

00553



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE QUIMICA

PROCESO DE GESTION DE UNA TECNOLOGIA
PARA EL CALCULO DE LOS NIVELES DE OZONO
MEDIANTE MODELOS MATEMATICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRIA EN INGENIERIA

INGENIERIA DE SISTEMAS

(INNOVACION Y ADMINISTRACION DE LA TECNOLOGIA)

PRESENTA

MARGARITA ROSA GARFIAS VAZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. FRANCISCO JAVIER GARFIAS Y AYALA



MEXICO, D. F.

2005

0342067



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

JURADO ASIGNADO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

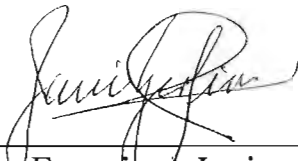
NOMBRE: Margarita Garfias
Vázquez

FECHA: 16/03/05

FIRMA: Margarita R. Garfias Vázquez

- Presidente: **Dr. Javier Audry Sánchez**
Vocal: **Dr. Tomas Miklos Ilkovics**
Secretario: **M. en C. María del Rocío Cassaigne Hernández**
1er. Suplente: **Dr. José Sámano Castillo**
2do. Suplente: **Dr. Rodrigo Cárdenas Espinoza**

Director de Tesis



Dr. Francisco Javier Garfias y Ayala

Sustentante

Margarita R. Garfias Vázquez
Margarita Rosa Garfias Vázquez

Agradecimientos

"Solo es útil el conocimiento que nos hace mejores"
Sócrates

A mi esposo Jorge Yunis Rafful Zepeda y a mis hijos Jorge Yunis y Francisco Javier por el apoyo incondicional que me han brindado.

A mi madre por su ayuda y apoyo moral.

A mi padre y director de tesis por su apoyo y destacada dirección.

A mis hermanos, especialmente a Mari Sol y Javier por su respaldo.

A la Dra. Sara Elvia Meza Galindo por las facilidades otorgadas.

A la Lic. Edith Jiménez Castro por la ayuda proporcionada al fotocopiar innumerables artículos.

Al Dr. Javier Audry Sánchez por su gran refuerzo en los aspectos matemáticos.

A los miembros del jurado: Dr. Tomas Miklos Ilkovics, M. en C. María del Rocío Cassaigne Hernández, Dr. José Sámano Castillo y al Dr. Rodrigo Cárdenas Espinoza, por sus acertados comentarios y sugerencias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad que me brindó para mejorar mi formación profesional.

Índice	Páginas
Prólogo	1
Objetivos e hipótesis	3
Capítulo I. Antecedentes	4
I.1. Análisis de los datos y metodología aplicada por diversos autores	5
Referencias	23
Capítulo II. Perfil del ozono y de las variables meteorológicas en la Ciudad de México	24
II.1. Antecedentes	24
II.2. Ubicación y entorno de la zona metropolitana del valle de México	28
II.3. Normas e índice de calidad del aire	32
II.4. Los efectos en salud por la contaminación del aire	32
II.4.1. Efectos a la salud debido al ozono	34
II.5. El pronóstico de la calidad del aire	37
II.6. Análisis de la información	39
II.7. Análisis de los precursores de ozono y de las variables meteorológicas	44
II.7.1. Veinte episodios	56
II.7.2. Análisis de las tablas de la compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de los 20 mayores episodios de ozono máx. (ppm) de la estación del Pedregal (1986-2001)	56
II.7.3. Reflexiones sobre las tablas comparativas de los veinte eventos anuales de máximo ozono	60
II.8. Distribuciones temporales	63
Referencias	72
Capítulo III. Modelos estadísticos para estudiar el efecto de las variables meteorológicas en los niveles de ozono	74
III.1. Introducción	74
III.2. Concepto de serie de tiempo	76
III.3. Proceso estocástico	77
III.4. Suavizamiento. Filtros lineales	77
III.4.1. Promedios móviles	78
III.5. Autocorrelación	79
III.6. El enfoque moderno de series temporales: modelos ARIMA	80

III.7. Modelo de regresión lineal múltiple	81
III.8. Metodología aplicada	83
III.8.1. Método autoregresivo (AR)	83
III.8.2. Modelo de retrasos	84
Referencias	85
Capítulo IV. Aplicación y resultados del modelo estadístico y regresión múltiple entre el ozono, temperatura y humedad	87
Referencias	97
Conclusiones y recomendaciones	99
Apéndice I. Acrónimos y abreviaturas	102
Apéndice II. Glosario	104
Apéndice III. Normas oficiales mexicanas de calidad del aire	123
Apéndice IV. Artículo “TROPOSPHERIC OZONE PREDICTION IN MÉXICO CITY. Part I”	125

Prólogo

La contaminación del aire es un problema ambiental persistente y generalizado que supone costos económicos y de salud considerables para la sociedad. Los problemas de la contaminación del aire se entremezclan además con otras cuestiones urbanas y ambientales complejas que son de creciente importancia en las regiones urbanas de todo el mundo, como la congestión del tráfico y la movilidad, los usos del suelo y el calentamiento global.

La Ciudad de México es una de las ciudades del mundo que tiene un alto volumen de población y actividades productivas que producen una contaminación atmosférica que excede la norma **NOM-020-SSA1-1993** varias veces al año.

Sin duda alguna, los esfuerzos que realizan los gobiernos del Distrito Federal y el Estado de México para controlar la contaminación en el área conurbada dio resultados satisfactorios. Sin embargo, parece ser que los esfuerzos realizados no han sido continuados y para ello hace falta que las Universidades intervengan para determinar si son efectivos los programas actuales o de lo contrario reforzarlos para satisfacer la normatividad de la calidad del aire.

Se pretende predecir el nivel de ozono troposférico, para alertar a la población de los episodios que se pueden presentar; así como encontrar la relación entre las variables meteorológicas y el nivel de ozono y determinar si los programas de control de ozono tienen el efecto deseado.

Como primer paso sería satisfacer la calidad del aire respecto al ozono y el siguiente sería satisfacer la calidad del aire en lo que respecta a las partículas suspendidas.

Hay varias preguntas cuya resolución permitiría avanzar en ese sentido. Una de ellas es saber si los programas de control de la formación de ozono sigue teniendo un efecto favorable. Otra consiste en determinar si la formación del ozono está controlada por la presencia de hidrocarburos o de óxidos de nitrógeno.

La tercera y última pregunta consiste en identificar el factor que influye primordialmente en la formación de partículas suspendidas.

Una respuesta satisfactoria a alguna de las preguntas anteriores sería muy favorable para proponer controles de mejora optimizar la calidad del aire en la Ciudad de México.

Lo anterior llevará a encontrar el modelo matemático para estudiar el efecto de las variables meteorológicas en los niveles de ozono, como una herramienta de un proceso de gestión de la tecnología.

En este documento, se procura como primer paso, en el Capítulo I, una revisión bibliográfica por diferentes autores de los diversos métodos matemáticos aplicados como un primer acercamiento y en él que se recogen las experiencias acumuladas a lo largo de estos años. En

el Capítulo II se analiza la problemática de la contaminación de ozono, el Capítulo III aborda la metodología a utilizar, el capítulo IV muestra la aplicación del modelo matemático y resultados obtenidos. En la última etapa se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Objetivo:

Estudiar y aplicar los *modelos matemáticos de series de tiempo y de regresión* para identificar y estimar a largo plazo las *tendencias del ozono troposférico* en el aire de la Ciudad de México, y determinar si las políticas de control tienen el efecto deseado.

Hipótesis:

Se supone que el nivel de *ozono troposférico* es afectado por las *condiciones meteorológicas*, como son la insolación, el viento, la temperatura, etcétera. Se pretende demostrar que estas *variables meteorológicas* pueden incorporarse a un *modelo de regresión*.

Capítulo I. Antecedentes

La red de medio ambiente de las oficinas de salud en el mundo, necesitan realizar los pronósticos de la contaminación diaria del aire para avisar a la población de la situación que prevalece y trazar estrategias para mejorar la calidad del aire. Cada pronóstico se basa en las relaciones estadísticas entre las condiciones del clima y las concentraciones de contaminantes en el ambiente.

En muchas situaciones de la vida real, se presentan problemas en los cuales existe una relación entre dos o más variables y surge la necesidad de encontrar la naturaleza de esta relación.

La Estadística es una ciencia de desarrollo reciente y de auge cada vez mayor. Se centra en el estudio cuantitativo de conjuntos de datos, empleando modelos matemáticos basados en la probabilidad y que permiten adquirir nuevos conocimientos y tomar decisiones. La historia de la Estadística, desde su comienzo hasta la incorporación de esta disciplina a la Matemática es única entre todas las ramas.¹

El estudio de los procesos estocásticos, la teoría de la decisión y el análisis multivariable tienen sus comienzos en las décadas de los años 30 al 50. A partir de la década de los años 50 se abre una gran diversidad de campos (control de calidad, análisis de series temporales en el dominio de la frecuencia, inferencia no paramétrica, simulación, etcétera) debido, por una parte, a que se dispone de una herramienta estadística científica suficientemente estructurada y desarrollada, y, por otra a la disponibilidad de computadoras veloces.

La predicción de concentraciones de ozono en el ambiente en las áreas urbanas permitiría evaluar cada factor como el cumplimiento e incumplimiento de los requerimientos de la normas. Aunque existe la predicción de modelos de ozono, todavía hay necesidad de modelos más exactos. El desarrollo de esos modelos es complejo porque las variables meteorológicas y una gran variedad de reacciones fotoquímicas se involucran en la formación de ozono.

La aplicación de los modelos de calidad del aire resulta ser benéfico en este sentido, ya que permite predecir con suficiente aproximación, el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera.

Los modelos de regresión lineal con multivariantes han sido ampliamente utilizados para este propósito, y pueden proporcionar resultados satisfactorios. Es de importancia destacar la utilidad de la *Regresión y Correlación* para modelar e investigar la relación entre dos o más variables.

La regresión es muy utilizada para interpretar situaciones reales, por lo cual es necesario realizar una selección adecuada de las variables que van a construir las ecuaciones de la regresión, ya que tomar variables que no tengan relación en la práctica, arrojará un modelo carente de sentido.

Se realizó una revisión de documentos publicados por diferentes autores referentes a este tema, por lo que a continuación se menciona de manera breve lo más relevante para la aplicación del procedimiento a seguir en esta investigación.

I.1. Análisis de los datos y metodología aplicada por diversos autores

Andrew C. Comrie,² de la Universidad de Arizona, en Tucson, Arizona; investigó la capacidad del *modelo de la red neuronal* para calcular las tendencias de ozono, y los comparó con los modelos de regresión múltiple tradicionales. Realizó un estudio en ocho ciudades de Estados Unidos con climas y niveles de concentración de ozono diferentes. Los datos de ozono y temperatura máximos diarios y, la velocidad del viento y la luz solar utilizados son de los meses de mayo a septiembre de 1991 a 1995, así como el nivel máximo de ozono del día anterior, para considerar el posible arrastre de ozono de un día a otro. Las variables meteorológicas escogidas fueron: temperatura máxima diaria, temperatura promedio diaria de bulbo húmedo, velocidad del viento promedio diaria e insolación diaria total. La correlación de la temperatura máxima diaria con el ozono en varias localidades da muy buen resultado, y las altas temperaturas de bulbo húmedo se relacionan estrechamente con anticlones estacionarios responsables de los eventos de ozono, así como los valores bajos de las velocidades de viento e insolación total (una medida del flujo de rayos UV). En este estudio se usaron cuatro variables meteorológicas.

La comparación de los modelos estadísticos indica que la técnica de la red neuronal es más exacta que los modelos de regresión para predecir el ozono diario. Las mejores predicciones de las ocho ciudades analizadas fueron para: Seattle, Pittsburgh, Chicago, Atlanta y Charlotte. Comrie asevera que los modelos de regresión generalmente predicen por debajo de la cola superior de la distribución, que son los valores más importantes para decidir si un modelo puede ser usado operacionalmente. Todos los datos de las diferentes ciudades fueron escalados para alcanzar valores que fluctúan entre 0.2 y 0.8 ppm, mediante una ecuación, que se fundamenta en los valores mínimos y máximos para cada ciudad. La normalización se efectuó para proveer intervalos conmensurables de tal suerte que las regresiones no fueran dominadas por cualquier variable que fuera expresada por números grandes y para evitar las asíntotas de la función sigmoide que es un paso común en el modelaje neuronal.

Para los modelos neuronales que no utilizan el dato del ozono máximo del día anterior, se usó una estructura $4 \times 6 \times 1$ (4 nodos en la capa de entrada, seis nodos en la capa escondida y un nodo en la capa de salida). Para el modelo neuronal que contempla el dato de ozono del día anterior, se usó una estructura de $5 \times 7 \times 1$. Para el modelaje del modelo neuronal se utilizó el software NevProp (Goodman, P.H. Nev Prop Software; Center for Biomedical Modeling Research, University of Nevada, Reno).

Comrie aplicó cuatro combinaciones de modelos y datos para comparar cada ciudad: regresión múltiple usando los datos únicamente del mismo día (MRU), regresión múltiple usando los datos de ozono del día anterior (MRL), modelo neuronal utilizando los datos del mismo día

(NNU) y el modelo neuronal usando datos del ozono del día anterior (NNL). Dependiendo de los datos que se comparen, la aplicación de una técnica estadística sencilla tal como R^2 puede conducir a resultados incompletos o aún engañosos. Por lo tanto, se usaron varias técnicas estadísticas para comparar los modelos.

Los resultados que obtuvo Comrie son similares para cada una de las ciudades, aunque el nivel de ozono en algunas ciudades fue menor que en otras. El ozono presenta un coeficiente de correlación para Seattle de $R^2=0.69$ utilizando el modelo de red neuronal y $R^2 = 0.59$ con el modelo de regresión múltiple; además el modelo de la red neuronal presentó numéricamente el menor error estándar. Sin embargo, con los dos modelos no se presenta una diferencia en las ciudades de Tucson y Phoenix, siendo en éstas un valor bajo de R^2 . Generalmente, ambas ciudades exhiben altos niveles de ozono, altas temperaturas y baja velocidad del viento. Las regresiones fueron realizadas con el paquete de software SYSTAT.

Junsub Yi y Victor R. Prybutok,³ de la Universidad del Norte de Texas, USA; desarrollaron un modelo de *red neuronal* para predecir los niveles de ozono máximos diarios, además compararon el modelo con dos modelos estadísticos tradicionales: el de *regresión* y *Box Jenkins ARIMA*. Los resultados muestran, al igual que en el estudio de Comrie A., que el modelo de la red neuronal es superior al de regresión y Box Jenkins ARIMA. Se seleccionaron los datos del 1 de junio al 30 de septiembre de 1993, en el área de Dallas-Forth Worth. El estudio de regresión mostró que las variables que más influyen para obtener un coeficiente de correlación mejor son los óxidos de nitrógeno, el óxido nítrico, la temperatura máxima diaria, la velocidad y dirección del viento superficial, y el nivel de ozono a las 9:00 am, para predecir los niveles máximos de ozono diarios. La variable más importante entre las nueve consideradas fue el óxido nítrico, con un valor de $R^2= 0.3802$. La segunda variable en importancia fue el nivel de ozono a las 9:00 am. Existen otros dos factores que influyen en una buena correlación entre la temperatura y concentración de ozono, los cuales son una alta temperatura del aire y la acumulación de ozono. Además, la velocidad de reacción fotoquímica depende fuertemente de la temperatura.

Al igual que en el artículo publicado por Ernesto Sandoval, et. al.¹⁷; los autores mencionan que las dos situaciones para provocar la formación de ozono sucede cuando las condiciones atmosféricas presentan un sistema de alta presión y cuando el aire se encuentra estancado o existe poco movimiento.

Usaron nueve neuronas en la capa de alimentación, cuatro en la capa oculta y una neurona en la capa de salida. Cada una de las nueve neuronas en la capa de entrada representaba a cada una de las nueve variables utilizadas en el modelo de regresión. Se usó el programa NeuralWare, 'SAVEBEST' para dar seguimiento y obtener el menor error RMS del conjunto de pruebas de validación. Los resultados muestran que el modelo de la red neuronal es superior a la regresión y Box Jenkins ARIMA.

Pao- Wen Grace Liu y Richard Johnson,⁴ de la Universidad de Wisconsin, Estados Unidos; desarrollaron un modelo estadístico de regresión de ozono, con el objeto de mejorar las predicciones del pico máximo horario de la concentración de ozono en un sitio de Milwaukee,

así como predecir el evento que exceda 100 ppb en los seis condados del área de Milwaukee. Es esencial desarrollar un modelo de ozono que sea más preciso a altas concentraciones y que sea capaz de hacer predicciones en tiempo real. Las exposiciones indeseables de ozono pueden reducirse si se contará con un método efectivo para predecir el ozono. Una *regresión con el modelo de las series de tiempo (RTSE)*, incluido un componente principal de un *disparador PC*, es la base para prever los picos de los niveles de ozono por hora diarios y para resolver algunos problemas de baja predicción de alto ozono y también proporcionar el potencial para hacer la previsión actual del ozono en tiempo real. Es empleado el modelo multivariable de tiempo de series Box Jenkins con un disparador PC, para estimar las medidas de los picos de niveles diarios de ozono a cada hora en la Universidad de Winsconsin, Milwaukee-North (UWM-N), durante 1991. Milwaukee es un área con niveles de ozono severos; se tomaron en cuenta diez años. El ozono es verificado por el *modelo RTSE, con un disparador PC*, el cual mejora significativamente la predicción de los picos diarios de ozono, particularmente los picos de ozono mayores a 100 ppb. La expresión del modelo matemático se muestra a continuación:

$$\ln O_3 = 0.63 + 0.02Tp_t - 0.0003WD510_t + (0.001 + 0.0005B)PC_t + \frac{(1 - 0.21B^3)a_t}{(1 - 0.57B - 0.18B^2)}$$

en donde $PC_t = 0.033Tp_t - 0.052NOx_t + 0.888WD510_t + 0.456WD1019_t$ ó $PC_t = 0$

La temperatura Tp_t es la máxima horaria en °F; WD510 se refiere a la dirección promedio del vector viento entre las 5:00 am y 10:00 am, en grados; NOx es el promedio de concentración de NOx entre las 6:00 y 9:00 am en ppb; WD1019 es el vector promedio de la dirección del viento entre las 10:00 am y las 7:00 pm, en grados; a es la distribución normal independiente e idéntica (ruido blanco); B es el operador regresivo que recupera el valor de la función anterior, por ejemplo $BTp_t = Tp_{t-1}$.

El PC, en esta investigación, es una combinación lineal de las variables meteorológicas y NOx durante los días de concentraciones de alto ozono. Se utilizó el paquete estadístico SAS para construir el *modelo RTSE*. En comparación, el *modelo RTSE con un disparador PC* incrementa el valor de R^2 de 0.680 a 0.809; además de presentar un menor valor numérico del error estándar. Esto sugiere que el uso del *modelo RTSE, con el disparador PC* es un modelo estadístico adecuado que tiene el potencial para prever el ozono en tiempo real.

Dapeng Xu, et al.,⁵ de la Universidad Canadiense de York, presentan un *modelo de regresión lineal* con variables estacionales (un ciclo anual) y parámetros meteorológicos (temperatura, horas de brillo solar y humedad relativa). Comparando las tendencias obtenidas con y sin considerar los impactos meteorológicos, los autores estimaron los efectos meteorológicos. Con este modelo de regresión se cree que se puede identificar las tendencias de ozono a nivel de suelo asociadas con los cambios en las emisiones del precursor. Para identificar cuales

parámetros meteorológicos están estrechamente asociados con las fluctuaciones de concentraciones máximas de ozono y para percibir la variación temporal del patrón de las concentraciones de ozono y los principales parámetros meteorológicos, se seleccionaron los datos. La temperatura máxima diaria es correlacionada con el logaritmo de la concentración de máximo ozono especialmente cuando la temperatura máxima de ozono esta arriba de los 15°C. También las horas diarias de sol y la humedad relativa son correlacionadas con el logaritmo de ozono máximo diario, aunque puede presentar una menor correlación. El modelo se construye con una función de regresión lineal en SAS/GRAPH (SAS Institute Inc., 1988a).

Se propone un modelo de regresión lineal:

$$\ln O_3 = \alpha + \beta Y + a \sin(kt) + b \cos(kt) + cT + dS + eH + f\omega(T - T_1)$$

donde α , β , a , b , c , d , e y f son coeficientes para determinar por el procedimiento de regresión $Y=0, \dots, 10$ de los años de 1980 a 1990, $k=2\pi/365$ número de onda, t el tiempo en días empezando desde el comienzo de cada año, T la temperatura máxima diaria en °C, S las horas de sol diarias, H es la humedad relativa, la variable ω es igual a 1 cuando la temperatura está encima del umbral de 15°C y es igual a cero cuando la temperatura queda abajo de los 15°C y T_1 la temperatura umbral, tomada a 15°C.

Si sólo se toman en cuenta los cuatro primeros términos de la ecuación, se obtiene un modelo simple de regresión, el cual sigue una tendencia lineal y las variaciones estacionales, así se le denomina modelo 1, si se toma en cuenta todos los términos de la ecuación 1 se le designa modelo 2. La tendencia y condiciones del modelo 2 representan la tendencia residual y el ciclo anual, después de tener los efectos meteorológicos considerados, mientras en el modelo 1 se incluyen los efectos de tendencia y el ciclo anual considerando la T , S y H . Se utilizó el procedimiento REG en SAS/STAT (SAS Institute, Inc. 1988b) y los datos de Windsor, para obtener unos coeficientes de correlación $R^2=0.57$ y 0.70 , respectivamente, con los modelos 1 y 2. La estadística confirma que con el modelo 2 se obtiene una mejor correlación con respecto al modelo 1.

Edwin J. Prior et al.,⁶ del centro de investigación de Langley NASA en Hampton, Virginia; tomaron datos de 1976 para describir la variabilidad diaria de promedio de los niveles de ozono máximo diarios en el área de St. Louis durante dicho año. Se consideraron esos datos porque en esa área había niveles de ozono altos (>120ppb). Para el análisis se encontró que es necesario considerar diversos parámetros con relación al transporte como es el tramo de la trayectoria del aire con alta presión en la vecindad de St. Louis. Inicialmente se propuso una relación lineal entre el nivel de máximo de ozono diario y cinco variables (el ozono a las 9:00 horas, intensidad de radiación solar a las 9:00 horas, los promedios de la velocidad del viento de 6:00 a 9:00 horas y además NO_x , y el pronóstico de la temperatura máxima diaria), resultando la expresión:

$$O_{3_{\max}} = C + C_W W_{6-9} + C_T T + C_{O_3} (O_{3_9}) + C_{NOx} NOx_{6-9} + C_S S_9 \quad (1)$$

donde $O_{3_{\max}}$ es el nivel máximo diario a cada hora de ozono (ppm), C es una constante, C_W es el coeficiente del modelo asociado con un promedio de velocidad del viento de las 6:00 a las 9:00 horas, C_T es el coeficiente del modelo asociado con un pronóstico a cada hora de la temperatura máxima, C_{O_3} es el coeficiente del modelo asociado con un promedio de nivel de ozono de 6-9 horas, C_{NOx} es el coeficiente del modelo asociado con un promedio de nivel de NOx de 6-9 horas, C_S es el coeficiente del modelo asociado con la intensidad de radiación solar a las 9:00 horas, W_{6-9} es el promedio de la velocidad del viento (m/s) de las 6:00 a las 9:00 horas, T es el pronóstico de la temperatura máxima diaria (°K), O_{3_9} es el nivel de ozono (ppm) a las 9:00 horas, NOx_{6-9} es el promedio del nivel de óxido de nitrógeno (ppm) de las 6:00 a las 9:00 horas y S_9 es la intensidad de la radiación solar a las 9:00 horas.

Es utilizado un análisis de regresión para seleccionar los datos de las variables óptimas. El análisis de regresión identifica la mejor variable única, el mejor par de variables, etcétera, usando el coeficiente de la correlación múltiple como un criterio de selección. Los coeficientes de varias variables son calculadas minimizando la suma de los residuos cuadráticos entre las observaciones y predicciones de ozono máximo diario. Hay tantos datos que se dividen en dos diferentes bloques (los días pares e impares durante 1976). Los resultados de los dos bloques se muestran en la tabla I.

Tabla I. Resultados de la regresión de los datos en 1976

Datos de las variables	(173) días pares		(168) días impares	
	SD, ppb	R ²	SD, ppb	R ²
O_{3_9}	15.4	0.856	15.5	0.811
T	18.8	0.776	16.3	0.787
O_{3_9}, W_{6-9}	13.9	0.884	13.9	0.852
O_{3_9}, T	14.1	0.882	13.1	0.871
O_{3_9}, W_{6-9}, T	13.1	0.900	12.2	0.889
$O_{3_9}, W_{6-9}, T, NOx_{6-9}, S_9$	13.1	0.901	12.2	0.890

donde SD es la desviación estándar y R^2 es el coeficiente de correlación. Las tres mejores variables para los dos bloques fueron O_{3_9} , W_{6-9} , T . Se observa que la inclusión de las otras dos variables, la intensidad de la radiación solar a las 9:00 horas y el promedio de óxidos de nitrógeno, no mejora al modelo a pesar de su importancia en los procesos físicos que llevan a la formación de ozono. Esto también puede parecer sorprendente en vista de los resultados acerca de la utilidad del promedio de NOx en la mañana por el ozono previsto, sin embargo, aparece esa inclusión del nivel de ozono de la mañana (como una variable) reduciendo o eliminando la utilidad de emplear los NOx y/o las medidas de la radiación solar.

Seleccionando las tres mejores variables O_{3y} , W_{6-9} , T , se puede encontrar un mejor modelo permitiendo una dependencia cuadrática de los niveles de máximo ozono diarios. De la ecuación 1, se incluyen los términos cuadráticos y se elimina S_0 y NO_x obteniendo la siguiente ecuación del modelo:

$$O_{3_{\text{diario}}} = C + C_{W_1} W_{6-9} + C_{T_1} T + C_{O_{3y}} (O_{3y}) + C_{W_2} W_{6-9}^2 + C_{T_2} T^2 + C_{O_{3y}^2} (O_{3y})^2 \quad (2)$$

Tabla II. Resultados de la regresión por de inclusión de términos cuadráticos.

Datos de las variables	(173) días pares		(168) días impares	
	SD, ppb	R ²	SD, ppb	R ²
O_{3y}, W_{6-9}, T	13.1	0.900	12.2	0.889
$O_{3y}, W_{6-9}, T, W_{6-9}^2$	12.8	0.906	12.0	0.893
$O_{3y}, W_{6-9}, T, W_{6-9}^2, T^2$	12.7	0.908	11.9	0.896
$O_{3y}, W_{6-9}, T, W_{6-9}^2, T^2, (O_{3y})^2$	12.6	0.910	11.8	0.898

Se observó que se obtienen mejores resultados con el modelo 2, incluyendo los términos cuadráticos. Los estudios previos mostraron una fuerte correlación entre los niveles de ozono máximo diario y la temperatura de superficie máxima diaria.

Por otro lado los autores mencionan tres factores que influyen y que además son citados por otros autores: 1) la proximidad de sistemas de alta presión; 2) la trayectoria histórica del tramo de aire y 3) la duración de estancamiento de los sistemas de alta presión. Dentro de un sistema de alta presión, el aire se estanca o se mueve levemente, y las condiciones radiantes prevalecen, ambas situaciones ayudan a la formación de ozono. Comentan que sería importante considerar estos datos en el modelo para obtener mejores resultados.

*Patricia E. Korsog, y George T. Wolf,*⁷ del Departamento de Ciencias Ambientales de los Laboratorios de investigación de General Motors situados en Warren, Michigan, EUA, seleccionaron ocho regiones urbanas del noreste del país para determinar la relación entre el nivel de ozono máximo y ciertas variables meteorológicas. Las regiones fueron: Filadelfia (PHIL), el Sur de Nueva Jersey (SNJ), la Ciudad de Nueva York (NYC), el Norte de Nueva Jersey (NNJ), el Suroeste de Connecticut (SWCT), Pittsburg (PITT), Baltimore (BALT) y Washington, D.C. (DC). Generalmente, las mayores concentraciones se encontraron en el centro de las ciudades y en áreas industriales. Se seleccionaron regiones que contaban por lo menos con ocho años de información de datos y con un 50% de registros diarios durante junio, julio y agosto, y en las que los equipos de medición no hubieran sufrido cambios de lugar.

La información meteorológica fue extraída de los aeropuertos cercanos a las principales ciudades de las regiones seleccionadas de la base National Climatic Data Center, en particular

de las temperaturas superficiales y a una cierta altura. Los autores no detallan la metodología seguida para descartar, validar o modificar los datos de ozono. Con esa nueva base corregida se estudiaron las posibles correlaciones con las variables meteorológicas. Se escogieron los datos de ozono que quedaban en el percentil 75.

En la siguiente tabla se muestra la localización y la magnitud del coeficiente de correlación entre el ozono y las variables meteorológicas, entre ellas la de temperatura de superficie (TMPD) y a 850 mb (TEMP) a las 14:00 horas.

Coeficiente de correlación de ozono con las variables meteorológicas								
	PHIL	SNJ	NYC	NNJ	SWCT	PITT	BALT	DC
TMPD	0.53	0.56	0.58	0.54	0.52	0.47	0.54	0.52
DPTP	0.26	0.20	0.25	0.29	0.42	0.017	0.22	0.19
SLVP	0.05	0.03	-0.07	0.05	0.02	0.16	0.06	0.03
RHUM	-0.16	-0.26	-0.21	-0.14	0.009	-0.40	-0.23	-0.26
HZVS	-0.42	-0.35	-0.31	-0.39	-0.45	-0.17	-0.35	-0.23
TSKC	-0.24	-0.30	-0.10	-0.11	-0.05	-0.27	-0.30	-0.25
WSPDS	-0.29	-0.23	-0.15	-0.19	-0.04	-0.14	-0.24	-0.24
TEMP	0.32	0.31	0.44	0.42	0.50	0.19	0.34	0.33
HGT	0.30	0.28	0.19	0.31	0.31	0.33	0.32	0.27
WSPDU	-0.37	-0.29	-0.06	-0.18	-0.20	-0.23	-0.24	-0.24

Las variables meteorológicas usadas en el estudio estadístico fueron:

O₃	Ozono, ppb
DPTP	Temperatura de bulbo húmedo, F
TMPD	Temperatura superficial, F
HZVS	Visibilidad, millas
TSKC	Cubierta total del cielo, (fracción del cielo oscurecido por las nubes)
WDIRS	Dirección del viento superficial (grados)
SLVP	Presión (reducida al nivel del mar) mb
HGT	Altura de la isobara de 850 mb, metros
TEMP	Temperatura a 850 mb, C
RHUM	Humedad relativa a 850 mb, %
WDIRU	Dirección del viento a 850 mb, grados
WSPDU	Velocidad del viento a 850 mb, mph

El modelo que se obtiene al correlacionar las variables meteorológicas y el ozono adopta la siguiente forma:

$$\hat{O}_3 = [\exp(a)](TMPD)^b (TEMP)^c (DPTP)^d (RHUM)^e (WSPD)^f$$

Los coeficientes se estimaron por el procedimiento de regresión.

Un criterio para determinar la posibilidad de un episodio de ozono consiste en determinar valores fijos de las variables meteorológicas por arriba de las cuales exista una gran posibilidad de un episodio de ozono. Los valores encontrados para Filadelfia fueron:

Criterios meteorológicos para que ocurra un episodio de ozono en Filadelfia

TMPD, F	>83.0
DPTP, C	>11.8
WSPDS, mph	<12.7
WDIRS, deg.	90 - 310
WSPDU, mph	-
WDIRU, deg	34 - 350
RHUM, %	-

Para SWCT los valores de WSPDU y RHUM fueron de <29 mph y <80%. La conclusión a la que llegan es que para la región noreste no se puede tener una correlación general.

Thomas S. Shively y Thomas W. Sager,⁸ de la Universidad de Texas, EUA; utilizaron datos del nivel de ozono máximo diario y valores máximos diarios de diversas variables meteorológicas recolectadas de cuatro sitios de análisis en Houston, Texas (Deer Park, Clinton Drive, Northwest Harris County y Aldine Drive). Los datos analizados son de mayo a octubre de 1983 a 1995, de las 6:00 a las 19:00 horas, considerado el periodo con mayores niveles de ozono. La National Ambient Air Quality Standard NAAQS requiere que las áreas no excedan el nivel de ozono de 12 pphm cada hora, más de tres días cada tres años consecutivos. Houston excede la norma. En 1995, se tomaron medidas en las regiones que no cumplían como Houston, ya que estaban a sus niveles de ozono más altos desde 1990. Sin embargo, análisis preliminares sugieren que las condiciones del clima en 1995 favorecían la formación de ozono. Los autores se preguntan si el aumento en 1995, era debido a condiciones del clima adversas o algún otro factor como las políticas de control. Para responder a esa pregunta se requiere la habilidad de separar los efectos de las condiciones meteorológicas de los efectos de las políticas de control y otros factores. La metodología general que puede ayudar a contestar esas preguntas es la regresión. El propósito de este artículo es el de demostrar la utilidad de la regresión semiparamétrica para resolver algunas de las preguntas anteriores.

Se utiliza el logaritmo natural del máximo nivel de ozono diario como la variable de respuesta en lugar del ozono mismo, porque el logaritmo de ozono es más cercano a la distribución normal y reduce el impacto de los datos anormales en el análisis. Las variables meteorológicas diarias utilizadas a cada hora son la temperatura, humedad, velocidad del viento y dirección del viento.

Decrece la estimación con el logaritmo de ozono en un 0.26 durante 1983 - 1995 conforme al modelo semiparametrico contra la estimación de 0.29 de acuerdo al modelo de regresión

lineal. Se cree que las predicciones del tiempo incluidas en el modelo capturan los efectos relevantes de las variables meteorológicas, incluso después de tener la compensación por los efectos de mitigación de un clima bueno y los efectos que agravan el mal clima, hay restos de una declinación en el sitio Clinton debido a otros factores (incluyendo las políticas de control), no en el modelo. La función semiparamétrica muestra una declinación como paso inicial de 1983 a 1984, en general un bajo decremento de 1984 a 1994 y un incremento en 1995.

Finalmente ellos notaron que los promedios anuales de la humedad y velocidad del viento al nivel del piso están por encima en el periodo de 1983 a 1995, mientras el intervalo de la temperatura muestra una tendencia general hacia arriba que debe ser asociada con un incremento en la tendencia del ozono, todas las demás variables quedan igual.

Kang-Shin Chen, et al.,⁹ de la Universidad Nacional de Sun Yat-Sen, China; en su investigación analizan los promedios anuales o mensuales de la máxima de ozono diaria a cada hora, que excede el límite diario de 120 partes por billón en las tres regiones, siendo las Ciudades de Kao-hsiung, Kso-hsiung y P'ing-tung. El conocimiento espacial y las variaciones temporales del ozono son factores cruciales para el mejor desempeño del modelo estadístico para predecir la tendencia de ozono y poder establecer las estrategias efectivas para reducir la cantidad de este contaminante en el ambiente. Kao-Ping esta localizada en la costa occidental del sur de Taiwán y es la responsable administrativa de tres regiones (Kao-hsiung City, Kao-hsiung Country y P'ing-tung Country). Por la proximidad de las tres regiones y sus similitudes en la calidad del aire y condiciones del tiempo se denomina como Kao-Ping Airshed (KPA), por la Agencia de Protección Ambiental de Taiwán. Este estudio se enfoca en el análisis estadístico del nivel máximo diario de ozono a cada hora en la zona de la KPA de 1996 a 2001 y las variaciones a largo plazo de concentraciones de ozono, NOx, hidrocarburos no metánicos y condiciones meteorológicas a cada hora en el ambiente.

Presentan los promedios anuales de las concentraciones de ozono máximo diario a cada hora utilizando las gráficas de caja, los extremos de las cajas, representadas por barras de error, y los percentiles 5, 10, 25, 50, 75, 90 y 95 y el nivel máximo de ozono. Los resultados mostrados en las figuras muestran que todos los percentiles mayores de 95 y el máximo diario de ozono en las tres regiones excedan la norma, excepto un percentil de 95 en la ciudad de Kao-hsiung que es menor que 120 ppbv. Sobre el periodo de interés se observa que la media anual y el 50-95 percentil de la concentración de ozono máxima diaria en la Ciudad de Kao-hsiung exhibe incremento en las tendencias (+1.8%/año), mientras todos los niveles en los condados de Kao-hsiung y P'ing-tung presentan declinaciones en sus tendencias (-2.1 a -2.5%/año) ver tabla 1.

Tabla 1. Cambio en la media anual y percentiles de la concentración de ozono máximo diario a cada hora en KPA, 1996-2001.

Región	Media	Percentil			
		50	75	90	95
Ciudad de Kao-hsiung	+1.8	+2.6	+0.9	+0.4	+0.3
Condado de Kao-hsiung	-2.5	-1.4	-2.0	-3.1	-4.2
Condado de P'ing-tung	-2.1	-1.1	-1.4	-3.9	-3.2

Nota: Cambio = (pico/ μ) \times 100%, donde μ es el conjunto anual medio de 1996 a 2001.

Los promedios mensuales de la concentración horaria máxima de ozono exhiben las variaciones estacionales, con la máxima en otoño y después en invierno, seguida de la primavera y la menor en verano. Las variaciones a largo plazo en los promedios anuales de concentraciones horarias de O_3 en las tres regiones, exhiben tendencias crecientes. Ocurren altos episodios de ozono con mayor frecuencia en otoño y espaciadamente en verano. Los parámetros meteorológicos en otoño e invierno indican que la tendencia del nivel de ozono de suelo aumenta y desencadena episodios altos de ozono en un día caluroso con la luz del sol y bajo viento, en un sistema de alta presión en estas dos estaciones. Los mapas sinópticos muestran que los anticiclones de alta presión son localizados frecuentemente en el norte y noreste de Taiwán en otoño e invierno, tal que las áreas metropolitanas y de bajo viento de la costa occidental son pronosticados con episodios de alto ozono. Los parámetros meteorológicos en otoño e invierno indican que la tendencia de ozono a nivel del piso tiende a acumularse y a disparar episodios altos de ozono en un día caluroso, bajos vientos y una alta presión, en esas dos estaciones.

*J.M. Davis de la Universidad de Carolina del Norte y P. Speckman de la Universidad de Missouri,*¹⁰ desarrollan un modelo estadístico (*GAM, Generalized Additive Model*) para predecir de antemano el promedio de un día de máximo ozono en un periodo de 8 horas (10 am-5 pm) para Houston, Texas. Los datos de las variables meteorológicas utilizadas en esta investigación fueron tomados de la Agencia de Protección Ambiental del Sistema de Recuperación de Información Aerométrico, (AIRS). Consiste en observaciones tomadas cada hora en el aeropuerto internacional de Houston para los meses de abril a octubre de 1983 a 1992 (2568 datos). Son analizadas en este trabajo diez estaciones en Houston. El área de Houston tiene varios factores complicados que hacen la predicción difícil. Desde el punto de vista meteorológico, la penetración interior de la brisa marina que circula en la vecindad de Houston y su interacción con la reestructuración diurna de la capa límite atmosférica complica los efectos. La falta de conocimiento de la concentración vertical de ozono y su mezcla descendente durante el día también presenta un problema.

Se suavizan los datos con un método llamado Loess y en ese trabajo se utiliza el paquete estadístico S-PLUS.

*Rao y Zurbenko,*¹¹ del Departamento de Tierra y Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Albany, New York; indican que la presencia de varios niveles de movimiento en las series de tiempo de las variables meteorológicas y de calidad del aire puede complicar el análisis y la interpretación de los datos. Es necesario separar las series de tiempo de los datos de ozono y variables meteorológicas en los componentes sinópticos, estacionales y de periodos largos dado que ocurren los procesos a diferentes frecuencias que son causados por los diferentes fenómenos físicos; el componente de la escala sinóptica es atribuible al tiempo y fluctuaciones a corto plazo en las emisiones de los precursores, escalas estacionales a la variación en el ángulo solar; y escalas a largo plazo a cambios en el clima, políticas y/o económicos. Las variaciones temporales del ozono medido son analizadas utilizando los filtros móviles promedio y un modelo de regresión lineal de mínimos cuadrados para reducir la influencia de ambas variaciones a corto plazo y fluctuaciones meteorológicas en la tendencia de ozono. Los filtros móviles promedio que usan, también llamados filtros KZ (Kolmogorov y Zurbenko),

son utilizados para remover la periodicidad de los picos de las variaciones de altas frecuencias a corto plazo de las series de tiempo de ozono y temperatura.

Las concentraciones de ozono máximo diario a cada hora de todas las estaciones de análisis en Estados Unidos las extrajeron de la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) del Sistema de Recuperación de la Información Aerométrica (AIRS) del periodo de 1983 a 1994. También se tomaron en cuenta los datos de temperatura máxima diaria a cada hora para el mismo periodo de tiempo del Servicio Nacional del Tiempo. El análisis exitoso del problema del ozono requiere una separación cuidadosa de los componentes estacionales y sinópticos. Las series de tiempo de los datos de ozono y temperatura están representadas por

$$\mathbf{O}(t) = \mathbf{e}(t) + \mathbf{S}(t) + \mathbf{W}(t); \mathbf{T}(t) = \mathbf{e}'(t) + \mathbf{S}'(t) + \mathbf{W}'(t) \quad (1)$$

donde $\mathbf{O}(t)$ es el logaritmo natural del ozono original de las series de tiempo y $\mathbf{T}(t)$ es la temperatura de las series de tiempo, $\mathbf{e}(t)$ es el componente de la tendencia a largo plazo, $\mathbf{S}(t)$ es el cambio estacional, $\mathbf{W}(t)$ es la variación a corto plazo y t es el tiempo. Considerando que, $\mathbf{O}(t)$ es la transformada del logaritmo, el análisis estadístico puede realizarse con éxito, $\mathbf{T}(t)$ sigue un modelo aditivo; los componentes de ese modelo aditivo son $\mathbf{W}'(t)$, $\mathbf{S}'(t)$ y $\mathbf{e}'(t)$ teniendo los mismos significados como la primera parte de la ecuación.

En este trabajo, los componentes en los datos debido a las diferentes escalas de movimiento son separados utilizando los filtros KZ. Este filtro se distingue por un algoritmo simple y la preservación de la información real cuando se aplica en un espacio desigual y/o los errores de los datos del ambiente. El filtro $KZ(m, k)$ es definido como k aplicaciones de un movimiento promedio simple de m puntos. El movimiento promedio se expresa como:

$$Y_t = \frac{1}{m} \sum_{s=(m-1)/2}^{(m-1)/2} X(t+s) \quad (2)$$

donde X es el tiempo original de las series de tiempo y t es el tiempo en días. Las series Y_t se convierten en la entrada para el segundo paso, y así sucesivamente. Las series de tiempo generadas por k iteraciones de los filtros descritos por la ecuación (2) son denotadas por $Y_t^{(k)}$. La función transferida cuadrada de $KZ(m, k)$ es dada por

$$|\phi_{m,k}(\omega)|^2 = \left[\frac{1}{m} \frac{\text{sen}(\pi m \omega)}{\text{sen}(\pi \omega)} \right]^{2k} \quad (3)$$

donde ω tiene unidades de ciclos por día (frecuencia). La ecuación (3) muestra, entre otras cosas, que el KZ es un filtro de bajo paso. El parámetro k controla el nivel de supresión de ruido. Entonces

$$\omega_0 \approx \frac{6}{\pi} \frac{1 - (1/2)^{1/2k}}{m^2 - (1/2)^{1/2k}} \quad (4)$$

donde ω_0 es la separación de frecuencia deseada. El lado derecho de la ecuación (4) es la solución aproximada de la ecuación $|\phi_{m,k}(\omega)|^2 = 1/2$.

En este artículo, los autores han demostrado la necesidad de separar los diversos componentes espectrales de series de tiempo del ozono. La separación lleva a entender claramente al ozono y las relaciones de las variables meteorológicas y sus precursores. Se obtiene una alta correlación en el espacio cuando el componente de ozono es a corto plazo, atribuible para tiempo a corto plazo y fluctuaciones de las emisiones de los precursores de ozono, y reteniendo el 50% de la información a corto plazo a unas distancias de 350 a 400 Km.

Yang J. y Millar D. R.,¹² de las Universidades de Rhode Island y Connecticut, analizan las características espaciales y temporales de las medidas del ozono a nivel del suelo a cada hora de 10 estaciones de análisis en Connecticut del 1 de abril al 31 de octubre del periodo de 1981 a 1997; con el fin de detectar la tendencia del ozono causada por las emisiones de los precursores del ozono. Usan filtros de promedio móvil y un modelo de regresión de mínimos cuadrados utilizado para eliminar la variación a corto plazo y los efectos de la temperatura de datos de tiempo de series originales. La media diaria horaria de las concentraciones de ozono medidas se analiza espectralmente para determinar las características de la frecuencia de las series del tiempo del ozono. Se filtra la concentración de la transformada del logaritmo del ozono máximo diario a cada hora y la temperatura superficial máxima diaria correspondiente a cada hora, para aplicar un modelo de regresión lineal. El análisis espectral se basó en la transformada de Fourier, empleada para examinar las características de las frecuencias en el ozono y la temperatura. Los resultados de los análisis espectrales son presentados como periodogramas en los cuales los picos pueden ser utilizados para medir la frecuencia y fuerza de la repetición de ciclos en los datos de las series de tiempo.

Las variaciones temporales de las medidas de ozono son analizadas utilizando dos filtros KZ. Uno es el filtro KZ(15, 5), con un tamaño de ventana de 15 días y 5 iteraciones, utilizado para remover los componentes con periodos menores a 33 días. El otro es el filtro KZ(214,3), con una medida de ventana de un año (del 1 de abril al 31 de octubre), el cual es capaz de remover todos los componentes con periodos menores a 500 días. Utilizando esos dos filtros, las series de tiempo de los datos de concentraciones de ozono son separadas en: a) componentes a corto plazo representando la influencia de las condiciones meteorológicas de fluctuaciones sinópticas y procesos al azar, b) la influencia de la rotación de la tierra alrededor del sol

representado como un componente estacional y c) representan a los componentes a largo plazo de la influencia de cambios en emisiones y el clima. Después se utiliza el modelo de regresión de mínimos cuadrados para remover los efectos meteorológicos de la línea original del ozono. Para este caso, la influencia de las variables meteorológicas en el ozono ambiental fue moderada, se utiliza la temperatura como un sustituto para todas las condiciones meteorológicas que afectan el ozono. Finalmente se aplica el filtro KZ(214, 3), para remover los componentes estacionales. La tendencia a largo plazo de los residuos que permanecen, puede atribuirse a cambios en emisiones causadas por las acciones de las políticas de control.

En el aspecto espacial, tanto del transporte de las fuentes de ozono regional y local afectan la variación de ozono. Desde el punto de vista del transporte por el aire, significa que el transporte de ozono regional a Connecticut puede ser asociado con la corriente de aire persistente del sudoeste. Recíprocamente, durante los periodos de estancamiento, el transporte del ozono regional probablemente ocurre menos, y las fuentes locales son dominantes. La valoración del efecto de transporte de ozono regional requiere el análisis histórico de las masas de aire, pero este tipo de datos no está disponible para este periodo del estudio.

Los resultados muestran que en 8 horas aproximadamente se excede la norma de 2 a 3 veces. Esto puede representar un problema para el futuro en Connecticut y las regiones circundantes. Todas las estaciones presentan una tendencia similar de ozono máximo diario y mínimo. El ozono máximo diario tiene una gran variación. Después del primer pico en 1983, hubo una declinación hasta 1986. Un segundo pico ocurre en 1988 y declina otra vez. También se encuentra que decrece la media diaria y es muy pequeña la concentración de ozono mínimo, de hecho, en algunas estaciones, un aumento gradual de concentraciones de ozono ocurren entre 1992 y 1997. Esto indica las dificultades para reducir las concentraciones de ozono relacionadas con factores naturales.

Al examinar la concentración de ozono máxima diaria entre sitios urbanos y no urbanos se observa que el promedio de ozono máximo diario en sitios no urbanos es más de 10 ppb, superior que en sitios urbanos. Esto último puede ser explicado debido a la distribución espacial del nivel de ozono en el suelo en Connecticut. El análisis realizado entre semana y los fines de semana muestran que la cantidad promedio diario de ozono en los fines de semana en sitios urbanos es mayor a 3 ppb, superior que lo correspondiente a los días entre semana.

Barbara E. Smith y William J. Adamski,¹³ de la Oficina de la Dirección de Aire, Madison, Wisconsin; analizan la tendencia de ozono promedio de una hora y ocho horas calculada para diez sitios cercanos al Lago Michigan del 15 de abril al 15 de octubre de 1980 a 1995. Los datos de ozono son ajustados para eliminar el efecto de las variables meteorológicas utilizando el método desarrollado por Rao y Zurbenko;¹² posteriormente aplicaron el modelo de regresión lineal para determinar la relación entre los datos filtrados de ozono y la temperatura, consiguiendo mejores coeficientes de correlación. En la mayor parte de los sitios, la curva de tendencia alcanza el pico durante 1988 a 1989, seguido por un declive hasta 1992 a 1994. Ambas tendencias declinaron, para los siete sitios hacia el lado del oeste del Lago Michigan (UWM-N, Slinger, Waukesha, Madison, Racine, Kenosha y Evanston). Para esos sitios, el decremento neto, promedió 0.83% por año para 8 horas de ozono y 0.91% por año para 1 hora

de ozono. Estas estimaciones indican que el problema del ozono disminuyó. En particular, la declinación de picos de los valores de ozono de 1 hora, ocurrieron sin que aumentara el nivel de ozono. En la parte sur y oriente las tendencias fueron estadísticamente insignificantes.

*Jiann-Long Chen, et. al.*¹⁴ del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Cincinnati, en Ohio; indican que es muy difícil modelar, calibrar y validar las variaciones de ozono a partir de primeros principios en virtud de la variabilidad temporal y espacial de la concentración de contaminantes, así como la influencia de las condiciones meteorológicas y la incertidumbre de las condiciones iniciales y de frontera. Desarrollan un procedimiento fundamentado en la teoría de sistemas dinámicos y un modelo que se construye al crear una fase multidimensional de espacio a partir de las observaciones de los niveles de ozono. Hacen predicciones con antelación de una y 24 horas en el área de Cincinnati. Resultados obtenidos de la serie de tiempo de ozono, señalan que puede ser caracterizado como un sistema de retrasos de dimensión reducida. Utilizan varios criterios para determinar la exactitud de las predicciones: error cuadrático medio, exactitud de la predicción y el coeficiente de correlación. Demuestran claramente que es superior el modelo espacial de fase que el auto regresivo, particularmente en las predicciones con una hora de antelación. Para determinar el retraso del método de retrasos, se escoge el tiempo tal que la auto correlación alcanza el valor de $1/e$.

Para predicciones con una hora de antelación, el método de retrasos, el modelo óptimo de espacio de fase tiene una dimensión embebida de ocho. Para la misma serie de tiempos, el modelo óptimo auto regresivo tiene un orden de 28. Debe enfatizarse que el modelo de espacio de fase tiene solamente dos parámetros, mientras que el auto regresivo óptimo cuenta con 30 parámetros. Para predicciones con antelación de una hora, el modelo de retrasos y auto regresivo predicen valores menores del máximo de 0.082 ppm, sin embargo el de retrasos predice más cercanamente que el auto regresivo, particularmente durante las primeras 24 horas.

Para predicciones con una hora de anticipación, la desviación es cerca de 0.0014 ppm por el modelo de retrasos y para el auto regresivo de 0.0095 ppm. Con respecto al error cuadrático medio, para predicción con una hora de antelación, el de retrasos da un error de 0.012, mientras que el auto regresivo de 0.013. Con un día de antelación, ambos métodos rinden el mismo error cuadrático medio de 0.018.

*Jennifer B. Flaum et. al.*¹⁵ de la Universidad de New York, Albany, New York, utilizan el filtro de Rao y Zurbenko:

$$X(t) = e(t) + S(t) + W(t) \quad (1)$$

donde $X(t)$ es la serie de tiempo original, $e(t)$ es la tendencia del componente a largo plazo, $S(t)$ es la variación estacional y $W(t)$ es la variación a corto plazo. Las partes determinadas (e y S) son separadas de los datos de las variaciones a corto plazo utilizando el filtro de

Kolmogorov-Zurbenko ($KZ_{m,p}$). El $KZ_{m,p}$ es un filtro promedio móvil simple de iteraciones repetidas. Cada iteración de un promedio móvil se define como:

$$y_{i,m} = \frac{1}{m} \sum_{j=-k}^k X_{i+j} \quad (2)$$

donde $m=2k+1$ y la Y_i llega es la entrada para el segundo paso y así sucesivamente. La serie de tiempo deseada, Y_i , se denota:

$$Y_i = KZ_{m,p}(X_i) \quad (3)$$

Rao y Zurbenko han mostrado que cuando el filtro $KZ_{29,3}$ se aplica a los datos diarios, se genera una serie de tiempos la cual es desprovista del ruido blanco e incluye solo variaciones estacionales a largo plazo. El logaritmo de ozono filtrado, las temperaturas, temperatura de punto de rocío, humedad específica, humedad relativa y velocidad del viento de las series de tiempo filtradas se denotan como $O_{kz}(t)$, $T_{kz}(t)$, $Td_{kz}(t)$, $Q_{kz}(t)$, $RH_{kz}(t)$ y $Wspd_{kz}(t)$ respectivamente.

Los autores están interesados en considerar otras variables meteorológicas además de la temperatura de superficie. Cuando la relación entre el O_i y las variables meteorológicas es descrita utilizando una técnica de regresión múltiple, los aspectos estacionales de la relación llegan a mezclarse completamente con los componentes a corto plazo, produciendo un efecto falso no lineal.

Un análisis de regresión lineal de dos variables realizado con el filtro de series de tiempo de cada una de las variables anteriores a cada situación mostró que el ozono presenta una mejor correlación con la temperatura de la superficie, temperatura de punto de rocío y humedad específica que con la velocidad del viento o la humedad relativa. Utilizando la regresión lineal de tres variables, con el logaritmo de ozono filtrado de las series de tiempo, se representa como:

$$O_{kz}(t) = aT_{kz}(t) + bX_{kz}(t) + c + \epsilon(t) \quad (4)$$

donde a , b y c son parámetros ajustados, T_{kz} es la temperatura filtrada, X_{kz} es alguna otra variable meteorológica y $\epsilon(t)$ representa los residuos de la relación. La relación lineal entre las variables llega a ser estrecha cuando los datos del ozono y las variables meteorológicas se cambian temporalmente con respecto a otros. Esto puede escribirse como:

$$O_{kz}(t) = aT_{kz}(t+i) + bX_{kz}(t+j) + c + \varepsilon(t) \quad (5)$$

donde la temperatura T y la segunda variable X son i y j días anteriores respectivamente. Los valores para las variaciones, i y j , son aquellos que permiten la correlación máxima entre las variables. Cuando la temperatura de rocío es utilizada en combinación con la temperatura de superficie se obtiene un máximo de $R^2 = 0.944$, mientras que para el sitio de Charlotte, NC con la temperatura de superficie únicamente, da una $R^2 = 0.909$. El logaritmo original de ozono de las series de tiempo puede describirse por las variaciones estacionales a largo plazo, $O_{kz}(t)$ y el proceso del ruido blanco en el dato $W(t)$ como:

$$O(t) = W(t) + O_{kz}(t) \quad (6)$$

Los resultados mostrados en esta investigación revelan que la contribución del componente a corto plazo a la variante total es bastante grande, y demuestra la necesidad de remover el ruido blanco al extraer la información de la base de datos. Combinando la ecuación (5) y la (6) se obtiene:

$$O(t) = W(t) + [aT_{kz}(t+i) + bTd_{kz}(t+j) + c] + \varepsilon_{kz,año,3}(t) \quad (7)$$

El primer término del lado derecho de la ecuación (7) representa la variación a corto plazo; el siguiente término (en el doble paréntesis) describe la temperatura a largo plazo y estacional y los efectos en el ozono de la temperatura en el punto de rocío; el tercer término representa los efectos de las emisiones a largo plazo inexplicado por las dos variables meteorológicas escogidas; y el cuarto término $[\delta_t = \{\varepsilon(t) - \varepsilon_{kz,año,3}(t)\}]$, representa las pequeñas variaciones estacionales del ozono inducidas por las variables meteorológicas de aquellas incluidas en la ecuación (5).

Se muestran las correlaciones de diversas variables de datos de cuatro sitios de análisis (Cliffside Park, NJ; Chester, SC; Decatur, GA y Washington, D.C.); los resultados son similares para todas las estaciones examinadas en esta investigación, en la que el ozono estacional se correlaciona favorablemente con la temperatura estacional. De las cinco variables meteorológicas consideradas aquí, la que desplegó el segundo coeficiente de la correlación más importante fue la temperatura de punto de rocío. La tercera fue la humedad específica. El análisis realizado de dos variables utiliza todas las combinaciones de variables revelando que la combinación de temperatura y la de punto de rocío da el mejor resultado de la variación en $O_{kz}(t)$. Esto se espera debido a las similitudes en los ciclos estacionales de ozono, temperatura y temperatura de punto de rocío. Aparece que las estaciones con la correlación más alta entre el ozono y la temperatura de superficie son aquellas que tienen un ciclo estacional más dramático, como los sitios norteros. Bridgeport, CT es una excepción a esta conducta en que

la regresión de una variable tiene un valor relativamente pequeño de R^2 y la adición de la segunda variable mejora poco la correlación. Debe notarse que los datos de este sitio están disponibles sólo durante seis meses al año.

En la mayoría de los sitios, las diferencias entre los máximos de $\epsilon(t)$ del método de una variable y de dos variables son pequeñas. Esto es debido a que en esos sitios, la correlación entre la temperatura y la temperatura de punto de rocío es extremadamente alta ($R^2 = 0.98$ para Cliffside Park y Washington).

*Ernesto Sandoval, et. al.*¹⁶ de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, México, D.F.; hacen referencia a la situación tecnológica y de la calidad del aire de 1986 al presente. A finales de 1987 en la Ciudad de México, se incorporó a la rutina del pronóstico los análisis sinópticos de cartas de superficie, de altura, de vientos máximos, fotografías de satélite y otros, con lo cual se vislumbró de manera más objetiva la influencia que ejercían sobre la dispersión de los contaminantes sistemas atmosféricos como los de alta presión, ondas tropicales y otros fenómenos meteorológicos. Con este tipo de análisis, que en la actualidad se realiza diariamente en la Ciudad de México, el pronóstico mejoró en su efectividad. En los estudios de radiosondeo atmosféricos se identifica el grado de estabilidad de la atmósfera. También mencionan el fenómeno que da lugar a la formación de una inversión térmica; siendo en el Valle de México la radiación y la subsidencia. La importancia del fenómeno de las inversiones térmicas como uno de los factores que impiden la dispersión de los contaminantes radica en el hecho de que se inhiben los movimientos atmosféricos tanto horizontal como verticalmente, debido a que el aire más frío, y por consiguiente más pesado, se encuentra en la parte baja de dicha capa, y el más caliente y ligero, por encima. Esto produce las condiciones más críticas de estabilidad atmosférica, dando lugar al estancamiento de los contaminantes en los lugares donde se produzcan emisiones.

*Luis Leobardo Díaz Gutiérrez*¹⁷ de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México, DF, al realizar una revisión de los datos disponibles, el autor observó que la estación de análisis de Tacuba, contaba con la mayoría de los datos. Selecciona los meses de marzo y abril, tomando en consideración que de acuerdo con los comportamientos históricos, en estos meses se presenta un número importante de días con altas concentraciones de ozono que rebasan la norma NOM-020-SSA1-1993 e incluso se tiene el mayor número de contingencias en el año. Por otra parte, en estos meses no se tiene precipitación pluvial ni cambios extremos en la temperatura o condiciones atmosféricas que provocan la dispersión de los contaminantes y cambios radicales en su comportamiento. Se aplicó un modelo matemático con la concentración de ozono, precursores y variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura, dirección del viento, velocidad del viento, concentración de ozono y concentración de óxidos de nitrógeno) de los meses de marzo y abril para los años 2000 (1162 series de datos) y 2001 (1407 series de datos) de la estación de análisis de Tacuba.

Al observar el patrón de las concentraciones a través del tiempo, se advierte que el ozono presenta prácticamente todos los días un comportamiento cíclico, con zonas de concentración despreciables entre las 20 horas y las 7 horas del día siguiente y comienza a formarse en una hora en que ha habido emisiones de sus precursores, los óxidos de nitrógeno (NOx) y los

compuestos orgánicos volátiles (COV), mediante las reacciones fotoquímicas desencadenadas por la radiación solar; el ozono presenta un máximo cerca de las 15 horas, mostrando un decremento cuando la radiación solar disminuye. Se revisó el comportamiento de otros sitios en la zona centro de la Ciudad de México (Lagunilla, Merced y Hangares), encontrado la misma conducta que en la estación de Tacuba. En otro análisis, tomando en cuenta los informes del IMECA para los meses de marzo y abril de 2001, se puede apreciar que el comportamiento es similar en las cinco zonas en que se divide la ZMVM; sin embargo, al realizar un análisis, utilizando el paquete Statistica, se determinó que únicamente en las zonas noroeste y noreste no manifestaban diferencias significativas. Entre las demás, las diferencias sí son significativas.

Para la determinación de los coeficientes de correlación del modelo multivariable, se usó el paquete software Statistica. El modelo para la concentración de ozono en un punto de la ZMVM quedó de la siguiente forma:

$$Y_{\text{est}} = -0.00058 - 0.00027 X_1 - 0.00039 X_2 + 0.000148 X_3^2 - 0.00002 X_4 + 0.001744 X_5^2 + 0.17649 X_6 - 0.00091 X_3 X_5 + 0.000017 X_2 X_3 + 0.00014 X_2 X_5 \quad (1)$$

Donde Y_{est} es el ozono ppm, X_1 es la hora del día, X_2 es la humedad relativa en %, X_3 es la temperatura en °C, X_4 es la dirección del viento en grados, X_5 es la velocidad del viento en m/seg y X_6 son los NOx en ppm.

El cálculo del error estándar entre los datos reales y los valores calculados se obtuvo mediante el desarrollo de un programa en Excel. Se obtuvieron cuatro modelos, pero el mejor fue en el que se emplearon los datos del año 2001, el cual presenta un coeficiente de correlación bajo ($R^2=0.66$), pero presentó numéricamente el menor error estándar para el ozono estimado respecto a los datos reales de los años analizados.

También se aplicó el modelo autoregresivo con los mismos datos de las concentraciones de ozono de los meses de marzo y abril para los mismos años del modelo anterior. En este caso se consideraron los datos de 24 horas continuas de medición en la estación de análisis. La base de datos fue conformada con el dato de una hora determinada (Y_t) y los datos de una y dos horas anteriores (Y_{t-1} y Y_{t-2}), utilizando el paquete Statistica y nuevamente se utilizó la rutina del análisis multivariable quedando de la siguiente forma:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} \dots + \beta_n Y_{t-n} \quad (2)$$

donde Y_t es el ozono en ppm, Y_{t-1} es la concentración de ozono promedio a una hora anterior y Y_{t-2} es la concentración de ozono promedio a dos horas antes. Este modelo presenta una

mejor bondad para predecir las concentraciones de ozono, respecto a los modelos anteriores ($R^2 = 0.87$), aún cuando en algunos casos se presentan valores de concentración negativos.

Referencias

- 1.- Daniel Peña, "Estadística, Modelos y Métodos 2. Modelos Lineales y Series Temporales", Alianza Universidad, Madrid, 1989.
- 2.- Comrie, A.C., J. Air & Waste Manag. Assoc., 1997, 47, 653-663.
- 3.- Yi, J.; Prybutoki, V.R., Environ. Pollution, 1996, 92, 349.
- 4.- Liu, P-W. G; Johnson, R., J. Air & Waste Manang. Assoc., 2003, 53, 1472.
- 5.- Xu, D.; Yap, D; Taylor, P.A., Atmos. Environ, 1996, 30, 1117.
- 6.- Prior, E.J.; Schiess, J.R.; McDougal, D.S., Environ. Sci. & Technol., 1981, 15, 430-436.
- 7.- Korsog, P.E; Wolf, G.T., Atmos. Environ., 25B, 1991, 47.
- 8.- Shively, T.S. and Sager T.W. Environ. Sci. & Technol., 2001, 35, 2554.
- 9.- Chen, K-S., Ho, Y.T.; Lai, C.H.; Tsai, Y.A.; Chen, S.J., Air & Waste Manang. Assoc., 2004, 54, 36.
- 10.- Davies, J.M.; Speckman, P., Atmos. Environ., 1999, 33, 2487.
- 11.- Rao, S.T.; Zurbenko, I.G.; Neagu, R.; Porter, P.S.; Ku, J.Y.; Henry, R.F., Bull. Am. Meteor. Soc., 1997, 78, 2153.
- 12.- Yang, J.; Miller, D.R., J. Air & waste Manang. Assoc., 2002, 52, 1354.
- 13.- Smith, B.E.; Adamski, W.J., J. Air & waste Manang. Assoc., 1998, 48, 1204.
- 14.- Chen, J-L.; Islam, S.; Biswas, P., Atmos. Environ, 1998, 11, 1839.
- 15.- Flaum, J.B.; Rao, S.T.; Zurbenko, I.G., J. Air & waste Manang. Assoc., 1996, 46, 35.
- 16.- Sandoval, E.; Escamilla, P.; Cerna, J.M.; Páramo, V.H.; González, R., Ciencia y Desarrollo, V.XVIII, 103, 51.
- 17.- Díaz-Gutiérrez, L.L., Diciembre 10 del 2001, Comunicación Personal. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco (UAM).

Capítulo II. Perfil del ozono y de las variables meteorológicas en la Ciudad de México

II.1. Antecedentes

La contaminación atmosférica es uno de los problemas más serios que enfrenta nuestro mundo moderno. Cerca de la mitad de la población del mundo vive en áreas urbanas debido a que ahí encuentran oportunidades para mejorar la calidad de vida, pero ello ocasiona un impacto al ambiente.

La mala calidad del aire en las zonas metropolitanas se explica en parte por la cantidad e inadecuada calidad de los combustibles consumidos, por el tipo de tecnologías imperantes en la planta industrial, por la alta concentración de las actividades productivas y de población, así como por las condiciones meteorológicas existentes.

El reducir la contaminación atmosférica es una de las prioridades más urgentes, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), ya que afecta tanto la calidad de vida de sus más de 18 millones de habitantes, como el ecosistema donde se encuentra localizada. El incremento de emisiones y, por tanto, las mayores concentraciones de contaminantes es particularmente ostensible en la zona metropolitana de la ciudad de México. Los habitantes de esta metrópoli se exponen de manera crítica a los efectos de los contaminantes, particularmente a aquellos con un pronunciado gradiente de concentración espacial, como es el caso del ozono y de las partículas suspendidas.

La contaminación atmosférica en la Ciudad de México crecía a fines de la década de los años ochentas, a un ritmo muy preocupante. La ciudad estaba experimentando lo que en otras ciudades había ocurrido cuando sus habitantes y las industrias localizadas en ella se adaptan a nuevas leyes y normas ambientales. Es decir, el abatimiento de los contaminantes más fáciles de controlar provocó que los contaminantes más pertinaces destacaran. De igual manera, la complejidad del problema hacía imposible que tanto los científicos como los tomadores de decisiones pudieran predecir con precisión los efectos de las nuevas políticas de control utilizando únicamente las herramientas disponibles hasta ese momento.

De noviembre a mayo, en la década de los años ochenta, imperaban condiciones climatológicas desfavorables, en particular por, las inversiones térmicas que se presentaban más de 20 días al mes. Además, la inversión térmica rompía tarde en diciembre y enero. Diciembre solía ser un mes crítico ya que, además del frío imperante, en algunos años la inversión térmica rompió después de las 11 horas en promedio.¹ El 19 de diciembre de 1985, día en que no rompió la inversión térmica, la ciudad quedó envuelta por una espesa capa de neblina y humo que permaneció en el ambiente más de 24 horas. Este fenómeno meteorológico, que despertó la intranquilidad de la ciudadanía y la atención de la prensa, hizo que el 14 de febrero de 1986, el presidente Miguel de la Madrid Hurtado publicara un decreto en el Diario Oficial de la Federación, en el que consideraba que los índices de contaminación

registrados en los últimos meses en la ciudad, agravados por la inversión térmica, hacían necesario adoptar medidas impostergables que revirtieran el fenómeno de la contaminación del aire. Las medidas y acciones específicas que propuso sentaron las bases para que en el corto y mediano plazos se iniciaran los controles de las fuentes de emisión de contaminantes, sin poner en peligro la planta productiva y el empleo y sin menoscabo de derechos y necesidades de la población.

Los esfuerzos para sanear la atmósfera de esta metrópoli, son muy recientes. Hasta 1986, se operaba una pequeña red de monitoreo manual del aire que medía principalmente SO₂, plomo y partículas. Durante ese año se instaló la primera Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) integrada por 25 estaciones de medición en tiempo real, que registran los niveles de ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), plomo (Pb), partículas totales en suspensión (PTS) y, a partir de 1995, partículas menores a 10 micras (PM₁₀) y radiación ultravioleta (UV-B). La RAMA actual cubre gran parte de la zona metropolitana con 32 estaciones automáticas y 12 manuales en operación.

Para los años de 1987 a 1988, la RAMA había producido una serie continua y confiable de registros de la calidad del aire. Sus datos indicaban que se violaban las normas de todos los contaminantes, casi todos los días, alcanzando niveles de concentración de hasta dos y tres veces por arriba de los estándares internacionales. Por decisión gubernamental, esta información se empezó a dar a conocer a la sociedad diariamente a través de los medios masivos de comunicación, para promover la creación de una conciencia social que sustentara la instrumentación de las medidas necesarias de prevención y control de las emisiones contaminantes.

La información registrada por la RAMA hasta la fecha, permite la identificación de los principales problemas de contaminación del aire de la región, destacando la contaminación por ozono y partículas suspendidas, las cuales muestran una frecuencia de excedencia a la norma de calidad del aire, superior a los 200 días al año, en el caso del ozono, en el suroeste de la ciudad.

En paralelo, a principios de 1989, el Gobierno Federal junto con los Gobiernos locales del Distrito Federal y del Estado de México (entidades sobre las que se asienta la metrópoli) constituyeron un Grupo Intergubernamental para analizar las causas y fuentes de la contaminación, así como para diseñar e instrumentar las medidas para su prevención y control.

Además de la preparación de programas y proyectos para el control de las fuentes de emisiones contaminantes, el grupo intergubernamental produjo el primer Programa Integral para Combatir la Contaminación Atmosférica (PICCA). El programa se orientaba a través de cinco líneas de acciones estratégicas:

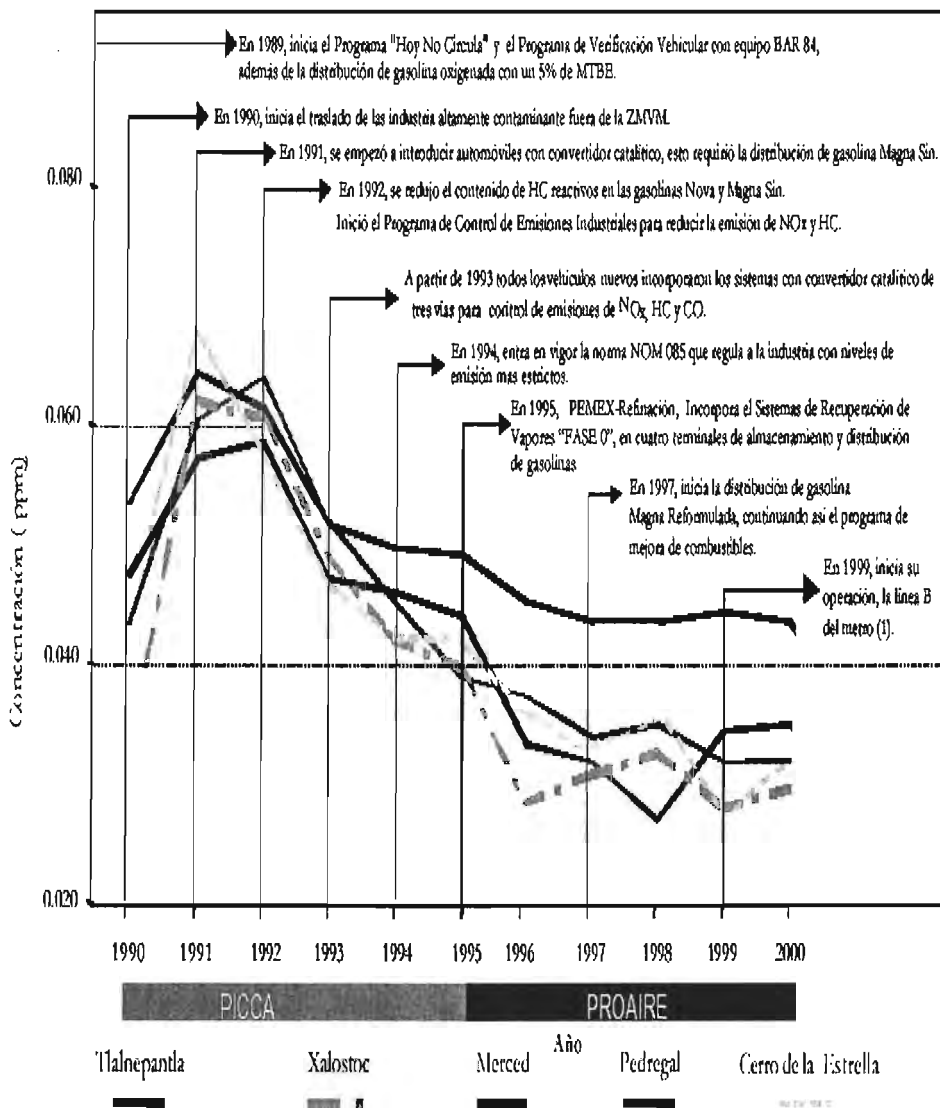
- Mejorar la calidad ambiental de los combustibles y promover la utilización de los más limpios

- Modernizar la flota vehicular con tecnologías menos contaminantes, expandir y articular el transporte colectivo y fiscalizar las emisiones de todos los vehículos en circulación
- Modernizar ambientalmente a la industria y asegurar el cumplimiento de la normatividad ambiental
- Proteger y restaurar los recursos naturales de la cuenca donde se asienta la metrópoli
- Desarrollar la investigación científica sobre el fenómeno y sus alternativas de manejo, educar ambientalmente a la población y promover la participación ciudadana

En 1995, sustentado en la información científica que se había estado generando y construyendo sobre los logros del programa anterior (PICCA), se preparó el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000 (PROAIRE). Este programa seguía básicamente las líneas estratégicas del anterior, reforzando y ampliando las medidas de prevención y control instrumentadas para mejorar la calidad de los combustibles, disminuir las emisiones del transporte e industrias y proteger los recursos naturales de la cuenca.

De la misma forma el INE (antes Subsecretaría de SEDUE) cuenta con un plan de contingencias ambientales por episodios de contaminación atmosférica, que ya ha aplicado en diversas ocasiones y que consiste en la aplicación progresiva de medidas de control, cuyo tipo e intensidad de aplicación depende del comportamiento de los niveles de contaminación y de las condiciones meteorológicas prevalecientes. La aplicación del plan se determina cuando los niveles de contaminación tienden a elevarse, y las condiciones meteorológicas tienden a ser o mantenerse desfavorables. Ante esta situación se inicia la aplicación de medidas preventivas y correctivas tales como la disminución de la actividad industrial y la agilización de la circulación vehicular, entre otras.

Gráfica 1. Tendencia del análisis atmosférico de ozono y principales acciones para inhibir su formación en la ZMVM, 1990-2000.²



(1) En el tramo Buenavista-Villa de Aragón.

II.2. Ubicación y entorno de la zona metropolitana del valle de México

Para situar el problema de la contaminación en perspectiva, conviene mencionar que más de la mitad de la industria del país se encuentra localizada en el área urbana inserta en la ZMCM. Adicionalmente, más de una quinta parte de la población nacional habita en la Ciudad de México, donde se consume más de 150 veces el promedio nacional de energía por unidad de área y circulan las tres quintas partes de los vehículos del país. Estos factores, aunados a la altitud y a que está rodeada de montañas, contribuyen al deterioro de la calidad del aire. Aún más, la combinación de topografía, clima y altitud de la Ciudad de México añaden un importante grado de dificultad a la tarea de encontrar la solución al problema de la contaminación.

La zona metropolitana de la Ciudad de México se encuentra localizada en una cuenca cerrada por montañas que limitan la entrada de vientos que dispersen la contaminación. El Valle de México se ubica sobre los 19°20' de Latitud Norte y 99°05' de Longitud Oeste, formando parte de una cuenca, la cual tiene una elevación promedio de 2,240 metros sobre el nivel del mar, por lo que recibe una fuerte radiación solar que transforma los NOx e hidrocarburos que se emiten, en ozono. Su altitud también incidía en la formación casi diaria de inversiones térmicas, que impedían la dispersión ascendente de los contaminantes y los concentra cerca del suelo urbano. En una superficie de 9,560 km², la ciudad presenta valles intermontañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos, en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco; está integrada por una parte del Estado de México, el sur del Estado de Hidalgo, el sureste de Tlaxcala y casi la totalidad del Distrito Federal. Dentro del Valle se ubica la ZMVM (16 delegaciones y 18 municipios del Estado de México), con una superficie de 3,540 km² lo que representa el 37% de la cuenca del Valle de México, que cuenta con prominencias topográficas aisladas como el Cerro de la Estrella, el Peñón y el Cerro de Chapultepec, entre otros; su ubicación geográfica y su entorno característico ejercen una influencia determinante sobre la calidad del aire existente en esta zona.²

Debido a la latitud de la Ciudad, el número de horas con luz solar y el ángulo directo del sol tienen poca variación estacional. Lo anterior provoca que en la Ciudad de México el problema de ozono esté presente durante todo el año, en tanto que en otras ciudades constituye un problema estacional.

A la altitud de la Ciudad de México la atmósfera es aproximadamente 25% menos densa que al nivel del mar. Esto significa que el filtro protector que la atmósfera ofrece es 25% menor. En consecuencia la mayor incidencia de radiación azul y ultravioleta acelera las reacciones fotoquímicas en la atmósfera y da lugar a una mayor formación de ozono. Además, al ser el aire menos denso, la mezcla aire-gasolina se enriquece en gasolina, dando origen a una combustión incompleta.

El problema de calidad de aire más severo en la Ciudad de México lo constituye el ozono. Invisible y sin fuentes de emisión, el ozono se forma en la naturaleza por medio de reacciones fotoquímicas complejas. Estas involucran la interacción de la componente ultravioleta de la

luz solar con los contaminantes atmosféricos. Los procesos fotoquímicos que se llevan a cabo en la atmósfera dan lugar a la formación de ozono y a otros contaminantes secundarios.

Entre los contaminantes que destacan son el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos no quemados (HC), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el bióxido de azufre (SO₂) y las partículas en suspensión (PTS).

Debido a la localización de la ZMCM así como a sus características climáticas y orográficas existe una inmensa actividad fotoquímica en la atmósfera, que se manifiesta a través de la formación de oxidantes fotoquímicos, dentro de las cuales el ozono es su trazador típico. El ozono se forma a partir de las reacciones de los óxidos de nitrógeno mediante procesos catalizados por la luz solar, aumentando su concentración en presencia de hidrocarburos. Ambos contaminantes (óxidos de nitrógeno e hidrocarburos) provienen en su mayoría de los vehículos automotores.

El área urbana se extiende en una cuenca semicerrada, en la porción suroeste del Valle de México, la cual está sujeta de manera natural a condiciones que no favorecen una adecuada ventilación de la atmósfera. Entre los principales factores fisiográficos y climáticos que afectan la calidad del aire destacan los siguientes:

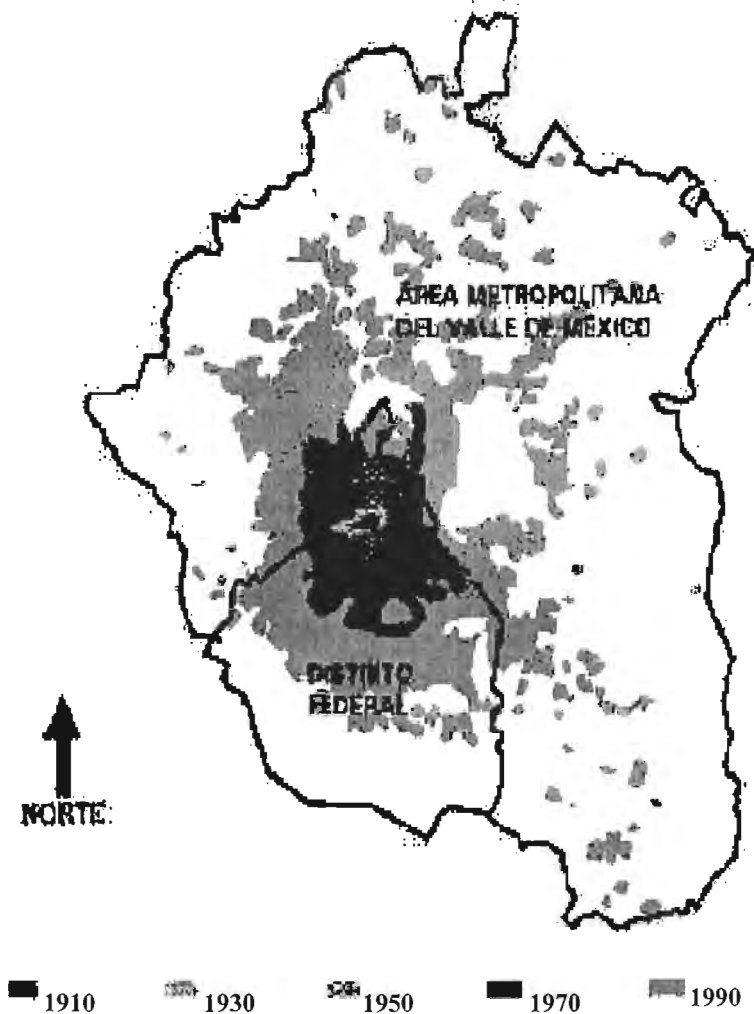
- El entorno montañoso que rodea la cuenca constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes. Por ello, es un medio propicio para la acumulación de los contaminantes atmosféricos. Las montañas que delimitan la cuenca alcanzan una altitud promedio de 3,200 metros, con elevaciones que superan los 5,400 metros
- Las frecuentes inversiones térmicas que ocurrían en el valle, en más del 70% de los días del año, eran un fenómeno natural que causaba un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera. Ello inhibía la capacidad de autodepuración de ésta y favorecía la acumulación de los contaminantes. El estancamiento perdura hasta que, al transcurrir el día y de manera gradual, la inversión térmica se rompe debido al calentamiento del suelo, entonces los contaminantes se dispersan
- Los sistemas anticiclónicos que se registran frecuentemente en la región centro del país, tienen la capacidad de generar cápsulas de aire inmóvil en áreas que pueden abarcar regiones mucho mayores que el Valle de México
- La intensa y constante radiación solar que se registra en el Valle de México a lo largo de todo el año, favorece la formación del ozono. Ello es resultado de las complejas reacciones que la luz ultravioleta del sol desencadena entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos emitidos a la atmósfera, los cuales son precursores del ozono

- La altitud a la que se ubica el Valle de México (2,240 m), determina que el aire sea 23% menos denso que a nivel del mar, lo cual tiende a desfavorecer los procesos de combustión en los vehículos diseñados para funcionar en el mar

A lo largo del siglo XX, la superficie ocupada por la zona metropolitana se ha expandido dramáticamente a la par del crecimiento de la población (figura 1).² Alrededor de la década de los años treinta, la población de la ZMVM aumentó a tasas relativamente altas, superiores a las del resto del país. En la década de los años cincuenta se produjo la expansión espacial de la metrópoli, prácticamente dentro de los límites del Distrito Federal, donde entonces habitaba el 99% de la población de la región. Esta es la época en que el crecimiento demográfico tuvo las tasas de crecimiento más altas de la historia. En la década de los años setenta, la zona metropolitana rebasó los límites del Distrito Federal y se extendió al Estado de México.

Este crecimiento poblacional tiene efectos negativos porque desplaza la frontera agrícola, afecta el sistema agropecuario del Valle y reduce las áreas de protección ecológica, ambiental y de recarga acuífera, generando efectos en la contaminación del aire, agua y suelo.

Figura 1. Expansión de la población en la superficie en la zona metropolitana³



La megalópolis es el área que comprende los municipios correspondientes a las zonas metropolitanas de las capitales de los estados limítrofes al Valle de México, más la totalidad de los municipios que mantienen relación funcional estrecha con la Ciudad de México y los que se ubican entre las zonas metropolitanas que integran la corona regional de ciudades y el Distrito Federal. En total se incluyen 189 municipios que corresponden, respectivamente, 91 al

Estado de México, 16 al Estado de Morelos, 29 al Estado de Puebla, 37 al Estado de Tlaxcala y 16 al Estado de Hidalgo, así como las 16 Delegaciones del Distrito Federal.

II.3. Normas e índice de calidad del aire

La Secretaría de Salud publicó el 23 de diciembre de 1994, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para establecer la calidad del aire con respecto a ozono, bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, plomo, partículas suspendidas totales (PST), y partículas suspendidas con diámetro menor de 10 micras (PM-10), que representan la fracción respirable de las PST. Actualmente, existen 20 NOM sobre calidad del aire, todas ellas relacionadas a máximos permisibles de contaminantes emitidos por fuentes fijas y móviles. Las normas de calidad del aire establecen los niveles máximos permisibles de concentración de contaminantes que garantizan la protección de la salud de la población en general y también de los grupos más susceptibles, para lo cual las normas incorporan un margen de seguridad.

Son de observancia para las autoridades federales y locales que tengan a su cargo el desarrollo y la aplicación de los planes o programas de política ambiental. Cabe mencionar que las normas mexicanas de calidad del aire son similares a las de otros países, en particular a las de los Estados Unidos y Canadá.

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) consiste en una conversión de las concentraciones de contaminantes a un número adimensional que indica el nivel de contaminación de una manera accesible para la población. Este tipo de índice se utiliza en todo el mundo, siendo uno de los más conocidos el Pollutant Standard Index (PSI), utilizado en los Estados Unidos. Un IMECA de 100 puntos equivale a la norma de calidad del aire para un contaminante determinado; los múltiplos de 100 de los IMECA se han desarrollado por medio de algoritmos sencillos que toman en cuenta los criterios de salud ambiental. La calidad del aire no es satisfactoria si el IMECA se sitúa entre 100 y 200, mala entre 200 y 300 y muy mala por arriba de 300 puntos.

El nivel de ozono a nivel de piso es uno de los criterios primarios de contaminantes que establece la Secretaría de Salud. La norma de calidad de aire indica que el ozono no debe exceder el nivel de 0.11 ppm promedio en una hora, durante un año. En la Ciudad de México se excede la norma varias veces al año.

II.4. Los efectos en salud por la contaminación del aire²

Los síntomas a causa de la exposición a la contaminación del aire son conocidos por los habitantes de la ZMVM, los cuales se manifiestan principalmente en dolor pulmonar, tos, dolores de cabeza, malestares en la garganta, irritación y lagrimeo de los ojos, por mencionar algunos. Más allá de estas señales, la exposición a la contaminación del aire está relacionada con serios trastornos a la salud entre los que destacan:

- El Incremento en la frecuencia de enfermedades respiratorias crónicas y agudas
- Aumento en la frecuencia de muertes asociadas a la contaminación atmosférica
- Disminución de la capacidad respiratoria
- Aumento de ataques de asma
- Incremento de enfermedades cardíacas
- Mayor frecuencia de cánceres pulmonares

Los contaminantes del aire tienen distinto potencial para producir daño a la salud humana, lo cual depende de sus propiedades físicas y químicas, de la dosis que se inhala y del tiempo de exposición. El ozono y las partículas son los contaminantes que tienen una mayor importancia debido a sus efectos a la salud, la magnitud de sus concentraciones en el aire y la frecuencia en la que exceden las normas de protección a la salud en la ZMVM; como ejemplo de lo anterior se tiene que a lo largo de la década de los años noventa, en alrededor del 88% de los días de cada año se rebasó la norma de protección a la salud. Actualmente la época seca-caliente, que abarca los meses de marzo a mayo, presenta condiciones de mayor riesgo para la salud de la población, ya que en ella el mayor porcentaje de excedencias a la norma de ozono y los niveles de PM10 se elevan considerablemente (los niveles de ozono alcanzan concentraciones superiores al doble de los límites establecidos).

Depende de la situación, como afecta la contaminación atmosférica al cuerpo humano, de la frecuencia y duración en que una persona se exponga a la contaminación, del tipo de contaminante y su concentración, el lugar, la hora y día de la semana, la temperatura y el estado del tiempo, entre otros factores. El nivel de riesgo individual está determinado por diversos factores que incluyen: la predisposición genética, edad, estado nutricional, presencia y severidad de condiciones cardíacas y respiratorias, y el uso de medicamentos; así como la actividad y el lugar de trabajo. En general, la población con mayor riesgo a la exposición de contaminantes está constituida por los niños menores de 5 años, las personas de la tercera edad (mayores de 65 años), las personas con enfermedades cardíacas, respiratorias y los asmáticos.

La exposición a los contaminantes se puede clasificar en aguda y crónica, de acuerdo al período de exposición y a la concentración de contaminantes. La exposición aguda es una exposición a concentraciones elevadas de contaminantes y de corta duración, que puede ocasionar daños sistémicos al cuerpo humano. Por otra parte, la exposición crónica involucra exposiciones de largo plazo a concentraciones relativamente bajas de contaminantes. En estas circunstancias, los contaminantes van ocasionando daños a la salud humana como respuesta a factores acumulados, interactuantes y recurrentes.

Los efectos más estudiados en relación con la exposición aguda a los contaminantes atmosféricos son los cambios en la función pulmonar, el aumento de síntomas respiratorios y la mortalidad.

Varias investigaciones describen un incremento en la mortalidad total (no incluye muertes accidentales) asociada con la exposición a partículas, ozono y sulfatos, lo cual ocurre principalmente en individuos con padecimientos cardiovasculares y/o respiratorios. El incremento de la mortalidad en estos grupos ocurre entre uno y cinco días después de una exposición aguda.

La morbilidad también está asociada con la exposición aguda a los contaminantes. Las enfermedades del tracto respiratorio superior e inferior, bronquitis, neumonía y enfermedades pulmonares obstructivas, son un ejemplo de la morbilidad asociada a la exposición aguda.

Los efectos a la salud debidos a una exposición crónica a contaminantes atmosféricos se conocen menos, sin embargo son similares a los indicados para una exposición aguda. Existen informes que indican un incremento en la mortalidad, principalmente en individuos de la tercera edad con padecimientos respiratorios y cardiovasculares. El incremento de enfermedades respiratorias (como la bronquitis) se señala como una consecuencia de la exposición crónica. La investigación científica desarrollada durante las últimas décadas ha avanzado significativamente en el campo de la identificación y medición de los efectos de la contaminación en la salud humana; sin embargo, la mayor parte de los estudios realizados consiste en el análisis de casos y situaciones de exposición aguda, por lo que existe un rezago referente a la evaluación de los efectos de la contaminación en exposiciones de largo plazo, de estudios generales de validez para la totalidad de la ZMVM y estudios para la medición de los costos asociados.

II.4.1. Efectos a la salud debido al ozono

El ozono es un gas altamente reactivo, su impacto en la salud se debe a su capacidad de oxidación, por ello daña a las células en las vías respiratorias causando inflamación, además reduce la capacidad del aparato respiratorio para combatir las infecciones y remover las partículas externas. Afecta los mecanismos de defensa, por lo que puede provocar un aumento de las infecciones respiratorias. El ozono es un riesgo para la salud de los niños, las personas de la tercera edad y para quienes padecen problemas cardiovasculares y respiratorios, como el asma, el enfisema y la bronquitis crónica. También afecta a personas aparentemente sanas y en excelentes condiciones de salud, por ejemplo a atletas que requieren la inhalación de altos volúmenes de aire durante sus ejercicios, provocándoles una disminución de su rendimiento físico.

Los efectos generalmente asociados con aumentos del ozono son: infecciones respiratorias agudas, tos, flemas, atrofia de mucosa nasal, irritación de ojos, disminución de la función de ventilación, visitas al hospital de emergencia por ataque de asma. La posibilidad de que el

ozono pueda inducir un incremento en la tasa de mortalidad es un tema que aún esta en discusión.

Una partícula suspendida se encuentra en estado sólido o líquido, su tamaño varía de 0.001 a 100 micras, encontrándose mayormente partículas entre 0.1 y 10 micras. Las partículas dentro de este intervalo se llaman partículas menores a 10 micras (PM10). Dentro de las PM10 se encuentra otro grupo, llamado partículas menores a 2.5 micras (PM2.5).

A diferencia de las partículas mayores a 10 milésimas de metros, las PM10 penetran directamente al aparato respiratorio sin ser capturadas por sus mecanismos de limpieza. Una vez que las partículas han entrado al tracto respiratorio, dependiendo de su tamaño, pueden acumularse en diferentes sitios dentro del aparato respiratorio.

Los riesgos a la salud asociados con las partículas en el área pulmonar son mucho mayores que el riesgo por las partículas que se quedan en la garganta.

El aumento en las concentraciones de partículas PM10 y PM2.5 generalmente se han relacionado con el aumento de visitas a servicios de urgencias, aumento de sintomatología respiratoria, hospitalización por incremento de los padecimientos respiratorios, bronquitis aguda en niños, bronquitis crónica en adultos y muerte prematura, principalmente en menores de edad y personas de la tercera edad.

Entre los componentes de las partículas PM10 y PM2.5 se encuentran compuestos orgánicos (como benceno, 1-3 butadieno, hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas, etcétera) y compuestos inorgánicos (como sílice, carbón, sulfatos y nitratos), entre otros.

En las tablas 1 y 2 se presentan los resultados de los estudios anteriormente mencionados, en las cuales se observa el efecto que tiene en la salud el aumento en los niveles de contaminación.

Tabla 1. Funciones anuales de exposición respuesta en la ZMVM - población general.⁴

Indicadores	% de cambio por cada 10 ppb de ozono, concentración horaria	% de cambio por cada 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} , promedio diario
Admisión en hospitales		
• Respiratoria	3.76	1.39
• Cardio-cerebrovascular	0.98	0.60
• Falla congestiva del corazón	.	1.22
Visitas a la sala de emergencia		
• Respiratoria	3.17	3.11
Días de actividad restringida		
• Total (adultos)	.	7.74
• Días laborales perdidos (adultos)	.	7.74
• Total (niños)	.	7.74
• Días laborales perdidos de mujeres	.	7.74
Días de actividad restringida menor		
• Total (adultos)	2.20	4.92
Efectos en Asmáticos		
• Ataques de asma	2.45	7.74
• Tos sin flema (niños)	.	4.54
• Tos con flema (niños)	.	3.32
• Tos con flema y uso de bronquodilatador	.	10.22
• Algunos síntomas respiratorios (niños)	0.66	.
• Síntomas respiratorios menores	0.23	.
Síntomas respiratorios		
• Síntomas en vías respiratorias superiores	1.50	4.39
• Síntomas en vías respiratorias inferiores	2.20	6.85
• Sibilancias	1.32	.
• Bronquitis aguda	.	11.0
Morbilidad crónica		
• Bronquitis crónica, casos adicionales	.	3.60
• Tos crónica, prevalencia (niños)	.	0.30
Mortalidad por medición longitudinal		
• Total	.	3.84
Mortalidad por medición transversal		
• Total	0.59	1.01
• Infantil	.	3.52

Tabla 2. Funciones anuales de exposición - respuesta en la ZMVM - población general.⁵

	% de cambio por 10 ppb de O ₃	% de cambio por cada 10 µg/m ³ de PM ₁₀	% de cambio por cada 10 µg/m ³ de PM _{2.5}
Mortalidad diaria		0.6	
Mortalidad crónica		3	
Mortalidad prematura	1		
Mortalidad total			1.7
Niños			6.3
Personas mayores			2.3
Bronquitis crónica		10	
Ausentismo escolar en niños	0.11		
Días de actividad restringida	2		

II.5. El pronóstico de la calidad del aire⁶

Se elabora diariamente con la información meteorológica de superficie y de los niveles superiores de la atmósfera a nivel nacional, registrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CNA) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), asimismo se auxilia de la información meteorológica generada por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, con el fin de evaluar las características de las masas de aire que influyen, a nivel regional y local, sobre la dispersión de los contaminantes.

El caso más crítico de una atmósfera estable es cuando alguna capa, aumenta su temperatura con la altura en vez de disminuir. Éste fenómeno es conocido como inversión térmica.

Existen diversos fenómenos que dan lugar a la formación de una inversión térmica; sin embargo los más comunes en el valle de México son la radiación y la subsidencia.

De acuerdo con la base de datos de la RAMA y su correlación con la información del radiosondeo del aeropuerto de la ciudad, se detectó que en determinadas ocasiones las máximas concentraciones se registraban en ausencia de inversiones térmicas. Este suceso originó la necesidad de buscar las condiciones meteorológicas que propiciaran la acumulación de contaminantes.

Un aspecto determinante para el pronóstico de calidad del aire consiste en saber si los sistemas meteorológicos son estáticos o dinámicos. Cuando son estáticos contribuyen a la acumulación de contaminantes; en cambio, si son dinámicos, aun cuando la presión sea alta y exista inversión térmica de consideración, la dispersión atmosférica se efectúa horizontalmente, por lo que en general los niveles de contaminación no se incrementan significativamente.

En invierno el sondeo atmosférico muestra que en la capa de aire cercana a la superficie terrestre las inversiones térmicas no existen o son débiles, o bien se presenta una capa isotérmica. Los vientos en las capas atmosféricas son débiles, variables o en algunos casos estratos no existen movimientos horizontales de aire. En los meses de invierno, por la poca insolación, la superficie terrestre no se calienta lo suficiente para generar los movimientos verticales característicos de las altas temperaturas en superficie, comunes en los meses de verano. Este fenómeno puede persistir varios días, siendo necesario realizar análisis en periodos de tiempo más cortos, con el propósito de elaborar pronósticos meteorológicos que permitan predecir con mayor precisión las características de la dispersión de los contaminantes.

En los meses de verano se han detectado altas concentraciones de ozono alrededor del mediodía. Los análisis meteorológicos indican que en los niveles cercanos a la superficie terrestre existe la afluencia de aire cálido de origen tropical. Por la circulación de vientos, este sistema propicia que en el valle de México los vientos incidan débiles del noreste, permitiendo la acumulación de contaminantes en la zona suroeste. El sondeo atmosférico revela que generalmente no se presenta inversión térmica, y que las altas temperaturas propias de esta estación del año generan movimientos verticales vespertinos, siendo ésta la causa que los índices de los contaminantes disminuyan rápidamente después de las 15 horas. En esta temporada otro elemento que propicia el descenso rápido de la concentración de contaminantes por la tarde son las lluvias, toda vez que lavan la atmósfera.

En varios casos no se ha registrado inversión térmica y no se presenta sistema anticiclónico en los niveles superiores de la atmósfera; sin embargo, los niveles de concentración de ozono fueron altos. En estos casos se consideró que la causa fundamental era atribuible al efecto producido por un sistema de alta presión en superficie, ubicado en los estados del noreste con elongación hacia el Golfo de México. Este fenómeno favorece el desplazamiento de aire frío del norte del continente a la parte oriental del país, propiciando que el aire frío llegue al valle de México y se estratifique, acumulándose los contaminantes hasta que el calentamiento de la superficie terrestre ocasiona los movimientos verticales de la atmósfera, con la consiguiente disminución de los niveles de contaminación.

Existen condiciones meteorológicas favorables para la dispersión de contaminantes; entre las más importantes se encuentran: un perfil atmosférico inestable, gran contenido de humedad asociada a nubosidad de desarrollo vertical productora de lluvias ligeras y moderadas, y velocidad de los vientos moderada y fuerte en las capas bajas de la atmósfera. Estas condiciones ocasionan la difusión de los contaminantes en la vertical y en la horizontal, y el lavado de la atmósfera.

Los sistemas meteorológicos que más frecuentemente producen alguna o algunas de estas condiciones son:

a) Perturbaciones tropicales

En el valle de México los ciclones en cualquiera de sus manifestaciones (depresiones, tormentas o huracanes) no inciden directamente; sin embargo, sus efectos favorecen la dispersión de contaminantes y el lavado atmosférico. Otros sistemas de baja presión provocan la entrada de aire de características cálidas y húmedas, que favorece nublados con lluvias, e inestabilidad atmosférica. La temporada de lluvias (junio-septiembre) es en la que se presenta una mayor incidencia de estos sistemas.

b) Corriente de vientos máximos

En los meses de invierno y primavera son característicos los sistemas como la corriente de vientos máximos que, cuando se encuentra sobre el valle de México, ocasiona vientos moderados y fuertes del suroeste, los cuales favorecen la dispersión de contaminantes gaseosos. Es conveniente mencionar que principalmente en los meses de febrero y marzo esta corriente provoca tolvaneras en la parte oriental del valle y zonas montañosas aledañas, originando altas concentraciones de partículas suspendidas. Otro sistema que produce efectos similares a la corriente de vientos máximos son las bajas presiones profundas en superficie, las cuales son típicas en la temporada invernal. Al igual que la corriente de vientos máximos, estas bajas presiones, cuando cubren la parte central del país ocasionan sobre el valle de México vientos moderados y fuertes, de componente occidental, que expulsan los contaminantes fuera del valle.

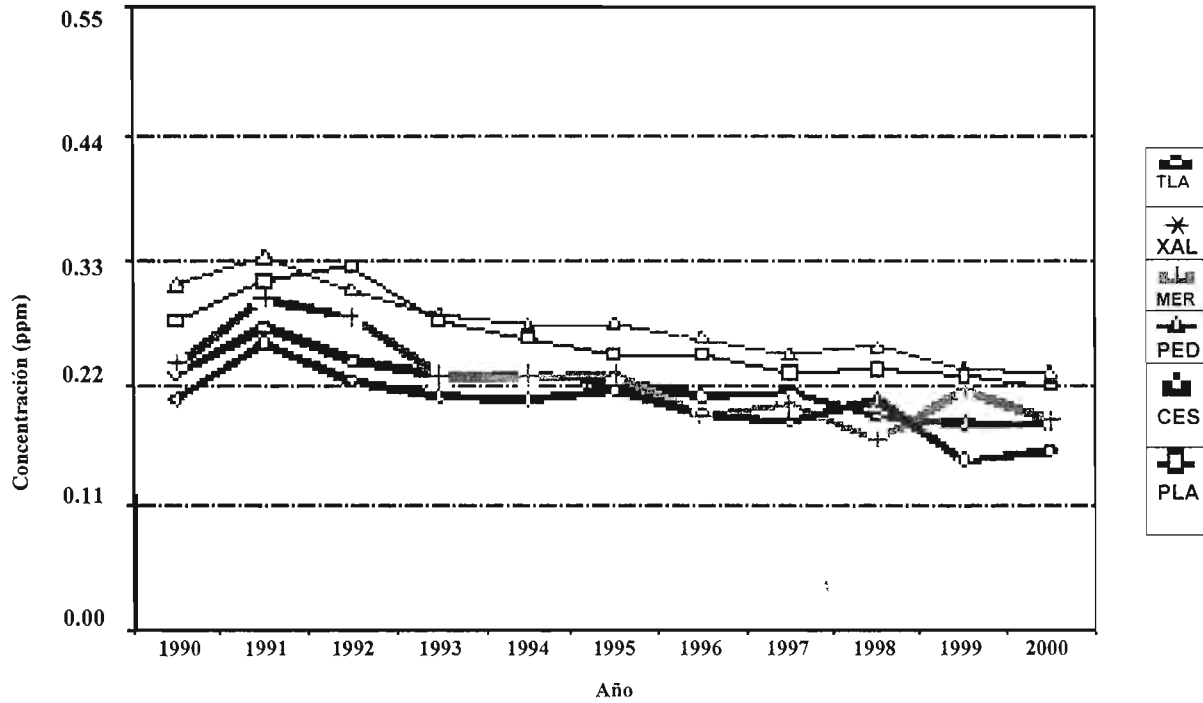
II.6. Análisis de la información

Debido a la gran cantidad y variabilidad de condiciones que intervienen en la medición de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas, fue necesario revisar y depurar la información utilizada. Realizada la validación se procedió a analizar los datos para poder describir la tendencia de la calidad del aire en la Ciudad de México. Se reconoce que esta manera de analizar la base de datos es subjetiva, pero es necesario efectuarla ya que los valores extremos ilógicos introducen grandes errores en el tratamiento estadístico, en particular en los valores de desviación estándar porque involucran el cuadrado de las diferencias de los valores con respecto al promedio y en el coeficiente de asimetría porque implica el cubo de estas diferencias. Se descartaron aquellas cifras con datos negativos o que representan valores cercanos a cero, ya que pudo haber ocurrido un error en su medición.

De los datos recopilados en las primeras estaciones de análisis continuo de ozono que fueron instaladas en el Valle de México – Tlanepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella, la RAMA ha registrado un incremento de las concentraciones de ozono en el periodo de 1986-1991 seguido de una estabilización de 1991 a 1994.⁷ En la actualidad se cuenta con un mayor número de estaciones que miden ozono en forma continua y que forman parte de la Red Automática de Monitoreo ambiental (RAMA). A lo largo de la década de los años

noventa, hubo una reducción gradual de las concentraciones de ozono que ocurren en la ZMVM. De acuerdo con los resultados de tendencia del indicador percentil 95, en 5 de estos sitios (TLA, XAL, MER, PED, CES), que son identificados como representativos de las zonas del área metropolitana, durante el periodo 1990-2000 tuvieron una tendencia decreciente estadísticamente significativa (gráfica 2).²

Gráfica 2. Promedio anual 1990-2000 de los primeros 30 máximos diarios por año.²

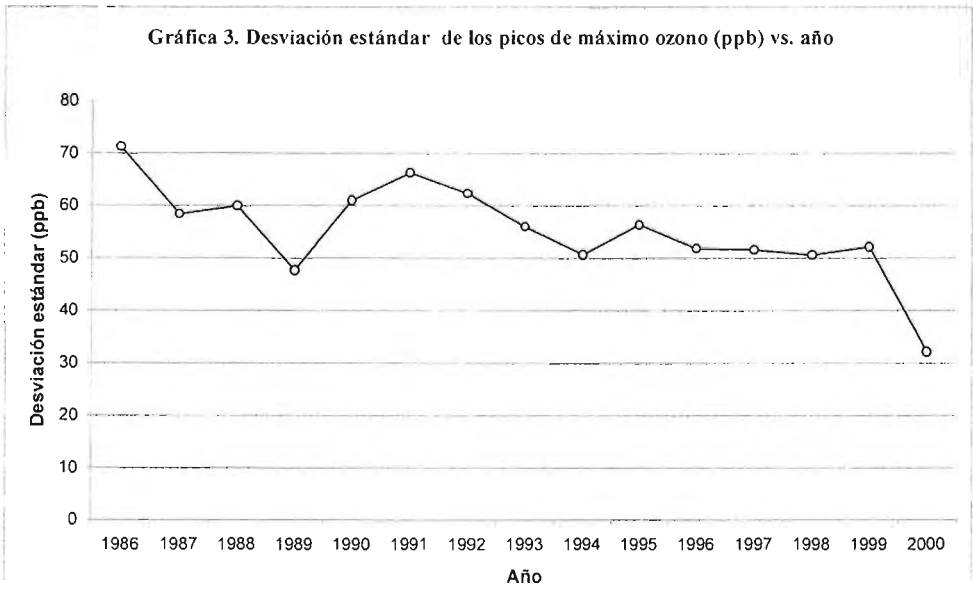


La tendencia del ozono calculada con los primeros 30 valores máximos ocurridos durante un año, presenta una disminución generalizada desde 1995, después de un periodo de poca variación de 1993 a 1994. Destacan en este análisis las estaciones Pedregal (PED) y Plateros (PLA) de la zona suroeste de la ZMVM, ya que los valores de este indicador duplican al valor de la norma de salud de 0.11 ppm, por lo que se caracteriza a esta región como la de mayor riesgo.

Con los datos horarios de ozono de estas cinco estaciones en el periodo de 1986-2000, se derivó un conjunto de valores máximos diarios de ozono en cada estación que sirvió como base de datos para el presente estudio.¹ En la tabla 3 se presentan los parámetros estadísticos del conjunto de picos diarios de ozono de las estaciones de Tlanepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella y en la gráfica 3 la desviación estándar de los picos de máximo ozono (ppb) vs. año.

Tabla 3. Parámetros estadísticos del conjunto de picos diarios de ozono de las estaciones de análisis continuo de Tlanepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella.¹

Año	Promedio (ppb)	Desviación estándar (ppb)	Coefficiente de asimetría	Máximo pico de ozono (ppb)	Núm. lecturas con $O_3 \geq 1.110$	Núm. de lecturas anuales	Porcentaje de lecturas que exceden la norma
1986	94.6	71.3	2.18	495	268	987	27
1987	101.2	58.4	1.27	411	441	1236	36
1988	119.8	60.0	0.89	405	832	1728	48
1989	110.8	47.7	0.81	346	712	1504	47
1990	129.5	61.1	0.66	403	1022	1707	60
1991	160.1	66.4	0.38	404	1221	1580	77
1992	138.9	62.4	0.50	402	1085	1636	66
1993	131.6	56.0	0.37	370	1100	1692	65
1994	134.4	50.7	0.41	312	1233	1825	68
1995	129.4	56.4	-0.31	349	1121	1825	61
1996	117.8	51.9	0.44	323	987	1830	54
1997	113.8	51.6	0.39	309	933	1825	51
1998	110.6	50.6	0.48	295	876	1825	48
1999	108.5	52.2	0.48	311	772	1720	45
2000	110.3	32.2	0.34	282	824	1700	49



Del análisis de la tabla 3 y gráfica 3 se infiere que el año con el mayor índice promedio de ozono y la mayor desviación estándar fue 1991, año que se toma como base para estimar reducciones ulteriores hasta 1999, debido a las acciones emprendidas desde entonces para controlarlo. En la década de los años noventa se logró abatir año con año la concentración máxima diaria de ozono, a excepción del 2000, en el cual parece ser que se agotó el modelo utilizado para el control de ozono.

La estación de la Ciudad de México con registro de mayor número de episodios de ozono anual es la del Pedregal, por lo que para esta investigación se tomarán como referencia los valores de ozono de esta última, ubicada en una zona residencial con mínima influencia industrial, al suroeste de la ZMCM.

Se seleccionaron los datos del periodo de 1986 a 2001, obtenidos de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

En primera instancia, en este trabajo se analizan las tendencias que presentan los promedios anuales de las concentraciones máximas diarias de ozono y de los precursores que se miden y que guardan relación con él (CO, NO_x); así como de las variables meteorológicas (temperatura (TEMP), dirección del viento (WDRP), velocidad del viento (WSPP) y humedad relativa (RHP)), con la finalidad de identificar la relación que tienen en la formación de ozono y posteriormente aplicar los modelos matemáticos a utilizar.

Se consideraron los valores mayores diarios de ozono, de los precursores de ozono y de las variables meteorológicas; así como para tener una mayor certeza se seleccionaron los veinte episodios de los valores mayores y menores de ozono (considerando como valor menor a 0.050 ppm) y su relación de éste con los precursores y las variables meteorológicas.

Para cada año se calculó la línea recta de tendencia, la correlación, la desviación estándar; además el nivel promedio y valor máximo y mínimo anual de la variable implicada.

II.7. Análisis de los precursores de ozono y de las variables meteorológicas

Para poder identificar cuales parámetros están asociados a la formación de ozono máximo diario, se procedió a realizar las siguientes correlaciones de 1986 a 2001:

- Logaritmo de ozono máximo diario vs. temperatura máxima diaria (TEMP)
- Logaritmo de ozono máximo diario vs. velocidad del viento máximo diario (WSPP)
- Logaritmo de ozono máximo diario vs. dirección del viento máximo diario (WDRP)
- Logaritmo de ozono máximo diario vs. humedad relativa máxima diaria (RHP)
- Logaritmo ozono máximo diario vs. monóxido de carbono máximo diario (CO)
- Logaritmo ozono máximo diario vs. óxidos de nitrógeno máximo diario (NO_x)
- Logaritmo de ozono máximo diario vs. dirección del viento máximo diario (WDRP) a las 10 horas

Se trazaron las gráficas respectivas para cada año y una global de 1986 a 2001; así como se presentan las tablas comparativas de la relación que guarda el ozono con respecto a los precursores de ozono y las variables meteorológicas que inciden en la formación de ozono derivadas de las gráficas.

De las tablas comparativas y gráficas se deduce lo siguiente:

a) Ozono (O₃)

En la tabla 4 y 5 se lista el valor mayor de los niveles máximos de ozono y el valor promedio anual de los niveles máximos de ozono de la estación del Pedregal de 1986 a 2001. Se aprecia la tendencia a disminuir de la concentración de este contaminante en la atmósfera.

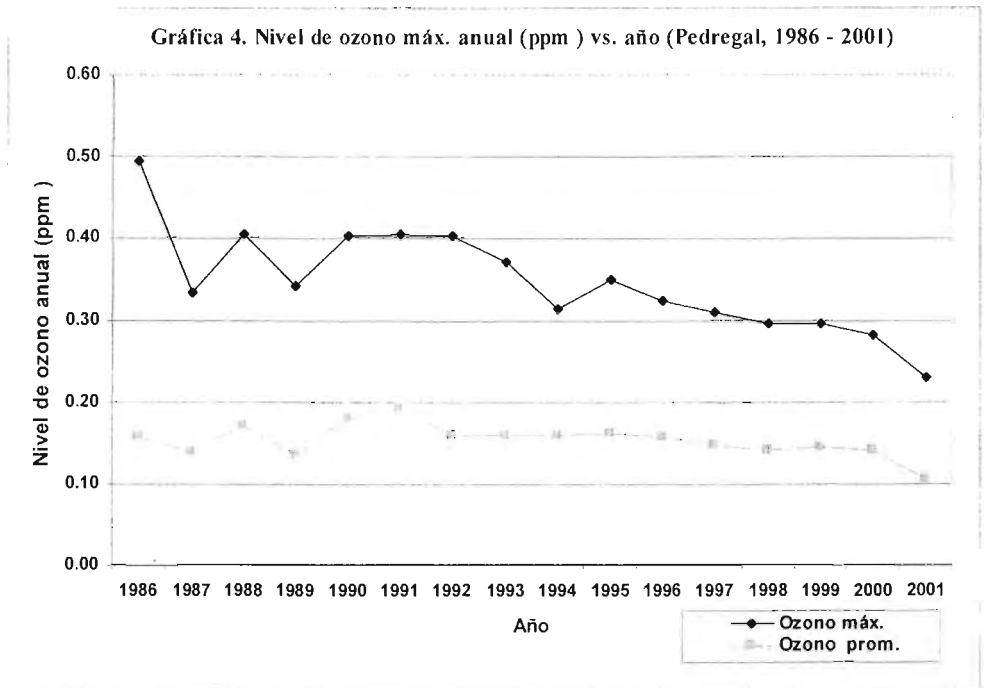
Tabla 4. Nivel anual de ozono máximo (ppm)

Año	Oz. Máx.
1986	0.495
1987	0.333
1988	0.405
1989	0.340
1990	0.403
1991	0.404
1992	0.402
1993	0.370
1994	0.312
1995	0.349
1996	0.323
1997	0.309
1998	0.295
1999	0.295
2000	0.282
2001	0.229

Tabla 5. Nivel anual de los promedios de ozono máximo (ppm)

Año	Oz. prom.
1986	0.158
1987	0.140
1988	0.171
1989	0.135
1990	0.179
1991	0.193
1992	0.160
1993	0.159
1994	0.160
1995	0.161
1996	0.157
1997	0.147
1998	0.142
1999	0.146
2000	0.142
2001	0.106

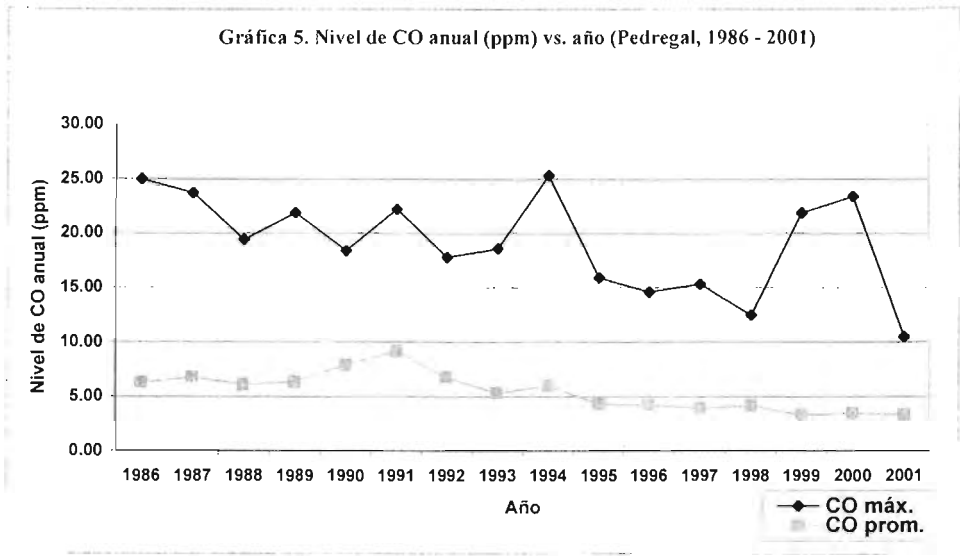
De los valores obtenidos de las tablas 4 y 5 se trazó la gráfica 4 de nivel de ozono anual (ppm) vs. año (Pedregal, 1986 - 2001).



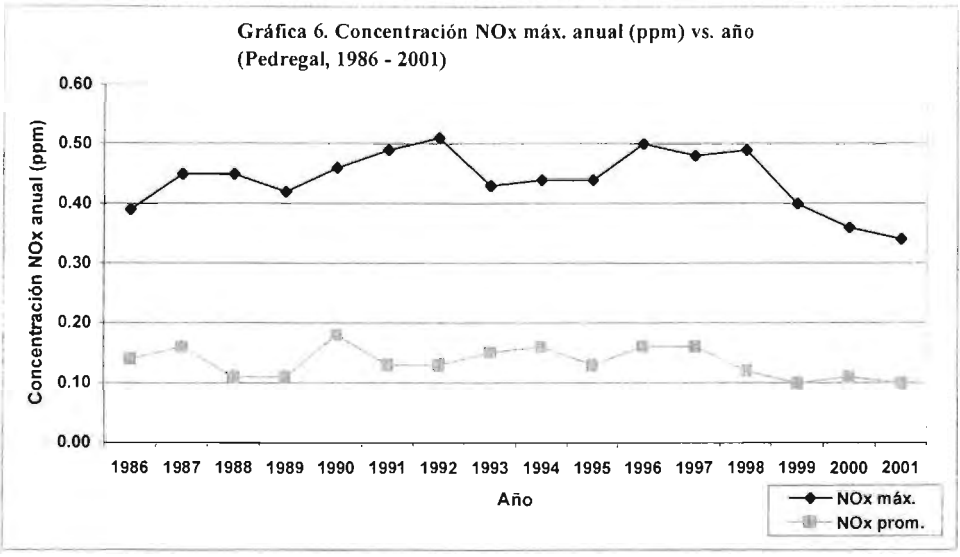
El año con el máximo índice anual de ozono fue 1986, seguido por 1988, 1991, 1990 y 1992. Respecto a los valores anuales promedio de ozono, el máximo de un nivel de 0.404 ppm se alcanzó en 1991, se excedió la norma 301 días durante ese año, y de esa fecha en adelante se redujeron a excepción de 1988 y 1990, lo cual indica que las variables meteorológicas podrían tener influencia. La tendencia de ozono es a la baja, lo cual indica que las acciones de control de los precursores de ozono han tenido un efecto positivo en todo el Valle de México. En la gráfica 4, se aprecia la disminución de ozono de 1986 a 2001 tanto del nivel anual de ozono máximo y del nivel anual de ozono promedio. El valor anual promedio en el año 2001 queda un poco por debajo del valor que marca la norma de calidad del aire.

Es probable que debido a las variables meteorológicas y precursores de ozono se deben estos picos de ozono, por lo que a continuación se trazaron las gráficas del nivel de precursor de ozono anual o variable meteorológica vs. año (Pedregal, 1986 - 2001) como se aprecia en las siguientes gráficas 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

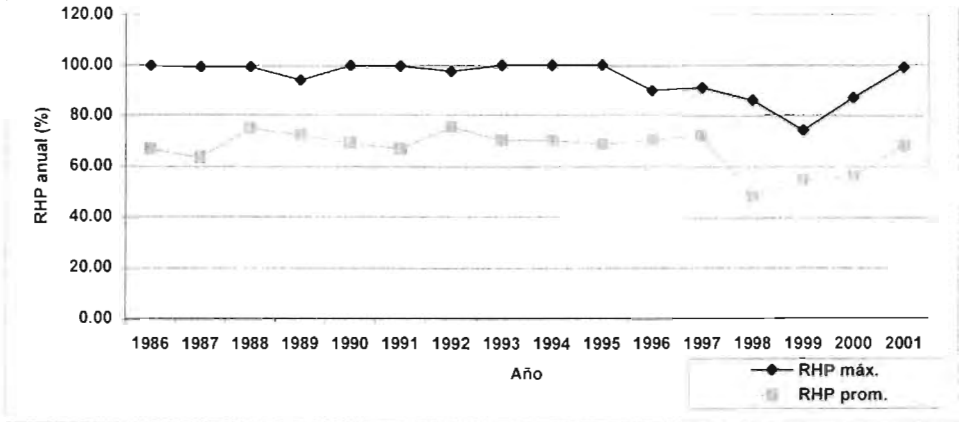
Gráfica 5. Nivel de CO anual (ppm) vs. año (Pedregal, 1986 - 2001)



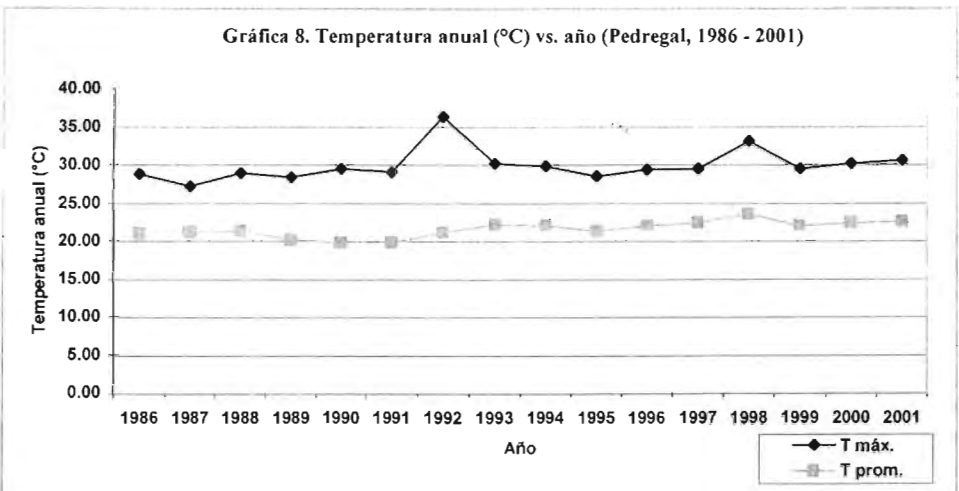
Gráfica 6. Concentración NOx máx. anual (ppm) vs. año (Pedregal, 1986 - 2001)

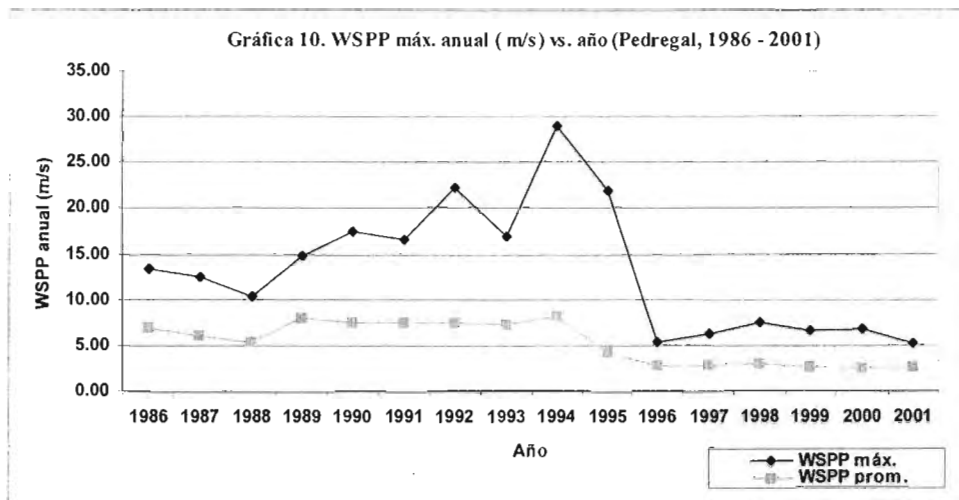
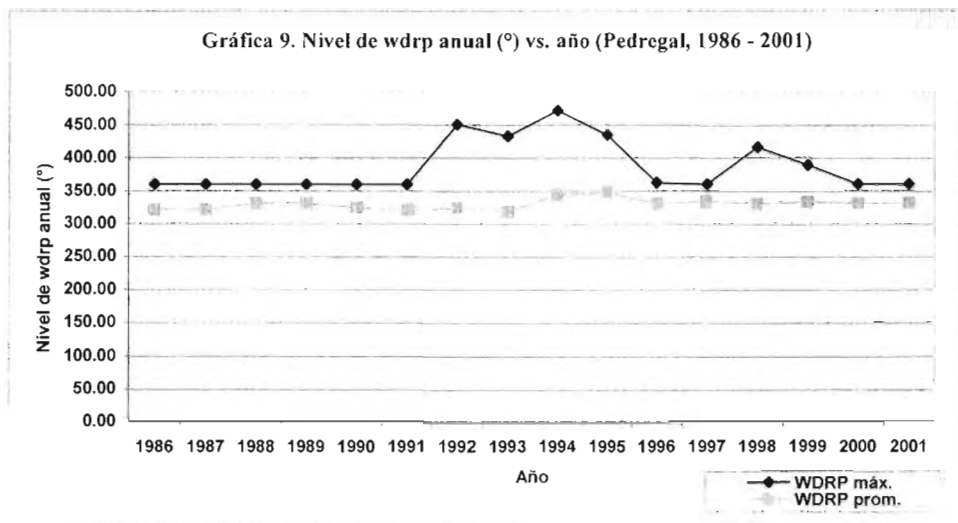


Gráfica 7. RHP máx. anual (%) vs. año (Pedregal, 1986 - 2001)



Gráfica 8. Temperatura anual (°C) vs. año (Pedregal, 1986 - 2001)





De la comparación de las gráficas anteriores con respecto a los picos de la gráfica de los niveles máximos de ozono se deduce:

- En el año 1994 se observa una baja considerable en el nivel de ozono, así como un incremento en la velocidad promedio del viento

- En el año de 1992 se advierte un alto nivel de NOx y un bajo nivel de ozono. Es ilógico que exista una alta concentración de NOx cuando se reduce el nivel de ozono
- En el año de 1991 se encuentran altos niveles de CO y de ozono lo que indica que el CO pudo haber contribuido a la formación de ozono

b) Precursores de ozono

Los precursores de ozono son el CO, NOx e hidrocarburos. Como no existe una medición del nivel de hidrocarburos, únicamente se procede a analizar el CO y NOx.

- *Monóxido de carbono (CO)*, (ver tabla 6)

Tabla 6. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de Log. Ozono máx. diario (ppb) vs. CO máx. diario (ppm) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	CO máx. anual	CO prom.	Desv. est.
1986	$y = 1.9590 + 0.0167x$	1.9590	0.0167	0.0220	25.00	6.28	3.35
1987	$y = 2.0302 + 0.0105x$	2.0302	0.0105	0.0211	23.70	6.76	3.58
1988	$y = 2.1027 + 0.0152x$	2.1027	0.0152	0.0359	19.40	6.11	2.82
1989	$y = 1.9889 + 0.0168x$	1.9889	0.0168	0.0936	21.90	6.38	3.27
1990	$y = 2.1643 + 0.0059x$	2.1643	0.0059	0.0045	18.40	7.91	2.56
1991	$y = 2.1652 + 0.0090x$	2.1652	0.0090	0.0171	22.20	9.17	2.99
1992	$y = 2.0103 + 0.0199x$	2.0103	0.0199	0.0382	17.80	6.78	2.58
1993	$y = 2.0281 + 0.0244x$	2.0281	0.0244	0.0849	18.60	5.35	2.56
1994	$y = 2.0830 + 0.0153x$	2.0830	0.0153	0.0503	25.30	6.00	2.57
1995	$y = 2.0963 + 0.0156x$	2.0963	0.0156	0.0233	15.90	4.34	2.08
1996	$y = 2.0451 + 0.0267x$	2.0451	0.0267	0.0659	14.60	4.24	1.96
1997	$y = 2.1166 + 0.0050x$	2.1166	0.0050	0.0031	15.30	3.96	2.13
1998	$y = 2.0290 + 0.0186x$	2.0290	0.0186	0.0261	12.50	4.20	2.02
1999	$y = 2.0479 + 0.0204x$	2.0479	0.0204	0.0244	21.90	3.33	1.78
2000	$y = 2.0707 + 0.0129x$	2.0707	0.0129	0.0199	23.40	3.52	1.94
2001	$y = 1.9218 + 0.0170x$	1.9218	0.0170	0.0191	10.50	3.40	1.69

- *Óxido de nitrógeno (NOx)*, (ver tabla 7)

Tabla 7. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de Log. Ozono máx. diario (ppb) vs. NOx máx. diario (ppm) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	NOx máx. anual	NOx prom.	Desv. est.
1986	$y = 1.9174 + 1.0074x$	1.9174	1.0074	0.0596	0.39	0.14	0.09
1987	$y = 2.0448 + 0.3495x$	2.0448	0.3495	0.0148	0.45	0.16	0.09
1988	$y = 2.1245 + 0.5214x$	2.1245	0.5214	0.0231	0.45	0.11	0.07
1989	$y = 2.0400 + 0.5315x$	2.0400	0.5315	0.0420	0.42	0.11	0.07
1990	$y = 2.1831 + 0.1196x$	2.1831	0.1196	0.0018	0.46	0.18	0.08
1991	$y = 2.2151 + 0.2117x$	2.2151	0.2117	0.0057	0.49	0.13	0.07
1992	$y = 2.1019 + 0.2955x$	2.1019	0.2955	0.0051	0.51	0.13	0.06
1993	$y = 2.0871 + 0.4808x$	2.0871	0.4808	0.0372	0.43	0.15	0.09
1994	$y = 2.0786 + 0.6228x$	2.0786	0.6228	0.0588	0.44	0.16	0.07
1995	$y = 2.1419 + 0.1717x$	2.1419	0.1717	0.0043	0.44	0.13	0.08
1996	$y = 2.0736 + 0.5145x$	2.0736	0.5145	0.0532	0.50	0.16	0.09
1997	$y = 2.1007 + 0.2290x$	2.1007	0.2290	0.0100	0.48	0.16	0.08
1998	$y = 2.0444 + 0.5115x$	2.0444	0.5115	0.0278	0.49	0.12	0.08
1999	$y = 2.1054 + 0.1018x$	2.1054	0.1018	0.0005	0.40	0.10	0.05
2000	$y = 2.0729 + 0.4112x$	2.0729	0.4112	0.0189	0.36	0.11	0.06
2001	$y = 1.8925 + 0.8835x$	1.8925	0.8835	0.0588	0.34	0.10	0.06

c) Variables meteorológicas

- *Humedad relativa (RHP), (ver tabla 8)*

Tabla 8. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de Log. Ozono máx. diario (ppb) vs. RHP máx. diario (%) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	RHP máx. anual	RHP prom.	Desv. Est.
1986	$y = 2.0212 + 0.0011x$	2.0212	0.0011	0.0064	99.80	66.71	23.87
1987	$y = 2.0486 + 0.0008x$	2.0486	0.0008	0.0059	99.40	63.47	24.36
1988	$y = 2.1963 + 1E-05x$	2.1963	1E-05	3E-05	99.40	74.84	20.15
1989	$y = 2.3534 + 0.0036x$	2.3534	-0.0036	0.0815	94.10	72.23	14.47
1990	$y = 2.2289 + 0.0002x$	2.2289	0.0002	0.0010	99.80	69.11	23.88
1991	$y = 2.2289 + 0.0002x$	2.2289	0.0002	0.0010	99.70	66.94	27.08
1992	$y = 2.2312 + 0.0012x$	2.2312	-0.0012	0.0075	97.70	75.38	19.42
1993	$y = 2.2521 + 0.0011x$	2.2521	-0.0011	0.0323	99.95	70.20	28.71
1994	$y = 2.2521 + 0.0011x$	2.2521	-0.0011	0.0323	99.95	70.20	28.71
1995	$y = 2.2626 + 0.0014x$	2.2626	-0.0014	0.0107	100.00	68.68	15.43
1996	$y = 2.2740 + 0.0016x$	2.2740	-0.0016	0.0120	90.00	70.24	13.51
1997	$y = 2.0974 + 0.0005x$	2.0974	0.0005	0.0014	91.00	72.18	13.40
1998	$y = 2.1718 + 0.0014x$	2.1718	-0.0014	0.0066	86.00	48.17	13.96
1999	$y = 2.4349 + 0.0058x$	2.4349	-0.0058	0.0825	74.00	54.76	11.44
2000	$y = 2.1173 + 7E-06x$	2.1173	7E-06	2E-07	87.00	56.38	10.41
2001	$y = 2.3068 + 0.0047x$	2.3068	-0.0047	0.1359	99.00	68.48	16.04

- *Temperatura (TEMP)*, (ver tabla 9)

Tabla 9. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de log. Ozono máx. diario (ppb) vs. Temperatura máx. diaria (°C) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	T máx. anual	T prom.	Desv. est.
1986	$y = 2.1535 + -0.0042x$	2.1535	-0.0042	0.0011	28.80	21.16	3.05
1987	$y = 1.5042 + 0.0281x$	1.5042	0.0281	0.1110	27.20	21.26	3.08
1988	$y = 1.5948 + 0.0276x$	1.5948	0.0276	0.1502	28.90	21.41	3.19
1989	$y = 1.7324 + 0.0179x$	1.7324	0.0179	0.0718	28.40	20.30	2.70
1990	$y = 1.7572 + 0.0228x$	1.7572	0.0228	0.1339	29.50	19.86	3.56
1991	$y = 1.8838 + 0.0185x$	1.8838	0.0185	0.0911	29.10	19.91	3.21
1992	$y = 1.5438 + 0.0282x$	1.5438	0.0282	0.1162	36.30	21.20	3.19
1993	$y = 1.6197 + 0.0243x$	1.6197	0.0243	0.0951	30.20	22.22	2.70
1994	$y = 2.0242 + 0.0068x$	2.0242	0.0068	0.0124	29.83	22.09	2.84
1995	$y = 1.4761 + 0.0322x$	1.4761	0.0322	0.2070	28.50	21.37	3.01
1996	$y = 1.5733 + 0.0266x$	1.5733	0.0266	0.1286	29.40	22.04	2.74
1997	$y = 1.5313 + 0.0269x$	1.5313	0.0269	0.1659	29.50	22.44	2.92
1998	$y = 1.4717 + 0.0269x$	1.4717	0.0269	0.1946	33.10	23.65	3.81
1999	$y = 1.3139 + 0.0364x$	1.3139	0.0364	0.2569	29.50	22.06	3.23
2000	$y = 1.5168 + 0.0271x$	1.5168	0.0271	0.1912	30.20	22.43	2.72
2001	$y = 1.6209 + 0.0161x$	1.6209	0.0161	0.0552	30.60	22.63	3.01
1986 - 2001	$y = 1.7431 + 0.0183x$	1.7431	0.0183	0.0676	36.30	21.66	3.24

- *Dirección del viento (WDRP)*, (ver tabla 10)

Tabla 10. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de log. ozono máx. diario (ppb) vs. wdrp máx. diaria (°) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	Wdrp máx. anual	Wdrp prom.	Desv. est.
1986	$y = 2.0860 + -1E-04x$	2.0860	-1E-04	0.0001	360.00	321.50	41.19
1987	$y = 1.6348 + 0.0014x$	1.6348	0.0014	0.0417	360.00	321.73	36.54
1988	$y = 2.2638 + -0.0002x$	2.2638	-0.0002	0.0009	360.00	331.06	33.15
1989	$y = 2.4125 + -0.0010x$	2.4125	-0.0010	0.0290	360.00	331.44	31.53
1990	$y = 2.3547 + -0.0005x$	2.3547	-0.0005	0.0042	360.00	324.54	31.67
1991	$y = 1.8561 + 0.0012x$	1.8561	0.0012	0.0364	360.00	320.84	32.12
1992	$y = 2.0442 + 0.0003x$	2.0442	0.0003	0.0036	451.00	324.46	50.81
1993	$y = 2.0375 + 0.0004x$	2.0375	0.0004	0.0096	433.00	318.88	54.81
1994	$y = 2.0829 + 0.0003x$	2.0829	0.0003	0.0074	472.00	345.35	56.86
1995	$y = 1.7712 + 0.0011x$	1.7712	0.0011	0.0673	435.00	348.55	49.02
1996	$y = 1.7126 + 0.0013x$	1.7126	0.0013	0.1542	363.00	331.34	59.33
1997	$y = 2.0066 + 0.0004x$	2.0066	0.0004	0.0042	360.00	335.03	32.37
1998	$y = 2.1148 + -2E-05x$	2.1148	-2E-05	1E-05	416.00	331.33	38.44
1999	$y = 2.2437 + -0.0004x$	2.2437	-0.0004	0.0033	389.00	334.34	34.74
2000	$y = 2.3654 + -0.0008x$	2.3654	-0.0008	0.0187	360.00	332.30	32.22
2001	$y = 2.3333 + -0.0011x$	2.3333	-0.0011	0.0292	360.00	332.64	33.60

- *La velocidad del viento (WSPP), (ver tabla 11)*

Tabla 11. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de log. ozono máx. diario (ppb) vs. wssp máx. (m/s) diaria de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	Wssp máx. anual	Wssp prom.	Desv. est.
1986	$y = -0.0303x + 2.1746$	2.1746	-0.0303	0.0417	13.40	6.93	2.21
1987	$y = -0.0232x + 2.2406$	2.2406	-0.0232	0.0886	12.50	6.04	3.33
1988	$y = -0.0058x + 2.2076$	2.2076	-0.0058	0.0037	10.30	5.31	2.31
1989	$y = 0.0005x + 2.0910$	2.0910	0.0005	3E-05	14.70	7.97	2.06
1990	$y = -0.0025x + 2.2267$	2.2267	-0.0025	0.0007	17.40	7.43	2.23
1991	$y = 0.0022x + 2.2302$	2.2302	0.0022	0.0007	16.60	7.43	2.45
1992	$y = -0.0081x + 2.2040$	2.2040	-0.0081	0.0057	22.20	7.47	2.45
1993	$y = -0.0238x + 2.3338$	2.3338	-0.0238	0.0695	16.90	7.27	2.34
1994	$y = -0.0031x + 2.2006$	2.2006	-0.0031	0.0064	28.88	8.20	4.46
1995	$y = 0.0060x + 2.1382$	2.1382	0.0060	0.0086	21.79	4.33	3.32
1996	$y = -0.0369x + 2.2616$	2.2616	-0.0369	0.0250	5.32	2.80	0.87
1997	$y = -0.0177x + 2.1879$	2.1879	-0.0177	0.0066	6.20	2.92	0.88
1998	$y = -0.0363x + 2.2155$	2.2155	-0.0363	0.0227	7.55	2.96	0.96
1999	$y = 0.0129x + 2.0716$	2.0716	0.0129	0.0039	6.57	2.72	1.10
2000	$y = -0.0322x + 2.2025$	2.2025	-0.0322	0.0344	6.67	2.50	0.98
2001	$y = -0.0397x + 2.0847$	2.0847	-0.0397	0.0245	5.15	2.59	0.82

- *La dirección del viento (WDRP), (ver tabla 12)*

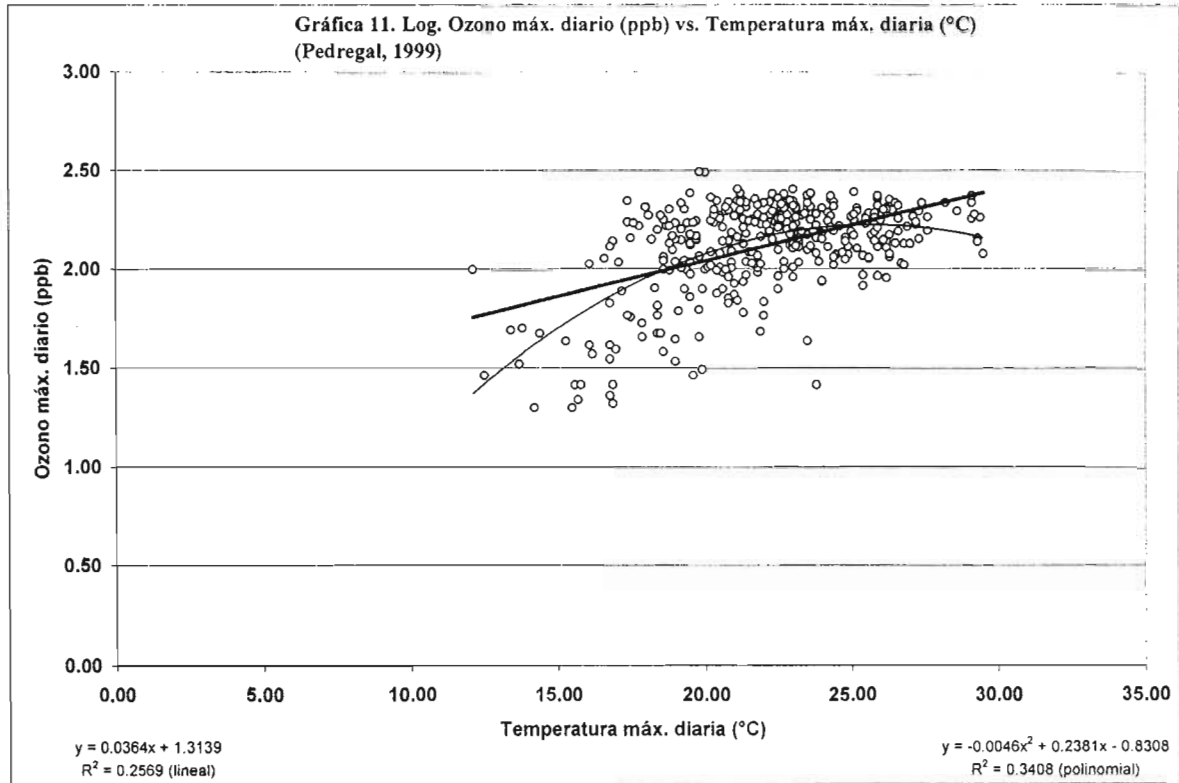
Tabla 12. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de log. ozono máx. diario (ppb) vs. wdrp máx. (°) a las 10 horas diario de la estación del Pedregal (1986, 1988, 1996 - 2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	Wdrp máx. anual	Wdrp prom.	Desv. est.
1986	$y = 2.1410 + -0.0006x$	2.141	-0.0006	0.0158	350.00	84.58	76.92
1988	$y = 2.2840 + -0.0007x$	2.2840	-0.0007	0.1410	356.00	110.66	107.01
1996	$y = 2.2072 + -0.0002x$	2.2072	-0.0002	0.0164	349.00	178.47	60.29
1997	$y = 2.1813 + -0.0004x$	2.1813	-0.0004	0.0511	354.00	125.96	107.20
1998	$y = 2.1710 + -0.0005x$	2.1710	-0.0005	0.0643	367.20	124.88	125.94
1999	$y = 2.2008 + -0.0008x$	2.2008	-0.0008	0.1741	362.90	105.49	115.71
2000	$y = 2.1724 + -0.0004x$	2.1724	-0.0004	0.0821	360.00	121.29	122.09
2001	$y = 2.0477 + -0.0006x$	2.0477	-0.0006	0.1034	360.00	106.79	11.79

De las tablas anteriores puede percatarse lo siguiente:

- Respecto a la tabla que contiene las correlaciones entre ozono y CO, se puede decir que el valor de R² es cercano a cero, lo cual indicaría que no hay relación alguna, sin embargo, por pequeño que sea el valor de R², siempre tiene un valor mayor que cero. Además la pendiente es positiva, lo cual se traduce en que aparentemente el CO afecta directamente a la formación de ozono. Es posible, que el CO sea un marcador de la presencia de hidrocarburos emitidos por los vehículos, ya que siempre se emiten conjuntamente

- Por lo que concierne a los óxidos de nitrógeno, la conclusión es la misma que la que se expuso para el CO, esto es, que propician la formación de ozono. La dispersión de los valores de NO_x tiende a disminuir, lo cual indica que hay un mejor control en la combustión vehicular
- En lo que se refiere a la humedad, el coeficiente de correlación es cercano a cero, pero siempre mayor a cero. La pendiente es casi siempre negativa, lo cual apunta a una relación inversa, entre el logaritmo de ozono y la humedad relativa
- En lo concerniente a la temperatura, los valores del coeficiente de correlación toman en algunos años un valor cercano a 0.2, con una pendiente mayor que cero, lo cual evidencia que la temperatura influye directamente en la producción de ozono
- Por lo que respecta a la dirección y velocidad del viento, los coeficientes de correlación son cercanos a cero, sin embargo, la pendiente de la velocidad del viento es menor a cero, lo cual ejemplifica que el viento sí influye en dispersar los contaminantes y reducir los niveles de ozono. Con respecto a la dirección del viento no existe una tendencia definitiva
- Dado que los coeficientes de correlación eran cercanos a cero para una relación lineal, se juzgó conveniente ensayar la relación polinomial (ver gráfica 11); que en el caso de la temperatura hace crecer el coeficiente de correlación a 0.3408. En el capítulo IV, se demuestra que usando el filtro KZ se obtiene una mejor correlación. El hecho de que al relacionar el logaritmo del ozono con las variables meteorológicas se obtenga una mejor correlación y de que la relación polinomial es mejor que la lineal, es indicativo que la función logaritmo transforma un polinomio de grado mayor que uno en una relación lineal



II.7.1 Veinte episodios

Para obtener datos más cercanos a la realidad se evaluaron los veinte episodios anuales de mayor y menor concentración de ozono.

En esta sección se analizan los veinte episodios con mayores y menores concentraciones de ozono ocurridos en el Pedregal de 1986 a 2001; así como los precursores de ozono y variables meteorológicas que influyen en la formación de ozono.

Se aprecia que de 1986 al año 2001 el nivel de concentración de ozono tiene un descenso, aunque en el año 1987 el ozono máx. es menor que en otros años. De los datos de la Red, durante 1986 y 1987 hay valores de concentración negativos o igual a cero, que no se tomaron en cuenta, posiblemente hubo errores ya que en 1986 empezó a operar la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA).

II.7.2. Análisis de las tablas de la compilación de las rectas y del coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de los 20 mayores episodios de ozono máx. (ppm) de la estación del Pedregal (1986-2001):

a) Precursores de ozono:

- *Monóxido de carbono (CO)*, (tabla 13)

Tabla 13. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de los 20 mayores episodios de log. ozono máx. diario (ppb) vs. CO máx. diario (ppm) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	CO máx. anual	CO prom.	Desv. est.
1986	$y = -0.0029x + 2.5883$	2.5883	-0.0029	0.0504	25.00	8.52	5.92
1987	$y = -9E-05x + 2.4368$	2.4368	-9E-05	3E-05	16.80	7.18	3.19
1988	$y = -0.0069x + 2.5403$	2.5403	-0.0069	0.2192	15.20	7.85	3.11
1989	$y = 0.0037x + 2.3649$	2.3649	0.0037	0.0922	20.60	9.33	4.83
1990	$y = 0.0019x + 2.4908$	2.4908	0.0019	0.0207	18.40	8.05	2.84
1991	$y = -0.0006x + 2.5415$	2.5415	-0.0006	0.0042	18.20	10.72	2.47
1992	$y = 0.0119x + 2.4056$	2.4056	0.0119	0.2891	13.70	8.56	2.51
1993	$y = 0.0018x + 2.4548$	2.4548	0.0018	0.0077	11.00	7.44	2.19
1994	$y = -0.0018x + 2.4653$	2.4653	-0.0018	0.0422	11.20	7.44	2.17
1995	$y = 0.0015x + 2.4408$	2.4408	0.0015	0.0041	8.40	4.96	1.57
1996	$y = -0.0016x + 2.4391$	2.4391	-0.0016	0.0155	9.10	5.12	1.66
1997	$y = -0.0030x + 2.4213$	2.4213	-0.0030	0.0786	13.40	5.13	2.45
1998	$y = -0.0021x + 2.4295$	2.4295	-0.0021	0.0258	9.20	4.53	2.20
1999	$y = 0.0053x + 2.3693$	2.3693	0.0053	0.0268	7.00	3.74	1.17
2000	$y = 0.0034x + 2.3591$	2.3591	0.0034	0.0225	8.00	4.02	1.50
2001	$y = -0.0050x + 2.3129$	2.3129	-0.0050	0.0606	6.70	4.10	1.25

- *Óxido de nitrógeno (NOx)*, (tabla 14)

Tabla 14. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de los 20 mayores episodios de log. ozono máx. diario (ppb) vs. NOx máx. diario (ppm) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	NOx máx. anual	NOx prom.	Desv. est.
1986	$y = 2.6169 + -0.3650x$	2.6169	-0.3650	0.2557	0.38	0.19	0.10
1987	$y = 2.4341 + 0.0133x$	2.4341	0.0133	0.0004	0.40	0.16	0.08
1988	$y = 2.5245 + -0.2306x$	2.5245	-0.2306	0.2872	0.32	0.15	0.09
1989	$y = 2.4279 + -0.1943x$	2.4279	-0.1943	0.0955	0.31	0.13	0.07
1990	$y = 2.5196 + -0.1026x$	2.5196	-0.1026	0.0405	0.35	0.17	0.07
1991	$y = 2.5193 + 0.0916x$	2.5193	0.0916	0.0797	0.37	0.17	0.08
1992	$y = 2.4811 + 0.2002x$	2.4811	0.2002	0.0542	0.31	0.13	0.07
1993	$y = 2.4966 + -0.1238x$	2.4966	-0.1238	0.0786	0.43	0.22	0.10
1994	$y = 2.4587 + -0.0346x$	2.4587	-0.0346	0.0179	0.36	0.20	0.07
1995	$y = 2.4570 + -0.0649x$	2.4570	-0.0649	0.0218	0.34	0.12	0.09
1996	$y = 2.4325 + -0.0103x$	2.4325	-0.0103	0.0013	0.39	0.21	0.09
1997	$y = 2.4227 + -0.0859x$	2.4227	-0.0859	0.0733	0.47	0.21	0.10
1998	$y = 2.4149 + 0.0318x$	2.4149	0.0318	0.0067	0.34	0.15	0.08
1999	$y = 2.3738 + 0.1393x$	2.3738	0.1393	0.0495	0.25	0.11	0.06
2000	$y = 2.3623 + 0.0861x$	2.3623	0.0861	0.0303	0.35	0.12	0.07
2001	$y = 2.3026 + -0.0573x$	2.3026	-0.0573	0.0293	0.34	0.15	0.07

b) Variables meteorológicas

- *Humedad relativa (RHP)*, (tabla 15)

Tabla 15. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de los 20 mayores episodios de ozono máx. diario (ppb) vs. RHP máx. diario (%) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	RHP máx. anual	RHP prom.	Desv. est.
1986	$y = 0.2529 + 0.0017x$	0.2529	0.0017	0.2919	99.40	69.71	21.35
1987	$y = 0.2715 + 5E-05x$	0.2715	5E-05	0.0019	97.10	72.40	26.62
1988	$y = 0.2933 + 0.0002x$	0.2933	0.0002	0.0128	97.40	72.87	25.39
1989	$y = 0.2164 + 0.0006x$	0.2164	0.0006	0.0500	93.90	64.90	15.00
1990	$y = 0.2570 + 0.0009x$	0.2570	0.0009	0.1116	92.30	75.64	11.17
1991	$y = 2.5194 + 0.0002x$	2.5194	0.0002	0.0334	92.10	67.59	25.53
1992	$y = 2.5617 + -0.0008x$	2.5617	-0.0008	0.1252	96.10	66.51	24.39
1993	$y = 2.4537 + -2E-05x$	2.4537	-2E-05	0.0007	99.95	75.54	22.34
1994	$y = 2.4537 + -2E-05x$	2.4537	-2E-05	0.0007	99.95	75.54	22.34
1995	$y = 2.4449 + 5E-05x$	2.4449	5E-05	0.0006	90.79	72.14	18.34
1996	$y = 2.4303 + -5E-07x$	2.4303	-5E-07	8E-08	89.00	71.00	14.64
1997	$y = 2.4527 + -0.0006x$	2.4527	-0.0006	0.0709	89.00	75.11	13.43
1998	$y = 2.4439 + -0.0005x$	2.4439	-0.0005	0.0622	78.00	45.17	14.58
1999	$y = 2.3518 + 0.0007x$	2.3518	0.0007	0.0549	68.00	50.56	12.17
2000	$y = 2.2626 + 0.0019x$	2.2626	0.0019	0.2654	75.00	55.21	8.37
2001	$y = 2.3268 + -0.0006x$	2.3268	-0.0006	0.0668	78.00	59.30	11.35

- *Temperatura (TEMP)*, (tabla 16)

Tabla 16. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de los 20 mayores episodios de log. ozono máx. diario (ppb) vs. TEMP máx. diario (°C) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	TEMP máx. anual	TEMP prom.	Desv. est.
1986	$y = 2.6496 + -0.0042x$	2.6496	-0.0042	0.0153	25.00	20.50	2.21
1987	$y = 2.5120 + -0.0035x$	2.5120	-0.0035	0.0309	25.50	21.44	2.68
1988	$y = 2.5622 + -0.0033x$	2.5622	-0.0033	0.0210	27.30	22.80	1.72
1989	$y = 2.4682 + -0.0035x$	2.4682	-0.0035	0.0379	26.10	19.89	3.34
1990	$y = 2.5667 + -0.0028x$	2.5667	-0.0028	0.0501	27.90	22.17	2.94
1991	$y = 2.5153 + 0.0009x$	2.5153	0.0009	0.0149	29.00	21.49	3.52
1992	$y = 2.6163 + -0.0048x$	2.6163	-0.0048	0.0385	27.90	22.71	2.37
1993	$y = 2.5307 + -0.0027x$	2.5307	-0.0027	0.0095	25.24	22.62	1.59
1994	$y = 2.4716 + -0.0009x$	2.4716	-0.0009	0.0147	28.32	22.11	2.64
1995	$y = 2.3527 + 0.0042x$	2.3527	0.0042	0.0678	27.50	23.07	2.29
1996	$y = 2.3340 + 0.0043x$	2.3340	0.0043	0.0793	29.40	22.79	1.94
1997	$y = 2.3009 + 0.0043x$	2.3009	0.0043	0.0580	28.00	24.11	1.70
1998	$y = 2.3733 + 0.0018x$	2.3733	0.0018	0.0674	33.10	26.28	4.51
1999	$y = 2.5562 + -0.0073x$	2.5562	-0.0073	0.2040	29.10	22.95	2.33
2000	$y = 2.1873 + 0.0078x$	2.1873	0.0078	0.1905	26.20	23.08	1.82
2001	$y = 2.3576 + -0.0030x$	2.3576	-0.0030	0.0451	26.50	22.16	1.87

- *Dirección del viento (WDRP)*, (tabla 17)

Tabla 17. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de los 20 mayores episodios de log. ozono máx. diario (ppb) vs. wdrp máx. diario (°) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	WDRP máx. anual	WDRP prom.	Desv. est.
1986	$y = 2.4964 + 0.0001x$	2.4964	0.0001	0.0185	360.00	311.83	76.27
1987	$y = 2.5226 + -0.0003x$	2.5226	-0.0003	0.0270	360.00	324.33	34.57
1988	$y = 2.3581 + 0.0004x$	2.3581	0.0004	0.0783	359.00	336.00	29.90
1989	$y = 2.5843 + -0.0006x$	2.5843	-0.0006	0.1691	360.00	324.61	38.60
1990	$y = 2.5342 + -9E-05x$	2.5342	-9E-05	0.0078	355.00	309.50	34.91
1991	$y = 2.4171 + 0.0004x$	2.4171	0.0004	0.1106	359.00	326.56	24.04
1992	$y = 2.5320 + -8E-05x$	2.5320	-8E-05	0.0052	420.00	320.94	42.94
1993	$y = 2.4258 + 0.0001x$	2.4258	0.0001	0.0349	423.00	313.17	61.49
1994	$y = 2.4738 + -6E-05x$	2.4738	-6E-05	0.0414	423.00	333.67	56.29
1995	$y = 2.6204 + -0.0005x$	2.6204	-0.0005	0.1854	419.00	357.06	33.93
1996	$y = 2.8334 + -0.0011x$	2.8334	-0.0011	0.0410	360.00	354.67	5.49
1997	$y = 2.4290 + -8E-05x$	2.4290	-8E-05	0.0043	358.00	335.89	25.40
1998	$y = 2.3738 + 0.0001x$	2.3738	0.0001	0.0646	360.00	314.78	53.35
1999	$y = 2.3391 + 0.0002x$	2.3391	0.0002	0.0238	358.00	321.50	38.22
2000	$y = 2.3063 + 0.0002x$	2.3063	0.0002	0.0690	359.00	318.78	44.03
2001	$y = 2.306 + 8.5E-05x$	2.3068	-5E-05	0.0069	357.00	311.94	45.53

- *La velocidad del viento (WSPP) (tabla 18)*

Tabla 18. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de los 20 mayores episodios de log. ozono máx. diario (ppb) vs. wspp máx. diario (m/s) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	Wspp máx. anual	Wspp prom.	Desv. est.
1986	$y = 0.0080x + 2.3493$	0.0080	2.3493	0.0564	10.10	6.15	2.03
1987	$y = -0.0048x + 2.4584$	-0.0048	2.4584	0.0738	9.90	4.82	3.07
1988	$y = -0.0039x + 2.4385$	-0.0039	2.4385	0.0201	8.20	4.83	1.51
1989	$y = -0.0017x + 2.4039$	-0.0017	2.4039	0.0040	11.60	6.86	2.00
1990	$y = -0.0044x + 2.5398$	-0.0044	2.5398	0.0694	12.00	7.53	2.02
1991	$y = 0.0034x + 2.5099$	0.0034	2.5099	0.1131	12.70	7.49	2.61
1992	$y = -0.0119x + 2.5859$	-0.0119	2.5859	0.1217	10.50	6.54	1.68
1993	$y = 0.0002x + 2.4670$	0.0002	2.4670	0.0002	10.39	5.74	2.42
1994	$y = -0.0003x + 2.4545$	-0.0003	2.4545	0.0102	24.41	8.58	6.43
1995	$y = -0.0052x + 2.4670$	-0.0052	2.4670	0.1014	9.86	3.63	2.32
1996	$y = -0.0216x + 2.4788$	-0.0216	2.4788	0.1359	3.18	2.22	0.51
1997	$y = 4E-05x + 2.4049$	4E-05	2.4049	1E-06	4.84	2.87	0.87
1998	$y = 0.0018x + 2.4152$	0.0018	2.4152	0.0030	3.95	2.41	0.72
1999	$y = -0.0115x + 2.4190$	-0.0115	2.4190	0.1555	5.48	2.58	1.28
2000	$y = 0.0051x + 2.3613$	0.0051	2.3613	0.0209	3.87	2.30	0.98
2001	$y = -0.0023x + 2.2974$	-0.0023	2.2974	0.0058	3.60	2.02	0.77

- *La velocidad del viento (WSPP) (tabla 19)*

Tabla 19. Compilación de las rectas y coeficiente de correlación obtenidos de las gráficas de los 20 niveles de Ozono máx. diario (ppm) vs. la WSPP diario (m/s) de la estación del Pedregal (1986-2001)

Año	Correlación $y = a + bx$	a	b	R ²	WSPP anual	WSPP prom.	Desv. est.
1986*					3.9	3.9	
1987	$y = 0.2716 + 0.0014x$	0.2716	0.0014	0.0051	5.80	2.46	1.77
1988	$y = 0.3706 + -0.0213x$	0.3706	-0.0213	0.1122	4.00	3.58	0.35
1989	$y = 0.3579 + -0.0245x$	0.3579	-0.0245	0.1685	5.20	4.30	0.62
1990	$y = 0.3047 + 0.0043x$	0.3047	0.0043	0.0477	5.70	4.07	1.50
1991	$y = 0.3257 + 0.0040x$	0.3257	0.0040	0.0242	5.80	4.40	0.82
1992	$y = 0.0031x + 0.3126$	0.3126	0.0031	0.0021	5.60	4.47	0.63
1993	$y = 0.2954 + 4E-05x$	0.2954	4E-05	5E-06	7.25	3.86	1.71
1994	$y = 0.2959 + -0.0035x$	0.2959	-0.0035	0.0702	5.40	3.63	0.97
1995	$y = 0.2897 + -0.0034x$	0.2897	-0.0034	0.0834	6.69	2.32	2.07
1996	$y = 0.2662 + 0.0030x$	0.2662	0.0030	0.0063	2.19	1.22	0.50
1997	$y = 0.2370 + 0.0135x$	0.2370	0.0135	0.0787	1.89	1.32	0.39
1998	$y = 0.2669 + -0.0032x$	0.2669	-0.0032	0.0102	2.71	1.57	0.54
1999	$y = 0.2612 + -0.0115x$	0.2612	-0.0115	0.1096	2.74	1.33	0.67
2000	$y = 0.2160 + 0.0189x$	0.2160	0.0189	0.2432	1.90	1.00	0.47
2001	$y = 0.2052 + -0.0081x$	0.2052	-0.0081	0.1126	2.09	0.99	0.48

*En este año a la hora de mayor ozono la WSPP era casi siempre de -99.99 (error en las mediciones)

II.7.3. Reflexiones sobre las tablas comparativas de los veinte eventos anuales de máximo ozono

- Los valores de la ordenada al origen “a” tienen prácticamente el mismo valor para todas las variables meteorológicas, lo cual podría deberse a que el nivel de ozono tiene un cierto valor aún cuando la variable meteorológica no tenga ningún efecto. Es notorio como “a” oscila alrededor de 2.5
- Los valores de la pendiente “b” son negativos para todos los casos, excepto para algunos años de la velocidad del viento, lo cual indica que a mayor intensidad de la variable meteorológica sucede un valor menor en la concentración de ozono, lo cual sería ilógico en el caso de la temperatura
- Respecto al valor de R^2 que en todos los casos tiene un valor bajo, esto indicaría que la correlación es muy baja

De las últimas tablas se observa el mismo fenómeno en el cálculo durante todo el año que en los veinte episodios de mayor concentración de ozono, pero a continuación se realizó un análisis de las tablas comparativas de los 20 niveles de los valores de los precursores de ozono y variables meteorológicas cuando la concentración de ozono toma los valores máximos y mínimos de la estación del Pedregal de 1986 a 2001.

Tabla 20. Comparativa de los 20 niveles de los valores de los precursores de ozono y variables meteorológicas cuando la concentración de ozono toma los valores máximos y mínimos de la estación del Pedregal (1986 – 2001)

Año	Precursores de ozono y variables meteorológicas	Valor mayor	Valor menor	Valor promedio mayor	Valor promedio menor	σ del valor mayor	σ del valor menor
1986	CO (ppm)	25.00	0.300	8.52	2.33	5.92	1.83
	NOx (ppm)	0.38	0.006	0.19	0.06	0.10	0.05
	RHP (%)	99.40	7.100	69.71	30.34	21.35	14.91
	TEMP. (°C)	25.00	10.100	20.50	18.83	2.21	4.07
	WDRP (°)	360.00	2.000	311.83	150.24	76.27	106.95
	WSPP (m/s)	*3.90	1.000	*3.90	3.72	*	1.76
1987	CO (ppm)	16.80	0.500	7.18	2.40	3.19	2.10
	NOx (ppm)	0.40	0.009	0.16	0.05	0.08	0.04
	RHP (%)	97.10	2.600	72.40	34.55	26.62	24.47
	TEMP. (°C)	25.50	7.500	21.44	16.69	2.68	4.55
	WDRP (°)	360.00	15.000	324.33	203.88	34.57	117.20
	WSPP (m/s)	5.80	0.100	2.46	3.98	1.77	2.65
1988	CO (ppm)	15.20	0.900	7.85	2.43	3.11	1.78
	NOx (ppm)	0.32	0.008	0.15	0.04	0.09	0.05
	RHP (%)	97.40	14.700	72.87	44.86	25.39	20.92
	TEMP. (°C)	27.30	8.900	22.80	17.87	1.72	3.32
	WDRP (°)	359.00	7.000	336.00	181.89	29.90	112.20
	WSPP (m/s)	4.00	1.400	3.58	4.38	0.35	1.98
1989	CO (ppm)	20.60	1.100	9.33	3.45	4.83	2.46
	NOx (ppm)	0.31	0.009	0.13	0.05	0.07	0.05
	RHP (%)	93.90	9.500	64.90	36.51	15.00	16.64
	TEMP. (°C)	26.10	5.400	19.89	17.00	3.34	3.36
	WDRP (°)	360.00	3.000	324.61	161.56	38.60	119.07
	WSPP (m/s)	5.20	0.800	4.30	5.85	0.62	2.57
1990	CO (ppm)	18.40	1.700	8.05	4.50	2.84	1.66
	NOx (ppm)	0.35	0.022	0.17	0.07	0.07	0.04
	RHP (%)	92.30	9.400	75.64	49.06	11.17	18.67
	TEMP. (°C)	27.90	6.600	22.17	15.77	2.94	4.62
	WDRP (°)	355.00	14.000	309.50	129.62	34.91	103.27
	WSPP (m/s)	5.70	2.700	4.07	5.45	1.50	2.64
1991	CO (ppm)	18.20	2.700	10.72	6.01	2.47	2.97
	NOx (ppm)	0.37	0.008	0.17	0.07	0.08	0.08
	RHP (%)	92.10	0.500	67.59	45.18	25.53	23.05
	TEMP. (°C)	29.00	4.600	21.49	15.58	3.52	4.75
	WDRP (°)	359.00	6.000	326.56	188.74	24.04	107.28
	WSPP (m/s)	5.80	1.300	4.40	4.68	0.82	2.80
1992	CO (ppm)	13.70	1.000	8.56	4.28	2.51	2.26
	NOx (ppm)	0.31	0.011	0.13	0.07	0.07	0.06
	RHP (%)	96.10	18.300	66.51	55.27	24.39	23.61
	TEMP. (°C)	27.90	6.600	22.71	14.77	2.37	3.58
	WDRP (°)	420.00	34.000	320.94	205.70	42.94	85.18
	WSPP (m/s)	5.60	1.200	4.47	4.11	0.63	2.27
1993	CO (ppm)	11.00	0.100	7.44	2.55	2.19	1.35
	NOx (ppm)	0.43	0.004	0.22	0.05	0.10	0.04
	RHP (%)	99.95	14.470	75.54	31.67	22.34	14.57
	TEMP. (°C)	25.24	9.800	22.62	17.53	1.59	3.74
	WDRP (°)	423.00	28.210	313.17	209.39	61.49	73.64
	WSPP (m/s)	7.25	0.680	3.86	5.09	1.71	2.55
1994	CO (ppm)	11.20	1.000	7.44	2.89	2.17	1.60
	NOx (ppm)	0.36	0.007	0.20	0.05	0.07	0.05
	RHP (%)	99.95	21.490	75.54	54.04	22.34	17.46
	TEMP. (°C)	28.32	10.010	22.11	18.76	2.64	3.42
	WDRP (°)	423.00	90.560	333.67	251.75	56.29	94.81
	WSPP (m/s)	5.40	1.610	3.63	5.02	0.97	2.32

1995	CO (ppm)	8.40	0.800	4.96	1.94	1.57	0.95
	NOx (ppm)	0.34	0.009	0.12	0.05	0.09	0.03
	RHP (%)	90.79	7.000	72.14	42.15	18.34	16.67
	TEMP. (°C)	27.50	8.290	23.07	17.62	2.29	3.20
	WDRP (°)	419.00	7.000	357.06	181.52	33.93	99.63
	WSPP (m/s)	6.69	0.410	2.32	2.39	2.07	2.22
1996	CO (ppm)	9.10	0.700	5.12	1.37	1.66	0.56
	NOx (ppm)	0.39	0.007	0.21	0.04	0.09	0.03
	RHP (%)	89.00	6.000	71.00	42.50	14.64	17.47
	TEMP. (°C)	29.40	11.000	22.79	18.84	1.94	3.45
	WDRP (°)	360.00	1.000	354.67	148.53	5.49	93.72
	WSPP (m/s)	2.19	0.160	1.22	1.80	0.50	0.70
1997	CO (ppm)	13.40	0.600	5.13	1.83	2.45	1.29
	NOx (ppm)	0.47	0.004	0.21	0.05	0.10	0.03
	RHP (%)	89.00	9.000	75.11	43.53	13.43	15.60
	TEMP. (°C)	28.00	12.100	24.11	18.61	1.70	3.96
	WDRP (°)	358.00	3.000	335.89	169.53	25.40	118.15
	WSPP (m/s)	1.89	0.300	1.32	1.59	0.39	0.78
1998	CO (ppm)	9.20	0.900	4.53	2.26	2.20	1.75
	NOx (ppm)	0.34	0.010	0.15	0.05	0.08	0.05
	RHP (%)	78.00	3.000	45.17	26.44	14.58	14.93
	TEMP. (°C)	33.10	13.200	26.28	19.77	4.51	3.25
	WDRP (°)	360.00	5.000	314.78	185.79	53.35	127.44
	WSPP (m/s)	2.71	0.240	1.57	2.17	0.54	1.57
1999	CO (ppm)	7.00	0.700	3.74	1.99	1.17	1.24
	NOx (ppm)	0.25	0.008	0.11	0.05	0.06	0.04
	RHP (%)	68.00	23.000	50.56	41.23	12.17	10.18
	TEMP. (°C)	29.10	12.600	22.95	16.93	2.33	2.42
	WDRP (°)	358.00	3.000	321.50	137.86	38.22	124.99
	WSPP (m/s)	2.74	0.050	1.33	1.26	0.67	0.93
2000	CO (ppm)	8.00	0.100	4.02	1.67	1.50	1.09
	NOx (ppm)	0.35	0.002	0.12	0.04	0.07	0.03
	RHP (%)	75.00	2.000	55.21	38.17	8.37	15.70
	TEMP. (°C)	26.20	12.500	23.08	17.42	1.82	2.71
	WDRP (°)	359.00	2.000	318.78	106.49	44.03	101.77
	WSPP (m/s)	1.90	0.140	1.00	1.23	0.47	0.87
2001	CO (ppm)	6.70	0.200	4.10	2.10	1.25	1.23
	NOx (ppm)	0.34	0.008	0.15	0.04	0.07	0.02
	RHP (%)	78.00	5.000	59.30	38.30	11.35	17.00
	TEMP. (°C)	26.50	14.400	22.16	20.62	1.87	3.61
	WDRP (°)	357.00	1.000	311.94	149.15	45.53	121.77
	WSPP (m/s)	2.09	0.110	0.99	1.70	0.48	1.13

*Durante el año 1986 hubo error en las mediciones.
Como nivel menor de ozono se consideró el valor de 0.050 ppm.

De la tabla 20 se advierte lo siguiente:

- El CO, NOx, TEMP y RHP son elevados cuando el nivel de ozono es alto y el CO, NOx, TEMP y RHP son bajos cuando hay poca presencia de ozono (en los valores mayores y promedio)
- El valor mayor con respecto al valor menor de la WDRP es similar, pero el valor promedio de la WDRP es mayor cuando el nivel de ozono es mayor y disminuye cuando hay menor presencia de nivel de ozono
- Al ser mayor la velocidad del viento se presenta menor nivel de ozono, y lo contrario sucede al existir un nivel de ozono mayor cuando la velocidad del viento es menor

En la tabla 21 se detallan los valores promedio de los precursores de ozono y de las condiciones meteorológicas (1986 a 2001), que favorecen la aparición de episodios en la zona del Pedregal, así como las condiciones promedio que menos favorecen la formación de ozono.

Tabla 21. Condiciones promedio que favorecen la presencia de episodios de ozono; así como las condiciones que hacen menos propicia la formación de ozono.

Formación de episodios		Ausencia de episodios	
CO (ppm)	13.240	CO (ppm)	8.630
NOx (ppm)	0.357	NOx (ppm)	0.193
RHP (%)	89.750	RHP (%)	75.470
TEMP (°C)	27.630	TEMP (°C)	25.520
WDRP (°)	374.400	WDRP (°)	361.600
WSPP (m/s)	4.500	WSPP (m/s)	8.200

De la tabla anterior se infiere que a elevadas concentraciones de CO y NOx se propicia la formación de ozono, así como con las temperaturas elevadas, mientras que bajas concentraciones de CO y NOx y temperaturas menores de 25.5°C evitan la formación de ozono.

Quizá la variable meteorológica mas relevante sea la velocidad del viento, la cual cuando supera el valor de 8.25 m/s asegura que no se presentará un episodio, pero cuando es pequeña, esto es, menor que 6 m/s favorecerá la producción de un episodio.

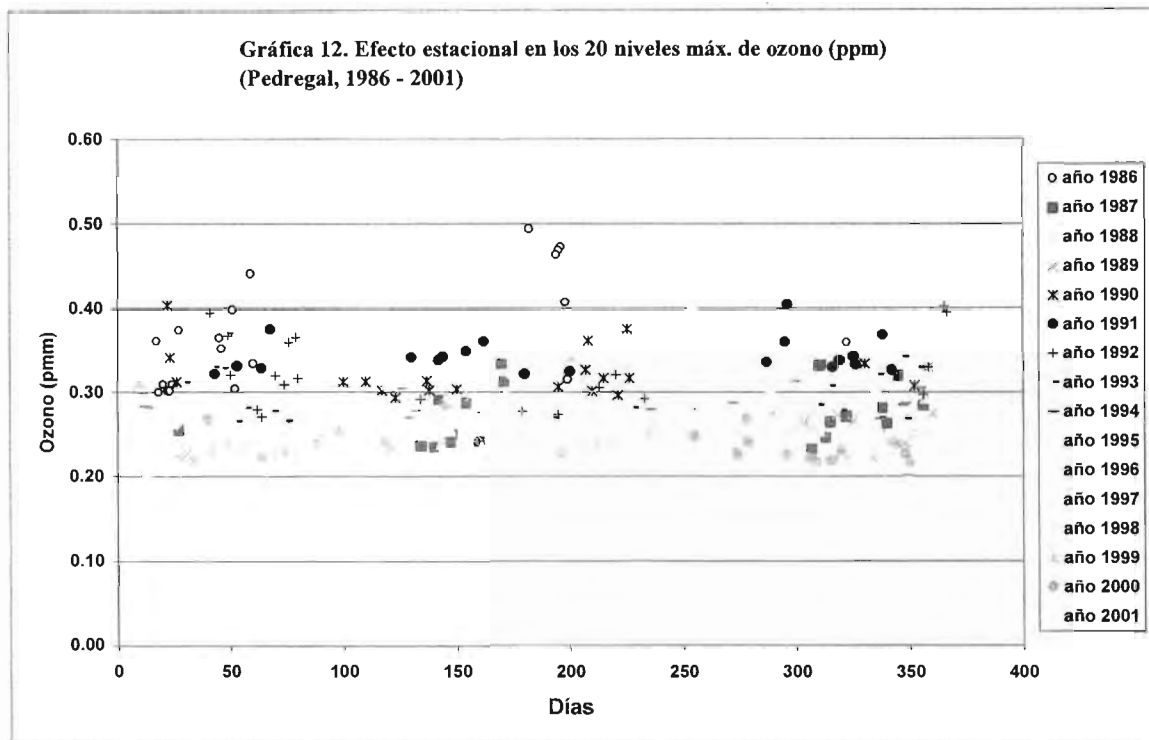
Para las demás variables es pequeño el intervalo entre la formación de un episodio y la ausencia del mismo. Es posible que se requiera la presencia de dos o más factores para que se propicie la presencia de un episodio.

II.8. Distribuciones temporales

Estacionalidad

Las concentraciones de ozono a lo largo de todo el año son muy variables en el Valle de México, con posibilidad de presentarse a lo largo de cualquier estación del año. Por lo anterior se procedió a evaluar los 20 episodios de máximo ozono realizando la siguiente gráfica:

1. Gráfica de los niveles de máximo ozono (ppm) vs. el número de días de mayor concentración de 1986 a 2001

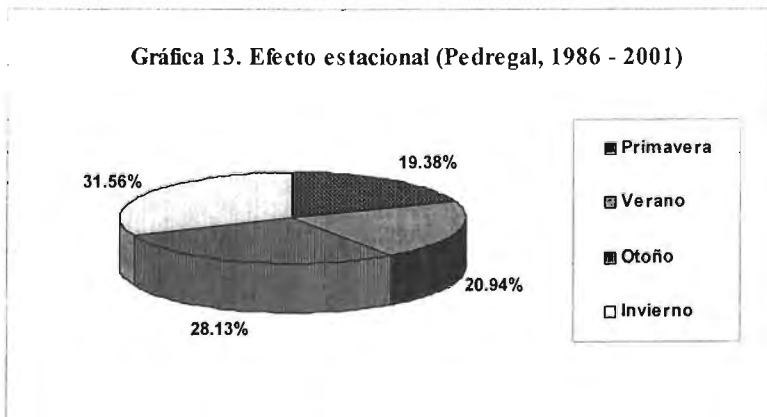


2. Porcentajes de episodios en cada estación del año (1986-2001)

Tabla 22. Porcentajes en cada estación del año (1986-2001)

Año	Porcentaje (%)			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
1986	0	30	5	65
1987	45	0	45	10
1988	10	40	25	25
1989	10	10	30	50
1990	35	45	10	10
1991	25	10	45	20
1992	5	25	5	65
1993	0	10	45	45
1994	20	15	45	20
1995	25	50	0	25
1996	10	25	30	35
1997	30	35	25	10
1998	50	15	35	0
1999	20	15	15	50
2000	20	10	60	10
2001	5	0	30	65
Total:	19.38	20.94	28.12	31.56

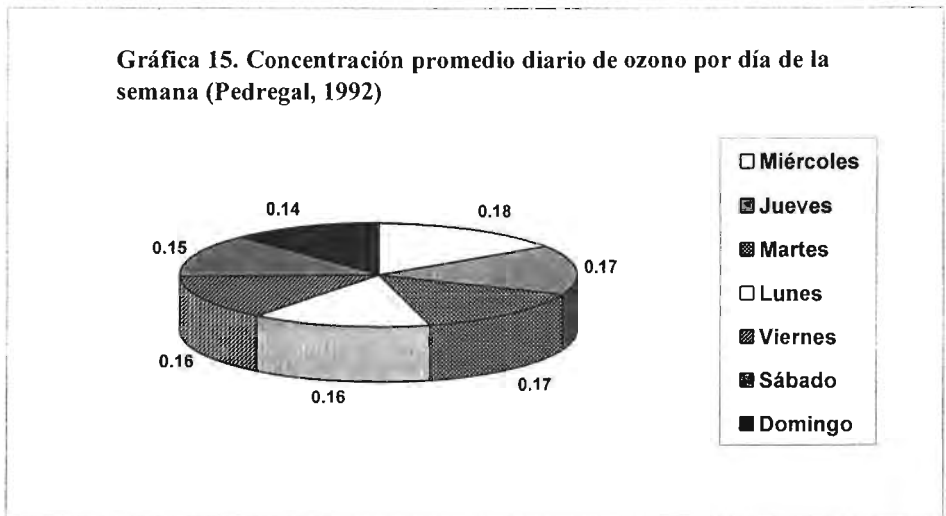
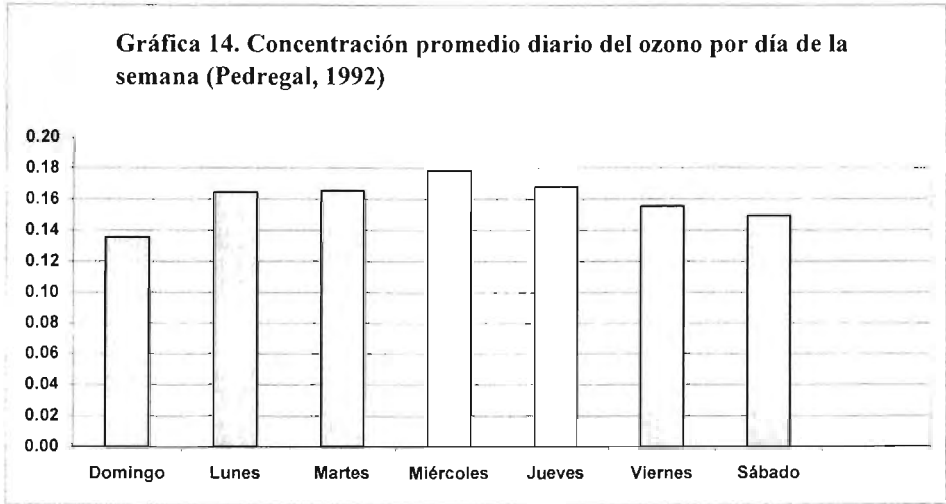
Primavera: 21 de marzo y termina el 20 de junio.
 Verano: 21 de junio y finaliza el 23 de septiembre.
 Otoño: 24 de septiembre al 21 de diciembre.
 Invierno: 22 de diciembre y finaliza el 20 de marzo.



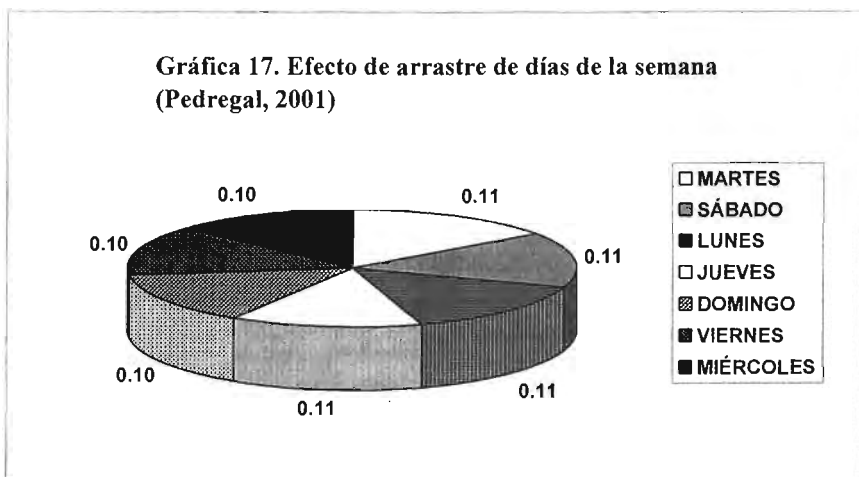
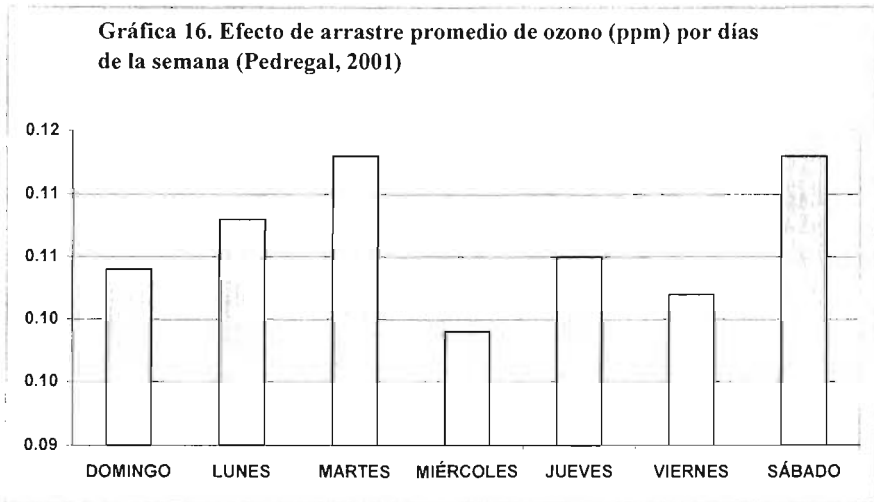
En términos estacionales existen dos periodos de gran intensidad de episodios por ozono durante invierno y otoño siendo diferente a otras latitudes, como por ejemplo en los Estados Unidos los episodios referentes a ozono ocurren principalmente en verano.

3. Efecto de arrastre por día de la semana de los años 1992 y 2001 de la estación del Pedregal

Se analizaron dos años 1992 y 2001. En 1992 la estación del Pedregal presentó los valores extremos más altos de ozono, los cuales alcanzaron un máximo de 0.475 ppm durante este año y 2001 por ser un año más reciente.

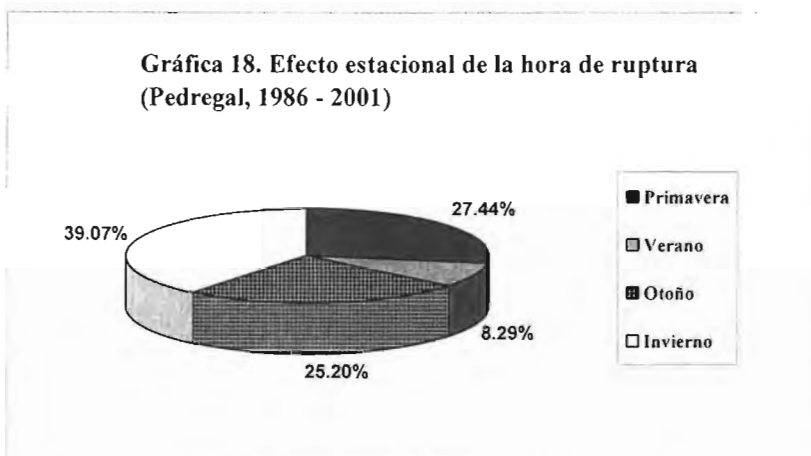


En el año 1992, observamos que el domingo presenta menor concentración de ozono y mayor concentración el miércoles y después empieza a descender, en este año con relación al día de la semana se observa un patrón que indica un inicio relativamente limpio que incluye al domingo y al lunes con concentraciones más altas de martes a jueves. Esto implica un acarreo de precursores del ozono de un día para otro si se considera al fin de semana como el día con menores emisiones de la semana.

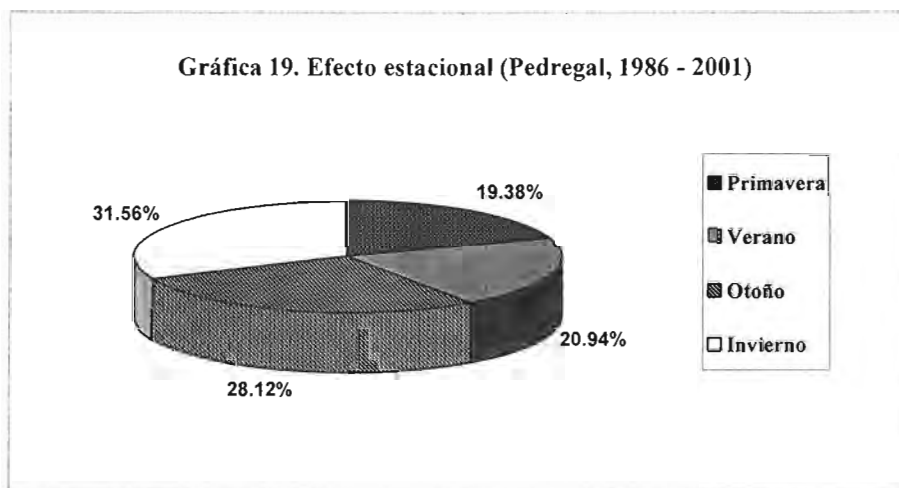


En el año 2001, los días de niveles más altos de concentración fueron los martes y sábados, a diferencia del año 1992 se presenta un día en el que aumentan las concentraciones de ozono máximo y otro que disminuyen.

4. Efecto estacional de la hora de ruptura de la inversión térmica



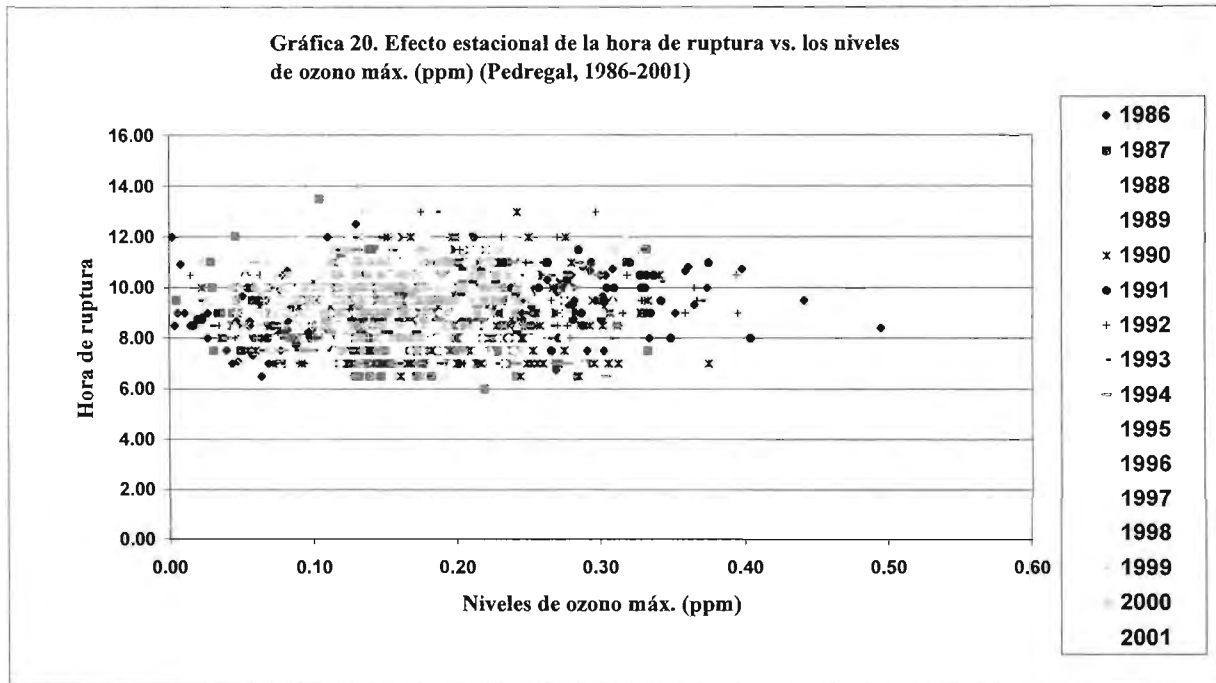
El mayor porcentaje de inversiones térmicas es en invierno.

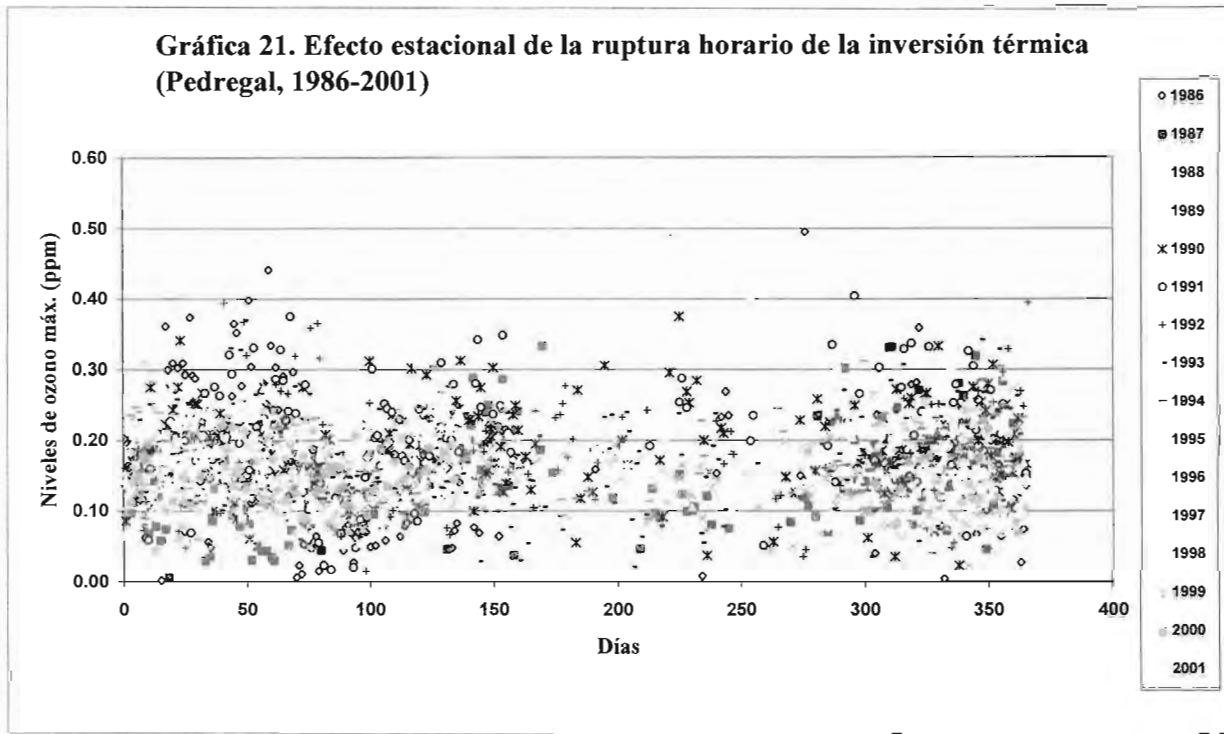


**Tabla 23. Porcentaje del efecto estacional de la hora de ruptura
(Pedregal, 1986 – 2001)**

Año	Porcentaje (%)			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
1986	0	30	5	65
1987	45	0	45	10
1988	10	40	25	25
1989	10	10	30	50
1990	35	45	10	10
1991	25	10	45	20
1992	5	25	5	65
1993	0	10	45	45
1994	20	15	45	20
1995	25	50	0	25
1996	10	25	30	35
1997	30	35	25	10
1998	50	15	35	0
1999	20	15	15	50
2000	20	10	60	10
2001	5	0	30	65
Total:	19.38	20.94	28.12	31.56

Gráfica 20. Efecto estacional de la hora de ruptura vs. los niveles de ozono máx. (ppm) (Pedregal, 1986-2001)





De las tablas y gráficas de las distribuciones temporales se observa:

- Los episodios de máximo ozono ocurren en mayor proporción en invierno con un 31.56% y siguiendo otoño con un 28.13%
- Con relación al día de la semana indica un acarreo de ozono y precursores de un día para otro, se observa que el día de mayor nivel de ozono para el año 1992 es el miércoles y para 2001 es el martes
- De 1986 a 2001, la estación que presenta mayor inversión térmica fue en invierno (39.07%), primavera (27.44%), otoño (25%) y en verano (8.29%)
- En relación a las gráficas de los niveles de ozono máximo (ppm) vs. los días de hora de ruptura de inversión térmica, muestran que la hora de ruptura de la inversión térmica disminuye de 1986 a 2001
- Se infiere que las inversiones térmicas son un factor para alcanzar mayores niveles de ozono. Esto se deduce al ver la gráfica 21 de efecto estacional y la de hora de ruptura que el mayor porcentaje en ambas es en invierno. Entonces al presentarse una prolongada inversión térmica se produce una mayor concentración de ozono

Referencias

1. Garfias F. J. y Díaz Luis, "Gasolinas oxigenadas. La experiencia mexicana, 1ª. Edición, Fondo de Cultura Económica (2003).
2. INE, "Almanaque de datos y tendencias de la calidad del Aire en Ciudades Mexicanas, 2004.
3. Covarrubias, 2000; en Proyecto para el diseño de una estrategia integral de gestión de la calidad del aire en el valle de México, 2001 – 2010.
4. IVM, DGSA-SSA/CENSA, CAM, PAHO, EHS-UCLA, Economic valuation of improvement of air quality in the Metropolitan Area of Mexico City, México, D.F., 2000.
5. Harvard School of Public Health, Boston, MA., Instituto de Salud, Ambiente y Trabajo, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Mexico City Air Pollution and Human Health, México, D.F., 2000.
6. Sandoval E., Escamilla P. Cerna J., Páramo V. H. y González R., "Meteorología y contaminación", Vol. XVIII, Núm. 103, Ciencia y Desarrollo (1992).

7. Cicero P., “Análisis exploratorio de la influencia meteorológica en las tendencias del ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México”, Departamento del Distrito Federal, (1995).
8. Brown M. J., “Mexico City ozone concentrations as a function of readily-available meteorological parameters”, Los Alamos National Laboratories Group NM 87545.
9. Díaz L. L., “Desarrollo de modelos para la estimación de concentraciones de contaminantes en la atmósfera”, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, 2001.
10. <http://www.sma.df.gob.mx/imecaweb/>
11. Molina M. y Molina L., “Megacities and atmospheric Pollution”, Journal of the Air & Waste Management Association, 54:644-680, 2004.

Apéndice I. Acrónimos y abreviaturas

AIRS	Agencia de Protección Ambiental del Sistema de Recuperación de Información Aerométrica de los Estados Unidos
CES	Cerro de la Estrella
CNA	Comisión Nacional del Agua
CO	Monóxido de carbono
Desv. est.	Desviación estándar
EKMA	Modelo de acercamiento empírico cinético
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
GAM	Modelo Aditivo Generalizado
HC	Hidrocarburos no quemados
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
INE	Instituto Nacional de Ecología
Máx.	Máximo
MER	Merced
Mín.	Mínimo
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
NO_x	Óxidos de nitrógeno
NO₂	Dióxido de nitrógeno
O₃	Ozono
Pb	Plomo
PED	Pedregal
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PICCA	Programa Integral para Combatir la Contaminación Atmosférica
PLA	Plateros
PM₁₀	Partículas menores a 10 micras
PM_{2.5}	Partículas menores a 2.5 micras
PPB	Partes por billón
PPM	Partes por millón
PROAIRE	Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México
Prom.	Promedio
PSI	Pollutant Standard Index
PTS	Partículas totales en suspensión
R²	Coefficiente de correlación
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
RHP	Humedad relativa
RTSE	Regresión con el modelo de series de tiempo
SEDUE	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SO₂	Dióxido de azufre
SS	Secretaría de Salud
TEMP	Temperatura
TLA	Tlanepantla
VOCs	Compuestos orgánicos volátiles
WDRP	Dirección del viento
WSPP	Velocidad del viento
XAL	Xalostoc
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México
°	Grados
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
m/s	Metros por segundo
σ	Desviación estándar
UV-B	Radiación ultravioleta
%	Porcentaje

Apéndice II. Glosario

A

Advección. Transporte de las propiedades de una masa de aire producido por el campo de velocidades de la atmósfera. Por lo general este término es referido al transporte horizontal en superficie de propiedades como temperatura, presión y humedad.

Aerosol. Gas o aire enriquecido con sustancias sólidas o líquidas y capaces de mantener partículas en suspensión durante un tiempo prolongado. Este concepto se asimila también al smog, la neblina, los productos en spray, la mezcla aire - residuos de la combustión de residuos, etcétera.

Aire. Mezcla de diversos gases, en ausencia de polvo y de vapor de agua, cuya proporción se mantiene constante hasta una altura aproximada de 20 Km. Los principales componentes son: el nitrógeno y el oxígeno con una proporción del 78 y el 21 %, respectivamente, en el 1% restante se incluyen gases como: ozono, vapor de agua, anhídrido carbonico (CO₂) y algunos gases nobles (argón, radón, etcétera).

Aire ambiente. Atmósfera en espacio abierto.

Aire contaminado. Aire que contiene partículas suspendidas de polvo, humo, microorganismos, sales o gases distintos a su composición ordinaria o en concentraciones anormalmente elevadas.

Aire húmedo. Se denomina al aire que contiene una humedad relativa superior al 80%.

Aire saturado. Es el aire que contiene la cantidad máxima de vapor de agua posible para una temperatura y una presión dadas (100% de humedad).

Algoritmo. Conjunto de reglas o procedimientos; similar a una ecuación.

Alta presión. Distribución del campo de presión atmosférica en donde el centro presenta una presión mayor que la que existe a su alrededor y a la misma altura; también denominada como Anticiclón. En un mapa sinóptico, se observa como un sistema de isobaras cerradas, de forma aproximadamente circular u oval, con circulación en sentido de las manecillas del reloj.

Altitud. Es la distancia vertical entre un punto situado sobre la superficie terrestre o la atmósfera y el nivel medio del mar.

Ambiente. Conjunto de elementos físicos, químicos y biológicos (naturales o artificiales, inducidos por el hombre), que propician la existencia, transformación y desarrollo de los organismos.

Análisis de regresión. Estimación de la relación lineal entre una variable dependiente y otras independientes.

Análisis sinóptico. Estudio y deducción del estado actual de la atmósfera utilizando para ello la información meteorológica generada en una determinada región y aplicando conceptos de masas de aire, frentes, ciclones, etcétera.

Anemómetro. Es el instrumento diseñado para determinar la velocidad o fuerza del viento en superficie.

Anticiclón. Área de máxima presión barométrica desde donde se emiten los vientos, que suele preceder a los ciclones.

Área Metropolitana. Extensión territorial en la que se encuentra la unidad político administrativa de la ciudad central y de localidades contiguas que comparten características urbanas comunes, tales como sitios de trabajo, lugares de residencia, espacios para labores agrícolas e industriales y que mantienen una relación socioeconómica directa, constante, intensa y recíproca con la ciudad central.

Área rural. Espacio donde predominan las actividades productivas del sector primario, conteniendo además las trazas de sistemas de transporte, instalaciones industriales, generación eléctrica, población y servicios, todos ellos dispersos. Estos espacios rurales, componentes de la estructura territorial, guardan relaciones interactivas con las áreas urbanas a las que rodea, con una transición gradual mediante espacios intercalados de una y otra hasta la prevalencia de una de ellas.

Área urbana. Espacios que contienen la población nucleada, en los que prevalece como uso del suelo el soporte de construcciones, infraestructura y servicios, incluyendo espacios con vegetación destinados al esparcimiento. Constituyen el espacio territorial de mayor desarrollo de actividades secundarias y terciarias. Estos espacios urbanos, componentes de la estructura territorial, guardan relaciones interactivas con las áreas rurales circundantes, con una transición gradual mediante espacios intercalados de una y otra hasta la prevalencia de una de ellas.

Atmósfera. Capa de aire que circunda la tierra y que se extiende alrededor de 100 kilómetros por encima de la superficie terrestre. Esta estructura física está formada por una mezcla de 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de varios gases; como el argón, el neón, el bióxido de carbono y vapor de agua entre otros compuestos inorgánicos.

Autorregresión. Regresión de una serie basada en valores previos a ella misma.

B

Baja presión. Es un sistema de isobaras cerradas concéntricas en el cual la presión mínima se localiza en el centro. La circulación es en sentido contrario a las manecillas del reloj. Este fenómeno provoca convergencia y convección por lo que se asocia a la presencia de gran nubosidad y chubascos.

Barómetro. Es el instrumento utilizado para medir la presión atmosférica.

Bióxido de azufre (SO₂). Contaminante producido durante el proceso de combustión de los combustibles con contenido de azufre. Las emisiones de este contaminante provienen principalmente de la industria.

Bióxido de carbono (CO₂). Gas inorgánico compuesto por dos moléculas de oxígeno y una de carbono. Este gas no tiene color, olor ni sabor; y se produce por la respiración de los seres vivos, y cuando se queman combustibles fósiles.

Bióxido de nitrógeno (NO₂). Contaminante generado cuando el nitrógeno contenido en los combustibles y en el aire es oxidado en un proceso de combustión.

Bondad del ajuste. Medida de lo bien que se acopla el modelo a los datos. Se basa en los cuadrados de las diferencias entre las probabilidades observadas y las pronosticadas.

C

Calidad ambiental. Conjunto de condiciones físicas, químicas y biológicas naturales del ambiente que no han sido alteradas.

Calidad de combustibles. Especificaciones técnicas de las características físicas y químicas de los combustibles. Que definen el potencial contaminante del mismo.

Calidad del aire. Condición de las concentraciones de los contaminantes en el aire ambiente.

Cambio climático. Son las variaciones en los promedios de los valores de los elementos meteorológicos (temperatura, precipitación, humedad, etcétera) de una amplia región, a lo largo de un período de tiempo, las cuáles provocan alteraciones en el clima original de esa zona, causado por procesos naturales y/o actividad humana.

Caudal de emisión. Masa de contaminante transferida a la atmósfera por unidad de tiempo.

Ciclón. Área atmosférica de presión más baja que las circundantes, que se traslada generalmente a gran velocidad y gira en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte y viceversa en el sur.

Circulación general. Conjunto de configuración de las corrientes de la atmósfera sobre todo el globo terrestre. Con frecuencia el término se aplica a la configuración de la corriente media en un intervalo de tiempo dado.

Clima. Conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera de un lugar de la tierra, en un periodo mínimo de diez años y lo constituyen principalmente, la temperatura, el régimen de lluvias, el régimen estacional y otros factores como son los vientos dominantes, la humedad relativa, la insolación, la presión atmosférica y la nubosidad.

Climatología. Ciencia dedicada al estudio de los climas en relación a sus características, variaciones, distribución, tipos y posibles causas determinantes.

Clorofluorocarbonos (CFC). Gases usados como propelentes de los aerosoles que una vez liberados pueden llegar hasta la estratosfera y en ella el cloro que contienen, reacciona con el ozono reduciendo el volumen de la capa protectora de este último.

Coefficiente. Estadístico que resume o representa una relación.

Combustibles fósiles. Son el petróleo, el carbón y el gas natural. Formados de plantas que vivieron en épocas muy remotas. La provisión de recursos de combustibles fósiles es limitada y no puede recircularse.

Combustión. Proceso de oxidación rápida de materiales orgánicos acompañados de liberación de energía en forma de calor y luz.

Compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Un compuesto orgánico volátil que existe como un gas bajo condiciones atmosféricas típicas. Un compuesto orgánico contiene carbón combinado con átomos de otros elementos, comúnmente con hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Los compuestos simples que contienen carbón tal como el monóxido y dióxido de carbono son generalmente clasificados como compuestos orgánicos. Los VOCs contribuyen a la formación de smog y pueden llegar a ser tóxicos. Frecuentemente tienen olor.

Concentración. Cantidad relativa de una sustancia específica mezclada con otra sustancia generalmente más grande. Por ejemplo: 5 partes por millón de monóxido de carbono en el aire. También se puede expresar como el peso del material en proporción menor que se encuentra dentro de un volumen de aire o gas; esto es, en miligramos del contaminante por cada metro cúbico de aire.

Concentración máxima admisible. Cantidad límite de contaminantes que se pueden arrojar a un río o a la atmósfera sin que se llegue a poner en peligro la salud o existencia del hombre, animales o plantas.

Constante. En los procedimientos de la regresión, la constante es el valor de la variable dependiente cuando todas las variables independientes toman el valor de cero.

Contaminación. La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 13 de diciembre 1996).

Contaminante. Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 13 de diciembre 1996).

Contaminantes criterio. Condiciones de concentración para ciertos contaminantes conocidos como peligrosos para la salud humana presentes en el aire y que constituyen los principales parámetros de la calidad del aire. En el ámbito internacional se reconocen siete contaminantes criterio: ozono, monóxido de carbono, partículas suspendidas totales y fracción respirable, bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno y plomo.

Contingencia ambiental. Situación de riesgo por la presencia de altas concentraciones de contaminantes criterio en el aire, derivada de actividades humanas o fenómenos naturales, que pueden poner en peligro la salud de la población, así como afectar a los ecosistemas.

Control de emisiones. Conjunto de medidas tendentes a provocar la reducción en las emisiones de contaminantes al aire.

Convección. Movimiento vertical del aire.

Convergencia. Zona donde chocan las líneas de flujo del viento generándose movimientos convectivos (ascenso del aire) para compensar la acumulación de aire en una pequeña zona.

Convertidor catalítico. Artefacto para abatir la contaminación del aire que remueve contaminantes como hidrocarburos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno de los gases de escape de los automóviles, ya sea convirtiéndolos por oxidación en bióxido de carbono y agua o reduciéndolos a nitrógeno y oxígeno.

Covariable. Variable predictora o independiente.

Covarianza. Medida no tipificada del grado de asociación existente entre dos variables.

Criterios ambientales. Factores descriptivos tomados en cuenta para el establecimiento de normas ambientales para varios contaminantes. Esos factores sirven para determinar los límites máximos en los niveles de concentración permitidos, y limitar el número de excedencias anuales al respecto.

D

Degradación ambiental. Modificaciones desfavorables del estado ecológico y ambiental como resultado de procesos naturales y/o actividades humanas.

Depresión. Región donde la presión atmosférica es relativamente más baja que la de las regiones que la rodean al mismo nivel.

Dependiente. Variable cuyos valores se desea predecir o resumir.

Desviación típica o estándar. La desviación típica es la raíz cuadrada del cociente que tiene como dividiendo la suma de los cuadrados de las diferencias de los elementos de una serie de observaciones con respecto a su media aritmética, y, como divisor, el número de elementos de la serie.

Deterioro ambiental. Alteración que sufren uno o varios elementos que conforman los ecosistemas, provocada por la presencia de un elemento ajeno a las características y la dinámica propias de los mismos.

Dirección del viento. Es la dirección desde la cuál sopla el viento, puede ser expresada en grados a partir del norte geográfico.

Dirección	Grados
NORTE	0
ESTE	90
SUR	180
OESTE	270

Dispersión. Fenómeno que determina la magnitud de la concentración resultante y el área de impacto, en el cual los contaminantes se van a dispersar y diluir según las condiciones meteorológicas y geográficas del lugar donde fueron liberados o generados.

Dosis. Cantidad de sustancia administrada a un organismo que produce un efecto.

E

Ecosistema. Unidad estructural funcional y de organización básica de interacción de los organismos entre sí y con el ambiente, en un espacio determinado.

Efecto de invernadero. Proviene de la acumulación, en la atmósfera, de gases que permiten el paso de la radiación de onda corta del sol, durante el día y que bloquean la propagación de la radiación de onda larga de la tierra durante la noche, evitando así el enfriamiento de la superficie terrestre. A consecuencia de este efecto, la tierra conserva una temperatura media de 15 C. Los principales gases de invernadero son: el bióxido de carbono (CO₂), el ozono (O₃) y el vapor de agua (H₂O).

Elemento natural. Los elementos físicos, químicos y biológicos que se presentan en un tiempo y espacio determinado sin la inducción del ser humano (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 13 de diciembre, 1996).

Emergencia. Evento repentino e imprevisto, que hace tomar medidas inmediatas para minimizar sus consecuencias.

Emisión. Descarga de contaminantes a la atmósfera provenientes de chimeneas y otros conductos de escape de las áreas industriales, comerciales y residenciales, así como de los vehículos automotores, locomotoras o escapes de aeronaves y barcos.

Error absoluto medio. Media aritmética de los valores absolutos de error de una variable.

Error de la predicción. Discrepancia entre un valor observado y su predicción, según el modelo especificado.

Error medio. Media aritmética de una variable de error.

Error típico. Medida de la variación del valor de un estadístico de contraste de una muestra a otra. Es la desviación típica de la distribución muestral de un estadístico. Por ejemplo, el error típico de la media es la desviación típica de las medias muestrales.

Error típico de estimación. Estimación de la desviación típica de los términos de error de la regresión. Es una estimación de la desviación típica de la variable dependiente para aquellos casos que tienen los mismos valores para las variable independiente.

Estabilidad. Propiedad de un sistema, en reposo o movimiento permanente, en el que toda perturbación introducida en él decrece.

Estabilidad atmosférica. Condición meteorológica directamente influida por la velocidad del viento y de sus movimientos ascendentes y descendentes, que muestra los movimientos convectivos y advectivos del aire.

Estación de análisis. Conjunto de elementos técnicos diseñados para medir la concentración de contaminantes en el aire en forma simultánea, con el fin de evaluar la calidad del aire en un área determinada.

Estacionalidad. Variación repetitiva a lo largo de un intervalo de tiempo. Puede considerarse como ejemplos las pautas entre los días de cada semana, los meses de cada año o los trimestres de cada año.

Estadístico. Medidas resumen que se usan para describir la muestra.

Estándares. Especificación técnica, habitualmente en forma de documento disponible para el público, elaborada con el consenso de la aprobación general de todos los intereses afectados, con base en resultados científicos consolidados, en la tecnología y en la experiencia, con el objeto de promover beneficios óptimos para la comunidad; y aprobada por un cuerpo reconocido a nivel nacional, regional o internacional.

Estimación. Procedimiento estadístico que, a partir de los datos y la especificación de un formato de modelo, proporciona estimaciones para los parámetros.

Estructura de la atmósfera. En función de que puedan considerarse capas con gradientes térmicos continuos, o se presenten discontinuidades, se distinguen y caracterizan las siguientes capas. La troposfera es la capa atmosférica en la que se desarrolla la vida, contiene casi todo el vapor de agua y CO₂, con lo que es la capa que evita las pérdidas de calor de la superficie terrestre. Además en ella (y en la tropopausa) se originan la mayoría de los fenómenos con repercusión en la meteorología de la superficie terrestre. Su composición cualitativa es bastante homogénea debido a la presencia de corrientes ascendentes y descendentes que mezclan bien todos los gases. La zona superior de la troposfera (de 5 a 10 km. aprox) y la tropopausa (capa límite) constituyen la llamada *trampa fría*, denominada así porque condensa la mayor parte del vapor de agua que asciende por la atmósfera, evitando que este H₂O alcance capas superiores en las que el agua puede ser descompuesto por fotodisociación, escapando el H₂ fuera de la atmósfera, y produciéndose una pérdida neta de agua. En la tropopausa se originan las corrientes de chorro (JETS) de gran importancia para la circulación atmosférica. La estratosfera es la región de la atmósfera, superior a la troposfera, de escasa variación térmica y eléctrica; situada a 12 – 50 km de altura y en la parte superior de la estratosfera se encuentra (entre los 35 y 50 km) la capa de ozono, que filtra la mayor parte de los rayos UV (ultravioleta). La energía que produce la absorción de estos rayos es la que provoca el calentamiento de esta capa. En la mesosfera se alcanzan las temperaturas más bajas de la atmósfera (-90°C) y abundan las formas disociadas, monoatómicas de los gases del aire (sobre todo nitrógeno, oxígeno, e hidrógeno), debido a la fotodisociación que provocan los rayos UV.

Exposición. Procesos por los cuales una sustancia con propiedades tóxicas se introduce o es absorbida por un organismo por cualquier vía.

F

Factor. Variable que maneja el investigador para medir cualquier efecto sobre otra variable. En el análisis conjunto, las variables predictoras (factores) no son métricas. Los factores deben representarse por dos o más valores (también conocidos como niveles).

Factor de emisión. Relación entre la cantidad de contaminación producida y la cantidad de materias primas procesadas, producto elaborado o energía consumida. Por ejemplo: un factor de emisión para una siderúrgica con procesos de altos hornos para producir hierro puede ser el número de kilogramos de partículas emitidas por cada tonelada de materia prima procesada.

Factores estacionales. Promedios estacionales corregidos que indican el efecto neto de cada período sobre el nivel de la serie.

Fotoquímicos. Contaminantes que se producen por la reacción de dos o más compuestos en presencia de la luz solar.

Fotoreactividad. Característica de algunos contaminantes del aire que experimentan o sufren cambios en su composición al reaccionar entre sí o con otros constituyentes del aire en presencia de la luz solar.

Fración respirable. Partículas cuyo tamaño es menor a 10 micrómetros y pueden introducirse sin ningún obstáculo al interior del sistema pulmonar hasta los alvéolos.

Frecuencia. Contador o número de casos que tienen cada valor (o intervalo de valores) de una variable.

Frente (atmosférico). La interfase o zona de transición entre masas de aire de diferentes propiedades físicas.

Fuente fija. En el lenguaje usado en torno a la contaminación del aire, se define como punto fijo de emisión de contaminantes en grandes cantidades, generalmente de origen industrial.

Fuente móvil. Cualquier máquina, aparato o dispositivo emisor de contaminantes a la atmósfera, al agua y al suelo que no tiene un lugar fijo. Se consideran fuentes móviles todos los vehículos como automóviles, barcos, aviones, etcétera.

Función numérica. Función que opera sobre una expresión numérica y devuelve un número o un valor perdido del sistema. La expresión que va a ser transformada mediante una función recibe el nombre de argumento y usualmente consta de un nombre de variable o de una lista de nombres de variables.

G

Gas natural. Mezcla de gases usada como combustible. Se obtiene de ciertas formaciones geológicas subterráneas. El gas natural es la mezcla de hidrocarburos de bajo peso molecular como el propano, metano, butano y otros; pero principalmente metano.

Gestión. Aquel conjunto de actividades, intrínsecamente políticas, articuladas a un proyecto ético, que tienen por objeto la realización colectiva de un producto o de un servicio de calidad, social, cultural, humanamente útil, económicamente viable, elaborado con los menores y más razonables costos, tanto para el organismo institucional que efectúa las acciones, como para su entorno natural y el resto de la sociedad, presente y futura. Este concepto, de carácter general, se puede extender a la gestión pública, precisando que ésta se refiere a aquel tipo de gestión realizada por instituciones gubernamentales, sobre asuntos que son materia de interés legítimo de la sociedad en su conjunto.

Gestión ambiental. Es el proceso político y administrativo de concertación del estado para lograr el compromiso permanente de los sectores públicos, sociales y privados en la conservación, protección, restauración y uso adecuado del entorno natural a sus recursos a través de un desarrollo integral y equilibrado.

Gráfico de casos. Gráfico vertical de datos pertenecientes a una serie temporal.

H

Hábitat. Conjunto local de condiciones geofísicas en el que se desarrolla la vida de una especie o de una comunidad animal o vegetal.

Heliógrafo. Es un instrumento que se utiliza para medir las horas de sol en un período de un día. Consiste en una esfera de cristal la cual juega el papel de lente concentradora de la luz solar que es concentrada y proyectada a una cartulina en su parte inferior. La cartulina se quemará de acuerdo a la intensidad de la luz.

Hidrocarburos. Compuestos orgánicos que contienen carbono e hidrógeno en combinaciones muy variadas. Se encuentran especialmente en los combustibles fósiles. Algunos de estos compuestos son contaminantes peligrosos del aire por ser carcinógenos; otros son importantes por su participación en la formación del ozono a nivel del aire urbano.

Higroméetro. Es el instrumento utilizado para medir la humedad del aire.

Homosfera. Es la región de la atmósfera en la cual la proporción de los componentes del aire, a excepción del ozono, vapor de agua y anhídrido carbónico, permanecen constantes; alcanza una altura de aproximadamente 80 Km.

Humedad. Cantidad de agua, que en estado gaseoso o líquido, se halla suspendida en el aire en un determinado momento.

Humedad absoluta. En un sistema de aire húmedo, es la razón de la masa del vapor de agua respecto al volumen total del sistema; usualmente expresada en gramos por metro cúbico.

Humedad relativa. Es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y se expresa en porcentaje con respecto a la humedad de saturación.

I

Imagen de radar meteorológico. Productos de forma digital que se obtienen a partir de la información de los radares de observación. Posteriormente, se procesa la información en equipos que permiten el despliegue de imágenes digitales en las que se grafican variables como lluvia potencial, velocidad y dirección del viento, posición y altura de nubosidad principalmente.

Imagen de satélite meteorológico. Imágenes digitales que se obtienen por medio de los satélites meteorológicos. Existen diferentes tipos de imágenes de acuerdo a la banda del espectro electromagnético que detecten los sensores. En lo referente a meteorología existen tres bandas principales de estudio, estas son: la visible, la infrarroja y la dominante con vapor de agua. Cada una de estas tiene una aplicación determinada. La más utilizada por los previsores de tiempo es la infrarroja.

Impacto Ambiental. Modificación del ambiente ocasionada por la acción del ser humano o de la naturaleza (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 13 de diciembre 1996).

Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). Unidad adimensional que permite comparar las magnitudes de los diversos contaminantes en una escala homogénea que va de 0 a 500, el nivel de 100 puntos corresponde al valor de la Norma Oficial Mexicana establecida para cada uno de los contaminantes.

Inestabilidad. Propiedad de un sistema en reposo o en movimiento permanente que en toda perturbación que es introducida en él crece.

Información. Todo elemento, o conjunto de elementos materiales o inmateriales, configurados –o conformados– en un conjunto aprehensible, cuya significación es relevante para los fines de la comunicación. Esto abarca aquellos conjuntos de elementos más o menos estructurados o sistematizados, como datos numéricos, geográficos y apreciaciones cualitativas, sistematizadas o desarrolladas documentalmente; pero también abarca imágenes, impresiones personales expresadas, ideas, valores y representaciones simbólicas.

Intervalo. Distribución de valores adyacentes para los que se calcula la frecuencia.

Iteración. Uno de los pasos de un algoritmo que requiere volver a ser calculado repetidamente.

Insolación. Tiempo en que, durante el día el sol luce sin nubes.

Inversión térmica. Estratificación de la parte inferior de la troposfera que juega un importante papel en la contaminación atmosférica, por la inmovilidad que confiere a esa capa, con la consiguiente incapacidad de dispersión y dilución de los contaminantes. En esta capa de aire, la temperatura aumenta con la altura, en vez de disminuir, como es lo natural en la troposfera. De esta manera, se impide todo movimiento y mezcla vertical, pues cualquier masa de aire que ascienda se enfriará en relación con su entorno, por lo que será más densa y se verá obligada a descender. El resultado es una capa estancada.

Inversión frontal. Este tipo de inversión se presenta cuando una masa de aire caliente es obligada a elevarse sobre aire más frío, lo cual sucede en las proximidades de una zona frontal.

Inversión por radiación. Este tipo de inversión se presenta generalmente por la noche, cuando la superficie terrestre, al no recibir la radiación del sol que la calienta, se enfria y por tanto el aire que se encuentra en contacto con la superficie se enfria más que el de mayores alturas.

Inversión por subsidencia. Este tipo de inversión se debe al ascenso del aire caliente cuando es reemplazado por una masa de aire frío que desciende sobre la superficie.

Isobara. Líneas de igual presión.

Isoterma. Líneas de igual temperatura.

M

Magnitud de la exposición. Está en función de la cantidad de la sustancia tóxica que entra en contacto o que ingresa al organismo, la duración de ese contacto y la frecuencia con la que ocurre. El efecto que puede ejercer una sustancia tóxica varía en función de la vía de contacto o de ingreso al organismo: ya sea por inhalación, ingestión o absorción a través de la piel.

Mapa de superficie (mapa sinóptico de superficie). Mapa que muestra la sinopsis de la situación meteorológica a nivel de superficie. Por norma internacional el nivel medio del mar es considerado como el nivel superficial, por lo que por lo que los observatorios situados a mayor o menor altura deben ajustar sus lecturas por medio de correcciones.

Masa de aire. Volumen extenso de la atmósfera cuyas propiedades físicas, en particular la temperatura y la humedad en un plano horizontal muestran solo diferencias pequeñas y graduales. Una masa puede cubrir una región de varios millones de kilómetros cuadrados y tener varios kilómetros de espesor.

Masa de aire estable. Masa de aire en la que prevalece la estabilidad estática, condición que depende de los gradientes verticales de temperatura.

Masa de aire inestable. Masa de aire que presenta inestabilidad en las capas inferiores; se producen nubes convectivas y precipitaciones, el contenido de humedad es elevado.

Material en partículas (PM). Es una mezcla de partículas sólidas y gotas de líquidos que se encuentran en el aire. Tiene su origen en diversas fuentes, que incluyen camiones diesel, plantas de energía, estufas a leña y procesos industriales. Las partículas gruesas (PM10) por lo general se emiten en el polvo que se transmite en el viento, por vehículos que viajan en caminos no pavimentados y por actividades de molido y triturado. Las partículas finas (PM2.5) provienen de la combustión de combustibles (vehículos de motor, generación de energía, instalaciones industriales), chimeneas residenciales y estufas a leña, y por incineración agrícola. Las PM2.5 también se pueden generar en la atmósfera a partir de gases como NO_x y VOC.

Máximo nivel permisible. Norma impuesta por instituciones nacionales, gubernamentales, Comités Nacionales o Internacionales, que indica la concentración o dosis de un contaminante que no debe ser sobrepasada, para evitar poner en peligro un organismo, con la finalidad de proteger la calidad ambiental, y la salud humana. Estos niveles, casi siempre significan un balance entre los intereses de pureza ambiental y el desarrollo económico.

Media aritmética. La media aritmética o promedio aritmético de una serie de elementos que tienen valores distintos, es igual a la suma de estos valores dividida por el número de elementos. En el caso de que se deba conceder una importancia distinta a los diferentes valores de la serie, es preciso darles una ponderación, resultando una media aritmética ponderada.

Media móvil. Es el promedio de un valor de la serie y los que le rodean. Las medias móviles se utilizan para suavizar las series cronológicas, es decir, para reducir el ruido o las fluctuaciones en las series.

Mediana. En una serie o grupo de observaciones, es el valor que divide el número de valores de la serie ("n") en dos mitades exactas. Para calcular la mediana, el primer paso consiste en ordenar los elementos individuales en una secuencia determinada (ascendente o descendente). Si "n" es impar, la mediana será un valor real de la serie, si "n" es par, la mediana se determina hallando el promedio de los dos valores centrales.

Meteorología. Ciencia que estudia la atmósfera, comprende el estudio del tiempo y el clima y se ocupa del estudio físico, dinámico y químico de la atmósfera terrestre.

Mínimos cuadrados generalizados. Método de extracción de factores que minimiza la suma de los cuadrados de las diferencias entre las matrices de correlación observada y reproducida.

Modelo de regresión. Modelo matemático que relaciona una variable dependiente con uno o más predictores o variables independientes.

Monitoreo. Conjunto de acciones periódicas y sistemáticas de observación y medición de los parámetros relevantes de un sistema, como indicadores de la evolución y consecuentemente del riesgo de un desastre.

Monitoreo ambiental. Proceso de observación repetitiva, con objetivos bien definidos relacionado con uno o más elementos del ambiente, de acuerdo con un plan temporal.

Monitoreo de aire. Sistema de observaciones ambientales sobre los cambios del ambiente natural y de la atmósfera debidos a la actividad del hombre. Sirve como fuente fundamental de información uni o multidisciplinaria sobre el estado actual del entorno. En un sentido amplio, este término designa las mediciones repetidas destinadas a seguir la evolución de un parámetro durante un intervalo de tiempo. En un sentido más restrictivo se aplica a la medida regular de niveles de contaminantes respecto de una norma, o para evaluar la eficacia de un sistema de regulación y de control.

Monóxido de carbono (CO). Gas menos pesado que el aire, incoloro, inodoro. Se produce por la combustión incompleta y es provocado principalmente por los vehículos de motor.

Muestra. Conjunto de elementos de una población o universo del que se quiere obtener información.

Moda. Se llama moda o valor modal a aquella que, en un grupo de observaciones, aparece más frecuentemente. Corresponde al dominante de una variable aleatoria, es decir, aquel valor para el que la concentración de probabilidad es máxima. Su determinación no requiere cálculos específicos, ya que basta con ordenar los valores individuales, agrupar los que sean iguales y ver cuál es el grupo más numeroso.

O

Óxidos de nitrógeno (NO_x). En términos generales pertenecen a los compuestos de óxido nítrico y dióxido de nitrógeno (NO₂). Los óxidos de nitrógeno son creados durante el proceso de combustión.

Ozono (O₃). Molécula triatómica de oxígeno. Es un contaminante invisible formado por compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y óxidos de nitrógeno (NO_x) cuando reaccionan químicamente ante la presencia de la luz del sol. Las fuentes principales de los VOC y del NO_x son fuentes móviles, como automóviles, camiones, autobuses y equipo agrícola. En

contraste, el ozono de la estratosfera, en nuestra atmósfera superior, mejor conocido como la capa de ozono, protege a la tierra de los rayos ultravioleta dañinos del sol.

P

Periodicidad. Variación cíclica repetitiva.

Plomo. El plomo es un metal gris azulado que ocurre en forma natural en pequeñas cantidades en la corteza terrestre. No tiene olor ni sabor especial. El plomo se encuentra ampliamente distribuido en el medio ambiente. La mayor parte proviene de actividades como la minería, la producción de materiales industriales y de quemar combustibles fósiles.

Política ambiental. Las metas y principios de acción generales de una compañía con relación al medio ambiente, de los cuales se pueden derivar los objetivos ambientales. Conjunto de medidas que posee un mínimo de coherencia entre sí, tendiente a lograr el ordenamiento ambiental. Documento público que contiene las intenciones y los principios de acción de la organización respecto de sus impactos ambientales, y que da origen a sus objetivos y metas ambientales. Declaración por la organización de sus intenciones y principios en relación con su desempeño ambiental global, que provee un sistema para la acción y para enunciar sus objetivos y metas ambientales.

Política ambiental internacional. Actividades intergubernamentales que mediante acuerdos, tratados, conferencias, declaraciones y proyectos conjuntos, tendientes a la preservación, conservación, explotación racional de los recursos naturales de la biosfera y la lucha contra la contaminación, se establecen entre dos o más países.

Política pública. Aquel comportamiento gubernamental que incide en las transformaciones del escenario social y busca regular un tipo de comportamiento de la sociedad en su conjunto. Comprende un ciclo de acciones que se pueden considerar como un "ciclo de gestión de la política pública." Este proceso consiste en un conjunto de actividades enlazadas que inician en el diagnóstico de un estado de acción, pasa a las fases de planeación, implantación, monitoreo y evaluación de una política pública.

Precusores de ozono. Químicos tales como los hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, ocurriendo naturalmente o como resultado de actividades humanas, lo cual contribuye a la formación de ozono.

Predicción. Acción y efecto de estimar y anunciar, con base en la ciencia o por conjetura, la posibilidad de que ocurra un fenómeno destructivo o calamidad. Conjunto de medidas y acciones para reducir al mínimo la pérdida de vidas humanas y otros daños, organizando eficazmente la respuesta y la rehabilitación.

Predicción meteorológica. (predicción del tiempo, pronóstico del tiempo). Resultado del análisis que realiza un meteorólogo previsor.

Presión atmosférica. Es la presión que ejerce la atmósfera en un punto específico como consecuencia de la acción de la fuerza de gravedad sobre la columna de aire que se encuentra encima de este punto.

Prevención. Conjunto de medidas cuyo objeto es impedir o evitar que sucesos naturales, tecnológicos o generados por el hombre causen desastres.

Pronóstico. Resultado de una estimación de probabilidades en torno a la ocurrencia de un evento calamitoso, puede ser a corto, mediano y largo plazo.

Pronóstico meteorológico. Es la estimación del estado futuro de la atmósfera en base a las condiciones meteorológicas actuales.

Psicrómetro. Instrumento consistente en un termómetro de bulbo seco y uno de bulbo húmedo, que se utiliza para medir el contenido de vapor de agua en el aire.

Punto de rocío (temperatura de punto de rocío). Es la temperatura a la cuál el aire alcanza la saturación, es decir se condensa.

R

R cuadrado. Medida de la bondad de ajuste de un modelo lineal. En ocasiones recibe el nombre de coeficiente de correlación. Es la proporción de la variación de la variable dependiente explicada por el modelo de regresión. Es también el cuadrado de la R múltiple, la correlación entre los valores observados y los pronosticados de la variable dependiente. Su intervalo de valores puede ir de 0 a 1. Los valores pequeños indican que el modelo no se ajusta bien a los datos.

Rango. Posición de un caso cuando los valores de todos ellos se ordenan de menor a mayor.

Raíz del error cuadrático medio. Raíz cuadrada del error cuadrático medio. El cálculo de la raíz cuadrada produce un estadístico de ajuste con la misma métrica que la serie de los errores y la serie observada.

Rayos ultravioleta. Son los pertenecientes a la parte invisible del espectro luminoso que se extiende a continuación del color violado, y que se caracteriza por su intensa acción química.

Red meteorológica. Conjunto de sistemas de observación de las variables meteorológicas.

Regresión. Porción de la variabilidad observada total en la variable dependiente que es explicada por la regresión.

Relación dosis-respuesta. Esta relación puede ser lineal como lo es el caso de las sustancias que producen cáncer a través de inducir alteraciones genéticas en las células blanco de su acción, o puede presentar un umbral de respuesta, por debajo del cual actúan los mecanismos de homeostasis para evitar la producción de efectos.

Riesgo. Número esperado de pérdidas humanas, personas heridas, propiedad dañada e interrupción de actividades económicas debido a fenómenos naturales particulares.

Ruido blanco. Una ST aleatoria se describe como un proceso de ruido blanco, puesto que un análisis de frecuencia de una ST (a través de SPECTRA) muestra que, por analogía con la luz blanca, todas las frecuencias están igualmente representadas. Por otro lado, las series no aleatorias pueden caracterizarse por un predominio de frecuencias bajas, frecuencias altas o una o más frecuencias determinadas que corresponden a periodicidades en la serie.

S

Satélite meteorológico. Es un satélite diseñado exclusivamente para recepción y transmisión de información meteorológica. Los datos que proporciona son en su mayoría en tiempo real. Existen dos clases de ellos, los geoestacionarios y los polar-sincrónicos.

Satélite meteorológico geoestacionario. Se caracterizan por permanecer sobre un punto fijo con respecto a la superficie terrestre y una distancia aproximada de 36 mil Km de altura. Las imágenes que proporcionan estos satélites tienen una frecuencia de 30 minutos y su resolución espacial va de 8 a 1 Km. De este tipo de satélites son los estadounidenses GOES que cubren la República Mexicana.

Satélite meteorológico polar-sincrónico. Estos satélites tienen órbitas de giro alrededor de la tierra con dirección casi paralela a los meridianos; es decir, recorren el planeta de polo a polo. Su órbita descendente es norte-sur en la mitad hemisférica iluminada por el sol; por el contrario, ascienden de sur a norte en la zona oscura. El tiempo aproximado en completar una vuelta es de 12 horas, por lo que completan dos ciclos en un día. Su altura aproximada es de 700 Km y su resolución espacial es mucho mas fina que los geoestacionarios.

Saturación. Condición del aire que se presenta cuando la cantidad de vapor de agua que contiene es el máximo posible para la temperatura existente.

Serie temporal. Variable cuyos valores representan observaciones de un fenómeno uniformemente espaciadas a lo largo del tiempo. También recibe el nombre de serie cronológica o serie en el tiempo.

Smog. Es el término general que se utiliza para describir diversos contaminantes del aire, incluyendo el **ozono a nivel del suelo** (el principal ingrediente del *smog*), material en partículas y monóxido de carbono.

Subsidencia. Movimiento descendente de una capa de aire sobre una extensa zona, este fenómeno provoca estabilidad en la atmósfera.

Superficie isobarica (superficie de presión constante). Superficie que presenta un mismo valor de presión en todos sus puntos. Utilizadas para la elaboración de los mapas meteorológicos en altura. Los niveles principales que se trazan en mapas son 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250 y 200 milibares.

T

Temperatura ambiente. Es la temperatura del aire registrada en el instante de la lectura.

Temperatura máxima. Es la mayor temperatura registrada en un día, y que se presenta entre las 14:00 y las 16:00 horas.

Temperatura mínima. Es la menor temperatura registrada en un día, y se puede observar en entre las 06:00 y las 08:00 horas.

Tendencia estacional. La tendencia que se manifiesta en los puntos de una serie separados entre si por la amplitud correspondiente a una estación. Por ejemplo, si los datos son mensuales, la tendencia que exhiben todos los puntos de Enero.

Termodiagrama. Gráfica en la cual se asientan los datos de radiosondeo. Las principales variables son presión en la escala vertical logarítmica y las temperaturas de ambiente y punto de rocío que se grafican en ejes oblicuos a la presión.

Termómetro. Instrumento que se utiliza para medir la temperatura, consiste en un tubo de cristal graduado con un tubo insertado relleno de líquido, el cual se dilata o comprime según la temperatura y en base a la altura que alcance se lee en la escala graduada.

Termómetro six. Este termómetro es usado para indicar la temperatura ambiente, además cuenta con dos índices que marcan uno la temperatura máxima y el otro la mínima.

V

Valor. Código numérico o alfabético que representa el estado de un caso para una variable.

Valor parcial. Estimación del análisis conjunto de la utilidad o preferencia global asociada con cada valor de cada atributo utilizado para definir el producto/servicio.

Valor pronosticado. El valor de la variable dependiente predicho a partir del modelo.

Varianza. La varianza es una medida de dispersión que refleja el reparto de los valores individuales alrededor del valor medio. Para el caso de una distribución de frecuencias se calcula de la forma siguiente: las diferencias entre los valores individuales y la media se elevan al cuadrado para eliminar la influencia de los signos, y todo este sumatorio se divide entre el número total de observaciones.

Vapor de agua. La cantidad de vapor de agua en la atmósfera es variable, siendo mayor en la regiones marítimas, depende de la evaporación y la evapotranspiración que se produce en la superficie de la tierra, y a pesar de encontrarse en pequeñas proporciones en la atmósfera, hasta un 3%, este gas juega un papel muy importante en la formación de los fenómenos meteorológicos.

Velocidad del viento. Razón del movimiento del viento en unidad de distancia por unidad de tiempo.

Viento. Movimiento horizontal de una masa de aire de la atmósfera como consecuencia de una variación entre las presiones, corregidas al nivel del mar, de dos puntos de la Tierra. Las magnitudes que caracterizan al viento son: en m/s, km/hora o en nudos.

Z

Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Es la continuidad física y demográfica formada por la ciudad de México y los centros de población situados en los territorios municipales de las entidades federales circunvecinas. Hoy día es conformada por 16 delegaciones de la Ciudad de México y 28 municipios del estado de México, enlistados en el contexto del segundo capítulo.

Apéndice III. Normas oficiales mexicanas de calidad del aire

Las normas de calidad del aire fijan valores máximos permisibles de concentración de contaminantes, con el propósito de proteger la salud de la población en general y de grupos con mayor susceptibilidad. Las normas vigentes de calidad del aire fueron publicadas por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación en diciembre de 1994.

Normas de calidad del aire vigentes

Valor límite de exposición

Contaminante	Aguda		Crónica
	Concentración y tiempo promedio de exposición	Frecuencia máxima aceptable	(para protección de la salud de la población susceptible)
Ozono	0.11 partes por millón (1 hora)	1 vez al año	
Monóxido de carbono	11 partes por millón (8 horas)	1 vez al año	
Partículas suspendidas totales	260 microgramo/metro cúbico (24 horas)	1 vez al año	75 microgramo/metro cúbico (media aritmética anual)
Partículas suspendidas PM10	150 microgramo/metro cúbico (24 horas)	1 vez al año	50 microgramo/metro cúbico (media aritmética anual)
Bióxido de azufre	0.13 partes por millón (24 horas)	1 vez al año	0.03 partes por millón (media aritmética anual)
Bióxido de nitrógeno	0.21 partes por millón (1 hora)	1 vez al año	

Normas para evaluar la calidad del aire en México

Contaminante	Norma	Ppm	μ/m^3	Especificación
O₃	NOM-020-SSA1-1993	0.11	216.00	En una hora una vez al año, en un periodo de 1 año.
CO	NOM-021-SSA1-1993	11.0	12595.00	Promedio móvil de 8 horas una vez al año.
SO₂	NOM-022-SSA1-1993	0.13 0.03	341.00 79.00	Promedio móvil de 24 horas una vez al año. Media aritmética anual.
NO₂	NOM-023-SSA1-1993	0.21	395.00	En una hora una vez al año.
PST	NOM-024-SSA1-1993	-	260.00 75.00	En 24 horas una vez al año. Media aritmética anual.
PM10	NOM-025-SSA1-1993	-	150.00 50.00	En 24 horas una vez al año. Media aritmética anual.
Pb	NOM-026-SSA1-1993	-	1.50	Promedio aritmético en 3 meses.

Apéndice IV

Artículo "TROPOSPHERIC OZONE PREDICTION IN MÉXICO CITY. Part I".

Aprobado en enero de 2005, para ser publicado en la
Revista de la Sociedad Química de México.

TROPOSPHERIC OZONE PREDICTION IN MEXICO CITY. Part I.

Margarita Garfias Vázquez, Javier Audry* Sánchez and Francisco Javier Garfias y Ayala.

Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México

* To whom correspondence should be addressed.

Abstract. - Two techniques are applied to forecast time series for the hourly ozone measured at Pedregal's recording station of the Automatic Network for Environmental Monitoring (RAMA for its acronym in Spanish) located in the metropolitan area of Mexico City. The techniques have been widely applied since last century: the autoregressive (AR) and the method of delays in an embedded space. The predicted values by the autoregressive method are somewhat less precise than those forecasted by the embedded space method, as presented below. It is intended to predict the maximum ozone daily concentration in advance to be able to alert the citizenship or for taking appropriate control measures. In this initial presentation, the models have as main limitation to be based only on the ozone time series; more robust models should take into consideration meteorological variables to increase precision. If it is roughly considered only the series formed by the hourly ozone series from January to May 1999; the series of daily ozone maxima have a standard deviation of around 0.05 ppm of ozone. In the most precise—the embedded space method— shown at the end of the article, the error standard deviation between predicted and real maximum daily ozone data is around 0.027 ppm of ozone, which shortens the gap, considering the total of the ozone maximum as a normal distribution.

Introduction.- Atmospheric pollution is one of the most serious problems confronting our modern world [1], [2]. In the Metropolitan Area of Mexico City the pollution control is one of its priorities, as it affects the life quality of about 20 million inhabitants as well as its ecosystem.

Air quality in mega metropolitan areas is a function on the quantity and quality of the fuels used, on the technology used by industrial and transportation units, on the high concentration of population and factories, and on the prevalent meteorological condition. The high concentration of emissions and consequently of contaminants is particularly notorious in the metropolitan area of Mexico City. The inhabitants of the metropolitan area are thus critically exposed to those contaminants with a high concentration gradient, as it is the case of carbon monoxide, nitrogen oxides and particles.

The most severe environmental problem in Mexico City is due to ozone and suspended particles. Invisible and with no emission sources, ozone is form in nature by complex photochemical reactions involving the ultraviolet spectra of sunlight. The reaction products are ozone and other contaminants.

It is assumed that the level of tropospheric ozone is affected by the meteorological conditions, such as, insolation, wind, humidity, temperature, and etcetera. Most of the papers published so far, try to develop a regression model incorporating the

meteorological variables to predict an ozone episode. Theory predicts that there is a correlation among the following meteorological variables and the maximum ozone concentration [4]

$$O_3 = f(\text{temperature, humidity, wind speed and direction})$$

Air quality regulations establish the maximum contaminant concentrations to protect the public health and those of more susceptible people, therefore incorporating a safety margin. The regulations have to be observed by local and federal authorities in charge of enforcing environmental programs. In Mexico City, air quality is not satisfactory if the IMECA (by its Spanish acronym for Índice Metropolitano de la Calidad del Aire) index exceeds 100 at the surface level (equivalent to 0.11 ppm. as an hourly average once in a day). The National Air Quality Standard is very often exceeded in a year.

Several programs have been elaborated to control ozone concentration levels in the urban area of Mexico City by the Federal District Government and the Environmental Ministry of the State of Mexico, however, in no one is detailed the meteorological effect on ozone levels. Due to the great amount and variability of conditions that have to do on measuring atmospheric variables and contaminants, it was necessary to filter out the information. Once the information was screened, it was found that data from the Pedregal Environmental Station, has the highest number of high levels of ozone episodes in a yearly basis. Then the surface ozone data during 1999, from Pedregal Station were selected for this study.

One way to study ozone formation in an urban zone is to use the emission inventory of its precursors (nitrogen oxides and volatile organic compounds) from anthropogenic and biogenic sources. In this estimation is important to quantify the intensity of the luminous radiation and to establish the photochemical reactions between the ultraviolet radiation and the ozone precursors. It is also required to determine the intensity and direction of wind fields. Having the above information, it is necessary to solve differential equations to estimate the level of ozone formation, which is quite a complex problem.

Lately, numerous papers have been published advancing equations that relate ozone formation with the meteorological parameters. Results are not satisfactory and the proposed equations vary in accordance to the place of application.

The aim of the present paper is to apply several mathematical techniques to predict the maximum daily ozone level in order to alert the public or to take appropriate measures to reduce its level. Previously, several studies have been made to predict the maximum daily ozone level [2], [3], [5]. There is not a model universally accepted to predict the maximum ozone level in urban or industrial areas, as the models depend on the climatologically characteristics of the zone considered.

Methodology. - In this first presentation, the surface ozone time series from Pedregal is used. Undoubtedly, other time series from Pedregal should be taken into account to improve forecasting, such as the hourly series of temperature, humidity and other

contaminants; such as carbon monoxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide. It is possible that the height of the limit layer should be included in the hourly series of barometric pressure; unfortunately, we could not find an electronic register of barometric pressure.

Analyzing the hourly ozone as a time series, the principal methods employed were: the autoregressive (AR) [7], and models based on a simulation of an attractor in an embedded space, this is, considering the series as a chaotic system [6]. In the following paragraphs, the preliminary results on the calculated superficial ozone levels are shown for the urban zone of Mexico City.

Autoregressive Method. - The general form of the predictor is:

$$X(n+1) = a_0X(n) + a_1X(n-1) + \dots + a_qX(n-q) \quad (1)$$

Where $X(j)$, $j = 1, 2, \dots, n$ is a sequence of terms known up to the "n" term and the next one is approximated as a linear combination of the "q" previous term. The number "q" of terms employed to make a prediction is the fundamental parameter on the autoregressive method, and "q" is known as the "order" of the method. There is an optimal way of selecting the coefficients "a_i" in the equation (1) [7]. A method known as the "Maximum entropy method or All-poles method" was used to predict ozone. A computer program given in reference [7] was used in this paper.

A great advantage of the autoregressive method is its simplicity as it uses only information on the data series on which a prediction is made. On the contrary, the multiple regression methods try to correlate several variables, which for ozone are the series of temperature, humidity, direction and wind speed, giving more complex models.

In order to apply the methods here exposed it is convenient to analyze previously the series, to visualize the trend, periodicity, and in particular to see the mechanism generating the series, in order to select the most appropriate method of prediction. In some occasions, the methods require that time series have certain characteristics, such as the mean value should be zero, that the series had no periodicity, etcetera.

The selected series is the hourly surface ozone concentration reported in ppm as registered at the Pedregal Environmental Station in the Federal District, in particular the series extending from January to May 1999.

The fundamental aim of this study is to predict with 18 to 24 hours in advance the ozone concentration in a meteorological station in Mexico City. As said before, a physical model of superficial ozone formation is a very complex issue; however, the use of a simple model as the AR is a test to visualize its advantage, and also to analyze the statistical consistency of data.

In the first test, data was fed into the AR model as it was registered. In Figure 2, it is shown the ozone levels of 20 consecutive days forecasted with 24 hours in advance, from February 23rd to March 14th 1999, which correspond to days 55 to 74 in the data

series. The ratio of the mean quadratic error to the quadratic mean value of the signal (hour to hour) is 0.378, equivalent to a correlation coefficient higher than 0.8. In Figure 1, it is illustrated the real maximum ozone values and those predicted during the same 20 days. In this case the ratio of the mean quadratic errors to the quadratic mean value of ozone is 0.327, which approximates to a correlation coefficient of 0.89. In Figure 3 it is shown the hour by hour predicted and real ozone values during the first 10 days.

The results are outstanding if it is taken that no previous adjustment to data was made and that the number of poles (number of terms in the linear combination) was not optimized, nor optimized the ratio of poles to number of data to be used in the AR model. Furthermore, forecasting is made with 24 hours in advance. It will be shown below that prediction is more precise if it carried out hour by hour.

In order to improve prediction, it was increased the number of poles and the total number of data. Figure 14 shows the result of using 120 poles and around 800 constant points (796). Prediction improves, as the ratio of the mean quadratic error to the mean quadratic value of the signal for the maximum values forecasted is 0.304. The same ratio for forecasted and real values in an hour by hour basis for the same 20 days was 0.363. However, to improve considerably the forecasting quality, it is necessary to analyze and treat data before applying again the AR method.

Ozone data can be separated in two groups. One is the nightly ozone data from 1 to 6 hours, which comprises relatively low ozone values compared with diurnal data. The other group is the diurnal ozone data from 7 to 24 hours. In Figure 4, it is shown the nightly ozone concentration data during the first 64 days of 1999. Figure 5 shows the diurnal ozone for the first 20 days of the same period considered. It can be observed that periodicity is complete on the diurnal ozone, as there is a strong correlation between solar radiation and ozone concentration in the atmosphere [4]. This can be appreciated in Figures 6 and 7 that show the correlogram and periodogram of the nightly ozone series during the first 64 days, Correlation is minimum and the periodogram does not show outstanding isolated peaks. On the other hand, the diurnal ozone shows a strong correlation and periodicity as shown in Figures 8 and 9 for the same period of 64 days. For the sake of comparison, in Figure 10 is shown the periodogram side by side of nightly and diurnal ozone. In Figure 11 is shown the total ozone periodogram for the same 64 days.

It is therefore advisable to use the AR method, but with the diurnal ozone data. In Figure 12, it is shown the real maximum and the predicted values for the period of 20 days considered by employing 100 poles, improving the forecast as the ratio of the mean quadratic error to the quadratic mean of signal for the predicted maximum improves, it is now 0.301. The same mean ratio for the hourly prediction is 0.3520.

In other work out with the same AR method, but using 120 poles (in this case is the order of the AR method) the results are shown in Figures 13 and 14. Figure 13 shows simultaneously the real ozone and the forecasted one during the first 10 days, and in Figure 14, it is illustrated the real and forecasted maximum during the 20 days considered before. The ratio of the mean quadratic error to the mean quadratic of

signal was 0.3047. Results are shown in Figure 15 for an entirely analogous calculation to the previous one, but considering only 30 poles, giving a ratio of the mean quadratic error to the mean quadratic value of signal of 0.3270.

Method of delays. - Other method considered for forecasting ozone is the method of delays applied mainly to chaotic models [6]. It is required to generate an embedded space with the ozone series and an affine transformation is used to find the following points in the series. Basically, the time series: $X(ti)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) is separated into the following vectors:

$$X_i = \{X(ti), X(ti-T), (X(ti-2T), \dots, X(ti-(d-1)T)\} \quad (A)$$

Where T is the "delay" and " d " is the number of coordinates or terms in the vector and the dimension of the embedded space, a vectorial space made precisely by all the vectors in A . To forecast next value, the last of the vectors is taken, for example x_n , and then it is looked for in the embedded space for neighboring vectors, which have a successor Y_i in the series. Be Y the group of all the successive vectors, then a function is built with the vectors X and Y . In this case, an affine transformation is adjusted:

$$AX_i + b = Y_i \quad (B)$$

The set of vectors X and their successors Y are used to adjust by least square method the coefficients of the matrix A and the coordinates of the vector b in equation (B). The least square method uses the QR decomposing method or the singular values decomposition method [6]. Once the matrix A and the vector b are found, then the last of the vectors X_n is substituted in (B), to obtain its successor one and the first coordinate of this vector is the following predicted datum of the series. The shape of the function B is quite arbitrary, but the one shown here was selected as it is the most suitable for chaotic models as reported in literature [6], [10]. In other circumstances, in a simpler manner, it can be taken the average value of the first coordinate of all the successors in the set Y of vectors [11]. This last technique avoids the need to calculate the A matrix and the vector " b ", i.e. there are no parameters to adjust. It should be noted the great flexibility of the method because of the possibility of selecting at will, a function and the parameters.

Previous to applying the method of delays, the ozone series was smoothed by means of a moving average filter, building a spectral matrix [9]. The matrix was constructed with the first 1200 data in an embedded space of dimension 12 [9]. The moving average data was projected on the first 6 eigenvectors of the spectral matrix [9].

The method of delays was applied on the smoothed values on an hour by hour horizon. Figure 16, shows the predicted maximum values and the real ones in a 20 day period. The forecasted values are quite close to the real ones, as the ratio of the mean square error to the mean quadratic value of the signal is 0.1416, that is equivalent to a correlation coefficient greater than 0.98. In Figure 17, it is shown the notable coincidence of predicted and real values when the forecasting is made hour by hour. The ratio of the mean quadratic error to the mean value of the signal when the prediction is made hour by hour is 0.2233. The low error values are mainly due to the

fact that prediction is made by the hour. An embedded space of dimension 18 was used and 36 neighboring vectors were chosen. The results show that the considered ozone series is a chaotic one, notwithstanding that it is not amenable to forecast data well in advance.

To use the method of delays for long prediction, a forecasting is made to an infinite horizon, besides the diurnal ozone was selected (from 7 to 22 hours), and smoothed by the moving average filter as before, projecting the series on the first 8 eigenvectors. Prediction starts at 10 hours every day. Results are shown in Figure 18 for the maximum values in the same 20 days, and the forecast is outstanding as the ratio of its mean quadratic error to the mean quadratic value of the signal is 0.1634. In Figure 19 is shown the prediction hour by hour in the first 12 days,

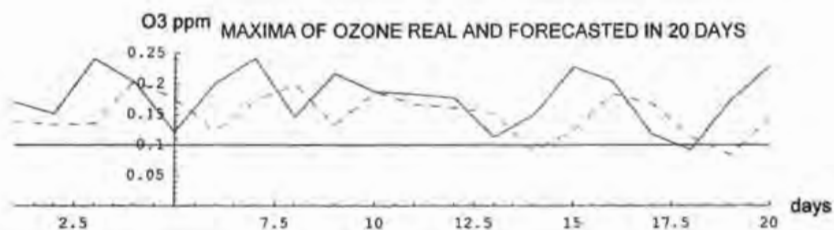
Conclusions. - It is here shown that those elementary methods such as the AR and the chaotic one, in which the only information they contain is the series itself, are capable of giving satisfactory forecasting on the surface ozone concentration. The trends on the predicted values are close to the real ones. In the AR method, increasing the poles number used improves precision. It is clear that the hourly ozone levels depend strongly on the previous values. An outcome of this study is validation of data measured at Pedregal Environmental Station. In a second part, meteorological variables will be introduced to improve ozone forecasting.

Bibliography.

- 1.-Garfias, F.J.; Díaz, L., "Gasolinas Oxigenadas: la experiencia mexicana", 1ª. Edición, 2003, Fondo de Cultura Económica, México.
- 2.- INE, "Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en ciudades mexicanas", 2004, México.
3. - Pao-Wen Grace Liu, "Forecasting Peak Daily Ozone Levels I. A Regression with Time Series Errors Model Having a Principal Component Trigger to fit 1991 Ozone Levels", 2002, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52, 1064-1074.
4. - Brown, M. J., "Mexico City Ozone Concentration as a Function of Readily Available Parameters", February 1994, Los Alamos National Laboratory, Report 87545, Los Alamos,
5. - Comrie, A. C., "Comparing Neural Networks and Regression Models for Ozone Forecasting", 1997, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47, 653.
6. - Mattheij, R.M.M.; Molenaar, J., "Ordinary Differential Equations in Theory and Practice", 1996, J. Wiley and Sons, New York.
7. - Press, W.H.; Flannery, B.P.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T., "Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing (FORTRAN Version)"1989, Cambridge University Press, Cambridge.

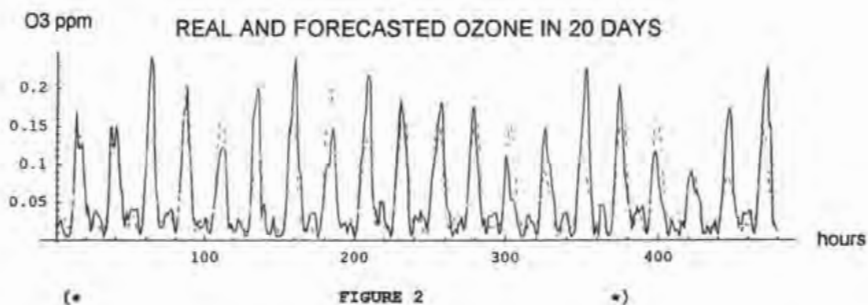
8. - Wolfram Research Inc., "Mathematica", 2004.
9. - Shaw, W.T.; Tigg, J., "Applied Mathematica: Getting Started, Getting it done", 1994, Addison Wesley Pub. Co., New York.
- 10.- Farmer, J.D.; Doynne, J.; Sidorowich, J.J., "Predicting Chaotic Time Series", 1987, *Physical Review Letters*, 59, 845.
- 11.- Jian-Long Chen, Islam, S., Biswas, P., "Nonlinear Dynamics of hourly ozone concentrations; nonparametric short term predictions". 1998. *Atmospheric Environment*, 32, No. 11, 1839-1848.

November 11th, 2004

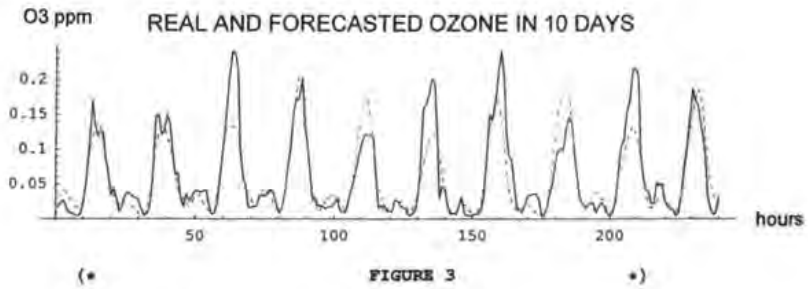


(* FIGURE 1 *)

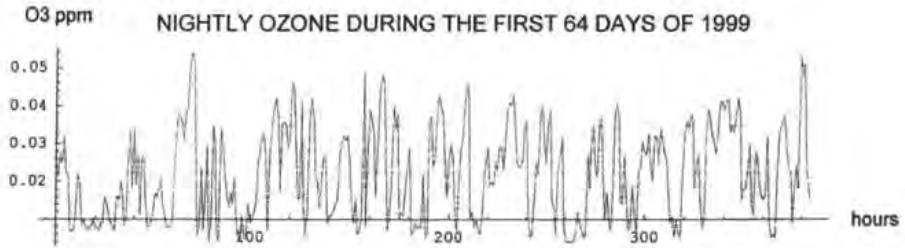
(* Maximum real and forecasted ozone for a period of 20 days, starting *)
(* from day 55 of 1999. Real data are depicted by a continuous line and *)
(* forecasted ones by a dashed line. Forecasting was done by the AR *)
(* method. Initial set of data comprised 1296 points from first day of *)
(* 1999, increasing the set each 24 hours. 60 poles were used. *)



(* Hourly ozone data. Real values are represented by the continuous line *)
(* and forecasted ones by the dashed line. The 20 days period correspond *)
(* to the same one illustrated in Figure 1 and the same method of *)
(* forecasting was applied. *)



(* This figure 2 correspond to the first half of Figure 2. *)

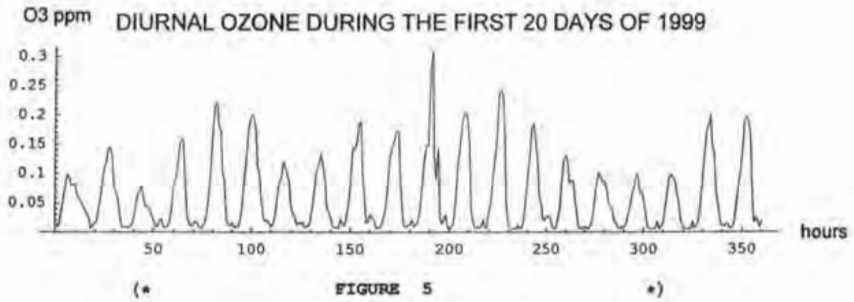


(*)

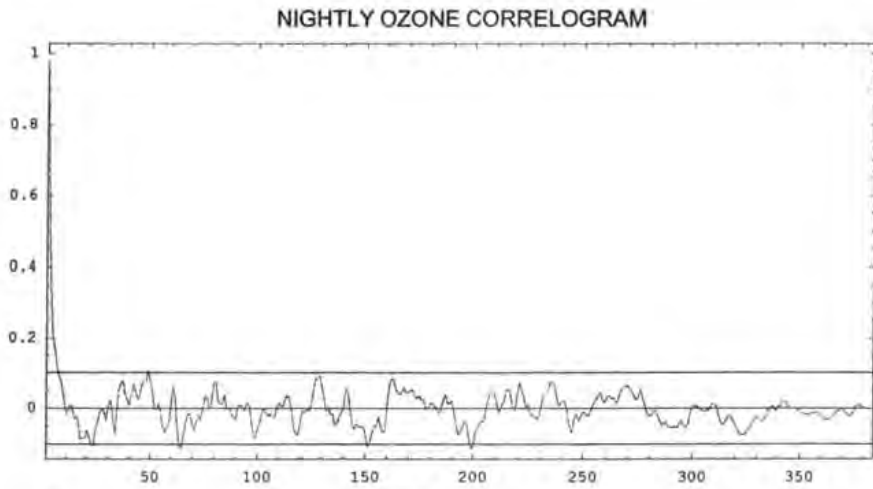
FIGURE 4

(*)

- (* Nightly ozone (from 1 to 6 hours) during the first 64 days of 1999. *)
- (* It is appreciated the lack of periodicity and ozone concentration *)
- (* not reaching 0.06 ppm. *)



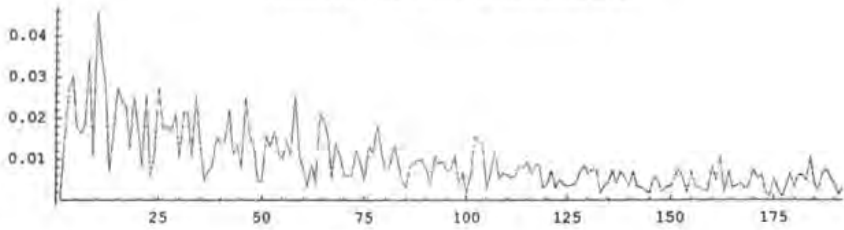
(* Diurnal ozone at Pedregal Station from 7 to 24 hours for the *)
(* first 20 days of 1999. There is a periodicity and ozone concentration *)
(* reaches 0.309 ppm. *)



(* FIGURE 6 *)

(* Correlogram of nightly ozone from 1 to 6 hours during the first 54 days *)
(* of 1999 at Pedregal Station *)

NIGHTLY OZONE PERIODOGRAM

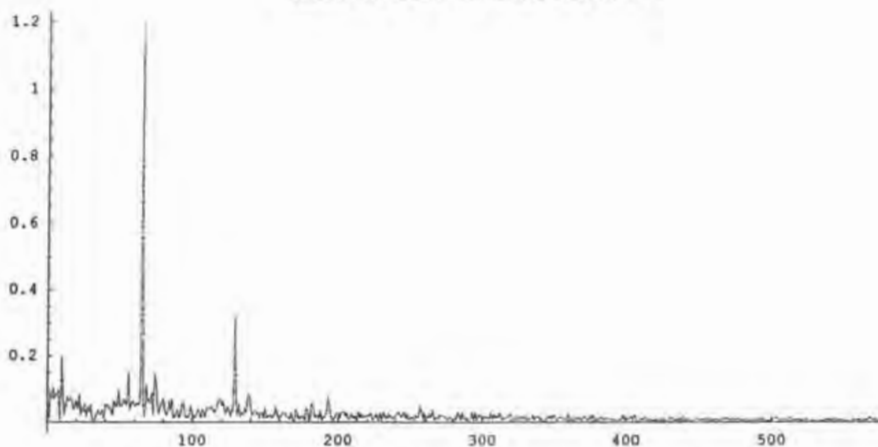


(* FIGURE 7 *)

(* Periodogram of nightly ozone from 1 to 6 hours during the first 64 days *)

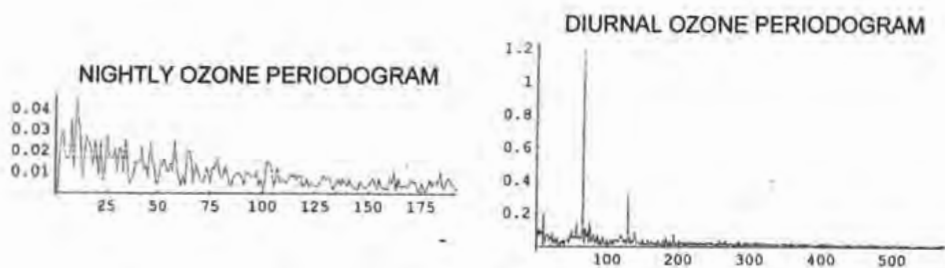
(* of 1999 at Pedregal Station. *)

DIURNAL OZONE PERIODOGRAM



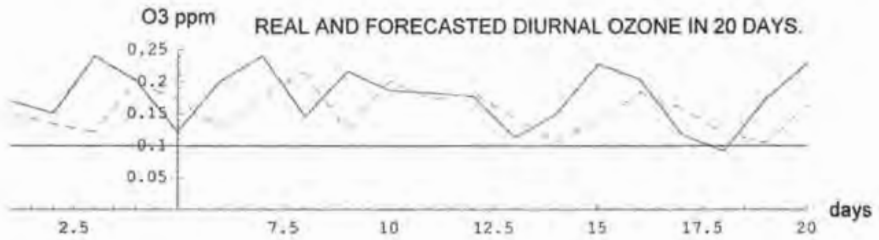
(* FIGURE 9 *)

(* Periodogram of diurnal ozone from 7 to 24 hours during the first 64 days of *)
(* 1999 at Pedregal Station. *)



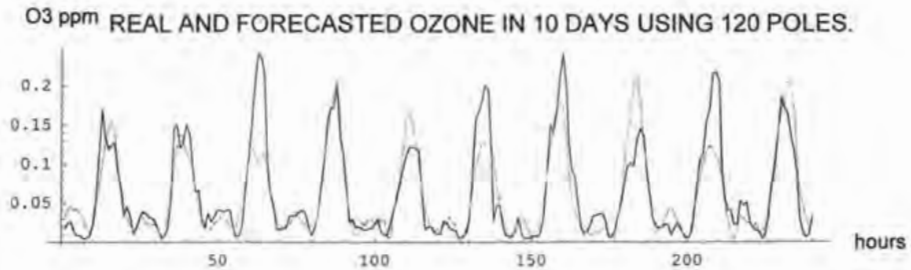
(* FIGURE 10 *)

(* Both periodograms, nightly and diurnal, for the first 64 days of 1999 *)
(* at Pedregal Station are shown side by side for comparison. *)



(* FIGURE 12 *)

(* Real and calculated ozone maximum of ozone for a 20 days period, from *)
(* day 55 of 1999. Real values are depicted by the solid line and predicted *)
(* ones by the dashed one. The AR method was applied using 100 poles and *)
(* a constant set of 796 diurnal points from 7 to 24 hours, rendering 18 *)
(* points per day. *)

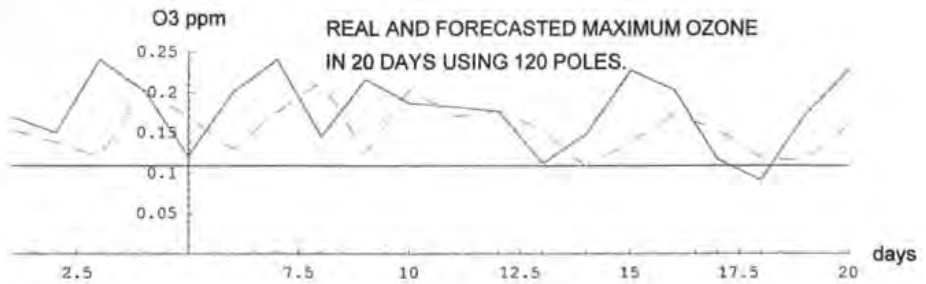


(*)

FIGURE 13

*)

(* Real and predicted hourly ozone for period of 10 days starting on *)
(* day 55 of 1999 at Pedregal Station. Real values are shown on a *)
(* continuous line and predicted ones on a dashed line. The AR method *)
(* was used to forecast ozone with 120 poles and a constant set *)
(* of 796 previous points. *)



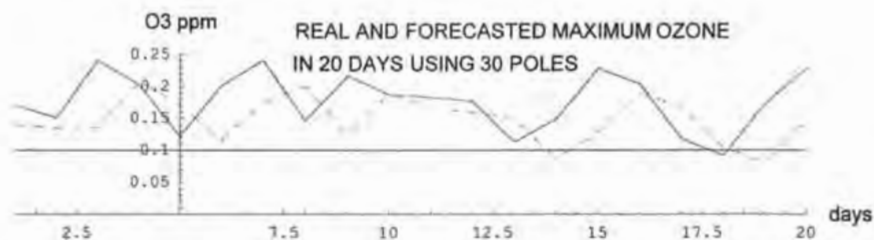
- Graphics -

(*

FIGURE 14

*)

(* Real and predicted maximum ozone values in a 20 days period from day 55 *)
 (* of 1999. Real values lie on a continuous line and predicted ones on a *)
 (* dashed line. The horizontal line is drawn at a concentration of 0.11 ppm, *)
 (* to show the National Air Quality Standard. The AR method was used to *)
 (* forecast ozone with 120 poles and a constant set of 796 previous points. *)



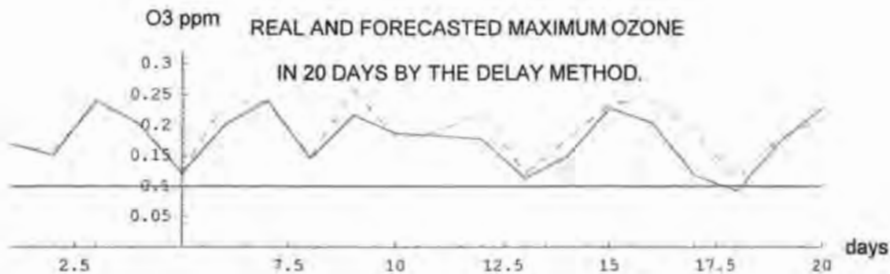
- Graphics -

(*

FIGURE 15

*)

- (* Real and predicted ozone for a 20 days period, from day 55 of 1999. *)
- (* Real maximum ozone values lie on the continuous line and predicted ones *)
- (* on the dashed line. The AR method was used with 30 poles and a constant *)
- (* set of 796 previous points. *)



- Graphics -

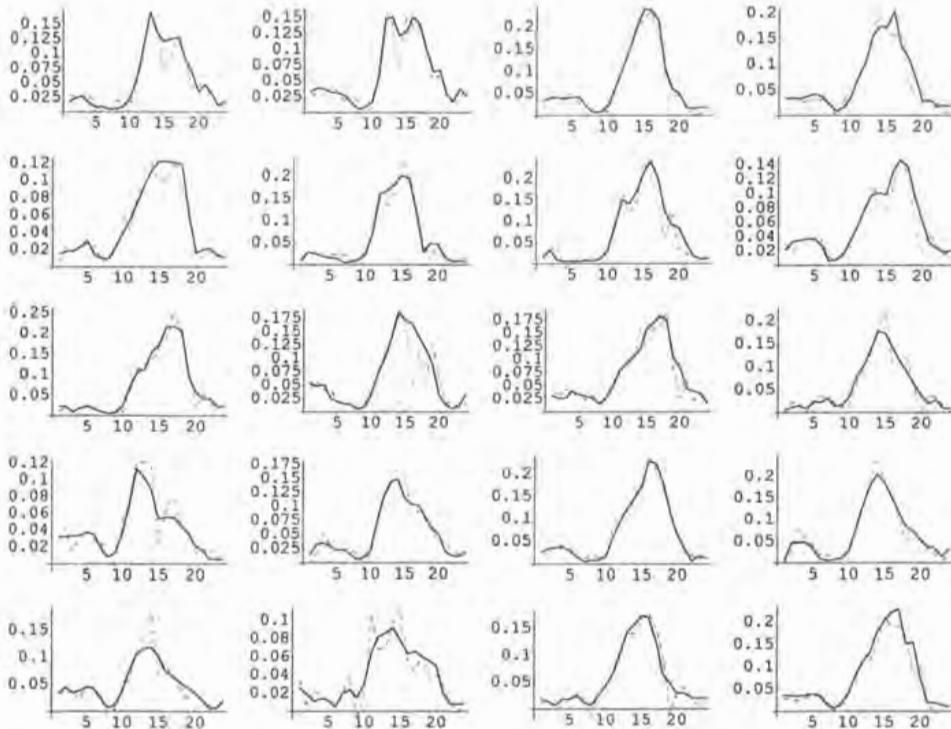
(*

FIGURE 16

*)

(* Real and predicted maximum ozone for a 20 days period from day 55 of *)
 (* 1999 at Pedregal Station. Real data are on the continuous line and *)
 (* predicted ones on the dashed line. The method of delays was used with *)
 (* an embedding dimension of 18 and selecting 36 closest neighboring *)
 (* vectors. Data was previously smoothed by moving averages and it was *)
 (* projected on the first 6 eigenvectors of the spectral matrix constructed *)
 (* from the first 1200 points, using a window of 12 points. Forecasting *)
 (* was made on an hour by hour basis. *)

GRAPHICAL ARRAY OF REAL AND FORECASTED HOURLY OZONE
ON AN HOUR BY HOUR BASIS.

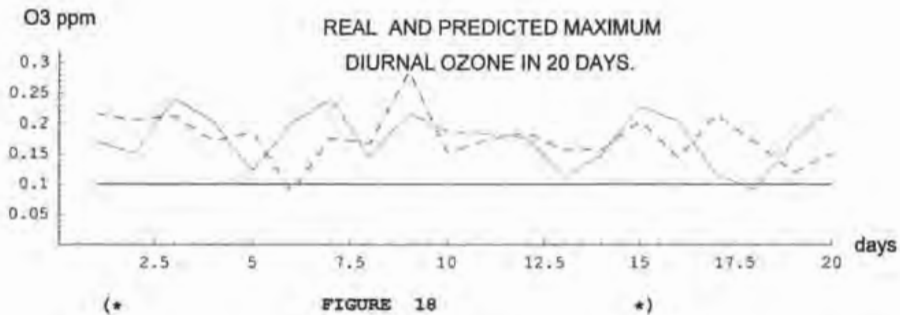


(*)

FIGURE 17

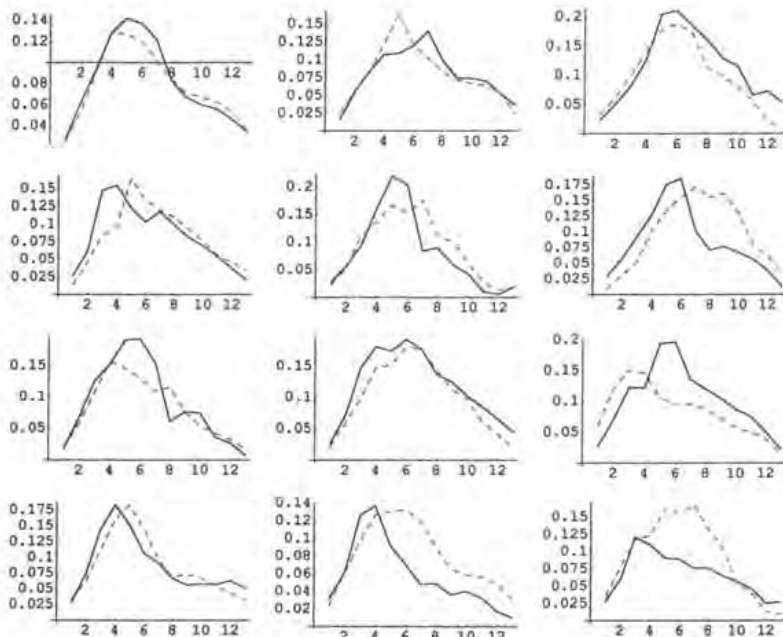
*)

(*) Real and predicted hourly ozone for 20 days from day 55 of 1999 at *)
 (*) Pedregal Station. Real hourly ozone on the continuous line and *)
 (*) forecasted ones on the dashed line. The method of delays was used *)
 (*) to forecast ozone with an embedding dimension of 18 and selecting *)
 (*) 36 closest neighboring vectors. Real data were previously smoothed *)
 (*) as in Figure 16. *)



(* Real and predicted maximum ozone for a 20 day period (Monday to *)
(* Friday) for the 4 weeks from week 17 of 1999, without considering *)
(* half a week at the beginning of the year. The delay method was applied *)
(* with an embedding dimension of 16. Two closest neighboring vectors *)
(* were selected and arithmetic averaging was used to forecast next *)
(* values. Data were previously smoothed with a dynamical average [9] *)
(* on the first 8 eigenvectors of a spectral matrix constructed on the *)
(* same embedding space. *)

GRAPHICAL ARRAY SHOWING REAL AND FORECASTED
HOURLY DIURNAL OZONE.



(* FIGURE 19 *)

(* Graphical array showing the hourly ozone from 10 AM to 11 PM, *)
 (* Real and predicted hourly diurnal ozone for the first 12 days of *)
 (* the 20 weekly days reported in Figure 18. Real ozone lies on the *)
 (* continuous line and forecasted one on the dashed line. *)