



GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
Secretaría de Medio Ambiente
Sistema de Monitoreo Atmosférico



Informe del Estado de la
Calidad del Aire
y Tendencias 2004

Zona
Metropolitana
del Valle de México



LIC. ANDRÉS MANUEL LÓPEZ OBRADOR
Jefe de Gobierno del Distrito Federal

DRA. CLAUDIA SHEINBAUM PARDO
Secretaria 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

ELABORACIÓN

BIÓL. ROBERTO MUÑOZ CRUZ
ACT. CRISTINA ORTUÑO MOJICA
ING. GERARDO SAMUEL LÓPEZ
VENEGAS
BIÓL. MÓNICA DEL CARMEN JAIMES
PALOMERA
GEÓG. VICENTE PÉREZ NÚÑEZ
TÉC. MARÍA GUADALUPE GRANADOS
GUTIÉRREZ

COLABORACIÓN

TÉC. ARMANDO RETAMA HERNÁNDEZ
ING. ALEJANDRO CAMPOS DÍAZ

DISEÑO DE PORTADA

D.G. EDGAR ROJAS RUIZ

AGRADECIMIENTOS

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA DE LA UNAM (CCA)
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y CAPACITACIÓN AMBIENTAL (CENICA)
DIRECCIÓN GENERAL DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN HIDRÁULICA (DGCOH)
PETRÓLEOS MEXICANOS (PEMEX)
SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMN)

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	v
INTRODUCCIÓN.....	vii
RESUMEN EJECUTIVO	ix
CAPÍTULO 1. INDICADORES DE CALIDAD DEL AIRE DEL SIMAT	1
SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	1
ANÁLISIS DE TENDENCIA.....	2
Selección de indicadores	2
Análisis de homogeneidad y tendencia	2
Análisis de movilidad de las concentraciones	3
ANÁLISIS DE ESTADO	4
Porcentaje de días o muestreos arriba de la NOM	4
Promedio superior al límite permisible de O ₃ y PM ₁₀	6
Población expuesta a concentraciones arriba de la NOM	7
ANÁLISIS DE LLUVIA ÁCIDA	7
Depósito húmedo promedio.....	8
Potencial de hidrógeno (pH) ponderado.....	9
CAPÍTULO 2. MONÓXIDO DE CARBONO – CO	11
ANÁLISIS DE TENDENCIA.....	11
ANÁLISIS DE ESTADO	11
CAPÍTULO 3. ÓXIDOS DE NITRÓGENO	13
DIÓXIDO DE NITRÓGENO – NO ₂	13
ANÁLISIS DE TENDENCIA	13
ANÁLISIS DE ESTADO	15
EXPOSICIÓN DE LA POBLACIÓN	15
ÓXIDOS DE NITRÓGENO – NO _x	16
ANÁLISIS DE TENDENCIA	16
CAPÍTULO 4. OZONO – O ₃	19
ANÁLISIS DE TENDENCIA.....	19
ANÁLISIS DE ESTADO	20
PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS	21
EXPOSICIÓN DE LA POBLACIÓN.....	21
CAPÍTULO 5. DIÓXIDO DE AZUFRE – SO ₂	25
ANÁLISIS DE TENDENCIA.....	25

ANÁLISIS DE ESTADO	26
CAPÍTULO 6. PARTÍCULAS SUSPENDIDAS	27
PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES – PST	27
ANÁLISIS DE TENDENCIA	27
ANÁLISIS DE ESTADO	27
PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRÓMETROS – PM ₁₀	28
ANÁLISIS DE TENDENCIA	29
ANÁLISIS DE ESTADO	29
PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS	30
EXPOSICIÓN DE LA POBLACIÓN	31
PARTÍCULAS MENORES A 2.5 MICRÓMETROS – PM _{2.5}	32
ANÁLISIS DE ESTADO	32
CAPÍTULO 7. PLOMO CONTENIDO EN PARTÍCULAS – Pb.....	35
ANÁLISIS DE TENDENCIA.....	35
ANÁLISIS DE ESTADO	35
CAPÍTULO 8. LLUVIA ÁCIDA.....	37
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL	37
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESPACIAL	38
REFERENCIAS	41

PRESENTACIÓN

A cuatro años y medio del inicio de mi gestión en la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, me es grato presentar el Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias para la Zona Metropolitana del Valle de México – 2004, un valioso insumo para evaluar el desempeño de las acciones para controlar y disminuir los contaminantes criterio, dispuestas en el Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002–2010 (PROAIRE 2002-2010).

Este esfuerzo documental representa el interés que tiene esta Secretaría en transparentar el proceso de información pública sobre contaminación atmosférica, con datos sustentados en el buen desempeño de los sistemas de medición y en el tratamiento adecuado de la información de calidad del aire, lo cual se respalda con las auditorías al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) que han realizado organismos ambientales de reconocido prestigio internacional, como es la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica.

A lo largo de estos años de gestión ambiental del aire, la Secretaría del Medio Ambiente ha buscado reforzar y consolidar el monitoreo atmosférico en la Zona Metropolitana del Valle de México, hoy en día se cuenta con una Red de Monitoreo de partículas menores a 2.5 micrómetros, un laboratorio de transferencia de estándares y mejores equipos para la transmisión y adquisición de datos. En los próximos meses se iniciará el monitoreo prospectivo de hidrocarburos, como una base para la gestión de los próximos años.

El mejoramiento de la calidad del aire continuará siendo un reto para garantizar la sustentabilidad de la Zona Metropolitana del Valle de México, este esfuerzo requiere que el gobierno y la sociedad compartan responsabilidades, lo que demanda la difusión de información y el acceso a la misma como necesidad primordial.

Ciudad de México
Dra. Claudia Sheinbaum Pardo
Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal

INTRODUCCIÓN

El presente Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias – 2004 para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), proporciona un panorama de la contaminación del aire en la Ciudad de México, el cual incrementa el conocimiento sobre este fenómeno y sirve como herramienta para evaluar el desempeño ambiental de las acciones de prevención y control de la contaminación atmosférica en el marco del Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002 – 2010.

Para cumplir con este propósito el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) vigila permanentemente el estado de la calidad del aire en la ZMVM. En el Capítulo 1 se describe la configuración actual del SIMAT, la cual contempla la integración de las estaciones de monitoreo de partículas menores a 2.5 micrómetros en las redes automática y manual de monitoreo atmosférico. También se presentan los indicadores de calidad del aire usados en este informe y se explican los criterios técnicos que garantizan su consistencia y confiabilidad. Al mismo tiempo, se describen las herramientas estadísticas empleadas para evaluar tendencia.

En el Capítulo 2 se analiza la evolución del monóxido de carbono entre 1990 y 2004, se identifica su tendencia y el porcentaje de cambio como una medida indirecta del efecto de las acciones de prevención y control. El uso de dos indicadores en este análisis permite contar con un mejor panorama sobre la variación del contaminante, ya que considera la evolución de sus concentraciones altas y típicas. También se describe el estado de la calidad del aire desde 1990, mediante el porcentaje de días del año con concentraciones superiores al valor límite establecido en su Norma Oficial Mexicana (NOM) de protección a la salud.

En el Capítulo 3 se describe la tendencia y el estado de la calidad del aire con respecto a los óxidos de nitrógeno y dióxido de nitrógeno, usando las herramientas del capítulo anterior. La importancia de estos contaminantes radica en que son precursores del ozono, por este motivo su análisis se complementa mediante el uso de nuevas herramientas, como es el caso del análisis de movilidad de las concentraciones horarias de dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, que evalúa con mayor detalle los cambios que presentan los contaminantes durante cada período de gestión, reforzando el análisis de tendencia.

En el Capítulo 4 se analiza la tendencia y el estado que presenta el ozono desde 1990, mediante herramientas de análisis e indicadores que caracterizan mejor su evolución y su representación espacial actual, incorporando una nueva herramienta para analizar la movilidad de las concentraciones horarias en tres períodos asociados a los programas de gestión de la calidad del aire. El análisis de estado se profundiza por medio de indicadores que mejoran la evaluación del riesgo a la salud, como es el caso del promedio móvil de 8 horas que establece la modificación a la norma de ozono y el porcentaje de días con concentraciones superiores al valor límite establecido en su NOM de protección a la salud cuya evolución considera las diferentes épocas climáticas y un nuevo análisis de población expuesta.

En el Capítulo 5 se analiza la evolución del dióxido de azufre entre 1990 y 2004, se identifica su tendencia y el porcentaje de cambio como una medida indirecta del impacto de las acciones de prevención y control. Asimismo, se describe el estado de la calidad del aire desde 1990, mediante el uso de indicadores asociados a su NOM de protección a la salud.

En el Capítulo 6 se analiza el comportamiento de las partículas entre 1990 y 2004, en el caso de las partículas suspendidas totales y las partículas menores a 10 micrómetros se identifica la tendencia y el porcentaje de cambio en concentraciones altas y típicas y se describe el estado desde 1990, considerando las épocas climáticas.

Debido a que las partículas menores a 10 micrómetros constituyen un mayor riesgo en la salud de los habitantes de la ZMVM, su análisis de estado considera el uso del nuevo análisis de población expuesta.

Con respecto a las partículas menores a 2.5 micrómetros se describe el estado actual con los valores límite propuestos en la modificación de la norma de partículas y su representación espacial, no se realiza algún análisis de tendencia debido a que se cuenta con información a partir de agosto de 2003.

En el Capítulo 7 se analiza la evolución del plomo contenido en partículas desde 1990, se identifica su tendencia y el porcentaje de cambio, así como el estado de éste en partículas suspendidas totales con respecto a su NOM de protección a la salud.

En el Capítulo 8 se describe el comportamiento temporal y espacial del depósito de sulfatos y nitratos medidos en muestras de agua de lluvia de la ZMVM, por su asociación con los principales precursores de la acidez y sus fuentes de emisión, para identificar la transferencia de estos precursores a sistemas naturales mediante el fenómeno de la lluvia ácida. También se presenta la distribución temporal y espacial del potencial de hidrógeno y la conductividad específica para complementar la descripción de dicho proceso de transferencia.

RESUMEN EJECUTIVO

El PROAIRE 2002 – 2010 considera como objetivo prioritario la reducción de los niveles de ozono (O_3) y partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) debido a que la magnitud de sus concentraciones en el aire y la alta frecuencia en que exceden los límites máximos permisibles, indican que en la actualidad son los contaminantes que constituyen un mayor riesgo a la salud. En el caso del O_3 , las acciones están orientadas a la reducción de las emisiones de los contaminantes precursores, como son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los hidrocarburos (HC). Por otro lado, también considera la reducción de otros contaminantes como son el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO_2).

En este orden de ideas, el presente documento integra el análisis de la información de calidad del aire registrada en la ZMVM. Las concentraciones altas de O_3 que se registran en la ZMVM continúan con la tendencia decreciente desde 1990, el indicador para este tipo de concentraciones (percentil 90) presenta una disminución del 42%, durante el período 1990 – 2004. Cabe mencionar que en 2004 se presentan concentraciones que superan el límite de la norma de protección a la salud en seis de cada diez días. La población que realiza actividades al aire libre en la región suroeste de la ZMVM presenta un mayor riesgo para la salud. El decremento paulatino de O_3 indica que las acciones instrumentadas para la disminución de este contaminante han tenido el impacto esperado, lo cual se observa en el análisis de movilidad de sus concentraciones y se refleja en la disminución del número de días en que la población estuvo expuesta a concentraciones superiores al valor límite y en la disminución del número de veces en que se instrumentó el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA).

En contraste, el análisis de los principales precursores del O_3 , indica que las concentraciones altas de dióxido de nitrógeno (NO_2) presentan una disminución del 30% en la mayoría de las estaciones de monitoreo de la ZMVM, desde 1990. Este decremento se refleja en la disminución de la población expuesta a concentraciones superiores al valor límite establecido en su norma de salud. Dicho límite sólo se cumplió en el año 2002, mientras que en 2003 y 2004 se rebasó durante tres y cuatro días, respectivamente. Por su parte, las concentraciones altas de NO_x registradas desde 1990, presentan un comportamiento irregular con una disminución del 32% en dos estaciones de monitoreo y un incremento del 58% en cinco estaciones.

Por su parte, el comportamiento de las concentraciones altas de monóxido de carbono (CO) registradas desde 1990 presenta una disminución consistente del 67%. Como consecuencia de dicha disminución, en los últimos cuatro años no se ha rebasado el límite establecido en la norma de salud.

El dióxido de azufre (SO_2) es otro contaminante cuyas concentraciones se han mantenido dentro de los límites permisibles. Sus emisiones provienen principalmente de la combustión y son resultado de la oxidación del azufre inorgánico y orgánico contenido en los combustibles. La evolución de este contaminante indica que el impacto de emisiones extraordinarias en 2000 y 2001, se ve disminuido por el comportamiento de las concentraciones entre 2002 y 2004. Las concentraciones altas de la mayoría de las estaciones de monitoreo presentan una disminución del 61% entre 1990 y 2004. Debido a esta situación, en los últimos tres años no se han rebasado los valores que la norma de protección a la salud establece como límite.

El comportamiento de las concentraciones altas de partículas suspendidas totales (PST) medidas con equipos manuales, indica una disminución del 63% en la mitad de las estaciones de monitoreo de la ZMVM; las demás estaciones no presentan un patrón consistente en su tendencia debido a la presencia de concentraciones extraordinarias. A pesar de esto, en 2004 se alcanzaron los niveles con menor magnitud. Durante este año se rebasó el límite máximo permisible de la norma de salud, en cuatro de cada diez muestreos realizados. El riesgo por niveles altos de este contaminante es mayor en la época seca fría, ya que al menos en seis de cada diez muestreos se supera el valor límite permisible.

La evolución de las partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) obtenidas con equipos manuales presenta un decremento del 41% en las concentraciones altas de la mayoría de las estaciones de monitoreo de la ZMVM. Las estaciones restantes presentan un comportamiento fluctuante que dificulta la evaluación de su tendencia. No obstante, en el año 2004 se presentan las concentraciones de menor magnitud e incluso, el valor límite de la norma sólo se rebasó en un muestreo durante la época seca fría. La región que comprende los municipios de Ecatepec, Tlalnepantla, Atenco y Nezahualcóyotl continúa con los niveles máximos.

Durante el año 2004 el comportamiento de las partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) obtenidas con equipos manuales, indica que las concentraciones altas cumplen con el límite propuesto como norma de salud en promedio de 24 horas. No obstante, el límite propuesto como promedio anual se rebasa en todas las estaciones de monitoreo de la ZMVM. La región que comprende los municipios de Ecatepec y Tlalnepantla presenta los niveles de mayor magnitud.

Por su parte, el comportamiento de las concentraciones altas y típicas de plomo (Pb) contenido en PST y PM_{10} presenta una disminución consistente del 94% a partir de 1990. Como consecuencia de esta disminución, no se ha rebasado el límite establecido en la norma de salud desde 1993.

La acidez en el agua de lluvia presenta un comportamiento fluctuante desde 1998, con niveles bajos en 2004. Esta situación se asocia a la evolución del sulfato (SO_4^{2-}) y el nitrato (NO_3^-) que presenta un comportamiento fluctuante con valores de depósito bajos en 2004. La distribución espacial del pH en 2004 con valores entre 5.06 y 6.31, indica que los niveles de mayor acidez se presentan en la región suroeste de la ZMVM, en dicha zona el SO_4^{2-} y el NO_3^- presentan los valores de depósitos con mayor magnitud. Por su parte, la distribución espacial de la conductividad específica, sugiere que las concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- con mayor magnitud se presentan en la zona norte, dado que éstos se asocian a los principales contaminantes precursores de la acidez, es posible que en esta zona haya una mayor emisión de SO_2 y NO_x . El patrón de distribución del pH y de la deposición de SO_4^{2-} y NO_3^- supone un proceso de transferencia de dichos contaminantes a la zona suroeste.

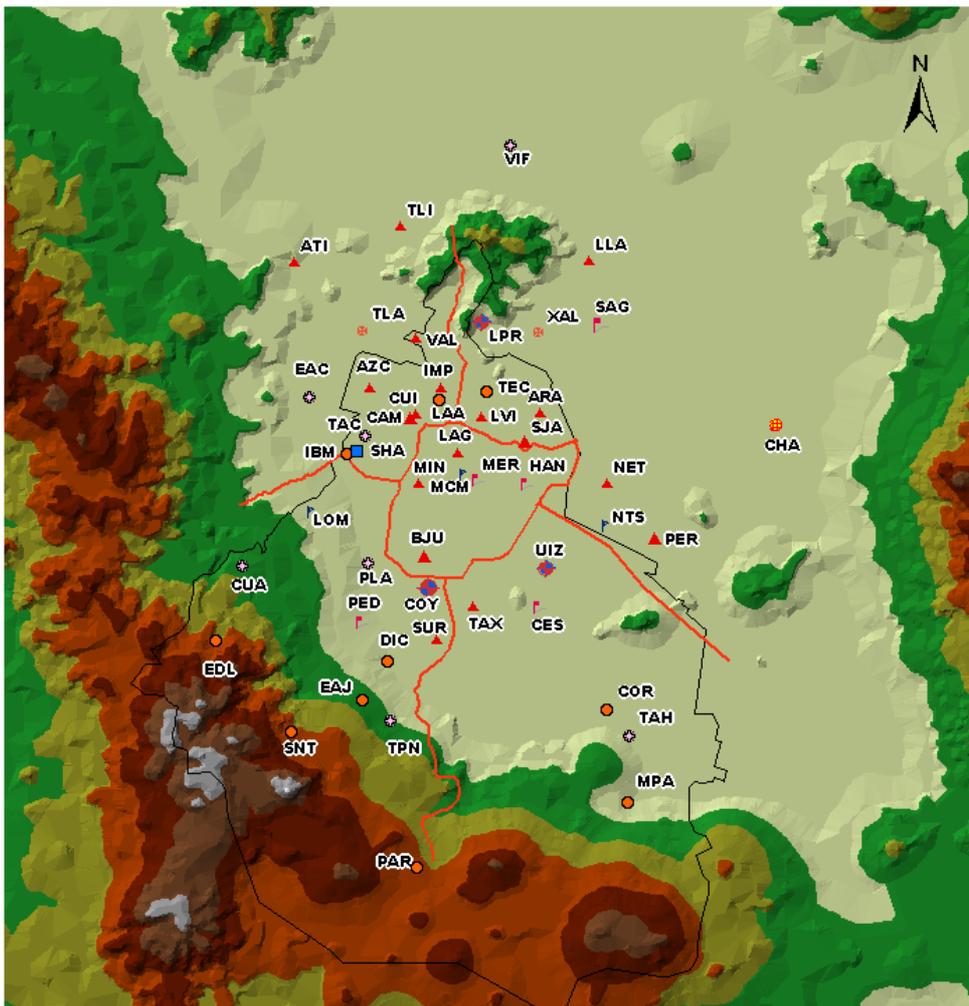
CAPÍTULO 1. INDICADORES DE CALIDAD DEL AIRE DEL SIMAT

SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) tiene por misión vigilar y evaluar el estado de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), para informar oportunamente a sus habitantes como medida de salud pública y para fortalecer la toma de decisiones en programas de prevención y control de la contaminación atmosférica.

Para lograrlo, el SIMAT cuenta con 50 estaciones de monitoreo por medio de las cuales se registran diferentes parámetros en la ZMVM (Mapa 1).

Mapa 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo del SIMAT de la Ciudad de México (2004).



NORESTE	Los Laureles	LLA
	La Presa	LPR
	La Villa	LVI
	San Agustín	SAG
	Xalostoc	XAL
	Aragón	ARA
	Netzahuacóyotl	NET
	Villa de las Flores	VIF
	Chapingo	CHA
	Netzahuacóyotl Sur	NTS
	Cerro del Tepeyac	TEC
	San Juan de Aragón	SJA
La Perla	PER	
NOROESTE	Vallejo	VAL
	Tacuba	TAC
	Enep Acatlán	EAC
	Azcapotzalco	AZC
	Tlalneantla	TLA
	Inst. Mex. del Petróleo	IMP
	Tultitlán	TLI
	Atizapán	ATI
	Legaria	IBM
	Lab. de Análisis Ambiental	LAA
	Secretaría de Hacienda	SHA
	Camarones	CAM
Cuicláhuac	CUI	
SUROESTE	Santa Ursula	SUR
	Pedregal	PED
	Plateros	PLA
	Cuajimalpa	CUA
	Tlalpan	TPN
	Lomas	LOM
	Diconsá	DIC
	Ecoguardas Ajusco	EAJ
	Exconv. Desierto Leones	EDL
	Parres	PAR
San Nicolás Totolapan	SNT	
Coyoacán	COY	
SURESTE	Cerro de la Estrella	CES
	UAM Iztapalapa	UIZ
	Taxqueña	TAX
	Tláhuac	TAH
	CORENA	COR
Milpa Alta	MPA	
CENTRO	Lagunilla	LAG
	Merced	MER
	Hangares	HAN
	Benito Juárez	BJU
	Insurgentes	MIN
	Museo de la Cd. Méx.	MCM

SIMBOLOGÍA

▲ RAMA	● RAMA, REDDA, REDMET
◆ RAMA, REDMA	⊗ RAMA, REDMA, RED DA, REDMET
○ REDDA	■ REDMA
⊕ RAMA, REDMA, REDMET	⊔ RAMA, REDMET
⊖ RAMA, REDMET	⊕ RAMA, REDDA

**SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE
GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL**

Fuente: GDF, Secretaría del Medio Ambiente, Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), 2004

Dichas estaciones se clasifican de acuerdo a la forma en que operan y al parámetro o parámetros que miden, para conformar las 4 redes de monitoreo que integran al SIMAT (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros que registra el SIMAT, 2004.

RED	EQUIPOS	PARÁMETROS
Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)	32	Ozono (O ₃), óxidos de nitrógeno (NO ₂ , NO _x y NO), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO ₂), partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀) y partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5}).
Red Meteorológica (REDMET)	15	Velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), humedad relativa (HR), temperatura ambiente (TMP), radiación solar UV-A (UVa) y radiación solar UV-B (UVb).
Red Manual (REDMA)	19	Partículas suspendidas totales (PST), PM ₁₀ , PM _{2.5} , plomo (Pb), nitratos (NO ₃ ⁻), sulfatos (SO ₄ ²⁻) y metales pesados (Cd, Cu, Fe, Ni, Mn).
Red de Depósito Atmosférico (REDDA)	16	pH, conductividad específica, aniones (NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ y CO ₃ ²⁻) y cationes (NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y K ⁺).

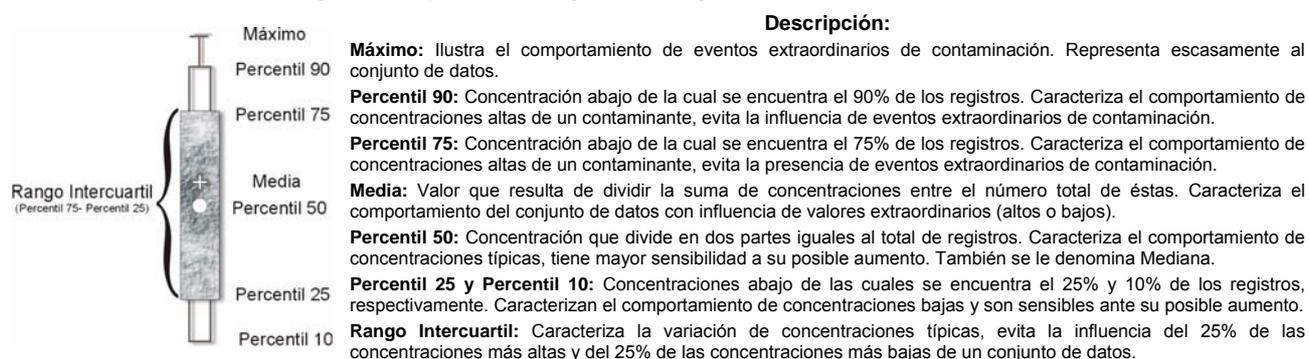
ANÁLISIS DE TENDENCIA

Selección de indicadores

El análisis de la tendencia de los contaminantes atmosféricos criterio¹ en la ZMVM, requiere indicadores confiables y representativos del conjunto de datos para inferir sobre la eficacia de las acciones de prevención y control. En el SIMAT los indicadores de calidad del aire se elaboran conforme a criterios de suficiencia de información, que consideran el tipo de dato y el desempeño histórico² de las estaciones de monitoreo.

En la Figura 1 se muestra el diagrama que representa al conjunto de datos y la descripción de los indicadores que lo componen. En este informe, se evalúa la tendencia³ de los contaminantes mediante el percentil 90 y el percentil 50 para inferir sobre su comportamiento.

Figura 1. Representación gráfica de algunos indicadores estadísticos.



Análisis de homogeneidad y tendencia

Idealmente, cuando se realiza el análisis de tendencia de un contaminante atmosférico, se espera que el comportamiento de las concentraciones sea similar en todas las estaciones de monitoreo, sin embargo, en la práctica se observa que éste puede diferir, lo cual representa un problema en la evaluación e interpretación de tendencia.

En este informe se emplea la prueba estadística de *Homogeneidad* (Gilbert O. R., 1987) para evaluar si la información de un contaminante atmosférico que registran las estaciones de monitoreo, presenta un comportamiento similar u homogéneo.

¹ Término adoptado por la Agencia 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 (O₃), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), plomo (Pb) y partículas suspendidas.

² Las estaciones con mejor desempeño histórico son aquellas que en 75% o más de los años en operación (desde 1990), han registrado el 75% o más de los datos esperados (desempeño anual bueno).

³ La tendencia es la evolución a largo plazo de una determinada variable, que permite apreciar su desplazamiento creciente o decreciente, considerando sus fluctuaciones cíclicas (El Pequeño Larousse Ilustrado, 2001).

Después de identificar la presencia de homogeneidad se evalúa la tendencia mediante la *Prueba de Mann Kendall* (Gilbert O. R., 1987), que identifica el porcentaje de cambio de un indicador durante el período analizado. Cuando el porcentaje de cambio es negativo, se dice que hay una *tendencia homogéneamente decreciente* en todas las estaciones, con un nivel de confianza de 95%. Por analogía, si el porcentaje de cambio es positivo la tendencia es *homogéneamente creciente*. Si el porcentaje de cambio es cero o no significativo se dice que no hay tendencia.

Análisis de movilidad de las concentraciones

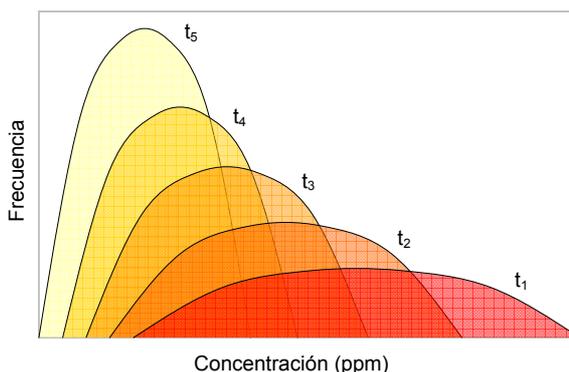
Este análisis permite identificar la evolución de las concentraciones de un contaminante atmosférico en un período de años. Es un complemento al análisis de tendencia realizado en este informe y se emplea para evaluar con mayor detalle los cambios que presentan los contaminantes durante un período de gestión, el cual se asocia con un programa ambiental (PICCA 1990 – 1994, PROAIRE 1995 – 2000 y PROAIRE 2002 – 2010).

Los supuestos de este análisis son:

- En un tiempo inicial t_1 , se tienen concentraciones altas de un contaminante (Figura 2).
- 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 (Figura 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 (Figura 2).
- Idealmente, el tiempo t_5 representa las condiciones de control, en el que se registra una frecuencia alta de concentraciones bajas (Figura 2).

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.

Figura 2. Movilidad de las concentraciones de un contaminante atmosférico.



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 Δ (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}):

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

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.

ANÁLISIS DE ESTADO

Para inferir el impacto que tiene el estado⁴ de la calidad del aire en la salud de la población, se recurre a la evaluación de indicadores relacionados con los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental, tal es el caso del porcentaje de días o muestreos en que el máximo de la concentración está por arriba de la NOM, el *promedio superior al límite permisible de la NOM y la población expuesta a concentraciones arriba de la NOM*.

Porcentaje de días o muestreos arriba de la NOM

Este indicador se refiere al porcentaje de días o muestreos al año, con valores arriba de los límites máximos permisibles definidos en las NOM para exposición aguda o crónica (Tabla 2).

⁴ Situación en que se encuentra la calidad del aire, con respecto al valor de la Norma de Salud de cada uno de los contaminantes criterio.

Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental^{/a}.

CONTAMINANTE (NOM)	VALORES LÍMITE PERMISIBLES		
	EXPOSICIÓN AGUDA		EXPOSICIÓN CRÓNICA
	CONCENTRACIÓN Y TIEMPO PROMEDIO	FRECUENCIA MÁXIMA ACEPTABLE	CONCENTRACIÓN Y TIEMPO PROMEDIO
Ozono (O ₃) (Modificación a la NOM-020-SSA1-1993) ^b	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 (CO) (NOM-021-SSA1-1993)	11 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	1 vez al año	-----
Dióxido de azufre (SO ₂) (NOM-022-SSA1-1993)	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (promedio aritmético anual)
Dióxido de nitrógeno (NO ₂) (NOM-023-SSA1-1993)	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	-----
Partículas suspendidas totales (PST) (NOM-024-SSA1-1993)	260 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	75 µg/m ³ (promedio aritmético anual)
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀) (NOM-025-SSA1-1993)	150 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	50 µg/m ³ (promedio aritmético anual)
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5}) (Proyecto de modificación a la NOM-025-SSA1-1993) ^c	65 µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	15 µg/m ³ (promedio aritmético anual)
Plomo (Pb) (NOM-026-SSA1-1993)	-----	-----	1.5 µg/m ³ (promedio aritmético de 3 meses)

^{/a} Publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 23 de diciembre de 1994.

^{/b} Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 30 de octubre de 2002.

^{/c} Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de octubre de 2002.

En el caso de las PM_{2.5}, el proyecto de modificación a la NOM indica que se debe observar el cumplimiento de los límites permisibles para exposición aguda y crónica, mediante el uso del percentil 98 y el promedio aritmético de la información registrada, respectivamente. La forma de obtenerlos es la siguiente:

Percentil 98

Se ordenan los valores diarios de concentración obtenidos durante un año en una serie ascendente ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) en la que cada valor es igual o mayor que el valor anterior ($x_n \geq x_{n-1}$).

Se multiplica el número total de valores (n) por 0.98. Se toma la parte entera del valor resultante (i) y el valor del percentil 98 se calcula con la ecuación:

$$P_{0.98} = x_{i+1}$$

donde: $P_{0.98}$ = percentil 98
 i = parte entera del producto de n y 0.98
 x_{i+1} = ($i + 1$)-ésimo número en la serie ordenada

El percentil 98 ($P_{0.98}$) es el valor de concentración con índice $i + 1$ en la serie ordenada de valores.

Promedio aritmético

Se calcula el promedio (o media) trimestral con la siguiente ecuación:

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} x_{i,t}$$

donde: \bar{x}_t = promedio para el trimestre t
 n_t = número de datos diarios válidos en el trimestre t
 $x_{i,t}$ = concentración correspondiente al día i en el trimestre t

Posteriormente, la media anual se obtiene como:

$$\bar{x}_a = \frac{1}{n_t} \sum_{t=1}^{n_t} \bar{x}_t$$

donde: \bar{x}_a = promedio anual
 n_t = número de trimestres válidos en el año.

Promedio superior al límite permisible de O₃ y PM₁₀

La mayor parte del año las concentraciones horarias de O₃ en la ZMVM, superan durante varias horas al día, el límite de protección que establece la norma de salud correspondiente (SIMAT, 2004). Esto puede significar un mayor riesgo de exposición para la población durante las horas en que se rebasa el límite permisible. El indicador del *promedio superior al límite* de O₃ (0.110 ppm) es una referencia indirecta que proporciona información de dicho riesgo y se obtiene de la siguiente manera:

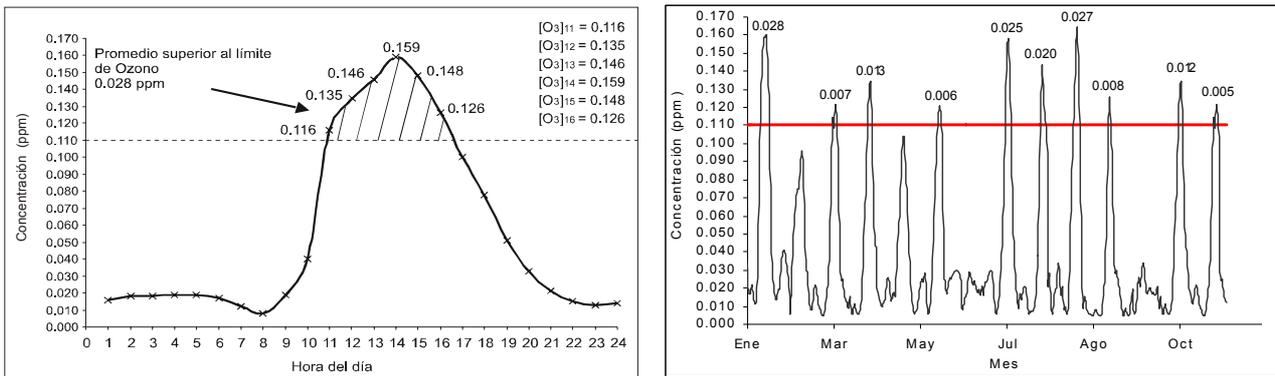
Promedio superior al límite permisible de O₃. Este indicador se obtiene con base en el número de días en que se rebasa el valor de la norma. El promedio superior al límite diario, es igual a la suma de las diferencias de los datos horarios del día ($[Concentración]_{hr}$) menos el valor límite de 0.110 ppm (límite permisible L_p), dividida por el número de horas consideradas. El promedio superior al límite permisible anual, es el promedio de los promedios superiores al límite diario. Las siguientes ecuaciones resumen el cálculo:

$$PromSupLp_{día} = \frac{\sum_{[Concentración]_{hr} > L_p} ([Concentración]_{hr} - L_p)}{\text{horas del día que se excede el límite permisible}}$$

$$PromSupLp_{año} = \frac{\sum (PromSupLp_{día})}{\text{días del año que se excede el límite permisible}}$$

Un ejemplo del cálculo para O₃ es el siguiente: La Figura 3 muestra un día hipotético con 6 concentraciones horarias superiores a 0.110 ppm y un año hipotético con 10 promedios superiores al límite permisible.

Figura 3. Comportamiento diario y anual del O₃ en una estación hipotética.



El Promedio superior al límite del día se calcula de la siguiente forma:

$$PromSupLp_{día} = \frac{(0.116 - 0.110) + (0.135 - 0.110) + (0.146 - 0.110) + (0.159 - 0.110) + (0.148 - 0.110) + (0.126 - 0.110)}{6} = 0.028 \text{ ppm}$$

El Promedio superior al límite del año se calcula de la siguiente forma:

$$PromSupLp_{año} = \frac{0.028 + 0.007 + 0.013 + 0.006 + 0.025 + 0.020 + 0.027 + 0.008 + 0.012 + 0.005}{10} = 0.0151 \text{ ppm}$$

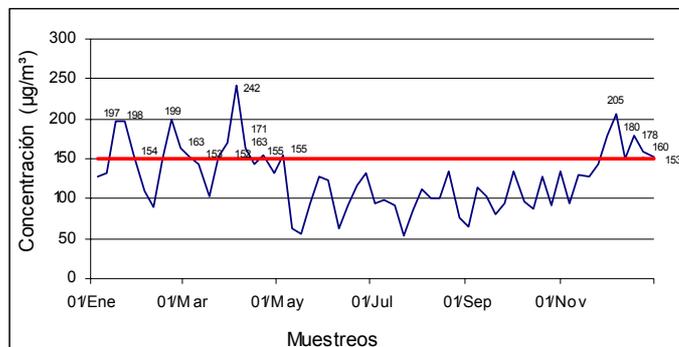
En el caso de las PM₁₀, el indicador del *promedio superior al límite* 150 µg/m³ también se obtiene de forma anual a partir de los muestreos de 24 horas. El indicador se construye de la siguiente manera:

Promedio superior al límite permisible de PM₁₀. Se obtiene como la suma de las diferencias de muestreos de 24 horas ($[Concentración]_{muestreo}$) mayores a 150 µg/m³ (L_p) y se divide por el número de muestreos considerados. La siguiente ecuación resume el cálculo:

$$PromSupLp_{año} = \frac{\sum_{[Concentración]_{muestreo} > L_p} ([Concentración]_{muestreo} - L_p)}{\text{muestreos del año que se excede el límite permisible}}$$

Un ejemplo del cálculo para PM₁₀ sería el siguiente: La Figura 4 representa el comportamiento de las concentraciones registradas en muestreos de 24 horas de un año hipotético.

Figura 4. Comportamiento anual de muestreos de PM₁₀ en una estación hipotética.



El cálculo del promedio superior al límite de 150 µg/m³ se obtuvo de la siguiente manera:

$$PromSupLp_{año} = \left\{ \begin{array}{l} (197 - 150) + (198 - 150) + (154 - 150) + (199 - 150) + (163 - 150) + (153 - 150) + \\ (242 - 150) + (171 - 150) + (163 - 150) + (152 - 150) + (155 - 150) + (155 - 150) + \\ (205 - 150) + (180 - 150) + (178 - 150) + (160 - 150) + (153 - 150) \end{array} \right\} \div 17 = 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Población expuesta a concentraciones arriba de la NOM

Por medio de este análisis se estima la población de la ZMVM con riesgo por exposición a un contaminante y el número de días que estuvo expuesta. Los resultados se presentan gráficamente para identificar la evolución de la exposición desde 1990. El análisis se realiza para O₃ y PM₁₀ ya que en la actualidad constituyen un mayor riesgo a la salud y para NO₂ debido a que es precursor de O₃.

1. Para realizar este análisis se usa la información de los censos generales de población y vivienda de 1990 y 2000 y el conteo de población y vivienda de 1995 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), así como las proyecciones de la población del Consejo Nacional de Población (CONAPO) para los años restantes.
2. Por medio de esta información se estima, para cada año, la población por AGEB⁵ a partir de 1990.
3. Posteriormente, se estima el número de días arriba de la norma de cada AGEB, por medio de la interpolación de los días con excedencias presentados en las estación de monitoreo.
4. Para cada año, se suma y grafica el número de habitantes en la ZMVM considerando el número de días que se exponen a concentraciones arriba de la norma.

ANÁLISIS DE LLUVIA ÁCIDA

El destino final de los contaminantes emitidos a la atmósfera es su dilución, transporte, depósito y conversión en otras especies debido a reacciones químicas. Existen dos mecanismos de depósito: el húmedo y el seco. El primero ocurre cuando los contaminantes entran en contacto con la lluvia y se disuelven o mezclan con ella. El segundo ocurre cuando las partículas sólidas o líquidas se depositan o adhieren a una superficie. El SIMAT recolecta y analiza muestras de lluvia entre junio y octubre de cada año. Las muestras de depósito húmedo (lluvia, llovizna, nieve, granizo, etc.) contienen a los contaminantes atmosféricos en forma de iones⁶, los cuáles se pueden medir en laboratorio.

⁵ Área Geo-Estadística Básica: división geográfica mínima empleada con fines estadísticos y censales por el INEGI.

⁶ 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. Un catión es un ión con carga positiva. Los aniones y cationes que comúnmente se analizan en el SIMAT son: sulfatos (SO₄²⁻), nitratos (NO₃⁻), cloruros (Cl⁻), amonio (NH₄⁺), sodio (Na⁺), calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺) y potasio (K⁺).

El depósito húmedo de un ión se calcula con las concentraciones obtenidas durante la época de lluvias y el volumen de las muestras. El comportamiento de los depósitos húmedos de sulfato (SO_4^{2-}) y nitrato (NO_3^-) se puede asociar al comportamiento del dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente. Aun cuando reaccionan y se producen otras formas de dichos contaminantes. A pesar de esto, el análisis del depósito húmedo de SO_4^{2-} y NO_3^- , permite inferir sobre la transferencia de los contaminantes de origen antropogénico que propician la acidez del agua (SO_2 y NO_x), durante la época de lluvias.

Depósito húmedo promedio

El indicador del depósito húmedo promedio (\bar{D}_T) es la masa promedio de un ión que se deposita en la ZMVM durante la época de lluvias. Para conocerlo se realizan los siguientes cálculos:

La concentración ponderada de un ión ($C_{ponderada}$) representa el promedio de las concentraciones obtenidas en una estación de monitoreo, durante la época de lluvias. Para su cálculo, se emplea la siguiente ecuación:

$$C_{ponderada} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

donde: $C_{ponderada}$ = Concentración ponderada de un ión (mg/m^3)
 i = i -ésima muestra
 n = Número de muestras con información válida de concentración y precipitación
 C_i = Concentración del ión analizado en la i -ésima muestra (mg/m^3)
 P_i = Volumen de la i -ésima muestra (m)

La conductividad⁷ de una solución se debe a la capacidad de los iones de transportar la electricidad. La conductividad específica⁸ (CE) se mide en laboratorio y es directamente proporcional a la concentración de los iones.

La distribución espacial de la conductividad específica (CE) en la época de lluvias, se puede asociar al comportamiento espacial de las concentraciones ponderadas de los iones, por tal motivo se usa para inferir sobre la ubicación de zonas con las concentraciones máximas de SO_4^{2-} y NO_3^- .

El depósito húmedo de un ión en una muestra (D), se obtiene multiplicando la concentración del ión (C) por el volumen de la muestra (P) expresado en altura de precipitación (m):

$$D = C \times P$$

La estimación del depósito húmedo total en una estación (D_T), cuando se tiene información de dos o más muestras, se obtiene multiplicando la concentración ponderada del ión ($C_{ponderada}$), por el volumen de precipitación acumulado en la estación, durante la época de lluvias (P_T):

$$D_T = C_{ponderada} \times P_T \qquad D_T = C_{ponderada} \times \sum_{i=1}^N P_i$$

donde: D_T = Depósito húmedo total de un ion (mg/m^2)
 P_T = Precipitación acumulada durante la época de lluvias (m)
 N = Número de muestras colectadas en el período

El indicador del depósito húmedo promedio (\bar{D}_T), se obtiene promediando los depósitos de las estaciones de monitoreo con mejor desempeño histórico durante la época de lluvias.

⁷ La conductividad eléctrica de una muestra de agua es la expresión numérica de su capacidad para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones en el agua, de su concentración total, de su movilidad iónica, de su carga o valencia y de las concentraciones relativas, así como de la temperatura.

⁸ La conductividad específica es una medida de la cantidad de iones disueltos en agua. La unidad de medida de la conductividad es el Siemen (S). Debido a que la geometría de la celda de medición afecta los valores de conductividad, las mediciones se normalizan para expresarlas en unidades de conductividad específica (S/cm) para compensar por variaciones en las dimensiones del electrodo.

Potencial de hidrógeno (pH) ponderado

La acidez del agua de lluvia se reporta en unidades de pH o potencial de hidrógeno. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en una solución. La relación entre pH y concentración de iones de H^+ es:

$$pH = -\log [H^+] \qquad [H^+] = 10^{-pH}$$

El indicador del pH ponderado se obtiene transformando el pH de las muestras obtenidas durante la época de lluvias, a concentraciones de iones de H^+ . Posteriormente, se obtiene la concentración ponderada de iones de H^+ y se transforma a unidades de pH.

CAPÍTULO 2. MONÓXIDO DE CARBONO – CO

ANÁLISIS DE TENDENCIA

Las concentraciones de CO registradas entre 1990 y 2004, en las 16 estaciones de monitoreo⁹ del SIMAT con mejor desempeño histórico que miden este contaminante, muestran un comportamiento descendente, destacando el período de 1990 a 1993 cuando el descenso es notable (Figura 5 y Tabla 3).

El análisis del comportamiento de las concentraciones altas de CO, por medio del percentil 90, indica que las concentraciones han disminuido de forma significativa en un 67% con respecto al año 1990. Por su parte, en las concentraciones típicas (percentil 50) el decremento es del 78%. Esto sugiere que a lo largo del período 1990 – 2004, el decremento de las concentraciones típicas de CO ha sido mayor que el de las concentraciones altas (Tabla 3).

Al evaluar el comportamiento de este contaminante, excluyendo la información registrada entre 1990 y 1994, se obtienen porcentajes de decremento con menor magnitud, tanto en concentraciones altas como típicas, esto muestra la importancia del decremento registrado al inicio de la década de los 90 (Tabla 3).

Figura 5. Comportamiento de CO en la ZMVM, 1990–2004.

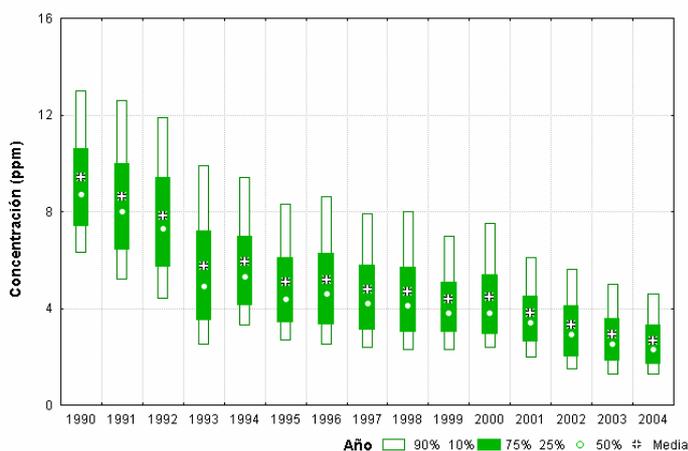


Tabla 3. Análisis de tendencia para CO en la ZMVM, 1990–2004 y 1995–2004.

CO (1990-2004)	Estaciones con tendencia Decreciente	
	Significativa	% de cambio
Percentil 90	16	67
Percentil 50	16	78

CO (1995-2004)	Estaciones con tendencia Decreciente	
	Significativa	% de cambio
Percentil 90	16	45
Percentil 50	16	50

ANÁLISIS DE ESTADO

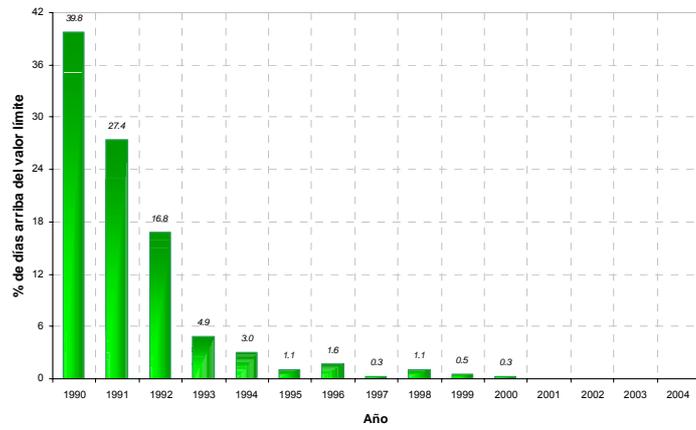
La Norma Oficial Mexicana NOM–021–SSA1–1993, establece que la concentración de CO, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de 11 ppm en promedio móvil de 8 horas una vez al año, para la protección a la salud de la población susceptible.

La evaluación de esta norma en la ZMVM, indica que en los últimos cuatro años (2001 – 2004) no se ha rebasado el límite máximo permisible establecido.

Esta situación es consecuencia del decremento que han tenido las concentraciones altas de CO desde 1990. Cabe mencionar que dicho año presenta concentraciones que rebasaron el valor de la norma, durante el 40% de los días (Figura 6).

⁹ LAG, TAC, EAC, TLA, XAL, MER, PED, CES, PLA, HAN, UIZ, BJU, SAG, VAL, AZC y SUR.

Figura 6. Porcentaje de días al año arriba del valor límite de la NOM de CO en la ZMVM, 1990–2004.



CAPÍTULO 3. ÓXIDOS DE NITRÓGENO

DIÓXIDO DE NITRÓGENO – NO₂

ANÁLISIS DE TENDENCIA

El análisis de las concentraciones de NO₂ registradas entre 1990 y 2004, en las 16 estaciones de monitoreo¹⁰ del SIMAT con mejor desempeño histórico, muestra que las concentraciones altas (percentil 90) y típicas (percentil 50) presentan un comportamiento fluctuante (Figura 7).

A pesar de esta situación, el análisis de tendencia en concentraciones altas indica una disminución significativa del 30% en doce estaciones de monitoreo. Es importante mencionar que dichas concentraciones presentan un incremento del 48% en dos estaciones (UIZ y SUR). Esta situación indica que la disminución de las concentraciones altas ocurre en la mayoría de las estaciones de monitoreo de la ZMVM (Tabla 4).

En contraste, el análisis de tendencia de las concentraciones típicas muestra un decremento del 31% sólo en seis estaciones de monitoreo, mientras que en nueve no se presenta una tendencia, e inclusive en una estación (UIZ) se tiene un aumento del 21% (Tabla 4). Esta situación muestra que la disminución de las concentraciones típicas ocurre de forma aislada en algunas estaciones de monitoreo de la ZMVM.

Figura 7. Comportamiento de NO₂ en la ZMVM, 1990–2004.

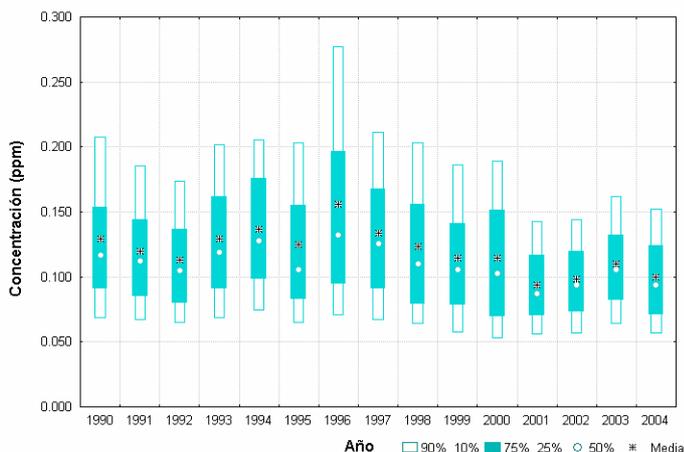


Tabla 4. Análisis de tendencia para NO₂ en la ZMVM, 1990–2004.

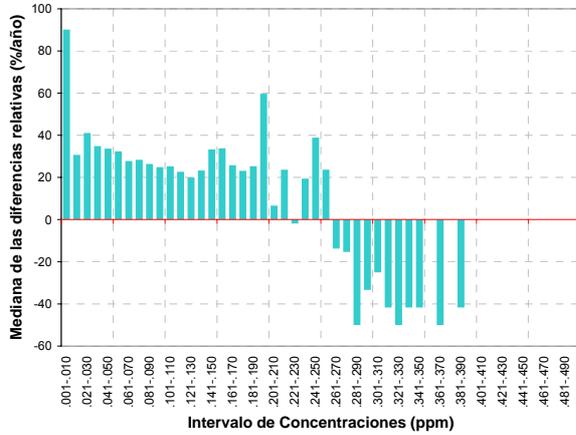
NO ₂	Estaciones con tendencia Decreciente			Estaciones con tendencia Creciente			
	Indicador	Sign.	%	No sign.	Sign.	%	No sign.
Percentil 90		12	30	1	2	48	1
Percentil 50		6	31	7	1	21	2

¹⁰ TAC, EAC, SAG, TLA, XAL, MER, PED, CES, HAN, BJU, PLA, LAG, AZC, UIZ, TAX y SUR.

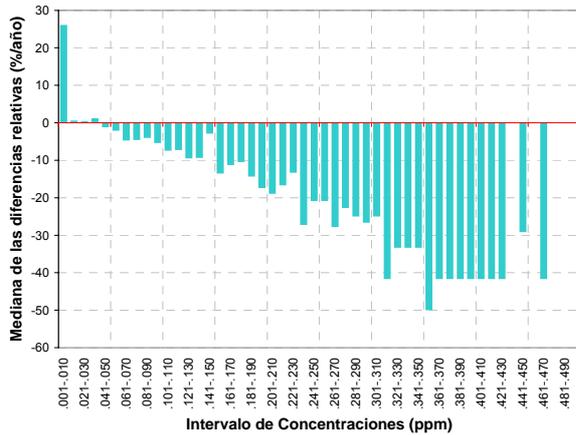
El análisis de movilidad en las concentraciones de NO₂ indica lo siguiente:

Figura 8. Movilidad de las concentraciones de NO₂ en la ZMVM.

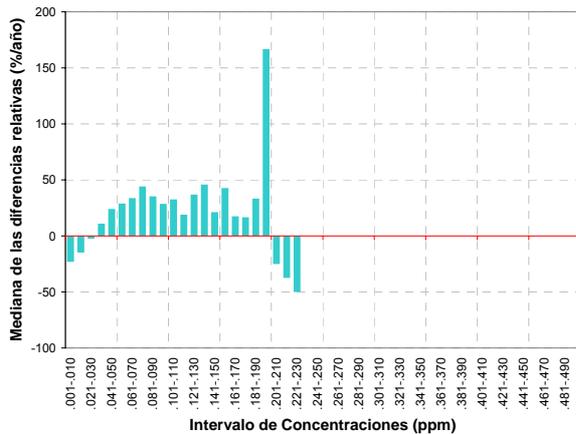
a) 1990 – 1994



b) 1995 – 2000



c) 2001 – 2004



☺ En el período de 1990 a 1994 (Figura 8.a) disminuye la presencia de concentraciones en el intervalo de 0.260 a 0.390 ppm.

☺ El aumento de concentraciones en el intervalo de 0 a 0.260 ppm, indica que las concentraciones mayores se desplazan a dicho intervalo.

☹ Entre los años de 1995 a 2000 se registran concentraciones superiores a las del período anterior con valores mayores a 0.390 ppm y hasta 0.470 ppm (Figuras 8.a y 8.b).

☹ A lo largo de este período hay una disminución paulatina en las concentraciones del intervalo de 0.040 a 0.470 ppm. Esto indica que las concentraciones máximas se presentan al inicio del período (en 1996) y después disminuyen gradualmente (Figuras 7 y 8.b).

☺ Como consecuencia del decremento observado en las concentraciones máximas del período anterior, durante los años de 2001 a 2004 no se presentan concentraciones mayores a 0.230 ppm (Figuras 8.b y 8.c).

☺ A lo largo de este período continúan disminuyendo los registros entre 0.200 y 0.230 ppm.

☺ Como resultado de lo anterior hay un aumento en las concentraciones del intervalo de 0.030 a 0.200 ppm. Sobresale el aumento del intervalo entre 0.190 y 0.200 ppm.

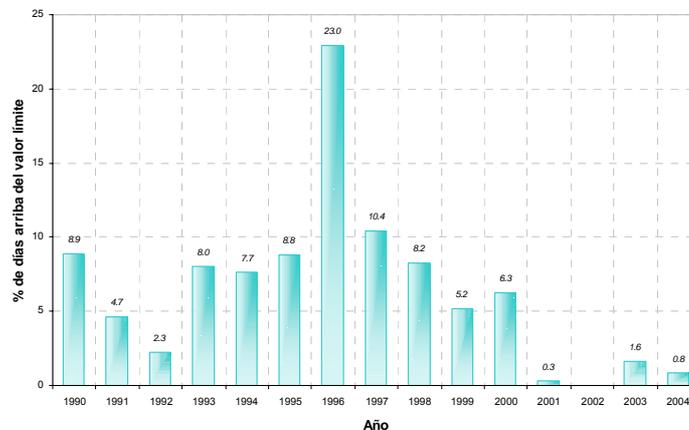
ANÁLISIS DE ESTADO

La Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, especifica que la concentración de NO₂, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo normado de 0.210 ppm, en una hora una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible.

A lo largo del período 1990 – 2004, el porcentaje de días arriba de este valor normado presenta un decremento fluctuante con su valor máximo en 1996 (Figura 9), en este año se presentaron 84 días (23%) con niveles arriba de la norma, de los cuales 48 se registraron en la estación de monitoreo EAC.

La evaluación de la norma en la ZMVM, indica que sólo se ha cumplido en el año 2002 (Figura 9). Por su parte, el año 2004 presenta tres días por arriba del límite permisible, dos de éstos se registraron en la estación PLA y uno en la estación TAX.

Figura 9. Porcentaje de días al año arriba del valor límite de la NOM de NO₂ en la ZMVM, 1990–2004.

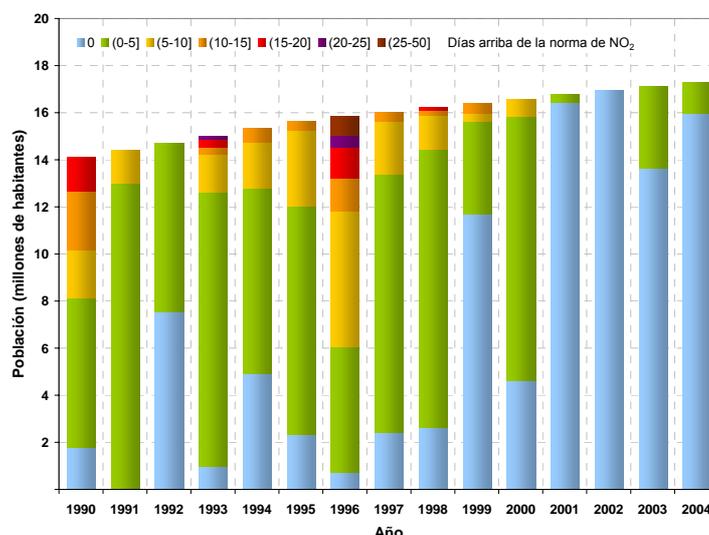


EXPOSICIÓN DE LA POBLACIÓN

La estimación de la población expuesta a días del año en que las concentraciones de NO₂ rebasaron el límite de 0.210 ppm (Figura 10), por al menos una hora al día, muestra que:

- ☹ En 1991, la población de la ZMVM (14.4 millones de habitantes) presenta entre uno y diez días de exposición.
- ☹ En 1996 se estima que cerca de 4 millones de habitantes se expusieron por más de diez días y hasta 50.
- ☺ El análisis de 2003 indica que 3.5 millones de habitantes estuvieron expuestos durante cinco días o menos.
- ☺ En 2004, aproximadamente 1.3 millones de personas se expusieron hasta por 5 días.

Figura 10. Población anual expuesta a concentraciones de NO₂ arriba del valor límite permisible en la ZMVM, por días, 1990–2004.



ÓXIDOS DE NITRÓGENO – NO_x

ANÁLISIS DE TENDENCIA

El análisis de los NO_x registrados entre 1990 y 2004¹¹, en las 15 estaciones de monitoreo¹² del SIMAT con mejor desempeño histórico, indica que las concentraciones altas (percentil 90) y concentraciones típicas (percentil 50) presentan un comportamiento fluctuante (Figura 11).

Debido a esta situación, el análisis de tendencia en concentraciones altas indica una disminución significativa del 32% sólo en dos estaciones de monitoreo (PED y EAC), mientras que en ocho estaciones no se presenta tendencia e incluso cinco estaciones (TLA, SAG, LAG, UIZ y SUR) muestran un incremento significativo del 58% (Tabla 5). Esta situación indica que en algunas estaciones de la ZMVM tienden a aumentar las concentraciones altas de NO_x registradas en los últimos años.

Asimismo, el análisis de tendencia en concentraciones típicas muestra una disminución del 30% en tres estaciones de monitoreo (PED, EAC y HAN), mientras que ocho estaciones no presentan tendencia y cuatro (TLA, LAG, UIZ y SUR) presentan un incremento del 79% (Tabla 5). Esta situación indica que las concentraciones típicas registradas en algunas estaciones de la ZMVM aumentaron en los últimos años.

¹¹ Es importante señalar que antes de 2001 no se contaba con métodos de validación para la información de NO_x.

¹² TAC, EAC, SAG, TLA, MER, PED, CES, HAN, BJU, PLA, LAG, AZC, UIZ, TAX y SUR.

Figura 11. Comportamiento de NO_x en la ZMVM, 1990–2004.

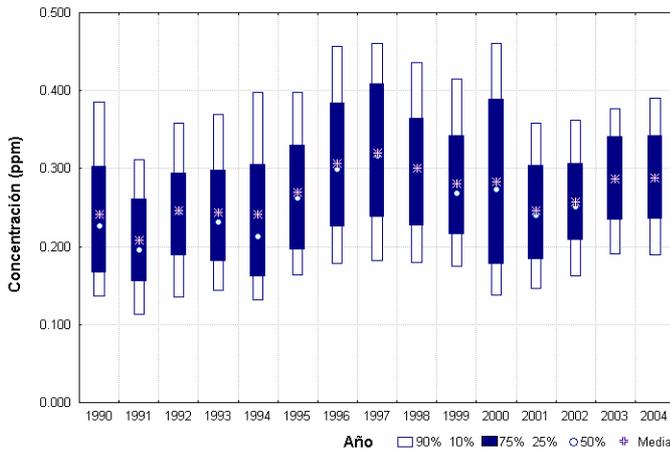


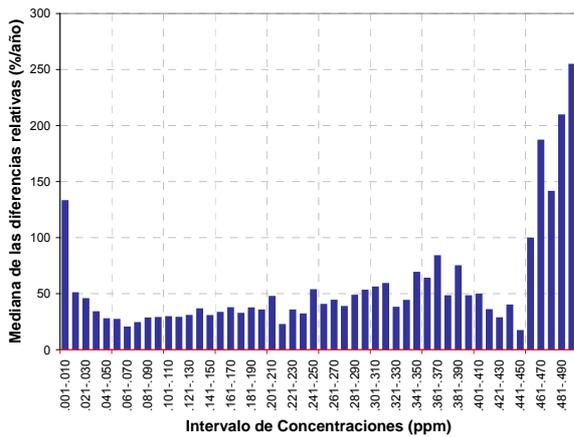
Tabla 5. Análisis de tendencia para NO_x en la ZMVM, 1990–2004.

NO _x	Estaciones con tendencia Decreciente			Estaciones con tendencia Creciente		
	Indicador	Sign.	%	No sign.	Sign.	No sign.
Percentil 90	2	32	6	5	58	2
Percentil 50	3	30	4	4	79	4

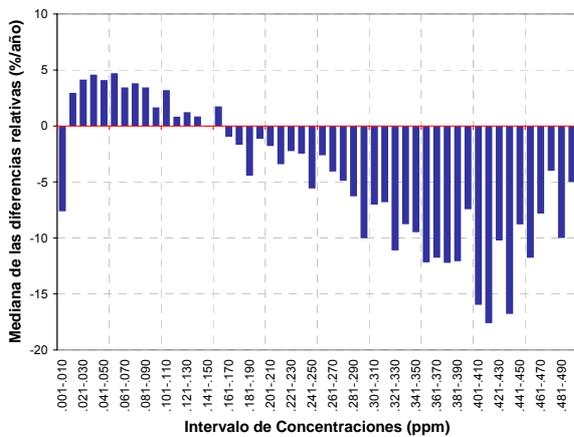
El análisis de la movilidad de las concentraciones de NO_x muestra los siguientes resultados:

Figura 12. Movilidad de las concentraciones de NO_x en la ZMVM.

a) 1990 – 1994



b) 1995 – 2000



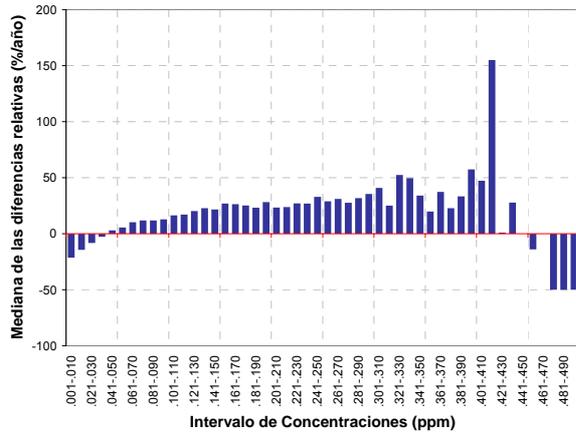
☹ Al final del período 1990 – 1994 (Figura 12.a) se presenta un incremento general de las concentraciones de NO_x.

☹ Durante este período, sobresale un aumento importante en las concentraciones del intervalo de 0.450 a 0.500 ppm.

☺ A lo largo del período 1995 – 2000 se revierte la situación anterior (Figuras 12.a y 12.b).

☺ En dicho período disminuyen gradualmente las concentraciones del intervalo entre 0.160 y 0.500 ppm, en consecuencia aumentan las concentraciones entre 0.010 y 0.160 ppm.

c) 2001 – 2004



- ☹ En los últimos años de este período nuevamente se incrementan las concentraciones (Figuras 11, 12.b y 12.c).
- ☹ El aumento en las concentraciones del intervalo de 0.160 a 0.450 ppm contrasta con lo observado en el mismo intervalo durante el período anterior.
- ☺ El análisis en este período muestra una disminución de las concentraciones altas entre 0.450 y 0.500 ppm.

CAPÍTULO 4. OZONO – O₃

ANÁLISIS DE TENDENCIA

Las concentraciones de O₃ registradas de 1990 a 2004, en las 14 estaciones de monitoreo¹³ del SIMAT con mejor desempeño histórico, presentan un comportamiento decreciente paulatino, con fluctuaciones en los años anteriores a 1998 (Figura 13 y Tabla 6).

Durante este período, el análisis de tendencia de las concentraciones altas de O₃ (percentil 90), indica una disminución significativa del 42%. Asimismo, las concentraciones típicas (percentil 50) presentan un decremento del 43% (Tabla 6).

Las concentraciones altas y típicas de mayor magnitud se presentan en 1991, mientras que los valores mínimos se registran en el año 2004 (Figura 13).

Figura 13. Comportamiento de O₃ en la ZMVM, 1990–2004.

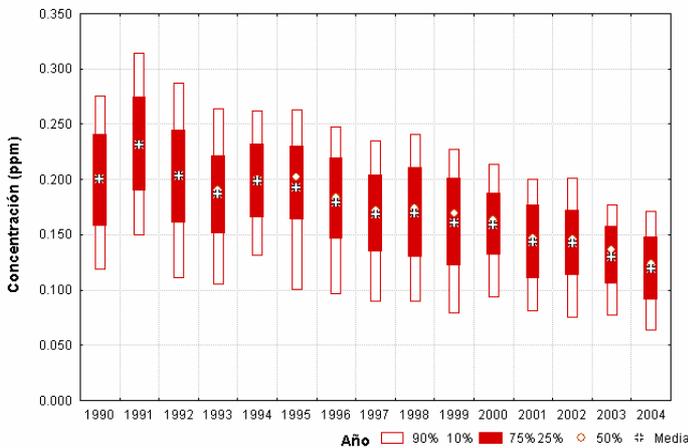


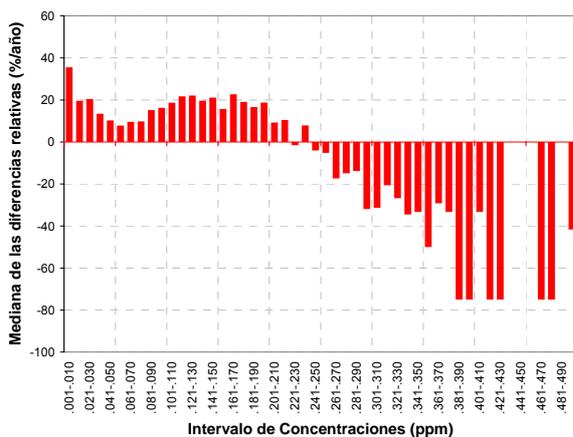
Tabla 6. Análisis de tendencia para O₃ en la ZMVM, 1990–2004.

O ₃	Estaciones con tendencia Decreciente	
	Indicador	Significativa
Percentil 90	14	42
Percentil 50	14	43

El análisis de movilidad en concentraciones de O₃ indica que:

Figura 14. Movilidad de las concentraciones de O₃ en la ZMVM.

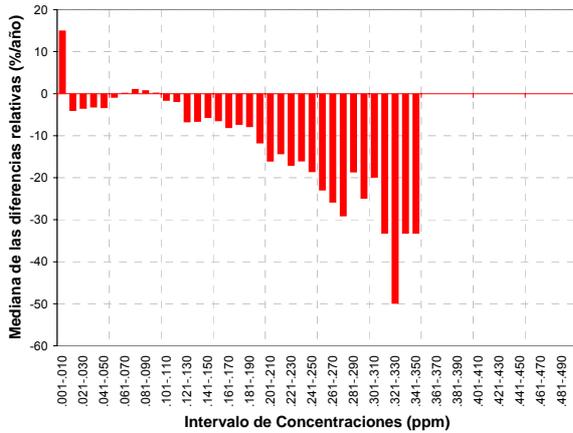
a) 1990 – 1994



- ☺ En los años de 1990 a 1994 (Figura 14.a) disminuyen gradualmente las concentraciones de O₃ mayores a 0.240 ppm registradas al inicio de dicho período.
- ☺ A lo largo de este período aumentan las concentraciones menores a 0.240 ppm.

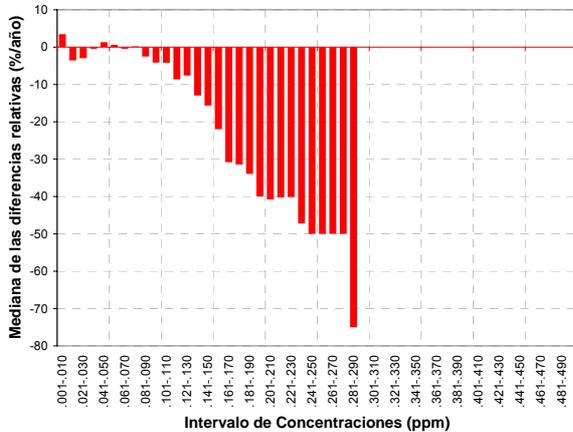
¹³ LAG, TAC, EAC, TLA, XAL, MER, PED, CES, PLA, HAN, UIZ, BJU, SAG, VAL, AZC y SUR.

b) 1995 – 2000



- ☺ Como consecuencia del decremento observado en el período anterior, de 1995 a 2000 no se presentan concentraciones mayores a 0.350 ppm (Figuras 14.a y 14.b).
- ☺ También disminuyen las concentraciones entre 0.240 y 0.350 ppm, incluso se presenta una disminución general en las concentraciones menores a 0.240 ppm.

c) 2001 – 2004



- ☺ En este período continúan disminuyendo las concentraciones, incluso solo se presentan concentraciones menores a 0.290 ppm (Figuras 14.b y 14.c).

ANÁLISIS DE ESTADO

La modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993 contempla dos valores, para efectos de protección a la salud de la población más susceptible:

- La concentración de O₃, como contaminante atmosférico, debe ser menor o igual a 0.110 ppm, promedio horario, para no ser rebasado una vez al año.
- La concentración del promedio de ocho horas de O₃, como contaminante atmosférico, debe ser menor o igual a 0.080 ppm, tomado como el quinto máximo, en un período de un año

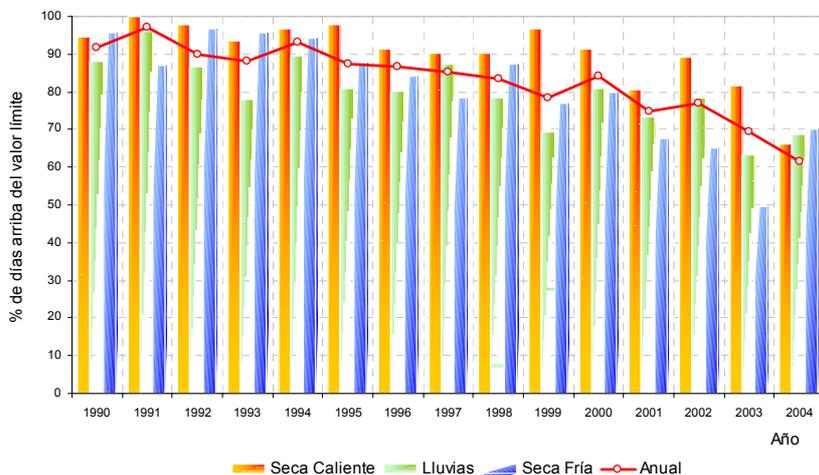
La evaluación de 1990 a 2004 de esta norma, indica que en la ZMVM no se ha cumplido con los valores que establece como límite. Sin embargo, el decremento que presentan las concentraciones altas de O₃ se refleja en la evolución decreciente del porcentaje de días en que se supera el valor límite que señala la norma (0.110 ppm), de 1990 a 2004 (Figura 15).

En el año 2004 se presenta el menor porcentaje de días con concentraciones superiores al límite de la norma, siendo igual a 61% (225 días).

La época del año con el mayor porcentaje de días que presentan concentraciones superiores al límite de O₃ en 2004 es la seca fría. Esta situación sólo se presenta en 1990 y 1993, en los demás años es la época seca caliente la que presenta el mayor porcentaje. Por su parte, la época de lluvias de 2004 presenta un porcentaje ligeramente mayor al de la época seca caliente, esta situación no se había presentado anteriormente (Figura 15).

Cabe mencionar que en el año 2004 el porcentaje anual es menor a los porcentajes de las épocas del año, debido a que la época de lluvias contempla a enero y febrero de 2005. El porcentaje de días con concentraciones superiores al límite en dichos meses es del 84 y 71%, respectivamente, mientras que para enero y febrero de 2004 es del 32 y 38%.

Figura 15. Porcentaje de días al año arriba del valor límite de la NOM de O₃ en la ZMVM, 1990–2004.



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

El análisis del promedio móvil de ocho horas como quinto máximo, indica que el valor límite de 0.080 ppm de O₃ se ha excedido en todas las estaciones de monitoreo de la ZMVM desde 1990. Sin embargo, su evolución presenta una disminución paulatina de 1990 a 2004 (Tabla 7).

Tabla 7. Quinto máximo de promedios móviles de ocho horas de O₃ (ppm) en las estaciones de monitoreo de la ZMVM (1990–2004).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
VALOR MÁXIMO	0.207	0.237	0.247	0.208	0.201	0.202	0.186	0.191	0.192	0.172	0.162	0.157	0.157	0.139	0.129
VALOR MÍNIMO	0.111	0.146	0.149	0.118	0.125	0.143	0.121	0.119	0.118	0.112	0.117	0.104	0.105	0.103	0.090
Estaciones que cumplen la NOM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS

El decremento paulatino de las concentraciones de O₃ se refleja en el número de veces por año que se instrumenta el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA). Desde 1998 hay una disminución paulatina en el número de ocasiones en que se instrumenta la precontingencia y la Fase I de contingencia. Debido a esta situación en el año 2004 no se activó el PCAA para O₃ (Tabla 8). La última contingencia para este contaminante se instrumentó el 18 de septiembre de 2002.

Tabla 8. Casos de Precontingencias y Contingencias Fase I y Fase II para O₃ en la ZMVM, bajo el esquema actual del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

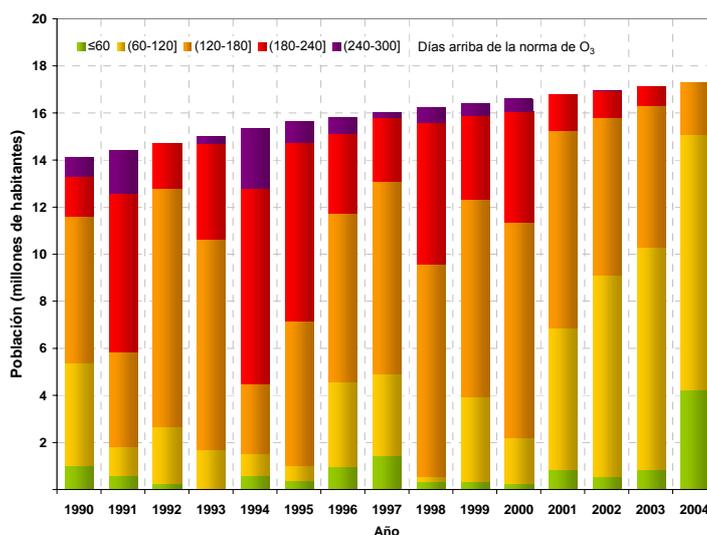
Fase del PCAA	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Precontingencia de O ₃	78	217	167	103	127	147	86	72	77	39	24	14	9	2	0
Contingencia Fase I de O ₃	—	2	4	12	1	5	3	3	4	3	0	0	1	0	0
Contingencia de O ₃ y PM ₁₀	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0	0	0	0	0
Contingencia Fase II de O ₃	—	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

EXPOSICIÓN DE LA POBLACIÓN

La estimación de la población expuesta a días del año en los que las concentraciones de O₃ rebasaron el valor límite de 0.110 ppm (Figura 16), por al menos una hora al día, muestra que:

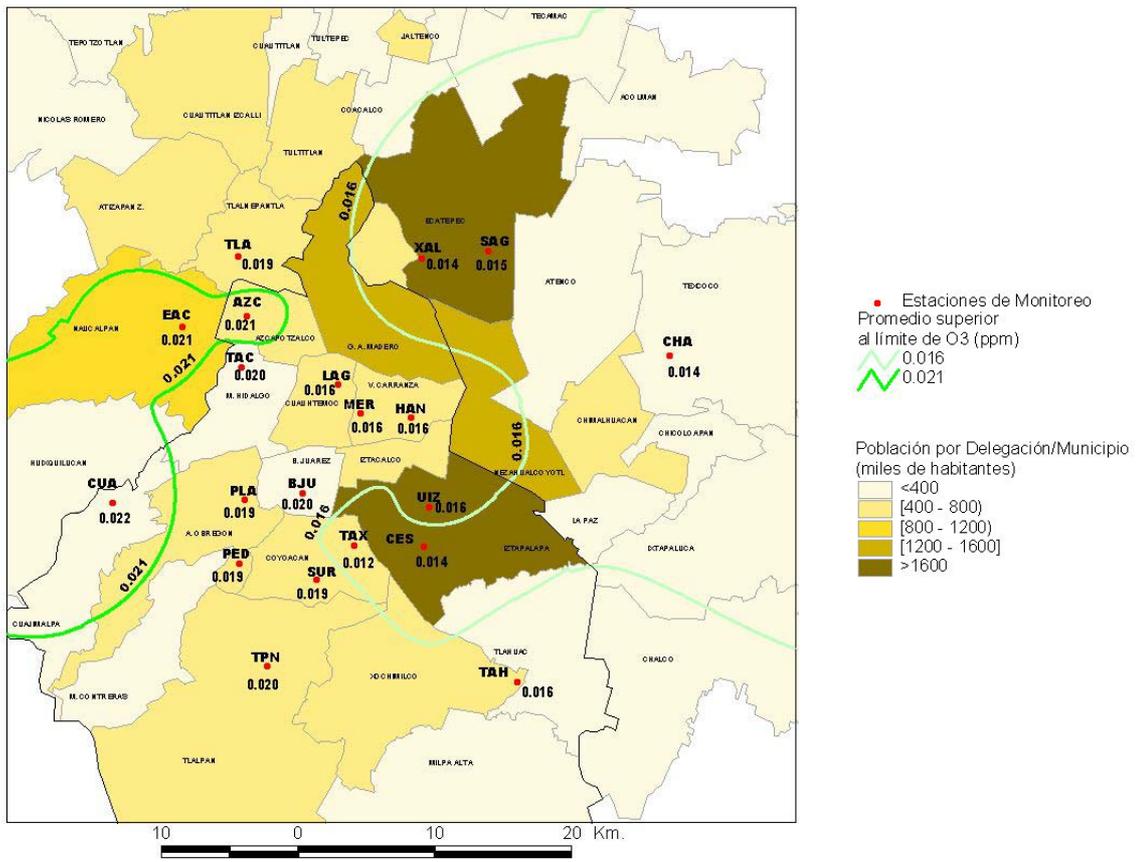
- ☺ En 1994 aproximadamente 10.8 millones de habitantes se expusieron en más de 180 días. En 2004 no hay población expuesta por más de 180 días.
- ☺ En 1992 hay cerca de 10.1 millones de habitantes que se exponen entre 120 y 180 días. En 2004 disminuye la población expuesta a 2.2 millones.
- ☺ Del período 1990 – 2004, este último presenta la mayor cantidad de habitantes expuestos por menos de 60 días (2.2 millones), mientras que en 1993 la población de la ZMVM se expuso por más de 60 días.

Figura 16. Población anual expuesta a concentraciones de O₃ arriba del valor límite permisible en la ZMVM, por días, 1990–2004.



La evaluación del promedio superior al límite de O₃ en 2004, muestra valores que oscilan entre 0.012 y 0.022 ppm. Su distribución espacial indica que la intensidad con que se rebasa diariamente el límite de 0.110 ppm es mayor en las delegaciones Cuajimalpa, Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Benito Juárez, Tlalpan, Coyoacán, Álvaro Obregón y en los municipios Naucalpan, Huixquilucan y Tlalnepantla del Estado de México (Mapa 2).

Mapa 2. Distribución espacial del promedio superior al límite de O₃, 2004.



CAPÍTULO 5. DIÓXIDO DE AZUFRE – SO₂

ANÁLISIS DE TENDENCIA

El análisis de las concentraciones altas (percentil 90) y típicas (percentil 50) de SO₂ registradas en las 16 estaciones de monitoreo¹⁴ del SIMAT con mejor desempeño histórico, muestra que éstas presentan un comportamiento decreciente entre 1990 y 2004. Los valores máximos se observan entre 1990 y 1992. El año 2004 presenta las concentraciones mínimas (Figura 17).

A pesar de que hay un incremento en las concentraciones en 2000 y 2001 (Figura 17), el análisis de tendencia de concentraciones altas muestra que a lo largo del período 1990 – 2004 hay una disminución significativa del 61% en 13 estaciones de monitoreo. Es importante mencionar que tres estaciones (LAG, UIZ y BJU) no presentan una tendencia. Esta situación indica que la disminución de las concentraciones altas ocurre en la mayoría de las estaciones de monitoreo de la ZMVM (Tabla 9).

Por su parte, el análisis de tendencia de concentraciones típicas muestra un decremento del 80% en las 16 estaciones de monitoreo. Esto significa que durante el período 1990 – 2004, el decremento de las concentraciones típicas es mayor al de las concentraciones altas en todas las estaciones de monitoreo de la ZMVM (Tabla 9).

Al analizar la tendencia de 1993 a 2004, se obtienen porcentajes de decremento con menor magnitud tanto en concentraciones altas como típicas, esto implica que las concentraciones de SO₂ disminuyen aún cuando se excluye la información registrada entre 1990 y 1992 (Tabla 9).

El análisis de tendencia a partir de 1993, indica una disminución del 31% en las concentraciones altas de nueve estaciones de monitoreo. Las concentraciones registradas en las demás estaciones (XAL, TLA, TAC, EAC, LAG, UIZ y BJU) presentan un comportamiento que dificulta la identificación de su tendencia. Esta situación puede estar influenciada por el incremento de las concentraciones altas en 2000 y 2001, dado que las concentraciones típicas presentan una tendencia decreciente en las 16 estaciones de la ZMVM (Tabla 9).

Figura 17. Comportamiento de SO₂ en la ZMVM, 1990–2004.

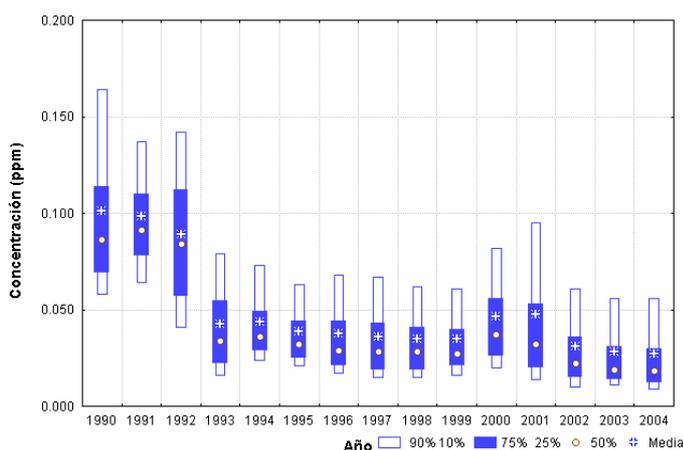


Tabla 9. Análisis de tendencia para SO₂ en la ZMVM, 1990–2004 y 1993–2004.

SO ₂ (1990-2004)	Estaciones con tendencia Decreciente			Estaciones con tendencia Creciente
	Indicador	Sign.	%	No sign.
Percentil 90	13	61	2	1
Percentil 50	16	80	0	0

SO ₂ (1993-2004)	Estaciones con tendencia Decreciente			Estaciones con tendencia Creciente
	Indicador	Sign.	%	No sign.
Percentil 90	9	31	4	3
Percentil 50	16	52	0	0

¹⁴ SUR, TAC, EAC, LVI, AZC, TLA, XAL, MER, PED, CES, ARA, LAG, PLA, UIZ, BJU y TAX.

ANÁLISIS DE ESTADO

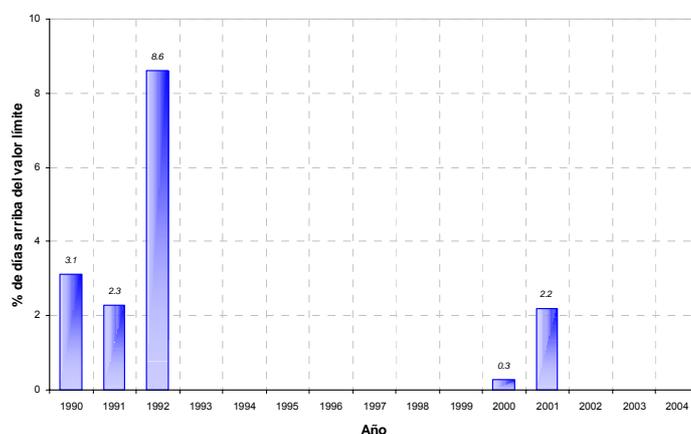
La Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993, establece que la concentración de SO₂, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo normado de 0.130 ppm, en 24 horas una vez al año y 0.030 ppm en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible.

En la ZMVM el primer límite que establece esta norma se cumple de 1993 a 1999 y de 2002 a 2004. Esta situación es consecuencia del decremento que presentan las concentraciones altas de SO₂ (Figuras 17 y 18).

En 1992 se presenta el mayor porcentaje de días con concentraciones superiores a 0.130 ppm, con 8.6% (Figura 18). Las concentraciones máximas de este año, se registraron en las estaciones de monitoreo AZC, LPR y XAL, principalmente.

En 2000 y 2001 hay días que presentan concentraciones superiores a 0.130 ppm (Figura 18). Durante estos años, la estación TLA presenta uno y siete días, respectivamente.

Figura 18. Porcentaje de días al año arriba del valor límite de la NOM de SO₂ en la ZMVM, 1990-2004.



La evaluación del promedio anual de SO₂ en la ZMVM, muestra que en los períodos de 1990 a 1993 y de 2000 a 2001 se rebasa el valor límite de 0.030 ppm (Tabla 10). En este último período sólo la estación TLA presenta valores superiores al límite permisible.

Tabla 10. Promedio aritmético anual (ppm) de SO₂ en las estaciones de monitoreo de la ZMVM (1990-2004).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
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
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
Estaciones que exceden la NOM	11	11	11	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0

CAPÍTULO 6. PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES – PST

ANÁLISIS DE TENDENCIA

La evolución de las concentraciones de PST registradas en las 10 estaciones de monitoreo^{15,16} del SIMAT con mejor desempeño histórico, muestra que las concentraciones altas (percentil 90) y típicas (percentil 50) disminuyen en forma consistente de 1990 a 2004. Los valores máximos del período se presentan en 1991 y los mínimos en 2004 (Figura 19).

El análisis de tendencia de 1990 a 2004 muestra una disminución significativa del 63% en las concentraciones altas de cinco estaciones de monitoreo (XAL, MER, CES, TLA y TAX). Las demás estaciones presentan un comportamiento fluctuante que dificulta la identificación de una tendencia (Tabla 11). Esta situación indica que el decremento de las concentraciones altas ocurre sólo en algunas estaciones de monitoreo de la ZMVM.

El análisis de tendencia de las concentraciones típicas muestra un decremento del 83% en siete estaciones de monitoreo (Tabla 11). Esto indica que la disminución de las concentraciones típicas ocurre en la mayoría de las estaciones de monitoreo de la ZMVM y que a lo largo de este período, es mayor la disminución en concentraciones típicas que en concentraciones altas.

Figura 19. Comportamiento de PST en la ZMVM, 1990–2004.

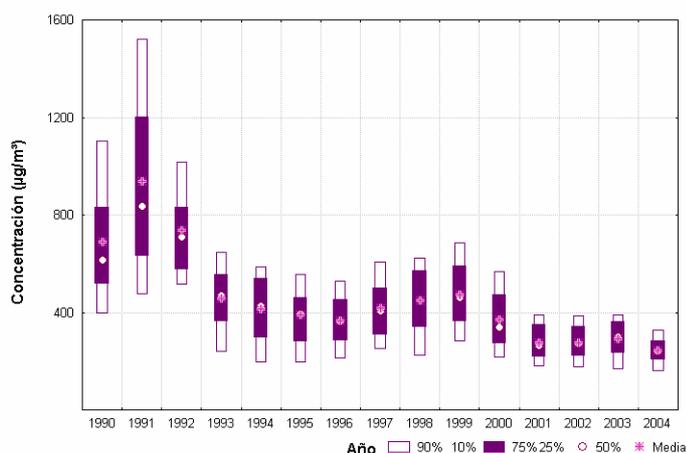


Tabla 11. Análisis de tendencia para PST en la ZMVM, 1990–2004.

PST	Estaciones con tendencia Decreciente			
	Indicador	Significativa	% de cambio	No significativa
Percentil 90	5	63	5	
Percentil 50	7	83	3	

ANÁLISIS DE ESTADO

La Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA1-1993, establece que la concentración de PST como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo permisible de 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en 24 horas, en un período de un año y 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible.

La evaluación de esta norma en la ZMVM, muestra que el primer valor que establece como límite no se cumple desde 1990. Sin embargo, el decremento que presentan las concentraciones altas de PST se refleja en la evolución decreciente del porcentaje de muestreos con concentraciones superiores a 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figuras 19 y 20).

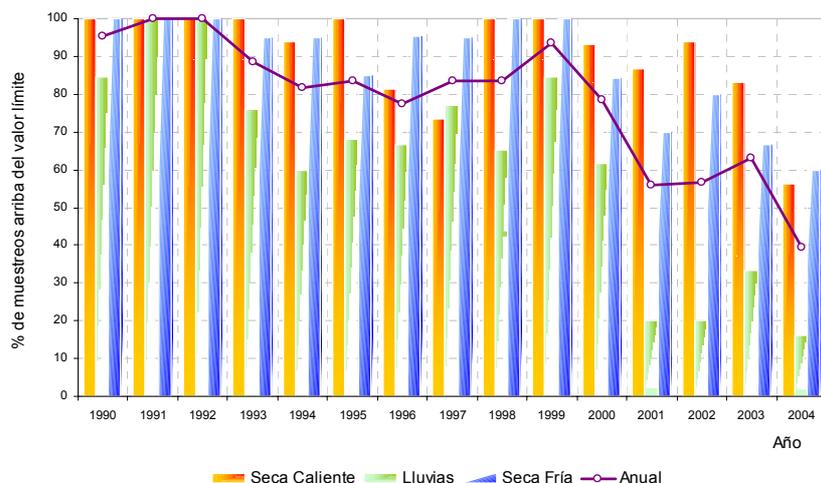
¹⁵ CES, MER, PED, TLA, XAL, UIZ, HAN, POT, TAX y CHA.

¹⁶ Las estaciones de monitoreo HAN, POT, TAX y CHA presentan concentraciones de PST entre 1990 a 1996, sin embargo, se usan en el análisis de tendencia porque en el período que muestrearon cumplen con los criterios de mejor desempeño histórico establecidos por el SIMAT.

El año 2004 presenta el menor porcentaje de muestreos (39%) con concentraciones mayores a dicho límite (Figura 20). Este porcentaje equivale a 24 muestreos anuales, de los cuales dos se registraron en la estación UIZ y el resto en la estación XAL.

La época de lluvias que presenta el menor porcentaje de muestreos con concentraciones superiores a $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es la de 2004, con 16%. Las épocas de lluvias de 2001 y 2002 rebasan dicho límite en un 20% de sus muestreos. Por su parte, la época seca caliente de 2004 presenta el 56% de sus muestreos con concentraciones mayores al valor límite, le sigue la época seca caliente de 1997, con 73%. Las épocas seca fría de 2003 y 2004 presentan los porcentajes de menor magnitud con 67 y 60%, respectivamente (Figura 20).

Figura 20. Porcentaje de muestreos anuales arriba del valor límite de la NOM de PST en la ZMVM, 1990–2004.



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

El análisis de la media aritmética anual, indica que el valor límite de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST aún se excede en todas las estaciones de monitoreo de la ZMVM. Sin embargo, su evolución muestra una disminución paulatina desde 1990. El 2004 presenta los promedios de menor magnitud (Tabla 12).

Tabla 12. Promedio aritmético anual de muestreos de PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en las estaciones de monitoreo de la ZMVM (1990–2004).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
VALOR MÁXIMO	639	957	702	433	413	375	365	405	431	466	369	277	276	295	245
VALOR MÍNIMO	125	130	91	108	101	100	109	92	156	140	127	96	94	94	81
Estaciones que cumplen la NOM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRÓMETROS – PM_{10}

En el SIMAT se realizan mediciones de PM_{10} por medio de la RAMA y la REDMA. La RAMA esta equipada con monitores automáticos de partículas que emplean el método de microbalanza oscilante (Tapered Element Oscillating Microbalance, TEOM, por sus siglas en inglés) o de atenuación de radiación β . Estos monitores se usan como método equivalente por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency, EPA, por sus siglas en inglés). Las concentraciones que se obtienen en forma automática y continua cada hora todos los días, sirven para instrumentar programas de vigilancia por medio del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) y de regulación ambiental de emisiones extraordinarias, como el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA).

La REDMA emplea muestreadores de alto volumen (High-Volume, HI-VOL, por sus siglas en inglés) que son designados como método de referencia por la EPA, para obtener muestras de PM₁₀ de 24 horas cada 6 días. Las concentraciones obtenidas en laboratorio de forma gravimétrica se emplean en el análisis de tendencia y estado al evaluar el cumplimiento de las Normas de Salud.

ANÁLISIS DE TENDENCIA

El análisis de las concentraciones altas (percentil 90) y típicas (percentil 50) de PM₁₀ registradas en las 6 estaciones manuales de monitoreo¹⁷ con mejor desempeño histórico, indica que éstas presentan una disminución entre 1990 y 2004. En 1990, 1993 y 1996 se presentan los valores máximos y en 2004 los valores mínimos (Figura 21).

El análisis de tendencia de 1990 a 2004 muestra un decremento significativo del 41% en las concentraciones altas de cuatro estaciones de monitoreo (XAL, CES, PED y TLA). Las dos estaciones restantes presentan un comportamiento fluctuante que dificulta la evaluación de su tendencia (Tabla 13). Esto indica que la disminución de las concentraciones altas se presenta en la mayoría de las estaciones de monitoreo de la ZMVM.

El análisis de tendencia de las concentraciones típicas muestra un decremento semejante al de las concentraciones altas con 46% en cinco estaciones de monitoreo (Tabla 13). Cabe mencionar que las concentraciones altas y típicas registradas en la estación NTS no presentan tendencia, debido a su comportamiento fluctuante influenciado por las frecuentes tolvaneras de su entorno.

Figura 21. Comportamiento de PM₁₀ en la ZMVM, 1990–2004.

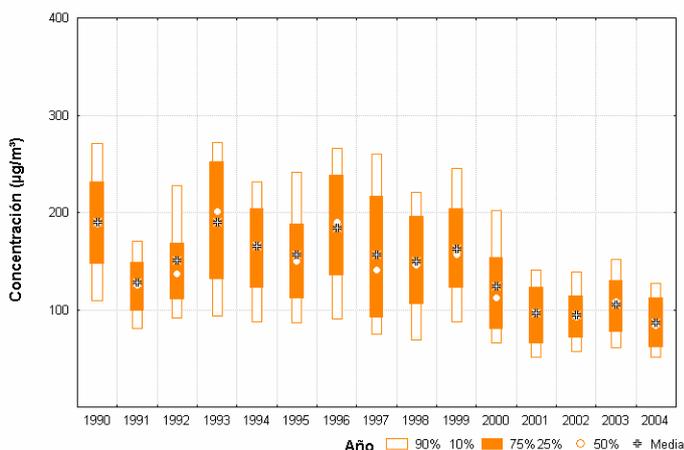


Tabla 13. Análisis de tendencia para PM₁₀ en la ZMVM, 1990–2004.

PM ₁₀	Estaciones con tendencia Decreciente			Estaciones con tendencia Creciente
	Indicador	Sign.	%	No sign.
Percentil 90	4	41	1	1
Percentil 50	5	46	0	1

ANÁLISIS DE ESTADO

La Norma Oficial Mexicana NOM–024–SSA1–1993, especifica que la concentración de PM₁₀, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite permisible de 150 µg/m³, en 24 horas una vez al año y 50 µg/m³ en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible.

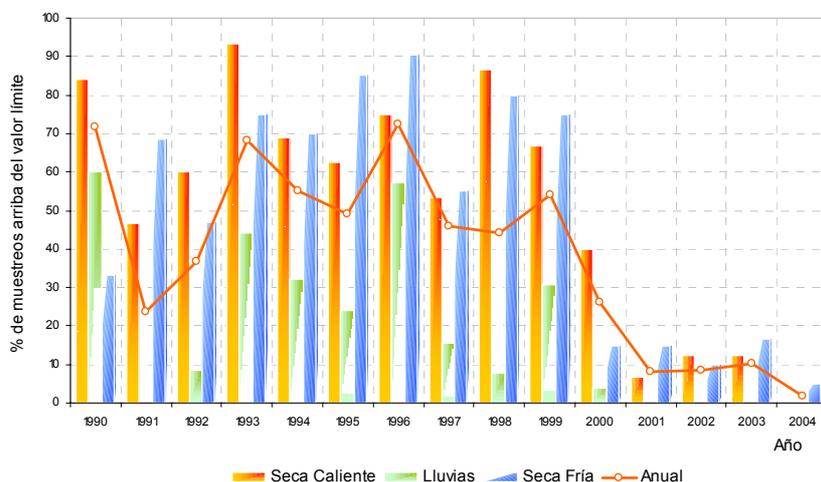
La evaluación de esta norma en la ZMVM, indica que el primer límite no se cumple desde 1990. A pesar de esto, el decremento que presentan las concentraciones altas de PM₁₀ se refleja en la disminución del porcentaje de muestreos con concentraciones superiores a 150 µg/m³ (Figuras 21 y 22).

El año 2004 presenta un muestreo con concentraciones mayores a 150 µg/m³ en la estación de monitoreo XAL, lo que representa el 1.6% de los muestreos anuales (Figura 22).

¹⁷ CES, MER, PED, TLA, XAL y NTS.

La época seca caliente de 2004 sobresale por no presentar muestreos con concentraciones superiores al valor límite. Asimismo, las épocas de lluvias de 1999 y de 2001 a 2004 no presentan muestreos con concentraciones mayores a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las épocas seca fría de 2002 y 2004 presentan los porcentajes de menor magnitud con 10 y 5%, respectivamente (Figura 22).

Figura 22. Porcentaje de muestreos anuales arriba del valor límite de la NOM de PM_{10} en la ZMVM, 1990–2004.



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

El análisis de la media aritmética anual, indica que el valor límite de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} se excede desde 1990 en la ZMVM. Sin embargo, su evolución muestra una disminución paulatina. En el año 2004 se presentan los promedios de menor magnitud, e incluso hay dos estaciones que cumplen con el valor de la norma (Tabla 14).

Tabla 14. Promedio aritmético anual de muestreos de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en las estaciones de monitoreo de la ZMVM (1990–2004).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
VALOR MÁXIMO	187	127	139	188	163	155	191	155	144	159	125	95	90	100	88
VALOR MÍNIMO	64.2	62.4	50.3	58.0	55.1	49.7	46.2	37.9	51.6	43.0	43.7	41.9	41.1	41.7	33.2
Estaciones que cumplen la NOM	0	0	0	0	0	1	2	1	0	1	1	1	1	1	2

PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS

Los monitores automáticos de PM_{10} se usan como método equivalente por la EPA, además tienen la característica que registran datos en forma continua (cada hora), lo cual permite identificar los períodos de mayor riesgo para la población cuando se expone al aire libre a fin de instrumentar acciones encaminadas a disminuir la intensidad de esos períodos y proteger la salud de la población. Por este motivo las concentraciones horarias registradas con equipos automáticos se usan para evaluar el PCAA.

El decremento de las concentraciones de PM_{10} registradas en las 12 estaciones automáticas de monitoreo¹⁸ con mejor desempeño histórico, a partir de 1995, se refleja en la disminución del número de veces que se instrumenta el PCAA por año. En el año 2004 no hubo necesidad de instrumentar alguna de las fases del PCAA, ya que no se presentaron concentraciones extraordinarias de PM_{10} (Tabla 15). La última contingencia por este contaminante se instrumentó el 25 de diciembre de 2003.

¹⁸ LVI, TLA, XAL, MER, PED, CES, SUR, EAC, HAN, PLA, SAG y TAX.

Tabla 15. Casos de Precontingencias y Contingencias Fase I y Fase II para PM₁₀ en la ZMVM, bajo el esquema actual del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

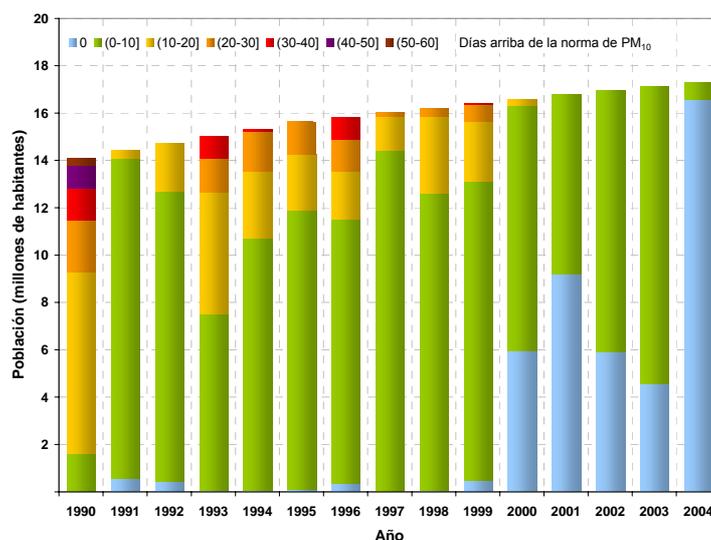
Fase del PCAA	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Precontingencia de PM ₁₀	4	0	3	1	0	1	0
Contingencia Fase I de PM ₁₀	1	0	1	0	0	1	0
Contingencia de O ₃ y PM ₁₀	0	0	0	0	0	0	0
Contingencia Fase II de PM ₁₀	0	0	0	0	0	0	0

EXPOSICIÓN DE LA POBLACIÓN

La estimación de la población expuesta a días del año en que la concentración de los muestreos de 24 horas de PM₁₀ rebasa el valor límite de 150 µg/m³ (Figura 23), indica lo siguiente:

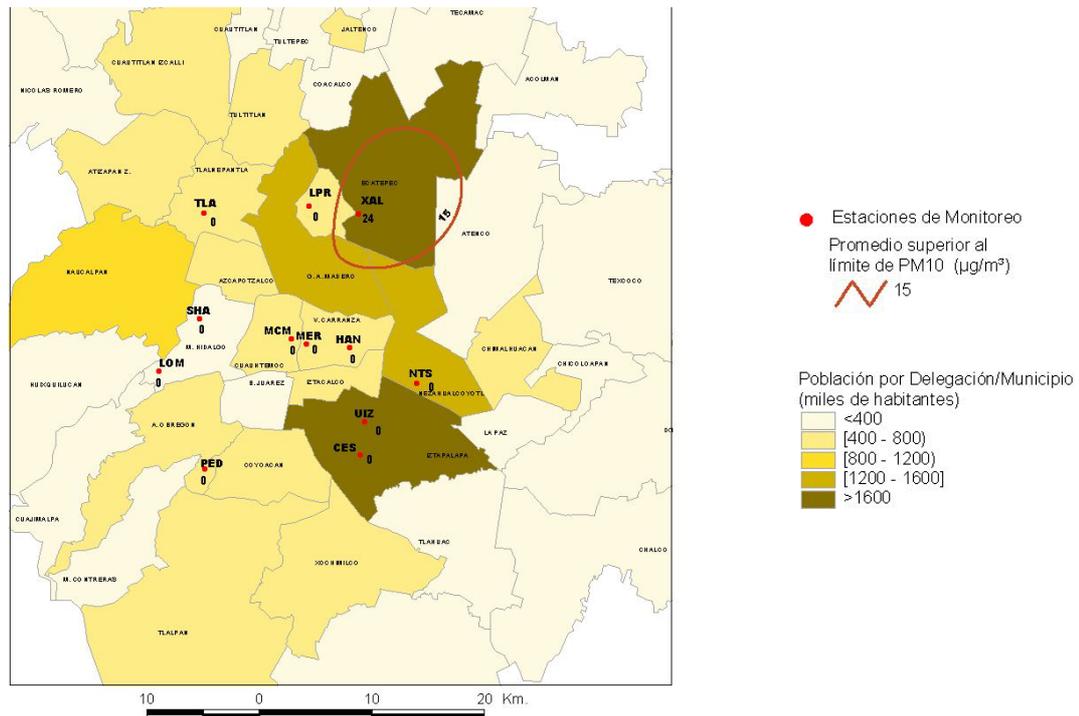
- ☺ En 1990 la población que no estuvo expuesta era de 21 mil habitantes. En 2004 aumentó a aproximadamente 16.6 millones de habitantes.
- ☺ En 1990 había 4.8 millones de persona expuestas por más de 20 días. A partir del año 2000 no hay habitantes expuestos por más de 20 días.
- ☺ En 1990 cerca de 7.7 millones de habitantes se expusieron entre 11 y 20 días. A partir de 2001 no hay habitantes expuestos por 11 días o más.
- ☺ En 1997 hay cerca de 14.4 millones de personas que se exponen entre 1 y 10 días. En 2004 disminuye la población expuesta a 730 mil habitantes.

Figura 23. Población anual expuesta a concentraciones de PM₁₀ arriba del valor límite permisible en la ZMVM, por días, 1990–2004.



La evaluación del promedio superior al límite de PM₁₀ en 2004, muestra un valor de 24 µg/m³ en la estación de monitoreo XAL. Su distribución espacial indica que la intensidad con que se rebasa diariamente el límite de 150 µg/m³ es mayor en los municipios Ecatepec, Tlalnepantla, Atenco y Nezahualcóyotl del Estado de México (Mapa 3).

Mapa 3. Distribución espacial del promedio superior al límite de PM₁₀, 2004.



PARTÍCULAS MENORES A 2.5 MICRÓMETROS – PM_{2.5}

En el SIMAT se realizan mediciones de PM_{2.5} por medio de la RAMA y la REDMA. La RAMA obtiene concentraciones cada hora durante todos los días por medio de monitores que emplean el método de microbalanza oscilante (Tapered Element Oscillating Microbalance, TEOM, por sus siglas en inglés) o de atenuación de radiación β . Estos monitores están designados como método equivalente por la EPA. Las concentraciones obtenidas pueden servir para instrumentar programas de vigilancia y regulación ambiental de emisiones extraordinarias.

La REDMA emplea muestreadores de PM_{2.5} de bajo flujo (16.67 l/min) para obtener muestras de 24 horas cada 6 días, las cuales se analizan en laboratorio para determinar su concentración y/o caracterización. Los muestreadores de bajo flujo están designados como método de referencia por la EPA. Las concentraciones que se obtienen en laboratorio se usan en el análisis de estado al evaluar el cumplimiento de los valores propuestos como Normas de Salud para PM_{2.5}.

ANÁLISIS DE ESTADO

La Secretaría de Salud Federal elaboró el proyecto de modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 para efectos de protección a la salud de la población más susceptible por exposición a concentraciones de PM_{2.5}. Esta propuesta tiene concordancia con la norma vigente de los EUA y su aplicación será de carácter nacional. Los valores especificados como concentración máxima de PM_{2.5} en el aire ambiente son:

- 65 µg/m³ promedio de 24 horas.
- 15 µg/m³ promedio anual.

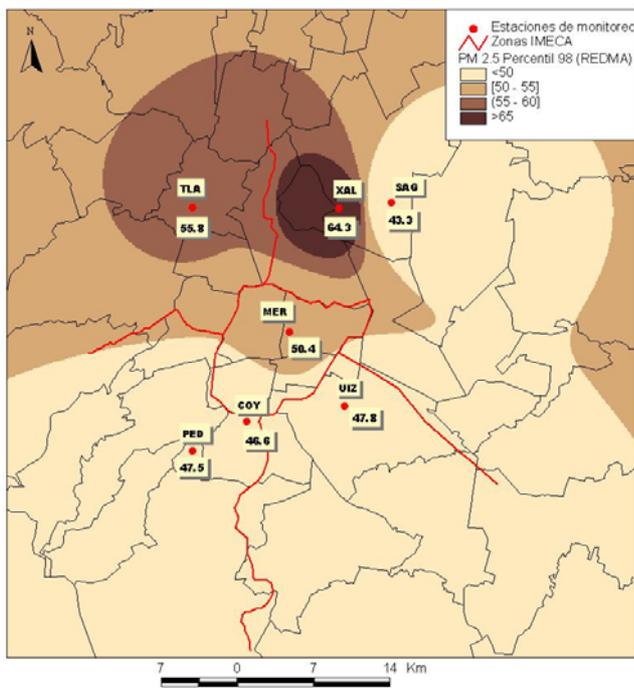
La evaluación en 2004 del primer límite propuesto como norma, indica que éste se cumple en todas las estaciones de monitoreo de la ZMVM. No obstante, el límite propuesto como promedio anual se rebasa en todas las estaciones de monitoreo de la ZMVM

El análisis de la distribución espacial de $PM_{2.5}$ en la ZMVM por medio del percentil 98 (Mapa 4), muestra valores que oscilan entre 43.3 y 64.3 $\mu g/m^3$. Destaca la estación de monitoreo XAL por presentar concentraciones altas que pueden calificarse como locales (hot spot). Los valores que alcanza este indicador se pueden calificar como bajos al compararlos con el límite de 65 $\mu g/m^3$ que propone el proyecto de norma.

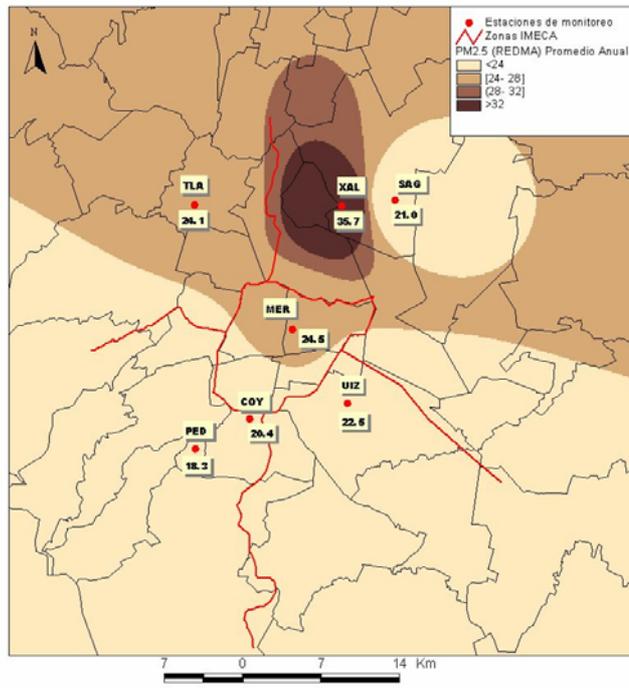
La distribución espacial de $PM_{2.5}$ mediante el promedio anual muestra un patrón similar al reportado con el percentil 98, en él sobresale nuevamente la estación XAL como sitio con posible influencia de emisiones locales (Mapas 4 y 5). Con relación a la magnitud de sus concentraciones, el promedio anual de XAL presenta 35.7 $\mu g/m^3$, mientras que en el suroeste de la ZMVM, la estación PED presentó la concentración de menor magnitud con 18.3 $\mu g/m^3$. Esta situación indica que en comparación con el límite anual de 15 $\mu g/m^3$ que propone el proyecto de norma, los valores del promedio anual se pueden calificar como altos.

La distribución espacial de las concentraciones de $PM_{2.5}$ por medio del percentil 98 y del promedio anual, muestra valores altos en los municipios Ecatepec y Tlalnepantla del Estado de México (Mapas 4 y 5).

Mapa 4. Distribución espacial del percentil 98 de $PM_{2.5}$ registradas con equipos manuales, en 2004.



Mapa 5. Distribución espacial del promedio anual de $PM_{2.5}$ registradas con equipos manuales, en 2004.



CAPÍTULO 7. PLOMO CONTENIDO EN PARTÍCULAS – Pb

ANÁLISIS DE TENDENCIA

Las concentraciones de Pb contenido en PST así como en PM₁₀, registradas desde 1990 en las 5 estaciones de monitoreo¹⁹ con mejor desempeño histórico, muestran un comportamiento descendente.

El análisis del comportamiento de las concentraciones altas de Pb en PST, por medio del percentil 90, indica que éstas han disminuido de forma significativa en un 94% con respecto a 1990. Mientras que las concentraciones típicas (percentil 50) presentan una disminución ligeramente mayor (95%). Cabe destacar que a partir del año 2000, las concentraciones de este contaminante muestran una consistencia en su magnitud (Figura 24 y Tabla 16).

Las concentraciones altas y típicas de Pb en PM₁₀ han disminuido de forma significativa en un 94% con respecto al año 1990. Dichas concentraciones presentan magnitudes similares desde el año 2000 (Tabla 16 y Figura 24).

Figura 24. Comportamiento de Pb en la ZMVM, 1990–2004.

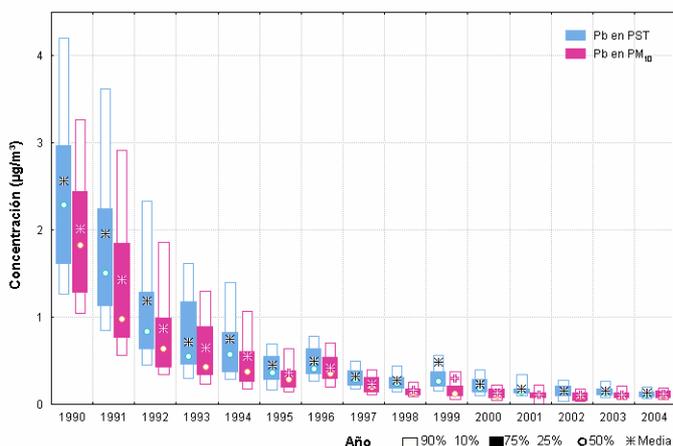


Tabla 16. Análisis de tendencia para Pb en la ZMVM, 1990–2004.

Pb en PST	Estaciones con tendencia Decreciente	
	Indicador	% de cambio
Percentil 90	5	94
Percentil 50	5	95

Pb en PM ₁₀	Estaciones con tendencia Decreciente	
	Indicador	% de cambio
Percentil 90	5	94
Percentil 50	5	94

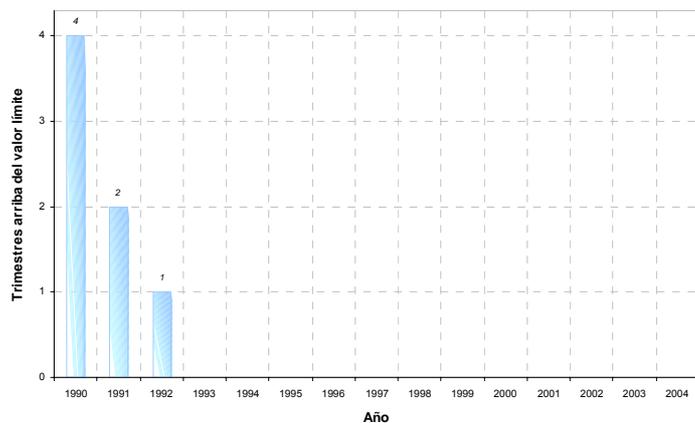
ANÁLISIS DE ESTADO

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/m³ en 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 ha rebasado el límite máximo permisible en los últimos doce años (1993 – 2004). Cabe mencionar que en 1990 se rebasó el valor de la norma, durante los cuatro trimestres (Figura 25).

¹⁹ TLA, XAL, MER, PED y CES.

Figura 25. Trimestres del año arriba del valor límite de la NOM de Pb contenido en PST en la ZMVM, 1990–2004.



CAPÍTULO 8. LLUVIA ÁCIDA

El *depósito atmosférico* es el proceso por el cual los gases, aerosoles²⁰ y partículas que contaminan la atmósfera, son removidos y depositados en la superficie de la Tierra. Cuando el depósito ocurre por medio de fenómenos físicos como la adsorción, la absorción, la gravedad, el viento, etc., se denomina *depósito seco*, cuando los contaminantes se depositan durante la precipitación pluvial²¹, se le llama *depósito húmedo* (SIMAT, 2002; Vet, 1991).

En condiciones naturales la lluvia presenta una ligera acidez (pH 5.6) provocada por el ácido carbónico (H_2CO_3) que se genera al estar en equilibrio el dióxido de carbono atmosférico (CO_2) y el agua (H_2O). La emisión de contaminantes de origen antropogénico como el SO_2 y los NO_x en combinación con la humedad atmosférica, propicia la formación de ácidos fuertes (H_2SO_4 y HNO_3) que incrementan la acidez en el agua de lluvia; por este motivo se dice que son precursores del fenómeno conocido como *lluvia ácida*, *precipitación ácida* o *deposición ácida*. El monitoreo y cuantificación del depósito húmedo permite inferir sobre la transferencia de los contaminantes precursores de la acidez a los ecosistemas terrestres y acuáticos, ampliando el conocimiento sobre su flujo y dinámica atmosférica, como base para la definición de indicadores de lluvia ácida.

En la REDDA se realizan muestreos de agua de lluvia por medio de equipos semiautomáticos para depósito atmosférico diferenciado (depósito húmedo y depósito seco) desde 1998 que se analizan para determinar la concentración de algunos iones.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL

El análisis del comportamiento y del estado se enfoca principalmente a los aniones SO_4^{2-} y NO_3^- debido a que se asocian a los contaminantes precursores de la lluvia ácida (SO_2 y NO_x).

El depósito húmedo promedio de SO_4^{2-} en las 10 estaciones de monitoreo²² con mejor desempeño histórico, presenta un comportamiento fluctuante de 1998 a 2004, con el valor máximo en 1998 y el mínimo en 2004. El depósito húmedo promedio de SO_4^{2-} , durante la época de lluvias de 2004, fue de 14.3 kg/ha (Figura 26). La presencia de valores altos en 2000 y 2001 puede asociarse con el incremento de las concentraciones altas de SO_2 registradas en estos años (Figura 17).

El depósito húmedo promedio de NO_3^- en las 16 estaciones de monitoreo²³ de la ZMVM con mejor desempeño histórico, presenta un comportamiento fluctuante en los registros de 1998 a 2004, con el depósito máximo en 2001. El depósito húmedo promedio de NO_3^- , durante la época de lluvias de 2004, fue de 14.5 kg/ha (Figura 26).

El análisis del pH ponderado entre 1998 y 2004, en las 16 estaciones de monitoreo²⁴ con mejor desempeño histórico, indica que la acidez del agua de lluvia presenta un comportamiento fluctuante con el pH mínimo en 1998 y el máximo en 2004. El incremento de la acidez en 2001 y 2002, se puede asociar al aumento de los depósitos de SO_4^{2-} y NO_3^- , durante dichos años (Figura 26).

²⁰ El aerosol es un sistema coloidal obtenido por dispersión de partículas ultramicroscópicas sólidas o líquidas en el seno de un gas.

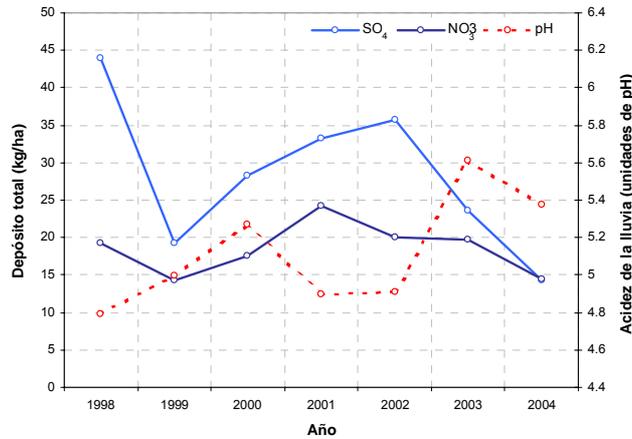
²¹ El término precipitación se utiliza para referirse a la caída de hidrometeoros que alcanzan la superficie de la Tierra. Los hidrometeoros están constituidos por partículas de agua (líquida o sólida) en caída o suspensión en la atmósfera, como es el caso de la lluvia, llovizna, niebla, neblina, rocío, escarcha, granizo, nieve, etc.

²² LOM, TEC, DIC, MCM, TLA, IBM, COR, EAJ, MPA y SNT.

²³ LOM, TEC, DIC, MCM, TLA, XAL, EDL, IBM, COR, NTS, CHA, LAA, EAJ, PAR, MPA y SNT.

²⁴ LOM, TEC, DIC, MCM, TLA, XAL, EDL, IBM, COR, NTS, CHA, LAA, EAJ, PAR, MPA y SNT.

Figura 26. Comportamiento del depósito humedo promedio de SO_4^{2-} y NO_3^- en la ZMVM, 1998–2004.

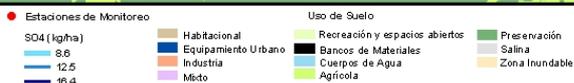
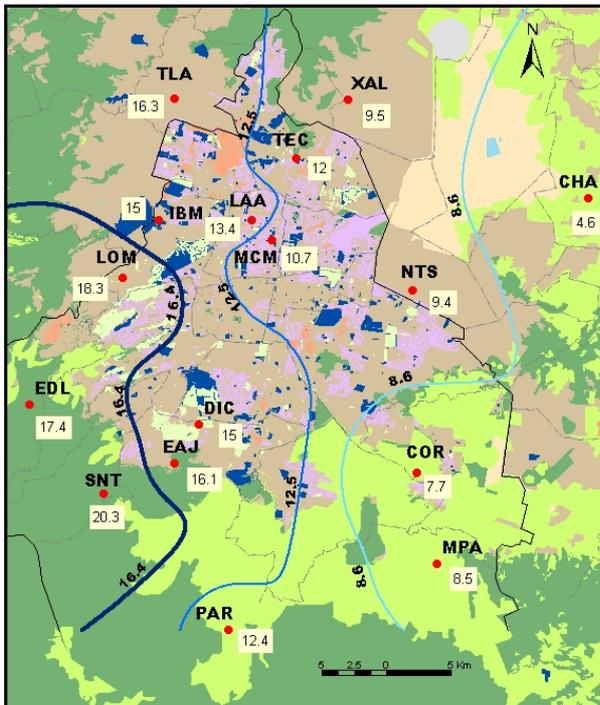


ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESPACIAL

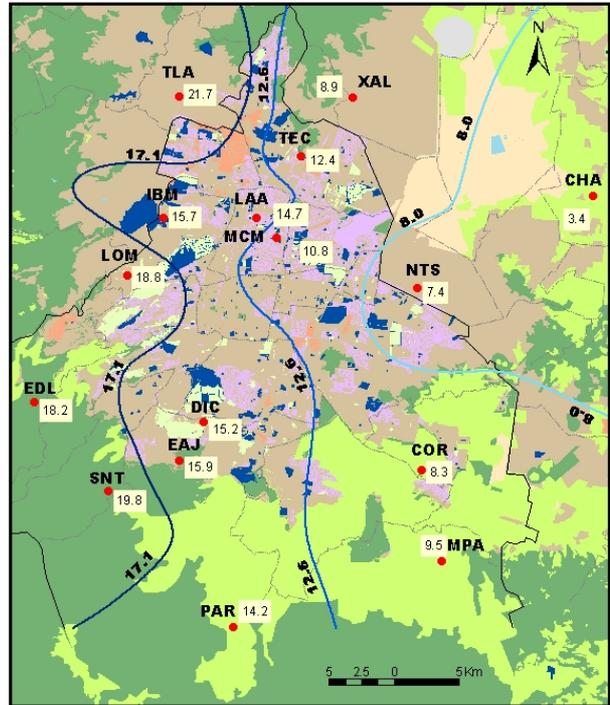
El depósito húmedo de SO_4^{2-} durante la época de lluvias de 2004, presenta valores que oscilan entre 4.6 y 20.3 kg/ha. Su distribución espacial muestra un gradiente con valores altos en el suroeste de la ZMVM y bajos en el este (Mapa 6). Esta situación sugiere una mayor transferencia de SO_4^{2-} a áreas de preservación forestal, agrícola, habitacional y de recreación del suroeste.

El depósito húmedo de NO_3^- presenta valores que oscilan entre 3.4 y 21.7 kg/ha. La distribución espacial del depósito húmedo presenta un gradiente con valores máximos en el oeste de la ZMVM y bajos en el noreste. Este comportamiento sugiere que hay una mayor transferencia de NO_3^- hacia las áreas forestales y agrícolas del oeste (Mapa 7).

Mapa 6. Distribución espacial del depósito húmedo de SO_4^{2-} (kg/ha) en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2004.



Mapa 7. Distribución espacial del depósito húmedo de NO_3^- (kg/ha) en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2004.

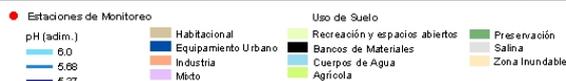
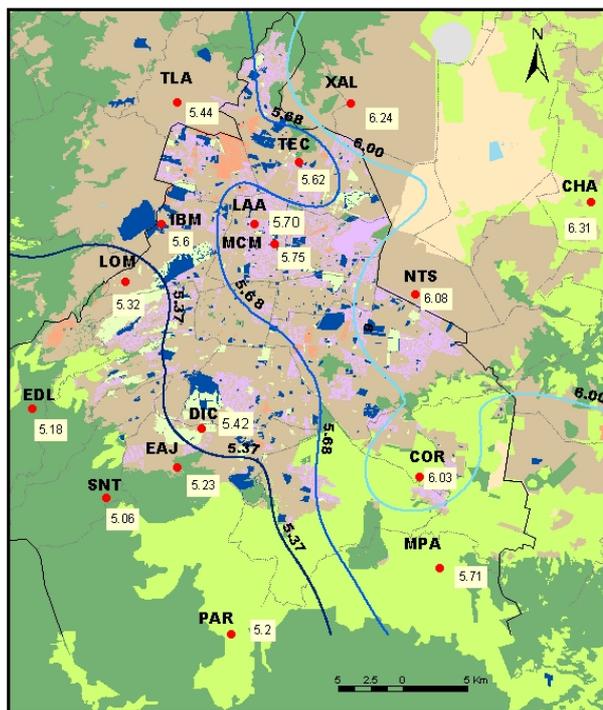
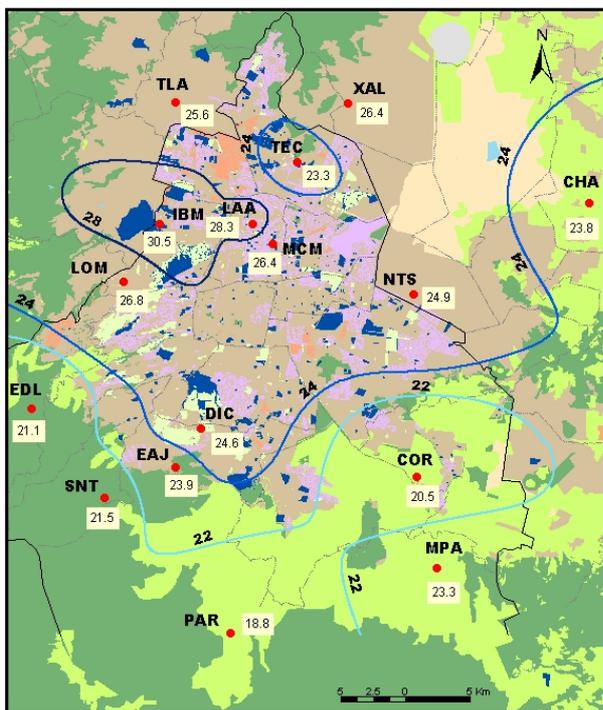


La conductividad específica oscila entre 18.8 y 30.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La distribución espacial de la CE en la ZMVM sugiere que hay una mayor emisión de SO_4^{2-} y NO_3^- en la zona norte, donde hay mayor agrupación de industrias, comercios, viviendas y ejes viales altamente transitados. La emisión de estos contaminantes es menor en áreas que presentan entorno forestal o agrícola (Mapa 8).

La transferencia de los contaminantes precursores de la acidez al suroeste de la ZMVM coincide con el patrón de distribución del pH, ya que esta zona presenta los valores de mayor acidez durante la época de lluvias de 2004. La distribución espacial del pH muestra valores que oscilan entre 5.06 y 6.31. (Mapa 9).

Mapa 8. Distribución espacial de la conductividad específica (CE) en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2004.

Mapa 9. Distribución espacial del potencial de hidrógeno (pH) en la ZMVM, durante la época de lluvias de 2004.



REFERENCIAS

- CAM (GDF, SEMARNAT, SSA, GEM). 2002. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002 – 2010*.
- CAM (SEMARNAT, DDF, SMA, GEM). 1996. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995 – 2000*.
- DDF. 1990. *Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica*. Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México.
- Diccionario Enciclopédico 2001. *El Pequeño Larousse Ilustrado*. Ed Larousse.
- ECOURS. 2001. *Ecosistema urbano y salud de los habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México*. Ed. Acuario. México, D.F.
- Gilbert O.R. 1987. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Ed. Van Nostrand Reinhold. Pp. 204–329
- GDF. 2005. *Inventario de Emisiones a la Atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002 (PRELIMINAR)*. Secretaría del Medio Ambiente del GDF. Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Dirección de Inventario y Modelación de Emisiones.
- Jaimes P., M. C. 2004. *Análisis de la tendencia y comparación de la contaminación atmosférica por ozono para la Ciudad de México y los Angeles, California, EUA*. Tesis de maestría, UNAM.
- Lefohn, A. S., D. S. Shadwick, and S. D. Ziman. 1998. *The difficult challenge of attaining EPA's new ozone standard*. Environ. Sci. Technol., 32, 276A–282A.
- Real Academia Española. 2001. *Diccionario de la Lengua Española*. 22^a ed. Ed. Espasa Calpe. España.
- 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.
- SIMAT. 2004. *Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2003 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.
- Vet, Robert J. 1991. *Wet Deposition: Measurement Techniques*. The Handbook of Environmental Chemistry Volumen 2 Parte F Reactions and Processes. Ed. Springer–Verlag Alemania.

Ganadores del Concurso Infantil del SIMAT sobre Contaminación del Aire, 2005



1er. Lugar
Edgar Raúl Vera Vargas



2do. Lugar
Isabel del Rosario Martínez Sorio



3er. Lugar
Nadia Saray López Velázquez



Sistema de Monitoreo Atmosférico

Agricultura #21 primer piso, Col. Escandón,
C.P. 11800, Del. Miguel Hidalgo
Tel. 5278 99 31 ext. 6161
correo-e: calidadaire@sma.df.gob.mx

www.sma.df.gob.mx/simat/