

CAPÍTULO 3. CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA OBTENCIÓN DE INDICADORES DE ESTADO Y TENDENCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

La operación del SIMAT ha requerido cambios en su configuración, como son: la ubicación de nuevas estaciones o la reubicación de otras, además del aumento o disminución del número de instrumentos de medición, por lo que se considera un sistema dinámico que se modifica para satisfacer las necesidades de cobertura en la medición de contaminantes. Además es susceptible a la pérdida o invalidación de registros, debido a fallas en la operación de los instrumentos y en la transmisión de la información, contaminación de filtros, cortes en la energía eléctrica o mantenimiento de los equipos.

Aunado a esto, desde el segundo semestre del 2001 el SIMAT implementó un control de calidad en la operación de los equipos de medición de O₃, NO₂, NO_x y SO₂, por lo cual, desde octubre de ese año se considera que estos equipos pueden registrar una concentración “cero”¹³.

Para obtener los indicadores de calidad del aire y del clima del presente informe, se instrumentaron procedimientos que consideran las situaciones antes descritas, buscando con ello garantizar su confiabilidad como instrumentos de evaluación del estado de la calidad del aire y del clima. A continuación se describen estos procedimientos y el sustento de su empleo.

IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES CON EL MEJOR DESEMPEÑO HISTÓRICO

Debido a la pérdida o invalidación de registros en el SIMAT, es necesario llevar a cabo un proceso de depuración de las bases de datos por estación de monitoreo e invalidar registros incongruentes o aislados¹⁴. Este procedimiento permite identificar a las estaciones de monitoreo que cuentan con información suficiente, lo que incrementa la confianza de los indicadores. De esta forma se clasificó el *desempeño anual* de cada estación de monitoreo por medio de tres categorías: *bueno* cuando registró el 75% o más de los datos esperados en el año, *regular* cuando registró más del 50% sin llegar al 75% y *malo* cuando registró 50% o menos de los datos¹⁵. En la Tabla 9 se indica el número de registros para establecer estas categorías en cada uno de los tipos de red que conforman el SIMAT (en el Anexo 3 se presenta el desempeño anual de cada estación de monitoreo del SIMAT).

Tabla 9. Número de registros por red de monitoreo del SIMAT de la Ciudad de México relacionados con las categorías de desempeño.

TIPO DE RED	TIPO DE DATOS	DESEMPEÑO DE LA ESTACIÓN (PORCENTAJE DE DATOS)		
		MALO (menor o igual al 50%)	REGULAR (más de 50% y menos de 75%)	BUENO (mayor o igual al 75%)
RAMA y REDMET	Horario	0 a 4392	4393 a 6587	6588 a 8784 (año bisiesto)
		0 a 4380	4381 a 6569	6570 a 8760 (año no bisiesto)
REDMA	Muestreos de 24 horas	0 a 31	32 a 45	46 a 61
REDDA	Muestreos Semanales	-	-	Total de eventos de lluvia muestreados

Es importante señalar que la información histórica de los NO_x no se ha validado; sin embargo, se consideró pertinente considerarla para llevar a cabo un análisis preliminar.

Una vez definido el desempeño anual de cada estación de monitoreo, se identificaron aquellas que entre 1990 y 2001 presentaron el *mejor desempeño histórico*, es decir, estaciones de

¹³ En años anteriores al 2001 los equipos no eran sensibles a la medición de concentraciones “cero”.

¹⁴ Se considera como registro aislado aquel que para un período de tiempo específico no cuenta con datos anteriores y posteriores a él, como consecuencia de la pérdida de registros.

¹⁵ Este criterio de desempeño es congruente con el que se empleó en el “Compendio Estadístico del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la ZMVM 1986-2001”.

monitoreo con un 75% o más de años de operación con desempeño anual bueno. En la Tabla 10 se ejemplifica este procedimiento, donde las estaciones 2 y 4 se consideran con mejor desempeño histórico, debido a que en el 75% o más de los años en que han operado tienen un desempeño bueno.

Tabla 10. Ejemplificación del criterio de selección de estaciones de la ZMVM con mejor desempeño histórico.

ESTACIÓN	AÑOS MIDIENDO A PARTIR DE 1990	AÑOS CON DESEMPEÑO BUENO A PARTIR DE 1990	PORCENTAJE DE AÑOS CON DESEMPEÑO BUENO	¿CUENTA CON EL MEJOR DESEMPEÑO HISTORICO?
1	12	8	67%	No
2	12	9	75%	Sí
3	8	5	63%	No
4	8	6	75%	Sí

Después de instrumentar estos procedimientos se consideró que la información de las estaciones del SIMAT listadas en la Tabla 11, es representativa del fenómeno de contaminación atmosférica y del clima que predomina en la metrópoli, por lo tanto, es la “mejor” información para la integración de indicadores.

Tabla 11. Estaciones del SIMAT de la Ciudad de México con mejor desempeño histórico (1990–2001).

Parámetro	RAMA				REDMET			REDMA				REDDA		
	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂	HR	TMP	VV	PST	Pb–PST	PM ₁₀	Pb–PM ₁₀	pH	Aniones	Cationes
Estaciones	LAG	LAG	SUR	TAC	TAC	TAC	EAC	TLA	TLA	TLA	TLA	EDL	EDL	EDL
	TAC	TAC	TAC	EAC	SAG	EAC	SAG	XAL	XAL	XAL	XAL	XCH	XCH	XCH
	AZC	EAC	EAC	SAG	TLA	SAG	TLA	MER	MER	MER	MER	FAN	FAN	FAN
	TLA	TLA	LPR	TLA	XAL	TLA	XAL	PED	PED	PED	PED	LOM	LOM	LOM
	XAL	XAL	LVI	XAL	MER	XAL	PED	CES	CES	CES	CES	TEC	TEC	TEC
	MER	MER	AZC	MER	PED	MER	CES	UIZ	FAN	NTS		TLA	TLA	TLA
	PED	PED	TLA	PED	CES	PED	PLA	FAN	TEC	UIZ		MCM	MCM	MCM
	CES	CES	XAL	CES	PLA	CES	HAN	HAN	CFE			LBFQ	LBFQ	LBFQ
	PLA	PLA	MER	HAN	HAN	PLA		POT						
	HAN	HAN	PED	BJU		HAN		TAX						
	UIZ	UIZ	CES	PLA				TEC						
	BJU	BJU	ARA	LAG				CFE						
	TAX	SAG	LAG	AZC				CHA						
		VAL	PLA	UIZ										
		AZC	UIZ	TAX										
			BJU											
Total	13	15	17	15	9	10	8	13	8	7	5	16	6	16

Nota: FAN, MCM, y XCH se reubicaron en 1998.

Esta distinción de estaciones con mejor desempeño histórico para obtener indicadores, contrasta con algunos reportes que emplean solamente la información de estaciones “históricas” o “representativas” de una región, lo que puede reflejar condiciones particulares del área donde se localizan. En otros reportes se considera la información de estaciones que operaron en algunos años con un desempeño bueno y posteriormente con un desempeño malo (DDF, 1996; DDF 1998; INE, 1997; CAM, 2002, disponible en Internet; GDF, 1999a).

CRITERIOS PARA PROCESAR LA INFORMACIÓN DE ESTACIONES CON MEJOR DESEMPEÑO HISTÓRICO, COMO BASE PARA LA DEFINICIÓN DE INDICADORES

Después de identificar las estaciones con el mejor desempeño histórico se procesó su información para obtener los indicadores, esto requirió aplicar diferentes criterios en función del fenómeno de contaminación atmosférica que caracteriza cada indicador y del tipo de red de que

proviene los datos. En la Tabla 12 se explican estos criterios. La información de la REDMET que aparece en la sección de *Estado* del Capítulo 1, Capítulo 7 y Anexo 7, se procesó considerando los criterios que aparecen al final de la Tabla 12.

Tabla 12. Criterios para procesar la información de las estaciones del SIMAT con mejor desempeño.

TIPO DE RED	CRITERIOS PARA CADA TIPO DE DATO
RAMA	Para el cálculo de indicadores basados en registros horarios (máximo o promedio diario) la información se procesa únicamente si se cuenta con el 75% o más de los registros del día (18 o más horas), de otra manera no se considera la información. En el caso de los indicadores de CO, este criterio se aplica en dos etapas, primero para obtener el promedio móvil de 8 horas (el cual se obtiene al menos con 6 horas con datos), y después para obtener el máximo diario de estos promedios móviles (que se obtiene al menos con 18 promedios móviles con datos).
REDDA	Los indicadores se basan en los muestreos colectados cada 7 días, por lo que las muestras con menos de 6 días o más de 8 no se consideraron en el cálculo.
REDMA	Debido a que las PM10 no cuentan con una norma específica para su medición, para el cálculo de indicadores de este contaminante se aplicó el criterio definido para las PST, basado en la NOM-035-ECOL-1993, que establece que las mediciones deben realizarse en períodos de 24 horas cada seis días o cada tres días. Los registros que no cumplieron con este calendario de muestreo no se consideraron en la obtención de los indicadores.
REDMET	Los registros horarios deben estar en el intervalo de medición del aparato y con valores típicos según la época del año. Dado que la VV y DV se obtienen como promedio vectorial, es necesario que ambos sensores operen correctamente, de tal forma que si en la base un registro carece de información de alguno de estos parámetros, el registro se invalida. Es importante señalar que hasta el 30 de marzo de 1995, la VV se registraba en millas terrestres y que a partir del 1 de abril de 1995 se registra en metros por segundo, por lo cual se utilizó la equivalencia de 1 milla terrestre = 1,609 metros (1 milla/hr = 0.4469 m/s) para convertir los registros anteriores al 1 de abril de 1995.

INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AIRE

Después de instrumentar los criterios mencionados se obtuvieron los indicadores, éstos se consideran como medidas estadísticas que proporcionan información o tendencias de uno o más parámetros asociados con algún fenómeno ambiental, lo que permiten evaluar el desempeño ambiental de las acciones de prevención y control (INE-SEMARNAP, 1997). En la Tabla 13 se listan los indicadores empleados en este documento, su descripción y el fenómeno que caracterizan, así como el tipo de dato procesado que puede emplearse para su obtención.

Tabla 13. Indicadores de la calidad del aire para la ZMVM.

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	TIPO DE DATOS O BASES DE DATOS PROCESADAS				
		Horarios	Móviles	Diarios	Exposición total diaria	Exposición promedio diaria
Percentil 90, Percentil 75, Percentil 50 o Mediana	Después de ordenar una población de datos por su magnitud (de menor a mayor), el Percentil 90 señala la concentración que acumula el 90% del total de registros ¹⁶ y el Percentil 75 señala la concentración que acumula el 75%. El Percentil 50 señala el valor de la concentración que divide al total de registros en dos grupos de igual tamaño (mediana). La cantidad de registros que integran estos percentiles permite caracterizar adecuadamente el comportamiento cotidiano de un contaminante y evaluar el impacto de los programas ambientales. Es posible identificar fenómenos temporales o regionales.	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 13. Indicadores de la calidad del aire para la ZMVM (continuación).

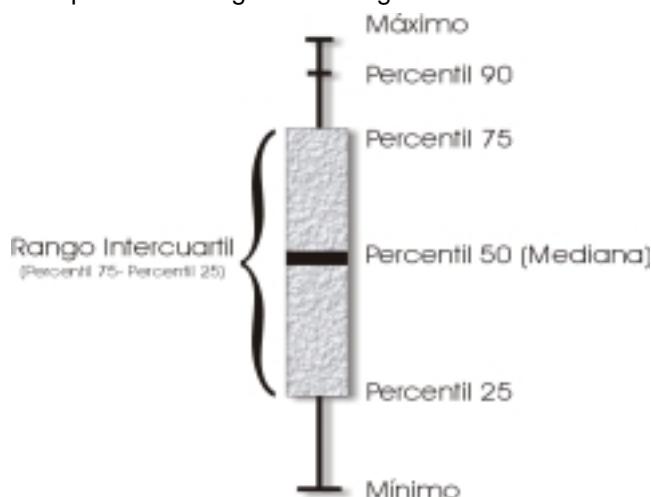
INDICADOR	DESCRIPCIÓN	TIPO DE DATOS O BASES DE DATOS PROCESADAS				
		Horarios	Móviles	Diarios	Exposición total diaria	Exposición promedio diaria
Distribución de días al año por intervalos de concentraciones	Muestra la frecuencia de valores de un contaminante en intervalos específicos, para evaluar su comportamiento en el tiempo. Para contaminantes criterio los intervalos se asocian con sus norma de salud.	✓	✓	✓	✓	✓

¹⁶ Otra manera de interpretar el Percentil 90 es cuando se señala la concentración a partir de la cual se encuentra la décima parte más contaminada del total de registros.

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	TIPO DE DATOS O BASES DE DATOS PROCESADAS				
Promedio horario típico	Muestra el comportamiento de un contaminante en el transcurso del día, mostrando los valores "típicos" o "promedio" de cada hora. Se obtiene al promediar los registros del año para una hora en particular. Permite asociar la concentración de los contaminantes con la intensidad de las actividades antropogénicas.	✓				

En la Figura 8 se representa la caracterización que hacen los percentiles y otros indicadores de una población de datos.

Figura 8. Representación gráfica de algunos indicadores estadísticos



A continuación se hace una explicación más detallada de estos indicadores en función del fenómeno de la calidad del aire que se pretende caracterizar, así como las herramientas estadísticas que complementan esta caracterización. Esta explicación se presenta en el orden en que serán abordados en los Capítulos posteriores.

Tendencia

En el Capítulo 4 se analiza la evolución de los contaminantes criterio presentes en la atmósfera de la ZMVM y se identifica la presencia de tendencia, con la finalidad de evaluar de forma indirecta la influencia de las acciones enmarcadas en el PICCA y en el PROAIRE 1995–2000. El indicador empleado fue el Percentil 90 anual de las concentraciones máximas diarias, que permite caracterizar la evolución de las concentraciones máximas cotidianas que se presentan en la ZMVM y se evita la influencia de concentraciones extremas asociadas a eventos extraordinarios o locales, como son los desfuegos industriales ocasionales, las tolveneras o episodios generados por vehículos automotores.

Desde el punto de vista económico la tendencia es la evolución a largo plazo de una determinada variable, que permite apreciar su desplazamiento creciente o decreciente, subyacente a sus fluctuaciones cíclicas; mientras que desde un enfoque estadístico se define como el movimiento de larga duración continuo y lento, que representa la evolución normal de un fenómeno¹⁷.

¹⁷ El Pequeño Larousse Ilustrado, 2001.

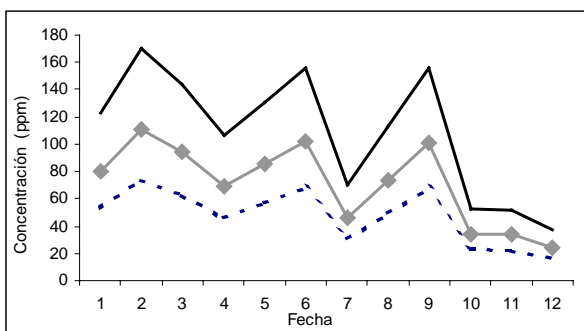
➤ Prueba no paramétrica para evaluar tendencia

Debido a que el indicador Percentil 90 se integró con información de varias estaciones, existe la posibilidad de que en alguna de éstas exista una tendencia creciente y en otras decreciente, o que no presenten tendencia. Por esta razón, inicialmente se evaluó que todas las estaciones presentaran el mismo tipo de tendencia, es decir, que fueran homogéneas. Esto requirió emplear una prueba estadística para identificar que el cambio de un contaminante fuera homogéneo en todas las estaciones de monitoreo, denominada *Prueba de Homogeneidad* (Gilbert O. R., 1987).

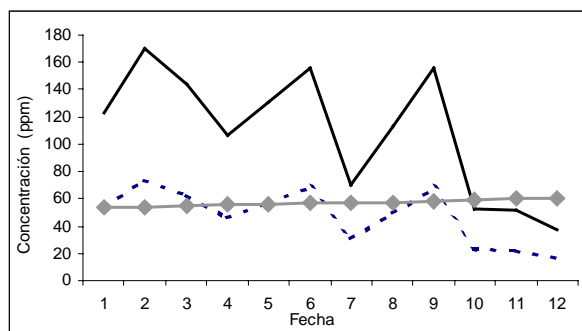
Después de identificar homogeneidad en las estaciones, se determinó la presencia de tendencia con la *Prueba de Mann Kendall* (Gilbert O. R., 1987), que identifica en el comportamiento del Percentil 90 cuando la pendiente de la recta es mayor o igual a cero, considerando los ciclos característicos del comportamiento anual del contaminante. Ambas pruebas se obtienen con un nivel de confianza del 95%, lo que significa que sus resultados pueden tener un margen de error del 5%.

Como ejemplo de homogeneidad y tendencia, se muestran a continuación diferentes casos:

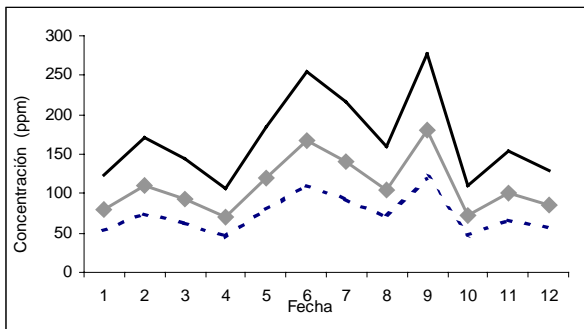
Caso 1. Las tres estaciones cambian en la misma dirección (hay homogeneidad) y presentan tendencia decreciente.



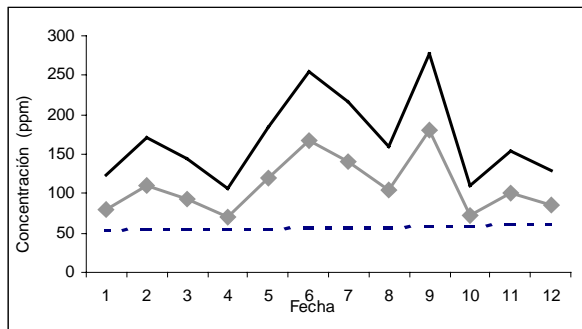
Caso 2. Dos estaciones cambian en la misma dirección y la tercera se mantiene constante, hay homogeneidad y tendencia decreciente.



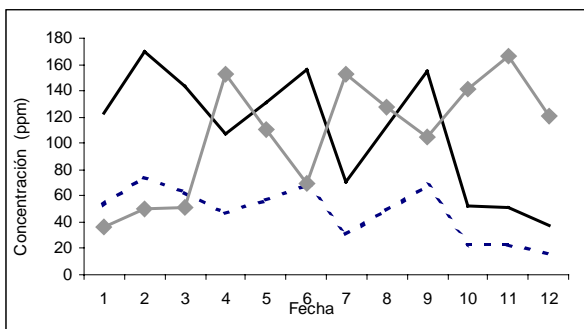
Caso 3. Las tres estaciones muestran el mismo cambio (hay homogeneidad), sin embargo, no hay tendencia (se muestran oscilantes).



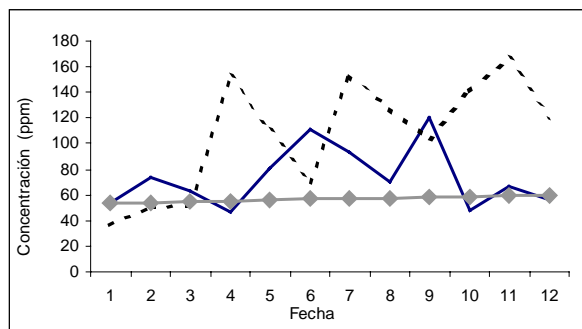
Caso 4. Dos estaciones muestran el mismo cambio y la otra se mantiene constante (hay homogeneidad), pero no hay tendencia.



Caso 5. Dos estaciones muestran un cambio en la misma dirección (tendencia decreciente) y la tercera lo muestra en la dirección opuesta (tendencia creciente), no hay homogeneidad, debido a que presentan tendencia en sentido contrario.



Caso 6. Cada estación presenta un cambio en dirección opuesta a las otras (una presenta tendencia creciente, otra decreciente y la tercera se muestra constante), no hay homogeneidad.



La Tabla 14 resume este procedimiento y su interpretación. En el Capítulo 4 de este documento se indica que hay una *tendencia homogéneamente decreciente* cuando ambas pruebas resultan afirmativas, es decir, todas las estaciones presentan tendencia y ésta es decreciente.

Tabla 14. Formato de resultados de las pruebas de homogeneidad y tendencia.

Primer paso: Prueba de homogeneidad	
Sí	No
Se realiza la prueba de tendencia.	La descripción concluye.
Segundo paso: Prueba de tendencia	
Sí	No
Se calcula el porcentaje de cambio del período en cada una de las estaciones que representan la ZMVM y se obtiene un promedio de estos valores.	La descripción concluye.

Salud y Exposición

Debido a que cada día cobra más importancia la influencia que tiene el ambiente en la salud de la población, tanto en el hogar, el trabajo y el entorno urbano (FUNSALUD, 1994), en el Capítulo 5 de este documento se hace un análisis detallado para describir el estado actual de la calidad del aire y su implicación en la salud de la población.

➤ Normas de protección a la salud

Se evaluó el estado de la calidad del aire con respecto a los límites permisibles de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de protección a la salud. El indicador empleado fue el número de días o muestreos anuales con valores por arriba de estos límites. En la Tabla 15 se listan las NOM de cada contaminante, los límites permisibles y la exposición que caracterizan (aguda o crónica)¹⁸.

Tabla 15. Normas Oficiales Mexicanas, Salud Ambiental^{/a}.

CONTAMINANTE (NOM)	VALORES LÍMITE		
	EXPOSICIÓN AGUDA		EXPOSICIÓN CRÓNICA
	CONCENTRACIÓN Y TIEMPO PROMEDIO	FRECUENCIA MÁXIMA ACEPTABLE	CONCENTRACIÓN Y TIEMPO PROMEDIO
Ozono (O ₃) (NOM-020-SSA1-1993)	0.11 ppm (1 hora)	1 vez al año cada 3 años ^{/b}	-----
	0.08 ppm ^{/c} (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	-----
Bióxido de Azufre (SO ₂) (NOM-022-SSA1-1993)	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (promedio aritmético anual)
Bióxido 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) 210 µg/m ³ ^{/c} (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) 120 µg/m ³ ^{/c} (24 horas)	1 vez al año	50 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} En la modificación de la norma se plantea 1 vez al año, nuevas especificaciones a publicarse en el Diario Oficial de la Federación.

^{/c} Nuevas especificaciones y valores a publicarse en el Diario Oficial de la Federación.

¹⁸ La exposición aguda se produce en períodos de tiempo reducidos (a lo más 24 horas) ante concentraciones altas de un contaminante. La exposición crónica, se produce en períodos prolongados de tiempo (de 3 meses a 1 año) ante concentraciones relativamente bajas y que pueden causar efectos dañinos a la salud.

➤ Exposición a O₃ y PM₁₀

En el Capítulo 1 se mencionó que el O₃ rebasa cotidianamente la norma de protección a la salud; sin embargo, ésta se refiere a eventos de una hora y no a períodos prolongados de exposición que tienen un mayor riesgo para la salud de la población. Por esta razón se evaluó el estado de la calidad del aire en función de la exposición diaria a concentraciones que superan el límite permisible de 0.11 ppm de la norma.

Para cumplir con este propósito se empleó el indicador de *Exposición Promedio Diaria*, el cual representa una concentración promedio de exposición durante el día, su magnitud puede asociarse con un mayor riesgo.

Para calcular este indicador, inicialmente se obtuvo la *Exposición Total*¹⁹ Diaria como la suma de las diferencias de los datos horarios del día ([Concentración]_{hr}) mayores a 0.110 ppm (L_p), la diferencia es la exposición horaria ([Concentración]_{hr} - L_p). La siguiente ecuación resume este cálculo:

$$Exp.Tot.día = \sum_{[Concentración]_{hr} > L_p} ([Concentración]_{hr} - L_p)$$

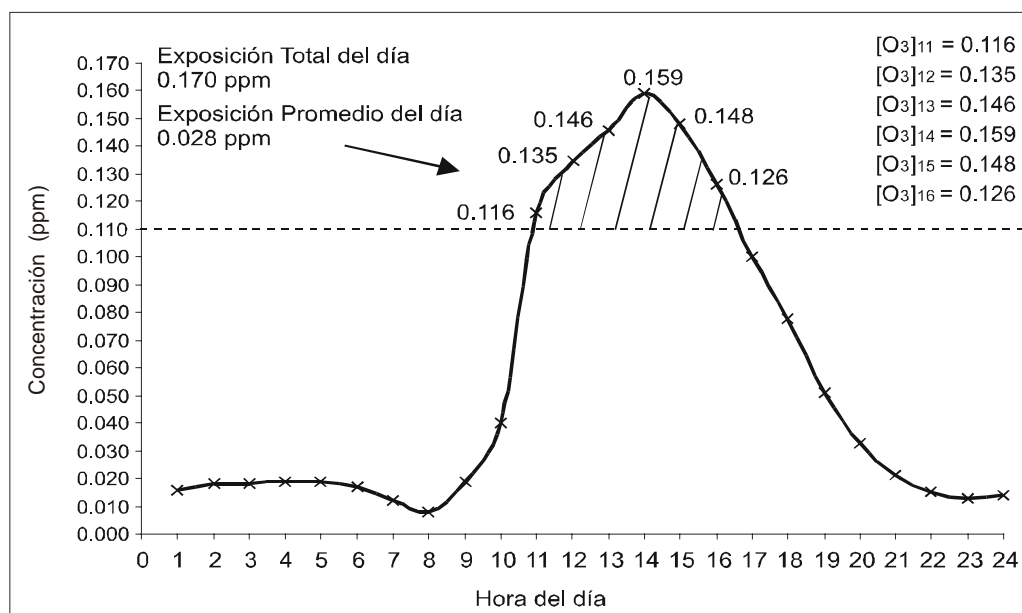
Posteriormente se obtuvo la *Exposición Promedio*²⁰ Diaria. La siguiente ecuación resume el cálculo.

$$Exp.Pr om.día = \frac{Exp.Tot.día}{\text{horas del día que se excede el límite permisible}}$$

En la Figura 9 se ejemplifica el fenómeno que caracteriza este indicador, el cálculo de la exposición promedio diaria se realiza de la siguiente forma:

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

Figura 9. Ejemplo de Exposición Total Diaria a O₃.



¹⁹ La *Exposición Total* es el acumulado de las diferencias entre el límite permisible y los registros mayores a éste para un período de tiempo determinado.

²⁰ La *Exposición Promedio* es la relación entre la Exposición Total y el número de horas con concentraciones por arriba del límite permisible.

Para las PM₁₀ el indicador de exposición se obtuvo con la información de muestreos de 24 horas y se visualizó de forma anual. Inicialmente se calculó la *Exposición Total Anual*, considerando los muestreos ([Concentración]_{muestreo}) mayores al límite permisible de 150 µg/m³ (L_p), la diferencia entre el valor del muestreo y el límite permisible, representó la exposición durante el día del muestreo ([Concentración]_{muestreo} – L_p). Para cumplir con este propósito se empleó el indicador de *Exposición Promedio Anual*, el cual representa una concentración promedio de exposición anual, su magnitud se asocia con un mayor riesgo.

La Exposición Total Anual se obtuvo como la suma de las diferencias. En la siguiente ecuación se resume la forma de cálculo.

$$Exp.Tot.anual = \sum_{[Concentración]_{muestreo} > L_p} ([Concentración]_{muestreo} - L_p)$$

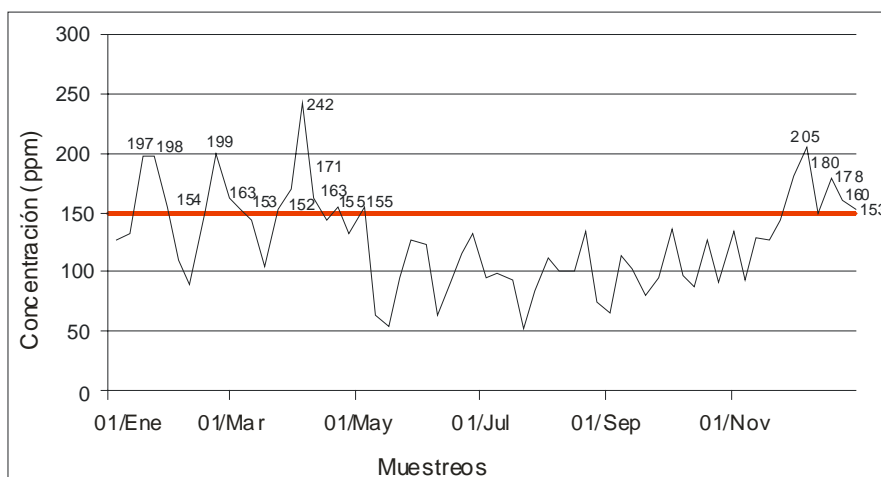
Posteriormente se obtuvo la *Exposición Promedio Anual de PM₁₀*, como se resume en la siguiente ecuación.

$$Exp.Pr om.anual = \frac{Exp.Tot.anual}{muestreos\ del\ año\ que\ se\ excede\ el\ límite\ permisible}$$

La Figura 10 ilustra el fenómeno que caracteriza este indicador, el cual se calculó con base a diecisiete muestreos del año mayores a 150 µg/m³, como se ilustra a continuación.

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

Figura 10. Ejemplo de Exposición Total Anual a PM₁₀.



➤ Variación espacial de la exposición a O₃ y PM₁₀

En el Capítulo 1 se mencionó que el problema de contaminación del aire en la ZMVM tiene una estrecha relación con la cadena montañosa que la rodea (Sierra Nevada, Sierra de las Cruces y Sierra Ajusco–Chichinautzin) y que evita la dispersión de contaminantes, principalmente en la zona sur; además el uso de suelo determina la presencia de contaminantes en una región, ya sea industrial, servicios o suelos en proceso de erosión.

Estas características determinan que en algunas regiones de la ZMVM la calidad del aire represente un mayor riesgo para la salud de la población. Para identificar las regiones de mayor riesgo por exposición a O₃ y PM₁₀, se llevó a cabo un análisis espacial de sus indicadores de exposición. El análisis temporal en 4 años clave de la gestión de la calidad del aire (1990, 1995, 2000

y 2001) permitió evaluar el desempeño ambiental de los programas de gobierno en términos de disminuir la exposición de la población y proteger su salud.

Comportamiento diario típico

La variación de las conductas y patrones de actividad de la población, así como en los horarios de actividad comercial o de producción, provoca que a lo largo del día las emisiones de contaminantes fluctúen. Este comportamiento se observa en los registros que realiza el SIMAT, de tal forma que algunos contaminantes atmosféricos tienen patrones definidos a lo largo del día, con períodos de horas de concentraciones altas que implican un mayor riesgo para la población, principalmente para quienes realizan actividades al aire libre.

Ante las acciones de prevención y control instrumentadas, es necesario tipificar el comportamiento actual que tienen los contaminantes atmosféricos a lo largo del día, en función de fuentes de emisión específicas. Para cumplir con este propósito en el Capítulo 6 se empleó el *promedio horario anual* como un indicador del comportamiento típico de cada una de las 24 horas del día, es decir, se promedian las concentraciones de la hora 01:00 de los 365 días del año, y así subsecuentemente para las 23 horas restantes. Este indicador se obtuvo para estaciones de monitoreo con un uso de suelo diferente, lo que permitió caracterizar el comportamiento de los contaminantes criterio a lo largo del día en función de fuentes de emisión predominantes.

Comportamiento temporal

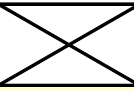
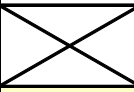












En el Capítulo 1 se mencionó que la variación climática que presenta anualmente la ZMVM, influye directamente en la presencia de algunos contaminantes atmosféricos. Se reconoce que en la época de lluvias disminuyen los niveles de partículas y en invierno se acumulan los contaminantes debido a las inversiones térmicas, mientras que en general, en la época de secas los niveles de radiación solar propician la formación de niveles extremos de O_3 que provocan situaciones de emergencia ambiental.

En el Capítulo 7 se realizó el análisis histórico del comportamiento de los contaminantes atmosféricos en tres épocas climáticas que caracterizan a la ZMVM: seca fría, seca caliente y lluvias. El indicador empleado fue el *Percentil 75* de datos diarios (máximos diarios o promedios de 24 horas dependiendo del contaminante), ya que caracteriza los registros cotidianos de cada contaminante en cada época del año y evita la influencia de condiciones climáticas extremas o atípicas; sin embargo, no es posible delimitar la influencia de eventos que inciden a una escala climática mayor, como son el fenómeno de “El Niño” o “La Niña”.

Además del análisis al nivel de época climática, en el caso del O_3 y las PM_{10} se llevó a cabo un análisis de la variación semanal de los datos diarios, con la finalidad de mejorar la caracterización de cada época y la influencia de días festivos o períodos vacacionales. Este análisis también se realizó en 4 años clave de la gestión de la calidad del aire (1990, 1995, 2000 y 2001), lo que permitió evaluar el desempeño ambiental de los programas de gobierno.

Para facilitar la interpretación de los resultados, los datos diarios se agruparon en intervalos de concentraciones y se les asoció a un color (Tabla 16), por su arreglo de columnas (meses) y renglones (días de la semana) se denominó análisis de mosaico (Figura 11).

Tabla 16. Escala de colores para la generación de mosaicos.

O ₃		PM10	
Concentración (ppm)	color	Concentración (µg/m ³)	color
No se cuenta con información o no es suficiente para un registro diario		No se cuenta con información	
[0.000, 0.060]		[0, 50]	
(0.060, 0.110]		(50, 120]	
(0.110, 0.233]		(120, 150]	
(0.233, 0.257]		(150, 270]	
(0.257, 0.282]		(270, 300]	
> 0.282		>300	

Delimitación de cada mes









Jueves y Viernes santos

Día festivo (1 de mayo, 16 de septiembre, 1 de noviembre, 12 de diciembre)



Nota: Los intervalos de la concentración están definidos en notación matemática, el símbolo “(“ representa valores mayores a (es equivalente a el símbolo “>”), el símbolo “]” representa valores menores o iguales a. De esta manera un ejemplo de la lectura de los intervalos sería de la siguiente manera: concentraciones mayores a 0 y menores o iguales a 0.060 ppm y otra más sería concentraciones mayores a 0.257 y menores o iguales a 0.282 ppm.

Figura 11. Ejemplo de mosaico.

Mes	Enero-2001				
Semana	1	2	3	4	5
Día	1-7	8-14	15-21	22-28	29-31
Lunes					
Martes					
Miércoles					
Jueves					
Viernes					
Sábado					
Domingo					

Depósito Atmosférico

El término *depósito atmosférico* se refiere al proceso por el cual las partículas suspendidas y los gases son transportados del aire hacia el suelo. Este transporte puede ocurrir de manera directa a través de fenómenos físicos (adsorción, absorción, gravedad, etc.), o por disolución en la fase acuosa de las gotas de agua suspendidas en la atmósfera, con el posterior transporte hacia la superficie por medio de la lluvia, niebla, granizo, nieve, rocío, etc. Al primer caso se le conoce como *depósito seco* y al segundo como *depósito húmedo*. El término *lluvia ácida* se emplea de manera común para describir la formación y depósito de ácidos durante los episodios de precipitación pluvial (depósito húmedo). Para los propósitos de este documento, en el análisis del Capítulo 8, el término lluvia ácida se referirá al depósito húmedo.

La composición del agua de lluvia depende de diversos factores, como son: el lugar en que se forman las nubes, la meteorología local, la topografía, la distribución e intensidad de la precipitación pluvial; en las grandes ciudades además depende de la forma como se integran los contaminantes a las gotas de lluvia y la distribución de fuentes de emisión. Por lo anterior, a pesar de que en una región se emitan concentraciones altas de un contaminante, si se presentan lluvias esporádicas éstas no causarán el mismo impacto que si se llegan a presentar lluvias con mayor frecuencia.

El indicador empleado en este documento para identificar la composición del depósito húmedo en una estación de monitoreo, denominado *depósito*, permitió mitigar la influencia de las variables señaladas, ya que se expresa como la masa de un compuesto químico²¹ depositada por la lluvia, niebla, granizo, nieve o rocío, sobre una unidad de área. Así mismo el indicador *depósito*

²¹ El término *especie química* se refiere a cualquier molécula, ion o átomo de un elemento o compuesto presente en la muestra.

acumulado se refiere al depósito captado en su totalidad por las estaciones de la REDDA. Es importante señalar que desde 1997 la REDDA emplea equipos automáticos que evitan la combinación del agua de lluvia colectada con el depósito seco.

El depósito no se mide directamente, se estima como el producto de la concentración de una especie química en una muestra de lluvia multiplicado por la cantidad de precipitación. Un evento particular de depósito se calcula como:

$$D = C \times P$$

donde:

D = Depósito (mg/m²)

C = Concentración de la especie de interés (mg/l)

P = Precipitación pluvial (mm de lluvia ó l/m²)

A = Área de captación (m²)

Vol = Volumen captado (ml), conversión a litros (Vol/1000)

Nota: la P se obtuvo considerando el Vol en litros y el A en metros ($P = Vol/1000 \times A$)

Para determinar el depósito de un período que involucra varios eventos particulares (como puede ser un mes, la época de lluvias o un año), se estima la concentración ponderada ($C_{ponderada}$), la cual no es recomendable si el número de muestras no válidas es grande. El depósito de un período se obtiene con la siguiente ecuación:

$$D = C_{ponderada} \times P_{tot}$$

donde:

$$C_{ponderada} = \frac{\sum_{i=1}^m (C_i \times p_i)}{\sum_{i=1}^m p_i} \quad \text{y} \quad P_{tot} = \sum_{i=1}^N p_i$$

i = i -ésimo muestreo.

m = Total de muestreos válidos para la especie química de interés en el período.

N = Total de muestras colectadas en el período (válidas y no válidas para la especie química de interés).

C_i = Concentración del compuesto de interés en la i -ésima muestra (mg/l).

p_i = precipitación durante el i -ésimo muestreo (mm de lluvia ó l/m²)

Nota: $1\text{mm} = 1\text{ l/m}^2$.

$C_{ponderada}$ = promedio ponderado de la concentración durante el período (mg/l)

P_{tot} = Precipitación total durante el período (mm de lluvia ó l/m²)

D = Depósito (mg/m²)

A continuación se ejemplifica el cálculo de la concentración ponderada y del depósito. Para esto se consideran los muestreos diarios de una semana para una especie química de interés, en la Tabla 17 se presentan las concentraciones de la especie y el volumen de agua de lluvia de cada muestra.

Tabla 17. Ejemplo de concentración y volumen en muestreos de depósito húmedo.

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Total
Concentración (mg/l)	40	80	10	20	125	Invalidado	No determinado	—
Volumen (ml)	0.5	0.25	1.5	0.75	0.20	0.20	0.20	3.2

Para determinar la concentración promedio de la especie química en esta semana, se calcula el promedio ponderado de la siguiente forma:

$$C_{ponderada} = \frac{\sum_{i=1}^m (C_i \times p_i)}{\sum_{i=1}^m p_i} = \frac{(40 \times 0.5 + 80 \times 0.25 + 10 \times 1.5 + 20 \times 0.75 + 125 \times 0.20)}{(0.5 + 0.25 + 1.5 + 0.75 + 0.20)} \frac{\text{mg} / \text{l} * \text{ml}}{\text{ml}} = \frac{95}{3.2} \text{mg} / \text{l} = 29.69 \text{ (mg / l)}$$

Es decir la concentración promedio en la semana es de 29.7 mg/l. Para obtener el depósito es necesario conocer la precipitación pluvial, por lo que se recurre a la equivalencia $P = Vol/(1000 \times A)$.

Tomando en cuenta que las cubetas de captación tienen un radio de 0.144 m, el área de la superficie de captación se calcula como: $\pi \cdot r^2 = (3.1415 \cdot 0.144 \cdot 0.144) = 0.0651 \text{ m}^2$.

De esta manera, la precipitación pluvial se obtiene como: Vol (l) / Área (m²), y la precipitación total de la semana sería:

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^N p_i = \frac{0.5}{1000 \cdot 0.0651} + \frac{0.25}{1000 \cdot 0.0651} + \frac{1.5}{1000 \cdot 0.0651} + \frac{0.75}{1000 \cdot 0.0651} + \frac{0.20}{1000 \cdot 0.0651} + \frac{0.2}{1000 \cdot 0.0651} + \frac{0.20}{1000 \cdot 0.0651} =$$

$$\frac{1}{1000 \cdot 0.0651} \cdot \text{Volumen}_{total} = \frac{1}{65.1} \cdot 3.2 (\text{l} / \text{m}^2) = 0.0492 (\text{l} / \text{m}^2)$$

El depósito en la semana de muestreo obtenido con 7 muestras sería

$$D = C_{ponderada} \times P_{tot} = 29.6875 \cdot 0.0492 (\text{mg} / \text{l} \cdot \text{l} / \text{m}^2) = 1.46 \text{ mg} / \text{m}^2 ,$$

de lo cual se concluye que en esa semana se depositó 1.46 mg/m²/semana de la especie química en la región aledaña a la estación de monitoreo.

Cabe mencionar que en el caso de la REDDA no se identificaron estaciones con el mejor desempeño histórico debido a que en el período de 1990 a 2001 se emplearon dos técnicas de muestreo con diferente sensibilidad a compuestos de origen local²², depósito total –DT– y depósito húmedo-seco –DH– (GDF, 1997; GDF, 1999b). Por lo cual los registros obtenidos con ambas no son comparables y requieren un tratamiento diferente para el cálculo del depósito antes mencionado, es por esta razón que no se realiza un análisis comparativo del período completo sino únicamente del período en que se mide con la técnica de depósito húmedo-seco. El Anexo A19 muestra un resumen de los cambios presentados a lo largo del período 1990–2001 en la REDDA, tanto en técnicas de monitoreo como en reubicación y cambio de nombre de algunas estaciones de monitoreo.

²² Como son el calcio (Ca²⁺) y el magnesio (Mg²⁺) que entre sus fuentes de origen se encuentra la erosión del suelo.