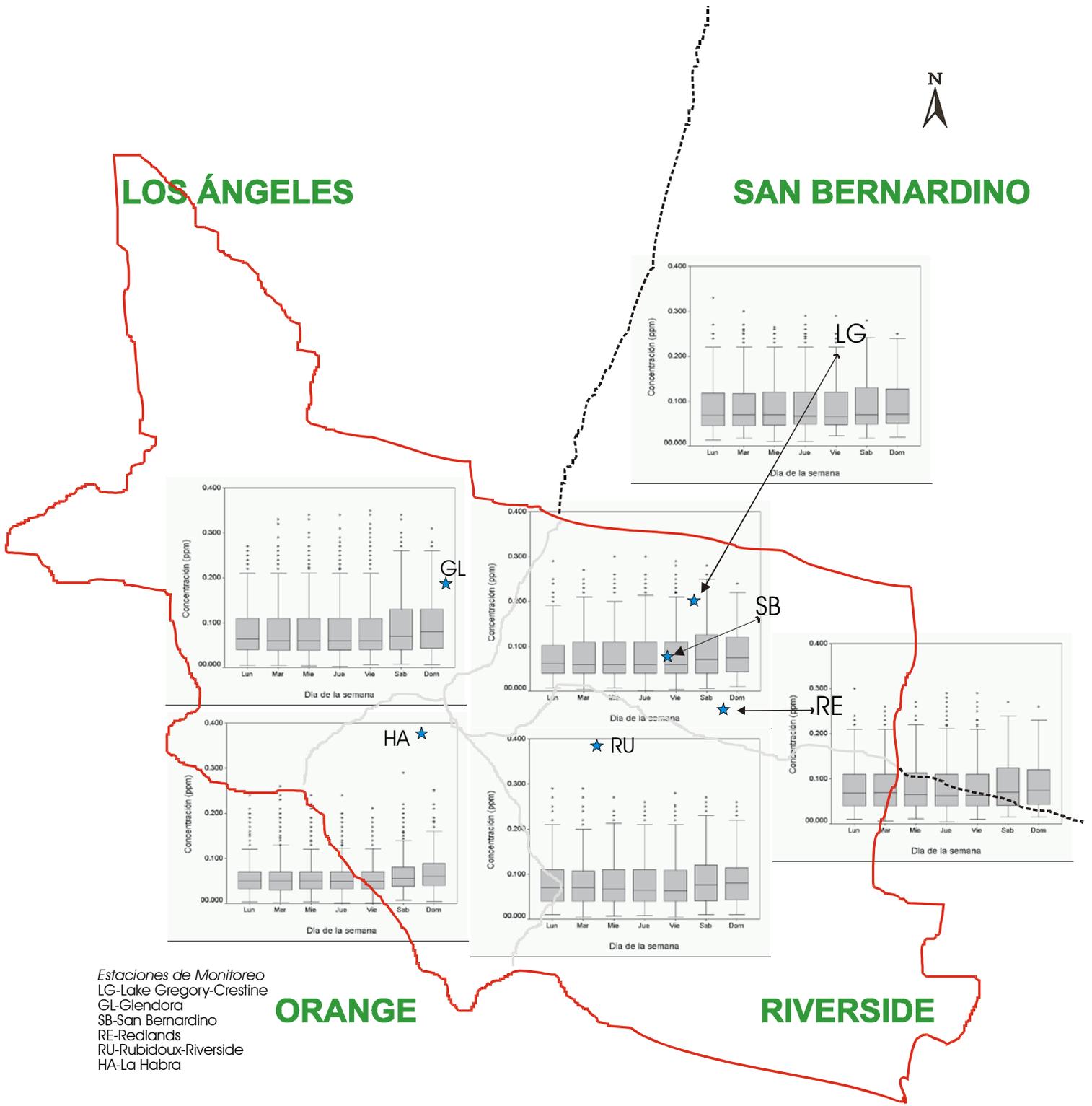
**Figura 8.10.** Comportamiento de las concentraciones máximas diarias según el día de la semana en la SoCAB (1986-1999)



En el caso del análisis por estación (6 estaciones: LG, GL, HA, RE, RU y SB). Todas las estaciones presentaron diferencias significativas en el comportamiento de las concentraciones por día de la semana.

Para el caso de LG sólo se encontraron diferencias en lun-sab y lun-dom. Los demás días se comportan de la misma manera. En el caso de GL, HA, RE y RU el comportamiento que se encontró fue que hay diferencia significativa de los días de la semana con sábado y domingo, esto es muestran el mismo comportamiento que en el análisis de Los Ángeles. La estación SB también presenta este comportamiento teniendo una pequeña variación con respecto al miércoles ya que no hay diferencia en sus concentraciones con las del sábado, en los demás días de la semana se comporta igual que el resto diferencia entre sábado y domingo con respecto a los días restantes.

Mapa 8.4 Comportamiento de los días de la semana en las 6 estaciones de los Ángeles (SoCAB)



Estaciones de Monitoreo  
 LG-Lake Gregory-Crestine  
 GL-Glendora  
 SB-San Bernardino  
 RE-Redlands  
 RU-Rubidoux-Riverside  
 HA-La Habra

## 8.5 EFECTO PISTON

El efecto pistón observa el comportamiento de las concentraciones horarias a través del tiempo y el efecto de las estrategias de control que se han aplicado para reducir los niveles de la contaminación.

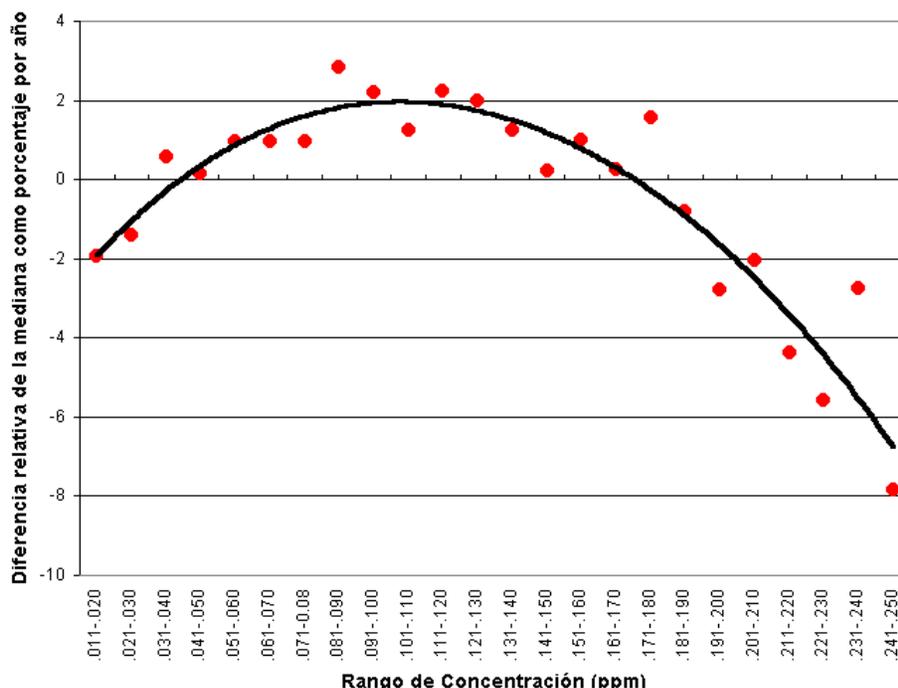
¿En que consiste el “efecto pistón”? Lefohn, et al (1999), menciona que existe una gran resistencia en reducir los niveles medios de las concentraciones por ozono, mientras los niveles altos son reducidos rápidamente.

Como las estrategias de control son implementadas, se presenta una resistencia baja para los niveles altos de las concentraciones y se reducen rápidamente, pero la resistencia se incrementa al tratar de reducir los niveles medios de las concentraciones. Esto es la resistencia al inicio es baja, sin embargo la resistencia se incrementa como cuando un pistón ejerce su fuerza en comprimir el gas. Esto ya ha sido estudiado en algunas ciudades de Estados Unidos por Lefohn, et al (1997, 1998 y 1999).

En las siguientes figuras se presenta el comportamiento del “efecto Pistón” para 6 estaciones de la ZMCM y de la SoCAB.

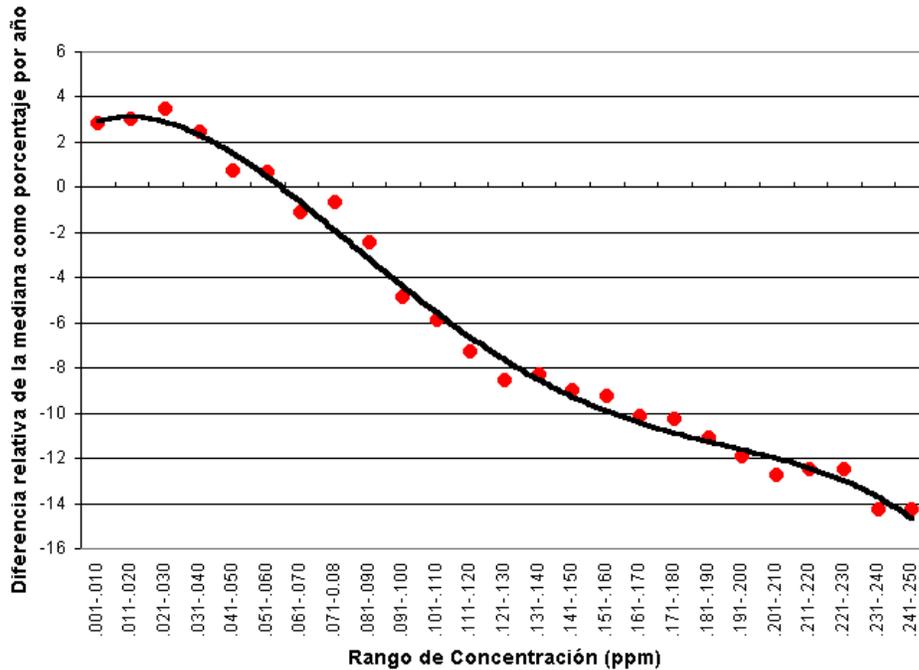
En la figura 8.11 que muestra el efecto pistón para la estación más crítica de la ZMCM los intervalos de concentraciones mayores a 0.181 ppm han tenido un decremento considerable, sin embargo, las concentraciones de 0.041 a 0.170 han tenido un incremento, esto es, las concentraciones intermedias son difíciles de bajar, ya que según el efecto pistón las altas bajan rápidamente, sin embargo se llega a un punto donde bajar las concentraciones intermedias es sumamente difícil, e inclusive tienen incrementos. Mostrando que algunas de las estrategias de control no han sido tan eficientes como se esperaba y señala la necesidad de ajustar las existentes.

Figura 8.11. Cambios de 1987 a 2000 en las concentraciones del promedio horario de Ozono en el Pedregal



El comportamiento que presenta la estación PED de la ZMCM contrasta con el comportamiento del efecto pistón de Glendora una de las estaciones históricamente críticas para la SoCAB (figura 8.12). En esta estación se observa como todas las concentraciones, tanto intermedias como altas han tenido un decremento significativo, y solo las concentraciones menores a 0.050 ppm se han incrementado. Siendo una señal que las estrategias de control en la SoCAB ha tenido resultado.

**Figura 8.12.** Cambios de 1986 a 2000 en las concentraciones del promedio horario de Ozono en Glendora

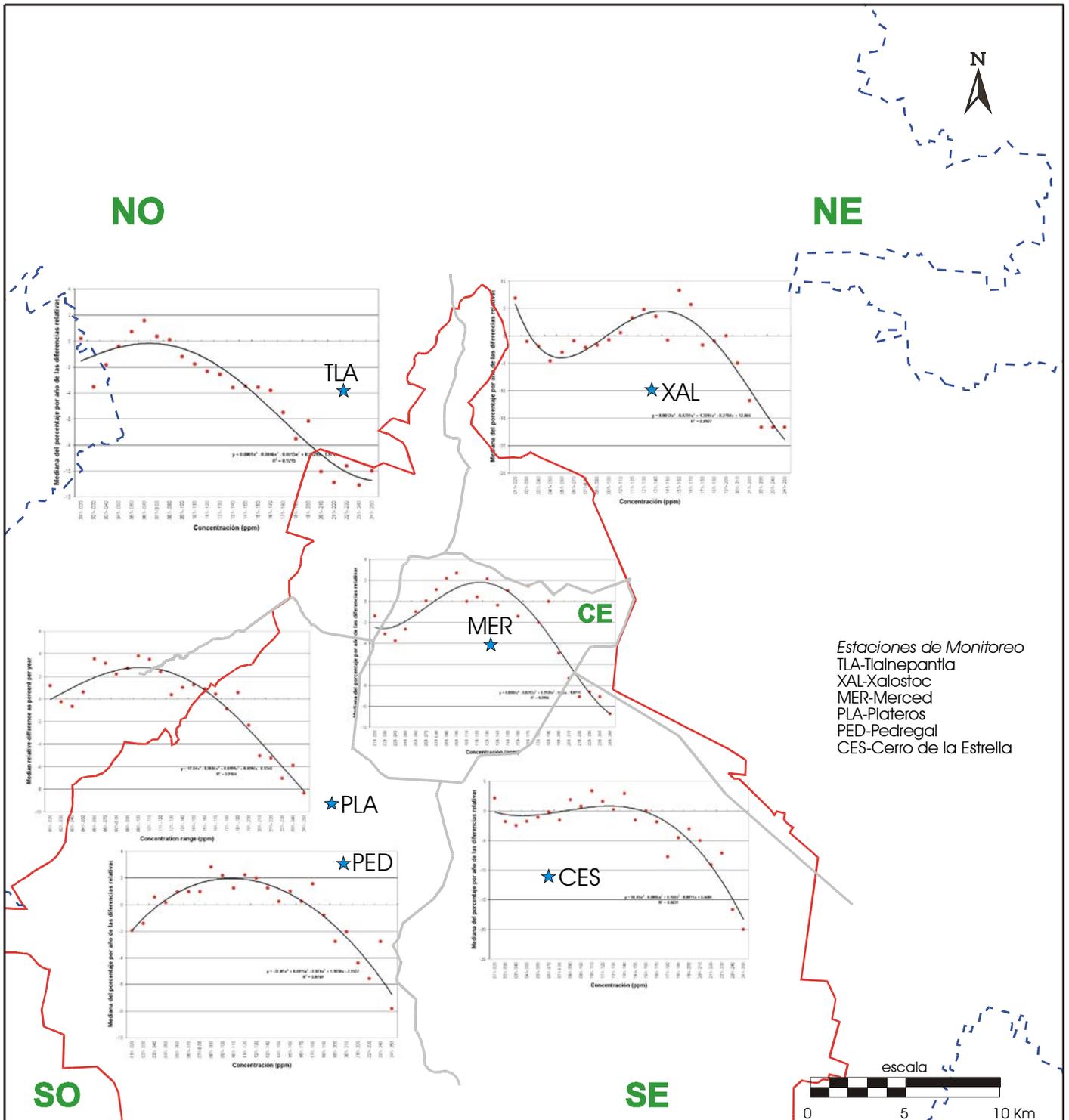


El efecto pistón que se observa en los Mapas 8.5 y 8.6 muestra las diferencias por zonas en cada una de las ciudades de estudio.

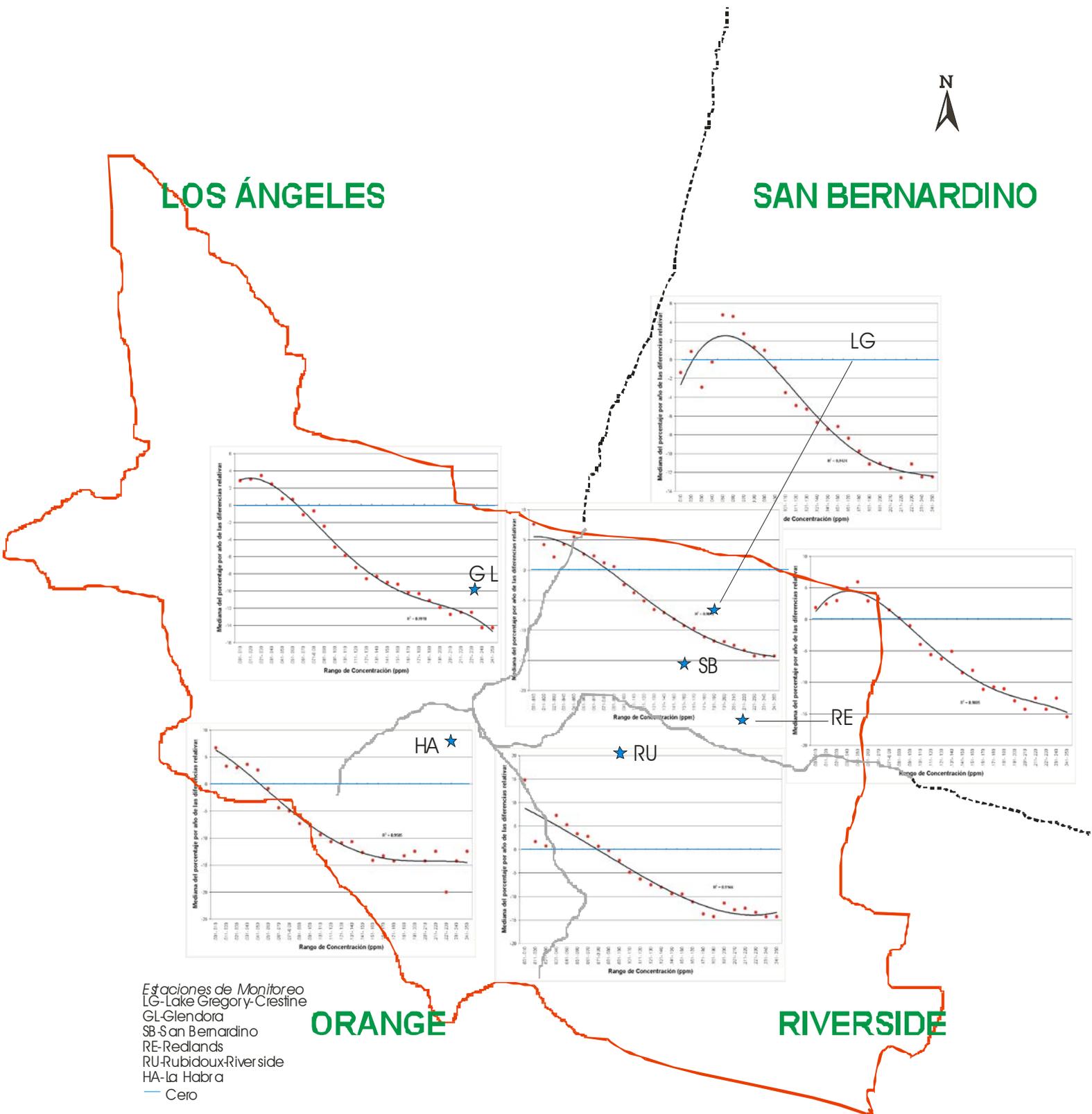
En la ZMCM se observa que la estación PLA tiene similitud con el comportamiento de PED, la estación TLA ha disminuido en todos los intervalos la concentración de O<sub>3</sub>, en cambio XAL muestra aumentos en intervalos intermedios de concentración (Mapa 8.5).

Para la SoCAB, la estación cercana a las montañas LG presenta en algunos intervalos incremento de la concentración y es debido a que en esta zona de Los Ángeles se estancan los contaminantes, sin embargo en todas las estaciones no muestran el comportamiento "Efecto pistón", ya que en todos los intervalos se han disminuido las concentraciones de ozono a través del tiempo (Mapa 8.6).

Mapa 8.5 Comportamiento del efecto pistón de las 6 estaciones de la ZMCM



Mapa 8.6. Comportamiento del efecto pistón en las 6 estaciones de la SoCAB



Estaciones de Monitoreo  
 LG- Lake Gregory-Crestine  
 GL-Glendora  
 SB-San Bernardino  
 RE-Redlands  
 RU-Rubidoux-Riverside  
 HA-La Habra  
 — Cero

## IX. ESTRATEGIAS DE CONTROL

El crecimiento del deterioro ambiental, así como la contaminación atmosférica en la Ciudad de México y la contaminación de lagos, ríos y aguas subterráneas no fue de interés para las autoridades, hasta 1971 cuando se promulga la Primera Ley Para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental. Posteriormente, por más de una década el gasto en controlar la contaminación no produce beneficios comprobables y las autoridades sanitarias niegan sistemáticamente los efectos en salud (Sosa, R. 2001).

Durante los años 70s y 80s el mayor interés oficial al atacar la contaminación atmosférica estuvo puesto en la reducción de los niveles de plomo, partículas, y dióxido de azufre. Es a partir de mediados de los 90s cuando se empieza a ver la necesidad de combatir el problema analizando sus causas, que en el caso del ozono consistió en reconocer la necesidad del estudio de los COVs como precursores, además de los óxidos de nitrógeno.

En 1996 se establece el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México, conocido como PROAIRE, con el propósito de ampliar, reforzar y dar continuidad a las medidas iniciadas a principios de la década. El objetivo del PROAIRE estuvo enfocado explícitamente a la reducción de las concentraciones pico y promedio de ozono, con la finalidad de disminuir el riesgo a la salud, asociado con la exposición de corto y largo plazo a este contaminante. Por ello las medidas que se implementaron fueron dirigidas a la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno y los COVs, pero no se consideró la composición de las gasolinas. (PROAIRE 2002-2010).

Las estrategias de control se constituyen por una serie de instrumentos diversos y complementarios, pertenecientes a dos ámbitos: regulación y marcos de incentivos. El propósito de la política ambiental urbana, sobre calidad del aire es muy claro: Avanzar para que cada vez se esté más cerca de cumplir con las normas de calidad del aire, en un período de tiempo razonable. Ello implica enfrentar costos económicos y políticos altos que implica grandes objeciones a todos los niveles.

Lo importante es seleccionar adecuadamente la combinación de instrumentos que minimice el costo social para lograr los objetivos, que condujeran al alcance de la meta.

Se presentan las diferentes estrategias que se han aplicado tanto en el caso de la Ciudad de México como en Los Ángeles. En el caso de la ZMCM estas acciones aunque muy costosas, su beneficio no es el esperado.

## 9.1 ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO

En la ZMCM se han aplicado los programas del PICCA y PROAIRE que tienen una serie de acciones para reducir los niveles de contaminación del aire, en las siguientes tablas se muestran las acciones y el contaminante a la que van dirigidos:

AÑO	ACCIONES	O <sub>3</sub>	NOx	CO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	PST-PM10	Pb
1986	Se fomentó el uso de gas natural en dos termoeléctricas del Valle de México y 365 industrias. Se inició la distribución de Diesel especial con 0.5% de contenido de azufre.					x	x	
1989	Distribución de gasolina oxigenada con un 5% de MTBE para reducir un 15% en la emisión de CO			x				
1989	Diversas cámaras establecieron un convenio para el uso exclusivo de Diesel y Gas L.P.	x		x		x		
1989	Inicia el Programa "Hoy No Circula" y también el Programa de Verificación vehicular con equipo BAR 84.	x	x	x	x			
1990	Se introdujo la gasolina Magna Sin para autos con convertidor catalítico	x	x	x	x			x
1991	Se empezaron a introducir automóviles con convertidor catalítico para reducir NOx en un 60% y HCs en un 90%. Esto requirió la distribución de gasolina Magna Sin.	x	x		x			
1991	Se redujo el contenido de Tetraetilo de Plomo (TEP) en un 50% (0.3 - 0.54 ml/gal) en la Gasolina Nova							x
1991	Se sustituyó el uso de combustóleo por gasóleo (con menos del 2% de azufre) y se cerró la Refinería "18 de Marzo".					x	x	
1992	La PROFEPA promovió el programa Nacional de Auditoría Ambiental en empresas o identidades públicas de jurisdicción Federal.						x	
1992	Se establecieron límites más bajos del contenido de HC's reactivos en las gasolinas Nova y Magna Sin. También inició el Programa de Control de Emisiones Industriales para reducir NOx y HC's. Instalación de techos flotantes en tanques de almacenamiento y autotanques	x	x	x	x			
1992	Se redujo el contenido de Tetraetilo de Plomo (TEP) en un 50% (0.2 - 0.3 ml/gal) en la Gasolina Nova							x
1992	Se prohibió la venta de combustóleo en la ZMVM					x	x	
1993	Se introdujo el Diesel Sin con 0.05% en peso de azufre y se llevo a cabo la instalación de Equipo Anticontaminante en 3,500 unidades de la ex-ruta 100					x	x	
1993	Se moderniza el Programa de Verificación Vehicular con la introducción de equipo BAR 90 y se hizo obligatorio el uso de convertidor catalítico y la aplicación de Fuel Inyección	x	x	x	x			
1993 a 1997	Reestructuración de transporte público: Autobuses nuevos en el D.F. 1,080 y 31,208 en el GEM	x	x	x	x	x		
1994	La Gasolina Nova presentó la última reducción en el contenido de Tetraetilo de Plomo (TEP) de 0.1 - 0.2 ml/gal.							x
1995	PEMEX refinación concluyó la fase 0 de instalación de Sistemas de Recuperación de Vapores (SRV-fase0) en 4 terminales de distribución.	x	x		x			
1996	La termoeléctrica Valle de México llevó a cabo una serie de trabajos en sus unidades generadoras para la reducción de las emisiones de NOx, que consistieron en la modificación del diseño del sistema de aire y gases en la combustión de los generadores de vapor		x					

AÑO	ACCIONES	O <sub>3</sub>	NOx	CO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	PST-PM10	Pb
1996	Inicio el programa de Autorregulación industrial para reducir las emisiones de NOx y COV	x	x					
1996	PEMEX puso a la venta las gasolinas PEMEX Magna y PEMEX Premium, las cuales presentan una reducción de 50% en su límite máximo de contenido de azufre y es 5% menos reactiva en la formación de O <sub>3</sub> (IMP).	x	x	x	X	x		
1996	Se concluyó la fase 1 de instalación de Sistemas de Recuperación de Vapores (SRV-fase1) en tanques de almacenamiento y descarga de combustibles	x	x		x			
1996-2000	En el GEM se renovaron 52,608 unidades del transporte público	x	x	x	x			
1996-2000	Se mejoraron 13 vialidades existentes	x	x	x	x	x	x	
1996-2000	Operación del sistema de bombeo de agua para el riego por aspersión para mantener humedecida la zona del cerro de jales. Este sistema suministra el agua salobre a la espiral exterior del evaporador solar.						x	
1997	Acuerdo por el que los vehículos automotores pueden exentar el programa Hoy No Circula	x	x	x	x			
1997	Desapareció del mercado la gasolina con plomo Nova Plus en la ZMVM							x
1997	El Sistema de vigilancia de la Calidad de Combustibles estableció límites mensuales de hidrocarburos en gasolina y azufre en el Diesel.	x				x		
1997	En diciembre PEMEX sustituye el gasóleo Industrial con 2% de Azufre por un combustible con máximo 1% de azufre.		x			x	x	
1997	Introducción de transporte eléctrico para la distribución de refrescos y perecederos en el primer cuadro de la Ciudad	x	x	x	x	x	x	
1997	Se comenzó a distribuir la gasolina Pemex Magna Reformulada, continuando así en el programa de mejora de combustibles	x	x	x	x			
1997	Se eliminó el contenido de Pb en latas para alimentos, utensilios escolares, juguetes, y el uso de pinturas de base agua en vialidades y mobiliario urbano son acciones adoptadas para evitar la exposición a este contaminante.							x
1997	Se moderniza el Programa de Verificación Vehicular con la introducción de equipo BAR 97, iniciando la medición de NOx	x	x	x	x			
1998	El GEM otorgó ocho camiones tipo <i>Kodiak</i> dedicados de fábrica a gas LP a los municipios de Ecatepec, Coacalco, Cuautitlán, Texcoco y Tultitlán	x	x	x	x	x		
1998	Inicia el programa piloto de Gas Natural Comprimido (GNC) en vehículos de pasajeros y carga del GDF y del GEM					x	x	
1998	La última modificación realizada al Programa Hoy No Circula en el cual se indica las medidas de otorgar el holograma (0, doble 0, 1 y 2) a los vehículos	x	x	x	x			
1998	Se reforestó el Valle de México y la zona rural con más de 9.0 millones de árboles						x	
1998-1999	Con el programa de participación ciudadana se plantaron 2,205,481 plantas y como parte del programa de pavimentación permanente en colonias populares, los trabajos de bachéo en la red primaria del D.F. Además se reforzó la recuperación de la Sierra de Santa Catarina y la Sierra de Guadalupe y la recuperación de áreas lacustres de Tláhuac, Zumpango y Texcoco.						x	
1999	El GDF hizo entrega de 100 nuevos autobuses que se incorporarán al transporte público de pasajeros	x	x	x	x			
1999	El GEM entregó 92 patrullas ecológicas dedicadas de fábrica a gas natural comprimido a 18 municipios conurbados, en el marco del "Programa piloto de conversión y adquisición de unidades vehiculares que usen como combustible gas natural para probar bajo condiciones reales de manejo los beneficios de los combustibles alternos".					x	x	
1999	Inicia el Programa Integral de Reducción de Emisiones Contaminantes "PIREC", para sustituir los convertidores catalíticos en vehículos automotores modelo 1993.	x	x	x	x	x		

AÑO	ACCIONES	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	PST-PM10	Pb
1999	Se expidió la Ley Agrícola y Forestal y La Ley de Protección al Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Estado de México						x	
1999	Se incorporaron bicitaxis al servicio de transporte público en el Centro Histórico y en algunos municipios conurbados.	x	x	x	x	x	x	
1999	Se pone en operación la línea B del metro, en el tramo de Buena Vista a Villa de Aragón.	x	x	x	x			
2000	El gobierno de Francia otorgó recursos para la conversión al uso de GNC de 860 microbuses del transporte público de pasajeros del Distrito Federal, año-modelo 1992 y 1993	x	x		x	x		
2000	Se amplió el sistema de trolebuses con 200 nuevas unidades que fueron recibidas en Instalaciones de Servicios Eléctricos, mismas que gradualmente se irán incorporando a las rutas establecidas.	x	x	x	x	x		
2000	Se reforestó la Zona Chinampera, y se dio mantenimiento a la zona lacustre en Xochimilco						x	
2000	Se realizó la revista vehicular para vehículos de transporte público de pasajeros y de carga del DF	x	x	x	x			
2000	Termino de la primera etapa de la planta de tratamiento de aireación a contracorriente en el ex lago de Texcoco, y se comenzó el desasolve del lago Churubusco						x	
2000	Se pone en operación el segundo tramo de la línea B del metro, en el tramo de continentes a Ciudad Azteca.	x	x	x	x	x	x	
2001	En el Distrito Federal, se cuenta con 1,033 unidades a gas natural de uso intensivo					x	x	

FECHA	NORMAS	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	PST-PM10	Pb
1995	NOM-092-ECOL-1994 y NOM-093-ECOL-1994. Establecen la obligatoriedad de Instalar SRV en todas las gasolineras de la ZMVM, así como el método de prueba para verificar estos sistemas	x						
1997	NOM-001-SEDG-. Plantas de almacenamiento para gas LP Diseño y construcción	x						
1997	NOM-027-SEDG-1996. Controles primarios y controles programadores de seguridad contra falla de flama para quemadores de gas natural					x	x	
1997	NOM-EM-118-ECOL-1997. Establece las especificaciones que debe reunir el gas LP que se utiliza en las fuentes fijas ubicadas en la ZMVM, además de establecer la mezcla más adecuada de propano y butano	X						
1998	NOM-001-SECRE-1997. Calidad del gas natural					x	x	
1998	NOM-002-SECRE-1997. Instalaciones para el aprovechamiento de gas natural					x	x	
1998	NOM-003-SECRE-1997. Distribución de gas natural					x	X	
1998	NOM-005-SECRE-1997. Gas natural y estaciones de servicio					x	x	
1998	NOM-105-ECOL-1996. Aplicación de niveles de emisión más estrictos para óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre y partículas provenientes del sector industrial (NOM-085-ECOL-1994)		x			x	x	
1998	NOM-117-ECOL-1998 Establece las especificaciones de protección ambiental para la instalación y mantenimiento de los sistemas para el transporte y distribución de hidrocarburos y petroquímicos	x				x	x	

FECHA	NORMAS	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	PST-PM10	Pb
1998	NOM-121-ECOL-1998. Establece los límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera provenientes de las operaciones de recubrimiento de carrocerías, unidades de uso múltiple, carga y camiones ligeros	x	x		x	x	x	
1999	NOM-002-SEDG-1999. Bodegas de distribución de gas LP en recipientes portátiles. Diseño, construcción y operación	x						
1999	NOM-042-ECOL-1999. Vehículos automotores nuevos en planta con peso bruto vehicular que no exceda los 3,856 kilogramos					x	x	
1999	NOM-047-ECOL-1999. Establece las características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes provenientes de los vehículos	x	x	x	x	x	x	
1999	NOM-123-ECOL-1998. Establece el contenido permisible de COV's en la fabricación de pintura	x						
1999	NOM-EM-001-SEDG-1999. Valoración de las condiciones de seguridad de los vehículos que transportan, suministran y distribuyen gas LP	x						
1999	NOM-EM-041-ECOL-1999. Establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible	x	x	x	x			
1999	NOM-EM-128-ECOL-1998. Establece los límites máximos permisibles de emisión de HC no quemados, CO, NO <sub>x</sub> y PST, provenientes del escape de automóviles y camiones nuevos en planta	x	x	x	x		x	
1999	NOM-EM-132-ECOL-1998. Establece de manera obligatoria el procedimiento de aceleración simulada en todos los vehículos en circulación que son definidos como operables en el dinamómetro	x	x	x	x	x		
1999	PROY-NOM-009-SECRE-1999. Monitoreo, detección y clasificación de fugas de gas natural en ductos					x	x	
1999	PROY-NOM-124-ECOL-1999 Especificaciones de protección ambiental para el diseño, construcción, operación, seguridad y mantenimiento de los diferentes tipos de estaciones de servicio	x						
2000	NOM-007-SECRE-1999. Transporte de gas natural.	x	x	x	x	x	x	
2000	NOM-011/1-SEDG-1999. Condiciones de seguridad de los recipientes portátiles para contener gas LP en uso	x						

## 9.2 LOS ÁNGELES, CALIFORNIA (SoCAB)

La zona metropolitana de Los Ángeles tiene uno de los mejores sistemas de monitoreo y ha sido líder en la implementación de estrategias para el control de la contaminación. En la siguiente sección se describe el manejo de una manera somera de las estrategias de control.

### *Programas para el manejo de la calidad del aire antes de 1970:*

Los factores sociales, científicos y tecnológicos jugaron un papel importante para regular y controlar la contaminación. Entre 1940 y 1950, el control de la contaminación del aire se enfocó en las fuentes evidentes, como las quemaduras en traspatios e incineraciones, quema a cielo abierto de la basura, y humo de las emisiones de fábricas. Estas medidas redujeron las partículas en dos tercios de emisiones. El programa alternativo de recolección de basura fue finalmente establecido en 1958, más de una década después de que la quema de traspatio fuera identificada como un problema ambiental de la Ciudad (AQMD, 1997).

En 1953, Los Ángeles Air Pollution Control District (APCD) comenzó con la reducción y control de las emisiones de hidrocarburos de los tanques de almacenamiento de la gasolina industrial. Reglas subsecuentes redujeron las emisiones de hidrocarburos en los camiones de almacenamiento y en los tanques bajo tierra en las gasolineras. En 1978 se requirieron mangas en las boquillas de succión en las bombas de gasolina para controlar los gases que se escapan durante el llenado de los vehículos.

Durante los 50's y 60's, los funcionarios de la Southern California Air Quality implementaron el uso de un equipo de recuperación de gases para transferir la gasolina a los tanques de los vehículos, se regularon los solventes derivados del petróleo, etcétera. Las regulaciones sobre la calidad del aire redujeron significativamente estas emisiones, sin embargo en Los Ángeles se registraron los niveles más altos de las concentraciones de ozono, llegando inclusive 4 veces por arriba del estándar. El rápido crecimiento de automóviles fue la mayor causa de que el problema de contaminación continuara.

### *De 1970 al Presente: Desarrollo Regional del control de la Calidad del Aire:*

En los primeros años de los 70's, Residentes y funcionarios responsables de la calidad del aire de los condados de San Bernardino y Riverside (al este de Los Ángeles), se encontraban descontentos con los esfuerzos realizados por sus vecinos de los condados del oeste Los Ángeles y Orange. Ya que la mayor parte de la contaminación del aire provenía de los vehículos e industrias de estos condados y aunado a las condiciones meteorológicas, en las cuales la brisa sopla tierra adentro transportando la contaminación a los residentes de los condados de San Bernardino y Riverside sufriendo estos los efectos de la bruma de contaminación (smog). El conflicto regional estimula la creación de una agencia de control de la contaminación que abarcara los 4 condados. Esto tomó más de 5 años de batallas políticas que hicieron de esta idea una realidad.

En 1973, el gobierno regional intentó consolidar programas voluntarios de control de contaminación. Sin embargo, sin una aplicación por parte de la autoridad, éste falló. Finalmente en 1977, se creó la "South Coast Air Quality Management District (SCAQMD)", para fusionar los programas de los 4 condados –Los Ángeles, Orange y parte de Riverside y San Bernardino– que componen el área metropolitana de Los Ángeles. Esta área urbana tiene 15 millones de personas, cerca de la mitad de la población de todo el estado de California. Es la segunda área urbana más poblada de los Estados Unidos (Website of California Air Resources Board).

#### *Instituciones Administrativas de la Calidad del Aire en Los Ángeles Air Basin:*

La South Coast Air Management District, consiste de un panel de 12 miembros establecidos por el Gobernador, Senadores y Asamblea como representantes de las ciudades y condados. El costo de operación del Panel es cubierto por las industrias. El Panel fue autorizado para desarrollar regulaciones de fuentes fijas y asignar multas por arriba de los \$25,000 dólares por día por violación. Así, los grandes contaminadores pagan la mayor parte del fondo para controlar la contaminación ambiental. Así mismo las empresas pagan una cuota anual para el permiso de operación.

Sin embargo, el mayor problema de contaminación de la región es por los vehículos, a principios de 1991 se realizó un cargo a los vehículos por el registro. El cargo consistía de: \$4 dólares por vehículo como pago estatal y \$1 dólar como pago al condado. El dólar y el 30% de los 4 dólares se utilizan para la investigación, e implementación de combustibles limpios y programas que reduzcan las emisiones vehiculares.

A mediados de 1990 La "Federal Clean Air Act" (La Acta Federal de Aire Limpio) inicia un programa para un nuevo Plan Estatal de Implementación (SIP, por sus siglas en inglés), el cual es propuesto por la CARB (California Air Resources Board) en 1994 y es aprobado por la EPA en 1996. Con el Plan Estatal de Implementación (SIP), la evaluación y la reducción de emisiones son requeridas para cumplir con los estándares federales del aire y deben ser aplicados a nivel estatal y local dentro de sus metas ambientales.

#### *Estrategias de Control:*

De 1970 a 1990, el SIP planteó actividades y compromisos que deben desarrollar las agencias ambientales a escala estatal y local para reducir las emisiones.

**Control de la Contaminación por Vehículos Automotores.** La legislación de California establece desde 1959 que los vehículos deben presentar pruebas de emisiones y certificar el dispositivo de control de emisiones. En 1961, se utilizó por primera vez la tecnología para el control de emisiones en automóviles, el dispositivo de ventilación del cárter del cigüeñal (PCV-Positive Crankcase Ventilation, por sus siglas en inglés), y este se estableció en California en forma obligatoria para el control de emisiones de hidrocarburos del cárter del cigüeñal.

En 1966, California impuso la primera regulación sobre los escapes de emisiones de vehículos de combustión interna para hidrocarburos y monóxido de carbono –el primero de su clase para EUA–. La policía de tránsito en California comenzó la inspección de los vehículos con un dispositivo de medición de gases contaminantes.

En 1975, aparecieron los primeros convertidores catalíticos de 2 vías que empezaron a utilizarse como parte del programa de control de emisiones para vehículos automotores. Este es el dispositivo más significativo de control de contaminación y es el primer ejemplo de regulación de “tecnología - forzada”, obligando a la industria a desarrollar nuevos controles de contaminación con mayor capacidad con fecha límite. En 1977, fue introducido el primer convertidor catalítico de 3 vías para el control de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono.

A finales de los 70's, Los Ángeles y el resto del estado requirió de la inspección vehicular para asegurar que los equipos de control de la contaminación operaran adecuadamente. Este programa desarrolla en California el “SmogCheck” en 1984. Aplicando el método proporcionado por "Bureau of Automotive Repair" (BAR), el programa identificaba los vehículos que necesitaban de mantenimiento y aseguraba la efectividad del sistema de control de emisiones bianualmente. En 1994 el “SmogCheck II” fue introducido dentro de los reglamentos. El objetivo de este programa, era identificar los vehículos que contaminaban y si éste estaba entre 2 a 25 veces por arriba del promedio de emisión estimada, el vehículo requería mantenimiento y tenía que volver a presentar la prueba, como vehículo no apto.

En los 90's, la CARB adoptó regulaciones efectivas a partir de los carros modelo 1994, se requeriría de un equipo con un sistema de computadora a bordo de diagnóstico (OBD, por sus siglas en inglés) para monitorear y mejorar las emisiones, así como alertar a los propietarios cuando hubiera un problema. A partir de 1996 todos los vehículos de todo tipo fueron equipados con el sistema OBD II (por sus siglas en inglés). Este sistema permite que se mejore y asegure que las emisiones sean lo más limpias posibles, además que es más fácil para los técnicos y el diagnóstico. El uso de este tipo de sistemas resuelve los problemas del carro más eficientemente.

En 1990, CARB aprobó estándares de uso de combustibles limpios y bajo en emisiones vehiculares. En 1999, La agencia corrigió y adoptó la regulación vehicular de bajas emisiones, conocida como LEVII (Low Emission Vehicles por sus siglas en inglés). Los estándares establecidos en California son los más estrictos que existen en la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés). Así mismo, se establecieron regulaciones para controlar las emisiones en buques.

En 1998, La CARB identificó ciertas partículas que se emiten por el uso del Diesel como contaminantes tóxicos del aire (TOC-Toxics Organic Contaminants, por sus siglas en inglés). Por lo que se desarrolló el Plan de Reducción de Riesgo por uso de Diesel con el fin de reducir sus emisiones en fuentes estacionarias y en vehículos, uno de los puntos importantes del programa es reducir las emisiones particuladas por diesel a cero, en el menor tiempo

posible. El programa tiene prioridades y severas medidas de control, así como en combustibles bajos en azufre, junto con catalizadores basados en filtros o trampas para las partículas emitidas por diesel y otra tecnología alternativa viable y mejora de combustibles.

**Control de Combustibles.** En los 60's, se tomaron los primeros pasos para la elaboración de combustibles vehiculares. A principios de 1970, el gobierno federal retiró el plomo de las gasolinas. Como resultado de esta medida los niveles de plomo en Los Ángeles no han excedido la norma de salud desde 1982.

La CARB fue la pionera en programas para las especificaciones en combustibles desde 1977 en respuesta la adopción de un estándar estatal para Presión de Vapores Reid (RVP). Otras regulaciones fueron adaptadas modificando las propiedades químicas de la gasolina, tales como los límites para plomo, azufre, fósforo, manganeso, como el contenido de azufre en el combustible del diesel del sur de California.

En 1991, California aplicó la Fase I de Reformulación de Gasolina. Aquí se requirió la eliminación del plomo, se adicionaron compuestos oxigenados durante los meses de invierno y el control del depósito de aditivos. En 1993 se enfocaron a los vehículos a diesel, limitando el contenido de hidrocarburos aromático y azufre.

En 1996, la Fase II de Reformulación de Gasolina (conocida como limpieza de la combustión por gasolina, CBG, por sus siglas en inglés) fue aplicada dentro del mercado. Se ha calculado que el uso de nuevas gasolinas en la flota vehicular de California a tenido el efecto, como si se hubieran retirado de circulación 3.5 millones de vehículos. La reducción de emisiones esta acompañada por la reducción de ciertos componentes (RVP y azufre); el uso de compuestos oxigenados durante todo el año; y la regulación de componentes adicionales (Benceno, aromáticos totales, olefinas).

**Combustibles y Vehículos Limpios.** En 1990, la CARB adoptó ciertas regulaciones enfocadas a vehículos automotores y combustibles. La agencia lanzó estos programas de emisiones bajas y emisiones cero para vehículos, requirió de los fabricantes de vehículos el desarrollo de autos limpios, tales como vehículos eléctricos (cero emisiones) para 1998. Sin embargo este requerimiento fue pospuesto hasta 2003, permitiendo a los fabricantes tiempo suficiente para implementar la tecnología que se requiere.

**Productos de Consumo.** En 1998, la CARB mejoró la regulación para maquinas para uso diverso que no son transporte, como las podadoras de césped, podadoras de hierbas y otras herramientas de este tipo, en 1999 adoptó una nueva regulación para reducir más del 70% las emisiones precursoras del smog por los cilindros de gas LP. Se adoptaron reglas en los productos de consumo, para cortar y disminuir las emisiones los compuestos orgánicos volátiles (COV's) en un estimado de 2,500 productos de uso doméstico.

**Incentivos Mercantiles.** En 1993, la SCAQMD adoptó el Programa de Incentivos mercantiles para aire limpio Regional (RECLAIM, por sus siglas en inglés), el cual impuso una serie de límites de emisión para cada región otorgando grandes recursos económicos. Los límites de emisión se hacían más estrictos cada año. Las empresas

tienen la libertad de seleccionar la tecnología que deseen para reducir las emisiones, dándoles la flexibilidad de seleccionar el método que les proporcione la mejor solución costo-efectividad. Si una empresa reducía sus emisiones por abajo del límite señalado en un año, ésta ganaba créditos que podían ser cambiados o vendidos a otra empresa que no cumplía o fallaba en la meta de ese año. A principios de 1997, más de \$30 millones de dólares en créditos habían sido vendidos y las metas de reducción de emisiones se habían cumplido.

La SCAQMD esta expandiendo este programa de incentivos a otros tipos de fuentes de contaminación incluyendo a los calentadores de agua para uso doméstico.

La CARB tienen un plan de incentivos para introducir vehículos pesados a diesel y acelerar la renovación de la flota vehicular incrementando autos de emisiones bajas. En 2000 California introdujo el programa de subsidios para desechar todos los vehículos viejos y los que fallan constantemente en los programas de inspección.

**Creación de Tecnologías Modernas.** En 1988, la SCAQMD estableció la oficina de nuevas tecnologías, con la finalidad de ayudar el desarrollo acelerado de tecnologías que ayuden a la industria para obtener emisiones tendientes a emisión cero. Esto incluye: Foto celdas, vehículos eléctricos, pinturas y solventes con COV's en tasa cero, sensores remotos, combustibles alternos para vehículos de carga pesada y locomotoras y la reformulación de productos que se utilizan para cocinar al aire libre (AQCD, 1997).

#### *Las decisiones que han hecho progresar:*

A pesar de los problemas políticos a los que se han enfrentado en California han sabido darle la importancia al control de la contaminación sobre los intereses políticos y esto ha hecho que hayan progresado de manera conjunta, en California no se han interpuesto intereses personales y políticos sobre la salud de los habitantes. El problema más grave al que se han enfrentado es con la política a escala federal, los cuales consideran como "bueno" el esfuerzo del estado, sin considerar el costo - beneficio asociado que se ha tenido, y se ha contado con el federalismo en medio ambiente.

El gobernador y los directivos de las agencias ambientales han jugado un papel muy importante en el sistema político de California. La agencia de Ambiental de California ("The California Air Resources Board" – CARB) es una de las agencias más poderosas. Es una agencia efectiva con una fuente de recursos económicos independientes y es fuerte políticamente; siendo apoyada por la opinión pública.

Los grupos de presión han incrementado la importancia de la contaminación del aire sobre la política. Existen tres fracciones dentro de los grupos de presión: Empresas (especialmente el área relacionada con los fabricantes de autos y talleres de servicio y la industria del petróleo); Las compañías utilitarias y grupos de interés público (ambos basados en calidad ambiental, salud pública y medio ambiente). El efecto de los grupos de interés público crece y mengua según el clima político o interés público de ese momento, pero la presión sobre el grupo de empresarios es constante, su presión se basa en las regulaciones ambientales y su competitividad. Los grupos de

interés público se han enfocado ha incrementar el interés de las personas sobre el ambiente y su salud. La población ha tenido un peso importante sobre la agenda legislativa en el tema ambiental, ha financiado y publicado este tema logrando un gran éxito. Las recesiones económicas que ha sufrido Estados Unidos en los 80's y 90's han tenido un pequeño efecto sobre los programas ambientales por el apoyo de la población. Asociaciones como club Sierra, la Asociación Americana sobre el Pulmón y el Consejo sobre la Defensa de los Recursos Naturales son un ejemplo de las organizaciones con gran influencia y como grupos de presión importantes (Molina M. et al, 2002).

### **Resultados y Consecuencias del Consejo para el Aire en Los Ángeles.**

El esfuerzo en la regulación de la contaminación en Los Ángeles se ha visto reflejada en el cambio que se ha tenido en la evaluación que da la Agencia de Protección al Ambiente en Estados Unidos (USEPA) al cambiar de zona "no cumple" a zona que "cumple" en cuanto al SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y plomo. Otros programas que no han sido tan efectivos son la disminución de los picos de Ozono que se ha bajado en un 50% en comparación con los registrados en los 60's. Se ha tenido un progreso significativo en la reducción de partículas depositados por gravedad, el cual era de más de 100 toneladas por milla cuadrada por mes.

## X. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El resultado específico del análisis de tendencia de los niveles de ozono depende en gran medida del periodo de tiempo analizado, por lo cual es muy fácil obtener decrementos en la concentración de ozono en la atmósfera de la ZMCM, si analizamos exclusivamente la evolución de la calidad del aire a partir de 1990. Por lo anterior es necesario evaluar la evolución de la contaminación atmosférica por ozono desde mediados de los años 80s, debido a que en esta época se presentó un drástico incremento en los niveles de ozono.

### 10.1 DISCUSIÓN REFERENTE A LA ZMCM

Los niveles de ozono hasta la fecha continúan rebasando la Norma Mexicana de Calidad del Aire (nmca) y esto se observa en los siguientes hallazgos:

#### 10.1.1 Tendencia

En la ZMCM en el periodo de 1986 a 2000, por el tipo de comportamiento que presentan las concentraciones de ozono, donde desde los primeros años de 1986 a 1991 se incrementan. Y de 1992 a 2000 se observa un comportamiento decreciente de las mismas, no se encontró tendencia en la mayoría de las estaciones, con excepción de la estación Pedregal que presentó una tendencia decreciente significativa y una tasa de cambio de 30.21%.

Para evaluar correctamente la tendencia se analizaron dos periodos, de 1986 a 1991 y de 1991 a 2000; en el primer periodo 3 estaciones mostraron tendencia creciente significativa. En la estación del CCA, donde existe información desde 1984, al aplicar la prueba estadística (Mann-Kendall) se presentó una tasa de incremento de **152.5%** teniendo inicialmente una concentración del TOP 30 de 0.147 ppm en 1984 a un valor de 0.348 ppm en 1992. En el segundo periodo, en todas las estaciones se encontró un comportamiento homogéneo y una tendencia decreciente significativa, con un porcentaje promedio de la tasa de cambio de 28.18%. Este resultado muestra que en los últimos 10 años se ha presentado una disminución en las concentraciones de ozono en la ZMCM (que aun están por arriba de lo establecido por la nmca para Ozono).

Los indicadores 2° máximo anual y 4° máximo trianual en todas las estaciones fueron mayores al límite que establece la Norma de Calidad del Aire, lo anterior da como resultado que no se cumpla con el límite de 0.11 ppm que señala la nmca para Ozono. En cuanto a la tendencia de estos indicadores el segundo máximo presenta el mismo comportamiento que el indicador TOP-30, solo dos estaciones tienen tendencia decreciente significativa con una tasa de decremento promedio de 24.5%; al realizar los dos cortes 3 estaciones (MER, PLA y CCA) muestran una tendencia creciente significativa con un 202.79% para CCA en el periodo 1984 a 1991

reafirmando lo encontrado con el TOP-30 y a partir de 1991 todas las estaciones presentan comportamiento homogéneo y tendencia decreciente significativa con un promedio de decremento del 30%.

El 4° máximo trianual, presenta un comportamiento suavizado, donde 5 de las 7 estaciones tienen tendencia decreciente significativa durante los 14 años de estudio con un promedio de la tasa de decremento del 29 %, es el único indicador que permite obtener una tendencia a lo largo del periodo, ya que la cresta de 1991 no es tan marcada.

Una precisión mayor año con año, se obtuvo aplicando la prueba de Wilcoxon presentando en los primeros años de 1986 a 1991 en la mayoría de las estaciones, una diferencia significativa creciente en los promedios máximos diarios en años consecutivos. En los últimos 5 años en 3 estaciones (CCA, CES y MER) se presentó un decremento significativo, sin embargo para TLA, PLA, PED no hubo diferencia significativa mientras que en XAL se se presentó un incremento. El caso de PED y PLA tiende a estabilizarse ya que desde 1998 a 2000 no se presentaron cambios significativos en las concentraciones medidas.

### **10.1.2 Violaciones a la norma**

La tendencia de las violaciones a la norma en la ZMCM es homogénea y con una tasa de cambio de "0", esto significa que a pesar de todos los esfuerzos realizados para disminuir las concentraciones de ozono, no han logrado reducir las violaciones a la nmca, mostrando que durante el periodo (1988-2000) la calidad del aire ha sido mala. Con más del 80% de los días al año presentando un riesgo para la salud de la población. Lo anterior también se ve reflejado al evaluar los indicadores 2° máximo anual y 4° máximo trianual, no cumpliéndose con la normatividad correspondiente, durante los 15 años de estudio.

Al comparar las violaciones a la norma de calidad del aire (0.110 ppm promedio horario máximo) y con la Norma de Calidad de Aire propuesta que considera el promedio móvil de 8 horas (0.080 ppm), se observa una estrecha asociación entre ambos indicadores. Del 100% de días que se rebasa el valor límite permisible de 0.110 ppm, el 92 % de estos sobrepasan el límite de 0.080 como promedio móvil de 8 horas. Esto significa que la mayoría de los días con violaciones a la norma de calidad de aire, la población tiene una exposición de 8 horas diarias a concentraciones de ozono que afectan a la salud.

Del análisis de la información durante los días de la semana, se encontró que los fines de semana son los días con menores niveles de concentración, no importando la época del año. De todos los días que conforman la semana el domingo es el que presenta menos días en los que se rebasa el valor de la nmca, y se explica por la reducción de actividades industriales y de transporte. En cuanto a los meses del año, mayo es el que presenta mayor número de días arriba de la norma y septiembre el que presenta el menor. Este comportamiento esta

estrechamente relacionado con la meteorología, ya que en mayo se presentan las temperaturas más altas y septiembre es el mes con mayor porcentaje de humedad relativa y precipitación.

### **10.1.3 Efecto Pistón**

El efecto pistón se presentó en las 6 estaciones de la ZMCM, observándose claramente la disminución de las concentraciones elevadas en los intervalos mayores a 0.201 ppm. Este comportamiento explica porque se ha reducido la aplicación del programa de contingencias ambientales, por otro lado, se observa un incremento de las concentraciones medias en los intervalos de 0.051 a 0.170 ppm en la mayoría de las 6 estaciones. En la estación Xalostoc se observó un incremento en el rango de 0.111 a 0.170, mientras en Tlalnepantla presenta una disminución notable en todos los intervalos, con un pequeño incremento en el intervalo de 0.051 a 0.080 que es el más pequeño de las 6 estaciones estudiadas, notándose una variación importante entre estas dos zonas industriales al norte de la ZMCM.

## **10.2 DISCUSIÓN REFERENTE A LOS ÁNGELES (South Coast Air Basin)**

### **10.2.1 Tendencia**

Los resultados obtenidos para la SoCAB, mostrando un decremento desde el inicio del periodo de prueba 1986 hasta 2000 para el indicador TOP-30 una tendencia decreciente significativa, con un promedio en la tasa de cambio para las 6 estaciones de 45.5%, esto significa que han disminuido las concentraciones de ozono en casi un 50%, y llegando las concentraciones de ozono en el año 2000 muy cerca del valor que establece la norma nacional de los Estados Unidos de 0.12 ppm.

Considerando los datos para los niveles de ozono de la SoCAB no cumplen con el valor de la Norma Nacional de Estados Unidos (0.12 ppm), ni el de la Norma Local para California (0.09 ppm), por lo que la USEPA ha considerado a la SoCAB como una "nonattainment area" que significa una zona que no cumple con la norma de calidad del aire en Estados Unidos. La USEPA ha dado fecha límite el año 2010, para que esta zona cumpla con la Norma de Calidad del Aire para Ozono.

Los indicadores 2° máximo diario y 4° máximo trianual en todas las estaciones fue mayor a la Norma de Calidad del Aire, al igual que en el caso de periodo de tres años, dando como resultado el incumplimiento, tanto de la norma de calidad del aire federal (0.12 ppm) como local (0.09 ppm) para el ozono.

### **10.2.2 Violaciones a la norma**

Las violaciones a la Norma Local de Calidad del Aire para Ozono en California de 0.09 y la Norma Nacional de Calidad del Aire para Ozono de 0.12 ppm se encontró tendencia con la misma tasa de cambio, esto significa un decremento de 0.33 en las concentraciones, mostrando que si hay una disminución significativa en las violaciones a las dos normas, durante el periodo de tiempo estudiado.

Al comparar las violaciones a las normas de una hora cuyo límite es de 0.09 ppm y 0.12 ppm contra el límite de 0.080 como promedio móvil de 8 horas, se observa una estrecha correlación entre estos indicadores, teniendo un 0.97 de correlación significativa. El verano es la época más crítica para ambos límites y cuando se presentan concentraciones altas la mayoría son de gran duración, teniendo un 77% de los días del verano con exposiciones de 8 o más horas a concentraciones dañinas a la salud.

Del análisis de la información durante los días de la semana, se encontró que los fines de semana son los días con mayores niveles de concentración, diferenciando claramente la época del año. De todos los días que conforman la semana el sábado y domingo son los que presentan mayor número de violaciones a la norma, este fenómeno ha originado una serie de estudios en la SoCAB determinando que el cambio de las emisiones por las actividades antropogénicas incrementan la emisión de compuestos orgánicos reactivos (COR) a óxidos de Nitrógeno NO<sub>x</sub> a más del 30%. El verano es claramente la época crítica tanto por ser la duración de la radiación solar mayor, como por las actividades culturales y de comportamiento de la población en California.

### **10.2.3 Efecto Pistón**

Con lo que respecta al efecto pistón, este no tiene un comportamiento como tal en las 6 estaciones de la SoCAB, ya que al parecer las estrategias de control han sido efectivas al disminuir las concentraciones en todos los intervalos, tanto los niveles altos como los intermedios. Y el incremento en la frecuencia de concentraciones se encuentra en el intervalo de 0.011 a 0.090 ppm de concentraciones menores a la norma de calidad del aire para California.

Algunas investigaciones indican que los niveles horarios de ozono en la atmósfera son reducidos por algunas estrategias de control a diferente velocidad dependiendo del intervalo de concentración en que se encuentren. Por ejemplo se ha observado que los valores elevados de concentraciones de ozono son reducidos más fácilmente en comparación con los valores intermedio o bajos (Lefohn et al., 1998). Esta observación del incremento de la resistencia en los niveles intermedios de las concentraciones promedios horarios en comparación con los niveles altos, es similar a la resistencia de un gas cuando es comprimido por un pistón. Aunque la resistencia inicial es baja, esta se incrementa conforme el efecto pistón comprime el gas (Lefohn 1997).

El efecto pistón se presenta ligeramente en la estación "pedregal" de la ZMCM, siendo notable un incremento en las concentraciones horarias de ozono en el intervalo 0.060 a 0.210 ppm

### 10.3 DISCUSIÓN DE LA COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES EN LA ZMCM Y LOS ÁNGELES (SoCAB)

Existen algunas similitudes entre las dos ciudades, sin embargo sus diferencias pueden ser fundamentales para la implementación de estrategias de control, como son: las político-económicas, culturales y sociales entre LA y ZMCM y en las cuales difieren enormemente.

En México es importante reconocer que no existen soluciones ni medidas correctivas únicas, que las acciones de control pueden y deben ser aditivas, no se deben excluir unas a otras, ya que ninguna sustituye a la otra, a pesar que parece que su eficiencia es baja, la suma de todas ellas podrá mejorar definitivamente la calidad del aire.

A pesar de todos los esfuerzos económicos, técnicos, políticos para disminuir la contaminación del aire en la ZMCM, se siguen presentando días que rebasan el valor límite permisible de la norma de calidad del aire para ozono con más del 80% de los días al año, y como se muestra en los resultados por el "Efecto Pistón", las concentraciones de ozono en la atmósfera se reducen en forma diferenciada dependiendo al intervalo de concentración donde se encuentres, esto es, si son valores altos de concentración de ozono se reducen fácilmente en comparación con los niveles intermedios de concentración. Por ejemplo si analizamos el número de veces en las que en estos últimos años se ha aplicado el programa de contingencias ambientales se observa que va en decremento (dependiendo también de la definición de contingencia y los niveles para declararla).

La SoCAB ha invertido mucho dinero en sus estrategias de control, comparando el mismo periodo de estudio con la ZMCM, se encontró que en 1986 cuando presentaban el 60% de violaciones a su norma local (0.09 ppm), en el año 2000 las disminuyeron a 31%, que se traduce en un decremento del 50%. En el caso de la ZMCM en 1986 presentaba un 56% de violaciones a la norma de calidad del aire (0.110 ppm), en el 2000 llegaron al 89%, con un incremento del 32%. Si solo se toma en cuenta el periodo a partir de 1991, año en el que se comenzó con la aplicación de las estrategias de control encontramos una reducción en las violaciones a la norma para la SoCAB del 19% y para la ZMCM del 5%, sus estrategias de control reducen 14% más los días en los que se rebasa el valor límite permisible en el mismo periodo; así mismo hay una tendencia decreciente en las concentraciones de ozono con un porcentaje de decremento del 45.5% comparado con el 28% de la ZMCM durante el periodo de 1990 a 2000. En el caso de la SoCAB el resultado del "Efecto Pistón" muestra claramente que sus estrategias han sido eficientes al disminuir las concentraciones altas y medias, contrario a lo que ocurre en la ZMCM, donde solo se han logrado disminuir las concentraciones altas.

## XI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 11.1 CONCLUSIONES

Del análisis de las concentraciones de ozono para la ZMCM en el período comprendido de 1986 a 1991, se observa en todas las estaciones una tendencia creciente, sin embargo sólo en 3 estaciones (PLA, TLA y CCA) se encontró un resultado significativo, siendo la estación del CCA la que mayor incremento presentó con **152.5%**. Este comportamiento creciente de los niveles de ozono, está asociado con el cambio en la formulación de las gasolinas y la sustitución de combustóleo por gas natural en las Termoeléctricas, ambas medidas se llevaron a cabo en este periodo.

En el segundo periodo que comprende de 1991 a 2000, en todas las estaciones se encontró una tendencia decreciente significativa, con un porcentaje promedio de la tasa de cambio de 28.18%. Este resultado demuestra que las medidas de control adoptadas por el gobierno desde el inicio de los 90's como el "hoy no circula", la verificación vehicular, uso del convertidor catalítico en vehículos, etcétera, pueden haber incidido en la disminución de los niveles del ozono.

Por otro lado la tendencia de las violaciones a la norma de calidad del aire para ozono en la ZMCM es homogénea y con una tasa de cambio de "0", esto significa que el número de días en los cuales se rebasó el valor de la norma para ozono desde 1988 ha sido prácticamente el mismo, con más del 80% de los días al año. Por lo tanto los resultados muestran que las estrategias de control que se han aplicado para disminuir las concentraciones de ozono no han sido lo suficientemente eficientes, a pesar de que los niveles de ozono decrecieron en los últimos años, como se observa en la tendencia, las violaciones a su norma de calidad del aire para no han disminuido durante todo el periodo (1986-2000) y la calidad del aire ha sido mala.

Lo anteriormente expuesto se confirma al aplicar el método denominado "Efecto Pistón", desarrollado por Lefohn y donde se muestra claramente como las estrategias de control han logrado disminuir las concentraciones altas o picos (en los intervalos mayores a 0.201 ppm) mientras que las concentraciones medias entre 0.051 y 0.170 ppm han aumentado, esta evaluación explica porque se ha reducido el número de días en los cuales ha sido necesario aplicar el programa de contingencias ambientales.

Del análisis de las concentraciones de ozono para la Ciudad de los Ángeles, durante todo el periodo de prueba (1986 - 2000) se observó una tendencia decreciente significativa para todos sus indicadores con un promedio cercano al 50%, esto significa que en 14 años disminuyeron un 50% las concentraciones de ozono, llegando estas concentraciones en el año 2000 a valores muy cercanos a lo que establece su norma nacional. Lo anterior debido a las medidas de control que se han aplicado durante estos años.

En cuanto a la tendencia de las violaciones a la norma de calidad del aire local para el estado de California y la norma nacional, se tiene la misma tasa de cambio, con un decremento significativo del 33% en las violaciones para ambas normas durante el periodo de tiempo estudiado. El verano es sin duda la época más crítica en la Ciudad de Los Ángeles, al rebasarse ambas normas de calidad del aire, sin embargo en promedio durante los 14 años de estudio tenemos que se rebasa en un 46% la norma de calidad del aire local y en un 31% la norma de calidad del aire nacional.

Es evidente que esta zona de los Estados Unidos es una de las más críticas en contaminación del aire, sin embargo se ha logrado disminuir los niveles de concentración, así como el número de horas y días en los cuales se rebasan las normas de calidad del aire para Ozono.

La aplicación del método denominado "efecto pistón" muestra claramente como sus estrategias han sido eficientes al disminuir las concentraciones altas y medias (en los intervalos mayores a 0.051 ppm) y por lo tanto dicho comportamiento no se presentó.

La diferencia entre la ZMCM y la Ciudad de Los Ángeles se debe principalmente a que las medidas de control que se han aplicado en Los Ángeles son más eficientes que las aplicadas en la Ciudad de México, ya que sus estrategias de control han disminuido 19% los días en los cuales se rebasa la norma de calidad del aire, con un decremento del 45.5 % en los niveles de ozono; mientras que para la ZMCM se presenta una reducción del 5% en el número de días por arriba de la norma y un decremento del 28% en las concentraciones de ozono, durante el periodo 1991 a 2000.

El incremento dramático en los niveles de ozono en la atmósfera de la ZMCM se dio en un periodo de tiempo muy corto (mediados de 1986) y por la aplicación de medidas tendientes a reducir otros contaminantes atmosféricos, por lo cual para una solución adecuada a este problema se debe de reconocer y entender su origen.

En México las estrategias de reducción de contaminantes deben adoptar medidas de corto, mediano y largo plazo, que permitan evaluar separadamente y en conjunto la eficiencia de cada una, y dar continuidad a los programas que hayan probado su beneficio, así como incorporar estrategias contundentes que den como resultado una mejor calidad del aire para los habitantes.

## 11.2 RECOMENDACIONES

- Tomar en cuenta los avances en el mejoramiento de la calidad del aire por ozono en la Ciudad de Los Ángeles, incorporando estrategias como el uso de combustible adecuados para las condiciones específicas de la ZMCM.
- Llevar a cabo estudios de reactividad fotoquímica de la ZMCM y que esto sirva como base en la toma de decisiones sobre estrategias de control.
- Establecer un programa de control de calidad de la información de calidad del aire que se genera día con día en la ZMCM.
- Evaluar y depurar la información histórica de la calidad del aire en la ZMCM.
- Incorporar los datos existentes generados por estaciones diferentes al GDF, en la base de datos de la calidad del aire en la ZMCM.
- Poner atención en el "Efecto Pistón" observado en la ZMCM y su posible implicación en la aplicación y evaluación de estrategias de control.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Aldana P. T, Bravo A H, Espinosa R M, Sosa E R, Tolivia M E, Torres B R, “Problemática de la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México”. Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, A.C., Año XL, Vol. (5-6), Mayo-Junio 1999.
- Aldana P. T, Bravo A H, Espinosa R M, Sosa E R, Tolivia M E, Torres B R, “Recomendaciones para mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México”.
- AQMD (Los Angeles County Air Pollution Control District). "The Southland's War on Smog: Fifty Years of Progress Toward Clean Air". Published May 1997. <<http://www.aqmd.gov/news1/marchcov.html>>
- Barnett V. “Statistics for the Environment” John Wiley & Son. New York. 1993.
- Blumenthal L.D., White H.W. and Smith B.T., “Anatomy of a Los Angeles Smog Episode: Pollutant Transport in the Daytime Sea Breeze Regime”, Atmospheric Environment, Vol. 12: 893-907, 1978.
- Bravo A H., Magaña R. "The actual air pollution in Mexico City. Staub-Reinhalt. Luft: No. 11. ". 1979
- Bravo A H., Perrin F. Sosa R y Torres R. “ Incremento de la contaminación atmosférica por ozono en la zona metropolitana de la Ciudad de México”, 1986.
- Bravo A H., Perrin F. Sosa R y Torres R. "contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: ocurrencia y estrategias de control". Boletín GEOS: 7(1), pp3-9. 1987.
- Bravo A H., Camacho C.R., Sosda E. R., Torres J.R.. "Efectos en la calidad del aire en C.U. por el uso del aditivo MTBE en las gasolinas del Valle de México". En : Memorias. VII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental A.C. D.. 8-D. 13. Oaxaca, Oax. Sept. 19-21. 1990.
- Bravo A H., Roy-Ocotla R G, Sánchez A P, Torres J R, “Contaminación atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. OMNIA 23(7): 1991; pp. 39-47.
- Bravo A H. Roy G. Sosa R. Torres R. “Report of the historical Trends (1986-1990) in the levels of ozone monitored at the suburban monitoring station of the University of Mexico at Mexico City”. Air & Waste Management. 1991.
- Bravo A H, Sosa E R, Roy-Ocotla R G, Sánchez A P, “Control strategies vs. Meteorology. Case: Mexico City”. Proceeding 86<sup>th</sup> AWMA Annual Meeting, Colorado, 1993.

- Bravo A H, Torres J R, "Seminario Aire y Política: acuerdos y desacuerdos en torno a la contaminación atmosférica de la Ciudad de México". El Colegio de México, México, 1996.
- Bravo A H, Torres J R, Sosa E R, "La Contaminación atmosférica de la ZMCM" In: Sustentabilidad y Desarrollo Ambiental. Calva J.L. Ed. México D.F., 1996 Vol. I; pp. 38-43.
- Bravo A. H., Sánchez A P, Sosa E. R., Torres J. R., "Air pollution problem in the Mexico City Metropolitan Zone: Photochemical Pollution". Proceeding 90<sup>th</sup> AWMA Annual Meeting. Toronto, 1997.
- Bravo A H, Torres J R, Sosa E R, "Reformulated gasoline: the experience of Mexico City Metropolitan Zone". Proceeding 90<sup>th</sup> AWMA Annual Meeting. Toronto, 1997.
- Bravo H A., Sosa E R, Sánchez A P, Jaimes P M., "New Ozone Standard in the U.S.A. Applied to Mexico City Metropolitan Air Quality". Proceeding 91<sup>st</sup> AWMA Annual Meeting. San Diego, 1998.
- Bravo H., Sosa R., Sánchez P., Jaimes M., "The Dilemmas of Change From Leaded to Unleaded Reformulated Gasolines in Developing Countries (Case: Mexico)". 1999.
- Bravo A,H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Jaimes P.M., Lefhon A. "The Piston Effect Observed in the Ozone Concentrations in the Mexico City Metropolitan Zone". 94th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Orlando, Florida. June. 2001.
- Calderón L, Osorno A. V., Bravo, H, delgado, R. y Barrios, R., "Histopathologic Changes of the nasal Mucosa in Southwest metropolitan Mexico City Inhabitants", American Journal of Pathology: Vol. 140, No. 1, 1992.
- CARB (California Air Resources Board), Guidance for Using Air Quality\_Related Indicators in Reporting Progress in Attaining the State Ambient Air Quality Standars. California Environmental Protection Agency, Air Resources Board. 1993.
- CARB (California Air Resources Board). "Clean Air - California's Success and Future Challenges". Agosto 1999.
- CARB (California Air Resources Board). "The 2001 California Almanac of Emissions & Air Quality". 2001.
- Castillejos M, Gold Dr, Dockery. "Effects of ambient ozone on respiratory function and symptoms in Mexico City School children" Am. Resp. Dis. 145:276-282, 1992.
- Code of Federal Regulations 40 CFR Parts 50 and 58. Washington D.C.: Protection of the Environment. National Archives and Records Admonistration; 1999.

- Cohanim S, Cassmassi J, Bassett M, "Ozone Trend in California's South Coast Air Basin, 1976-1996". Proceeding 91<sup>st</sup> AWMA Annual Meeting. San Diego, 1998.
- Comisión Ambiental Metropolitana, IVM, DGSA-SSA, PAHO, EHS-UCLA, "Economic valuation of Improvement of air quality in the Metropolitan Area of Mexico City", México, D.F., 2000.
- Comisión Ambiental Metropolitana, GDF, GEM, "Programa para Mejorar la Calidad del Aire en al Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010" , México, D.F., 2001.
- Comision Nacional de Derechos Humanos. "La contaminación Atmosférica en México". México 1992.
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación del Valle de México. "Red Automática de Monitoreo Atmosférico" Dirección General de Ecología, DDF. 1992.
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación del Valle de México. "Avances a Junio 1994. Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México". Diciembre. 1994.
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación del Valle de México. "La contaminación atmosférica en el Valle de México. Acciones para su control. 1988-1994. DF 1995.
- Committee on Tropospheric Ozone Formation and Measurement; Board on Environmental Studies and Toxicology; Board on Atmospheric Sciences and Climate; Commission on Geosciences, Environment, and Resources; National Research Council. " Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution". NATIONAL ACADEMY PRESS. Washington, D.C. 1991
- Cox, W.M and S. Chu. "Meteorologically adjusted ozone trends in urban areas: a probabilistic approach". Atmospheric Environment. 27(4):425-434. 1993.
- Datos del monitoreo de la sección de contaminación ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- Datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (R.A.M.A) del D.D.F.
- Datos de la South Coast Air Basin (SoCAB) 1986-1996.
- DDF, SEMARNAP, Secretaria de Salud y Gobierno del Estado de México. "Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México, 1995-2000", 265 pp, México, Marzo 1996.
- Davison, A., "Update on Ozone Trends in California's South Coast Air Basin", J. Air & Waste Management Association, February 1993.

- Emtzian G. , K.H Grasnick and J. Taubenheim. "Seasonal variations of ozone trends". Advances in space research v 10 Pergamon Press, NY. USA. 1990.
- EPA, Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants, Vol. I, II, III, 1996, USEPA, EPA/600/P-93/004aF.
- EPA, Guideline on Ozone Monitoring Site Selection., Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC. 277111, EPA-454/R-98-005, August 1998.
- EPA, Guideline for reporting of Daily Air Quality-Air quality Index (AQI), USEPA, 1999. EPA-454/R-99-010.
- EPA, El Smog-¿A quién perjudica?, Lo que Usted necesita Saber Acerca del Ozono y Su Salud, USEPA, 2000, EPA-452/K-00-001.
- Fortoul T.I, Lambert W., Bliss M., Bravo H., Sánchez P., López I., Sánchez I., Villadelmar L., Rivero O. and Samet J. "Acute changes in lung function associated with daily ozone exposures of children attending a day camp in Mexico City". Am. J. Of Resp. And Critical Care Med.; 151: A496, 1995.
- Fortoul T.I, Lambert W., Bliss M., Bravo H., Olaiz G., Rojas R., Sánchez P., López I., Villadelmar L., Sánchez I. and Samet J. "Ozono y Sistema Respiratorio, algunos efectos". Ciencia y Desarrollo. Vol. XXI, No. 125, Nov-Dic. 44-47, 1996.
- Fuentes Gea V. and Garcia A. "Air Pollution trends in Mexico city, TSP (1976-1984)" Air & Waste Management. 1990.
- Garcia A., Herrera M. y Bravo H. "Campus' Ozone concentration related to New blends in gasoline sold in Mexico City: A statistical analysis". Air & Waste Management. 1991.
- Gilbert O. R. "Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring". Van Nostrand. New York.1987.
- <http://www.aqmd.gov/aqmp/97aqmp/chapters/m-chap1.html>
- <http://www.aqmd.gov/aqmp/97aqmp/chapters/m-chap2.html>
- <http://www.aqmd.gov/aqmp/97aqmp/chapters/m-chap4.html>
- [http://www.ine.gob.mx/dggia/cal\\_aire/espanol/vm.html](http://www.ine.gob.mx/dggia/cal_aire/espanol/vm.html)
- Kendall,M.G., "Rank Correlation Methods", 4th de. Charles Griffin, London. 1975.

- Kersog P. and Wolff G. "An examination of urban ozone trends in the northeastern U.S. (1973-1983) a robust statistical method". Atmospheric Env. Vol 25B, No. 1:47-57, 1991.
- Kirchstetter W.T. and Harley A. R., "impactPhase 2 Reformulated Gasoline on Atmospheric Reactivity of Exhaust and Evaporative Emissions". Proceeding 90<sup>th</sup> AWMA Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada, 1997.
- Kleinman M.T. "Health Effects of Air Pollution", <http://www.aqmd.gov/>, enero 2003, California, South Coast Air Quality Management District
- Kolaz, D.J., and R.L. Swinford. 1990. How to Remove the Influence of Meteorology from the Chicago Area Ozone Trend. Paper 90-97.5. Presented at the 83rd Annual Meeting and Exhibition of the Air and Waste Management Association, Pittsburgh, Penn., June 24-29
- Kumar S. and Chock D. P., "An Update on Oxidant Trends in the South Coast Air Basin of California". Atmospheric Env. Vol. 18, No. 10:2131-2134, 1984.
- Kuntasal G. and T.Y. Chang. "Trends and relationships of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> and HC in the south coast air basin of California". JAPCA 37(10):1158-1163.1987.
- Larsen L., Bradley R. and G. Honcoop, "Consideration of historical variability in selecting air quality trend statistics and in interpreting air quality trends". A&WMA annual meeting Pittsburg, PA USA. 16p. 1989.
- Lefohn, A.S., and D.S. Shadwick. "Ozone, sulfur dioxide and nitrogen dioxide trend at rural sites located in the United States". Atmospheric Environment 25:491-501. 1991.
- Lettenmaier.D.P., "Detection of trends in water quality data from records with dependent observation", Water Resources Research 12:1037-1046. 1976.
- Lettenmaier.D.G. "Detection of trends in Stream Quality:Monitoring Network Design and Data Analysis". C.W. Harris Hydraulics Laboratory, Department Civil Engineering, University of Washintong, Seattle, Wash. Technical Report. No51. PB-285 960. 1977.
- Lettenmaier.D.G., "Design considerations for ambient stream quality monitoring. Water Resources Bulletin 14:884-902.1978.
- Lindsay R.W. J.L. Richardson, and W.L. Chameides. "Ozone trends in Atlanta, Georgia:Have emission controls been effective?". Journal of Air Pollution Control Association (JAPCA) 39(1):40-43.1989.

- Lippmann M. Ozone in (Lippman m. Ed.). "Environmental Toxicants. Human Exposures and their Health Effects". New York: Van Nostrand Reinhold, pp 465-519, 1992.
- Ludwig, F.L., and E. Shelar. "Site Selecting for the Monitoring of Photochemical Air Pollutants". Stanford Research Institute, Menlo Park, CA. Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. EPA Publication No. EPA-450/3-78-013. April 1978.
- Mann H.B. "Non-Parametric test against trend". *Econometrica* 13:245-259. 1945.
- Masters G. M. "Introduction To Environmental Engineering and Science". Prentice Hall. New Jersey.
- MacAllister R, O'Hara P., Robbins J., Sayer T., " Comparing Nonmethane Organic Compound, NO<sub>x</sub>, and daily Maximum Ozone Concentrations by site and by year". Proceeding 85<sup>th</sup> AWMA Annual Meeting. Kansas City, Missouri, 1992.
- MathSoft, S-Plus 2000, Guide to Statistics, Vol. 2, Data Analysis Products Division, MathSoft, Inc. Seattle, Washington, USA, 1999.
- McCollister G.M. and K.R. Wilson. "Linear Stochastic models for forecasting daily maxima and hourly concentrations of air pollutants". *Atmospheric Environment* 9:417-423. 1975.
- McKee, D.J., Tropospheric Ozone, Human Health and Agricultural Impacts, Lewis Publisher, USA, 1993.
- McPherson G. "Statistics in Scientific Investigation". Springer-Verlag. New York. 1990.
- "Methods of Air Sampling and Analysis". APHA Intersociety committee. 2nd. Edition. American Public Health Association, USA 1977.
- Millard, S.P., Environmental Stats for S-Plus, probability, Statistics & Information, Seattle, Washington, USA, 2000.
- Molina L.T, Molina M.J., Kluver, "Air Quality in the Mexico Megacity An Integrated Assessment", Academic Publishers, MIT, USA, 2002.
- Munn R.E. "The estimation and interpretation of air quality trends, including some implications for network design". *Environmental Monitoring and Assessment* 1:49-58. 1981.
- Norma oficial Mexicana NOM\_CCAM-003-ECOL/1993. Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para calibración de los equipos de medición.

- Norma oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993. Que se refiere a la salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, ozono (O<sub>3</sub>). Valor permisible para la concentración en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población (SEDESOL, 1994).
- Quadri G., y L. Sánchez Cataño. " La Zona Metropolitana y la contaminación atmosférica. Limusa Noriega Editores. México, D.F. 1992.
- Rao, S.T., Gopal S., Henry R. "Statistical Analysis of Trends in Urban Ozone Air Quality". J. Air. Waste Manage. Assoc. 42:1204-1211. 1992.
- Reinsel G., G.C. Tiao, R. Lewis N. Wang and D. Nychka. "Statistical analysis of stratospheric ozone data the detection of trend. Atmospheric Environment 15:1569-1577. 1981
- Restrepo, I., (coordinador), La contaminación atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud., CNDH, México, 1992
- Rueda R. "Estadística No Paramétrica: Un enfoque intuitivo". Cuadernos Técnicos IIMAS, UNAM. 1988.
- Sánchez J. R. Pablo. Tesis de licenciatura: "Importancia de la Evaluación de la Calidad del Aire por Ozono en la Zona Suroeste de la Ciudad de México", FC-UNAM, 1999.
- Sans R y Ribas J. " Ingeniería Ambiental: contaminación y tratamientos". edit. Marcombo, España, 1989.
- Santos Burgoa C. Y L. Rojas Bracho. "Los efectos de la contaminación atmosférica en la salud. La contaminación Atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud". Comisión Nacional de Derechos Humanos. México, 205-250. 1992.
- SEDESOL "Informe de la Situación General en Materia de equilibrio Ecológico y protección al Ambiente 1993-1994". INE. 1994.
- SEDUE-FUNDACIÓN FRIEDICH EBERT. "Primer Seminario Internacional sobre administración de la Calidad del Aire", Metepec, Puebla, 2 al 6 de noviembre, 1987.
- Seinfeld, J.H., "Urban air pollution: state of the science". Science. 243: 745-752, 1989.
- Sen P.K. "Estimates of regression coefficient based on Kendall's tau". Journal of the American Statistical Association 63:1379-1389. 1968.
- Sillman, S., Samson P.J. and J.M. Masters. "Ozone Production in Urban Plumes Transported over Water: Photochemical Model and Case Studies in the Northeastern and Midwestern U.S.". Environ. Sci. Technol. 1992.

- Smith R.A. R.M. Hirsch and J.R. Slack. "A Study of Trends in Total Phosphorus Measurement at NASQAN stations. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2190. 1982.
- Sosa, E. R., Tesis de Doctorado: "Evaluación y Control de Benceno en la Atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México". DEPI- UNAM, 2001.
- South Cost Air Quality Management District. Summary of air Quality in California's South Coast and Southeast Desert air Basin's 1987-1990", 1991.
- S-Plus 2000 Profesional Release 3. MathSoft, Inc., 1998-2000.
- S-Plus EnvironmentalStats for S-PLUS: Copyright 1995, 1997, 1998 Steven P. Millard, Ph.D. Version 1.1 Release 2 for Microsoft Windows : 1998
- SPSS for Windows Release 10.0.1, Standard Version, 1999, SPSS Inc.
- Staehelin J. and W. Schmid. "Trend analysis of tropospheric ozone concentration utilizing the 20 year data set of ozone ballon sounding over Payerne". Atmospheric Environment 25:1739-1749.1991.
- Stoerkenius T.E. "Comparison of techniques for adjusting ozone exceedances to account for variations in meterological conditions". A&WMA annual meeting, Pittsburg, USA. 27p. 1989.
- Van Belle G. and J.P.Hughes. "Nonparametric test for trend in water quality". Water Resources Research 20:127-136. 1984.
- U. S. Environmental Protection Agency. (1998). "Guideline for Selecting and Modifying the Ozone Monitoring Season based on An 8-hour Ozone Standard". Office of Air Quality Planning and Standards". Research Triangle Park, NC 27711. EPA-454/R-98-044. July 1998.
- U. S. Environmental Protection Agency. (1998). "Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. Office of Air Quality Planning and Standards". Research Triangle Park, NC 27711. EPA-454/R-98-044. August 1998.
- U. S. Environmental Protection Agency. (1998c). Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC 27711. EPA-454/R-98-044. August 1998.
- Wakim P.G. "Temperature adjusted ozone trends for Houston, New York and Washington 1981-1987". A&WMA Annual Meeting Pittsburg, USA 16p. 1989.

- World Health Organization, "Analysing and Interpreting Air Monitoring Data", WHO Offset Publication No. 51, Geneva, 1980.
- World Health Organization, "Guidelines for Air Quality, WHO, Geneva, 2000.
- Zannetti P. "Air Pollution Modeling" Van Nostrand. New York. 1990.
- Zelding M.D. and W.S.Meisel "Use of Meteorological Data in Air Quality Trends Analysis". U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, National Technical Information Service, Springfield, Va. EPA-450/3-78-024. 1978.
- Zurita E. and Castro M. "A Statistical analysis of mean hourly concentration of surface ozone at Madrid (Spain)". Atmospherum Env. Vol. 17 No. 11. pp 2213-2220. 1983.