

# LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

## 20 años de monitoreo atmosférico



Sensor de dirección y velocidad del viento, Unidad Móvil RAMA (circa 1975)

Análisis del estado y tendencia de la calidad del aire, 1990-2005  
Criterios para el manejo de registros de calidad del aire  
Criterios para evaluar las tendencias y el estado de la calidad del aire  
Bases para el desarrollo del sistema de monitoreo atmosférico



**GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL**  
México, la Ciudad de la Esperanza



Secretaría del Medio Ambiente



# **LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO, 1986 – 2005**

Criterios para el manejo de registros de calidad del aire

Criterios para evaluar las tendencias y el estado de la calidad del aire

Bases para el desarrollo del sistema de monitoreo atmosférico

**Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal  
Dirección General de Gestión Ambiental del Aire  
Sistema de Monitoreo Atmosférico**

**Ciudad de México, 2006**

**LIC. ALEJANDRO ENCINAS RODRÍGUEZ**

Jefe de Gobierno del Distrito Federal

**M.A.P. EDUARDO VEGA LÓPEZ**

Secretario del Medio Ambiente

**DR. J. VÍCTOR HUGO PÁRAMO FIGUEROA**

Director General de Gestión Ambiental del Aire

**M en C. RAFAEL RAMOS VILLEGAS**

Director de Monitoreo Atmosférico

**BIÓL. ROBERTO MUÑOZ CRUZ.** Subdirector de Análisis  
**TÉC. ARMANDO RETAMA HERNÁNDEZ.** Subdirector de Monitoreo  
**ING. ALEJANDRO RÍOS MEJÍA.** Subdirector de Sistemas  
**MET. ALFREDO ALFONSO SOLER.** Subdirector de Meteorología

<b>ELABORACIÓN</b>	<b>COLABORACIÓN</b>
BIÓL. ROBERTO MUÑOZ CRUZ ACT. CRISTINA ORTUÑO MOJICA TÉC. MARÍA GUADALUPE GRANADOS GUTIÉRREZ ING. GERARDO SAMUEL LÓPEZ VENEGAS GEÓG. VICENTE PÉREZ NÚÑEZ BIÓL. MÓNICA DEL CARMEN JAIMES PALOMERA	TÉC. ARMANDO RETAMA HERNÁNDEZ ING. ALEJANDRO CAMPOS DÍAZ

**DISEÑO**

Ivalú Loya Moreno

**AGRADECIMIENTOS**

Dr. Ernesto Jáuregui Ostos, Dr. Humberto Bravo Álvarez, Biól. Pablo Sánchez Álvarez, Dr. Ernesto Dos Santos Caetano Neto.  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.  
Dr. Pablo Cicero Fernández. Universidad de California Los Ángeles (UCLA).  
DIRECCIÓN GENERAL DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN HIDRÁULICA (DGCOH)

Portada. Sensor de dirección y velocidad de viento empleada en la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

## **PRESENTACIÓN**

Los gobiernos del Distrito Federal, el Estado de México y el federal, llevan a cabo una gestión coordinada del recurso aire sustentada en programas de largo plazo. Por ello, es importante contar con herramientas adecuadas que permitan evaluar de manera confiable y oportuna los resultados de estos programas.

Para lograr esto, los modelos de gestión de la Calidad del Aire destacan la importancia de establecer y operar redes de monitoreo, y establecer los mecanismos pertinentes para su gestión. En el caso del actual Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, han transcurrido 20 años desde que inició en su nueva etapa la medición de contaminantes criterio y actualmente se ha logrado consolidar un grupo de trabajo que respalda su operación. No obstante, el futuro de este sistema debe responder al proceso de crecimiento de esta metrópoli, así como a las necesidades de información de su población.

El presente documento integra una revisión de la historia de la medición de contaminantes atmosféricos, como antecedente para describir la infraestructura física y administrativa del actual sistema de monitoreo. Así mismo, incorpora las propuestas para su desarrollo a futuro que resultaron del Foro de Monitoreo Atmosférico celebrado del 19 al 21 de abril del 2006, un espacio que permitió el intercambio de ideas entre investigadores y responsables de la gestión de este recurso.

Por otra parte, se integran a detalle los procedimientos que se realizan para el manejo de los registros de los contaminantes atmosféricos y los parámetros meteorológicos con el fin de obtener indicadores, así como los métodos de análisis que se han instrumentado para evaluar tendencias y comportamiento de los contaminantes.

De esta forma se transparentan los procesos y se contribuye a difundir el conocimiento adquirido en el Sistema de Monitoreo Atmosférico a lo largo de la presente administración.

M.A.P. Eduardo Vega López

# INDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>1 GESTIÓN AMBIENTAL DEL AIRE</b>	<b>3</b>
1.1 Iniciativas de gestión ambiental del aire en la ZMVM	3
1.2 El monitoreo atmosférico, su importancia en la evaluación del Proaire 2002-2010	5
<b>2 HISTORIA DEL MONITOREO ATMOSFÉRICO EN LA ZMVM</b>	<b>7</b>
2.1 El inicio del monitoreo atmosférico en la ZMVM	7
2.2 Crecimiento y expansión del monitoreo atmosférico en la ZMVM	9
2.3 El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México - SIMAT	13
2.3.1 Plan de mejora continua del SIMAT	15
2.3.2 Subproceso de monitoreo	16
2.3.2.1 Evaluación de representatividad de las estaciones del SIMAT	18
2.3.2.2 Evaluación de redundancia de los registros del SIMAT	18
2.3.2.3 Evaluación del desempeño de los monitores de gases contaminantes	19
2.3.2.4 Evaluación del desempeño de los monitores de partículas suspendidas	20
2.3.2.5 Evaluación de desempeño de los monitores automáticos de partículas	20
2.3.3 Subproceso de adquisición, transmisión y validación de registros	22
2.3.3.1 Adquisición y transmisión de registros	23
2.3.3.2 Validación de registros	24
2.3.3.4 Obtención de indicadores	24
2.3.3.5 Técnicas de análisis de tendencia y estado de los contaminantes atmosféricos	26
2.3.3.6 Difusión de la información	28
2.4 Configuración actual y futuro del SIMAT	32
2.5 Memorias del Foro de Monitoreo Atmosférico, Ciudad de México	33
<b>3 CARACTERÍSTICAS GEOCLIMÁTICAS DE LA ZMVM</b>	<b>38</b>
3.1 Características geográficas	38
3.2 Características climáticas	38
3.3 Índice Meteorológico	45
<b>4 OZONO Y ÓXIDOS DE NITRÓGENO</b>	<b>49</b>
4.1 Análisis de tendencia y movilidad	50
4.2 Análisis de estado	52
4.3 Evaluación del riesgo por exposición a ozono en la ZMVM	54
<b>5 MONÓXIDO DE CARBONO</b>	<b>57</b>
5.1 Análisis de tendencia	57
5.2 Análisis de estado	58
<b>6 DIÓXIDO DE AZUFRE</b>	<b>59</b>
6.1 Análisis de tendencia	59
6.2 Análisis de estado	60
<b>7 PARTÍCULAS SUSPENDIDAS</b>	<b>61</b>
7.1 Análisis de tendencia de PST y PM <sub>10</sub>	61
7.2 Análisis de estado de las PST, PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	62

7.3	Evaluación del riesgo por exposición a PM <sub>2.5</sub> en la ZMVM	66
<b>8</b>	<b>PLOMO</b>	<b>67</b>
8.1	Análisis de tendencia	67
8.2	Análisis de estado	68
<b>9</b>	<b>DEPÓSITO ATMOSFÉRICO</b>	<b>68</b>
9.1	Comportamiento histórico y espacial de los precursores de lluvia ácida en la ZMVM	70
9.2	Comportamiento histórico y espacial del pH del agua de lluvia ácida en la ZMVM	71
	<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXO 1. Aspectos generales del análisis de tendencia</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO 2. Pruebas estadísticas para el análisis de tendencia</b>	<b>78</b>
	Prueba de tendencia de Mann Kendall	79
	Prueba de homogeneidad de estaciones	80
	Estimación de la pendiente (porcentaje de cambio) mediante la Prueba de Sen	82
	<b>ANEXO 3. EL EFECTO PISTON</b>	<b>83</b>

## RESUMEN

La integración y operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico<sup>1</sup> (SIMAT) de la Ciudad de México a partir del año 2001, tuvo el propósito de mejorar la medición de las concentraciones de contaminantes criterio<sup>2</sup>, mejorar la difusión de la información al público y fortalecer su empleo como un medio para evaluar el desempeño de los programas para mejorar la calidad del aire.

Por lo anterior y tratando de esbozar los lineamientos que debe incorporar la intención de fortalecer en el futuro al SIMAT, en el capítulo 2 de este documento se revisan los antecedentes y estado actual de este sistema, desde los primeros estudios llevados a cabo al final de la década de los 50 por investigadores e instancias gubernamentales, las diferentes etapas de crecimiento espacial y su infraestructura, hasta los aspectos técnicos de mayor relevancia instrumentados durante la gestión actual. Así mismo, se incorporan las propuestas para su mejora que surgieron del Foro de Monitoreo Atmosférico celebrado los días 18 y 20 de abril del año 2006.

En los capítulos subsecuentes se incluyen los aspectos técnicos vinculados con el tratamiento y análisis de los registros de parámetros meteorológicos y los contaminantes atmosféricos que realiza el SIMAT actualmente. El detalle con el que se explican estos aspectos técnicos, tiene la finalidad de documentarlos y difundirlos para transparentar los procedimientos que se llevan a cabo.

En el caso de la evaluación del comportamiento de los contaminantes a lo largo del tiempo, el SIMAT ha adoptado una serie de indicadores y métodos que permiten evaluar su tendencia al nivel de estación de monitoreo, y cuantificar el "cambio promedio" promedio que ha tenido año con año.

Derivado de lo anterior, se estima que la tendencia de 1990 a 2005 de las concentraciones máximas de ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México, continua siendo decreciente y que en una estación como Pedregal, localizada en el suroeste de esta metrópoli, el decremento de un año a otro sea cercano a 0.011 ppm. Esta mejora también se aprecia en el aumento a 144 días (39.5%) con concentraciones menores al límite que protege la salud y una menor activación del plan de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

En el caso de los óxidos de nitrógeno, uno de los precursores del ozono, el análisis de tendencia no muestra evidencia estadística de decrementos en el tiempo, incluso en algunas estaciones se continúan presentando tendencias crecientes.

El monóxido de carbono, el plomo y el dióxido de azufre son contaminantes con una tendencia que manifiesta el "control" que se ha logrado a través de los programas, y llegan a presentar

---

<sup>1</sup> Considera su integración como sistema, la instrumentación de un sistema de calidad, un sistema de mejora continua, la innovación tecnológica, etc.

<sup>2</sup> Término adoptado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) para describir a los contaminantes atmosféricos cuyos límites máximos permisibles, en forma de normas o estándares, han sido establecidos con base en criterios científicos para cuidar el bienestar y la salud humana. Los contaminantes criterio son: ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), plomo (Pb) y partículas suspendidas.

excedencias eventuales a sus normas de salud correspondientes. En el caso del dióxido de azufre, en los últimos 4 años se ha disminuido la frecuencia de eventos extraordinarios y también se ha logrado mantener el valor del indicador de exposición crónica por debajo del límite que sugieren las autoridades sanitarias.

Las concentraciones de partículas menores a 10 micrómetros obtenidas como muestreos de 24 horas, muestran una tendencia decreciente desde 1990 y la magnitud del decremento anual de las concentraciones máximas llega a ser de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en algunas estaciones. No obstante, en 2005 se presentaron excedencias a los límites permisibles durante los meses de la época seca-fría.

A esta situación de niveles insalubres de  $\text{PM}_{10}$ , se añade el hecho de que el límite anual que previene ante situaciones crónicas de exposición sea rebasado aún en la mayoría de las estaciones de monitoreo. Esta misma situación se presenta en el caso de las partículas menores a 2.5 micrómetros ( $\text{PM}_{2.5}$ ), ya que el límite de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se rebasa en todas las estaciones de monitoreo.

El impacto de la contaminación atmosférica de la ZMVM sobre las áreas forestales y agrícolas localizadas al sur, estimado a partir de los niveles de acidez registrados en el agua de lluvia, indica que entre 1990 y 2005 han incidido sobre esta región eventos de lluvia con  $\text{pH} \leq 5.6$ . En el resto de la ZMVM la presencia de estos eventos ha disminuido de forma paulatina a lo largo del periodo de años señalado.

## **1 GESTIÓN AMBIENTAL DEL AIRE**

La calidad del aire aparece hoy día como uno de los principales objetos de preocupación entre los distintos problemas ambientales que se enfrentan en la Ciudad de México (Lezama, 2000). Este problema comenzó a ser relevante a partir de la década de los 40, cuando la centralización económica desencadenó una aglomeración industrial y poblacional. Esta última variable llegó a presentar tasas de crecimiento superiores al 3% anual (Herrera, A. 1990).

La Ciudad de México es considerada uno de los núcleos urbanos con mayor población de todo el mundo. La elevada concentración de industrias, vehículos y el uso doméstico de la energía provocan el deterioro del aire (Encarta, 2003).

### **1.1 Iniciativas de gestión ambiental del aire en la ZMVM**

Debido a los altos niveles de contaminación del aire en esta metrópoli y al aumento de la mancha urbana, la gestión del recurso aire ha requerido la incorporación e integración de un mayor número de municipios conurbados del Estado de México. De acuerdo con el programa vigente para la gestión ambiental del aire, la influencia de la calidad del aire en esta metrópoli involucra a las 16 delegaciones del Distrito Federal y 28 municipios conurbados (Proaire 2002-2010).

La historia de la gestión ambiental del aire en la ZMVM tiene como fecha clave para su inicio y desarrollo el día 1° de agosto de 1979, cuando la Comisión Intersecretarial de Saneamiento Ambiental presentó el primer "Programa coordinado para mejorar la calidad del aire en el Valle de México 1979 – 1982", el cual sería un antecedente para el Programa Integral para el Control de la Contaminación Atmosférica 1990 – 1994 (PICCA).

En 1981, el entonces Departamento del Distrito Federal organizó como preámbulo a la Reunión Internacional de Grandes Ciudades, una reunión de expertos en problemas de grandes metrópolis para discutir la problemática de la contaminación ambiental. Este grupo de expertos presentó ante el Presidente de la República, un proyecto de solución a la problemática atmosférica en el Valle de México.

Dos años más tarde, en 1983, se promulgó el Plan Nacional de Desarrollo (PND) que proponía, entre otros aspectos, el diseño de sistemas de monitoreo atmosférico, por lo que se concretó la instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). Derivado de este PND y la consulta pública, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) publicó en 1984 el Programa Nacional de Ecología, en el que se establecía la necesidad de controlar y disminuir la contaminación ambiental, se enfatiza la necesidad de operar una red de monitoreo.

En 1987 la SEDUE celebra una reunión con expertos nacionales e internacionales en calidad del aire y se discuten los proyectos y programas promovidos por el Gobierno Federal, en conjunto con los sectores privado y social. Como resultado de esta reunión se definieron acciones a corto, mediano y

largo plazo, para el control de emisiones y de fuentes móviles, redes de monitoreo y mejora de combustibles. También en este año se realizó el Segundo Seminario Internacional sobre Administración de la Calidad del Aire, con la conclusión de ampliar la red de monitoreo y medir otros contaminantes, incluyendo estaciones de control y métodos alternos de medición (SEDUE, 1988).

La prioridad de atender la problemática de calidad del aire y la complejidad metropolitana, motivaron que a finales de la década de los 80 se creara el Consejo del Área Metropolitana (CAM) del Distrito Federal y del Estado de México, con el propósito de incidir en las decisiones sobre planeación demográfica, territorial y económica de la ZMVM.

Al concluir el PICCA se diseñó el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995 – 2000 (Proaire), un programa de carácter sistémico e integrador que tuvo el propósito general de proteger la salud de la población que habita en la ZMVM, abatiendo de manera gradual y permanente los niveles de contaminación atmosférica. En este programa se considera necesario inducir un cambio cultural para que los diferentes sectores involucrados en el problema estén dispuestos a aceptar y asumir las responsabilidades que les corresponden. En cuanto a la red de monitoreo, el Proaire anuncia la necesidad de incrementar la credibilidad de las mediciones por medio de auditorías públicas, debido a los cuestionamientos y críticas de grupos ecologistas y medios de comunicación. También señala que es necesario instrumentar un programa permanente para llevar a cabo mediciones de la calidad del aire en microambientes, debido a la necesidad de mejorar la evaluación de riesgos y exposición personal (DDF, GEM, SEMARNAP, SSA; 1996).

En el año 2002 se publicó el Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002 – 2010 (Proaire 2002 – 2010), el cual mantiene el objetivo de proteger la salud humana ante los efectos nocivos causados por la contaminación atmosférica, por lo que es necesario reducir los niveles de contaminación para alcanzar niveles que aseguren la protección a la salud de la población y evitar su exposición a niveles de riesgo, especialmente los grupos más vulnerables. El Proaire 2002 – 2010 es un instrumento dinámico, con metas específicas para cada contaminante atmosférico criterio que se ajustan cuando se incorporan nuevas acciones, y que se centra en atender las siguientes preguntas:

<p><b>¿Cuál es la calidad del aire necesaria para proteger la salud?</b></p>	<p>En principio, las normas de calidad del aire de protección a la salud establecen límites máximos permisibles para los distintos contaminantes del aire. Aunque el ozono y las PM<sub>10</sub> son los contaminantes que constituyen un mayor riesgo a la salud, debido a la magnitud de sus concentraciones y la frecuencia con que se exceden los límites permisibles; en el Proaire 2002 – 2010 también es prioritario continuar reduciendo la concentración del resto de los contaminantes y asegurar que sus concentraciones en el aire se mantengan en niveles seguros, desde el punto de vista de la protección a la salud.</p>
<p><b>¿Cuánto debe reducirse la exposición de la población a los niveles de contaminación para prevenir efectos?</b></p>	
<p><b>¿En cuánto pueden reducirse los niveles de contaminación atmosférica en el año 2010?</b></p>	<p>Depende de las acciones que se realicen y de su efectividad, su ausencia provocaría que en el año 2010 los niveles de contaminación sean superiores en comparación a los actuales. Se prevé que la reducción de los niveles de contaminación, evite efectos a la salud.</p> <p>La reducción de los niveles de O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub> es un proceso gradual, requiere de un esfuerzo de largo plazo con acciones de corto, mediano y largo plazo, y el compromiso permanente de la sociedad.</p>

En el Proaire 2002 – 2010 se plantea como medida específica la modernización de la RAMA, con el objetivo de revisar sus estaciones y reubicarlas o modernizarlas para una mejor operación y adquisición de datos, debido a que su configuración actual data de 1986.

En este programa también se menciona que ante el aumento de la mancha urbana, se planeó la instalación de 6 estaciones remotas adicionales y aumentar la medición de contaminantes criterio en estaciones existentes. Entre los aspectos sobresalientes de esta medida de modernización de la RAMA, destacan el uso de sistemas “inteligentes” de adquisición de datos y enlaces telefónicos digitales para diagnosticar a distancia la operación de sus equipos de monitoreo, y la necesidad de modernizar su plataforma informática para mejorar la adquisición y validación de registros, y aumentar la disponibilidad de la información que genera (CAM, 2002).

## **1.2 El monitoreo atmosférico, su importancia en la evaluación del Proaire 2002-2010**

En el Proaire 2002 – 2010 se enfatiza que la RAMA es la herramienta más completa y confiable para medir el estado de los contaminantes en el aire de la ZMVM, y el principal instrumento para vigilar y evaluar la efectividad de sus acciones. Esta evaluación debe ser objetiva y rigurosa, y dar a conocer los logros o retrocesos de forma clara y sencilla en términos de la reducción de emisiones y la exposición ambiental,<sup>3</sup> con la finalidad de que los involucrados identifiquen los elementos que limitan o fortalecen el cumplimiento de los objetivos.

<sup>3</sup> A pesar de la incertidumbre que existe en el proceso que relaciona las emisiones con la concentración de los contaminantes en la atmósfera.

La evaluación que se propone en este programa es de carácter integral y periódica, por medio de indicadores básicos que incorporen las vertientes económica, social y ambiental. De esta forma se agiliza el proceso de difusión y comprensión por parte de la población, ya que una sociedad informada tiene una participación decidida y efectiva. Las características de estos indicadores son:

- Conformar un grupo consistente de indicadores o atributos para la comparación de políticas.
- Reflejar los resultados de diferentes combinaciones de opciones.
- Incorporar interacciones de diversas actividades dentro de diferentes sistemas o herramientas que apoyan la evaluación.

Los indicadores deben atender situaciones como la concentración de los contaminantes, la reducción de emisiones en las fuentes, los efectos en la salud, e impactos sociales y económicos.

**Indicadores de calidad del aire.** Se elaboran con base en los criterios que establecen las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental y en el caso de las partículas pueden considerarse sus propiedades químicas (composición) o físicas (dispersión y absorción de la luz).

**Indicadores de salud.** Se elaboran con base a criterios para la evaluación de riesgos a la salud humana, por lo que se proponen entre otros: visitas a la sala de emergencia, días de actividad restringida, efectos en asmáticos, morbilidad asociada con padecimientos crónicos (bronquitis, tos crónica) y mortalidad asociada con enfermedades crónicas o agudas.

**Indicadores sociales y económicos.** Se construyen integrando variables como la percepción y participación social, el riesgo ambiental, la comunicación ambiental y el gasto público para atender enfermedades asociadas a la contaminación atmosférica; deben integrarse las necesidades de la población (gastos y necesidades) con el propósito de que cada usuario del ambiente module su conducta y que el problema de la calidad del aire sea algo incorporado en la selección cotidiana de opciones que confronta todo individuo o empresa.

En el Proaire 2002-2010 también se menciona la importancia de indicadores que de manera rápida y fácil, muestren el efecto que causa la contaminación atmosférica sobre el conjunto de la población que habita la ZMVM, por ejemplo:

- Porcentaje de individuos con exposición a  $O_3$  y  $PM_{10}$ , que disminuyen su actividad laboral.
- Porcentaje de individuos con exposición a  $O_3$  y  $PM_{10}$ , que se ausentan de la escuela.
- Numero de días al año en que se cumplen las NOMs de  $O_3$  y  $PM_{10}$ .
- Número de días con contingencias ambientales por  $O_3$  y  $PM_{10}$ .
- Inversión pública y privada en el sector salud para atender enfermedades asociadas con la contaminación atmosférica.
- Población de la ZMVM beneficiada por la aplicación de las medidas del Proaire 2002-2010.

## 2 HISTORIA DEL MONITOREO ATMOSFÉRICO EN LA ZMVM

El propósito de este capítulo es presentar la información histórica acerca del monitoreo atmosférico en la Ciudad de México, sobre todo la que documenta las iniciativas que sentaron las bases de la red de monitoreo que se opera en la actualidad. Un aporte adicional es la incorporación de iniciativas e ideas para su desarrollo en el futuro, las cuales derivan de la experiencia del SIMAT y de los comentarios que se realizaron en el Foro de Monitoreo Atmosférico en abril de 2006.

### 2.1 El inicio del monitoreo atmosférico en la ZMVM

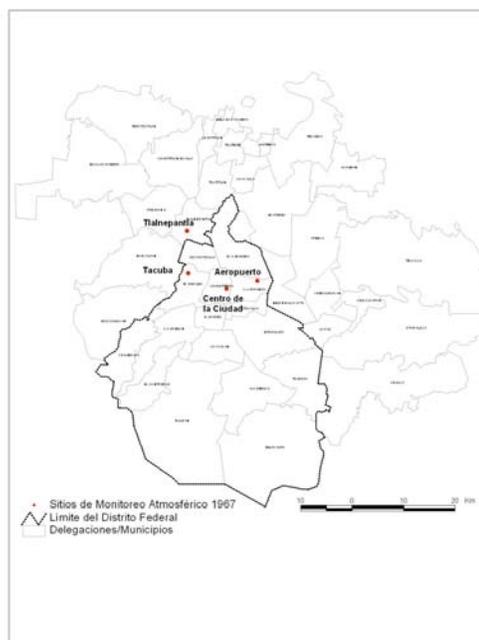
La información disponible muestra que las primeras investigaciones para determinar los niveles de contaminación atmosférica, así como la creación de la primera institución y marco legal del país, se realizaron a finales de la década de los 50. En estas investigaciones se empleaban como indicadores la visibilidad, la acidez, las partículas suspendidas totales y las partículas sedimentables (SEDUE, 1987; SEMARNAT, 2004).

En 1958, el entonces Departamento de Higiene Ocupacional de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, inició la medición de la calidad del aire en la Ciudad de México, aunque poco se rescató de este esfuerzo. Posteriormente, en 1966 la Dirección General de Higiene Industrial inició formalmente investigaciones sobre contaminación atmosférica, para lo cual integró en el mismo año la primera red de monitoreo con 4 estaciones dotadas con equipos manuales para medir dióxido de azufre, partículas suspendidas, polvo sedimentable y acidez. Las estaciones se localizaron en Tlalnepantla, el Aeropuerto, el Centro de la Ciudad y Tacuba (Mapa 1).

Con esta estructura institucional y la intervención de movimientos ecologistas, en 1968 el gobierno mexicano participó en la Reunión Internacional sobre el Medio Ambiente Humano, organizada por las Naciones Unidas, con el objetivo de promover la toma de decisiones para prevenir y controlar la contaminación del aire.

Entre 1967 y 1973, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) realizó un programa de monitoreo regional, que permitió la integración de 88 estaciones en 26 ciudades de 14 países. Esta red se denominó "Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire" (SEDUE, 1987; PNUMA, 2004).

**Mapa 1. Red de Monitoreo, 1966**



Derivado de esta iniciativa de la OPS, en la Ciudad de México se instalaron 10 estaciones de monitoreo para medir dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), partículas suspendidas, polvo sedimentable y acidez del agua de lluvia. Éstas se integraron con las 4 estaciones ya existentes, sumando así 14 estaciones (Mapa 2) equipadas de la siguiente forma:

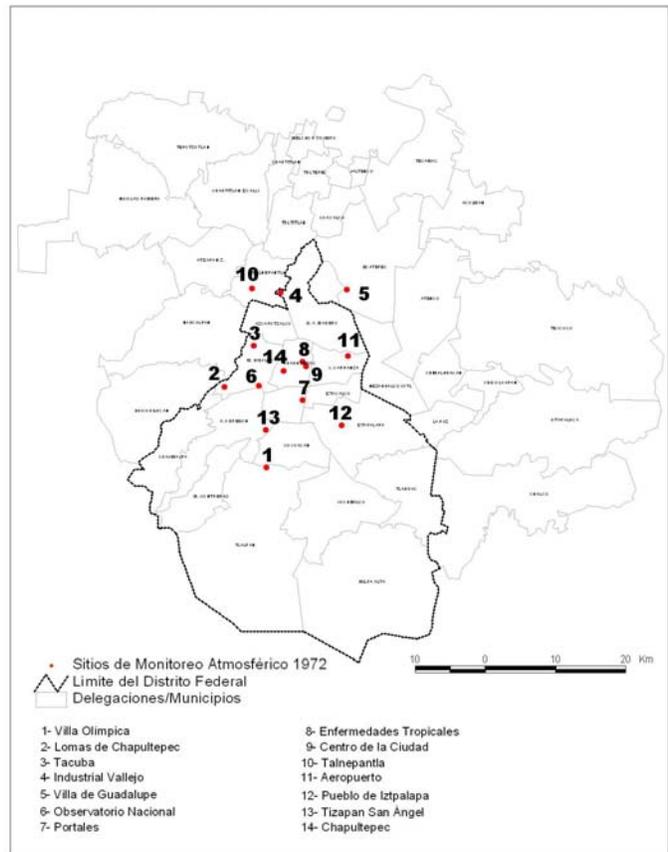
Parámetro	Principio de operación
• Dióxido de Azufre	Peróxido de hidrógeno
• Partículas suspendidas	Reflectrometría
• Polvo sedimentable	Método de jarras
• Acidez	Agua oxigenada

La operación de esta red se modificó en 1972, ya que el método de medición de reflectrometría estaba diseñado para el tipo de contaminación de la Ciudad de Londres (contaminación por partículas de carbón) y no era adecuado para las condiciones de la Ciudad de México<sup>4</sup>.

La determinación del SO<sub>2</sub> se cambió por el método de pararrosanilina y las partículas suspendidas por análisis gravimétrico, conforme su empleo por parte de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, por sus siglas en inglés) y se suspendió la cuantificación de acidez (SEDUE, 1987; Sánchez, 1999).

En 1973 el gobierno mexicano y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), iniciaron un programa conjunto de protección ambiental. En el apartado de contaminación atmosférica, se establecía la adquisición gradual de 48 equipos automáticos de monitoreo, de los cuales 22 se instalaron en la Ciudad de México y el resto en otros estados de la República Mexicana. Esta red se denominó "Red Computarizada Automática de Monitoreo Atmosférico del Valle de México" o "Red Philips" (por la marca de los equipos); con algunos de estos equipos se reforzaron las 14 estaciones que existían antes (Mapa 3).

**Mapa 2. Red Panamericana de Muestreo Normalizado, 1967**

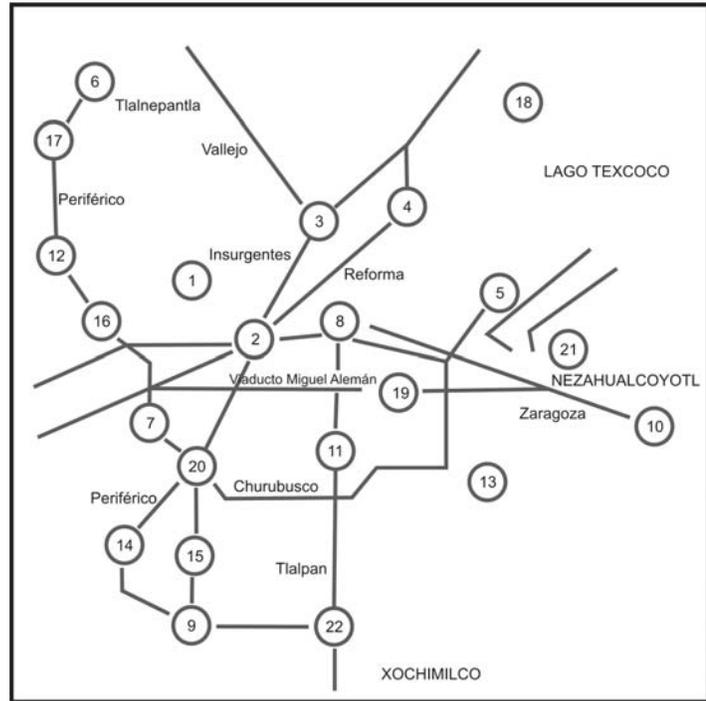


<sup>4</sup> Comunicación personal del Dr. Humberto Bravo Álvarez, Investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

Las estaciones de esta red tuvieron muestreadores de alto volumen (Hi-Vol, por sus siglas en inglés) para determinar partículas suspendidas totales (PST) y burbujeadores de gases para determinar  $\text{SO}_2$ , ozono ( $\text{O}_3$ ) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ).

Con la introducción de equipos automáticos fue posible realizar mediciones continuas de gases y parámetros meteorológicos, y transmitirlos a un centro receptor de datos donde se procesaban para elaborar un reporte diario.

**Mapa 3. Localización de estaciones Red Philips – Programa PNUD, 1973**



Fuente: SEDUE, 1988

Los métodos de determinación de los equipos automáticos eran coulométrico para monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), y quimioluminiscente para el  $\text{O}_3$ . En 5 de las estaciones se instalaron equipos para medir velocidad y dirección del viento, humedad relativa y temperatura ambiente. Además contaba con estaciones móviles equipadas con equipos para medir meteorología,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  y polvo (SEDUE, 1987; Sánchez, 1999).

La falta de presupuesto y de un programa de aseguramiento y control de calidad que garantizara la confiabilidad de los datos generados, además de un suministro inadecuado de refacciones y consumibles, provocó que la Red Philips dejara de operar continuamente en 1978 y se abandonara en 1980 (Bravo, 1987; SEMARNAT, 2004).

**Entre las iniciativas de investigación, destaca la instalación en 1976 de la estación de monitoreo de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), cuyos registros permitieron que el Dr. Humberto Bravo Álvarez describiera el ciclo fotoquímico del  $\text{O}_3$  en la Ciudad de México.**

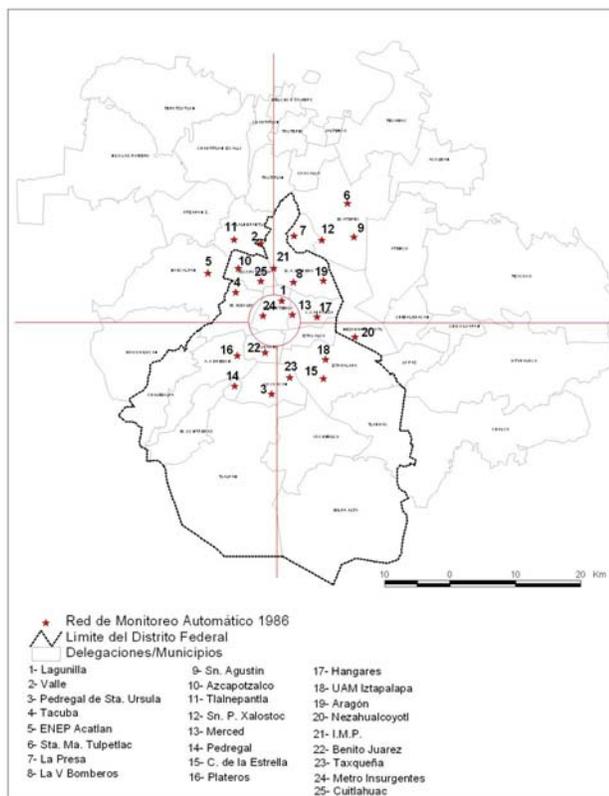
## 2.2 Crecimiento y expansión del monitoreo atmosférico en la ZMVM

Castillejos (2006) señala en el Programa Coordinado para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1979 – 1982, que “ las redes de monitoreo de contaminantes y meteorología que estaban en operación, debían optimizarse y extenderse para cubrir la totalidad del área requerida del Valle de

México y la zona de influencia, para vigilar la calidad del aire y proteger la salud de sus habitantes, y permitir la instrumentación oportuna de las acciones de atención a emergencias”. A este tipo de argumentos, se adiciona la promulgación del PND en 1983 que expresa la necesidad de contar con una red de monitoreo.

En enero 1986 se inició la operación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) con 25 estaciones y equipos automáticos para medir CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y óxidos de nitrógeno (NOx), y equipos manuales para partículas suspendidas totales (PST) y su contenido de plomo (Pb); de estas estaciones, 19 se localizaron en el Distrito Federal y 6 en el Estado de México (Mapa 4). En 10 de estas estaciones se instalaron equipos para medir temperatura ambiente (TMP), humedad relativa (HR), dirección y velocidad del viento (WDR y WSP) (Sánchez, 1999).

**Mapa 4. Distribución de estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, 1986.**



**El primer registro horario de la RAMA ocurrió el 8 de enero de 1986, cuando se registró una concentración de 15.4 ppm de CO en la estación Cuitláhuac.**

La operación de la RAMA era responsabilidad de la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). Su diseño y selección de equipos se basó en los criterios establecidos por la USEPA, aunque se experimentó con equipos de Japón y Alemania. La información generada por la RAMA se centralizaba en un centro de proceso, almacenaje y generación de reportes de la calidad del aire (Sánchez, 1999).

Entre los proyectos que fortalecieron al monitoreo atmosférico se destaca el Programa de Precipitaciones Ácidas en la ZMVM, el cual inició en 1987 con el propósito de caracterizar el potencial hidrógeno y el contenido de sulfato, nitrato, cloruro, sodio, calcio, magnesio y potasio en el agua de lluvia colectada en 4 estaciones de monitoreo equipadas con colectores convencionales que constan de un embudo acoplado a un recipiente (Foto 1). Este embudo capta el depósito húmedo y el depósito seco de contaminantes durante un período de muestreo y los conduce al recipiente. La muestra final que contiene los depósitos mezclados se conoce como depósito total (GDF,1996; SEMARNAT, 2004).

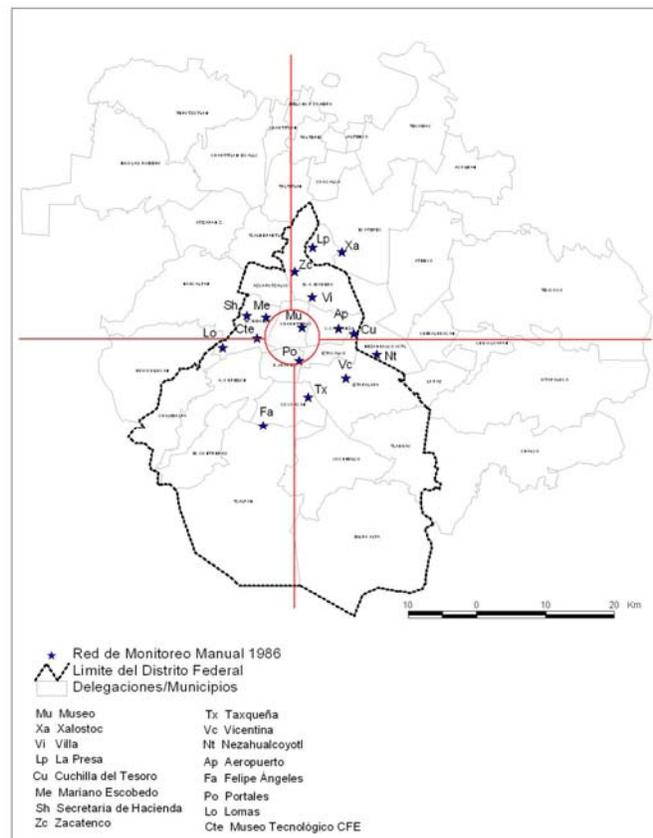
**Foto 1. Colector convencional**



En este año también se inició el desarrollo de un programa para el biomonitoreo de plantas de tabaco para evaluar el daño causado por el O<sub>3</sub> (SEDUE, 1988).

La expansión de la RAMA ocurrió como un proceso gradual, en 1988 aumentó a 19 el número de sus estaciones con equipo manual y se incluyó la medición manual de partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) y su contenido de Pb (Mapa 5).

**Mapa 5. Distribución de estaciones de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico, 1988.**



En 1991 se aumentó a 32 el número de estaciones con equipos automáticos (Mapa 6), con el objeto de evaluar la interacción y formación de contaminantes secundarios (O<sub>3</sub>) y primarios (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y partículas). En éste sentido, se instalaron nuevos equipos para medir óxido nítrico (NO)/NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, hidrocarburos totales (TCH) y CO (SEDUE, 1991).

A partir de este año se inició el registro de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

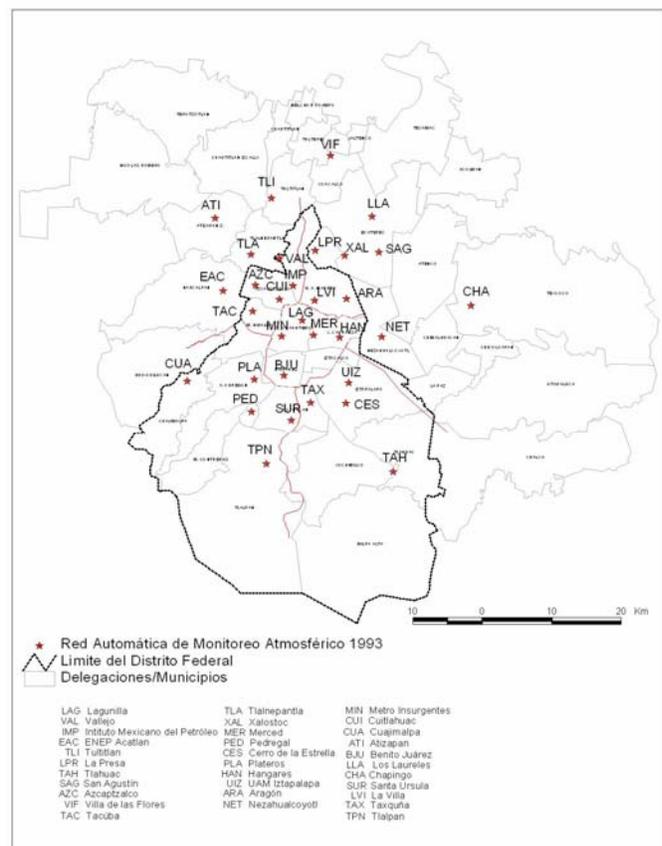
También se documenta la adquisición de una unidad móvil para medir concentraciones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, TCH, O<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub> y parámetros meteorológicos (WDR y WSP, TMP, HR y radiación solar), así como un radar para la medición del viento en una altura que oscila entre 250 y 3000 m y la medición de temperatura a una altura entre 150 y 1500 m, y un sodar para medir el perfil vertical del viento a una altura entre 20 y 300 m (SEDUE, 1991).

**En la expansión de la RAMA de 1991, se instalaron 3 estaciones en la periferia del Distrito Federal (CUA, TPN y TAH) y 4 en municipios del Estado de México (CHA, VIF, ATI y TLI) (CMPCCAVM, 1993)**

En enero de 1993 la Dirección General de Ecología del entonces Departamento del Distrito Federal (DDF) asume la responsabilidad de operar la RAMA e inicia pruebas para medir las PM<sub>10</sub> con equipos automáticos en 10 estaciones. En 1995 se inició su medición y en junio del 2000 se aumenta a 16 estaciones el número de equipos.

En este año se adquirieron 2 espectrómetros diferenciales de absorción óptica (DOAS, por sus siglas en inglés) para realizar el monitoreo de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, ácido nitroso, benceno, tolueno, p-xileno y formaldehído; con el propósito de mejorar la comprensión del comportamiento de los precursores del O<sub>3</sub> y su asociación a las fuentes de emisión. Estos equipos determinan las absorciones del espectro electromagnético que son proporcionales a la concentración de los contaminantes existentes.

**Mapa 6. Ampliación de la RAMA, 1993**



Durante esa administración, el DDF contempló la ampliación de la RAMA a zonas perimetrales de la mancha urbana identificadas con fuentes de emisión significativas, como es el corredor Tula-Vito-Apasco, así como zonas potencialmente receptoras, como el corredor biológico Ajusco-Chichinautzin. De esta forma se pensaban tener 37 estaciones con equipos automáticos, 19 con equipos manuales, 10 con equipos de meteorología y 2 unidades móviles, sin embargo este proyecto no se concretó (CMPCCAVM, 1994 y 1995).

Entre 1997 y 1999 se lleva a cabo la instalación de colectores semiautomáticos (Foto 2) y se diseña una red para el monitoreo de lluvia ácida con 16 estaciones. Estos equipos cuentan con un mecanismo controlado por un sensor eléctrico que permite el muestreo de los depósitos húmedo y seco en recipientes separados; cuando se presenta un evento de precipitación se descubre el recipiente de depósito húmedo y se tapa el de depósito seco, cuando deja de llover ocurre lo contrario. De esta forma es posible obtener registros de pH, conductividad eléctrica, sulfato y nitrato.

**Foto 2. Colector semiautomático**



La forma en que operan estos equipos evita que las muestras se contaminen de impurezas o que pierdan volumen a causa de la evaporación; en consecuencia, la determinación de propiedades y compuestos es más precisa y garantiza una mejor caracterización del agua de lluvia.

En 1996 la Dirección General de Proyectos Ambientales de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del DDF, firma un convenio con el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores Campus Monterrey (ITESM), con el objetivo de implantar el Sistema de Monitoreo de Radiación Solar Ultravioleta (UV). En este convenio se estableció que la SMA obtendría los registros de radiación y el ITESM se encargaría de la instalación, operación y calibración de los equipos. En febrero de 1997 se inicia la operación de la estación prototipo Tecnológico de Monterrey (TEM) y el envío de información de radiación UV tipo B. En julio de 1998 se instalaron 10 equipos más y se solicita al Instituto de Geofísica (IGEOF) de la UNAM un diagnóstico de los mismos. Entre sus recomendaciones se encuentran: revisión de procedimientos, reubicación de equipos, supervisión de instalaciones, mantenimiento y calibración de los equipos. En 1999 se firma un convenio entre el Gobierno del Distrito Federal (GDF) y la UNAM, facultándose al IGEOF para mantener, instalar, operar y calibrar los equipos en 8 estaciones.

En junio del año 2000 se aumentó a 15 el número de estaciones para el monitoreo de parámetros meteorológicos.

### **2.3 El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México - SIMAT**

En diciembre del año 2000 la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, inicia la integración del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), con la finalidad de unificar los esfuerzos destinados a la medición de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos. Uno de los aspectos centrales de esta iniciativa fue la intención de unificar y homologar los procedimientos para el monitoreo, adquisición, transmisión, validación y difusión de la

información bajo un esquema de mejora continua basado en los Sistemas de Gestión de la Calidad - Norma ISO 9001:2000.

**El SIMAT tiene la misión de vigilar y evaluar el estado de la calidad del aire, con el propósito de informar oportunamente a los habitantes y fortalecer la toma de decisiones en programas de prevención y mejoramiento de la calidad del aire.**

A fin de determinar las concentraciones de las partículas finas en suspensión, en 2001 se desarrolló el proyecto "Diseño, instalación y operación de la Red de Monitoreo de Partículas Menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>)", el cual se financió con recursos del Fideicomiso Ambiental Metropolitano. Este proyecto contó con la colaboración del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

Para la selección de los sitios donde se ubicaron las estaciones de monitoreo de la red de PM<sub>2.5</sub>, se realizaron durante un año muestreos con equipos manuales en 80 puntos potenciales de la ZMVM, cada uno con 5 repeticiones. De esta manera se evaluó la variación espacial y temporal de las PM<sub>2.5</sub> en la ZMVM, y se determinaron sitios representativos en términos del riesgo a la salud pública y cobertura espacial.

**Un aspecto importante del proyecto "Diseño de la Red de Monitoreo de PM<sub>2.5</sub>" fue la evaluación del desempeño de 2 equipos de monitoreo automático, los cuales reducen la pérdida de material semivolátil, y la evaluación de 2 equipos manuales de referencia.**

En agosto de 2003 se inauguró formalmente la operación de la Red de Monitoreo de PM<sub>2.5</sub>, con 8 estaciones dotadas con equipos automáticos y 7 con equipo manual. Estas estaciones se integraron a la RAMA y la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA).

**Con la instalación equipos automáticos y manuales de PM<sub>2.5</sub>, es posible evaluar la precisión y exactitud de las mediciones, así como determinar su composición mediante el análisis de las muestras.**

Actualmente, el SIMAT se integra con los siguientes subsistemas o redes de monitoreo:

Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) – Aporta registros minuto a minuto de O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, y con la información que provee se genera el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).

Red Meteorológica (REDMET) – Aporta registros minuto a minuto de humedad relativa, temperatura ambiente, presión barométrica, dirección y velocidad del viento, presión barométrica, radiación fotosintéticamente activa, radiación global, radiación solar UV-A y UV-B.

Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) – Aporta muestreos de 24 horas de partículas suspendidas (PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), sulfatos, nitratos y metales pesados. Con la información que provee se evalúa el cumplimiento de las normas de salud de partículas suspendidas.

Red de Depósito Atmosférico (REDDA) – Se conoce también como Red de Lluvia Ácida, aporta muestras de depósito seco y húmedo (agua de lluvia) para determinar: acidez, conductividad, sulfato, nitrato, cloruro, carbonato, amonio, sodio, calcio, magnesio, potasio y metales pesados.

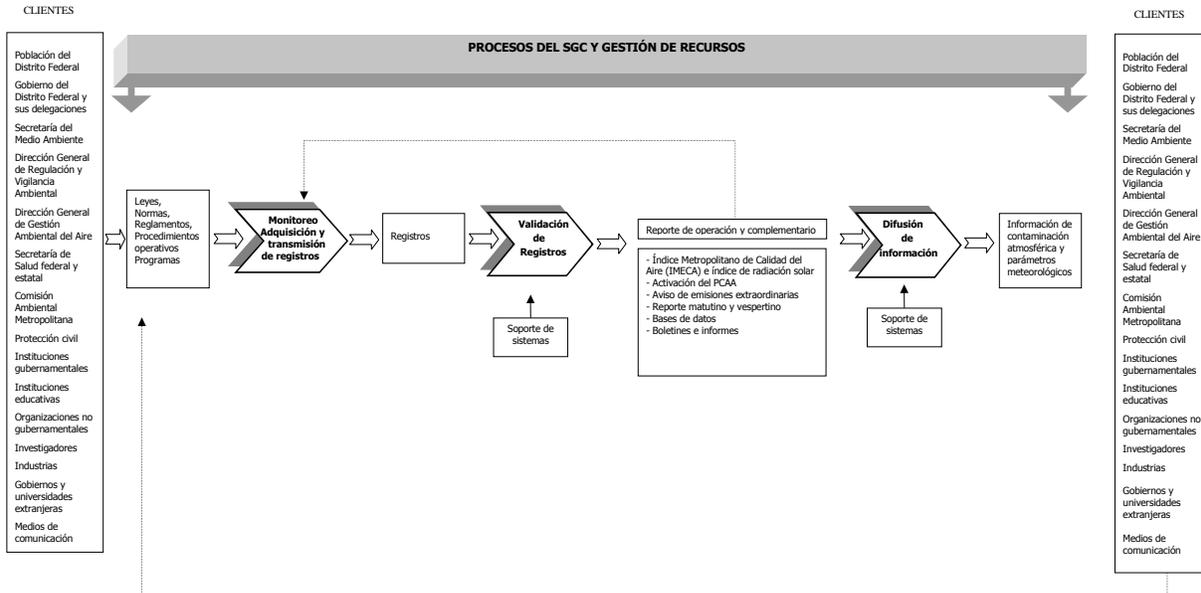
### **2.3.1 Plan de mejora continua del SIMAT**

La instrumentación de un plan de mejora continua basado en la Norma ISO 9001:2000, es una actividad que se ha realizado gradualmente en el SIMAT y aunque no se ha logrado llevar a cabo una auditoria de certificación, es importante documentar los logros obtenidos y los obstáculos enfrentados. Como se mencionó antes, esta estrategia garantiza la calidad de los productos y servicios que ofrece el SIMAT, conforme a las especificaciones técnicas y normativas vigentes.

El objetivo de certificación comprende el proceso de monitoreo – adquisición – transmisión – validación – difusión, de los registros del SIMAT (Figura 1). Los avances logrados hasta junio del año 2006 son:

- Elementos de planeación (misión, visión y política y objetivos de calidad)
- Diseño de la implantación del Sistema de Gestión de la Calidad
- Definición y delimitación de responsabilidades
- Identificación, documentación e interrelación de los procesos
- Documentación de los procedimientos generales según la Norma Internacional ISO 9001:2000
- Documentación del procedimientos operativos
- Difusión interna
- Planteamiento de los objetivos e indicadores por proceso
- Documentación del manual de calidad y planes de calidad
- Formación de equipos y capacitación interna
- Planteamiento y cierre de acciones correctivas

**Figura 1. Proceso para la obtención y difusión de registros del SIMAT.**



### 2.3.2 Subproceso de monitoreo

La operación de los equipos de monitoreo del SIMAT se realiza conforme los lineamientos que establecen las Normas Oficiales Mexicanas y organismos como la USEPA. Se cuenta con un programa preventivo y correctivo que opera diariamente, mediante el cual es posible garantizar la correcta operación de estos equipos y la confiabilidad de sus registros. También se ha dispuesto de un programa de auditorías internas como parte del aseguramiento de la calidad y se pretende que sea una herramienta administrativa y técnica para evaluar la efectividad de las actividades realizadas en la operación de los instrumentos y equipos, y que provea las bases para establecer acciones correctivas cuando se descubren deficiencias en cualquiera de las etapas del monitoreo.

Los principios de operación de los equipos con que cuenta cada uno de los subsistemas del SIMAT al momento de realizar este informe se detalla a continuación:

**Tabla 1. Principios de operación de los equipos de la RAMA**

contaminante	principio de operación
O <sub>3</sub>	Fotometría ultravioleta
NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	Quimiluminiscencia
SO <sub>2</sub>	Fluorescencia pulsante
CO	Espectroscopia no dispersiva por correlación de filtro gaseoso
PM <sub>10</sub>	Balanza de oscilación (TEOM)
PM <sub>2.5</sub>	Atenuación de radiación beta y balanza de oscilación (TEOM)

#### Laboratorio de transferencia de estándares

En el año 2005 el SIMAT concluyó la integración de este laboratorio, lo que permite aplicar estándares primarios para la certificación de los estándares de transferencia. En la certificación se emplea un esquema de 6 x 6 (6 verificaciones no continuas con 6 puntos de calibración).

El laboratorio cuenta con un estándar primario de ozono verificado contra el estándar de referencia de la Región 6 de la USEPA en Houston, Texas. Para CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, cuenta con mezclas trazables del NIST (National Institute of Standards and Technology) que se actualizan anualmente (Retama H. A., 2006).

**Tabla 2. Principios de operación de los equipos de la REDMET**

parámetro	principio de operación
WSP	Anemómetro convencional
WDR	Veleta convencional
TMP	Termistor
HR	Sensor tipo capacitor
Presión barométrica	Transductor de estado sólido
Radiación solar UV-B	Radiómetro

Es importante señalar que en junio del año 2001 el SIMAT concluyó la operación de los 2 equipos que registraban H<sub>2</sub>S. Algunos aspectos pendientes de revisar en el desempeño de los equipos de radiación solar, fueron la calibración, instalación y adquisición de datos, y la reubicación de algunas estaciones.

**Tabla 3. Principios de operación de los equipos de la REDMA y método para la determinación de metales pesados**

parámetro	principio / método
PST	Alto volumen / gravimetría
PM <sub>10</sub>	Alto volumen / gravimetría
PM <sub>2.5</sub>	Alto volumen / gravimetría
Sulfatos y Nitratos	Química Húmeda
Pb, Cadmio, Cobre, Hierro, Vanadio, Manganeso y Níquel	Absorción Atómica

#### Laboratorio de gravimetría

En el año 2005 el SIMAT puso en marcha un laboratorio de gravimetría, que permite controlar de mejor manera la calidad de las muestras de partículas colectadas. En la actualidad se analizan anualmente por estación de monitoreo, cerca de 61 muestras de cada tipo de partículas (PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>).

Los cuartos de pesado permiten controlar adecuadamente la temperatura y la humedad, evitando así la pérdida de muestras.

**Tabla 4. Técnicas para determinar parámetros obtenidos de las muestras de la REDDA**

depósito húmedo		
parámetro	técnica de análisis	
Volumen	Volumétrica	
Potencial de Hidrógeno (pH)	Electrométrico	
Conductancia específica	Conductímetro digital	
Acidez	Titulación	
Alcalinidad	Titulación	
Aniones (sulfatos, nitratos, cloruros)	Cromatografía de líquidos	
Cationes	Amonio	Electrodo selectivo de amoniaco
	Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio	Espectrofotometría de absorción atómica de flama
Metales pesados: Cadmio, Cobre, Hierro, Plomo y Zinc	Espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito acoplado	

depósito seco	
parámetro	técnica de análisis
Bario, Potasio, Calcio, Hierro, Manganeso, Plomo, Selenio, Titanio, Zinc	Barrido por fluorescencia de rayos X

### **Unidad Móvil de Monitoreo Atmosférico**

**El SIMAT continúa operando una Unidad Móvil de Monitoreo Atmosférico, para el desarrollo de proyectos de investigación y campañas especiales. Entre las instituciones apoyadas recientemente destacan: Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Mario Molina, Gobierno del Estado de Oaxaca, Gobierno del Estado de México.**

#### **2.3.2.1 Evaluación de representatividad de las estaciones del SIMAT**

Al momento de integrar el SIMAT, una de las necesidades primordiales que se consideraron fue la evaluación de la representatividad espacial<sup>5</sup> de sus estaciones de monitoreo, debido a que algunas tenían más de 20 años en operación y se desconocía la situación de su entorno físico.

Este tipo de diagnósticos es recomendado por la USEPA y la Organización Mundial de la Salud (OMS), con el propósito de modificar, suprimir, reubicar o establecer nuevas estaciones (EPA, 1998; WHO, 1980). De esta forma se diseñó un protocolo para evaluar el entorno físico y la representación espacial de cada estación, con base en criterios definidos a partir del Título 40 del Código Federal de Regulaciones de los Estados Unidos (40 CFR, por sus siglas en inglés).

Este trabajo se realizó en el año 2001 y se recomienda llevar a cabo este tipo de evaluaciones cada 2 años, debido a los cambios físicos que se presentan en el entorno las estaciones de monitoreo y al crecimiento de la mancha urbana.

**La evaluación de las estaciones Taxqueña (TAX) y Metro Insurgentes (MIN), indica que ambas están bien ubicadas físicamente, si embargo su escala de representación espacial es "MICRO", por lo que se califican como "no cumple" con los propósitos del SIMAT y se recomienda ampliar los objetivos de este sistema para evaluar exposición directa de las personas por medio de este tipo de estaciones.**

**En las estaciones Benito Juárez (BJU) y Cuitlahuac (CUI) se ha modificado el entorno físico, de tal forma que presentan obstáculos que inciden en la obtención de los registros y que no pueden modificarse o retirarse. Por esta razón se califican como "no cumple" y se recomienda que dejen de operar o reubicarse si fuera necesario.**

#### **2.3.2.2 Evaluación de redundancia de los registros del SIMAT**

Otra de las necesidades consideradas prioritarias al integrar el SIMAT, fue evaluar la redundancia<sup>6</sup> en las mediciones de algunos contaminantes, sobre todo aquellos que presentan concentraciones bajas y que se consideran bajo control. Este tipo de iniciativa garantiza la eficiencia de una red de monitoreo en términos de la representatividad de los registros que obtiene, y evitar gastos innecesarios de operación y mantenimiento.

<sup>5</sup> La representatividad es la medida en la que un dato describe las características de su población, en función de los procesos de emisión y las características ambientales de la región.

<sup>6</sup> Se considera redundante una estación que presenta registros de igual magnitud o patrón similar de otra estación

En una etapa preliminar el SIMAT llevo a cabo la evaluación de redundancia de los registros de CO y SO<sub>2</sub>. En junio del año 2006 se llevaron a cabo las recomendaciones para CO, y aún está pendiente la instrumentación de las recomendaciones para SO<sub>2</sub>, en virtud del registro ocasional de valores horarios altos. Este tipo de evaluación debe realizarse continuamente, sobre todo ante la pertinencia de proporcionar información representativa y abatir costos.

**El primero de junio del año 2006, se retiraron los equipos de monitoreo de CO en las estaciones Cuitlahuac (CUI), Azcapotzalco (AZC), Cerro de la Estrella (CES), Aragón (ARA) y Atizapan (ATI), como resultado del análisis de redundancia de sus registros.**

### 2.3.2.3 Evaluación del desempeño de los monitores de gases contaminantes

Al estructurarse el SIMAT se afrontó la necesidad de validar y transparentar sus procesos, por lo que continuó manteniendo la colaboración con la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés) y la Organización Panamericana de la salud (OPS), para llevar a cabo auditorias del desempeño de los equipos de monitoreo.

**Tabla 5. Auditorias realizadas a los equipos de monitoreo del SIMAT**

año	auditor	institución	equipos auditados	resultados
1995	Willie T. Mcleod	USEPA	60	operación al 95% 8 monitores con un mal desempeño
06 / 1996	Willie T. Mcleod	USEPA	57	6 monitores con un mal desempeño
10 / 1999	Willie T. Mcleod	USEPA	84 (19 de O <sub>3</sub> , 21 de NO <sub>2</sub> , 21 de CO, 21 de SO <sub>2</sub> y 2 de H <sub>2</sub> S)	Solo un monitor de SO <sub>2</sub> con mal desempeño
10 / 2000	Maribel Colón, John Duncan	USEPA	55 (14 de O <sub>3</sub> , 14 de NO <sub>2</sub> , 14 de CO y 13 de SO <sub>2</sub> )	Operación satisfactoria de monitores Definidos como viejos Personal capacitado
11 / 2003	Mark Shanis, Mathew Plate	USEPA		El SIMAT proporciona registros exactos y está bien implementado Los registros de O <sub>3</sub> son de calidad excepcional Los registros de NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> y CO son de calidad aceptable
04 / 2005	Mark Shanis	USEPA	62 (16 de O <sub>3</sub> , 15 de NO <sub>2</sub> , 15 de CO y 16 de SO <sub>2</sub> )	Los equipos de O <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> y CO operan en condiciones aceptables. La operación de los equipos de SO <sub>2</sub> está ligeramente fuera del error de tolerancia.

Para llevar a cabo la más reciente auditoria, el personal de la USEPA usó la metodología del Programa Nacional de Auditorías de Desempeño (NPAP, por sus siglas en inglés), el cual cuenta con un sistema más riguroso que el instrumentado antes en la RAMA. Uno de sus resultados más sobresalientes fue la recomendación de revisar el diseño del SIMAT con la posibilidad de reducir el número de estaciones de contaminantes que no exceden las normas de calidad del aire e incrementar y/o reubicar estaciones de monitoreo de O<sub>3</sub> en respuesta al incremento urbano.

**Una auditoria es una evaluación sistemática y objetiva de un proyecto para determinar si los procedimientos se aplican de manera efectiva. Los resultados de una auditoria proveen información para mejorar los procesos.**

#### **2.3.2.4 Evaluación del desempeño de los monitores de partículas suspendidas**

En el caso de los equipos de monitoreo de partículas, el SIMAT cuenta con un programa interno para auditar su desempeño. Los procedimientos del mismo se desarrollan con base a los procedimientos técnicos del SIMAT, los requisitos y fundamentos descritos en el manual del fabricante, y las referencias de la USEPA. Los aspectos técnicos que se evalúan en esta auditoria fueron: condiciones físicas de operación, parámetros de operación (temperatura y presión), flujo volumétrico y masa.

Los resultados de la auditoria de desempeño realizada entre enero y mayo del 2006, indican que los equipos de monitoreo<sup>7</sup> de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> tienen un "buen desempeño" en campo, al no encontrarse desviaciones significativas de los intervalos de tolerancia de cada parámetro evaluado, no obstante se recomienda llevar a cabo una auditoría que incorpore aspectos de documentación, registros, calibración y mantenimiento (GDF-SMA, 2006).

#### **2.3.2.5 Evaluación de desempeño de los monitores automáticos de partículas**

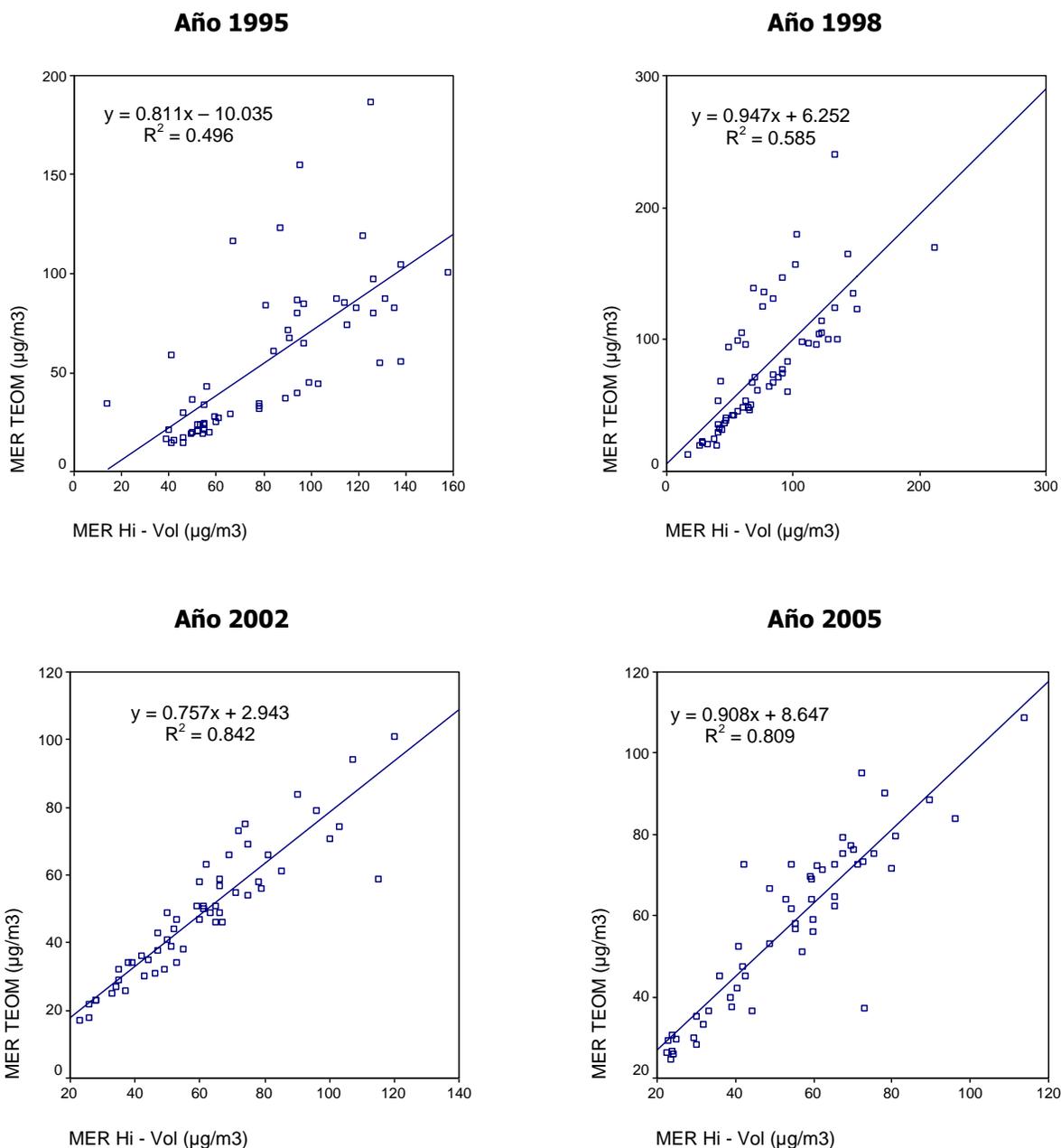
La medición de PM<sub>10</sub> se realiza en la ZMVM desde 1986 con muestreadores de alto volumen y en 1995 se inició la operación de equipos automáticos (TEOM y Beta). En el año 2001 el SIMAT implementó algunas acciones para mejorar la calidad de la operación de los equipos de PM<sub>10</sub>. Dentro de éstas destaca la reducción de la temperatura de operación de 50° a 35° C, con el propósito minimizar la pérdida de material volátil presente en la muestra de partículas (GDF-SMA, 2006).

Los resultados del análisis de comparación<sup>8</sup> indica una mayor correlación entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> registradas con ambos tipos de equipo en 2002 y 2005 (Gráfica 1), esto permite comparar los resultados obtenidos y la confiabilidad de los registros, sin olvidar que los equipos manuales operan como método de referencia.

<sup>7</sup> Se auditaron los 22 equipos de monitoreo automáticos o continuos, y 8 equipos manuales.

<sup>8</sup> El análisis se realizó por medio de regresión lineal obteniendo los parámetros de R<sup>2</sup>, pendiente y ordenada al origen. La R<sup>2</sup> representa qué tan bueno es el modelo para explicar la variable dependiente con respecto a las variables del modelo. Mientras más cercano a uno sea, el modelo es mejor.

### Gráfica 1. Comparación de las concentraciones registradas con equipos automáticos y manuales de PM<sub>10</sub>



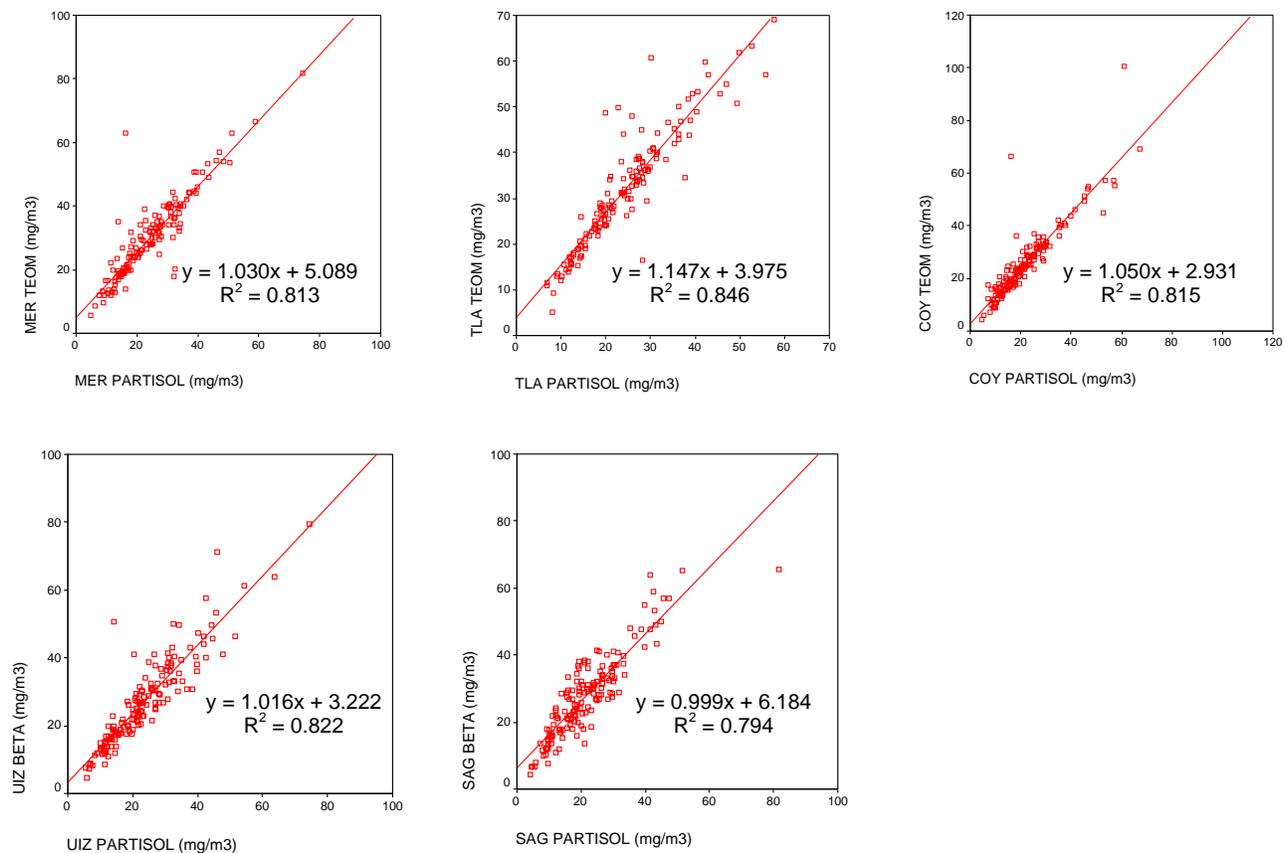
Los resultados del análisis de comparación de los registros de PM<sub>2.5</sub> obtenidos con equipos manuales (bajo volumen) y automáticos (Teom y Beta) en el periodo de agosto de 2003 a mayo de 2006, muestran una buena asociación en general, por lo que se asemeja la magnitud de los registros obtenidos con ambos equipos. Estadísticamente se dice que la correlación entre equipos manuales y automáticos es significativa, ya que su coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 0.8 aproximadamente y la pendiente cercana a 1 (Gráfica 2).

Al revisar la incidencia de las diferencias entre los equipos, se encontró que el 94% de los registros realizados durante el periodo señalado con equipo automático Teom, fueron mayores que los

realizados con equipo manual Partisol, es decir, las mediciones de  $PM_{2.5}$  realizadas con el equipo automático se sobreestimaron con respecto al método de referencia. En el caso de las mediciones realizadas con el equipo automático Beta, el 88% de éstas fueron mayores que las obtenidas con el equipo manual, por lo que también se sobreestimaron las mediciones.

Al nivel de estación de monitoreo, las diferencias entre ambos equipos fueron menores en las estaciones UIZ (Teom-Partisol) y COY (Beta-Partisol), donde la diferencia fue del 15% ( $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 18% ( $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), respectivamente. En las estaciones MER (Teom-Partisol), SAG (Beta-Partisol) y TLA (Teom-Partisol) la diferencia fue del 24% ( $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 28% ( $6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 31% ( $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), respectivamente.

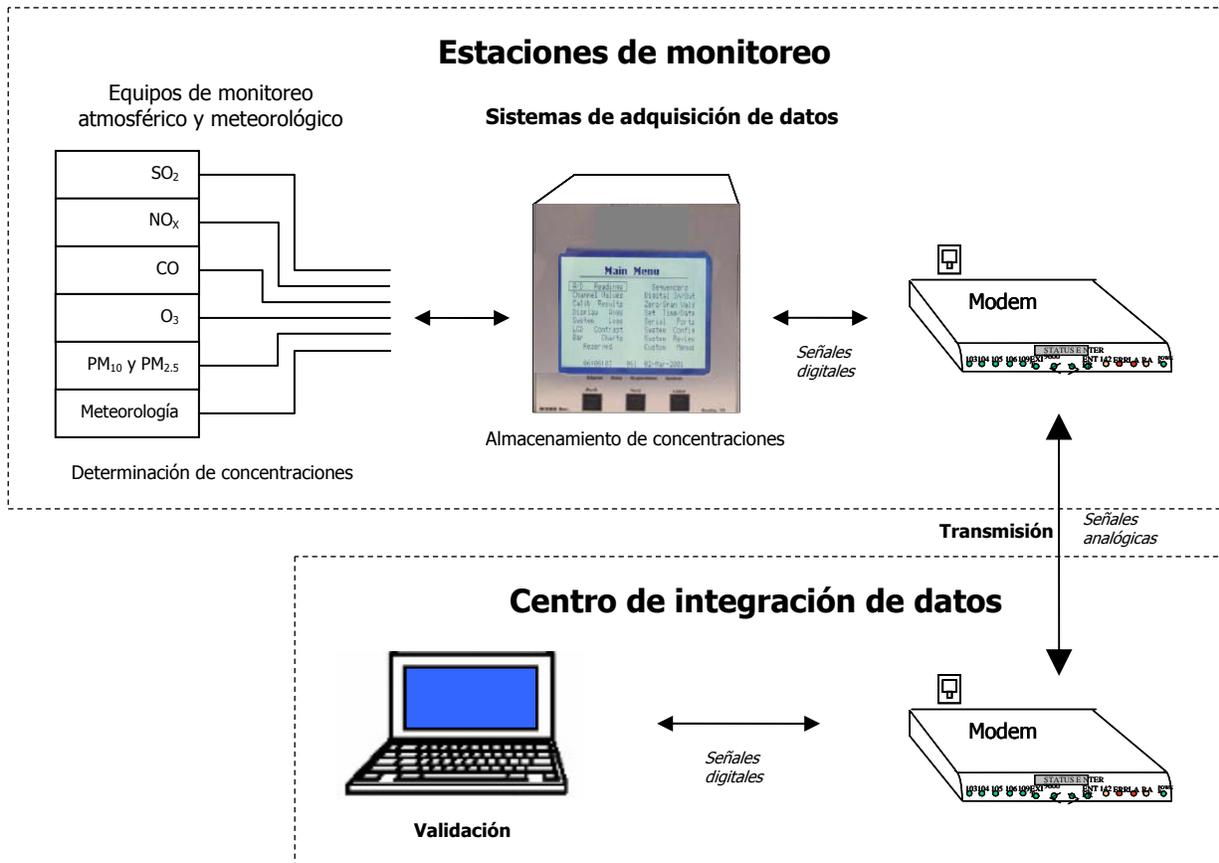
**Gráfica 2. Comparación de las concentraciones registradas con equipos automáticos y manuales  $PM_{2.5}$**



### 2.3.3 Subproceso de adquisición, transmisión y validación de registros

En el SIMAT se llevan a cabo tareas para la adquisición, transmisión y validación de los registros de contaminantes y parámetros meteorológicos obtenidos *in situ* (Figura 2). Las actividades que se realizan en este subproceso también son parte de un plan de mejora continua, lo que permite garantizar su almacenamiento y la identificación de fallas en la operación de los equipos, así como su concentración y almacenamiento.

**Figura 2. Subproceso de adquisición y transmisión de registros del SIMAT**



### 2.3.3.1 Adquisición y transmisión de registros

Los registros de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos que se obtienen en el SIMAT, se almacenan temporalmente en un sistema de adquisición de datos o datalogger, y se transmiten posteriormente a un centro de integración. En el SIMAT se utilizan tres tipos de datalogger que se complementan para la adquisición de registros, estos son:

- Sistema de adquisición de datos tipo PERSIS. Este es el primer sistema que se utilizó para adquirir los registros de gases y parámetros meteorológicos, utiliza un software que está instalado a una computadora personal y que permite observar los registros en forma gráfica y realizar conversiones. La transmisión de registros al centro de integración se realiza de manera automática cada minuto por medio de una línea telefónica privada.
- Sistema de adquisición de datos ODESSA DSM 3260 AQM. Este sistema emplea un software que permite una comunicación bidireccional con una computadora personal. Este sistema realiza cálculos (promedios, promedios móviles) y almacena temporalmente los registros horarios. La transmisión de registros a un centro de integración se realiza de forma manual a través de una línea telefónica privada y se emplea cuando no hay comunicación por medio de los sistemas tipo PERSIS.

- Sistema de adquisición de datos CPP – H2NS. Conforme a lo establecido en el Proaire 2002-20210, el SIMAT ha incorporado gradualmente los sistemas inteligentes de adquisición de datos denominados CPP-H2NS, los cuales permiten diagnosticar a distancia las fallas de operación de los equipos o su configuración, y asigna una amplia variedad de etiquetas que facilitan el diagnóstico de su operación. El CPP-H2NS permite almacenar temporalmente los registros y transmitirlos a un centro de integración cada minuto. Su instalación se inició en agosto del año 2003 y concluyó en enero de 2005 (Foto 3).

**Foto 3. Sistema de adquisición de datos tipo CPP-H2NS**



La transmisión de registros desde el sistema de adquisición de datos de las estaciones de monitoreo al centro de integración, se realiza por medio de módems. La instalación de esta tecnología inició en junio de 2002.

### **2.3.3.2 Validación de registros**

Este subproceso es el paso previo para que los registros que genera el SIMAT sean públicos. Su correcta aplicación depende del conocimiento del sistema de administración de registros de contaminantes y parámetros meteorológicos que se transmiten de las estaciones de monitoreo al centro de integración.

### **2.3.3.4 Obtención de indicadores**

En el Proaire 2002 – 2010 se enfatiza que la comprensión del problema de la contaminación del aire, requiere evaluar la efectividad de los programas para reducir las emisiones y la exposición, esto a pesar de la incertidumbre que pueda existir en el proceso que relaciona las emisiones y las concentraciones en la atmósfera<sup>9</sup>. De esta forma el programa señala la conveniencia de aplicar métodos de evaluación que apoyen la toma de decisiones, resaltando la importancia del monitoreo atmosférico en la detección de tendencias de los contaminantes.

**Evaluación del desempeño de las estaciones de monitoreo.** La evaluación de la situación de los contaminantes atmosféricos en la ZMVM requiere contar con información confiable y representativa.

<sup>9</sup> Programa Integral sobre Contaminación Urbana, Regional y Global: Estudio de Caso de la Ciudad de México. Anexo 2: Estado actual del conocimiento científico de la contaminación del aire en el Valle de México. Instituto Tecnológico de Massachussets, Octubre del 2000.

Como se mencionó antes, la confiabilidad de los registros que genera el SIMAT se garantiza por medio de programas internos de aseguramiento de la calidad y auditoría, así como las auditorías externas de desempeño.

En ocasiones las fallas prolongadas en la operación de los equipos de monitoreo o en la transmisión, provocan la pérdida de información y consecuentemente la pérdida de representatividad de los registros que genera la estación. Anualmente, se espera que en una estación se genere cierta cantidad de información y cuando no sucede esto, se dificulta hacer comparaciones con la información de estaciones en las que no se presentan estos problemas.

Por lo anterior, en el SIMAT se evalúa el desempeño de cada estación de monitoreo de la RAMA y la REDMA en función de la información que registra a lo largo del tiempo, para lo cual se definen como criterios los siguientes:

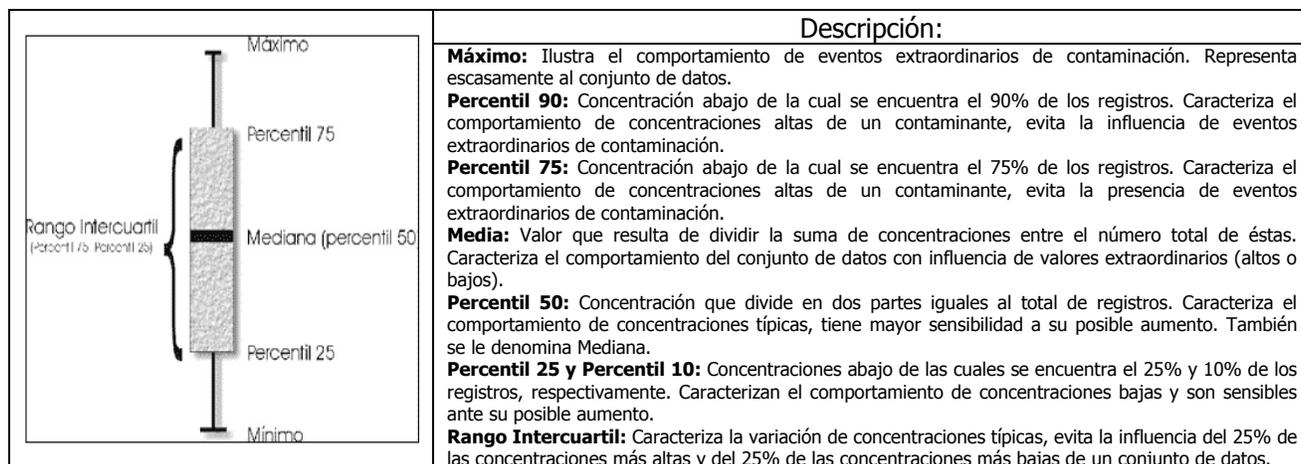
- **Desempeño anual:** Se clasifica como ***bueno*** cuando la estación registra el 75% o más de los datos esperados en el año, ***regular*** cuando presenta más del 50% sin llegar al 75% y ***malo*** cuando presenta 50% o menos de los datos.
- **Desempeño histórico:** Este criterio se emplea para garantizar la correcta operación de las estaciones de monitoreo a lo largo del tiempo. En el presente trabajo se consideran como las estaciones con el ***mejor desempeño histórico*** a aquellas que en el período de 1990 a 2005, tuvieron un desempeño anual bueno en el 75% de los años o más.

Cuando una estación de monitoreo inicia su operación, se considera que deben transcurrir cuatro años con un desempeño anual bueno para considerar su desempeño histórico. Por ejemplo, si una estación inició su operación en el año 2001, para el año 2005 tendría un mejor desempeño si en el 75% de estos años su desempeño fue bueno.

El análisis de tendencia de 1990 a 2005 se realiza con los datos de las estaciones de monitoreo que cumplen el criterio de mejor desempeño histórico, aún cuando hayan dejado de medir antes de concluir el período. El análisis de tendencia de los contaminantes atmosféricos en la ZMVM, requiere indicadores confiables y representativos del conjunto de datos. Un indicador es una representación numérica que sintetiza la información de un período de tiempo.

En la Figura 3 se muestra el diagrama que representa al conjunto de datos y la descripción de los indicadores que lo componen. En el SIMAT, la tendencia de los contaminantes se evalúa mediante el percentil 90, para inferir sobre el comportamiento de las concentraciones altas y el percentil 50, para inferir sobre el comportamiento de las concentraciones típicas.

**Figura 3. Representación gráfica de indicadores estadísticos.**



### 2.3.3.5 Técnicas de análisis de tendencia y estado de los contaminantes atmosféricos

El análisis de tendencia de los contaminantes atmosféricos criterio es otro tema que ha tenido un desarrollo importante en la gestión del SIMAT. Los métodos adoptados para llevar a cabo esta tarea, permiten realizar una evaluación objetiva de la situación de cada contaminante, teniendo como base la confiabilidad de los registros obtenidos en campo y la representatividad de los indicadores, como se comentó en los apartados anteriores.

Entre los aspectos relevantes del análisis de tendencia que se efectúa en el SIMAT, destacan la calificación de la dirección que tiene en el tiempo el comportamiento de cada contaminante por medio de distintos indicadores, es decir, si el comportamiento que refleja un determinado indicador es creciente, decreciente o no muestra cambio. Para llevar a cabo esta calificación por estación de monitoreo se emplea la Prueba de Mann Kendall (Gilbert O. R., 1987).

El análisis de tendencia se complementa con la prueba de homogeneidad de Mann Kendall (Gilbert O. R., 1987), por medio de la cual se evalúa que la tendencia de un grupo de estaciones tenga un comportamiento semejante, ya que en ocasiones la tendencia de un contaminante puede ser decreciente en algunas estaciones y en otras no mostrar tendencia.

También se estima la "magnitud" del cambio anual que hay en esta tendencia, a través del estadístico propuesto por Sen (Gilbert O. R., 1987) que deriva de un ajuste lineal. Esta magnitud se obtiene en las unidades de concentración del contaminante, por lo que es posible señalarla como una medida del incremento o decremento que se presentó cada año.

Estos métodos para el análisis de tendencia se adoptaron porque estiman la tendencia sin considerar la influencia de los datos extremos, datos faltantes o comportamientos cíclicos. En los Anexos 1 y 2 se detallan los aspectos específicos y teóricos del análisis de tendencia que se desarrolla en el SIMAT.

Un complemento al análisis de tendencia, es el análisis de movilidad de las concentraciones de

un contaminante atmosférico en un período de años, el cual se conoce como análisis del “efecto pistón”. El supuesto principal de este análisis es una “metáfora” donde el conjunto de las acciones instrumentadas para la reducción y control de la contaminación, funcionan como un pistón que empuja a las concentraciones de un contaminante a valores menores y conforme avanza encuentra mayor resistencia. El pistón puede mantenerse o regresar a su estado inicial, lo cual supone que las acciones instrumentadas no están logrando su propósito. En el Anexo 3 se detallan los aspectos específicos y teóricos de este análisis.

Estos análisis permiten evaluar con mayor detalle el cambio que presenta un contaminante atmosférico durante un período de tiempo, como puede ser el período correspondiente a la gestión de un programa ambiental específico, como es el caso del Proaire 2002 – 2010.

Por otra parte, para inferir acerca del estado de la calidad del aire en la salud de la población, en el SIMAT se emplean indicadores relacionados con los límites permisibles que establecen las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental (Tabla 6). La interpretación de estos indicadores puede ser sencilla, como ocurre con el porcentaje de días con registros máximos que superan a los límites de las NOM o puede tener un mayor grado de complejidad, como es el caso de los indicadores de exposición poblacional.

**Tabla 6. Normas Oficiales Mexicanas, Salud Ambiental.**

contaminante (NOM)	exposición aguda		exposición crónica
	concentración y tiempo promedio	frecuencia máxima aceptable	concentración y tiempo promedio
Ozono (Modificación a la NOM-020-SSA1-1993) <sup>b</sup>	0.11 ppm (1 hora)	1 vez al año	-----
	0.08 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	4 veces al año	-----
Monóxido de carbono (NOM-021-SSA1-1993) <sup>a</sup>	11 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	1 vez al año	-----
Dióxido de azufre (NOM-022-SSA1-1993) <sup>a</sup>	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (promedio aritmético anual)
Dióxido de nitrógeno (NOM-023-SSA1-1993) <sup>a</sup>	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	-----
Partículas suspendidas totales (NOM-024-SSA1-1993) <sup>a</sup>	260 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	1 vez al año	75 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético anual)
Partículas menores a 10 micrómetros (NOM-025-SSA1-1993) <sup>a</sup>	150 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	1 vez al año	50 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético anual)
Partículas menores a 2.5 micrómetros (Modificación a la NOM-025-SSA1-1993) <sup>c</sup>	65 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	1 vez al año	15 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético anual)
Plomo (NOM-026-SSA1-1993) <sup>a</sup>	-----	-----	1.5 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético de 3 meses)

<sup>a</sup> Publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 23 de diciembre de 1994.

<sup>b</sup> Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 30 de octubre de 2002.

<sup>c</sup> Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 26 de septiembre de 2005.

**Los países requieren monitoreos locales o regionales de la calidad del aire que pueden combinarse con datos censales de población a fin de determinar el porcentaje de niños sujetos a exposiciones superiores a las normas establecidas (CCA, 2005).**

### 2.3.3.6 Difusión de la información

**El IMECA.** En el ámbito de la gestión ambiental del aire para la ZMVM, el Índice Metropolitano de la Calidad del aire (IMECA) se considera como la principal herramienta para informar a la población de manera adecuada y oportuna sobre los niveles de contaminación y su variación en el tiempo, con el fin de salvaguardar su salud. Este índice tiene sus antecedentes en 1977, cuando la Dirección General de Saneamiento de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, desarrolló el Índice Mexicano de Calidad del Aire o IMEXCA. En 1982 se diseñó el IMECA, cuya metodología transforma a una escala adimensional simple las concentraciones de los contaminantes criterio.

El fundamento técnico del IMECA es el Índice Estándar de Contaminantes (Pollutant Standard Index o PSI por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América (EUA), un método basado en una función lineal segmentada y las normas primarias de calidad del aire<sup>10</sup>, y las NOMs de salud ambiental vigentes, de forma tal que establece en 100 puntos el límite de protección a la salud para cada contaminante (SSA, 1979).

En enero de 1986 el IMECA se empezó a difundir a la población a través de diversos medios, y hoy en día su difusión comprende la radio, la prensa, la televisión e Internet. Este tipo de índice debe considerarse como información cotidiana para que la población tenga una visión objetiva acerca del problema de la contaminación atmosférica (Lezama, 2000) y actué de forma tal que disminuya los riesgos de exposición a los contaminantes.

En la actualidad el IMECA se obtiene cada hora durante todo el año y se difunde o hacen uso del mismo diversas instituciones, entre las que se pueden mencionar a:

- Instituto Nacional Ecología
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
- Sistema Nacional de Desarrollo Integral de la Familia - Coacalco
- Comunicación Social del Gobierno del Distrito Federal
- Servicios Educativos del Gobierno del Distrito Federal y colegios particulares
- Protección Civil del Gobierno del Distrito Federal
- LOCATEL
- H. Cuerpo de Bomberos
- Medios informativos (radio, televisión y periódicos)

---

<sup>10</sup> El PSI fue el resultado de la investigación realizada por Thom y Ott en 1975, con más de 50 índices de contaminación existentes en los EUA y Canadá para identificar las características óptimas de un índice de contaminación del aire. En 1976 se propuso el PSI y posteriormente se modificó y adoptó por el Gobierno de los EUA como un índice uniforme de la contaminación del aire. El PSI tiene las siguientes características estructurales: seis variables de contaminación del aire: CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, PST y el producto SO<sub>2</sub> x PST; utiliza funciones lineales segmentadas para calcular los subíndices y se calcula de modo máximo, reportando únicamente el subíndice máximo (1).

**El Índice de Radiación Solar.** En 1996 la Dirección General de Proyectos Ambientales de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del entonces Departamento del Distrito Federal (DDF) firmó un convenio con el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), con el objetivo de implantar el Monitoreo de Radiación Solar en la ZMVM.

En febrero de 1997 entró en operación la estación prototipo TEM, en consecuencia, la Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) comenzó a adquirir y procesar información de radiación solar ultravioleta (UV) tipo B, e inició la generación y difusión del Índice de Radiación Ultravioleta (IUV), como medida de protección a la salud de la población.

La medición de la radiación solar en la ZMVM ha pasado por un largo proceso de estructuración. En la actualidad el SIMAT cuenta con el Subsistema REDMET (Red Meteorológica), el cual registra radiación UV Tipos A y B en ocho estaciones de monitoreo, radiación global (GR) en cinco y radiación fotosintéticamente activa (PAR) en dos.

El IUV fue desarrollado en 1994 por la OMS, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la Organización Mundial de Meteorología y el Comité Internacional de protección de las radiaciones no ionizantes (ICNIRP) para sensibilizar al público al nivel mundial sobre el riesgo de la exposición de los niños a los rayos ultravioleta.

En la ZMVM el SIMAT genera y difunde un IUV como indicador de la intensidad de la radiación solar UV tipo B que llega a la ZMVM. Este se calcula con base en las dosis de radiación que la población puede soportar, dependiendo del tipo de piel antes de sufrir un enrojecimiento mínimo (eritema)<sup>11</sup>. Los valores del IUV se clasifican en una escala de 0 al 15, que implica el tiempo de exposición al Sol antes de que la radiación pueda causar algún daño a la piel.

**Difusión pública de la información.** La difusión de la información es una de las principales metas del SIMAT. Para llevar a cabo esta tarea y en respuesta a las necesidades de los diversos usuarios, se diseñaron diferentes instrumentos y medios. La experiencia en cada uno de estos se detalla a continuación:

- Página electrónica del SIMAT [www.sma.df.gob.mx/simat](http://www.sma.df.gob.mx/simat). A través de este medio se dispone la información relacionada a la contaminación del aire: bases de datos, información horaria del IMECA, información de los subsistemas que conforman el SIMAT, información de los contaminantes, legislación, programas ambientales, publicaciones y más.
- Talleres y pláticas para niños, profesores y población abierta. Estos espacios tienen el objetivo de sensibilizar al público en general acerca del problema de contaminación del aire, los efectos en la salud y las prácticas preventivas (Fotos 4, 5 y 6). En estas pláticas también se incluyen a

---

<sup>11</sup> Eritema: Enrojecimiento de la piel.

investigadores o estudiantes nacionales y extranjeros. Entre diciembre del 2000 y junio del 2006, el SIMAT impartió el siguiente número de visitas, talleres y atención de usuarios (Tabla 7).

**Tabla 7. Atención a solicitudes de información y pláticas durante la gestión del SIMAT**

año	número de visitas - taller	número de usuarios
2001	22	787
2002	31	1090
2003	21	502
2004	14	176
2005	11	168

Los visitantes nacionales y extranjeros son principalmente personas que laboran en otras redes de monitoreo, con los cuales se intercambia información de sus experiencias. También es personal que lleva a cabo proyectos en materia de calidad del aire y efectos en la salud.

**Foto 4. Taller de sensibilización a profesores**



**Foto 5. Taller de sensibilización para niños**



- Exposiciones en espacios públicos y eventos ambientales. El objetivo es difundir en los diferentes espacios públicos y eventos ambientales, información sobre contaminación del aire como medida de protección a la salud. Entre los eventos donde participa el SIMAT destacan:
  - Semana de medio ambiente, seguridad e higiene en diferentes centros de trabajo de Luz y Fuerza del Centro.
  - Feria del día mundial del medio ambiente organizado por el Gobierno del Distrito Federal.
  - Mes de la ciencia y la tecnología organizado por el Sistema de Transporte colectivo METRO (Fotos 7, 8 y 9).
  - Eventos ambientales en escuelas y universidades. Los profesores y alumnos solicitan al SIMAT su participación para la realización de eventos ambientales dentro de sus escuelas.

**Foto 6. Taller de sensibilización itinerante en la estación del Metro La Raza**



**Foto 7. El SIMAT en la estación del Metro Centro Médico**



**Foto 8. El SIMAT en la estación del Metro La Raza**



**Foto 9. El SIMAT en la estación del Metro Jamaica**



- **Pronóstico de la calidad del aire**

Para la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del Gobierno del Distrito Federal (GDF), es importante prever situaciones de emergencia ambiental que motiven la instrumentación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCCA), de tal forma que se puedan realizar acciones para reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos e informar a la población para evitar su exposición a altas concentraciones de O<sub>3</sub>.

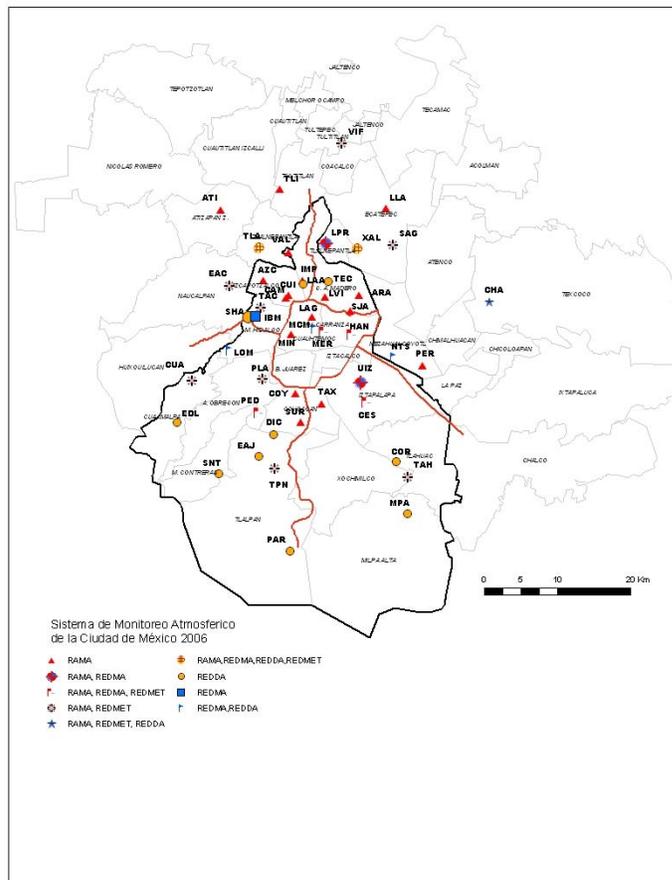
Por lo anterior la SMA-GDF promueve el desarrollo de un modelo de pronóstico de calidad del aire, como una herramienta para prevenir oportunamente a la población de las condiciones de la contaminación atmosférica y llevar a cabo acciones de control. De esta forma el SIMAT, opera un modelo empírico de pronóstico de O<sub>3</sub> basado en información meteorológica que se transmite diariamente a las 19:00 horas (<http://www.sma.df.gob.mx/imecaweb/mapas/mapdat/pronos.php>), al mismo tiempo desarrolla e instrumenta un pronóstico con base en herramientas estadísticas para estimar las concentraciones máximas de O<sub>3</sub> del día siguiente. Este pronóstico se implementa con base en una metodología propuesta por la USEPA y se reportan avances en 4 de sus 7 etapas.

A partir de los resultados, se espera contar con un programa de pronóstico de O<sub>3</sub> que genere valores máximos para las diferentes regiones de la ZMVM.

## 2.4 Configuración actual y futuro del SIMAT

Al concluir el año 2005, el SIMAT contaba con un total 48 estaciones de monitoreo, 36 ubicadas en el Distrito Federal y 12 en el Estado de México; en total concentra 193 equipos automáticos y 40 equipos manuales, 24 de los cuales son para partículas y 16 para el depósito atmosférico (Mapa 7).

**Mapa 7. Distribución de estación del SIMAT, 2006**



En el futuro se prevé que el SIMAT continúe destacando a nivel nacional, para lo cual deberá consolidar los sistemas de gestión de la calidad asociados con sus procesos. Así mismo, deberá responder y adaptarse a las necesidades de información derivadas de un mejor conocimiento de la problemática de calidad del aire y del crecimiento de la mancha urbana.

La búsqueda de respuestas a este tipo de planteamientos fue el motivo para la realización del primer Foro de Monitoreo Atmosférico que se celebró en la Ciudad de México los días 19, 20 y 21 de abril del año 2006 (<http://www.sma.df.gob.mx/simat20/>). A este evento asistieron destacados científicos y funcionarios públicos, entre los principales aportes que realizaron se pueden destacar:

## 2.5 Memorias del Foro de Monitoreo Atmosférico, Ciudad de México



**Dra. Margarita Castillejos:** Algo de Historia sobre la Red de Monitoreo Automática del Distrito Federal

“ Quizá en un futuro no lejano se debieran reducir el número de estaciones de monitoreo que actualmente existen y reemplazarlas por un **super sitio** de la ciudad, ubicado en donde se refleje la contaminación urbana en su conjunto, que mida otros contaminantes durante todo el año, al menos cada 3 ó 6 años, lo que permitiría tener las tendencias y empezar a tomar medidas en relación a los nuevos hallazgos. Esto permitiría complementar los estudios intensivos que se están realizando, como el proyecto MILAGRO”.

**Ing. Rodolfo Lacy Tamayo:** Criterios y procedimientos de monitoreo atmosférico

“ se deben consolidar sistemas de monitoreo atmosférico que operen con un enfoque holístico, esto es, como una red de redes conformadas por estaciones jerárquicamente organizadas que mejoren la calidad y representatividad de los datos, susceptibles de ser auditadas para garantizar el cumplimiento de la legislación”

“ los problemas de contaminación del aire en áreas urbanas requieren un marco legal de mayor rango jerárquico, una Ley de Aire Limpio y sobre Cambio Climático que atienda a los problemas de contaminación globales, regionales y locales; lo que implica mejorar el monitoreo urbano o regional, en las Áreas Naturales Protegidas y en los sitios de representatividad global ”

Una ley de este tipo debe considerar:

- Definición precisa de las atribuciones, obligaciones y responsabilidades de los tres niveles de gobierno y la ciudadanía
- Sistema nacional de monitoreo atmosférico
- Inventario nacional de fuentes de contaminación
- Administración de las cuencas atmosféricas
- Fuentes y mecanismos de financiamiento
- Autoridad Nacional
- Inventario de gases efecto invernadero (GEI)
- Objetivos de emisión/reducción de GEI
- Mercado de bonos de carbono
- Planes y programas de acción, mitigación y adaptabilidad

**Téc. Armando Retama:** Aseguramiento y Control de la Calidad en el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México

Una limitante para el control de calidad en el monitoreo atmosférico es la cantidad de recursos económicos destinados, algunos aspectos a considerar para mejorar la operación del SIMAT son:

- Establecer un programa permanente de evaluación y capacitación para el personal operativo
- Adquirir mezclas certificadas para el área de estándares
- Presupuesto anual para la certificación de los estándares y equipo de calibración
- Adquirir equipos para la calibración del equipo de meteorología
- Concluir los procedimientos para la operación de los analizadores de gases y partículas
- Incrementar el personal técnico operativo para la operación del SIMAT
- Establecer un plan de auditorias internas para evaluar el desempeño de los equipos
- Apoyar el desarrollo de normas técnicas actualizadas
- Establecer una metodología de evaluación permanente de la representatividad de las estaciones

**Mathew Plate:** Proceso de auditoria de los Sistemas de Monitoreo Atmosférico, y técnicas de validación y manejo de datos

Debido a la importancia de obtener datos confiables es necesario:

- Mantener programas de auditoria para asegurar la calidad de los datos
- Análisis de los datos auditados para evaluar el funcionamiento de las redes de monitoreo
- Validar, verificar y valorar la calidad de los datos
- En la validación es importante considerar como perspectivas
  - Demostración del negativo (asume que la contaminación esta presente)
  - Demostración del positivo (asume que no hay contaminación)
  - Intolerancia de datos imprecisos
- Validación de contaminantes criterio: La Plantilla de Validación es el método de la EPA para validar datos de calidad del aire. Esta plantilla considera la validación en una manera lógica y metódica, e incluye los siguientes criterios:
  - Criterios críticos
  - Criterios operacionales
  - Criterios sistemáticos
- Otras técnicas y consideraciones de Validación:
  - "Tiempo Real"
  - Métodos Complejos

**Dra. Telma Castro y Dra. María Amparo Martínez:** Apoyo del SIMAT en la Investigación Científica

La importancia del SIMAT radica, principalmente, en el registro continuo de los contaminantes y variables meteorológicas, lo cual es necesario para el estudio del ambiente como un sistema complejo. El SIMAT debe ser discutido, decidido y analizado con los conocimientos más recientes en la materia, y debe responder a distintos objetivos.

Algunas sugerencias para los próximos 20 años de trabajo conjunto son:

- Mayor colaboración entre instituciones de investigación y áreas de monitoreo ambiental con objetivos de mediano y largo plazo
- Coordinación entre instancias de monitoreo (meteorológico, satelital, científico, escolar, industrial)
- Impulso al desarrollo de tecnología para el monitoreo. Necesidad de permanente actualización, disminución de la dependencia de equipo importado
- Estrategias de monitoreo en función de programas de control
- Ampliación del espectro de contaminantes criterio (p.e. tóxicos)
- Atención a procesos de micro y mesoescala (p.e. isla de calor, lagos, parques)
- Incorporar monitoreo de actividades humanas y de uso del suelo

**Biól. Roberto Muñoz Cruz** Evaluación y rediseño del SIMAT ante el crecimiento de la ZMVM

El SIMAT debe incorporar una propuesta metodológica para evaluar en forma continua (cada 2 años) la representatividad de las estaciones de monitoreo, con el propósito de llevar a cabo un rediseño continuo y dinámico, conforme a los siguientes puntos:

- Evaluación. Criterios técnicos para el muestreo y establecimiento de estaciones de monitoreo, determinación de su escala espacial de representatividad
- Redundancia de mediciones. Detección de registros similares en dos o más estaciones para su posible eliminación o reubicación
- Crecimiento futuro. El crecimiento poblacional y la estimación de su posible exposición a contaminantes en el futuro, puede ser un indicativo de la cobertura o ampliación que deberá tener el SIMAT

**Dr. José Luis Lezama.** Participación y percepción ciudadana sobre los problemas ambientales del aire

A pesar de que hay una tendencia a la baja, las condiciones de la calidad del aire en la Ciudad de México siguen siendo graves. El punto por tratar es la forma como sus habitantes la viven, perciben, construyen y reconstruyen esta contaminación.

Existe a nivel de la conciencia ciudadana una necesidad por negar la magnitud de esta contaminación, ya que los habitantes de ninguna ciudad pueden vivir su vida cotidiana con la certeza de que están viviendo en medio de un peligro muy grande y sobre el cual no tienen muchas posibilidades de influir para su disminución, para evitarlo o para apartarse de ese peligro. En muchas comunidades, la magnitud del daño ambiental y los niveles de conciencia ambiental no marchan al parejo, por un lado se encuentra el daño y el peligro ambiental y por otro, la conciencia sobre ese peligro.

Si hubiera una relación directa entre el riesgo, el daño ambiental, la conciencia y la protesta ambiental, la ciudad de México viviría en una revuelta permanente debido a los altos niveles de contaminación.

En ese sentido es importante destacar la importancia que tiene en términos de la gestión de la calidad del aire, el tipo de problemática que estamos construyendo o el problema que estamos diagnosticando, cuáles son las características de ese diagnóstico, sea de la calidad del aire en particular o de los problemas ambientales en general, sobre los cuales proponemos políticas o establecemos estrategias de gestión.

Además, es importante la forma como los ciudadanos y autoridades construyen los problemas ambientales, ya que no hay una manera unánime de construirlos, basta mencionar que hay muchos especialistas que tienen interpretaciones distintas sobre el origen, causas y consecuencias de los contaminantes. Siendo el ozono una de las sustancias que más preocupa a la opinión pública y a los encargados de la política pública, no es el único, ni el más peligroso de los contaminantes, ya que hay una gran cantidad de hidrocarburos de los cuales no existe una medición sistemática y pueden tener efectos más letales sobre la salud humana.

Hay infinidad de muestras de que hay una separación, hay un vacío, entre el conocimiento científico que se produce o los diversos conocimientos que hay sobre la contaminación en la ciudad de México. Hay una no correspondencia entre ese conocimiento, entre su objetividad y lo que se toma como decisiones de política pública. En ese sentido, es importante la percepción de los problemas, la manera como los problemas son contruidos tanto por los ciudadanos, como por los propios científicos y como por los que toman las decisiones, para establecer sobre qué tipo de problemas se están estableciendo determinados tipos de estrategias para solucionarlos y discutir también si esa forma de diagnosticar los problemas es la más adecuada o la más pertinente para enfrentar los problemas de fondo que afectan a la atmósfera, a los ciudadanos y a los ecosistemas.

**Mtro. Javier Urbina Soria.** Elementos psicosociales en la percepción y valoración de indicadores de contaminación del aire

El problema de la contaminación atmosférica en la ZMVM ha mejorado, se va avanzando, especialmente en lo técnico: Se tienen mejores normas y equipamiento, y estudios de impacto específicos

En donde no hemos avanzado mucho es en lo social, no hay una cultura de prevención, hay una insuficiente aceptación y cumplimiento de normas, lo cual tiene que ver con la percepción de riesgos.

La percepción de riesgos es el punto de partida para la comunicación de riesgos. "Lo que no se percibe no existe", es decir, si la gente no ve que algo está ocurriendo, aunque sea factible que ocurra, no le interesa.

Al respecto de la percepción del riesgo, los hallazgos internacionales indican que:

- La gente se cubre con algo que denominamos el mito de la invulnerabilidad personal, es decir, no acepta la posibilidad de ocurrencia de un desastre aún y cuando se le muestre evidencia empírica.
- La gente rechaza modificaciones estructurales en su forma de vida para prevenir riesgos.
- Confía en sus habilidades para enfrentar el riesgo y rechaza las medidas precautorias.
- La gente considera que de ocurrir un desastre no le afectará en lo personal.
- La gente tiende a pensar que los beneficios son mayores que los riesgos.
- Uno de los patrones de ajuste más frecuentes es no hacer nada y enfrentar las pérdidas.
- Una vez que una persona acepta el riesgo es muy difícil convencerle para que cambie de opinión.

En un estudio sobre percepción y comunicación de riesgos en la ZMVM se encontró que la población identifica como el problema ambiental número uno a la contaminación del aire, mientras que los expertos lo califican en el lugar siete. Los resultados de un estudio exploratorio sobre el IMECA muestra la importancia de considerar lo que la ciudadanía podría entender naturalmente sin hacer un esfuerzo de interpretación o tener que aprenderse códigos especiales.

En conclusión, aunque la calidad del aire ha mejorado en los últimos años y la población sigue consciente de que la contaminación del aire es muy alta, es notable que la propia población no acepta modificar sus estilos de vida. También hay diferencias notables entre especialistas y la población en la manera de percibir los diferentes elementos que intervienen en la comunicación de riesgos ambientales. Ante esto, es responsabilidad de funcionarios públicos, académicos y medios de comunicación, transmitir a la población, en forma adecuada, el riesgo de la contaminación atmosférica.

### **3 CARACTERÍSTICAS GEOCLIMÁTICAS DE LA ZMVM**

Las condiciones de la calidad del aire en la ZMVM tienen una estrecha relación con la presencia de fenómenos meteorológicos que ocurren a nivel sinóptico y local, así como con las características físicas de la región donde se localiza. Esto indica la relevancia de caracterizar el comportamiento de las variables meteorológicas que inciden en la ZMVM, lo que posibilita una mejor evaluación de las tendencias de los contaminantes atmosféricos e inferir de mejor forma con respecto de los resultados de las acciones de gestión ambiental.

#### **3.1 Características geográficas**

Las características físicas de la ZMVM son un factor a considerar al tratar el tema de la contaminación atmosférica. En primer lugar se destaca su ubicación en una cuenca localizada sobre los 19°20' de latitud norte y 99°05' de longitud oeste, cuya superficie abarca 9,560 km<sup>2</sup> que integra valles intermontañosos, mesetas, cañadas y terrenos semiplanos de los extintos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco (Proaire, 2002).

La elevación promedio de la ZMVM es de 2,240 metros sobre el nivel del mar y destacan la sierra Quetzaltepec localizada al oriente, con una altitud máxima de 4,060 msnm; la sierra Ajusco-Chichináutzin localizada al sur, con una altitud máxima de 3,930 msnm; y la sierra de Las Cruces localizada al poniente, con una altitud máxima de 3,530 msnm. Al noroeste se encuentra la sierra La Muerta y al norte la Sierra de Guadalupe (INEGI, 2005).

La ubicación de la ZMVM en una cuenca rodeada por una cadena montañosa, es un factor determinante en su capacidad de carga para soportar las emisiones de contaminantes atmosféricos, y en la altitud donde se localiza es menor la eficiencia de la combustión de los vehículos automotores.

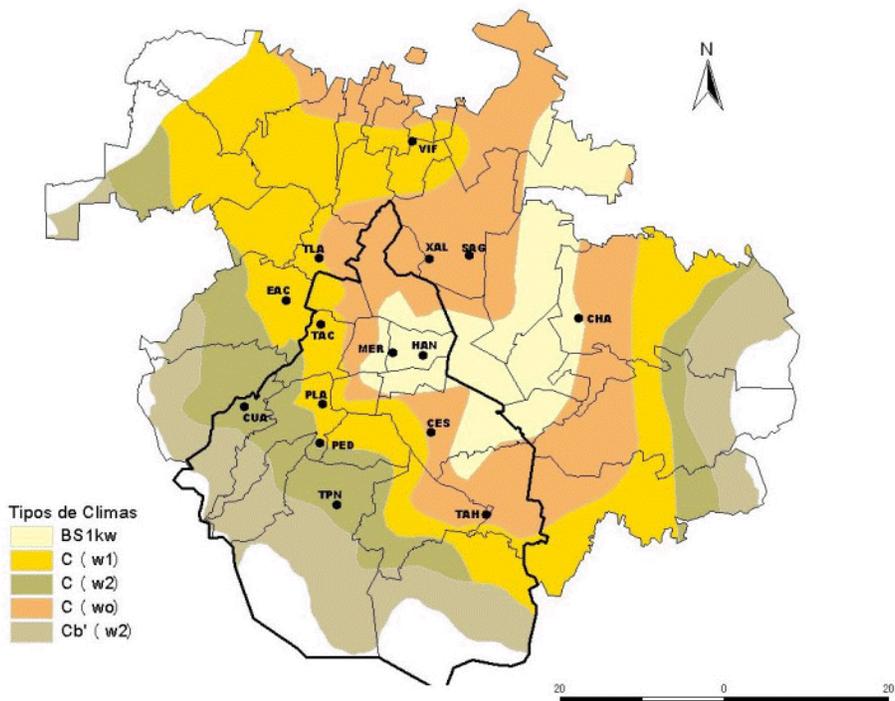
#### **3.2 Características climáticas**

Por las características geográficas antes descritas y la incidencia de variables meteorológicas, en la ZMVM se presentan diferentes tipos de clima; según el sistema de clasificación climática de Köppen, modificado por García (1973) para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, el clima en el centro y en el sur de la ZMVM se define como templado subhúmedo con lluvias en verano ( $Cw_0$ ,  $Cw_1$ ,  $Cw_2$  y  $Cb'w_2$ , en el Mapa 8). Por su parte, el INEGI (2002) señala que en poco más del 80% del territorio de la ZMVM el clima es templado.

García (1973) también define que en el noreste de la ZMVM el clima es semiárido templado con verano cálido ( $Bs_1 kw$ , en el Mapa 8). Esta aridez se puede explicar por un fenómeno diurno de

subsistencia<sup>12</sup> de aire en el centro de esta región, originado por el desplazamiento del aire superficial hacia las montañas, también conocido como viento de valle (Jáuregui, 2002).

**Mapa 8. Tipos de clima en la ZMVM según Köppen**



Fuente: SIMAT 2006, con datos de "Geo Ciudad de México, 2003".

Las condiciones que caracterizan al clima de la ZMVM, son un factor determinante en la calidad del aire que predomina a lo largo del año (Proaire, 2002-2010). Por esta razón es importante caracterizar su comportamiento anual, temporal y diario, y su relación con la presencia de contaminantes atmosféricos específicos.

- **Presión atmosférica.** Al nivel regional la presión atmosférica que incide sobre la superficie terrestre influye en las condiciones del clima. El movimiento vertical de un volumen de aire da lugar a constantes cambios de presión atmosférica y a movimientos laterales del aire que producen vientos (Enciclopedia Metódica Larousse, 2000).

Los sistemas de alta presión ocurren cuando una masa de aire fría desciende sobre la superficie terrestre, aumentando la presión y provocando condiciones de estabilidad atmosférica que favorecen el estancamiento de contaminantes, como son el cielo despejado y el viento ligero o moderado en superficie. En la ZMVM estos sistemas son característicos de la época seca<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Movimiento descendente de una capa de aire en una zona extensa.

<sup>13</sup> Comunicación personal del Dr. Caetano Neto, investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (2006).

Por otro lado, los sistemas de baja presión ocurren cuando una masa de aire caliente asciende, disminuyendo la presión y provocando condiciones de inestabilidad atmosférica, esto es, el movimiento de aire por convergencia y convección<sup>14</sup>, lo cual se asocia con la presencia de nubosidad y chubascos. En la ZMVM este tipo de sistemas son característicos del verano<sup>13</sup>.

• **Viento.** En términos generales se puede señalar que la dirección del viento es una condición que permite el movimiento y transporte horizontal de los contaminantes atmosféricos, mientras que la velocidad determina su dilución. La dispersión vertical de los contaminantes atmosféricos está determinada por el gradiente vertical de temperatura de la atmósfera ([www.red-de-autoridades.org](http://www.red-de-autoridades.org)).

A nivel regional las condiciones del viento de la ZMVM, en cuanto a su dirección y velocidad, se relacionan con la interacción de los vientos locales y regionales. Jáuregui (2000) señala que la región donde se asienta esta urbe tiene una afluencia de vientos alisios la mayor parte del año, los cuales tienen una intensidad débil con una trayectoria predominante norte - noreste durante la época de lluvia y que pueden alcanzar hasta 40 km/h (11.1 m/s) durante los meses de marzo a mayo, en estos meses de sequía el viento puede tener una trayectoria del norte al este, sur o noreste.

Durante el invierno la incidencia de masas de aire polar provoca estabilidad atmosférica y al final de esta temporada es recurrente la presencia de una "corriente en chorro"<sup>15</sup>". Este sistema puede descender en los meses de febrero y marzo, e incidir con vientos de cierta velocidad en la superficie del Valle de México. En estos meses también inicia el arribo de masas de aire tropical, de manera que su interacción con las masas de aire polar provocan movimientos erráticos y rápidos del viento. En estas condiciones las concentraciones de contaminantes como el O<sub>3</sub> pueden ser bajas, mientras que las partículas provenientes de la erosión del suelo se pueden incrementar (GDF-INEGI, 2002).

A nivel local existe un flujo de viento diurno que deriva del contraste térmico que ocasiona el soleamiento diferencial entre laderas y planicie, por lo que se conocen como vientos de valle, mientras que en la noche hay un flujo de viento frío que proviene de las montañas y desciende por gravedad hacia la planicie, los cuales se denominan vientos de montaña ([www.red-de-autoridades.org](http://www.red-de-autoridades.org)).

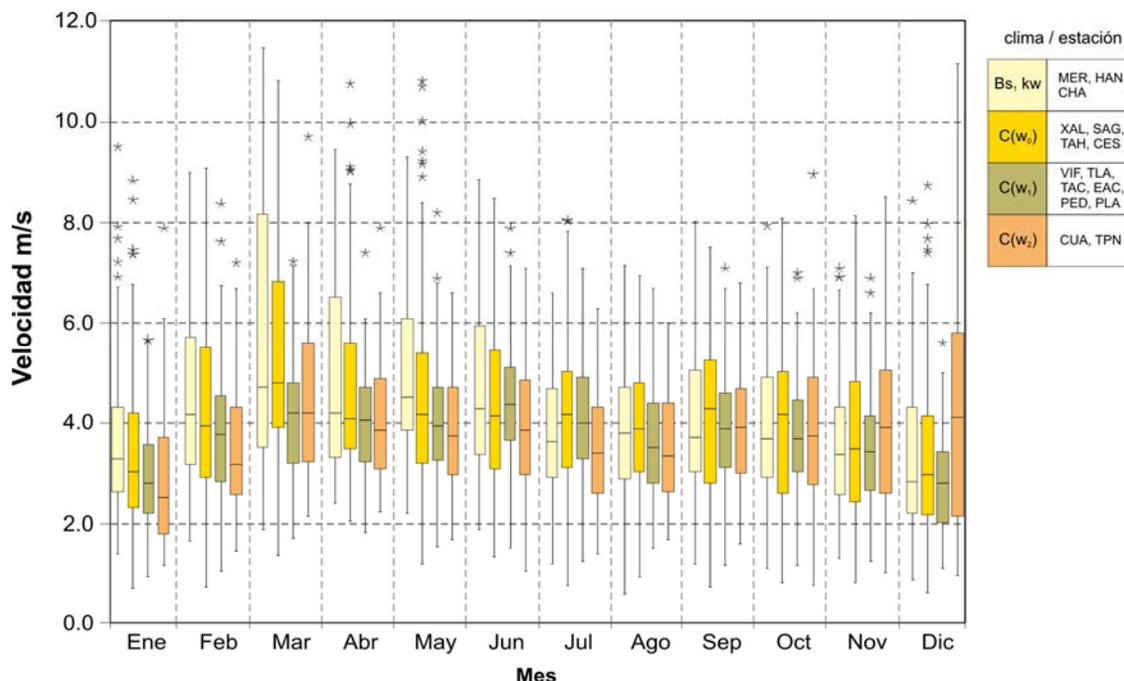
---

<sup>14</sup> La convergencia es el movimiento horizontal en donde el aire se acumula en una región determinada y debido a la conservación de la masa produce ascenso de aire.

La convección es el movimiento vertical ascendente del aire debido al calentamiento por la radiación solar.

<sup>15</sup> Una corriente en chorro es un sistema meteorológico de gran escala que incide sobre la región central del país y que se asemeja a un tubo formado por chorro de aire que se mueve a muy alta velocidad.

**Gráfica 3. Comportamiento del viento entre las 14:00 y 22:00 hrs, año 2005 (valor máximo diario)**



• **Radiación Solar.** La radiación solar es la energía incidente del sol y se transmite en forma de ondas electromagnéticas que inciden sobre la superficie terrestre. Su papel es importante en la determinación de las condiciones del clima, el balance energético y el equilibrio natural del planeta.

Una porción de esta radiación se denomina ultravioleta, la cual tiene una longitud de onda que fluctúa entre 100 y 400 nanómetros, esto es, la porción más energética del espectro electromagnético.

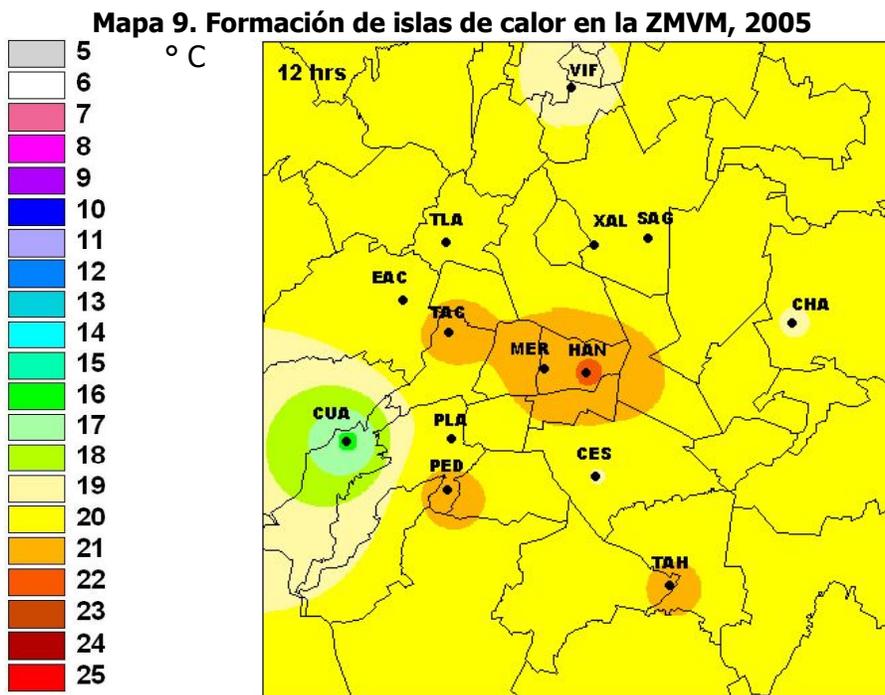
Por sus condiciones geográficas la ZMVM recibe una radiación solar intensa, la cual alcanza sus niveles máximos durante la primavera y el verano, y los mínimos durante el otoño y el invierno. La presencia de radiación solar acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos como el O<sub>3</sub>, por esta razón las concentraciones máximas de este contaminante en la atmósfera de la ZMVM se alcanzan entre las 13:00 y 17:00 horas.

• **Temperatura ambiente.** La temperatura ambiente a nivel de superficie depende de la insolación y esta última es una función de la cantidad de radiación solar incidente, de la distribución de calor debido a las grandes masas de aire y del calentamiento desigual del terreno. En los grandes centros urbanos el cambio de uso de suelo y el calor que provoca el consumo de energía ocasiona un incremento de la temperatura.

Según Jáuregui (2000), en la cuenca donde se ubica la Ciudad de México el régimen térmico está dentro de los límites ideales de comodidad ambiental, ya que en la planicie el promedio anual oscila entre 15° y 16° C, y en las montañas entre 12° y 14° C (fresco a frío). En el sur de esta urbe,

donde se concentra una región con cubierta vegetal, la temperatura es en general más fresca y hacia el centro de la ciudad la temperatura se incrementa; este fenómeno se magnifica en ciertas horas del día cuando el aire se vuelve más seco y la temperatura de una zona se eleva con respecto a su entorno, dando lugar a lo que este investigador denomina como "Isla de Calor". Jáuregui (2000) apunta que esta situación también se asocia con el tránsito vehicular y la obstrucción del viento debido a la altura de los edificios.

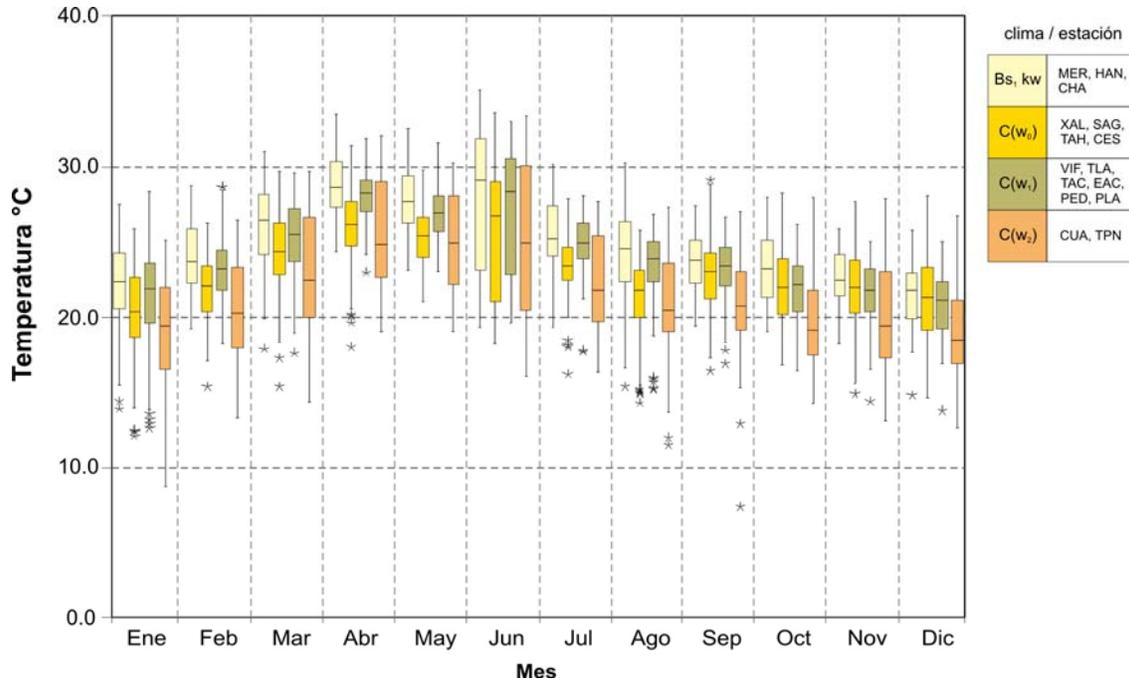
Este fenómeno puede visualizarse por medio de la distribución espacial de la temperatura en la ZMVM con registros del SIMAT, los cuales corresponden al promedio de los registros realizados a las 12:00 horas durante la temporada de lluvia del año 2005 (Mapa 9).



En el escenario de un cambio global del clima, Jáuregui (2000) señala que en la Ciudad de México el frío del invierno tenderá a ser más benigno y que las ondas de calor tenderán a ser más frecuentes.

Jáuregui (2000) comenta que el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) reporta que entre 1950 y 1980 se registraron temperaturas extremas que oscilaron entre 36 y 38°C. Esta institución también reporta que en 1998 registró una temperatura extrema de 33.9° C. En el SIMAT la temperatura extrema registrada en los últimos años ha sido de 35°C (Gráfica 4). Por su parte, las temperaturas mínimas registradas por el SMN en el periodo 1950–1980, oscilaron entre -4° y -1° C, y en las áreas rurales entre -12° y -10° C; en el caso del SIMAT, entre 2000 y 2005 se registraron temperaturas de hasta -2.6° C en estaciones de la periferia.

**Gráfica 4. Comportamiento de la temperatura entre las 9:00 y 20:00, 2005 (valor máximo diario)**



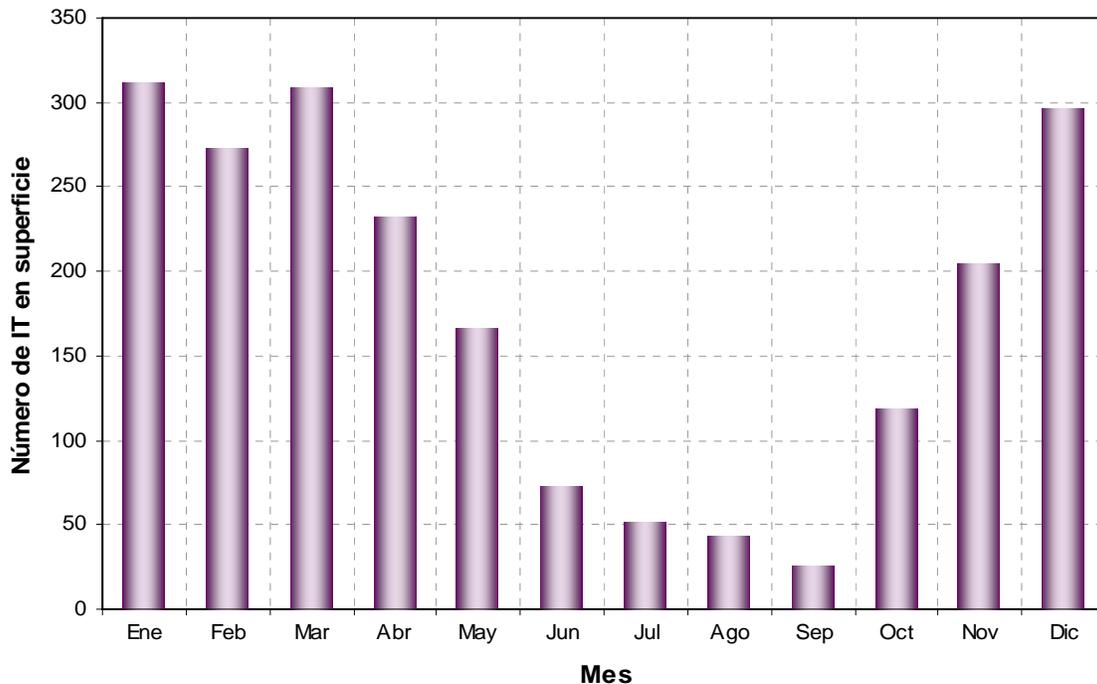
**Inversiones Térmicas.** En condiciones normales la temperatura disminuye conforme aumenta la altitud; por el contrario cuando se encuentra una capa en donde la temperatura aumenta con la altitud, se encuentra en una capa de inversión térmica. Su presencia más frecuente ocurre durante la madrugada y tiende a mitigarse al aumentar la intensidad de la radiación solar, ya que el calentamiento del suelo provoca también el calentamiento de las capas de aire. De esta forma, es común decir que el calentamiento por radiación solar debilita una inversión térmica, hasta su ruptura. Por el contrario, este fenómeno puede ser duradero bajo un sistema de alta presión unido a una velocidad del viento mínima (Encarta 2003).

Existen diversos tipos de inversión térmica, lo cual depende de las condiciones atmosféricas y los períodos de duración:

- **Inversión por radiación**
- **Inversión por subsidencia**
- **Inversión frontal**
- **Inversión por advección**

En la ZMVM es común la presencia de inversiones térmicas por radiación. La época seca fría (noviembre, diciembre, enero y febrero) se caracteriza por registrar un mayor número de inversiones térmicas y en la época de lluvias disminuye su presencia (Gráfica 5).

**Gráfica 5. Número de inversiones térmicas (IT) mensuales 1990-2005 en la ZMVM**



• **Precipitación pluvial y humedad relativa.** Para algunos autores el clima puede clasificarse como seco y húmedo en función de un límite de 70% en el contenido de humedad del aire. De esta forma el clima de la República Mexicana sería húmedo en la tierra caliente, moderadamente húmedo en la templada y seco en la tierra fría (<http://biblioweb.dgscs.unam.mx/libros/medica/index.html>).

Jáuregui (2000) define a la humedad relativa como la relación que existe entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y el máximo que puede contener a una cierta temperatura. Este parámetro meteorológico puede presentar variaciones importantes a lo largo del día (Informe Climatológico 2004, SMA-GDF).

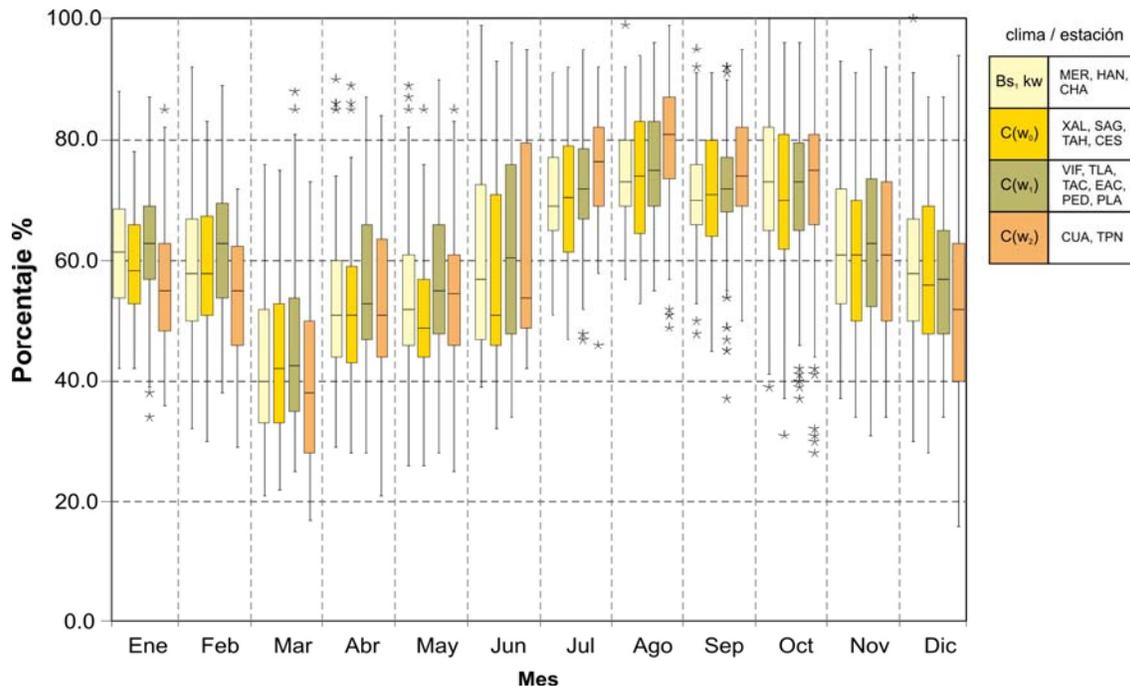
En la ZMVM la incidencia de una mayor humedad relativa y la presencia de lluvias se asocia con la afluencia de vientos alisios con alto contenido de humedad, la cual se inicia generalmente en el mes de mayo y concluye en octubre (Informe Climatológico 2004, SMA-GDF). Jáuregui (2000) menciona que la humedad ha decrecido en el norte de esta urbe y que las lluvias se han intensificado en el poniente.

A lo largo del día los valores máximos de humedad se registran en las primeras horas de la mañana y durante la noche, cuando se presentan los valores mínimos de temperatura. Los registros de humedad son mayores cerca de la zona montañosa del suroeste, a causa del flujo de aire con vapor de agua provocado por la cubierta vegetal de la zona (Informe Climatológico 2004, SMA-GDF).

En las ciudades la temporada de lluvia se asocia con una mejora en la calidad del aire, debido a que funciona como un mecanismo de limpieza conocido como lavado atmosférico. No obstante, la

presencia de contaminantes como el SO<sub>2</sub> y los NO<sub>x</sub>, puede propiciar la formación de compuestos ácidos debido a reacciones químicas que involucran al vapor de agua y la luz solar. Estos ácidos se encuentran en gotas de vapor de agua y pueden absorberse en la superficie de partículas y formar núcleos de condensación (Henry J. G. Heinke G. H., 1989).

**Gráfica 6. Comportamiento de humedad relativa entre las 9:00 y 20:00 hrs, 2005 (valor máximo diario)**



### 3.3 Índice Meteorológico

La variación que presentan las variables meteorológicas dificulta el diagnóstico integral de su situación en una región como la ZMVM, por esta razón se pretende generar un índice meteorológico (IM) para inferir sobre las variaciones que tienen en conjunto estas variables. Se espera que este IM refleje la presencia de las épocas húmeda (junio a octubre), Seca-Caliente (marzo a mayo) y Seca-Fría (noviembre a febrero), que caracterizan a la ZMVM.

El antecedente a este IM es el trabajo de Cicero (2004), quien propone un IM definido con 4 categorías a partir del valor mínimo y la mediana de los registros de velocidad del viento, y el valor máximo y mínimo de los registros de temperatura. El propósito de su IM es analizar el efecto de las condiciones meteorológicas de la Ciudad de México en la tendencia del ozono.

La información de cada variable meteorológica se integra en el índice de forma categórica de acuerdo con su comportamiento diario, mientras que al agregar la información mensualmente se intenta identificar su variabilidad a lo largo del año.

El proceso para obtener el IM en este trabajo se desarrolló de la siguiente forma:

• **Caracterización del comportamiento de los parámetros meteorológicos en la región.**

Esta caracterización deriva del análisis del comportamiento de los parámetros meteorológicos explicado previamente en el apartado 3.2 de este capítulo, destacando la variación que presentan según la época del año, sobre todo la temperatura y la humedad.

• **Definición y obtención de indicadores<sup>16</sup> para el IM.** Para los fines del presente reporte se consideró en la integración del IM a la temperatura y la humedad relativa, y se definieron como indicadores a su valor máximo y mínimo diario en dos horarios (9:00 a 20:00 hrs y de 21:00 a 8:00 hrs del día siguiente). En total se emplean 4 indicadores para cada una de estas variables meteorológicas.

En cuanto a la velocidad del viento, debido al comportamiento horario que presenta se consideraron tres momentos del día (8:00 a 13:00 hrs; 14:00 a 22:00 hrs; 23:00 a 7:00 hrs del día siguiente). También se incorporó al IM la información de precipitación pluvial y como indicador el total diario de precipitación.

Para cada indicador se establecen categorías conforme a lo siguiente:

viento		
escala	intervalo (m/s)	categoría
1	≤ 0.277	Calma
2	(0.277 - 1.666]	Ventolina
3	(1.666 - 3.333]	Brisa muy débil
4	(3.333 - 5.55]	Brisa débil
5	(5.55 - 8.055]	Brisa moderada
6	(8.055 - 10.83]	Brisa fresca
7	(10.83 - 13.611]	Brisa fuerte
8	(13.611 - 16.94]	Viento fuerte
9	(16.94 - 24.5]	Viento duro
10	≥ 24.5	Temporal, Huracán, etc.

temperatura		
escala	intervalo (°C)	categoría
1	≤ 2.5	Helada
2	(2.5 - 10]	Frío
3	(10 - 15]	Fresco
4	(15 - 20]	Ligeramente fresco
5	(20 - 25]	Templado
6	(25 - 30]	Calor ligero
7	(30 - 35]	Calor
8	(35 - 40]	Mucho Calor
9	≥ 40	Bochornoso

humedad		
escala	intervalo (%)	categoría
1	≤ 30	Seco
2	(30 - 50]	Moderado
3	(50 - 70]	Aire Húmedo
4	(70 - 100]	Suficiente para Lluvia
5	=100	Saturado

precipitación		
escala	intervalo (mm)	categoría
1	≤ 2.5	Ligera
2	(2.5 - 7.5]	Moderada
3	≥ 7.5	Fuerte

<sup>16</sup> Algunos indicadores propuestos son: para la temperatura y humedad relativa se obtiene el valor del máximo, mínimo y mediana diaria; para el viento se obtiene la mediana en 3 intervalos de horas: 22 hrs (día anterior) a 10 hrs, de 11 a 13 horas y de 14 a 21 horas. Para la precipitación se considera la precipitación promedio diaria.

En la obtención de indicadores de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, se consideró la información de la REDMET del SIMAT correspondiente al período 2001-2005. en el caso de precipitación pluvial, se utilizó la información del Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

• **Obtención del índice**<sup>17</sup>. Finalmente, se obtiene el IM conforme los siguientes pasos:

**Paso 1.** Por medio del método de clasificación denominado Análisis de Cluster de las “k” medias, se identifican los indicadores similares y los agrupa. El número de grupos “k” los designa el analista, en la obtención del IM de este trabajo se evaluó k = 12, 9, 8, 7, 6, 5, 4 y 3.

**Paso 2.** A continuación se empleó el análisis de discriminantes para explicar la asociación (eficiencia) de los indicadores obtenidos en el paso previo, además de grupos adicionales considerando el mes del año y las épocas climáticas (seca-fría, seca- caliente y lluvias). El resultado de este análisis indica que el grupo con “k” = 4, representa la mayor asociación (88.4%) de los indicadores que se incorporaron.

grupo	eficiencia	grupo	eficiencia
Grupo de 12	85 %	Grupo de 5	83.3 %
Grupo de 9	80.8 %	Grupo de 4	<b>88.4 %</b>
Grupo de 8	80.4 %	Grupo de 3	85.7 %
Grupo de 7	87.4 %	Grupo por época	<b>76.9 %</b>
Grupo de 6	85.4 %	Grupo por mes	26.2 %

**Paso 3.** A partir del resultado del paso 2, se revisan las características de los indicadores agrupados por medio del análisis de árbol de clasificación<sup>18</sup> y regresión (CART). Este método considera un conjunto de registros con variables respuesta (categórica o continua), en este caso el grupo obtenido mediante el método Cluster, y variables explicativas (indicadores). Estos registros se examinan y se agrupan conforme a sus características (mejor regla de clasificación), lo que permite conformar la estructura del árbol de decisiones.

El resultado del CART (Tabla 7) indica que la asignación de los indicadores a cada una de las 4 categorías es eficiente (en el CART se emplea el término “bondad”).

**Tabla 7. Clasificación de indicadores mediante CART**

Categoría A	Categoría B	Categoría C	Categoría D	Promedio
99.04 %	95.78 %	96.72 %	97.37 %	<b>97.23 %</b>

<sup>17</sup> En comunicación personal con el Dr. Cicero-Fernández, recomienda que para mejorar el índice, es necesario incluir más parámetros meteorológicos, que influyen en la formación del ozono y sugirió el uso de métodos estadísticos mas sofisticados como: el “Árbol de Regresión y Clasificación” (CART, por sus siglas en inglés), técnicas de regresión logística, análisis de cluster, etc. para formar las categorías del índice.

<sup>18</sup> Se define un árbol de clasificación como un arreglo en forma de árbol en el que las ramas representan conjuntos de decisiones.

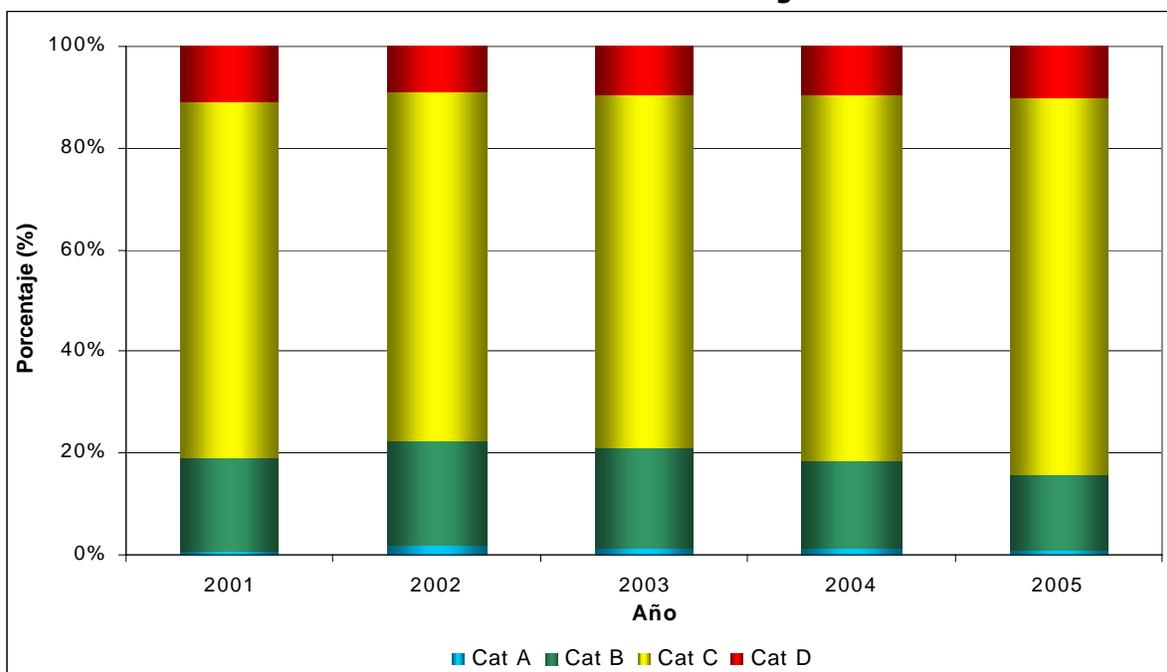
La revisión de las características de las categorías del IM obtenidas mediante el CART, indican que éstas son congruentes con el conocimiento existente de los fenómenos meteorológicos, por ejemplo, la categoría B ilustra lo que sucede durante la temporada de estiaje en la ZMVM, con temperaturas máximas extremas, escasa precipitación pluvial y humedad relativa baja.

**Tabla 8. Características de los grupos del IM formado mediante el CART**

Categorías	Tm_max	Tm_min	Hr_min	Hr_max	Ws1	Ws2	Ws3	Ppt
<b>A</b>	15 - 25°C	10- 15 °C	50- 70%	70 - <100%	3.33 – 8.05 m/s	5.55 – 8.05 m/s	3.33 – 5.55 m/s	
<b>B</b>	20 – 30°C		< 30	< 30	1.66 – 5.55 m/s	5.55 – 10.83 m/s		< 2.5 mm
<b>C</b>	20 – 30°C	10 – 15°C	< 50	70 - <100%	0.27 – 1.66 m/s	3.33 – 5.55 m/s		
<b>D</b>	15 – 20°C	2.5 – 15°C	30 – 70%	70 - <100%	1.66 – 3.33 m/s	3.33 – 5.55 m/s	1.66 – 3.33 m/s	

- **Obtención del IM anual.** Finalmente, se caracterizan las condiciones meteorológicas en la ZMVM por medio del IM, para cada uno de los años del período 2001 - 2005. Se puede señalar de forma general, que en estos 5 años ha prevalecido un mayor porcentaje de días con condiciones meteorológicas definidas por la categoría C.

**Gráfica 7. Caracterización de las condiciones meteorológicas anuales mediante el IM**



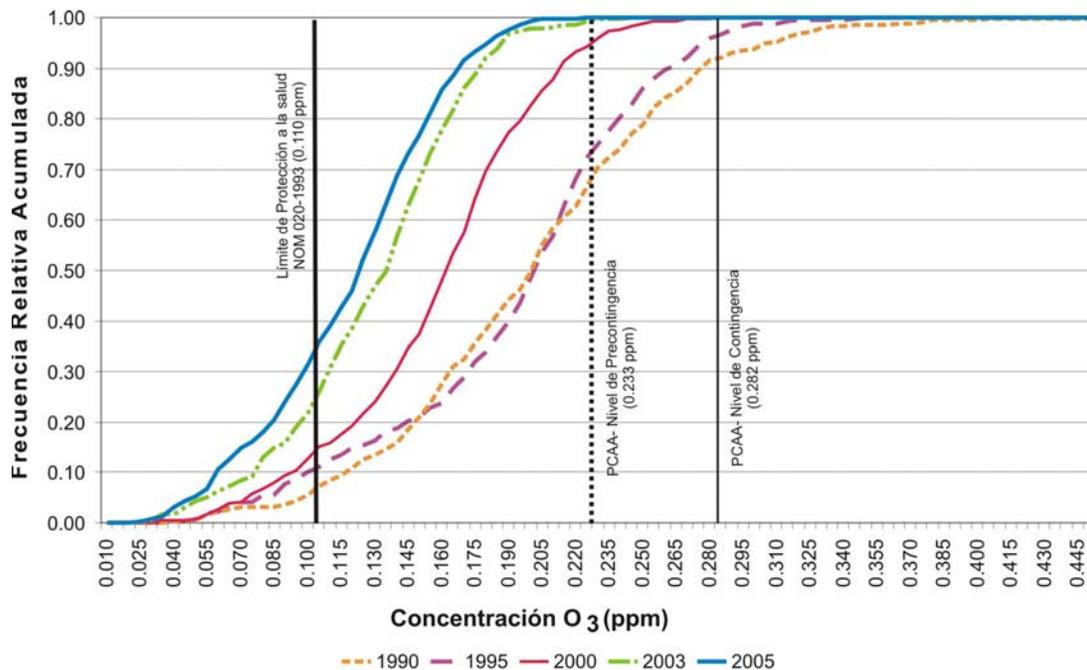
## 4 OZONO Y ÓXIDOS DE NITRÓGENO

En el Proaire 2002 – 2010 se señala que el posible cumplimiento de los límites permisibles que establece la NOM de ozono en el año 2010, requiere reducir en más de un 70% las emisiones de sus precursores, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos. Esta visión de largo plazo se debe en parte a los altos costos económicos y sociales que implica el abatimiento de contaminantes como el ozono. En este programa se prevé que la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno<sup>19</sup> y los compuestos orgánicos volátiles<sup>20</sup> permitiría alcanzar gradualmente las siguientes metas:

- Una reducción general de las concentraciones de ozono para el año 2010
- Eliminar las concentraciones de ozono superiores a 0.233 ppm (200 puntos del IMECA)
- Reducir el número de días con concentraciones de ozono en el intervalo de 0.111 a 0.233 ppm (101 a 200 puntos del IMECA)
- Aumentar el número de días con concentraciones de ozono inferiores al límite que señala la NOM (0.11 ppm)

La primera de estas metas se evalúa cualitativamente por medio del comportamiento de la frecuencia acumulada anual de las concentraciones de ozono (Gráfica 8). En el año 2005 (línea azul continua) la frecuencia indica que no se excedieron los umbrales de precontingencia y contingencia ambiental del PCAA, y que hubo una mayor frecuencia de días con concentraciones debajo del nivel de la NOM, aunque aún se acumula cerca del 60% de los registros entre 0.111 a 0.233 ppm.

**Gráfica 8. Función de distribución de las concentraciones máximas diarias de ozono en la ZMVM**



<sup>19</sup> Emisiones de industrias y vehículos automotores.

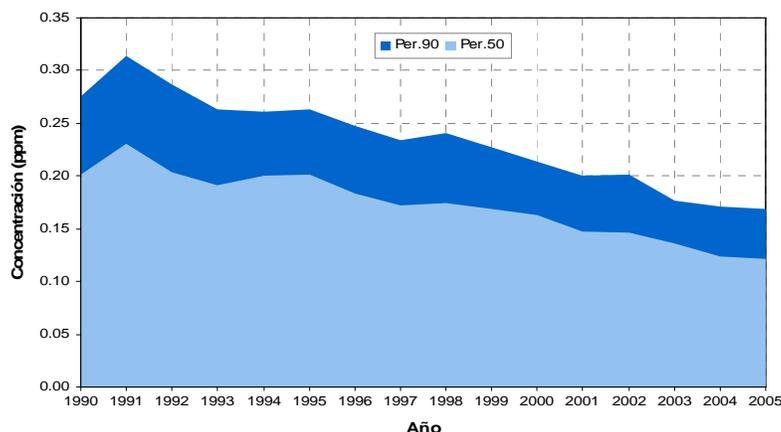
<sup>20</sup> Emisiones provenientes del uso de combustibles y productos orgánicos en los sectores del transporte, la industria, servicios y doméstico.

#### 4.1 Análisis de tendencia y movilidad

El análisis de tendencia del ozono de 1990 a 2005 (Figura 4), aporta la siguiente información:

- ☺ 14 estaciones de monitoreo<sup>21</sup> del SIMAT se califican con "mejor" desempeño histórico.
- ☺ En las 14 estaciones la tendencia de las concentraciones máximas de 1990 a 2005, evaluadas por medio del percentil 90 (per. 90), es decreciente.
- ☺ Se estima que en la estación Pedregal (PED) se presenta el mayor decremento año con año, el cual se estima en 0.0112 ppm. El mínimo corresponde a la estación Tlalnepantla, con 0.0039 ppm.
- ☺ En las 14 estaciones la tendencia de las concentraciones típicas de 1990 a 2005, evaluadas por medio del percentil 50 (per. 50), es decreciente.
- ☺ El mayor decremento año con año del indicador percentil 50, ocurrió en la estación plateros (PLA).

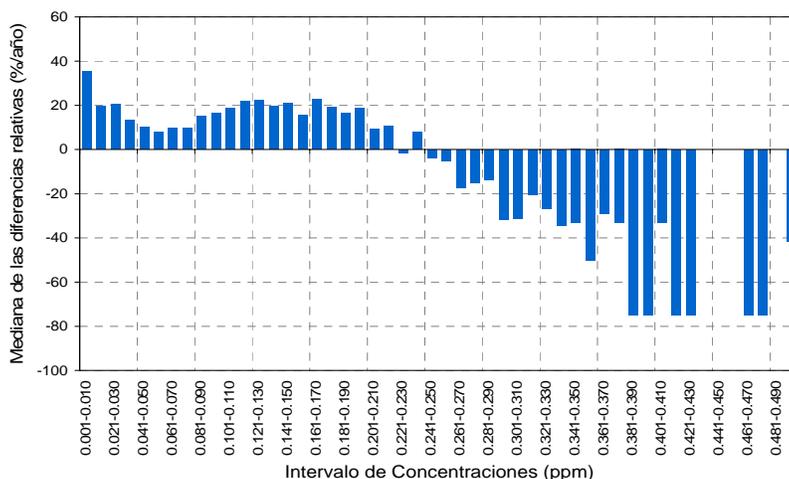
**Figura 4. Análisis de tendencia del ozono en la ZMVM, 1990–2005**



indicador	número de estaciones	% de cambio		m de cambio	
		mín.	máx.	mín.	máx.
per. 90	14	28	46	0.0039	0.0112
per. 50	14	30	50	0.0026	0.0086

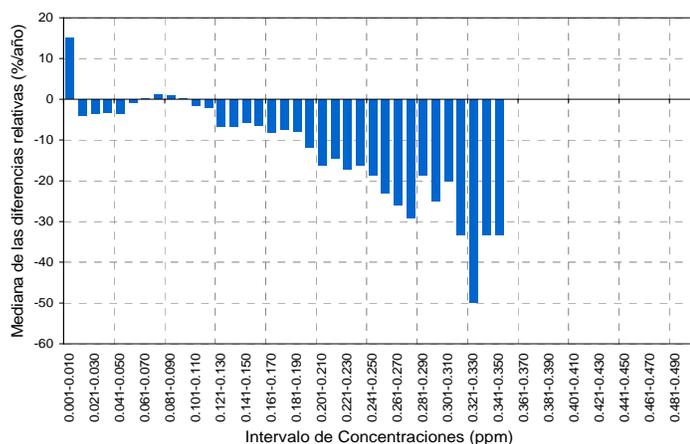
**Figura 5. Análisis de movilidad (efecto pistón) en las concentraciones de ozono en la ZMVM  
Período 1990 – 1994**

- ☺ El análisis de movilidad indica que en el período 1990–1994 el decremento del ozono fue constante y que las concentraciones mayores al final del período fueron de 0.240 ppm.
- ☺ A lo largo del período 1995 continuaron decreciendo las concentraciones, aunque se presentaron valores mayores a 0.240 ppm al inicio del período,
- ☺ Finalmente, en el período 2001-2005 continuó su disminución y los registros mayores fueron de 0.290 ppm.

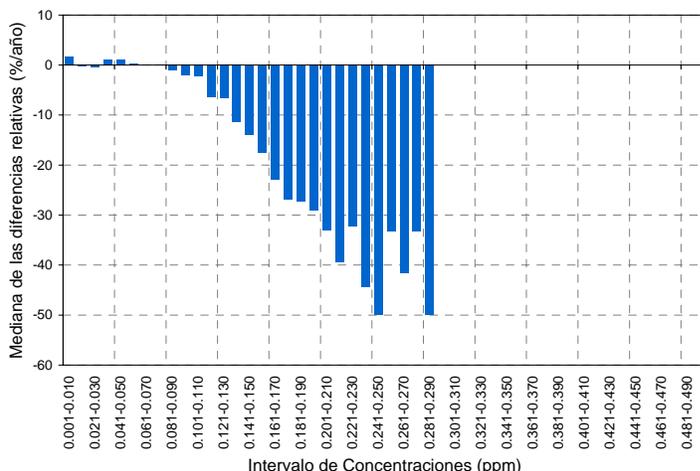


<sup>21</sup> TAC, TLA, XAL, MER, PED, CES, HAN, BJU, PLA, LAG, AZC, UIZ, TAX y SUR.

**Período 1995 – 2000**



**Período 2001 – 2005**

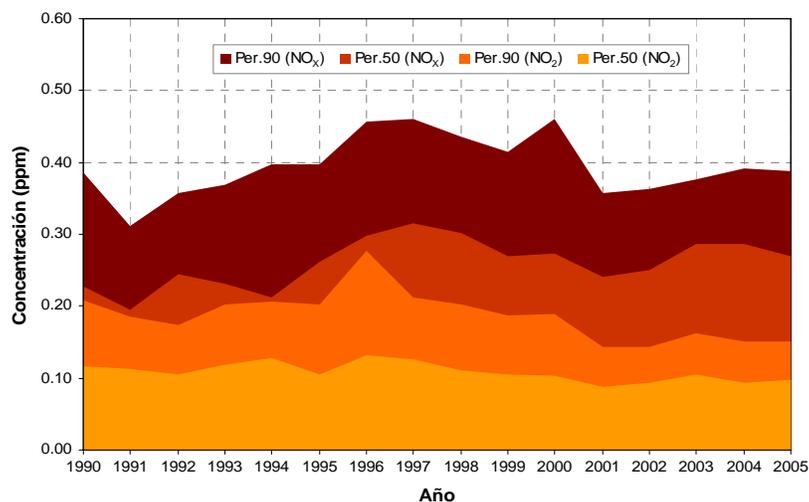


En el caso de los óxidos de nitrógeno (Figura 6), el análisis de tendencia permite señalar lo siguiente:

☺ 16 estaciones<sup>22</sup> del SIMAT que registran NO<sub>2</sub> y 15 estaciones<sup>23</sup> que registran NO<sub>x</sub>, se califican con “mejor desempeño histórico”.

☹ En 13 de las estaciones que registran NO<sub>2</sub> se estima que una tendencia decreciente de las concentraciones altas (percentil 90), sin embargo ésta no es significativa estadísticamente. En 2 de estas estaciones se estima que la tendencia es creciente.

**Figura 6. Análisis de tendencia para NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en la ZMVM, 1990–2005**



NO <sub>2</sub> estaciones con tendencia decreciente					
indicador	número de estaciones	% de cambio		m de cambio	
		mín.	máx.	mín.	máx.
per. 90	13	11	45	0.0006	0.0038
per. 50	9	9	39	0.0005	0.0025
NO <sub>x</sub> estaciones con tendencia decreciente					
per. 90	4	10	35	0.0024	0.0055
per. 50	4	14	38	0.0020	0.0036

☹ Al evaluar la situación de las concentraciones típicas de NO<sub>2</sub>, en 9 estaciones se estima una tendencia decreciente, no obstante en 4 de éstas la tendencia no es significativa estadísticamente.

<sup>22</sup> TAC, EAC, SAG, TLA, XAL, MER, PED, CES, HAN, BJU, PLA, LAG, AZC, UIZ, TAX y SUR.

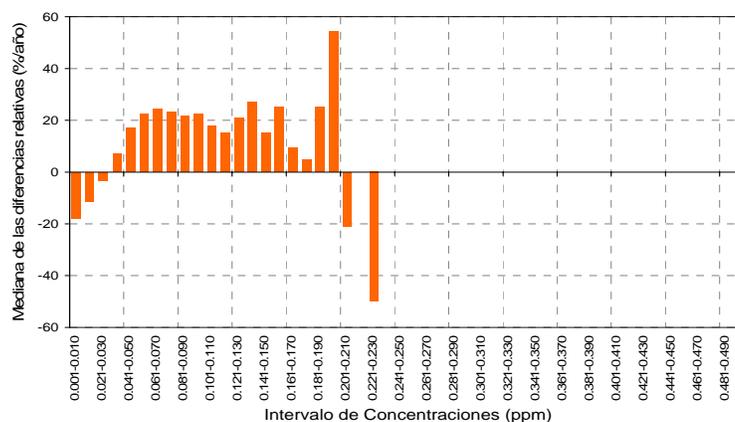
<sup>23</sup> TAC, EAC, SAG, TLA, MER, PED, CES, HAN, BJU, PLA, LAG, AZC, UIZ, TAX y SUR.

En 6 estaciones no se aprecia tendencia y en la estación UIZ se presenta una tendencia creciente.

- ☹ Las concentraciones altas (percentil 90) y típicas (percentil 50) de NOx presentan una tendencia decreciente significativa sólo en 4 estaciones (MER, PED, EAC y HAN)
- ☹ En el caso de las estaciones TLA, SAG, LAG, UIZ y SUR, ambos indicadores (percentil 90 y 50) presenta una tendencia creciente.

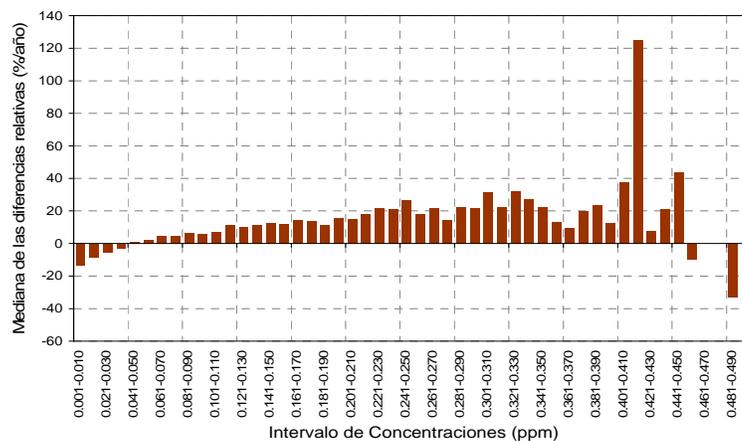
**Figura 7. Análisis de movilidad (efecto pistón) del NO<sub>2</sub> en la ZMVM, 2001 – 2005**

- ☺ El análisis de movilidad de NO<sub>2</sub> para el período 2001–2005, indica que disminuyó gradualmente la magnitud de sus concentraciones, las cuales llegaron a ser de 0.200 ppm. También se aprecia que aumentaron las concentraciones menores a 0.030 ppm.
- ☺ Esto contrasta con el período 1995–2000, en el que se registraron concentraciones de hasta 0.040 ppm.



**Figura 8. Análisis de movilidad (efecto pistón) de NOx en la ZMVM, 2001 – 2005**

- ☺ En el caso de la movilidad de los NOx, en el período 2001–2005 se aprecia un aumento de la frecuencia de concentraciones menores a 0.050 ppm.
- ☹ A pesar de lo anterior, en este período también hubo un aumento gradual de las concentraciones, principalmente en el intervalo de 0.160 y 0.450 ppm, mientras que en el período 1995-2000 se habían presentado decrementos en este mismo intervalo.



## 4.2 Análisis de estado

La NOM de salud ambiental para ozono define dos criterios para proteger la salud de la población más susceptible (Tabla 8). Al analizar el estado de la calidad del aire en la ZMVM con relación a estos criterios, se aprecia lo siguiente:

- ☹ Aunque el valor de ambos criterios ha decrecido gradualmente a lo largo del período 1990 – 2005 (Gráfica 9), aún superan los recomendados para protección de la salud. En el caso del criterio de 0.11 ppm, el valor del indicador de referencia (2º máximo anual) prácticamente lo duplica.

**Tabla 8. Norma Oficial Mexicana, salud ambiental, de ozono y dióxido de nitrógeno**

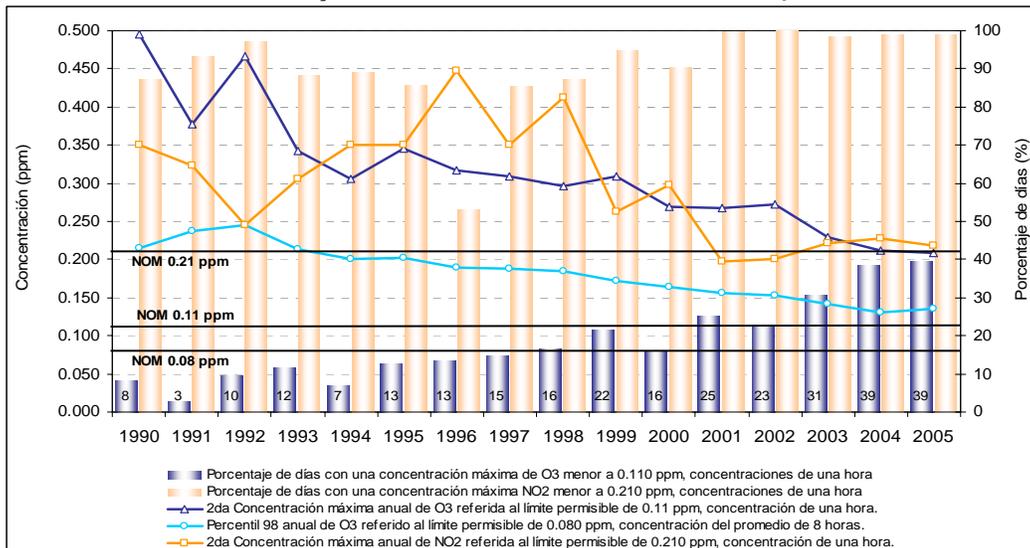
contaminante (NOM)	exposición aguda		exposición crónica
	concentración y tiempo promedio	frecuencia máxima aceptable	concentración y tiempo promedio
ozono (modificación a la NOM-020-SSA1-1993 <sup>a</sup> )	0.11 ppm (1 hora)	1 vez al año	
	0.08 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	4 veces al año	
dióxido de nitrógeno (NOM-037-ECOL-1993 <sup>b</sup> )	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	-----

<sup>/a</sup> Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 30 de octubre de 2002

<sup>/b</sup> Publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 23 de diciembre de 1994

- ☺ Con relación al número de días en que se "cumple" con el valor del criterio de 0.11 ppm, como otro indicador de estado, se aprecia un aumento continuo de su frecuencia desde 1992 y alcanzando en el año 2005 la mayor frecuencia de días desde 1990, con 144 días que representan el 39.5% (Gráfica 9).
- ☺ En el año 2005 el promedio de horas al día con valores superiores a este criterio descendió a 2.2 horas. Comparativamente, en 1991 sólo en el 3% se cumplió con este criterio y el promedio fue de 6.6 horas.
- ☺ En el caso del NO<sub>2</sub> el número de días en que se cumple con el valor del criterio de 0.21 ppm ha aumentado de forma importante (Gráfica 9). En los últimos dos años esta frecuencia equivalió al 99.4% y en 2002 prácticamente fue del 100%.

**Gráfica 9. Estado y tendencias del ozono en la ZMVM, 1990 – 2005**



- ☺ El decremento que presentan las concentraciones máximas de ozono asociadas con el límite permisible de 0.11 ppm, ha permitido que el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) no se active en los últimos años (Tabla 9). La última ocasión en que se instrumentó el PCAA por concentraciones altas de ozono fue el 18 de septiembre del 2002, cuando se registró

una concentración superior a 0.282 ppm (equivale a 240 puntos del IMECA).

**Tabla 9. Casos de Precontingencias y Contingencias Fase I y Fase II para O<sub>3</sub> en la ZMVM, bajo el esquema del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas elaborado en 1998**

fase del PCAA	1990	1991	1992	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005
precontingencia de O <sub>3</sub>	78	217	167	147	24	14	9	2	0	0
contingencia Fase I de O <sub>3</sub>	—	2	4	5	0	0	1	0	0	0
contingencia de O <sub>3</sub> y PM <sub>10</sub>	—	—	—	—	0	0	0	0	0	0
contingencia Fase II de O <sub>3</sub>	—	1	4	0	0	0	0	0	0	0

Nota: antes de 1998 no se aplicaba la fase de precontingencia, para los años 1990 a 1997 se obtuvieron como el conteo de días con valores entre 0.234 y 0.294 ppm (equivalente a 201 y 250 puntos IMECA, respectivamente)

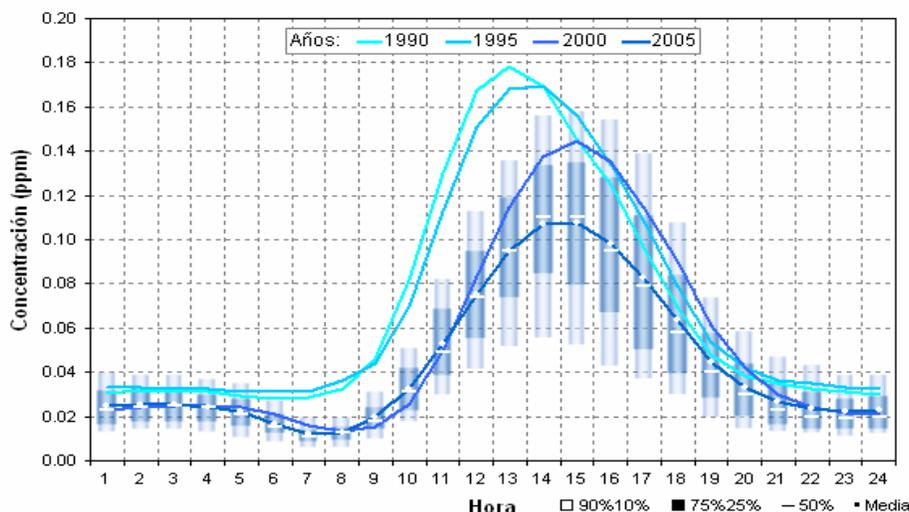
**El ozono puede provocar inflamación de los pulmones, capacidad pulmonar disminuida y síntomas como tos, dolor de pecho y falta de aire. La exposición de corto plazo a concentraciones de ozono se ha asociado con la exacerbación del asma, la bronquitis y enfermedades respiratorias que conducen al enfermo a la sala de urgencias y la hospitalización (EPA, 2003).**

### 4.3 Evaluación del riesgo por exposición a ozono en la ZMVM

La exposición a contaminantes atmosféricos puede interpretarse como el producto del tiempo que un individuo permanece en un lugar con concentraciones de un contaminante (Santos, 1998) y como una situación de riesgo que se produce en un tiempo y región determinada (Blaikie, 1996). El riesgo que representa para los habitantes de la ZMVM la contaminación atmosférica, radica en la posibilidad de causar algún efecto en su salud como resultado de la intensidad que alcanzan las concentraciones de contaminantes y del tiempo de exposición, de su variación temporal o espacial, además de las características socioeconómicas de las personas.

La evolución del comportamiento diario del ozono en la ZMVM, muestra que la intensidad de las concentraciones han disminuido de forma importante a lo largo del período 1990 – 2005, y que el tiempo de exposición se mantiene entre las 12:00 y 16:00 horas (Gráfica 10).

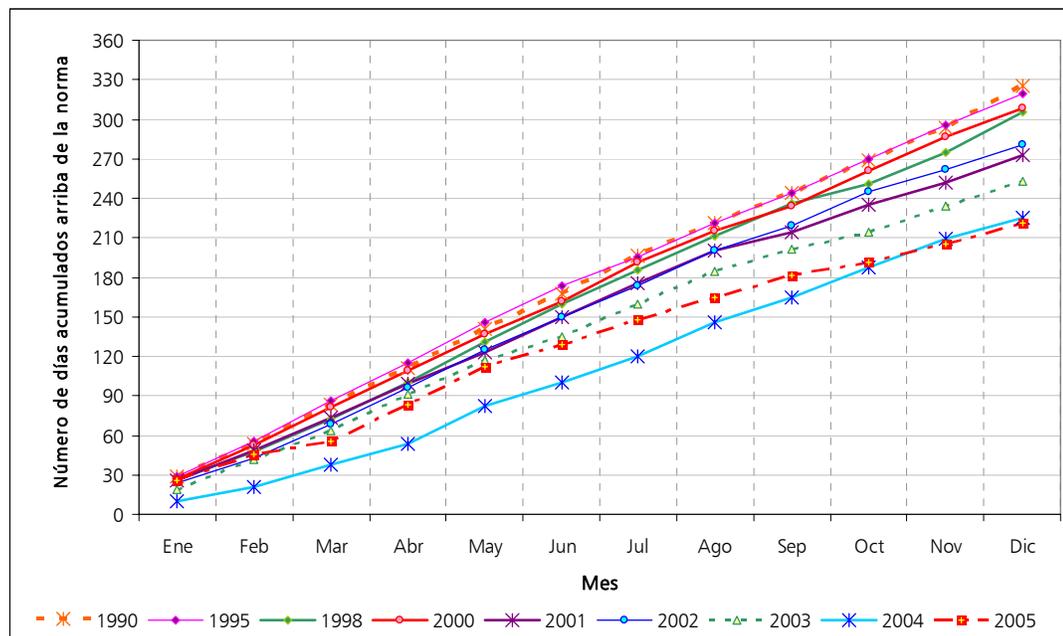
**Gráfica 10. Comportamiento diario del ozono en la ZMVM, 1990 – 2005**



A lo anterior se adiciona la frecuencia diaria con que se excede la NOM de 0.11 ppm. El análisis de esta frecuencia de forma acumulada mensual, muestra que ésta tiene un comportamiento lineal ascendente a lo largo de cada año, es decir, que esta frecuencia tiene cierta constancia mensual. En el caso de los años 2003 y 2005 resalta que en el mes de septiembre hay una ligera inflexión descendente de esta frecuencia debido a una mejoría en las condiciones de calidad del aire.

Es importante aclarar que aún con las reducciones que se aprecian en esta frecuencia a lo largo de los años, esto es un indicativo del posible riesgo por exposición durante períodos prolongados a concentraciones que superan o están cercanas a los límites permisibles y pueden tener consecuencias a largo plazo en la salud de las personas o en su calidad de vida.

**Gráfica 11. Frecuencia acumulada de días con excedencias a la NOM de ozono en la ZMVM, 1990 – 2005.**



**Los efectos a la salud asociados con la exposición pueden ser síntomas como la irritación ocular, molestias en la garganta y dolor de cabeza, hasta crisis asmáticas o el aumento en las tasas de morbilidad y mortalidad prematura. La atención médica o pérdida de días de trabajo asociados a esta situación implican costos económicos.**

En el estudio de efectos a la salud humana asociados por la exposición a ozono, existe un especial interés por evaluar de mejor forma el riesgo que tienen los niños y los ancianos. La vulnerabilidad de los niños se asocia con la dosis que reciben, ya que tienen un ritmo de respiración superior a los adultos, además de que su organismo está en desarrollo y su sistema inmunológico es inmaduro. Las estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) indican que 5 millones de niños mueren al año a nivel mundial, por enfermedades relacionadas con la contaminación del aire (WHO, 2002).

Ante este escenario la Comisión de Cooperación Ambiental (CCA) señala la importancia de estimar el impacto que tiene la contaminación por ozono en los niños que viven en áreas donde se exceden las normas de calidad del aire (CCA, 2006). En el caso de la ZMVM, se estima que en las condiciones actuales de contaminación representan un riesgo para la población, de la cual 5 millones son niños y representan al 30% de la población total (INEGI 2000).

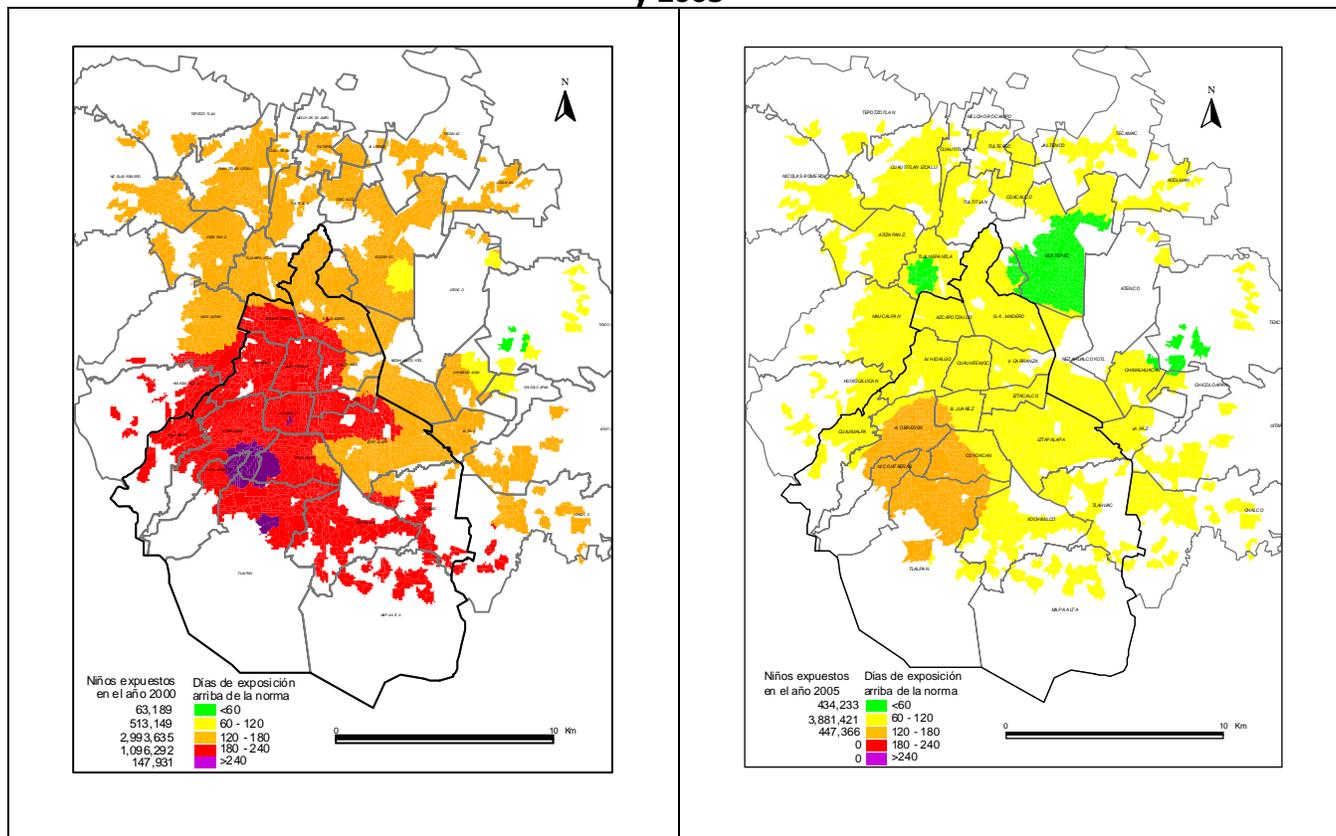
**La exposición infantil a ozono se relaciona con diversos síntomas, que van desde la simple irritación ocular y nasal hasta la posibilidad de agravar los síntomas de enfermedades crónicas como el asma, en el caso de la población infantil este problema se incrementa por la necesidad que tiene su organismo de obtener un mayor volumen de aire respecto a su peso, por lo que la dosis respirada es superior a la de un adulto.**

La estimación del indicador de exposición infantil por ozono en la ZMVM, conforme a los lineamientos de la CCA, se obtuvo para los años 2000 y 2005. Como información de contaminación atmosférica se empleó la frecuencia de excedencias a la NOM en cada estación del SIMAT, y como información de población la obtenida durante el Censo General de Población y Vivienda del año 2000, y las proyecciones realizadas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO 2000). De esta forma se relaciona la distribución espacial de la población menor a 15 años y la interpolación de la frecuencia de excedencias a la NOM.

Los resultados para el año 2000 indican que en toda la ZMVM se presentaron excedencias a la NOM de ozono y se infiere que el 100% de los niños tuvieron la probabilidad de exponerse. De este análisis destaca que cerca de 150 mil niños con residencia en la región suroeste, pudieron exponerse durante 240 días o más a concentraciones que superaron la NOM, mientras que en las regiones restantes donde se concentraron cerca de 4.8 millones de niños se superó la NOM al menos en 60 días (Mapa 10).

La mejora de la calidad del aire por ozono se refleja en la estimación de este indicador en el año 2005, no obstante la menor frecuencia de 60 días sólo aparece en algunas partes de la región noreste donde habitan cerca de 450 mil niños, mientras que en el área geográfica donde se excede entre 60 y 120 días habitan 3.9 millones de niños y en el suroeste donde se excede la NOM entre 120 y 157 días, y se concentran 440 mil niños (Mapa 10).

**Mapa 10. Población infantil expuesta a concentraciones de ozono superiores a la NOM, 2000 y 2005**



## 5 MONÓXIDO DE CARBONO

El Proaire 2002 – 2010 plantea la posibilidad de llevar a cabo una revisión de la NOM de monóxido de carbono y así modificar su límite permisible a 9 ppm, como promedio móvil de 8 horas, en concordancia con los criterios internacionales. De esta forma en este programa se proponen como metas:

- Eliminar las concentraciones de monóxido de carbono que excedan el límite de 9 ppm
- Reducir las concentraciones actuales de monóxido de carbono

### 5.1 Análisis de tendencia

Al analizar la tendencia del monóxido de carbono (Figura 9) se reporta lo siguiente:

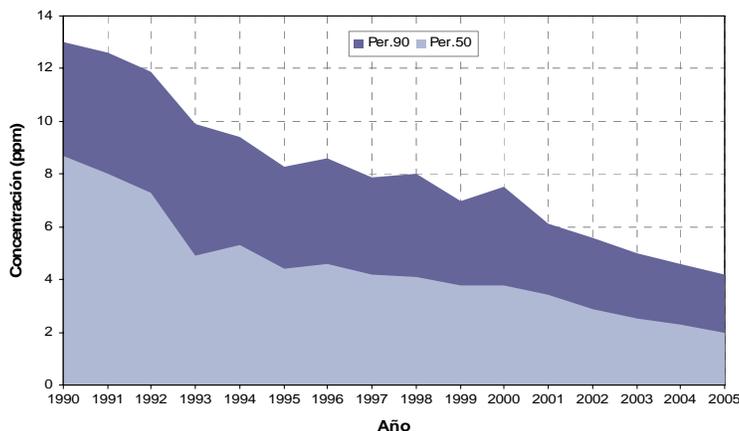
- ☺ 16 estaciones de monitoreo<sup>24</sup> del SIMAT se califican con "mejor" desempeño histórico.
- ☺ En las 16 estaciones la tendencia de las concentraciones máximas (per. 90) y típicas (per. 50) es decreciente a lo largo del período 1990 a 2005. En el caso de las concentraciones máximas, se

<sup>24</sup> LAG, TAC, EAC, TLA, XAL, MER, PED, CES, PLA, HAN, UIZ, BJU, SAG, VAL, AZC y SUR.

estima que su decremento mayor año tras año fue del orden de 0.386 ppm, mientras que las concentraciones típicas decrecieron en alrededor de 0.225 ppm.

☺ Lo anterior indica el cumplimiento de la meta del Proaire 2002-2010 de reducir gradualmente las concentraciones de este contaminante.

**Figura 9. Análisis de tendencia del monóxido de carbono en la ZMVM, 1990–2005**



indicador	número de estaciones	% de cambio		m de cambio	
		mín.	máx.	mín.	máx.
per. 90	16	39	84	0.120	0.386
per. 50	16	44	98	0.080	0.225

## 5.2 Análisis de estado

La Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, establece que la concentración de CO, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de 11 ppm en promedio móvil de 8 horas una vez al año, para la protección a la salud de la población susceptible (Tabla 10).

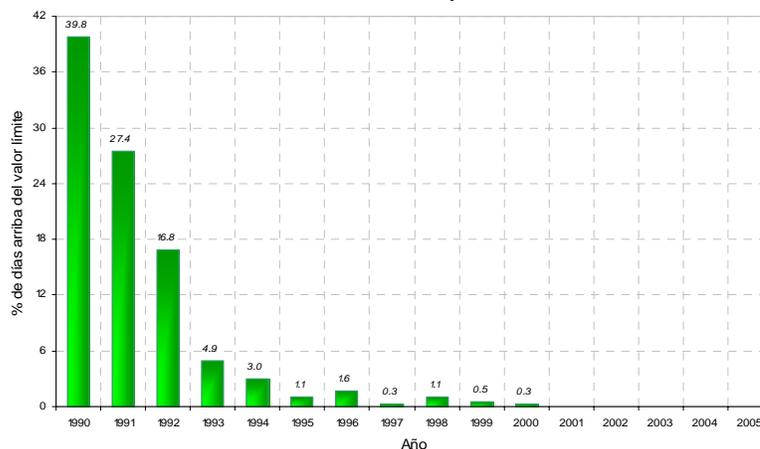
**Tabla 10. Norma Oficial Mexicana, salud ambiental, de monóxido de carbono.**

contaminante (NOM)	exposición aguda		exposición crónica
	concentración y tiempo promedio	frecuencia máxima aceptable	concentración y tiempo promedio
monóxido de carbono (CO) (NOM-021-SSA1-1993) <sup>a</sup>	11 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	1 vez al año	-----

☺ A lo largo del período 2001–2005 se ha cumplido con el límite máximo permisible que señala la NOM (Gráfica 11).

☹ Aún no se ha realizado la reducción del límite permisible de este contaminante conforme lo planeado en el Proaire 2002-2010.

**Gráfica 11. Excedencias diarias al límite de la NOM de CO en la ZMVM, 1990–2005.**



## 6 DIÓXIDO DE AZUFRE

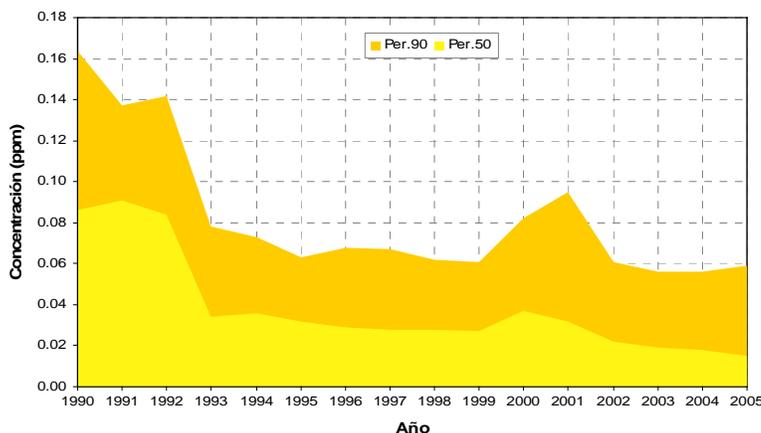
La disminución y control de las concentraciones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en la atmósfera de la ZMVM, se plantean en el Proaire 2002 – 2010 en términos de no exceder los límites que establece la NOM para proteger la salud de la población ante una posible exposición crónica o aguda. Las metas que se proponen en este programa se concretan a:

- Reducir las concentraciones promedio diario
- Reducir la concentración promedio anual
- Evitar la ocurrencia de picos extraordinarios asociados con el uso indebido de combustibles de alto contenido de azufre

### 6.1 Análisis de tendencia

- ☺ 14 estaciones de monitoreo<sup>25</sup> del SIMAT se califican con “mejor” desempeño histórico.
- ☺ En las 14 estaciones la tendencia de las concentraciones máximas (per. 90) y típicas (per. 50) es decreciente a lo largo del período 1990 a 2005.
- ☺ El mayor decremento anual de las concentraciones máximas estimadas (per. 90), corresponde a la estación Xalostoc (XAL) con una estimación de 0.0033 ppm.
- ☹ Es dos estaciones (LAG y BJU) no presenta tendencia.

**Figura 10. Análisis de tendencia del dióxido de azufre en la ZMVM**



1990 – 2005					
indicador	número de estaciones	% de cambio		m de cambio	
		mín.	máx.	mín.	máx.
per. 90	14	15	90	0.0003	0.0033
per. 50	16	36	111	0.0005	0.0020
1993 – 2005					
indicador	número de estaciones	% de cambio		m de cambio	
		mín.	máx.	mín.	máx.
Per. 90	11	15	51	0.0003	0.0012
Per. 50	16	29	83	0.0004	0.0012

- ☺ En el caso de las concentraciones típicas evaluadas por medio del percentil 50, el mayor decremento anual corresponde a la estación La Villa (LVI) con una estimación de 0.0020 ppm.
- ☺ Lo anterior indica el cumplimiento de la meta del Proaire 2002-2010 de reducir gradualmente las concentraciones promedio diario.
- ☺ Al analizar la tendencia entre 1993 a 2005, mediante el percentil 50 y el percentil 90 se obtienen

<sup>25</sup> SUR, TAC, EAC, LVI, AZC, TLA, XAL, MER, PED, CES, ARA, PLA, UIZ y TAX.

porcentajes de decremento menores, esto implica que las concentraciones de SO<sub>2</sub> disminuyen aún cuando se excluye la información registrada de 1990 a 1992.

## 6.2 Análisis de estado

La NOM de SO<sub>2</sub> define como límite de protección a la salud ante eventos de exposición aguda una concentración de 0.130 ppm como promedio de 24 horas una vez al año, y como límite de protección ante eventos de exposición crónica a una concentración de 0.030 ppm como media aritmética anual (Tabla 11).

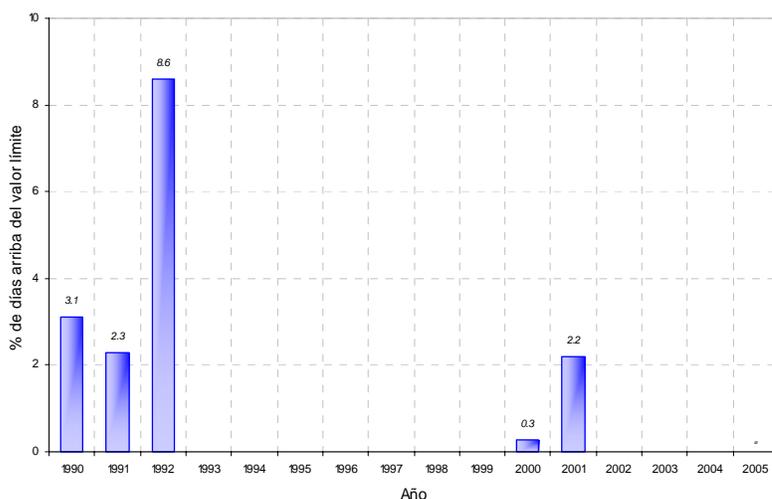
**Tabla 11. Norma Oficial Mexicana, Salud Ambiental, de dióxido de azufre**

contaminante (NOM)	exposición aguda		exposición crónica
	concentración y tiempo promedio	frecuencia máxima aceptable	concentración y tiempo promedio
dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) (NOM-022-SSA1-1993) <sup>/a</sup>	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (promedio aritmético anual)

La evaluación del estado de la calidad del aire en la ZMVM (Gráfica 12) con relación a estos indicadores muestra lo siguiente:

- ☹ 1992 fue el año con el mayor porcentaje de días (8.6%) que superaron la NOM de 0.130 ppm. Las concentraciones máximas en este año se registraron en las estaciones AZC, LPR y XAL.
- ☹ En los años 2000 y 2001, la estación TLA registró en uno y siete días concentraciones superiores a 0.130 ppm, respectivamente.

**Gráfica 12. Excedencias diarias al límite de la NOM de SO<sub>2</sub> en la ZMVM, 1990–2005**



- ☹ Al evaluar el promedio anual se encuentra que en los períodos de 1990 a 1993 y de 2000 a 2001 se rebasó el valor límite de 0.030 ppm (Tabla 12).

**Tabla 12. Promedio aritmético anual (ppm) de SO<sub>2</sub> en la ZMVM, 1990–2005**

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
valor máximo	0.069	0.081	0.072	0.032	0.025	0.023	0.020	0.020	0.018	0.019	0.030	0.036	0.019	0.019	0.017	0.020
valor mínimo	0.040	0.037	0.025	0.012	0.015	0.013	0.012	0.010	0.009	0.008	0.010	0.010	0.007	0.008	0.008	0.007
estaciones que exceden la NOM	11	11	11	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

## 7 PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

En el Proaire 2002-2010 se establece como una prioridad la reducción de los niveles de partículas suspendidas que se registran en la ZMVM, sobre todo las  $PM_{10}$ . En la NOM-025-SSA1-1993, publicada el lunes 26 de septiembre de 2005, se señala que en las últimas décadas la calidad del aire de las principales urbes del país, se ha deteriorado debido a la presencia de las partículas y resalta la importancia de identificar su composición química al momento de evaluar los daños a la salud humana.

El Proaire 2002–2010 establece como metas:

- Aumentar el número de días con concentraciones diarias dentro del límite de la NOM
- Reducir el promedio anual conforme la NOM
- Establecer metas de reducción de las  $PM_{2.5}$

**La medición rutinaria de las  $PM_{2.5}$  en la atmósfera de la ZMVM desde el agosto del 2003, ha permitido conformar una base de datos con registros horarios y con muestreos de 24 horas.**

### 7.1 Análisis de tendencia de PST y $PM_{10}$

En el apartado 2.3 anterior se menciona que en el SIMAT la medición de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se realiza con equipos automáticos que proporcionan información horaria continua, y equipos manuales que proporcionan información de muestreos de 24 horas cada 6 días. Así mismo, se señala que la medición de PST se realiza únicamente con equipos manuales.

Ante esta situación cuando se obtienen los indicadores de tendencia y estado de  $PM_{10}$ , en el SIMAT se emplea la información recopilada por medio de los equipos manuales debido a que son el método de referencia en países como los EUA, además de que se operan en la ZMVM desde 1988 y existen diferencias al comparar sus registros con los obtenidos con equipos automáticos durante el período 1995-2000 (apartado 2.3.2.5). En el caso de las PST, en México es el único tipo de partícula que tiene una norma (NOM-035-ECOL-1993) que establece los métodos de medición y el procedimiento para la calibración de equipos.

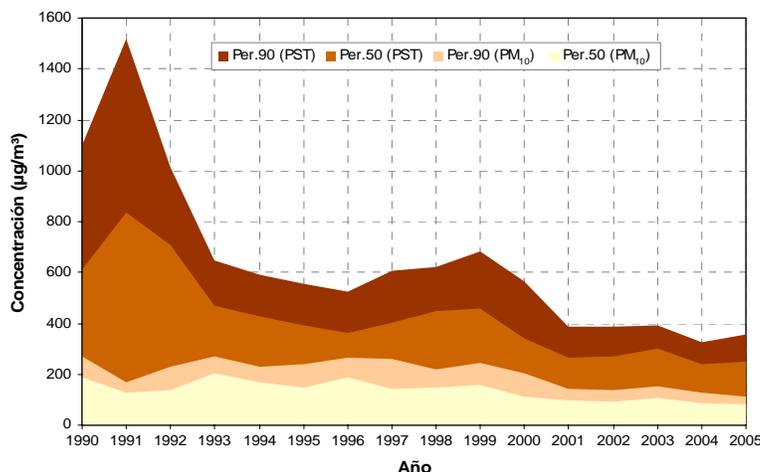
Al considerar estos aspectos, el análisis de tendencia permite señalar lo siguiente:

- ☺ Sólo 6 estaciones de monitoreo<sup>26</sup> que miden PST se califican con "mejor" desempeño histórico.
- ☺ La tendencia de las concentraciones máximas (percentil 90) y típicas (percentil 50) en PST, es decreciente en la mayoría de las estaciones de monitoreo durante el período 1990-2005.
- ☺ El mayor decremento anual de las concentraciones máximas de PST se estimó en  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y en las concentraciones típicas se estimó en  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

<sup>26</sup> TLA, XAL, MER, PED, CES y UIZ.

- ☹ En la estación PED no se detectó presencia de tendencia en las PST en ambos indicadores (percentil 90 y 50).
- 😊 6 de las 7 estaciones de monitoreo<sup>27</sup> que miden PM<sub>10</sub> se califican con “mejor” desempeño histórico.
- 😊 La tendencia de las concentraciones máximas (per. 90) y típicas (per. 50) de PM<sub>10</sub>, es decreciente en la mayoría de las estaciones de monitoreo durante el período 1990-2005.
- 😊 Se estima que el mayor decremento anual de las concentraciones máximas de PM<sub>10</sub> fue 10 µg/m<sup>3</sup> y en las concentraciones típicas de 7 µg/m<sup>3</sup>.
- ☹ En la estación NTS no se detectó presencia de tendencia en las PM<sub>10</sub> en ambos indicadores (per. 90 y per. 50).

**Figura 11. Análisis de tendencia de PST y PM10 en la ZMVM, 1990–2005**



PM <sub>10</sub> estaciones con tendencia decreciente					
indicador	número de estaciones	% de cambio		m de cambio	
		mín	máx.	mín.	máx.
per. 90	5	35	56	2	10
per. 50	5	32	55	1.6	7
PST estaciones con tendencia decreciente					
per. 90	6	27	133	5.2	21
per. 50	9	24	126	3	16

**Tabla 13. Instrumentación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas para PM<sub>10</sub>**

fase del PCAA	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
precontingencia de PM <sub>10</sub>	4	0	3	0	0	1	0	1
contingencia Fase I de PM <sub>10</sub>	1	0	1	0	0	1	0	1
contingencia de O <sub>3</sub> y PM <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
contingencia Fase II de PM <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0

Estimados bajo el esquema del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas elaborado en 1998.

**En la época seca la intensidad del viento provoca la presencia de tolvaneas en la ZMVM, no obstante la repastización de los suelos erosionados ha reducido la incidencia de éstas, al menos las provenientes del noreste de la ciudad donde se localiza la reserva del Plan de Texcoco (Jáuregui, 2000).**

## 7.2 Análisis de estado de las PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

El 26 de septiembre del 2005 se publicó en el Diario Oficial de la Federación una modificación a la NOM-025-SSA1, con la cual se prevé proteger la salud de la población susceptible. Esta modificación

<sup>27</sup> TLA, XAL, MER, PED, CES y NTS.

consistió en integrar los criterios para evaluar la exposición aguda y crónica ante PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, y reducir el valor de los límites permisibles (Tabla 14). Cabe señalar que la Organización Mundial de la Salud (OMS) reporta que no hay un límite seguro para evitar los efectos nocivos de las partículas, por lo que se recomienda disminuir sus concentraciones tanto como sea posible.

**Tabla 14. Norma Oficial Mexicana, salud ambiental, de partículas en suspensión**

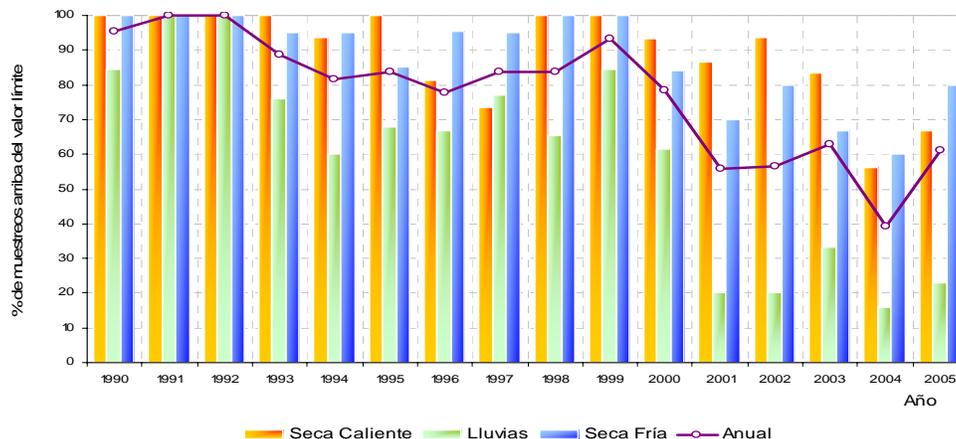
tipo de partículas	exposición aguda		exposición crónica
	concentración y tiempo promedio	frecuencia	concentración y tiempo promedio
partículas suspendidas totales NOM-024-SSA1-1993 Modificación a la NOM-025-SSA1-1993	260 µg/m <sup>3</sup> (24 horas) 210 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	una vez al año una vez al año	75 µg/m <sup>3</sup> (promedio anual) no hay
partículas menores a 10 micrómetros NOM-025-SSA1-1993 Modificación a la NOM-025-SSA1-1993	150 µg/m <sup>3</sup> (24 horas) 120 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	una vez al año una vez al año	50 µg/m <sup>3</sup> (promedio anual) 50 µg/m <sup>3</sup> (promedio anual)
partículas menores a 2.5 micrómetros Modificación a la NOM-025-SSA1-1993	65 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	una vez al año	15 µg/m <sup>3</sup> (promedio anual)

**En un análisis sistemático de estudios elaborados en América Latina, la Organización Panamericana de la Salud indica que un aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> en las concentraciones promedio de partículas se relaciona con el incremento de la mortalidad diaria por todas causas, todas las causas respiratorias y enfermedades cardíaco vasculares. Este incremento también se relaciona con el aumento de admisiones hospitalarias por todas las causas respiratorias (OPS, 2005).**

En el presente trabajo el análisis del estado de la calidad del aire con relación a las PST y las PM<sub>10</sub>, se refiere a los límites que establecían sus NOM para comparar con los años previos. En el caso de las PM<sub>2.5</sub> si se consideran los límites que establece la modificación a la NOM, debido a que es un contaminante que se mide recientemente en el SIMAT. Por lo anterior, se puede señalar lo siguiente:

- ☺ Las excedencias a la NOM de PST han disminuido de forma general en el período 1990-2005. En 1991 y 1992, el límite de PST se rebasó en el 100% de los muestreos y en el 2004 en el 40%.
- ☹ En el 2005 aumentaron sus concentraciones y se rebasó el límite en el 60% de los muestreos.
- ☺ En la época de lluvias se presentan menos excedencias a la NOM y el mayor número corresponde a la época seca-fría.

**Gráfica 13. Excedencias a la NOM de PST en la ZMVM, 1990–2005.**



NOTA: La época seca fría de cada año incluye a noviembre y diciembre de dicho año, más enero y febrero del año siguiente.

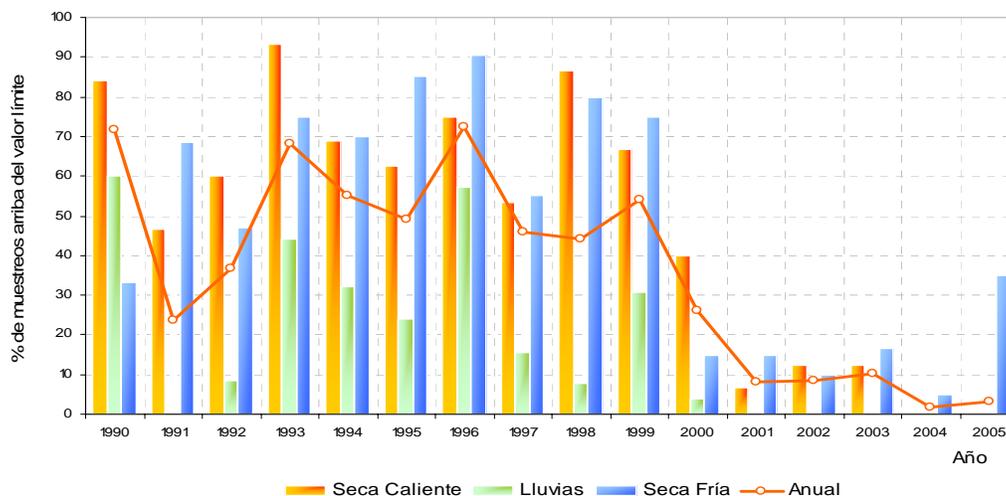
- ☺ Las excedencias de  $PM_{10}$  a la NOM han disminuido de forma general después de 1999, ya que en 1990 y 1996 el valor de su límite se rebasó en cerca del 70% de los muestreos y en el 2004 sólo se rebasó en el 3%.

**ASMA Y OTRAS ENFERMEDADES RESPIRATORIAS (CCA, 2005)**

- Los niños pasan al aire libre más tiempo que los adultos y respiran más rápido, lo que potencialmente los expone a mayores concentraciones de contaminantes atmosféricos en el exterior, como el tránsito, las centrales eléctricas, el humo de la combustión de madera y los incendios forestales.
- La contaminación atmosférica está asociada con la mortalidad infantil y el desarrollo de asma, puede influir en el desarrollo de los pulmones y causar efectos duraderos en la salud respiratoria.
- Las partículas suspendidas se asocian a la bronquitis aguda de los niños. Las investigaciones muestran que los índices de bronquitis y tos crónicas se reducen cuando bajan los niveles de partículas.

- ☺ Desde el año 2001 no se presentan excedencias a la NOM durante la época de lluvias.
- ☹ El mayor número de excedencias continúan presentándose en el la época seca-fría, en el 2005 el número de excedencias se incrementó en esta época a 35% cuando en los 5 años anteriores no había rebasado el 16%.

**Gráfica 14. Excedencias a la NOM de PM<sub>10</sub> en la ZMVM, 1990–2000**



NOTA: La época seca fría de cada año incluye a noviembre y diciembre de dicho año, más enero y febrero del año siguiente.

**Investigaciones realizadas en la Ciudad de México sobre daños a la salud ocasionados por partículas, evidencian el incremento de los índices de mortalidad, semejantes a estudios en ciudades de Europa y Estados Unidos de América.**

**Entre los hallazgos se encuentra que ante incrementos de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> hay un aumento de 1.6% en las muertes diarias de personas mayores de 65 años y de 6.9% en la mortalidad infantil (menos de un año de edad), y que un aumento de la misma magnitud en las PM<sub>10</sub> se asocia con un incremento de 4% de las muertes totales diarias (NOM-025-SSA1-1993).**

- ☹ El límite anual de PST señalado en 260 µg/m<sup>3</sup>, se rebasa aún en las estaciones del SIMAT.
- ☹ El límite anual de PM<sub>10</sub> señalado en 50 µg/m<sup>3</sup>, se rebasa en la mayoría de las estaciones del SIMAT, sólo en la estación pedregal (PED) se cumple con este límite.
- ☹ El límite anual de PM<sub>2.5</sub> señalado en 15 µg/m<sup>3</sup>, se rebasa en las estaciones del SIMAT considerando sólo la información de 2004 y 2005.

**Tabla 14. Promedio aritmético anual de partículas en la ZMVM**

PST (µg/m <sup>3</sup> )																
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
máx.	639	957	702	433	413	375	365	405	431	466	369	277	276	295	245	263
estaciones que cumplen la NOM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )																
máx.	187	127	139	188	163	155	191	155	144	159	125	95	90	100	88	78
estaciones que cumplen la NOM	0	0	0	0	0	1	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1
PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )																
máx.															36	31
estaciones que cumplen la NOM															0	0

**En estudios experimentales se ha identificado que las PM<sub>10</sub> presentes en el centro de la Ciudad de México tienen un mayor efecto citotóxico y genotóxico, lo cual se relaciona con la presencia de hidrocarburos policíclicos; también se reporta que las PM<sub>10</sub> de esta región son capaces de inducir la secreción de moléculas proinflamatorias. En estudios de citotoxicidad inducidas por las PM<sub>10</sub> indican que en el norte son más citotóxicas que en el Centro y el Sur (NOM-025-SSA1-1993).**

### **7.3 Evaluación del riesgo por exposición a PM<sub>2.5</sub> en la ZMVM**

De la misma forma como se estima el riesgo de la población infantil por exposición a ozono, en el caso de las PM<sub>2.5</sub> se evaluó para los años 2004 y 2005, debido a la disponibilidad de información consistente por parte de la REDMA del SIMAT. En este caso se empleó al promedio anual de concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, para inferir acerca de las situaciones de exposición crónica.

**Las partículas menores a 2.5 micrómetros se asocian con síntomas simples como la irritación ocular y complicaciones cardiacas o respiratorias. En un estudio realizado en niños se observó un aumento en la presión arterial ante incrementos de 10 µg/m<sup>3</sup> de este contaminante (Zanobetti et al, 2004), así como un incremento entre el 10 y 8% en la mortalidad en individuos con problemas cardiacos con este mismo incremento de PM<sub>2.5</sub> (Delfino et al, 2005).**

**En estudios sobre morbilidad en la Ciudad de México se reporta que ante incrementos de 20 µg/m<sup>3</sup> en las PM<sub>10</sub> aumenta en 8% la sintomatología de vías respiratorias bajas en niños asmáticos de 5 a 13 años.**

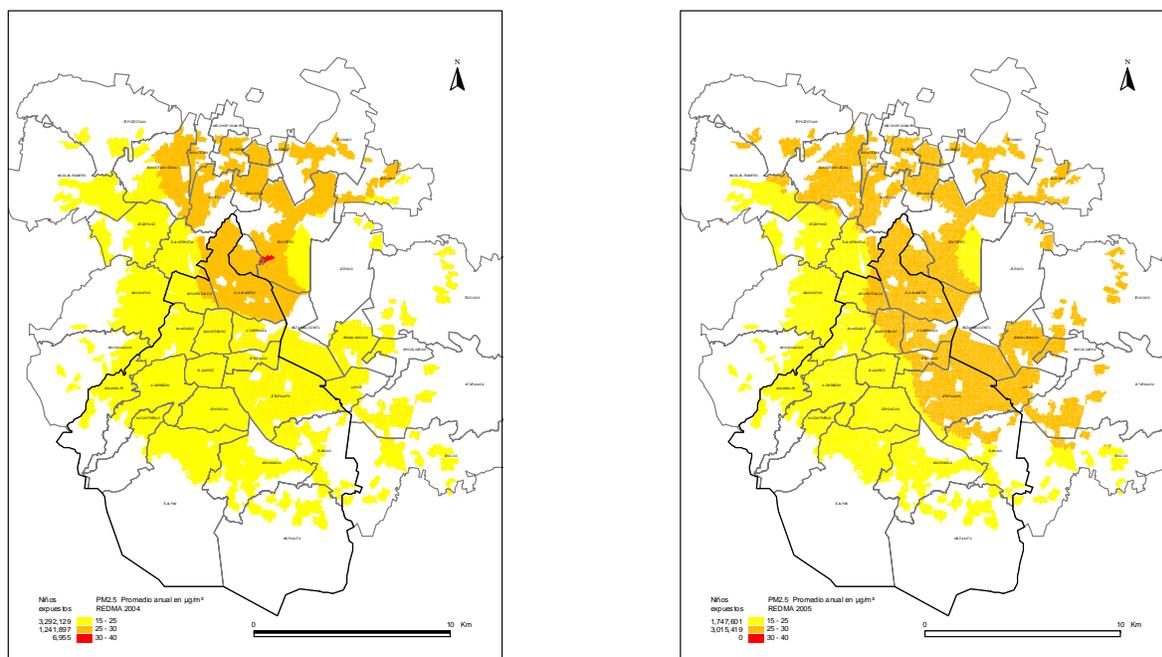
**Otros estudios sobre el efecto asociado de contaminantes en la salud de niños, señala que la exposición durante 7 días a concentraciones de 17 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> y 25 ppb de O<sub>3</sub>, se asocia con una disminución de 7.1% en su flujo respiratorio máximo (NOM-025-SSA1-1993).**

Los resultados muestran que en el año 2004 el total de la población infantil de la ZMVM vivía en áreas donde las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> promedio anuales superaban la norma de protección a la salud que establece como límite 15 µg/m<sup>3</sup>. La zona noreste de la ciudad es la que presenta altos niveles, duplicando el límite establecido para este contaminante, principalmente en la zona de Xalostoc donde se registró un promedio anual de 35.7 µg/m<sup>3</sup>. El 27.3% de la población infantil, estaba expuesto a niveles entre 25 y 35 µg/m<sup>3</sup>.

En el año 2005 la zona noroeste de la ciudad continuó presentando altos niveles de concentraciones llegando a 30.9 µg/m<sup>3</sup>, la población expuesta a concentraciones promedio anual entre 25 y 35 µg/m<sup>3</sup> aumentó a un 63% lo que representa 3 millones de individuos en condiciones de calidad del aire que amenazan su salud. El total de la población infantil continúa exponiéndose a concentraciones por arriba de la norma (Mapa 11).

**Los niños pueden estar más expuestos a contaminantes ambientales debido a que, en proporción con su tamaño, un niño respira más aire que los adultos, por lo que su exposición a los contaminantes por peso corporal es relativamente más alta (CCA, 2005).**

**Mapa 11. Exposición promedio anual a PM<sub>2.5</sub>, 2004-2005**



## 8 PLOMO

En el Proaire 2002-2010 se hace énfasis a la situación de mejora que se ha logrado en la calidad del aire con relación al plomo y que es el resultado de las medidas instrumentadas en el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA). Por lo anterior, la meta que se espera lograr cada año es seguir controlando los niveles de este contaminante y evitar posibles daños a la salud humana.

### 8.1 Análisis de tendencia

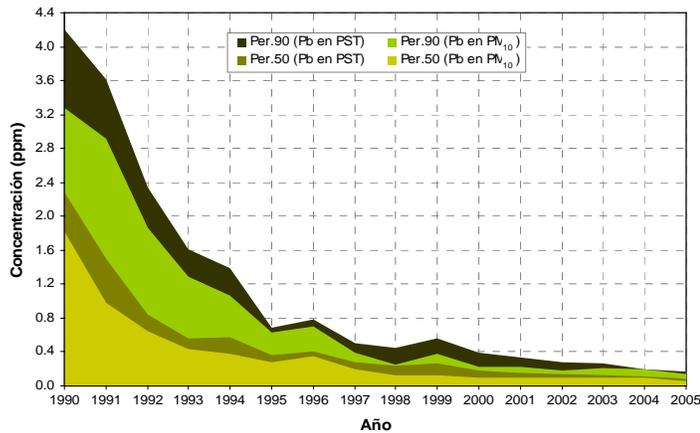
La disminución del contenido de Pb en las PST y en las PM<sub>10</sub>, registradas desde 1990 en las 5 estaciones de monitoreo<sup>28</sup> con mejor desempeño histórico, continúan mostrando un comportamiento que sugiere el control de este contaminante.

La estimación para las concentraciones altas de Pb en PST (per. 90), indica decrementos anuales del orden de 0.15 µg/m<sup>3</sup> en la estación XAL, mientras que las concentraciones típicas (per. 50) en esta misma estación han disminuido en alrededor de 0.04 µg/m<sup>3</sup> (Figura 12).

En el caso del Pb contenido en las PM<sub>10</sub>, el mayor decremento anual en las concentraciones máximas se estima en 0.12 µg/m<sup>3</sup> y para las concentraciones típicas se estima en 0.04 µg/m<sup>3</sup>, ambos corresponden a la estación XAL.

<sup>28</sup> TLA, XAL, MER, PED y CES.

**Figura 12. Comportamiento del Pb contenido en PM<sub>10</sub> y PST en la ZMVM, 1990–2005**



PM <sub>10</sub>					
indicador	estaciones con tendencia decreciente	% de cambio		m de cambio	
		mín.	máx.	mín.	máx.
per. 90	5	117	156	0.02	0.12
per. 50	5	123	160	0.01	0.04

PST					
per. 90	5	93	138	0.02	0.15
per. 50	5	97	143	0.02	0.05

## 8.2 Análisis de estado

La Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993, establece que la concentración de Pb, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de 1.5 µg/m<sup>3</sup> en un período de tres meses promedio aritmético, como protección a la salud de la población susceptible. La evaluación en la ZMVM de esta norma indica que no se rebasa el límite máximo permisible desde 1993, sumando así 14 años.

## 9 DEPÓSITO ATMOSFÉRICO

En términos económicos la lluvia ácida es un fenómeno ambiental preocupante para la conservación de los bosques y en el rendimiento de los cultivos, debido al impacto que causa en los tejidos vegetales y que puede provocar el deterioro de árboles y plantas, e incluso su muerte. No obstante, la incidencia de este fenómeno ocurre a nivel del ecosistema, ya que altera las condiciones fisicoquímicas naturales de los suelos y mantos acuíferos de los mismos.

### Efectos de la lluvia ácida en los ecosistemas

- **Causa estrés, disturbios en la polinización y crecimiento en plantas**
- **Ocasiona la muerte de microorganismos que descomponen la materia orgánica del suelo y que aporta nutrientes para las plantas**
- **Reduce la disponibilidad de minerales y ocasiona la lixiviación de nutrientes**
- **Provoca el bandeado, moteado, amarillamiento y defoliación en el dosel de las plantas**
- **Disminuye la resistencia en plantas y las hace susceptibles a plagas y enfermedades**
- **La acidificación del suelo incrementa la solubilidad de iones tóxicos (aluminio, hierro, manganeso, mercurio, etc.) que con el paso del tiempo pueden contaminar al agua superficial o subterránea y afectar a los organismos que las habitan o consumen**

(Fenn *et al.*, 2002; Bingman, 1987; Valroff, 1985)

La lluvia ácida se origina a partir de las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, las cuales se combinan con la humedad atmosférica y dan lugar a la formación de ácidos fuertes (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub>) que acidifican el agua de lluvia. En condiciones naturales el agua de lluvia tiene un pH ligeramente ácido (5.6), debido a

la presencia de ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) en la atmósfera, el cual resulta del equilibrio entre el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

**Más del 90% de las emisiones de óxidos de nitrógeno consisten en monóxido de nitrógeno (NO), las cuales se convierten a dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y pueden convertirse en ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), que finaliza en partículas y gotas de agua, principalmente. También se deposita en forma de vapor. El ácido nítrico se disuelve en agua para formar los iones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Quadri-Sánchez, 1992).**

El fenómeno de la lluvia ácida, se explica técnicamente como un proceso de depósito atmosférico por medio del cual los contaminantes atmosféricos (gases, aerosoles<sup>29</sup> o partículas) se transfieren desde la atmósfera a los ecosistemas terrestres y acuáticos mediante dos mecanismos; el primero se denomina *depósito húmedo* y ocurre durante el proceso de formación (rain out) o caída (washout) de la precipitación pluvial<sup>30</sup>, y el segundo se denomina como *depósito seco* y se realiza en ausencia de una fase acuosa, ya sea mediante mecanismos de difusión, movimiento Browniano o asentamiento gravitacional (SIMAT, 2002; Vet, 1991, Krupa, 1999).

Con la información que registra el SIMAT a través de la REDDA, es posible diagnosticar la situación del proceso de depósito atmosférico en la ZMVM. Lo anterior mediante la definición de indicadores de lluvia ácida obtenidos a partir de muestras de depósito húmedo, de los parámetros: potencial de hidrógeno (pH), conductancia específica (CE) y concentración de los iones<sup>31</sup> disueltos como sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ). Estos parámetros también se determinan en redes de monitoreo de otros países como el Programa Nacional de Depósito Atmosférico (NADP) de EUA, la Red de Monitoreo de Precipitación y Aire Canadiense (CAPMoN), la Red de Monitoreo de Lluvia Ácida del Japón (JARN), la Red de Monitoreo de Depósito Ácido en el Este de Asia (EANET) y el Programa de Monitoreo y Evaluación en Europa (EMEP) de la Convención sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza de Largo Alcance (CLRTAP), entre otras.

**Los efectos de la lluvia ácida en la salud de personas son indirectos y derivan de la exposición a los contaminantes precursores de la acidez. El  $\text{SO}_2$  se asocia con efectos en personas que padecen asma o que tienen problemas cardíacos y/o circulatorios, mientras que al  $\text{NO}_2$ , se asocian como efectos la irritación del tracto respiratorio, la bronquitis, la neumonía y una menor resistencia a infecciones respiratorias como la influenza (OPS, 2005; Quadri-Sánchez, 1992).**

<sup>29</sup> El aerosol es un sistema coloidal obtenido por dispersión de partículas ultramicroscópicas sólidas o líquidas en el seno de un gas.

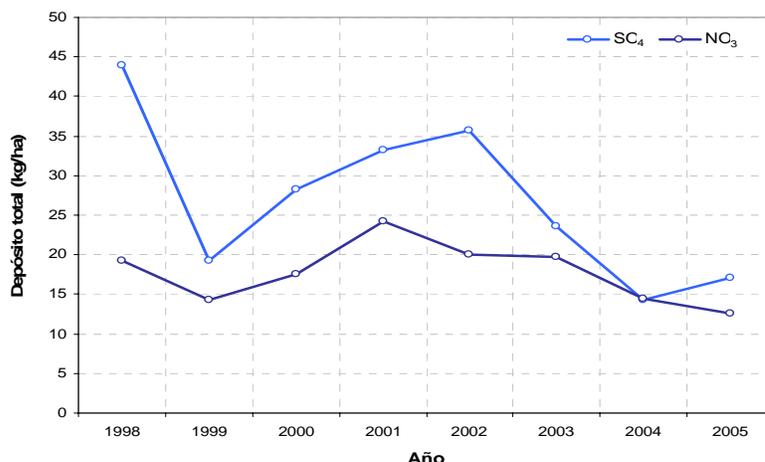
<sup>30</sup> El término precipitación pluvial se refiere a la caída de hidrometeoros en la superficie terrestre. Los hidrometeoros son fenómenos atmosféricos que están constituidos por partículas de agua (sólida o líquida) en caída o suspensión, por ejemplo: lluvia, llovizna, niebla, neblina, rocío, escarcha, granizo, nieve, etc.

<sup>31</sup> Un ión es un átomo o agrupación de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica. Un anión es un ión con carga negativa y un catión es un ión con carga positiva.

## 9.1 Comportamiento histórico y espacial de los precursores de lluvia ácida en la ZMVM

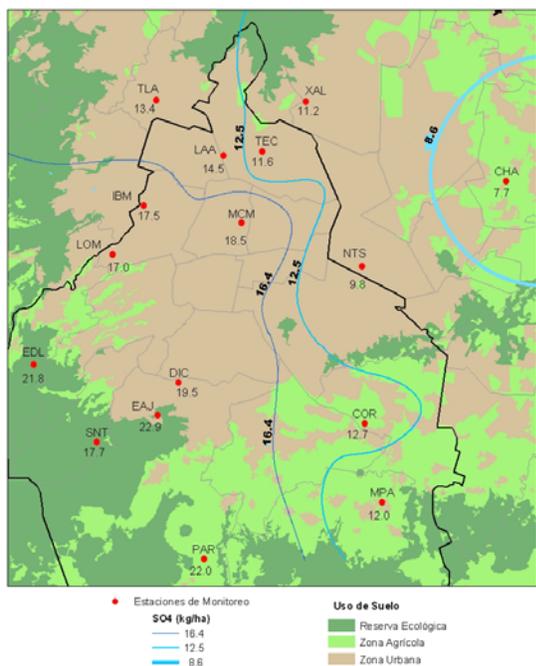
El comportamiento temporal del  $\text{SO}_4^{2-}$ , tuvo un repunte en 2005 al estimarse que durante la temporada de lluvia se depositaron 17.1 kg por hectárea<sup>32</sup> (Figura 2). En el caso del  $\text{NO}_3^-$ , asociado a  $\text{NO}_x$ , en este mismo año se estimó un depósito de 12.5 kg<sup>33</sup>, el más bajo desde 1998.

**Figura 2. Comportamiento del depósito húmedo promedio de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  en la ZMVM, 1998–2005.**

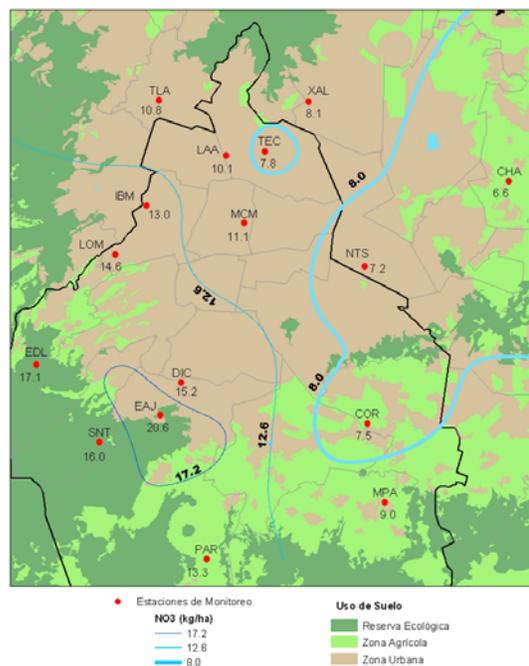


Con relación a la distribución del depósito en el año 2005, ambos precursores muestran el gradiente de transferencia típico para la ZMVM, esto es, valores altos en el suroeste y bajos en el noreste (Mapas 12 y 13). El gradiente de  $\text{SO}_4^{2-}$  fluctúa entre 7.7 y 22.9 kg/ha, y en el caso del  $\text{NO}_3^-$  entre 6.6 y 20.6 kg/ha.

**Mapa 12. Distribución espacial del depósito húmedo de  $\text{SO}_4^{2-}$  (kg/ha) en la ZMVM, 2005.**



**Mapa 13. Distribución espacial del depósito húmedo de  $\text{NO}_3^-$  (kg/ha) en la ZMVM, 2005.**



<sup>32</sup> Indicador obtenido con la información de 10 estaciones de monitoreo con mejor desempeño histórico (LOM, TEC, DIC, MCM, TLA, IBM, COR, EAJ, MPA y SNT).

<sup>33</sup> Indicador obtenido con la información de 16 estaciones de monitoreo con mejor desempeño histórico (LOM, TEC, DIC, MCM, TLA, XAL, EDL, IBM, COR, NTS, CHA, LAA, EAJ, PAR, MPA y SNT).

## 9.2 Comportamiento histórico y espacial<sup>34</sup> del pH<sup>35</sup> del agua de lluvia ácida en la ZMVM

La evolución temporal y espacial de los registros del pH del agua de lluvia, permite inferir acerca de la relevancia del proceso de transferencia de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  hacia las áreas forestales y agrícolas del sur de la ZMVM. La información disponible desde 1990, indica que la incidencia de eventos de lluvia ácida ( $\text{pH} \leq 5.6$ ) en estas áreas ha sido una situación que sucede año con año (Figura 6). Es importante resaltar la relevancia que tienen como proveedoras de servicios ambientales para la ZMVM, al ser áreas de recarga para el acuífero y sumideros de carbono.

En 1998 se registró la mayor incidencia de eventos de lluvia ácida en la ZMVM, los cuales se registraron aún con colectores convencionales que muestreaban el depósito total. Después de 1998, cuando se instalan los equipos semiautomáticos y se mejoró la estimación del pH mediante el presente análisis del depósito húmedo, se aprecia una disminución anual paulatina de los eventos de lluvia ácida en la ZMVM, de forma tal que en los últimos tres años del análisis (2003 a 2005) su presencia se ha circunscrito a la región poniente.

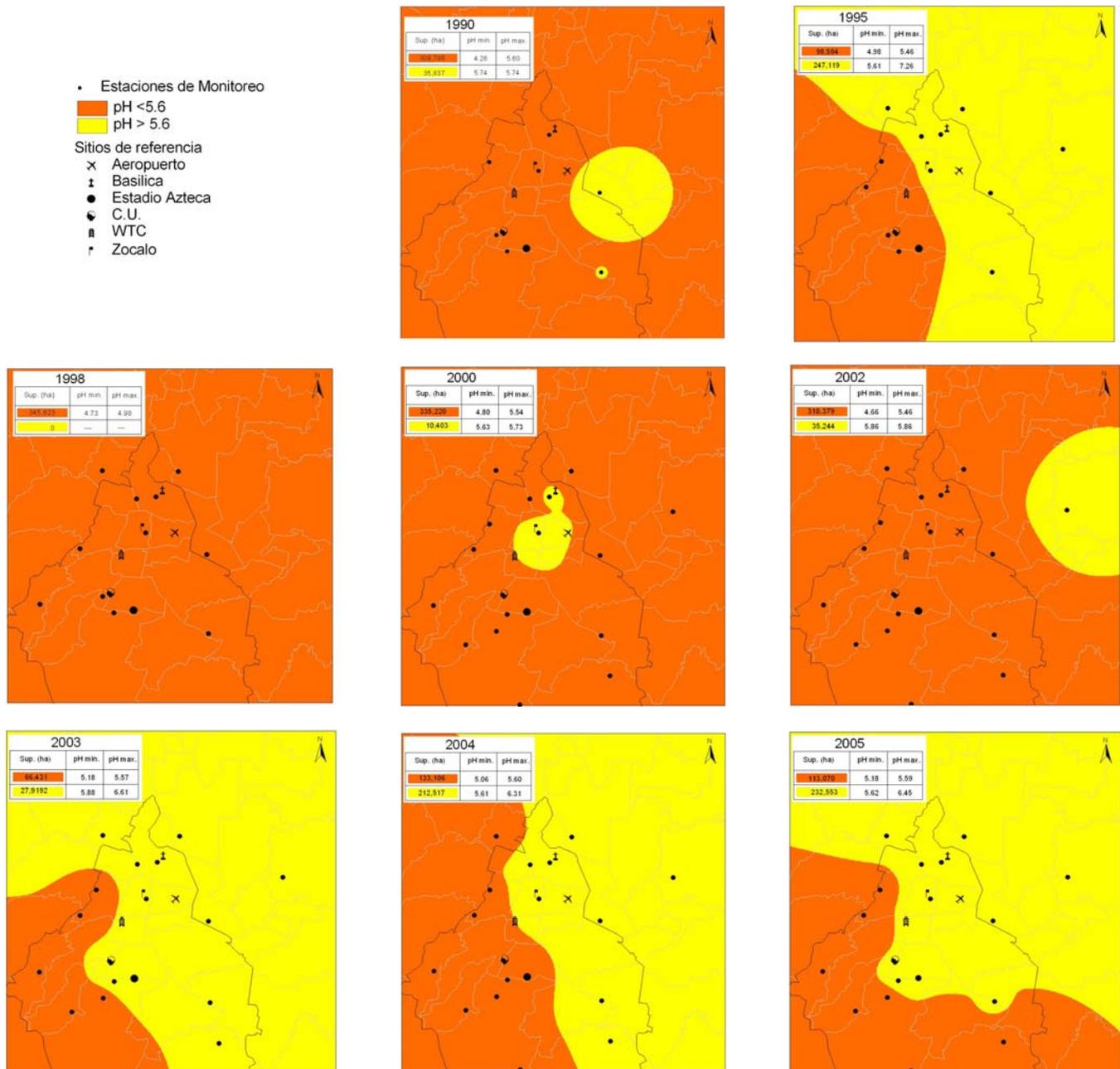
En términos comparativos, se puede señalar que en 1990 la superficie impactada por eventos de lluvia ácida, equivalió al 90% de la superficie, mientras que en 2005 la superficie equivalió al 33%, con valores que oscilaron entre 5.18 en el suroeste y 6.45 en el noreste.

---

<sup>34</sup> La distribución espacial se efectúa mediante la interpolación de datos considerando la distancia inversa a la cuarta potencia.

<sup>35</sup> Promedio ponderado del pH. Vet (1991) señala que para períodos de análisis con más de un evento de precipitación (muestras) se recomienda obtener el pH promedio ponderado, ya que usualmente se tienen datos faltantes. Entre los factores que provocan estos faltantes se encuentran: el funcionamiento de los instrumentos, la pérdida de muestras, la contaminación o insuficiencia de volumen de la muestra.

**Figura 6. Distribución espacial histórica del pH del agua de lluvia en la ZMVM (1990-2006).**



## Bibliografía

- Bingman, Ingvar. Acidification and Air Pollution, Brief Guide. National Environmental Protection Board. Solna, Sweden. 1987.
- Castillejos S. Margarita. Algo de Historia sobre la Red de Monitoreo Automática del Distrito Federal. Foro de Monitoreo Atmosférico y Taller de Gestión Ambiental del Aire. GDF-SMA. Ciudad de México, 19 al 21 de abril de 2006.
- Comisión Ambiental Metropolitana, Secretaría del Medio Ambiente y de Recursos Naturales, Secretaría de Salud, Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México (CAM). Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002 – 2010. 2002.
- Comisión de Cooperación Ambiental (CCA). Salud Infantil y Medio Ambiente en América del Norte. Canadá, 2006
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación del Valle de México (CMPCCAVM). Informe mensual de la calidad del aire. Abril, 1993.
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación del Valle de México (CMPCCAVM). Red Automática de Monitoreo Atmosférico, Dirección General de Ecología. 1992
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación del Valle de México (CMPCCAVM). Avances a Junio 1994. Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México. Diciembre, 1994.
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación del Valle de México (CMPCCAVM). La contaminación atmosférica en el Valle de México, acciones para su control, 1988-1994. 1995.
- CONAPO. Proyecciones de la Población de México 2000-2050, consulta en [www.conapo.gob.mx](http://www.conapo.gob.mx) diciembre, 2004.
- Delfino, Sioutas y Malik. Potential Role of Ultrafine Particles in Associations between Airborne Particle Mass and Cardiovascular Health. *Environmental Health Perspectives*, Volume 113, Number 8, August, consulta en [www.ehponline.org/members/2005/7938/7938.html](http://www.ehponline.org/members/2005/7938/7938.html), 2005.
- Environmental Protection Agency (EPA). "Air Pollution and Children's Health". A fact sheet by Cal/EPA's Office of Environmental Health Hazard Assessment and The American Lung Association of California, 2003.
- Fenn, M.E.; de Bauer, L.I. y Hernández-Tejeda, T. (Editors). Urban Air Pollution and Forests. Resources at Risk in the Mexico City Air Basin. Ed. Springer. Serie Ecological Studies. Vol. 156. New York, USA. 2002.
- García, E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (adaptación a condiciones de la Republica Mexicana, Instituto de Geografía, UNAM. México. 1973.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF). Informe Anual 1994, Programa de Precipitaciones Ácidas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. 1996.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF). Introducción al diseño de redes de monitoreo atmosférico. Apuntes del curso teórico. 1996.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF-INEGI-SMA). Estadísticas del Medio Ambiente en el Distrito Federal y Zona Metropolitana, 2002.
- Henry J. G. and Heinke G. H. Environmental Science and Engineering, Prentice Hall, USA, 1989.

- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y la Zona Metropolitana - 2002, 2005.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Manual de Normas para la Actualización de la Cartografía Censal (versión electrónica en [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx) , consulta en diciembre de 2004), 2000.
- Jaimes P. M. Análisis de la tendencia y comparación de la contaminación atmosférica por ozono para las ciudades de México y Los Ángeles, Tesis de Postgrado, 2004.
- Jáuregui, E. El Clima de la Ciudad de México, Temas selectos de Geografía en México. Editorial Plaza y Valdez, 2000.
- Krupa, Sagar V. Polución, Población y Plantas. The American Phytopathological Society. Trad. Bauer, M.L.I. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México, 1999.
- Lezama, J.L. Aire dividido, crítica a la política del aire en el Valle de México. El Colegio de México, México, 2000.
- Martínez A. P. y Romieu I., "Introducción al Monitoreo Atmosférico", OPS, GTZ y DDF, México, 1997.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe, 2005.
- Orvañanos, D. "Geografía Médica de la Republica Mexicana", <http://biblioweb.dgsca.unam.mx/libros/medica/index.html>
- PNUMA, Red Consumers Internacional. Manual de Ciudadanía Ambiental Global, 2005.
- Quadri de la T., G. y Sánchez C., L.R. 1992. La Ciudad de México y la Contaminación Atmosférica. Ed. Limusa. Distrito Federal, México.
- Real Academia Española. Diccionario de la Lengua Española. 22ª ed. Ed. Espasa Calpe. España. 2001.
- Retama H. Armando. Aseguramiento y Control de la Calidad en el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Foro de Monitoreo Atmosférico y Taller de Gestión Ambiental del Aire. GDF-SMA. Ciudad de México, 19 al 21 de abril de 2006.
- Sánchez J. R. Pablo. Importancia de la Evaluación de la Calidad del Aire por Ozono en la Zona Suroeste de la Ciudad de México, Tesis de licenciatura, 1999.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), Boletín Informativo de la Calidad del Aire, Ciudad de México, Octubre 1986 – Abril 1992.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y ecología (SEDUE). La Contaminación Atmosférica en el Valle de México, México, 1988.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y ecología (SEDUE-FUNDACIÓN FRIEDICH EBERT). Primer Seminario Internacional sobre administración de la Calidad del Aire, Metepec, Puebla, 2 al 6 de noviembre. 1987.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y ecología (SEDUE). Diseño Detallado para la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. 1991.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico, 2004. Instituto Nacional de Ecología. México. 2004.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (GDF-SMA), Primer Informe de Monitoreo Atmosférico en Trayectoria, Ciudad de México, Agosto de 2000.

- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF). Programa de Protección Ambiental del Distrito Federal. 2002-2006. México, 2002.
- Secretaría del Medio Ambiente del GDF. Folleto de Monitoreo de Partículas Suspendidas Menores a 2.5 micrómetros en la Ciudad de México, 2003.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF). Reporte Técnico 02-05/06. Reporte de autoría interna 2006-1 al desempeño de los monitores continuos de partículas suspendidas (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y de los muestreadores FRM PM<sub>2.5</sub>. [http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/sma02-05-06\\_auditoriapm25.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/sma02-05-06_auditoriapm25.pdf) (julio de 2006).
- SIMAT. 2002. Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2001 para la Zona Metropolitana del Valle de México. Secretaría del Medio Ambiente del GDF. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF). Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias – 2001. 2002.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF). Informe Climatológico de la ZMVM - 2004. 2005.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF). Inventario de Emisiones a la Atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de México - 2004. 2005.
- Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente de la Secretaría de Salubridad y asistencia (SSA). Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMEXCA) - Memorándum Técnico AT/02-78. Talleres Gráficos de la Nación, agosto de 1979.
- Tapia C. J., Introducción a la Meteorología Ambiental. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.
- Valroff, Jean. Pollution Atmosphérique et Pluies Acides. Rapport au Premier minister. La Documentation Française. Paris, France. 1985.
- Vet, Robert J. Wet Deposition: Measurement Techniques. The Handbook of Environmental Chemistry Volumen 2 Parte F Reactions and Processes. Ed. Springer-Verlag Alemania. 1991.
- World Health Organization. Health and environment in sustainable development: 5 years after the Earth summit (press release). Página en Internet: <http://www.who.int/archives/inf-pr-1997/en/pr97-47.html>. 2002 .
- Zanobetti A, Canner MJ, Stone PH, Schwartz J, Sher D, Eagan-Bengston E, *et al.* Ambient pollution and blood pressure in cardiac rehabilitation patients. *Circulation* 110:2184-2189. <http://www.smfrancis.demon.co.uk/airwolvs/23healthpm10.html>. 2004.

#### Páginas electrónicas

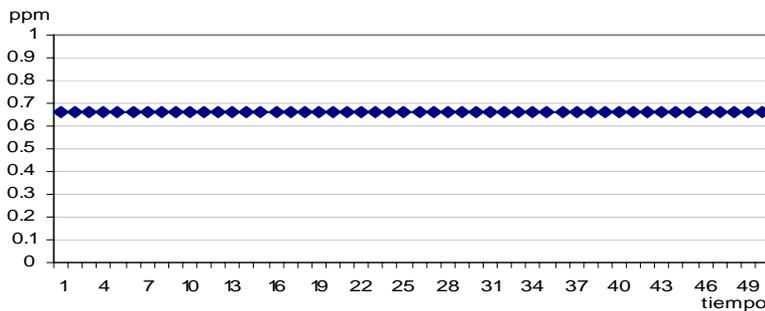
- <http://mx.encarta.msn.com/>
- <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/236/cap4.html>
- [http://www.red-de-autoridades.org/capacitacion/Capitulo1/1\\_1\\_2.htm](http://www.red-de-autoridades.org/capacitacion/Capitulo1/1_1_2.htm)
- <http://www.red-de-autoridades.org/cds/disco04/presentaciones/05jue/03pronosticometeorologicoycaliddaddelaire.ppt>
- <http://www.union.org.mx/guia/actividadesyagravios/elaireenlaciudad.htm>
- [www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx) Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal

## ANEXO 1. Aspectos generales del análisis de tendencia

A una secuencia de registros correspondientes a un período de tiempo equidistante (semana, mes, año, etc.), es posible asociar un patrón de comportamiento y una tendencia. Existen factores que provocan la presencia de ciclos en la tendencia de variables ambientales y que se asocian con fenómenos naturales y las actividades económicas. Esto provoca la presencia de períodos de estacionalidad, los cuales se suavizan mediante técnicas estadísticas cuando se analiza una tendencia.

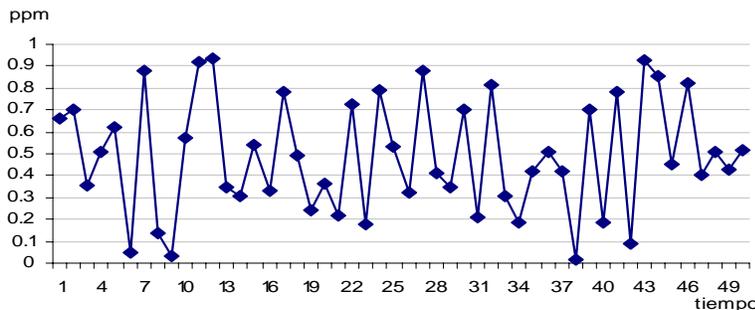
Entre los diferentes tipos de comportamiento y tendencia que presentan las variables ambientales se pueden señalar los siguientes:

### a) comportamiento constante y sin tendencia



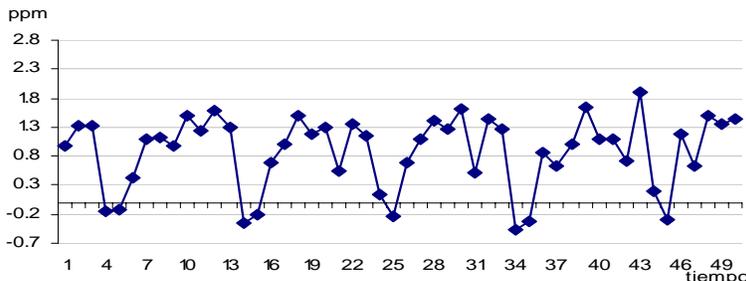
Los registros tienen el mismo valor a lo largo del tiempo, el patrón se aprecia como una línea horizontal imaginaria.

### b) comportamiento con fluctuaciones aleatorias y sin tendencia



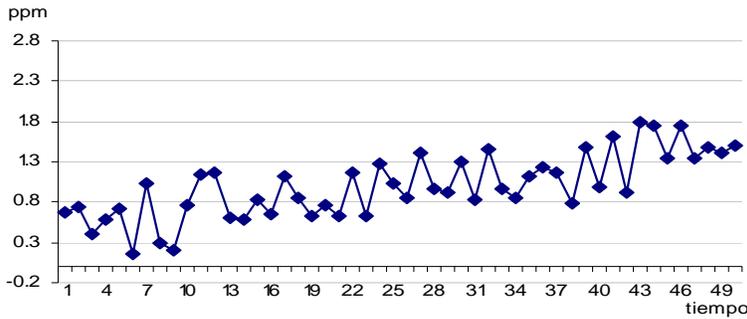
Los registros presentan valores que fluctúan a lo largo del tiempo, se puede señalar que éstos oscilan de forma aleatoria alrededor de una línea horizontal imaginaria. No se aprecia tendencia.

### c) comportamiento con fluctuaciones cíclicas y sin tendencia



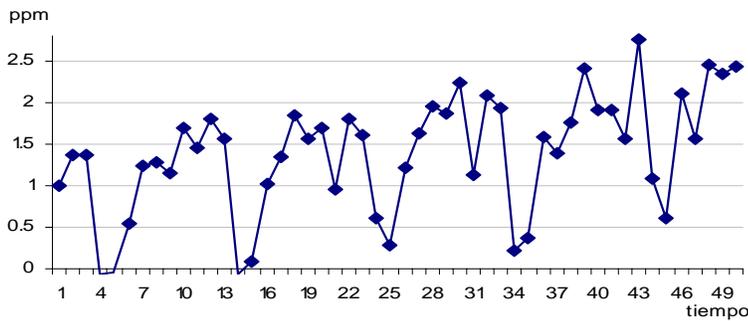
Los registros presentan fluctuaciones cíclicas, los intervalos de oscilación son iguales y alrededor de una línea imaginaria horizontal. No se aprecia tendencia.

**d) comportamiento con fluctuaciones aleatorias y con tendencia**



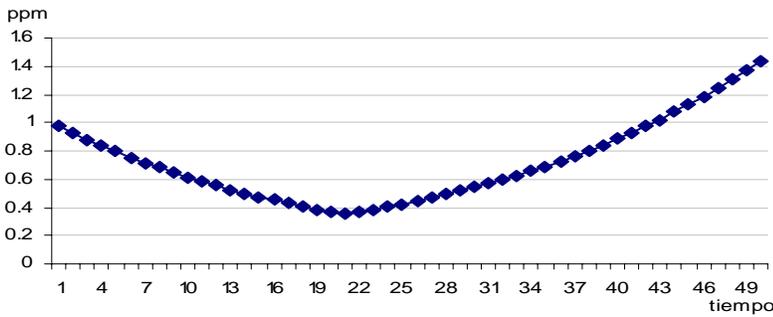
Los registros presentan fluctuaciones aleatorias a lo largo del tiempo sobre una línea imaginaria ascendente o descendente que expresa su tendencia.

**e) comportamiento con fluctuaciones cíclicas y con tendencia**



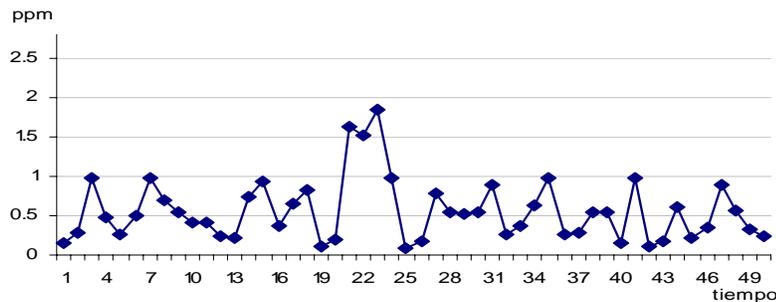
Los registros presentan fluctuaciones cíclicas alrededor de una línea imaginaria horizontal ascendente o descendente que expresa su tendencia.

**f) comportamiento con correlación positiva y sin tendencia**



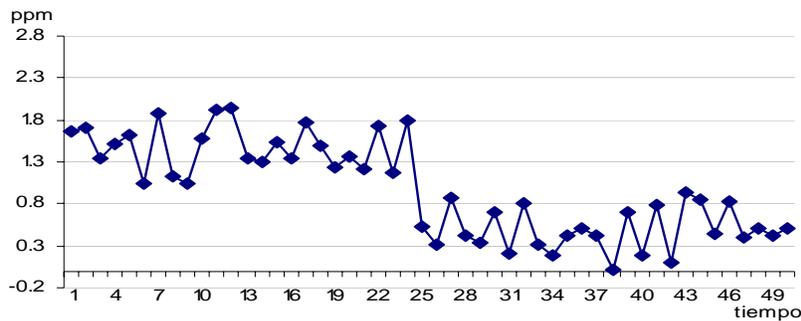
Los registros presentan este tipo de comportamiento cuando se obtienen en períodos de tiempo cercanos, por lo que presentan una correlación positiva sin tendencia.

**g) comportamiento con fluctuaciones aleatorias e impulsos y sin tendencia**



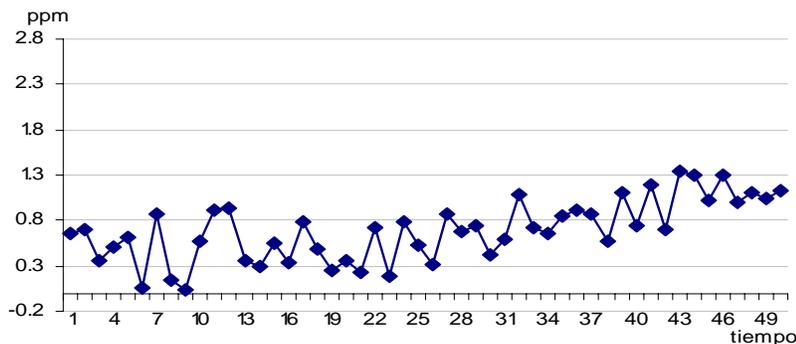
Los registros presentan fluctuaciones aleatorias en forma de impulsos, se aprecian como "saltos" aleatorias alrededor de una línea horizontal imaginaria. No se aprecia tendencia.

### h) comportamiento con fluctuaciones aleatorias sin tendencia y con desfase de nivel



Presenta fluctuaciones aleatorias y tiene un desfase de nivel, se observa un comportamiento oscilante sobre una línea imaginaria horizontal y un desfase en el tiempo, posteriormente continúan las fluctuaciones aleatorias.

### i) comportamiento con fluctuaciones aleatorias periódicas con ausencia y presencia de tendencia



El comportamiento de los registros presenta fluctuaciones aleatorias, en una parte del período no se aprecia tendencia y posteriormente hay una tendencia sobre una línea imaginaria, que puede ser ascendente o descendente.

En el SIMAT el análisis de tendencia de los contaminantes atmosféricos criterio, se realiza por medio de pruebas estadísticas que detectan la forma de su comportamiento en el tiempo (creciente o decreciente), y métodos que consideran la homogeneidad de los registros de cada contaminante, de tal forma que se evalúa que su comportamiento tenga cierta homogeneidad al provenir de diferentes estaciones de monitoreo, por lo que se dice que hay "homogeneidad de las estaciones".

## ANEXO 2. Pruebas estadísticas para el análisis de tendencia

En el campo de la estadística existen las pruebas paramétricas y las no paramétricas. En las primeras se considera que los registros de un fenómeno en estudio se comportan de cierta forma, se dice entonces que tienen una distribución (ley de probabilidad) conocida; por ejemplo, en la prueba T-Student para igualdad de medias de dos poblaciones de datos, el supuesto principal es que la distribución de los datos es normal. En el caso de las pruebas no paramétricas, no se requiere tener conocimiento acerca de la distribución de los datos ya que en estas pruebas se hace uso del orden de las observaciones (estadísticas de orden).

### Prueba de tendencia de Mann Kendall

En el presente trabajo se emplea la prueba estadística no paramétrica de Mann Kendall (Gilbert, 1987), la cual es útil cuando la información no refleja algún efecto estacional, además de que no se limita por el número de registros. En el proceso de esta prueba se compara la magnitud de los registros (signos), en este caso el valor de los indicadores de un contaminante atmosférico, y se infiere así con respecto de su tendencia. Su desarrollo para el caso de una estación de monitoreo se resume de la siguiente forma:

Paso 1. Se enlistan los indicadores anuales de forma ordenada ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ )

Paso 2. Se obtienen el signo de la diferencia de cada par de indicadores al comparar sus magnitudes ( $x_j - x_k$ , con  $j > k$ ), de acuerdo con lo siguiente:

$$\text{signo}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

Paso 3. A partir de los resultados se obtiene el estadístico "S" de Mann Kendall, que se refiere al total de las diferencias positivas menos el total de diferencias negativas, mediante la ecuación:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(x_j - x_k)$$

El resultado se interpreta de la siguiente manera, si S es positivo se infiere de forma subjetiva que la tendencia es creciente, cuando S es negativo se infiere de forma subjetiva que hay una tendencia decreciente. A continuación se ilustra el proceso explicado en los pasos 1, 2 y 3:

#### Obtención del estadístico de Mann Kendall

	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	Año n-1	año n	# de +	# de -
Indicador	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	.....	$x_{n-1}$	$x_n$		
Diferencias		$x_2 - x_1$	$x_3 - x_1$	$x_4 - x_1$	.....	$x_{n-1} - x_1$	$x_n - x_1$		
			$x_3 - x_2$	$x_4 - x_2$	.....	$x_{n-1} - x_2$	$x_n - x_2$		
				$x_4 - x_3$	.....	$x_{n-1} - x_3$	$x_n - x_3$		
					.....	$\vdots$	$\vdots$		
						$x_{n-1} - x_{n-2}$	$x_n - x_{n-2}$		
							$x_n - x_{n-1}$		
								$S =$	Total de signos +

Paso 4. Con base en los indicadores se estima una varianza para el estadístico  $S$  de Mann Kendall, la cual considera el caso de los empates (signo  $x_j - x_k = 0$ ) obtenidos en el paso 2, mediante la ecuación:

$$Var[S] = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{q=1}^g t_q(t_q-1)(2t_q+5) \right]$$

Donde  $g$  es el número de grupos de empate, es decir el número de indicadores con valor repetido, y  $t_q$  el número de ocasiones que se repite un indicador en el  $q$ -ésimo grupo, por ejemplo en la secuencia de indicadores  $\{23, 24, 10, 6, 10, 24, 24, 10, 23\}$  hay tres que se repiten (23, 24 y 10) por lo que se forman 3 grupos de empate ( $g = 3$ ), el primero con 2 datos ( $t_1=2$ ) que corresponde al valor de 23, el segundo con 3 datos ( $t_2=3$ ) que corresponde al valor de 24 y el tercero con 3 datos ( $t_3=3$ ) que corresponde al valor de 10.

Paso 5. Posteriormente se calcula el estadístico  $Z$  de la siguiente manera:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

Paso 6. Finalmente, con base en la obtención del estadístico  $Z$  se evalúa la hipótesis de interés, que puede ser:

A)  $H_0$ : No hay tendencia vs.  $H_a$ : Hay tendencia decreciente

B)  $H_0$ : No hay tendencia vs.  $H_a$ : Hay tendencia creciente

En términos del análisis de la tendencia de los contaminantes atmosféricos, el propósito es evaluar una hipótesis como la que plantea el inciso A y en caso de no encontrar evidencias de tendencia (aceptación de  $H_a$  y rechazo de  $H_0$ ) se evalúa la hipótesis del inciso B.

El rechazo de  $H_0$  se realiza con un nivel  $\alpha$  de significancia ( $0 < \alpha < 1$ ) si :

A)  $Z$  es negativo y  $|Z| > Z_{1-\alpha}$  con  $Z_{1-\alpha}$  el cuantil  $\alpha$  de una distribución normal estándar

B)  $Z$  es positivo y  $Z > Z_{1-\alpha}$  con  $Z_{1-\alpha}$  el cuantil  $\alpha$  de una distribución normal estándar

### **Prueba de homogeneidad de estaciones**

Esta prueba se emplea en el SIMAT como complemento al análisis de tendencia de un contaminante cuando la información proviene de más de una estación de monitoreo ( $M$  estaciones,  $M > 1$ ), ya que permite evaluar que la tendencia que reflejan los registros de las diferentes estaciones sea homogénea. La prueba de homogeneidad de tendencia se considera como un método objetivo para

evaluar la tendencia de un contaminante en una región, se basa en la prueba de Mann-Kendall para cada estación y su inferencia se realiza a partir del estadístico ji-cuadrada de homogeneidad ( $\chi^2_{\text{homog}}$ ) definido de la forma:

$$\begin{aligned}\chi^2_{\text{homog}} &= \chi^2_{\text{total}} - \chi^2_{\text{tend}} \\ &= \sum_{j=1}^M Z_j^2 - M \bar{Z}^2\end{aligned}$$

El proceso de esta prueba se resume de la siguiente manera:

Paso 1. Se obtiene  $Z_j$  conforme la prueba de Mann Kendall (paso 5 del ejemplo anterior) para cada una de las estaciones ( $j=1, \dots, M$ ) y se calcula:

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^M Z_j}{M}$$

Cuando la tendencia de las estaciones es la misma, entonces  $\chi^2_{\text{homog}}$  tiene una distribución Ji-cuadrada con  $(M-1)$  grados de libertad  $\chi^2_{(M-1)}$  y  $\chi^2_{\text{tend}}$  tiene una distribución Ji-cuadrada con 1 grado de libertad.

Paso 2. Prueba de hipótesis. Finalmente, se prueban como hipótesis de interés para este análisis:

A)  $H_0$ : La tendencia entre estaciones es homogénea vs.  $H_a$ : La tendencia no es homogénea

B)  $H_0$ : La tendencia entre estaciones es diferente de cero vs.  $H_a$ : No hay tendencia

En términos del análisis de homogeneidad para la tendencia de un contaminante cuando la información deriva de más de una estación, se opta por la prueba de hipótesis del inciso A. En caso de no tener evidencia para rechazar  $H_0$  conforme el inciso A, se opta por evaluar la  $H_0$  conforme el inciso B.

En términos estadísticos se rechaza  $H_0$  a favor de  $H_a$ , a un nivel  $\alpha$  de significancia ( $0 < \alpha < 1$ ) si :

A)  $\chi^2_{\text{homog}} > \chi^2_{(M-1), \alpha}$  con  $\chi^2_{(M-1), \alpha}$  el cuantil  $\alpha$  de una distribución Ji-cuadrada con  $(M-1)$  grados de libertad.

Si no se rechaza  $H_0$ , se evalúa la tendencia ( $\chi^2_{\text{tend}} = M \bar{Z}^2$ ) conforme el inciso B y se rechaza  $H_0$  a favor de  $H_a$  a un nivel  $\alpha$  de significancia ( $0 < \alpha < 1$ ) si :

B)  $\chi^2_{\text{tend}} > \chi^2_{1, \alpha}$  con  $\chi^2_{1, \alpha}$  el cuantil  $\alpha$  de una distribución Ji-cuadrada con (1) grado de libertad.

La validez de esta prueba depende de que cada valor  $Z_j$  se distribuya de forma normal, lo que implica que cada estación debe tener más de 10 observaciones. En el uso de esta prueba se asume que las  $Z_i$  son independientes, es decir, los datos de las diferentes estaciones no estén correlacionados.

### **Estimación de la pendiente (porcentaje de cambio) mediante la Prueba de Sen**

Después de determinar la presencia de tendencia de un contaminante y su homogeneidad, en el SIMAT se emplea la prueba desarrollada por Sen para estimar la pendiente (cambio por unidad de tiempo) asociada a la misma Gilbert (1987). Este método evita la influencia de los valores atípicos (outliers) y faltantes, el estimador que se obtiene de esta prueba se relaciona con la prueba de Mann-Kendall y se obtiene de la siguiente manera:

Paso 1. Para cada estación de monitoreo se calcula la diferencia entre cada par de registros consecutivos, con la restricción de comparar sólo con el registro posterior ( $x_{j'} - x_j$ , con  $j' > j$ ) y se pondera por la diferencia de tiempo entre estas ( $j' - j$ ), esto es:

$$Q = \frac{x_{j'} - x_j}{j' - j} \quad \text{con } j' > j$$

De esta forma, de cada estación se obtienen  $N'$  comparaciones conforme los posibles pares de registros con  $j' > j$ , es decir  $N' = n(n-1) / 2$  donde  $n$  es el número de periodos en el tiempo.

Paso 2. Para cada estación se obtiene el estimador de la pendiente a partir de la mediana de los  $N'$  valores de  $Q$ , para lo cual se ordenan de menor a mayor  $Q_{[1]} \leq Q_{[2]} \leq Q_{[3]} \dots \leq Q_{[N'-1]} \leq Q_{[N']}$  y se obtiene la mediana como:

$$mediana_Q = \begin{cases} Q_{\left[\frac{N'+1}{2}\right]} & \text{si } N' \text{ es impar} \\ \frac{Q_{\left[\frac{N'}{2}\right]} + Q_{\left[\frac{N'+1}{2}\right]}}{2} & \text{si } N' \text{ es par} \end{cases}$$

A continuación se ilustra el proceso explicado en los pasos 1 y 2 considerando M estaciones, donde  $X_{nM}$  corresponde al valor de los indicadores (n) por estación:

		Estaciones				
		1	2	3	.....	M
Diferencias ponderadas	1	$(X_{21}-X_{11})/(2-1)$	$(X_{22}-X_{12})/(2-1)$	$(X_{23}-X_{13})/(2-1)$	.....	$(X_{2M}-X_{1M})/(2-1)$
	2	$(X_{31}-X_{11})/(3-1)$	$(X_{32}-X_{12})/(3-1)$	$(X_{33}-X_{13})/(3-1)$	.....	$(X_{3M}-X_{1M})/(3-1)$
	3	$(X_{31}-X_{21})/(3-2)$	$(X_{32}-X_{22})/(3-2)$	$(X_{33}-X_{23})/(3-2)$	.....	$(X_{3M}-X_{2M})/(3-2)$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	N'-1	$(X_{n1}-X_{(n-2)1})/(n-(n-2))$	$(X_{n2}-X_{(n-2)2})/(n-(n-2))$	$(X_{n3}-X_{(n-2)3})/(n-(n-2))$	.....	$(X_{nM}-X_{(n-2)M})/(n-(n-2))$
	N'	$(X_{n1}-X_{(n-1)1})/(n-(n-1))$	$(X_{n2}-X_{(n-1)2})/(n-(n-1))$	$(X_{n3}-X_{(n-1)3})/(n-(n-1))$	.....	$(X_{nM}-X_{(n-1)M})/(n-(n-1))$
Mediana (estimador de la pendiente)		Sen <sub>1</sub>	Sen <sub>2</sub>	Sen <sub>3</sub>	.....	Sen <sub>M</sub>

Paso 3. A partir de la ecuación de la recta ( $Y = \alpha + mX$ ) y del estimador de la pendiente (Sen) para cada estación, se calcula la ordenada al origen con  $\alpha = \bar{Y} - m * \bar{X}$ , donde  $\bar{Y}$  equivale a la mediana de los indicadores y  $\bar{X}$  equivale a la mediana de los años.

Paso 4. Posteriormente se estiman para cada estación los valores ajustados del primero ( $x_1$ ) y el último ( $x_n$ ) indicador, considerando la pendiente y la ordenada al origen obtenidas.

$$y_1 = \alpha + mx_1 \quad y \quad y_n = \alpha + mx_n$$

Paso 5. Con base en el cálculo de estos indicadores ajustados, se obtiene el porcentaje de cambio (PC) para cada estación, como:

$$PC = \frac{y_i - y_n}{y_i} * 100$$

Paso 6. Finalmente, a manera de síntesis de la situación que prevalece con respecto de la tendencia de cada contaminante en un conjunto de estaciones, ya sea creciente o decreciente, se presentan los porcentajes de cambio mínimo y máximo. En ocasiones se presenta al promedio de los porcentajes como un parámetro que resume la situación de la tendencia del contaminante.

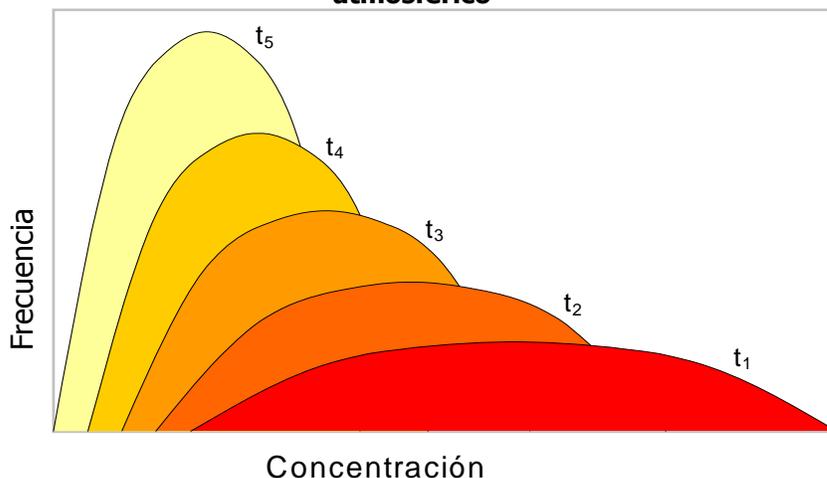
### ANEXO 3. EL EFECTO PISTON

Anteriormente se señaló que este análisis permite identificar la evolución de las concentraciones de un contaminante atmosférico en un período de años y que es un complemento al análisis de tendencia. Los supuestos de este análisis son:

- En un tiempo inicial  $t_1$ , se tienen concentraciones altas de un contaminante

- Al instrumentar acciones para mejorar la calidad del aire, se espera reducir la magnitud de las concentraciones de  $t_1$ , para alcanzar la situación del tiempo  $t_2$
- De manera consecutiva, al fortalecer e implementar nuevas medidas de control, se espera que las concentraciones sigan disminuyendo en magnitud y aumenten en frecuencia hasta llegar a las situaciones de  $t_3$  y  $t_4$
- Idealmente, el tiempo  $t_5$  representa las condiciones de control, en el que se registra una frecuencia alta de concentraciones bajas

#### Movilidad de las concentraciones de un contaminante atmosférico



Este tipo de análisis fue desarrollado por Lefohn, et al. (1997), el supuesto principal es que las concentraciones altas disminuyen con mayor facilidad, lo cual provoca que cada vez sea más difícil disminuir las concentraciones medias. Por la forma como se visualiza éste análisis, también se le denomina "efecto pistón", ya que se asemeja con la demanda de una mayor fuerza conforme se presiona un émbolo que comprime un fluido dentro de un cilindro.

En este informe se analiza la movilidad de las concentraciones para contaminantes que el PROAIRE 2002 – 2010 considera como principal objetivo a disminuir, tal es el caso del  $O_3$  que presenta niveles altos y rebasa los límites máximos permisibles frecuentemente y de los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), cuya principal razón para su control es que son precursores del  $O_3$ .

Para llevar a cabo el análisis de movilidad de un contaminante atmosférico específico se realizan los siguientes pasos (Jaimes, 2004):

1. Se definen intervalos de concentración con base en un incremento  $\Delta$  (en este caso de 0.010 ppm) a partir de la concentración mínima y hasta la concentración máxima registradas durante un período de  $m$  años.
2. Se calcula la frecuencia anual de concentraciones horarias en cada intervalo ( $f_{a_k}^i$ ).
3. Se calculan, entre pares de años, las diferencias relativas de cada intervalo ( $DR_{ij}$ ):

$$DR_{ij} = \frac{\left( \frac{f_{a_k}^i - f_{a_l}^i}{f_{a_l}^i} \times 100 \right)}{(a_k - a_l)} \quad \begin{array}{l} i = \{1, 2, \dots, x\} \\ j = \{1, 2, \dots, n\} ; \quad a_k > a_l ; \quad n = C_{m,2} = \frac{m!}{2!(m-2)!} \\ k, l = \{1, 2, \dots, m\} \end{array}$$

- donde:
- $DR_{ij}$  =  $j$ -ésima diferencia relativa de frecuencias en el intervalo de concentración  $i$ , en %
  - $f_{a_k}^i$  = frecuencia de registros en el intervalo de concentraciones  $i$ , durante el año  $a_k$
  - $a_k, a_l$  =  $k$ -ésimo y  $l$ -ésimo año
  - $N$  = combinaciones posibles entre pares de años
  - $M$  = número de años que componen el período de análisis
  - $X$  = número de intervalos de concentración

4. Para cada intervalo  $i$ , se obtiene la mediana de sus  $n$  diferencias relativas. Este indicador representa el porcentaje de cambio anual en la frecuencia de los registros.
5. Se grafican los intervalos de concentración y las medianas de las diferencias relativas.