

Julio César Hernández Romero, Delfino Madrigal Uribe, Carlos Morales Méndez
Comportamiento del monóxido de carbono y el clima en la ciudad de Toluca, de 1995 a 2001
Ciencia Ergo Sum, vol. 11, núm. 3, noviembre, 2004, pp. 263-274,
Universidad Autónoma del Estado de México
México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10411306>



Ciencia Ergo Sum,
ISSN (Versión impresa): 1405-0269
ciencia.ergosum@yahoo.com.mx
Universidad Autónoma del Estado de México
México

Comportamiento del monóxido de carbono y el clima en la ciudad de Toluca, de 1995 a 2001

Julio César Hernández Romero*, Delfino Madrigal Uribe* y Carlos Morales Méndez*

Recepción: 16 de abril de 2004

Aceptación: 21 de julio de 2004

*Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

Correo electrónico: madurdel@uaemex.mx

Resumen. Uno de los gases contaminantes con mayor distribución y concentración en Toluca y su área metropolitana es el monóxido de carbono que, al igual que el dióxido de azufre y el dióxido de carbono, es generado principalmente por la combustión automotriz y, en segundo lugar por el sector industrial. Sin embargo, debido a la activa dinámica de los vientos en la mayor parte del año, estos gases tienden a dispersarse en todo el valle; solamente durante el invierno la concentración y la distribución del monóxido de carbono se encuentran por encima de las normas establecidas en la legislación vigente. Por eso se considera la calidad del aire como satisfactoria, aunque por su combinación con las bajas temperaturas del periodo invernal y la baja humedad del aire, tiende a representar riesgos para la salud humana.

Palabras clave: contaminación, monóxido de carbono, Toluca.

The Relationship of Carbon Monoxide and Climate in the City of Toluca, Mexico, from 1995 to 2001

Abstract: One of the contaminant gases with the greatest distribution and concentration in Toluca City and its metropolitan area is Carbon Monoxide. Along with Sulphur Dioxide and Carbon Dioxide, it originates much more from the automotive combustion of vehicles used for transportation than from the industrial sector. Owing to the dynamic activity of winds during most of the year, these gases disperse throughout the whole valley, with the result that the concentration and distribution of Carbon Monoxide in the city exceeds legal perimeters only during the winter. The air quality thus is considered as being satisfactory, even though the contamination combined with the winters' low temperatures and humidity represent a risk for human health.

Key words: contamination, carbon monoxide, Toluca.

Introducción

El presente estudio es resultado de una investigación que pretende caracterizar la distribución de diversos gases como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre, las partículas suspendidas y el ozono, entre otros, cuya descripción se basa en los datos aportados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la zona metropolitana de la ciudad de Toluca, dependiente de la Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México. La importan-

cia de los vehículos automotores como fuentes de contaminación, la presencia del monóxido de carbono en primer término y del dióxido de azufre en segundo sitio, así como la disponibilidad más continua de datos, justifica que se muestren en este escrito los resultados referentes exclusivamente de la distribución y la dinámica de dispersión del monóxido de carbono.

Aunque existen estudios preliminares como los presentados en reportes técnicos de la Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México, la distribución de diversos

gases no se había ilustrado de manera cartográfica, como tampoco se había analizado su distribución respecto a factores climáticos y geográficos como la temperatura, la precipitación, el patrón de vientos, el relieve y las fuentes contaminantes, lo que constituye el objetivo central de este trabajo.

Sin embargo, existen algunas investigaciones relacionadas que, aunque no abordan directamente los datos de contaminación, tienen una relación importante, como los estudios de Calderón (1990) y Jáuregui (1971) referentes a lluvias ácidas e islas de calor. Solamente en el trabajo de Hernández (2002) se analiza más profundamente esta distribución, por lo cual forma parte de este texto.

Para abordar el estudio se recopilieron los datos de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de los años de 1995-2001, que se consideraron más continuos y consistentes en cuanto a registro en la red. Se procesaron en una hoja de cálculo para aplicar parámetros estadísticos de dispersión y tendencia central. Asimismo, se realizó un mapa digital de la zona metropolitana de la ciudad de Toluca, escala 1:100,000, sobre el que se ubicaron como puntos las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico. A partir de hojas de cálculo en las que se representaron las coordenadas de cada estación, fueron vaciados los datos de concentración de monóxido de carbono y de otros gases contaminantes, una vez determinados los promedios mensuales de los contaminantes, así como su promedio anual y sus tendencias respecto a los límites permisibles de concentración.

Por medio de diversas interpolaciones que maneja el *software* Surfer 7.2, se trazaron las isolíneas de concentración del monóxido de carbono, así como de los otros gases, y se editaron como franjas en más de 62 mapas, 12 de ellos fueron relativos al monóxido de carbono; aquí presentamos lo más característico de los patrones de concentración (ver mapa 4). Estos mapas fueron combinados con los de temperaturas medias anuales y de precipitaciones medias anuales, así como de representación de rosas de los vientos en diversas estaciones del año, durante seis años (1995-2001), con el fin de establecer relaciones concretas en cuanto a la influencia de los factores geográficos y climáticos en los procesos de concentración y dispersión de la contaminación atmosférica.

La interpretación de estos datos estadísticos en forma de gráficas y de los mapas de distribución permitió establecer la relación que existe dentro de la zona metropolitana de Toluca, entre las zonas de mayor concentración urbana y vehicular, y los efectos estacionales de la temperatura, la

La concentración de monóxido de carbono depende básicamente de las emisiones de los automóviles y de las industrias.

precipitación y el viento, en la dinámica de distribución del monóxido de carbono entre 1995 y 2001.

1. Descripción de resultados

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que se encuentra en pequeñísimas partes en la composición natural de la atmósfera (menor a

0.00066%). Sus principales fuentes de emisión son los incendios y la combustión de hidrocarburos y sustancias que contienen carbono, tales como gasolina y diesel. Sin embargo, otras actividades humanas también han aumentado la producción de este gas, por lo que en la actualidad representa un peligro para el ambiente y la salud humana (Boubel y Fox, 1994).

El comportamiento del monóxido de carbono generado en una ciudad o una zona industrial es controlado en gran medida por la ocurrencia de los fenómenos climáticos y la geografía de la región. La temperatura, la precipitación, el viento y la situación geográfica son los principales agentes de concentración o dispersión al influir poderosamente en los procesos de distribución del gas.

La concentración de monóxido de carbono depende básicamente de las emisiones de los automóviles y de las industrias. El tránsito vehicular de la región es muy elevado, ya que se concentran tanto vehículos que proceden de los municipios adyacentes, de los estados vecinos, así como los de la ciudad de México. El corredor industrial Toluca-Lerma, el aeropuerto y los nuevos sitios comerciales de Metepec y Lerma representan focos de contaminación del aire, en los que el monóxido de carbono tiende a una mayor distribución que se refleja en los datos registrados (Cárdenas, 2001).

Debido a que desde la década de los ochenta ya se observaban los procesos de contaminación atmosférica, en 1982 se instaló la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la zona metropolitana de la ciudad de Toluca, que tuvo diversas tutelas aunque originalmente dependía de la Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México. Sin embargo, debido a la falta de asesoría técnica y de mantenimiento permanente, esta red registraba los datos intermitentemente y casi siempre sobre ciertos contaminantes como el monóxido de carbono y las partículas suspendidas, sólo hasta fechas recientes contó con otros gases como el dióxido de azufre y el ozono, lo que dificultaba grandemente el procesamiento estadístico, y en particular la cartografía para la caracterización de la dinámica de su distribución (Gobierno del Estado de México, 1996a).

En los últimos años se ha regularizado el registro, y ello permite un procesamiento más confiable que ha permitido tipificar patrones de comportamiento por estación y de comportamiento de la distribución total de la red.

Para explicar la dinámica de distribución y concentración del monóxido de carbono, es necesario establecer primeramente las condiciones geográficas y climáticas que condicionan al valle de Toluca en lo general, posteriormente describir el comportamiento en particular del monóxido de carbono por estaciones y en su distribución general, y finalmente relacionar explicativamente la actuación del gas con los factores climáticos y geográficos más importantes.

1.1. Factores climáticos y geográficos del valle de Toluca

El clima del valle de Toluca es el resultado de la confluencia entre fenómenos continentales y regionales de carácter meteorológico y la dinámica de los factores geográficos y meteorológicos locales.

Por una parte, constituye un valle de origen tectónico, con manifestaciones volcánicas recientes y procesos activos de erosión y sedimentación, que se encuentra muy elevado con respecto a otros valles del país (2,700 msnm en promedio). Por otra, sus condiciones recientes son casi idénticas a las del valle de México, pues también es un gran valle de naturaleza lacustre, rodeado por sistemas montañosos elevados, gradientes topográficos que influyen decisivamente en la distribución de temperaturas y precipitaciones de rangos muy amplios.

Al igual que el valle de México, el de Toluca ha pasado por periodos de desecación de sus áreas lacustres y por activos procesos de deforestación de sus zonas de piedemonte, lo que acentúa todavía más los rangos de temperatura, precipitación y evaporación. La recarga hidrológica aún es alta a pesar de los déficit en la extracción subterránea y en la pérdida de la humedad del suelo, aunque se ha afectado fuertemente la humedad relativa del aire.

Particularmente, el valle de Toluca se encuentra rodeado por el sistema montañoso del Nevado de Toluca y Santa María del Monte al oeste, por la Sierra de Tenango al sur, por el sistema de la Sierra de las Cruces y Monte Alto al este, y por la falla de Perales al norte, que determina la presencia de conjuntos de colinas, entre las cuales atraviesa el río Lerma.

Los vientos tienden en todo caso a chocar con las laderas montañosas y ocasionar efectos de valle y montaña, donde disminuyen las temperaturas y aumenta la humedad del aire hasta propiciar lluvias locales, muchas de ellas en formas concentradas o arremolinadas (trombas) en los periodos húmedos del año (Lugo e Inbar, 2002), a la vez que cesa su

actividad en forma significativa durante el invierno, lo que hace estacionaria la contaminación atmosférica en relación directa con las bajas temperaturas; ello causa inversiones térmicas, heladas y ocasionalmente lluvias invernales y nevadas (Ayllón, 1996).

La humedad atmosférica que constituyen las precipitaciones es aportada por el Frente Tropical Mexicano proveniente durante el verano de las fajas ecuatoriales y responsable de la mayor parte de la humedad (vientos alisios). Del mismo modo procede el efecto de *El Niño*, los ciclones tropicales, los frentes fríos y las masas denominadas 'nortes', que ocurren normalmente en la zona del Golfo de México. Todos estos eventos actúan en forma continental en todo el país como elementos regionales que regulan el clima y sus anomalías, como las inundaciones y las sequías (Morales, 1999: 17).

La ciudad de Toluca, al encontrarse dentro del valle que lleva su nombre, adquiere las características climáticas de esta región. El clima de la parte sur está determinado por la orografía del Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces. Las elevaciones montañosas conforman gradientes térmicos medios anuales, en cuyas bases son del orden de los 12 °C (2,650 metros de altitud), y hacia las cimas suelen ser de 4 °C (zonas con más de 4,000 metros de altitud). Las bajas temperaturas del relieve se trasladan hacia los sitios de la ciudad y valle a través del seno de las brisas de montaña.

La ciudad de Toluca tiene una temperatura media anual de 12.9 °C, pero en invierno suelen bajar hasta los -2 °C, y en verano asciende hasta los 28 °C, por lo que la amplitud térmica es de 30 °C, situación que puede incrementarse como consecuencia del cambio de uso del suelo. Las temperaturas más elevadas ocurren en el mes de mayo con valores que oscilan entre 26° y 28 °C, en tanto, las temperaturas más bajas ocurren en enero, con años donde la escala termométrica desciende más allá de los -5 °C.

La temporada lluviosa en el valle de Toluca se inicia en mayo y termina en octubre. Durante el régimen de lluvias, las estructuras orográficas agolpan la humedad a través de sus laderas y sus cúspides, que al enfriarse y condensarse forman nubes de las familias de los cúmulos y los estratos, los cuales desencadenan precipitaciones copiosas en verano y otoño. En algunos años las lluvias son escasas (en verano) y la aridez se prolonga por varias semanas, como sucedió en 1967, 1983 y 1997, periodos en que el fenómeno atmosférico *El Niño* fue intenso. No obstante, ocurren años con lluvias extraordinarias, como 1978, 1998 y 2004.

Al terminar la temporada de lluvias (por lo común, en la primera quincena de octubre), se inicia la época fría con las irradiaciones térmicas, vespertinas y nocturnas; la situación se agrava con inviernos muy crudos cuando por el norte de

México invaden frentes fríos, asociados a intensas corrientes de chorro (vientos fríos que circulan de oeste a este en altura), que pueden propiciar algunas lluvias y nevadas en las zonas altas de las montañas.

La interrelación de los elementos atmosféricos antes citados definen en Toluca y su zona metropolitana un tipo de clima templado con régimen de lluvias en verano (según el sistema climático de Köppen modificado por Enriqueta García), cuyos símbolos son los siguientes: C(w2)(w)b(i)g, es decir: clima templado subhúmedo (con precipitación suficiente), presenta verano largo, la lluvia invernal es inferior a 5%, es isotermal y la temperatura más elevada se registra antes del solsticio de verano. Este tipo de clima se distribuye en la mayor parte del valle de Toluca, y es responsable en gran medida del comportamiento del monóxido de carbono en esta región.

2. Comportamiento del monóxido de carbono y el clima

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la zona metropolitana de la ciudad de Toluca posee siete estaciones, distribuidas en la zona urbana y metropolitana. De esas fuentes de información se obtuvieron los datos del monóxido de carbono que se presentan en este estudio. La información proporcionó promedios para las estaciones de invierno y verano, así como para los años de 1995 a 2001. La estación de invierno abarca los meses de diciembre, enero y febrero, y para verano, junio, julio y agosto.

Para analizar la intervención del monóxido de carbono, los datos son representados y analizados primeramente en su comportamiento promedio en todas las estaciones de monitoreo durante la temporada de lluvias (verano) y en la estación de secas (invierno), que son las más representativas de las condiciones extremas de carácter climático, y por ende también de la concentración de este gas. Igualmente se analiza su actuación espacial o de distribución en las mismas estaciones, tomando como referencia el comportamiento en 1995 y en 2001. Finalmente, como complemento de la correlación entre factores climáticos y de concentración, se observa su comportamiento promedio a lo largo de 24 horas en las estaciones que tienen los patrones más representativos de concentración.

Al analizar el comportamiento global de la concentración del monóxido de carbono en relación con el promedio de los tres meses del invierno (diciembre, enero y febrero), a lo largo de los años considerados, puede observarse que aunque el promedio del invierno de 1995 fue de 3.4 partes por millón (ppm), los datos analizados demuestran que la ten-

dencia particular dentro de la estación es a aumentar paulatinamente de 3.1 ppm en el mes de diciembre, a 3.4 ppm en enero y a 3.7 ppm en febrero, cuando coincide con las más bajas temperaturas del año y la menor incidencia de vientos.

Los inviernos de los años siguientes no representan valores mayores a 2.45 ppm, lo que demuestra la incidencia de algunos factores dispersantes que contrarrestan el efecto invernal. Al igual que en la ciudad de México, los valores que exceden la norma ocurren en este periodo, aunque también es común que en cada determinado lapso también incidan vientos de gran velocidad que mezclan los gases con la mayor concentración de partículas suspendidas a través de tolvaneras.

Este comportamiento se debe en gran parte a que en diciembre apenas comienza a incrementarse la advección de frentes fríos hacia el territorio nacional y los vientos polares, los cuales provienen de Norteamérica; pero a medida que avanza el invierno, los fenómenos gélidos se incrementan y ocasionan heladas, nevadas e inversiones térmicas en la ciudad y valle de Toluca. El descenso de temperatura en enero y febrero mantiene al monóxido de carbono en los niveles más bajos de la troposfera (primera capa de la atmósfera), asimismo propicia un mayor número de horas de exposición, ya que en invierno las noches son más largas (OMS, 1992).

Localmente la concentración del monóxido de carbono durante el invierno de 1995 tuvo un patrón de distribución concéntrico-radial: se concentró dentro de la ciudad de Toluca y se dispersó en círculos hacia las partes exteriores en todas direcciones. Esto refuerza la presencia de los fenómenos de inversión térmica relacionados con las bajas temperaturas que adquieren las construcciones, y que al conjuntarse con la estacionalidad de los vientos, permiten que muchas de las emisiones permanezcan más concentradas alrededor de las fuentes contaminantes, en este caso los vehículos automotores (mapa 1). En cambio, el patrón de distribución del CO en el invierno del año 2001 tuvo un comportamiento muy distinto, pues las máximas concentraciones se registraron hacia el noroeste y las menores hacia el sureste; esto refleja la incidencia de pequeñas ráfagas de viento de orientación se-nw, pues se alejan de las fuentes de emisión (mapa 3).

Para el verano, los valores de concentración disminuyeron sensiblemente a lo largo de los tres meses en que transcurre y durante los años considerados, ya que el promedio de la estación para 1995 fue de 1.8 ppm, mientras que en su comportamiento medio mensual osciló entre 1.6 ppm para junio, 1.8 ppm en julio y 2.2 ppm para agosto. Independientemente de que la lluvia y el viento influyen mucho en este periodo para diluir la concentración de CO en el aire, también coinciden con un periodo de máxima produc-

ción industrial en el corredor Toluca-Lerma, y con una carga mayor en el parque vehicular dentro del área metropolitana (Legorreta, 1989). No obstante, la capacidad de dispersión del aire es mayor al porcentaje total de concentración del gas.

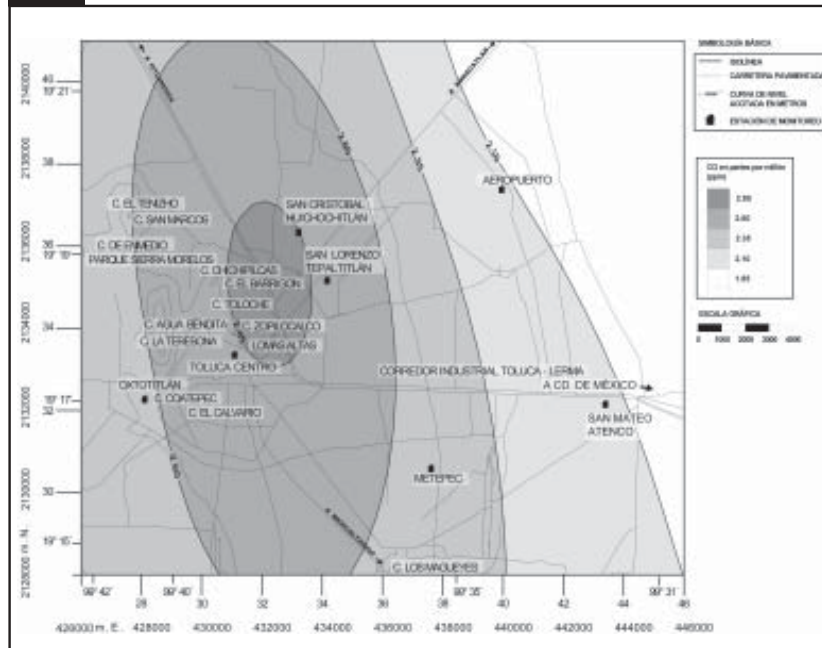
El mes de mayor precipitación es julio y el de menor es agosto. Esto explica en parte el hecho de que en este último mes se presente la mayor concentración de monóxido de carbono del verano, pues coincide con el mes de mayor actividad industrial. El calentamiento de julio propicia fenómenos conectivos que elevan suficiente humedad para formar grandes nubes denominadas cúmulonimbos, que dan como consecuencia precipitaciones torrenciales. En agosto, el valor de CO se incrementa debido a que entonces disminuyen las lluvias y los vientos, que coinciden en muchas ocasiones con la ocurrencia de la sequía intraestival y la canícula.

La acción del viento es crucial, ya que desarrolla un patrón de distribución gradual que va de sureste a noroeste de la zona incluida en los mapas. La distribución más alta se desarrolla hacia el sureste, relativamente lejos de las fuentes de origen en la zona industrial Toluca-Lerma y en las zonas más urbanas de Toluca y Metepec, para diluirse paulatinamente hacia el noroeste.

Los vientos dominantes en el valle corren de suroeste a noreste durante el verano, y ocasionalmente de sureste a noroeste, prácticamente en forma diagonal a la forma como se distribuyen los valores, lo que implica en gran medida una circulación muy local que obliga a las masas de CO a concentrarse hacia el sureste y dispersarse hacia el noroeste pues, como se verá más adelante, existen factores como el fenómeno de la isla de calor de la zona urbana que alteran las condiciones regionales (mapa 2). Esta condición se mantiene en relación con el patrón de distribución para los años

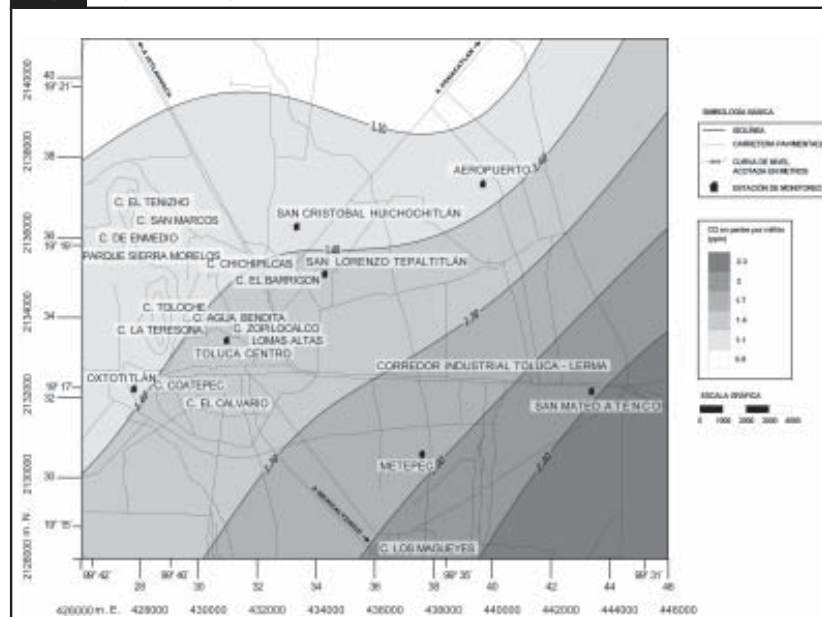
siguientes, de modo que los valores menores suceden hacia el norte y los mayores hacia el sur, en especial en el verano de 2001 (mapa 4).

Mapa 1. Comportamiento espacial del monóxido de carbono. Invierno de 1995.

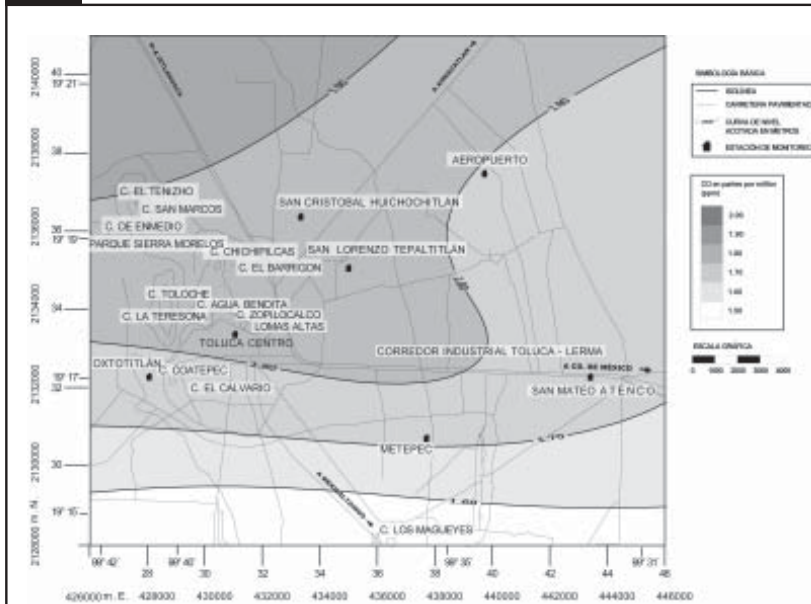


Proyección: Universal transversa de mercator cada 1,000 metros.
Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ciudad de Toluca sobre la carta del INEGI, escala 1:50,000 (1973).

Mapa 2. Comportamiento espacial del monóxido de carbono. Verano de 1995.

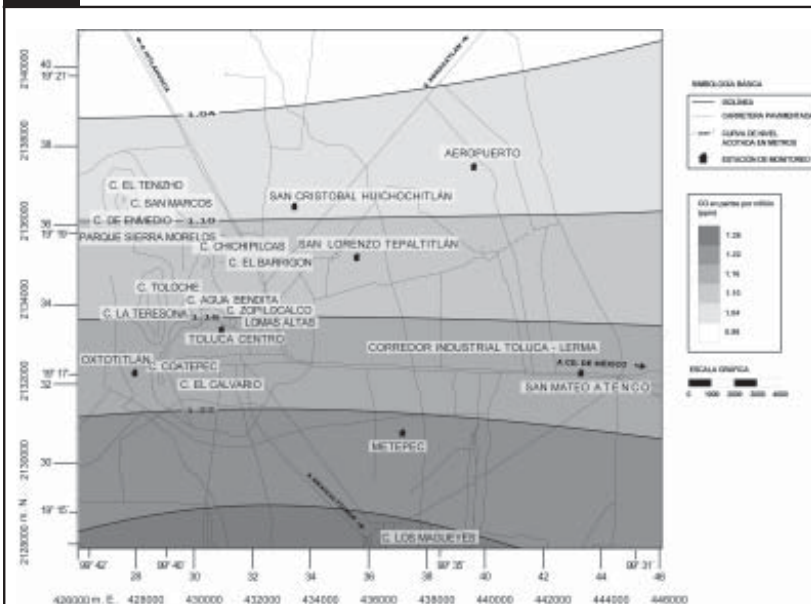


Proyección: Universal transversa de mercator cada 1,000 metros.
Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de Toluca sobre la carta del INEGI, escala 1:50,000 (1973).

Mapa 3. Comportamiento espacial del monóxido de carbono. Invierno de 2001.


Proyección: Universal transversa de mercator cada 1,000 metros.

Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de Toluca sobre la carta del INEGI, escala 1:50,000 (1973).

Mapa 4. Comportamiento espacial del monóxido de carbono. Verano de 2001.


Proyección: Universal transversa de mercator cada 1,000 metros.

Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de Toluca sobre la carta del INEGI, escala 1:50,000 (1973).

El promedio de los valores generales de invierno es de 3.4 ppm y el de verano es de 1.8 ppm. Considerando al primero como el 100%, se obtiene que el descenso de monóxido de carbono en verano es hasta de 53%, lo que representa un valor muy significativo en esta época del año.

Hay que recordar que el CO sigue generándose en verano, con los procesos industriales, el tránsito vehicular, las actividades domésticas y la dinámica fisiconatural, sin embargo, las precipitaciones y los vientos limpian la atmósfera durante esta época del año.

En el cuadro 1 se observa que los valores tanto del invierno como del verano decrecen de 1995 a 2001; los índices más elevados ocurren en 1995 (3.40 y 1.95), y los más bajos en 2001 (1.75 y 1.40). La diferencia entre los valores promedio de 1995 a 2001 en invierno es de 1.65, lo que representa 48.5%, mientras en verano la diferencia es de 0.55, que equivale a 28.2%; se nota claramente la discrepancia entre una estación y otra, pero también es evidente cómo la tendencia de 1995 a 2001 es hacia una disminución de este gas.

La disminución en las concentraciones de monóxido de carbono de 1995 a 2001 en Toluca y su zona metropolitana no obedecen solamente a fenómenos meteorológicos, sino también a ciertas medidas que han puesto en marcha los gobiernos federal y estatal, como el Programa de Verificación de Automóviles que se lleva a cabo cada semestre, así como el mayor control de la emisión de gases por las industrias en las zonas periféricas a la zona urbana. No obstante, en los últimos años el padrón vehicular ha aumentado, pero los modelos recientes pudieran explicar también el decremento del monóxido de carbono.

Esto ocurre de la misma forma en la ciudad de México y su área conurbada dentro del estado de México, donde desde 1990 se ha desarrollado un patrón claramente descendente del

monóxido de carbono a partir de la operación de medidas como el programa de verificación vehicular, la gasolina oxigenada y la adición de convertidores catalíticos en los modelos recientes (Rico *et al.*, 2001: 190). En los años noventa, los gobiernos federal y estatal emprendieron un conjun-

to de medidas de control para atender los problemas generados por contaminación atmosférica, ya que para ese tiempo el proceso se agudizó en la ciudad de Toluca y sus áreas aledañas.

Como parte de la elaboración del Programa Aire Limpio para el Valle de Toluca 1997-2000, la Secretaría de Ecología realizó un inventario para calcular los volúmenes de contaminantes. Con base en él se calculó que el total de emisiones de la zona metropolitana del valle de Toluca es de alrededor de 470 mil toneladas al año, de las cuales 3% corresponde a la industria, 4% a los servicios, 25% a la erosión de suelos y 68% al transporte (Morales, 2000: 214).

Otra forma de observar el comportamiento del monóxido de carbono, es su concentración a lo largo de 24 horas en cada una de las estaciones. De ahí pueden determinarse las estaciones que tienen los patrones más representativos en una zona específica de concentración de contaminantes, y analizarse como elementos extremos (máximos y mínimos) de la población de datos.

Las concentraciones de monóxido de carbono son muy variables a lo largo del día y la noche. Para este rubro se tomaron en cuenta dos estaciones de la red de monitoreo atmosférico, que son Oxtotitlán y Metepec; la primera es representativa de una zona con características semirurales, y la otra con condiciones de mayor urbanización. También se eligieron para este ejercicio dos días típicos: uno de invierno y el otro de verano (3 de enero y 14 de agosto de 1995), debido a su comportamiento estándar con respecto al promedio.

Puede apreciarse en la gráfica 1, para el invierno, que los valores más bajos de ambas estaciones se registran de las 12 a las 20 horas; a partir de este momento comienza el ascenso de manera significativa; los valores más altos ocurren por la noche, entre las 23 y 24 horas; enseguida, tiende a disminuir, con números no tan bajos como en el día, el valor más bajo se manifiesta sin la presencia solar a las 6 horas; a partir de las 7 horas se elevan notablemente los valores; entre las 8 y las 10 horas, se registran los valores más altos.

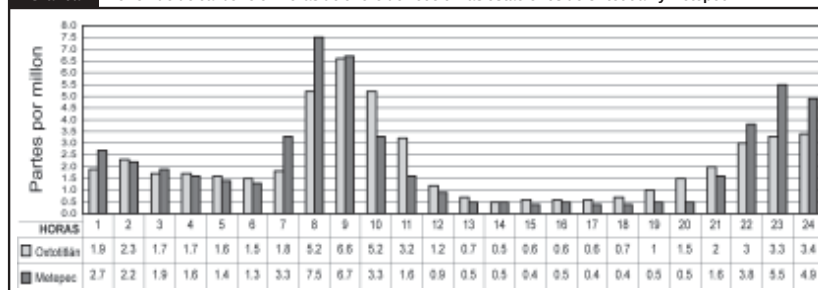
En la gráfica 1, de las 24 horas, pueden observarse diferencias considerables entre las dos estaciones. Los índices más elevados, de manera general, corresponden a Metepec, sobre todo en el transcurso de la noche; mientras en Oxtotitlán, los valores más altos están entre las 10 y las 21 horas, pero muy semejantes a los de la otra estación. Como el monóxido de carbono se desprende en gran medida de la combustión de los automóviles, el gas es más intenso en

Cuadro 1. Tendencia del monóxido de carbono en la ciudad de Toluca y zona metropolitana de 1995 a 2001.

Años	Invierno	Verano	Diferencia	%
1995	3.40	1.95	1.45	-42.6
1996	2.45	1.70	0.75	-30.6
1997	1.85	1.20	0.65	-35.1
1998	1.96	1.40	0.56	-28.5
1999	1.98	1.20	0.78	-39.3
2000	1.75	1.15	0.60	-34.2
2001	1.80	1.34	0.46	-25.1
Media	2.23	1.40	0.79	-35.1

Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de Toluca.

Gráfica 1. Monóxido de carbono en horas de enero de 1995 en las estaciones de Oxtotitlán y Metepec.



Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ciudad de Toluca, 2001.

la zona de Metepec, con mayor infraestructura urbana y concentración de habitantes.

De las 12 a las 19 horas en las dos estaciones se registran los parámetros más bajos. La insolación y el viento del invierno son los dos factores que dispersan y diluyen con facilidad los contaminantes en el día. El 3 de enero de 1995 constituyó un día muy soleado, pues coincide con el perihelio (día en que la Tierra está más cerca del Sol), por lo que esa energía electromagnética adicional afectó los dos sitios de monitoreo atmosférico.

La gráfica 2 muestra el comportamiento del monóxido de carbono para el verano. Las estaciones Oxtotitlán y Metepec presentan durante las 24 horas del 14 de agosto de 1995 un curso similar al del invierno, sólo que en la primera los valores son más elevados, caso que se observa de las 8 a las 24 horas. La mayor concentración de CO en la estación Oxtotitlán, donde el espacio no está muy urbanizado, puede deberse a que los vientos predominantes del sur transportan hacia el noreste de Toluca parte de los contaminantes generados.

En las gráficas 1 y 2 puede apreciarse que los valores del CO es muy semejante durante las 24 horas; se presentan dos máximos entre las 7 y las 11 horas y entre las 21 a las 24 horas; el hecho está relacionado con el mayor flujo vehicular por las principales calles y avenidas de la ciudad. Los traslados en automóviles particulares y en autobuses públicos a las áreas de trabajo y a las instituciones educati-

vas representan la dinámica más fuerte del monóxido de carbono (Schwell y Zali, 1999).

En las dos siguientes gráficas horarias de los días 28 de enero y el 13 de julio de 2001, que representan también al invierno y al verano, la situación general durante las 24 horas es semejante a la de 1995, sólo que los datos de 2001 son más bajos que los de 1995 (gráfica 3 y gráfica 4). Tam-

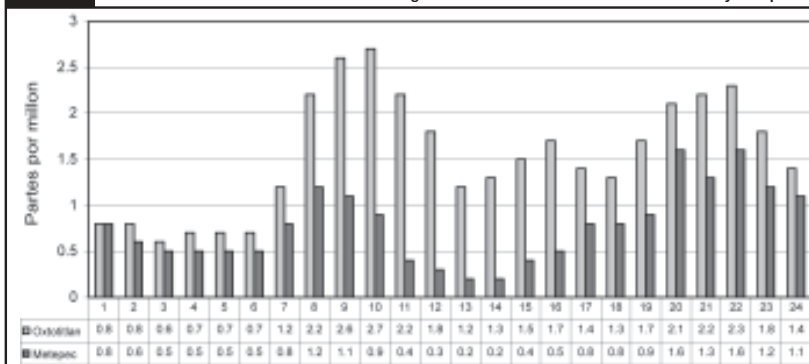
bién se nota que tanto para el invierno como para el verano en la estación Oxtotitlán los valores de CO son más altos que en los seis años anteriores. Es evidente que la ciudad de Toluca está creciendo vertiginosamente y que los espacios donde hace algunos años no había tanto tránsito de automóviles para 2001 ya era elevado, así como también se presenta una mayor concentración de población.

En todos los casos, las concentraciones de monóxido de carbono son más acentuadas en invierno que en verano, y también de 1997 a 2001 se registra un descenso apreciable en casi todos los datos que se tomaron en cuenta en este trabajo. Así lo muestra el cuadro 1 que resume la situación de todas las estaciones entre el invierno y el verano, y entre 1995 y 2001.

También en este ejercicio se contemplan los valores medios mensuales de las siete estaciones de monitoreo, que abarcan de 1995 a 2001. El estado que reflejan todas las estaciones a lo largo del año es muy similar: mayores concentraciones en invierno con respecto al verano, tomando en cuenta que en estos periodos ocurren las situaciones atmosféricas extremas y, por tanto, los gases siguen este patrón. De esta manera, primavera y otoño representan meses de transición hacia el calor y lluvia o hacia el frío y aridez.

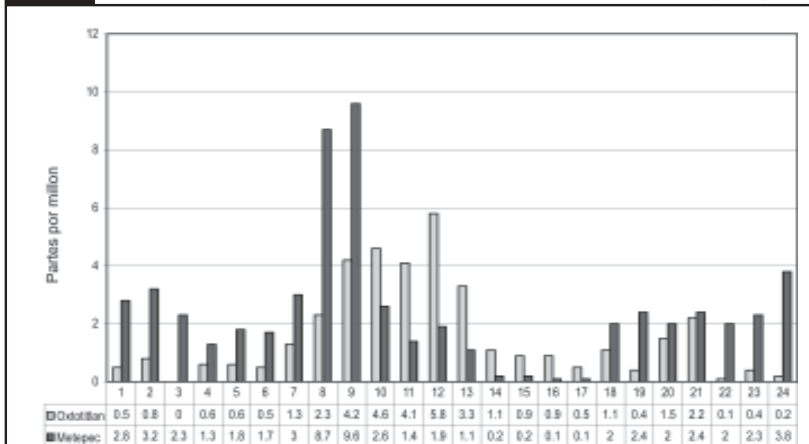
Es preciso mencionar que casi siempre son diciembre, enero, febrero y marzo los meses de mayor concentración de monóxido de carbono en el aire; pero enero es el mes de mayor valor por este contaminante, también es cuando se registran las temperaturas más gélidas para el hemisferio norte, en el valle de Toluca suelen descender hasta los -5°C , mientras en las montañas alejadas como la Sierra de las Cruces y el Nevado de Toluca bajan hasta -10°C . Cuando invade al valle un frente frío, prolongación de un 'norte' o la entrada de aire marítimo tropical, las bajas temperaturas se combinan con la humedad para la ocurrencia de algunas lluvias o nevadas.

Gráfica 2. Monóxido de carbono en 24 horas del 14 de agosto de 1995 en las estaciones de Oxtotitlán y Metepec.



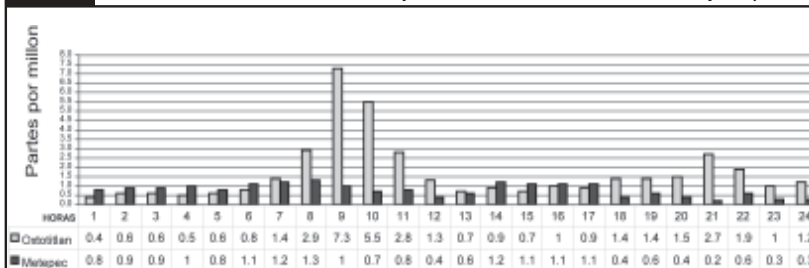
Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ciudad de Toluca, 2001.

Gráfica 3. Monóxido de carbono en 24 horas del 28 de enero de 2001 en las estaciones de Oxtotitlán y Metepec.



Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ciudad de Toluca, 2001.

Gráfica 4. Monóxido de carbono en 24 horas del 13 de julio de 2001 en las estaciones de Oxtotitlán y Metepec.



Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ciudad de Toluca, 2001.

En julio se observa menor concentración de monóxido de carbono en Toluca y su zona metropolitana. También es el mes más lluvioso para el valle de Toluca, pues en este periodo llega suficiente humedad proveniente del Atlántico y del Pacífico, pero sobre todo de este último, ya que presenta menor continentalidad hacia el territorio mexicano. La gestación de huracanes en el Pacífico (zona del Istmo de Tehuantepec) comienza en mayo pero se activa intensamente en julio y agosto, lo que conduce a un desprendimiento de vientos húmedos que se propagan a través del territorio mexicano, y al encontrarse con montañas elevadas, condensan la humedad para originar lluvias copiosas.

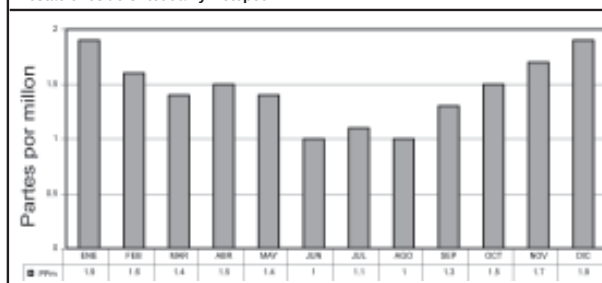
Las moléculas del monóxido de carbono y otros gases, ante la magnitud de las lluvias del verano, actúan como núcleos de condensación y de sublimación (sobre aquéllas se adhieren las gotitas de agua en las nubes) para permitir la formación de nubes de la familia de los cúmulos. El cielo limpio del valle de Toluca en julio permite que los seres vivos puedan desarrollar mejor sus funciones fisiológicas, como la fotosíntesis en la vegetación. La oxigenación en las zonas tropicales se eleva a su máximo en verano, no solamente por la limpieza de la atmósfera, sino también por la propagación de oxígeno (generada en las zonas fóticas marinas) que transportan los huracanes por medio de los vientos difundidos en altura.

Los elementos climáticos que se muestran en el cuadro 2 son los principales responsables de la concentración, el tiempo de permanencia, el transporte, la combinación y la dilución del monóxido de carbono en Toluca y su zona metropolitana. Como se observa, los elementos atmosféricos para México son muy diversos a lo largo del año, tomando en cuenta que la variedad se debe a que en el país convergen fenómenos provenientes de las zonas polares, frías, templadas, subtropicales, tropicales y ecuatoriales.

La incidencia de los fenómenos meteorológicos de todas las zonas climáticas de la Tierra en el país permite una gran dinámica atmosférica en el transcurso del año, lo que se traduce en una renovación constante de los componentes químicos gaseosos. En la primavera, el verano y el otoño ocurre la mayor turbulencia, mientras que en el invierno no disminuye mucho, pero las álgidas temperaturas inhiben de manera parcial la dispersión del monóxido de carbono.

Toluca y su zona metropolitana se encuentra ubicada en la zona tropical, por lo que la insolación fluctúa, en el invierno y el verano, entre 11 y 12 horas, cantidad que se considera elevada, así que la acción solar facilita mayor movimiento atmosférico. La elevada altitud de la ciudad (2,660 metros) confina bajas presiones atmosféricas a lo largo del año, y esta combinación geográfica coadyuva a

Gráfica 5. Monóxido de carbono en 24 horas del 13 de julio de 2001 en las estaciones de Oxtotitlán y Metepec.



Fuente: Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ciudad de Toluca, 2001.

Cuadro 2. Elementos atmosféricos relacionados con la concentración de monóxido de carbono durante el invierno y el verano en el valle de Toluca.

Elementos	Invierno	Verano
Temperatura	Temperaturas mínimas Heladas Inversiones térmicas	Temperaturas máximas Olas de calor Canícula
Viento	Polares Oeste Corrientes de chorro	Alisios Monzones
Nubes	Cirros Estratos	Cúmulos Cúmulo nimbo
Humedad	Escasa	Elevada
Precipitación	Lloviznas Nevadas	Tormentas eléctricas Lluvias copiosas
Huracanes	Nulos	Abundantes
Masas de aire	Frías	Cálidas
Frentes	Fríos	Cálidos

Fuente: Elaboración propia.

dispersar más rápido los componentes gaseosos. El origen del monóxido de carbono y otros gases contaminantes que se hallan suspendidos en el aire de Toluca no sólo pertenece a este espacio, sino también proviene de las regiones cercanas, como la ciudad de México, pues es evidente que los elementos atmosféricos no toman en cuenta fronteras.

3. Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) es una unidad que permite comparar las magnitudes de los diversos contaminantes en una escala homogénea que va de cero a 500, como se observa en el cuadro 3. El imeca está basado en la norma oficial mexicana NOM-085-ECOL/1993, que establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera, como es el monóxido de carbono.

El imeca consta de dos algoritmos de cálculo fundamentales; el primero, para la obtención de subíndices correspon-

Cuadro 3. Índice Metropolitano de la Calidad del Aire para el monóxido de carbono.		
Imeca	Calidad del aire	Partes por millón (8 horas)
0-100	Satisfactoria	13
101-200	No satisfactoria	22
201-300	Mala	31
301-500	Muy mala	50
Fuente: Gobierno del Estado de México, 1996b.		

Cuadro 4. Efectos de los contaminantes en la salud y sus recomendaciones para evitarlos.		
Imeca	Efectos	Medidas
0-100	No se presentan efectos negativos sobre la salud.	No se necesita ninguna medida preventiva.
101-250	Irritación en los ojos y dolor de cabeza. Se reactivan los síntomas de los enfermos del corazón o de los pulmones. Niños, ancianos y fumadores presentan trastornos del aparato respiratorio y cardiovascular.	Se debe evitar caminar en la calle por tiempos largos. No se recomienda realizar ejercicio físico al aire libre.
251-350	Lactantes, ancianos y fumadores pueden presentar además de las molestias anteriores, alteraciones inflamatorias en el sistema respiratorio. El resto de la población puede presentar trastornos funcionales en el aparato respiratorio y cardiovascular.	Se debe evitar caminar en la calle por tiempos largos. No realizar ejercicio al aire libre. No fumar. Evitar cambios bruscos de temperatura. Disminuir el contacto con los enfermos de las vías respiratorias.
Más de 350	Los enfermos crónicos de los pulmones o del corazón reactivan sus padecimientos de base. Los lactantes, ancianos y fumadores pueden presentar alteraciones inflamatorias en su aparato respiratorio. El resto de la población puede presentar alteraciones inflamatorias en su aparato respiratorio.	Ingestión de jugo de frutas. Atención médica oportuna si se detecta alguna alteración. Mantenerse atento a las recomendaciones que emita el Sistema de Salud.
Fuente: Programa de Aire Limpio para el Valle de Toluca, 1997.		

dientes a diferentes indicadores de la calidad del aire; y el segundo, para la combinación de éstos en un índice global.

El primer algoritmo involucra la utilización de funciones segmentadas basadas en dos puntos de quiebre principales. Estos puntos fueron obtenidos a partir de los criterios mexicanos de la calidad del aire, así como de niveles para los que ocurren daños significativos a la salud. Al primero se le asignó el valor de 100 y al segundo el de 500; entre estos dos puntos se definieron tres más, cuyo objetivo es clasificar el intervalo en diferentes términos descriptivos de la calidad del aire.

El índice de la calidad del aire se define como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud dentro de una región determinada.

Como se aprecia en el cuadro 3, el imeca del monóxido de carbono para Toluca y su zona metropolitana se ubica en el parámetro de cero a 100, lo que según la norma equivale a una calidad de aire satisfactoria, es decir, sus repercusiones en la salud no son considerables.

Hay que advertir que el presente estudio toma en cuenta monóxido de carbono medio mensual y sólo en los datos del contaminante de las 24 horas se presentan valores absolutos, pero éstos se ubican por debajo de las 10 ppm.

El cuadro 4 muestra los efectos de los contaminantes en la salud.

De acuerdo con los reportes de monóxido de carbono para Toluca y su zona metropolitana, el imeca queda ubicado en todos los casos entre cero y 100 unidades, lo que indica que no se presentan efectos negativos sobre la salud, por lo que el criterio es no recomendar ninguna medida preventiva.

Hay que tomar con cautela las aseveraciones anteriores, ya que en algunos días de invierno en ciertos sectores de la ciudad se observan masas oscuras muy acentuadas en el aire, tanto en las zonas industriales como en las principales avenidas; es ahí donde debe estar presente el monóxido de carbono, pues es desprendido en abundancia por esas fuentes. La gasolina y el diesel son las principales sustancias que lo producen.

El comportamiento del monóxido de carbono durante las 24 horas registra dos máximos importantes: uno entre las 7 y 10 horas y el otro entre las 18 y las 21 horas; factor que está relacionado con dos variables primordiales: por un lado, bajas temperaturas, y por el otro, intensidad del flujo vehicular. Las industrias también liberan este gas, pero su ubicación está relativamente lejos de los sitios donde se encuentran las estaciones de monitoreo ambiental (Ross, 1974).

Los valores medios anuales del monóxido de carbono tienden hacia un decremento de 1995 al 2001. La disminución puede estar relacionada con las medidas de control de anticontaminantes puestas en marcha por los gobiernos federales y estatales, como son la verificación de automóviles y el programa Hoy no Circula. Aunque esta última norma no se aplica en Toluca, es importante, pues parte de la contaminación que tiene esta ciudad llega del Distrito Federal.

El Programa de Medio Ambiente 1995-2000, propuesto por el gobierno federal, define los lineamientos de política general en materia de ambiente y recursos naturales, derivados del Plan Nacional de Desarrollo, y que al mismo tiempo lo refuerzan (Semarnap, 1999). El programa pro-

mueve un desarrollo urbano sustentable como una de las estrategias, proyectos y acciones prioritarias, cuyas metas en relación con contaminación del aire son:

- Propiciar el uso racional de los recursos comunes ambientales (especialmente el aire) más importantes de las ciudades.
- Establecer un marco regulativo y de incentivos que fomenten permanentemente la innovación y el cambio tecnológico en los procesos urbanos, de servicio y de transporte, para mejorar su eficiencia energética y calidad ambiental.
- Generar cambios en la estructura modal del transporte urbano que aseguren una mayor eficiencia funcional y ambiental de las ciudades.

Para cumplir las metas, el Programa de Aire Limpio para la zona metropolitana del valle de Toluca 1997-2000 describe los principales proyectos y acciones prioritarias que de manera más concreta fomentan el aire limpio, y que son:

- Ordenamiento ecológico territorial integrado a planes de desarrollo urbano en zonas metropolitanas críticas.
- Formulación de programas de gestión de la calidad del aire en las zonas metropolitanas prioritarias, que integren políticas urbanas, ambientales y de transportes.
- Desarrollo de un sistema normativo que favorezca la reconversión tecnológica de la industria y el transporte de las zonas metropolitanas.
- Promoción de sistemas de información y monitoreo ambiental en las zonas metropolitanas.
- Regulación y normatividad para la modernización tecnológica en los procesos industriales y de transporte.

Todas estas normas establecidas por las autoridades gubernamentales han contribuido de alguna manera a atender y disminuir la carga de flujos gaseosos a la atmósfera. Sin embargo, el proceso apenas comienza y falta mucho para frenar con bases sólidas el problema de la contaminación en Toluca y otras ciudades del país.

Conclusiones

El comportamiento del monóxido de carbono en Toluca y su zona metropolitana está estrechamente relacionado con la manifestación de los diversos fenómenos atmosféricos que se originan o convergen en territorio mexicano.

Las condiciones meteorológicas tanto del invierno como del verano determinan la mayor y menor concentración de monóxido de carbono a lo largo del año. Las bajas temperaturas del invierno lo concentran en la capa atmosférica adyacente al suelo, mientras las elevadas temperaturas del verano, aunadas a las lluvias y a los vientos predominantes, lo transportan y lo diluyen a otras zonas.

Los fenómenos atmosféricos que por más tiempo atra-

pan cerca del suelo al monóxido de carbono son las inversiones térmicas y los frentes fríos. Los eventos que disipan y trasladan a mayor distancia al contaminante en verano son las precipitaciones y los vientos.

Los datos de monóxido de carbono en Toluca y su zona metropolitana oscilan durante el año (12 meses) entre 0.5 y 7 ppm, por lo que de acuerdo con el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (imeca), los valores se ubican en el nivel de satisfactorios, así que no existen efectos negativos en la salud humana y, de esta manera, no se necesitan medidas preventivas (Secretaría de Ecología, 1997).

Aunque los datos de monóxido de carbono publicados por la Red Automática de Monitoreo Ambiental muestren un comportamiento con valores relativamente bajos, hay que advertir que existen horas y días en que la atmósfera se observa con muy poca visibilidad y olores fétidos, sobre todo en el corredor industrial Toluca-Lerma. Esto haría necesario un estudio de comportamiento del monóxido y de otros gases contaminantes como el dióxido de carbono, el dióxido de azufre y el ozono a nivel de un gradiente atmosférico, o de volumen en las capas de aire que van hasta unos mil metros por encima del suelo, para explicar mejor su dinámica y su concentración.

atm

Bibliografía

- Ayllón, T. (1996). *Elementos de meteorología y climatología*. Trillas, México, D. F.
- Boubel, R. y Fox D. (1994). *Fundamentals of Air Pollution*. 3ª ed. Academic Press, San Diego, California.
- Calderón, T. (1990). *Evolución de las precipitaciones ácidas en la ciudad de Toluca*. Tesis de maestría, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Cárdenas Gutiérrez, E. (2001). "Volúmenes vehiculares en la zona urbana de la ciudad de Toluca", *Cuadernos de Investigación*, Núm. 21. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Comisión para la Recuperación del Río Lerma (2000). *Atlas ecológico de la cuenca hidrográfica del río Lerma*.
- Gobierno del Estado de México
- _____ (1996a). *Temas ambientales*. Toluca, México.

- _____. (1996b). *Programa Estatal de Protección al Ambiente 1996-1999*. Gobierno del Estado de México, Toluca.
- Hernández Romero, J. C. (2002). *Contaminación atmosférica en la ciudad de Toluca*. Tesis de licenciatura, Facultad de Geografía, UAEMex.
- Jáuregui Ostos, E. (1971). “La isla de calor en la ciudad de Toluca, México”, *Boletín*. Núm. 11, Instituto de Geografía de la UNAM.
- Légorreta J. (1989). *Transporte y contaminación en la ciudad de México*. Centro de Ecodesarrollo, México. D. F.
- Lugo Hubp, J. y M. Inbar (2002). *Desastres naturales en América Latina*. FCE, México, D. F.
- Morales Méndez, C.
- _____. (2000). “Climas”, en *Atlas industrial de la cuenca alta del río Lerma*. Gobierno del Estado de México, Toluca, México.
- _____. (1999). “El Niño: sus consecuencias ecológicas”, *Cultus*. Vol. 1, Núm. 1, UAEMex, Toluca.
- Organización Mundial de la Salud (1992). *Monóxido de carbono*.
- Rico Méndez, F. et al. (2001). *Daños a la salud por contaminación atmosférica*. Cigome, UAEMex, Toluca, México.
- Ross, R. D. (1974). *La industria y la contaminación del aire*. Diana, México, D. F.
- Schwell, D. y O. Zali (1999). *Urban Traffic Pollution*. British Library, Londres.
- Secretaría de Ecología (1997). Programa de Aire Limpio para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.
- Semarnap (1999). *Programa Nacional de Acción Climática*. Documento para consulta pública. Semarnap et al. México.