



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DINÁMICA ATMOSFÉRICA DE LOS  
PRECURSORES DEL SMOG FOTOQUÍMICO EN  
LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE  
MÉXICO**

**TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**QUÍMICO**

**PRESENTA**

**OCTAVIO CÉSAR CASTILLO SIERRA**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.**

**AÑO 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: Profesora: Glinda Irazoque Palazuelos**

**VOCAL: Profesor: José Luz González Chávez**

**SECRETARIO: Profesora: Rocío García Martínez**

**1er. SUPLENTE: Profesora: Irma Cruz Gavilán García**

**2º SUPLENTE: Profesora: Gema Luz Andraca Ayala**

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Laboratorio de Química Atmosférica,  
UNAM, Av. Universidad # 3000 Coyoacán 04510, México D.F.

## **ASESORA DEL TEMA:**

**Dra. Rocío García Martínez** \_\_\_\_\_

## **SUSTENTANTE:**

**Octavio César Castillo Sierra** \_\_\_\_\_

## ÍNDICE GENERAL

### I. Índice de tablas

### II. Índice de figuras

<b>Introducción</b>	<i>Pág. 1</i>
<b>Objetivos</b>	<i>Pág. 4</i>
<b>Capítulo 1. Antecedentes</b>	<i>Pág. 5</i>
<b>Capítulo 2. Dinámica atmosférica</b>	<i>Pág. 12</i>
2.1 Características generales de la atmósfera	<i>Pág. 13</i>
2.2 Presión y temperatura	<i>Pág. 15</i>
2.3 Meteorología y contaminación	<i>Pág. 18</i>
2.4 Capa de mezcla	<i>Pág. 23</i>
2.5 Inversión térmica	<i>Pág. 26</i>
2.6 Isla de calor	<i>Pág. 28</i>
<b>Capítulo 3. La Zona Metropolitana de la Ciudad de México</b>	<i>Pág. 32</i>
3.1 Situación y distribución geográfica	<i>Pág. 33</i>
3.2 Climatología de la ZMCM	<i>Pág. 35</i>
3.3 Fuentes de contaminación y contaminantes atmosféricos	<i>Pág. 37</i>

**Capítulo 4. Dinámica de los contaminantes atmosféricos** *Pág. 45*

4.1 Smog fotoquímico *Pág. 46*

4.2 Ozono y formación de radicales *Pág. 48*

4.3 Óxidos de nitrógeno *Pág. 54*

4.4 Compuestos de azufre *Pág. 57*

4.5 Lluvia ácida *Pág. 61*

4.6 Compuestos orgánicos volátiles *Pág. 63*

4.7 Nitratos de peroxiacilo *Pág. 65*

4.8 Carbonilos *Pág. 67*

4.9 Partículas suspendidas *Pág. 71*

**Capítulo 5. Normas de Calidad del aire** *Pág. 75*

5.1 Sistema de Monitoreo Atmosférico *Pág. 79*

5.2 Inventario de emisiones *Pág. 81*

5.3 PROAIRE 2011-2020 *Pág. 82*

**Capítulo 6. Conclusiones** *Pág. 84*

**Referencias** *Pág. 86*

## **I. ÍNDICE DE FIGURAS I**

<b>FIGURA 1.</b> Variación de la presión atmosférica con la altitud	<i>Pág. 16</i>
<b>FIGURA 2.</b> Estructura atmosférica, temperatura y altitud	<i>Pág. 17</i>
<b>FIGURA 3.</b> Anticiclón	<i>Pág. 21</i>
<b>FIGURA 4.</b> Ciclón	<i>Pág. 22</i>
<b>FIGURA 5.</b> La capa de mezcla	<i>Pág. 25</i>
<b>FIGURA 6.</b> Inversión térmica	<i>Pág. 27</i>
<b>FIGURA 7.</b> Temperatura en función de la densidad poblacional	<i>Pág. 29</i>
<b>FIGURA 8.</b> Isla de calor, según el tipo de región	<i>Pág. 30</i>
<b>FIGURA 9.</b> Mancha urbana de la ZMVM	<i>Pág. 34</i>

## **II. ÍNDICE DE TABLAS**

<b>TABLA 1.</b> Composición de la atmósfera terrestre	<i>Pág. 14</i>
<b>TABLA 2.</b> Contaminantes naturales	<i>Pág. 39</i>
<b>TABLA 3.</b> ¿Contaminantes comunes en la ZMVM?	<i>Pág. 44</i>
<b>TABLA 4.</b> Tipos de smog	<i>Pág. 47</i>
<b>TABLA 7.</b> Índice de Calidad del Aire	<i>Pág. 78</i>
<b>TABLA 8.</b> Normas oficiales mexicanas de Salud Ambiental	<i>Pág. 80</i>

# INTRODUCCIÓN

Es común comentar que el Valle de México es un espacio del país donde se encuentra asentada alrededor de la quinta parte de la población nacional y donde el desarrollo económico, industrial y urbano ha originado desde hace varias décadas niveles muy altos de contaminación atmosférica, repercutiendo en un considerable deterioro ambiental. A veces, se usa el término Valle de México o Ciudad de México indistintamente, solo con fines explicativos respecto a temas de la urbanización y la formación de la zona metropolitana correspondiente.

Para comprender el complejo problema de la contaminación del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, o de la Ciudad de México, junto con sus consecuencias en el medio ambiente, es necesario iniciar revisando en forma detallada una serie de factores concomitantes como las características geográficas y la climatología de la Cuenca de la Ciudad de México, así como los elementos atmosféricos y los fenómenos meteorológicos que juegan un papel importante en la captación y evolución de los contaminantes. Es importante examinar también la estructura atmosférica, su composición química, el comportamiento en ella de características físicas como la presión, la temperatura y la humedad; igualmente deben considerarse las condiciones que se establecen en la atmósfera como la capa de mezcla, las inversiones térmicas y la isla urbana de calor, que se originan a causa tanto de factores físicos naturales, como por las actividades humanas.

La dinámica atmosférica de las sustancias contaminantes obedece a múltiples agentes, contándose entre ellos a las fuentes de contaminación, sus tipos y peculiaridades; así como a las propiedades físicas y características químicas de esas especies contaminantes que la atmósfera recibe y las que se forman dentro de ella por medio de reacciones.

Todo esto se conjuga para establecer en la atmósfera una compleja estructura de reacciones en cadena que sufren los contaminantes primarios que recibe el aire de la Ciudad de México, fotoquímicas muchas de ellas y por la vía de radicales libres, produciendo una mezcla de intermediarios y contaminantes secundarios peligrosos para la salud de los seres vivos, para los ecosistemas y para los diversos bienes intramuros y extramuros.

Por otra parte, pero igualmente importante por su potencial peligrosidad para el clima, el estado del tiempo y la salud de los seres vivos, está el estudio de las partículas suspendidas, los mecanismos de su formación y sus propiedades más relevantes.

En la Ciudad de México, la Gestión de la Calidad del Aire es un tema que se ha incluido en los planes de los diferentes gobiernos desde hace ya varias décadas, obteniendo resultados poco satisfactorios en un principio, siendo hasta la última década del siglo XX cuando se empezó a mejorar significativamente, ya que por una parte se ha logrado mantener a algunos contaminantes bajo control y otros han continuado reduciendo sus niveles con la instrumentación de medidas acordadas en el seno de la Comisión Ambiental Metropolitana, donde la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, junto con los gobiernos del Distrito Federal y del Estado de México, juegan un papel importante en la propuesta de acciones, siendo la más reciente y de amplio espectro de acciones el PROAIRE 2011-2020, que plantea estrategias para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México en la presente década.

Es fundamental para las personas que viven en la Zona Metropolitana del Valle de México conocer la Norma Oficial Mexicana vigente que en materia de salud existe para cada uno de **los "contaminantes criterio"**.



Este trabajo contribuirá, con una explicación al detalle y clara, a la intelección de los fenómenos y los conceptos que cualquier persona con una instrucción básica requiere para tener una cultura ambiental mínima en la Zona Metropolitana del Valle de México y de cualquier metrópoli del Mundo, que le permita entender los problemas de contaminación de su entorno y llevar a cabo acciones enfocadas a resolverlos y a prevenir otros.

También servirá como una guía para un conocimiento más profundo de los procesos fisicoquímicos y de los mecanismos de reacción que están involucrados en la formación de los contaminantes secundarios en la atmósfera de la Ciudad de México, así como de la teoría básica de las partículas en suspensión, que permita analizar el tema de la contaminación atmosférica en cualquier núcleo urbano.

## **Objetivo general**

- Desarrollar una investigación monográfica acerca de los factores y los precursores químicos que participan en la dinámica atmosférica y su efecto sobre la formación, distribución y migración de los contaminantes de origen fotoquímico y material particulado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

## **Objetivos particulares**

- Estudiar las condiciones meteorológicas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, y su influencia en la dinámica atmosférica de los contaminantes.
- Describir la dinámica atmosférica de los precursores e intermediarios del smog fotoquímico y la dinámica de las partículas suspendidas, así como la repercusión en la contaminación del aire de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, junto con los aspectos de la legislación ambiental para la calidad del aire referentes a las especies estudiadas.
- Contribuir a la comprensión de la dinámica atmosférica y de los fenómenos de generación, acumulación y transformación de los contaminantes en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, para coadyuvar a la formación de una conciencia social que se manifieste en acciones preventivas capaces de procurar una atmósfera más saludable para el desarrollo actual de las personas y de las próximas generaciones.

# **Capítulo 1**

## **ANTECEDENTES**

Han pasado ya varias décadas desde que se identificaron en forma clara los primeros indicios de deterioro ambiental causado por la contaminación en la Ciudad de México. Fue a partir de 1940 que el problema de contaminación del aire se vuelve relevante por la concentración poblacional que desencadenó la aglomeración industrial, las oportunidades de trabajo y salarios más altos que ésta ofrecía; además de las comodidades, diversiones, y el mejor nivel de vida al que invitaba la creciente ciudad. Los primeros esfuerzos en la lucha contra el problema de la contaminación apuntaban a medir los niveles de contaminación y crear instituciones y leyes ambientales en la década de los años sesentas.

Por ejemplo, en 1966 la Dirección de Higiene Industrial integra la primera red de monitoreo con cuatro estaciones localizadas en Tlalnepantla, el aeropuerto, el centro de la Ciudad de México y en Tacuba, con equipos para medir dióxido de azufre, partículas suspendidas y polvo sedimentable (partículas con grandes velocidades de asentamiento que se eliminan del aire por gravedad, fundamentalmente); y en agosto de 1967 inicia la operación de la Red Panamericana de Muestro Normalizado a nivel nacional, con el apoyo de la Organización Panamericana de la Salud.

Con esto se instalan en la Ciudad de México 14 estaciones para medir dióxido de azufre, partículas suspendidas con método de reflectometría (usando un reflectómetro, que mide la reflectancia, la reducción en el reflejo de la luz, que produce una muestra de aire atmosférico contaminado, comparándola con la que producirían muestras estándar), y polvo sedimentable por gravimetría (colectando el material sedimentable de un volumen conocido de aire, en tarros de caída de polvo, durante un tiempo específico y determinando el peso acumulado).

Esta red concluye su operación en diciembre de 1972. Estos métodos presentaron diversos problemas técnicos como interferencia de gases en la medición de dióxido de azufre, falta de curvas de calibración en la medición de partículas suspendidas y ausencia de correlación con estudios de salud en el caso de polvo sedimentable. En enero de 1972 la Secretaría de Salubridad y Asistencia modifica su estructura para crear la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente. Con la creación de este órgano se inicia la Gestión Ambiental en México **(1)**.

En los siguientes años se realizaron otros intentos, como en 1973 la denominada Red Computarizada Automática de Monitoreo Atmosférico en el Valle de México o **"Red Philips" (por la marca de los equipos)**, cuya operación en la medición de PST, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y ozono (O<sub>3</sub>), dio información que se consideró no confiable, dejando de funcionar en 1978 y siendo abandonada en 1980. Esta red de monitoreo nace de un programa conjunto de protección ambiental entre el gobierno mexicano y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Fue hasta el año de 1984 que se inicia la sistematización del registro de niveles de contaminación y en el Plan Nacional de Desarrollo se establece la necesidad de contar con sistemas de monitoreo de contaminación atmosférica, instalándose la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) con 25 estaciones, 19 en el Distrito Federal y 6 en el Estado de México. Los contaminantes que registra son: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono, partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), partículas suspendidas totales y plomo.

En este tiempo algunos de los esfuerzos por disminuir las emisiones de sustancias contaminantes dieron al final, resultados insatisfactorios. Por ejemplo, en ese mismo año del 84 se toma una medida de control para disminuir la contaminación atmosférica por plomo. Se programó la sustitución paulatina a mediano plazo de combustibles con tetraetilo de plomo, por otros sin este compuesto, y la introducción de vehículos con convertidor catalítico; además de centros de servicio.

Esta decisión redundaba en una virtual disminución de plomo en el aire, pero inmediatamente también se incrementan las emisiones de hidrocarburos reactivos ya que la gasolina con menos plomo tiene un mayor contenido de isómeros de estos compuestos orgánicos, además de que aumentan en mucho las emisiones de óxidos de nitrógeno, apareciendo en consecuencia niveles de ozono en una magnitud y frecuencia antes no conocidos.

Lo mismo sucede con la medida tomada para disminuir las emisiones de dióxido de azufre, al cambiar el combustible que usaban las termoeléctricas localizadas en el Valle de México por gas natural. Con esto se redujeron los niveles de SO<sub>2</sub>, pero a la par hay un sensible incremento de óxidos de nitrógeno, con su consecuente efecto negativo en la atmósfera favoreciendo la formación fotoquímica de ozono y de aerosoles de nitrato (2).

En el verano de 1988 se implanta la verificación vehicular, programa que resultó poco eficaz por la falta de conocimiento de los verificadores **y por la corrupción. El programa "Hoy no Circula" surge en noviembre de 1989** como medida para resolver las contingencias ambientales de invierno; en marzo de 1990 fue impuesto permanentemente, buscando disminuir las emisiones del 20 % de la flota vehicular. En sus inicios ayudó a disminuir las cantidades de gasolinas consumidas, pero bastaron unos meses para que se alcanzaran e incluso se superaran, y en mucho esas cantidades, como consecuencia del incremento notable en el número de vehículos por el alza en la compra de éstos por parte de la ciudadanía, muchos de ellos de modelos anteriores, dado que el transporte público no ofreció una alternativa de movilidad viable a la población.

Estas dificultades han resultado básicamente por la ausencia de un estudio técnico minucioso de las consecuencias colaterales de las medidas implantadas, por no considerar la experiencia ganada en otros países (como la problemática del ozono en la Ciudad de Los Ángeles en el Estado de California, Estados Unidos) en su lucha contra la contaminación atmosférica, y por ignorar las recomendaciones y

sugerencias de especialistas en contaminación del país, quienes alertaban en el momento sobre la contaminación fotoquímica en la Ciudad de México.

En realidad, se aplicaron acciones desordenadas de tipo **“prueba y error”**, en las que el conocimiento científico de las causas, formación, transporte y transformación de los contaminantes no fue aplicado con suficiente rigor y seriedad.

En octubre de 1990, en medio de un continuo y acelerado crecimiento de la población y del número de vehículos en la ZMVM, se acordó la instrumentación del Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en el Valle de México (PICCA). Los esfuerzos del PICCA se dirigieron a la reducción de las emisiones de plomo, dióxido de azufre, monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, así como de las partículas generadas por la destrucción de bosques, erosión de zonas deforestadas, tiraderos clandestinos y calles sin pavimentar. Para ello, las estrategias del PICCA se concentraron en: a) el mejoramiento de la calidad de los combustibles, b) la reducción de emisiones en vehículos automotores, c) la modernización tecnológica y el control de emisiones en industrias y servicios, y d) la restauración ecológica de las áreas boscosas que circundan al Valle de México. Con las medidas del PICCA se lograron mejoras sustanciales en la calidad del aire, principalmente respecto al plomo y al dióxido de azufre **(2)**.

Desde 1992 se logró que la concentración de estos contaminantes se mantuviera por debajo de la norma y que el monóxido de carbono sólo rebasara la norma de salud correspondiente de manera excepcional. En 1996, la entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, la Secretaría de Salud, el Gobierno del Estado de México y el entonces Departamento del Distrito Federal acordaron la instrumentación del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000, conocido como ProAire (1995-2000), con el propósito de ampliar, reforzar y dar continuidad a las medidas iniciadas a principios de la década. El objetivo del ProAire estuvo enfocado explícitamente a la reducción de las concentraciones pico y promedio de ozono, con la finalidad de disminuir el riesgo a la salud asociado con la exposición de corto y largo plazo a este contaminante.

Para tal fin y dado que el ozono es un contaminante que se forma en la atmósfera a partir de los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, las medidas implementadas fueron dirigidas principalmente a la reducción de las emisiones de estos contaminantes.

Como resultado de estos programas, a lo largo de la década de los noventa se registró un avance en la reducción y contención de los niveles de contaminación atmosférica en la ZMVM, a pesar del continuo crecimiento de la población, del número de vehículos y del ritmo de actividad de esta zona. De esta forma, las concentraciones de plomo en el aire se redujeron en más de un 99 % en comparación con los niveles que prevalecían en 1988; los niveles de dióxido de azufre fueron muy bajos comparados con la norma de salud correspondiente, los niveles de monóxido de carbono se redujeron significativamente y los niveles de ozono revirtieron su tendencia al alza en contraste con la tendencia que mantenían a principios de la década de los noventa.

Los resultados en el mejoramiento de la calidad del aire de 1990-2005 fueron positivos, ya que en términos generales la contaminación atmosférica disminuyó significativamente en todos los contaminantes, pero han persistido problemas con ozono (O<sub>3</sub>) y partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>).

En el año 2000 la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, a través de la Dirección General de Gestión Ambiental del Aire, inicia la integración del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), con la finalidad de unificar los esfuerzos destinados a la medición de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos. El SIMAT tiene la misión de vigilar y evaluar el estado de la calidad de aire, e informar oportunamente a los habitantes sobre los niveles de contaminación del aire para fortalecer la toma de decisiones en programas de prevención y mejoramiento. La información a la población se efectúa mediante la difusión del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).

El IMECA se difunde para los contaminantes criterio, y ofrece información sobre qué tan limpio o contaminado se encuentra el aire en la Ciudad de México y su Zona Metropolitana, si su calidad es buena o representa un riesgo para la salud.

El PROAIRE 2002-2010 reunió acciones de diferentes dependencias del Gobierno Federal, del Gobierno del Estado de México, del Gobierno del Distrito Federal, del Sector Empresarial y Académico, Organismos de Cooperación Técnica y ONG´s, para lograr la reducción de las emisiones contaminantes, buscando el cumplimiento de las normas de calidad del aire, para la protección de la salud. Dio continuidad al antes publicado y tuvo como objetivo principal alcanzar menores niveles de contaminación reduciendo las emisiones antropogénicas y como consecuencia la concentración de contaminantes.

Entre las metas específicas se planteó, en el caso del ozono, aumentar el número de días que las concentraciones estén dentro del límite establecido por la norma, eliminar las concentraciones superiores a 200 IMECA y reducir el número de días en que las concentraciones se encuentren en el intervalo de 101 a 200 IMECA. Para las PM<sub>10</sub>, se buscó aumentar el número de días que las concentraciones diarias se encuentren dentro del límite establecido por la norma y reducir el promedio anual de las concentraciones de PM<sub>10</sub>.

Se planteó también eliminar las concentraciones de CO que excedan nueve partes por millón (promedio de ocho horas), así como reducir su concentración actual. En el caso del SO<sub>2</sub>, las metas fueron reducir las concentraciones promedios diario y anual, así como evitar la ocurrencia de picos extraordinarios asociados con el uso indebido de combustibles de alto contenido de azufre. Para alcanzar estas metas de calidad del aire el programa planea la reducción de emisiones.

Esta reducción se enfoca a partículas suspendidas, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y dióxido de azufre. El programa consta de 89 medidas que involucran al transporte, industria, servicios, protección de la salud, conservación de recursos naturales, educación ambiental y fortalecimiento institucional.



Actualmente el Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (PROAIRE 2011-2020), plantea nuevas políticas en materia de gestión de calidad del aire aplicables en la Zona Metropolitana del Valle de México para este periodo.

## **Capítulo 2**

# **DINÁMICA ATMOSFÉRICA**

En la atmósfera existen procesos que disminuyen o dispersan a las sustancias contaminantes como es el caso del viento y las precipitaciones, pero hay características que favorecen la acumulación de humos y polvos como la humedad atmosférica. Igualmente, el vapor de agua puede reaccionar con algunos contaminantes primarios como los óxidos de azufre para producir otros más agresivos como el ácido sulfúrico. La radiación electromagnética proveniente del sol también puede producir contaminantes peligrosos en presencia de ciertas sustancias en el aire al activar reacciones fotoquímicas. Es muy importante resaltar que varios de estos fenómenos y características atmosféricas son resultado no sólo de procesos fisicoquímicos naturales, sino que algunos dependen de las actividades humanas, del terreno sobre el cual están asentadas las ciudades y de la configuración de las construcciones en ellas. La dinámica atmosférica puede definirse como la suma de estos procesos, y los resultados que de ésta derivan, en cuanto a propiedades físicas y sustancias químicas en la atmósfera y el medio ambiente.

## **2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ATMÓSFERA**

La atmósfera es la capa de gas que rodea a un cuerpo celeste. No resulta sencillo señalar en forma precisa su espesor en la Tierra, porque no posee una superficie superior claramente definida, pero se acepta en forma convencional que su altitud máxima es de más de 800 km. Por encima de esa distancia respecto a la superficie terrestre, los enrarecidos gases se diluyen imperceptiblemente con el casi vacío del espacio exterior.

Ha necesitado de muchos millones de años para alcanzar su actual composición y estructura, que la hacen apta para permitir y propiciar el desarrollo de los seres vivos que la habitan. En ella se producen todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan al planeta y regula la entrada y salida de energía. Por compresión, el mayor porcentaje de la masa de la atmósfera se encuentra concentrado en los primeros kilómetros. Así, el 66 % de ella se localiza bajo los primeros 10 km y sobre los 60 km se halla sólo una milésima parte.

Se llama aire a la mezcla de componentes que constituyen la atmósfera. Es tan antigua como nuestro planeta (aproximadamente 4 500 millones de años según determinaciones radiométricas), y al igual que éste ha ido cambiando a través del tiempo. Las emisiones a la atmósfera generadas en la naturaleza forman parte de los ciclos del planeta y juegan un papel importante en la regulación de la temperatura a escala global, en el balance químico de la atmósfera y determinan en gran medida la evolución de los ecosistemas. Actualmente está compuesta fundamentalmente por tres gases que son el nitrógeno, el oxígeno y el argón; los cuales constituyen el 99.95 % del volumen atmosférico. De ellos, el argón es geoquímicamente inerte, el nitrógeno forma diversos compuestos y el oxígeno es altamente reactivo, formando fácilmente los óxidos de muchas otras sustancias.

Los componentes restantes del aire están presentes en cantidades muy pequeñas o trazas y se expresan en unidades de partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb). Se ha estimado la masa total de la atmósfera en  $5.3 \times 10^{18}$  kg.

El siguiente cuadro comparativo nos da idea de la abundancia relativa de los principales componentes de la atmósfera, considerándolos también de acuerdo con su espesor relativo, es decir, el espesor que tendría cada sustancia si se concentrara en una sola capa:

COMPONENTE	MASA MOLAR	CONCENTRACIÓN		ESPESOR RELATIVO
		MOLECULAR	EN MASA	
Nitrógeno	28.02	78.08 %	75.51 %	6.35 km
Oxígeno	32.00	20.95 %	23.14 %	1.68 km
Argón	39.94	0.93 %	1.28 %	74 m
Neón	20.18	18 ppm	13 ppm	15 cm
Helio	4.00	5 ppm	0.7 ppm	4 cm
Kriptón	83.70	1 ppm	2.9 ppm	8 mm
Hidrógeno	2.02	0.5 ppm	0.03 ppm	4 mm
Dióxido de Carbono	44.01	350 ppm	533 ppm	2.8 m
Ozono	48.00	0-12 ppm	0-20 ppm	0-2 mm
Vapor de agua	18.02	0-4 %	0-2.5 %	0-300 m

**Tabla 1. COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA TERRESTRE**

Recientemente la atmósfera ha sufrido cambios extremos debido al aumento de las velocidades de emisión de contaminantes, a la ocurrencia de procesos a altas temperaturas como fundiciones ferrosas, a la combustión de carbón fósil, a la operación de termoeléctricas, cambio de usos del suelo, entre otros que modifican los flujos de las masas de aire (3).

## 2.2 PRESIÓN Y TEMPERATURA

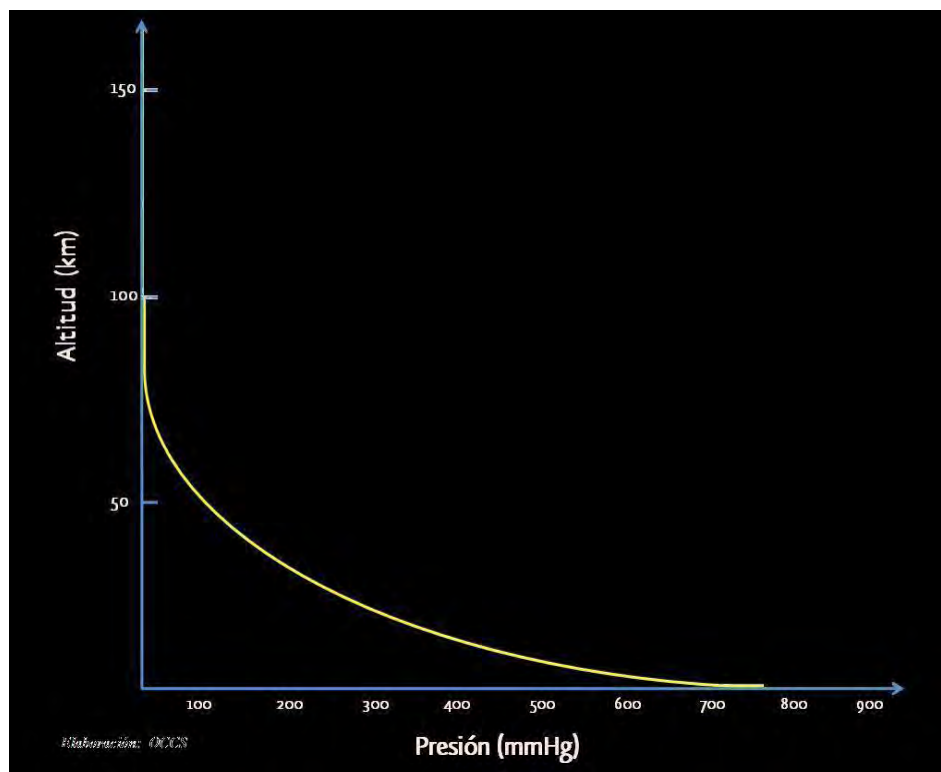
Bajo los primeros 80 km la composición química, la presión, la temperatura y la densidad de la atmósfera, permiten estructurarla en capas horizontales de características definidas, llamadas en orden de altitud: **troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera.**

La troposfera se extiende de la superficie terrestre a la tropopausa, que es el límite de esta capa y la frontera a la siguiente, a una altura aproximada de 18 km en los trópicos y 12 km en las latitudes medias. Esta capa contiene del 85 al 90 % de la masa de la atmósfera, y es a menudo dinámicamente inestable con rápidos intercambios verticales de energía y masa asociados con una actividad convectiva.

La estratosfera está ubicada desde la tropopausa hasta la estratopausa, que es su límite, a una altura de 50 km. A su vez, la mesosfera se extiende desde los 50 km hasta la mesopausa a 85 km en altitud, siendo esta capa muy importante en ciertos procesos fotoquímicos. La termosfera es la capa más externa, se encuentra por encima de la mesopausa y se extiende desde los 85 km hasta el espacio exterior.

La presión atmosférica disminuye de manera bastante regular a medida que aumenta la altitud, sin embargo, disminuye mucho más rápidamente a elevaciones inferiores que a superiores, como muestra la figura 1.

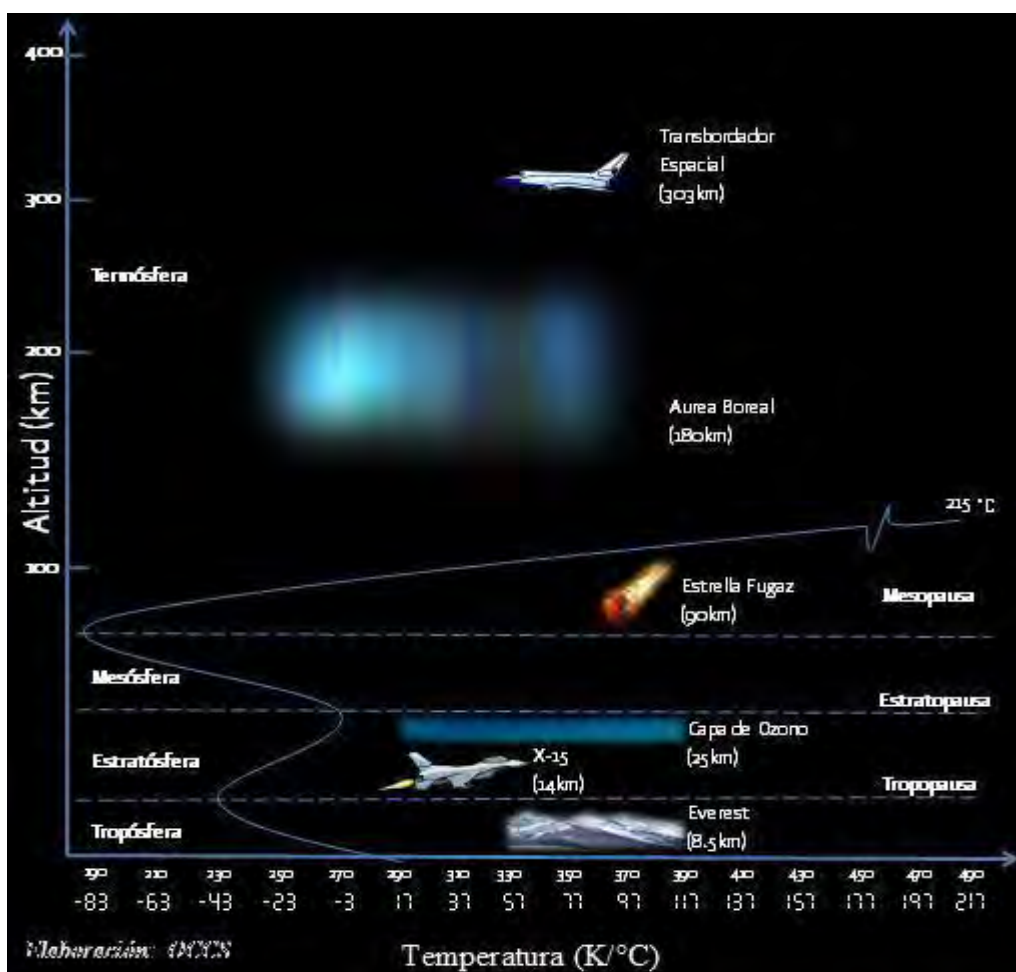
La explicación de esta característica es la compresibilidad del aire. Por esto, la presión disminuye desde un valor promedio de 760 mm Hg al nivel del mar, hasta  $2.3 \times 10^{-3}$  mm Hg a 100 km, y a sólo  $1.0 \times 10^{-6}$  mm Hg a 200 km.



**FIGURA 1. VARIACIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA CON LA ALTITUD**

Distinto a la presión, la temperatura de la atmósfera se modifica en forma muy compleja en función de la altura como ilustra la figura 2. Por encima de la superficie terrestre la temperatura disminuye en la troposfera, alcanzando un mínimo de  $-60^{\circ}\text{C}$ , aproximadamente a los 12 km, estableciendo la tropopausa.

Por encima de esta altitud la temperatura aumenta en la estratosfera, capa constituida de nitrógeno, oxígeno y ozono, hasta los 2 °C (275 K) en la región de los 50 km o estratopausa, aumento causado por las reacciones exotérmicas provocadas por la radiación UV del sol; y de allí comienza nuevamente a disminuir. Arriba de la estratopausa la temperatura disminuye a valores inferiores a los que se observan en la tropopausa, llegando a otro mínimo, ahora de unos -90 °C en la mesopausa. A partir de aquí, la temperatura se eleva rápidamente en la termosfera (4).



**FIGURA 2. ESTRUCTURA ATMOSFÉRICA, TEMPERATURA Y ALTITUD**

El aumento de temperatura en esta región también llamada ionosfera se debe al bombardeo del nitrógeno y oxígeno moleculares y de otras especies atómicas por partículas energéticas como electrones y protones que provienen del Sol.

Los límites entre las distintas capas o pausas, son regiones donde la pendiente de la curva de temperatura presenta un punto de inflexión y tienen importancia porque la mezcla del aire a través de ellas es relativamente lenta. Así, los contaminantes que se generan en la troposfera, por ejemplo, encuentran lentamente un sitio en la estratosfera (5).

## **2.3 METEOROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN**

La contaminación atmosférica es la presencia en el aire de sustancias o formas de energía capaces de provocar riesgo, daño o molestia grave en las personas, en los animales y en las plantas; y que afectan al clima y a los bienes de cualquier naturaleza.

La troposfera es la región de la atmósfera donde se desarrolla el ser humano. Aquí se dan el sonido del viento, la lluvia, el sol y todo lo que normalmente consideramos como clima; es la capa que contiene alrededor del 90 % de la masa total del aire, como hemos visto, y casi todo el vapor de agua de la atmósfera. Es la zona donde el ser humano se desarrolla y donde tiene lugar la emisión de contaminantes. Las concentraciones de estos contaminantes, su dispersión y transformación siguen un ciclo que guarda relación con las tasas de emisión y con la dinámica atmosférica provocada por la evolución de las temperaturas y tienen también influencia algunas variables meteorológicas como la velocidad del viento, la estabilidad atmosférica, el grado de insolación, la humedad atmosférica y las precipitaciones.



La cantidad de agua en forma de vapor, que contiene el aire es lo que conocemos como humedad atmosférica. El aire puede transportar humedad en sentido horizontal y vertical, y de acuerdo con las temperaturas habituales del planeta, el agua puede presentarse en los tres estados de agregación. La humedad del aire oscila entre un 0 % a un 4 % del volumen.

Puede expresarse con diferentes índices, por ejemplo: la humedad absoluta es el peso en gramos del vapor de agua contenido en 1 m<sup>3</sup> de aire; la humedad específica expresa los gramos de vapor de agua contenidos en un kilogramo del aire húmedo respectivo. La humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire en un momento dado y la que contendría si estuviese saturado a esa misma temperatura.

La humedad relativa es la medida de humedad del aire más empleada; nos indica la cantidad de agua que la atmósfera puede admitir y matemáticamente es el cociente de la presión de vapor del agua y la presión de saturación del vapor de agua para la misma temperatura y presión atmosféricas expresado en porcentaje. Una humedad relativa del 100 % significa que la atmósfera no acepta más agua, es cuando el cuerpo no puede transpirar y el calor puede ser asfixiante. En la Ciudad de México la humedad relativa llega a ser hasta del 95 %, por ejemplo, en algunos días de los meses de julio a septiembre.

La presión parcial del vapor de agua es la parte de la presión atmosférica total ejercida por el vapor de agua contenido en el aire. Cuando el aire está saturado de vapor de agua, la presión parcial de vapor recibe el nombre de presión de saturación, la cual depende de la temperatura porque cuanto más caliente está una masa de aire, mayor es la cantidad de vapor de agua que contiene. La temperatura a la que una masa de aire está saturada se le conoce como punto de rocío, cuando el aire ya no puede contener más vapor de agua y ésta se condensa.

Por otra parte, el aire en la parte de la troposfera cercana a la superficie no es homogéneo, presenta grandes diferencias en la temperatura, humedad y estabilidad, debido a la distribución irregular de la radiación solar, que varía de un modo notable en un plano horizontal a un nivel altitudinal común. Esto tiene como causa el calentamiento desigual de las distintas partes de la superficie terrestre. Estas variaciones suponen movimientos compensatorios que desplazan el aire desde las zonas de mayor presión (anticiclones) a las de menor presión (borrascas). Igualmente sucede en sentido vertical, debiéndose la mayoría de las veces a las variaciones de temperatura relacionadas con la altura y a diferencias en las presiones. Estos desplazamientos horizontales y verticales del aire es lo que denominamos viento.

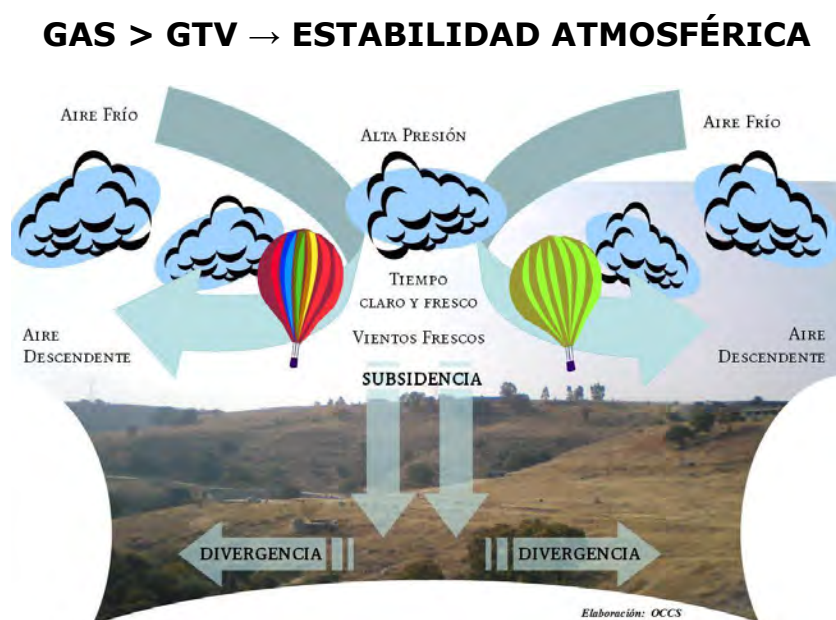
Cuando el aire asciende en la atmósfera se desplaza de una zona de mayor presión a otra de menor presión. Debido a esto se expande y se va enfriando porque su presión también disminuye, hay un menor efecto de la gravedad y su densidad se aminora.

Cualquier proceso en el que el sistema no recibe ni desprende energía en forma de calor, es un proceso adiabático. El proceso de enfriamiento o calentamiento por los movimientos ascendentes y descendentes del aire es adiabático siempre que no se efectúe en las proximidades de la superficie de la Tierra, donde los procesos no adiabáticos son frecuentes porque el aire sí intercambia energía en forma de calor con la superficie y los cuerpos que están en ella.

Las variaciones de temperatura que experimenta una masa de aire en movimiento vertical que no intercambia energía en forma de calor, se llama gradiente adiabático. Cuando el aire no está saturado se dice que el gradiente adiabático es seco (GAS). El contacto entre las moléculas del aire por la turbulencia, limita relativamente la disminución de la temperatura en el movimiento ascendente, resultando lo que conocemos como gradiente térmico vertical de la atmósfera (GTV).

A medida que aumenta la humedad relativa del aire se tiende a alcanzar el punto de rocío; cuando esto pasa la humedad se condensa y se libera la energía que llamamos calor latente de vaporización, lo que disminuye más el ritmo de descenso de la temperatura. Esto es el gradiente adiabático húmedo o saturado de la atmósfera (GAH).

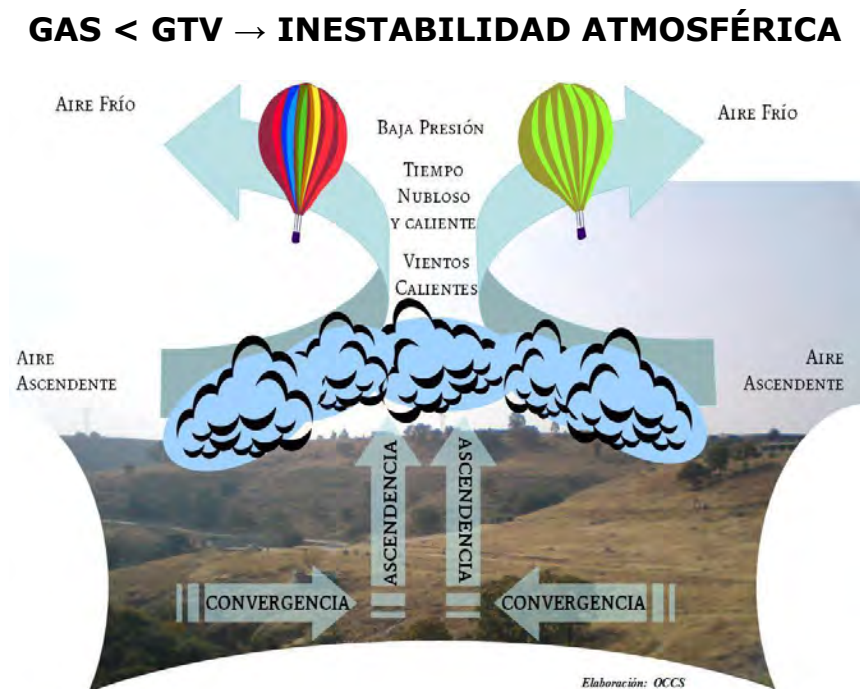
En la atmósfera hay estabilidad cuando el gradiente adiabático seco es mayor que el gradiente vertical de temperatura. Si una masa sube hacia una zona de menor presión, y su temperatura disminuye rápidamente respecto a la del aire circundante, de forma natural tenderá a descender por que se encontrará nuevamente en un sistema de alta presión y porque su densidad aumenta (subsistencia), produciendo, a su vez, un aumento de presión en la superficie terrestre y la divergencia del aire, es decir, la expansión desde el centro hacia el exterior, ocasionando zonas de alta presión denominadas anticiclones. Figura 3.



**FIGURA 3. ANTICICLÓN**

En cambio, la inestabilidad atmosférica se da cuando el gradiente adiabático seco es menor que el gradiente térmico vertical de la atmósfera.

Esto quiere decir que la temperatura de la masa de aire ascendente disminuye más lentamente que la temperatura del aire circundante inmóvil. Cuando ocurre esto, el aire asciende con facilidad y se originan núcleos de bajas presiones en la superficie de la masa de aire, provocando la convergencia del aire circundante hacia ésta y formándose las depresiones, borrascas o ciclones. Figura 4.



**FIGURA 4. CICLÓN**

## 2.4 CAPA DE MEZCLA

La capa de mezcla o capa límite atmosférica (CLA) representa el estrato de aire sujeto a la influencia de la superficie terrestre. Figura 5. Es el dominio de la atmósfera adyacente a la superficie del planeta, dándose aquí el transporte turbulento de masa y energía, por lo que las sustancias emitidas en la superficie planetaria se dispersarán de manera gradual, horizontal y verticalmente, mezclándose e interactuando fisicoquímicamente si permanecen el tiempo suficiente.

La capacidad de dispersión o de dilución de los contaminantes que discurren en esta zona, precedentes de los focos emisores, es una función de la turbulencia atmosférica que se caracteriza con base en un parámetro que **se denomina "clase de estabilidad", que depende de la turbulencia térmica y de la turbulencia mecánica**. Las categorías de estabilidad en cualquier momento van a depender de tres factores:

- a) Estabilidad estática (relacionada con la variación de la temperatura en función de la altura)
- b) Turbulencia térmica (causada por el calentamiento del aire a nivel del suelo)
- c) Turbulencia mecánica (una función de la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie).

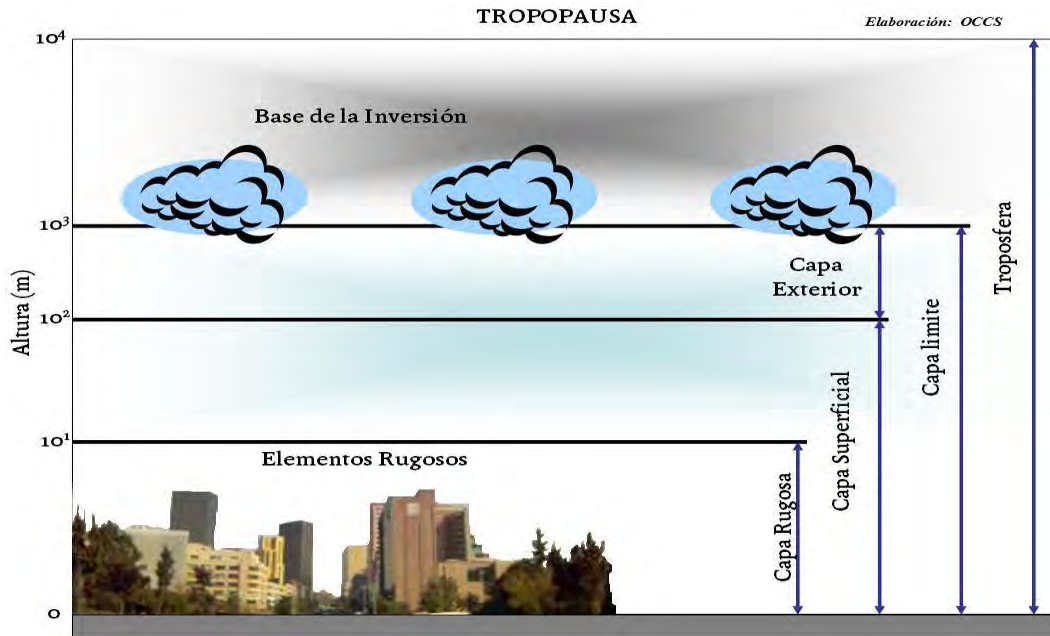
Como se señaló anteriormente, la estabilidad de la atmósfera depende de la diferencia de temperatura entre una porción de aire y el aire que la rodea. Por consiguiente, se pueden producir diferentes niveles de estabilidad según cuán grande o pequeña sea dicha diferencia.

La altura de esta capa, llamada altura de la capa de mezclado ( $Z$ ) es un parámetro fundamental que caracteriza la estructura de la troposfera y es básico en la modelación de la dispersión de los contaminantes atmosféricos, puesto que mientras más profunda sea la capa, mayor será el volumen de aire para la dispersión de los contaminantes.

Se define la altura de la capa de mezclado como el espesor de la capa de la atmósfera dentro de la cual es relativamente irrestricta la mezcla vertical de las sustancias en el aire y su espesor varía típicamente entre los 30 y los 3000 m, dependiendo de un gran número de factores **(6)**. Su determinación cuantitativa está acompañada de una gran dificultad, no existiendo una expresión matemática que sea aceptada universalmente por la comunidad científica.

La altura de la capa convectiva, como también suele llamársele, presenta una escala temporal característica. Su espesor está relacionado con los procesos de calentamiento intenso durante el día y el enfriamiento nocturno, de forma que su crecimiento, desarrollo y decrecimiento están condicionados por la aportación energética del sol, lo que se manifiesta en una clara componente diurna. Esta dependencia temporal se traduce en un comportamiento dinámico y variable del espesor del aire, condicionado por el proceso de convección. De esta forma, la capa límite presenta un carácter nocturno y diurno claramente diferenciado. Mientras que durante la noche normalmente la capa límite viene definida principalmente por la inversión radiativa superficial, durante el día la actividad turbulenta provoca el desarrollo de la capa de mezcla. Este fenómeno contempla las siguientes etapas:

- 1) Destrucción de la inversión radiativa nocturna a primeras horas de la mañana y comienzo de una débil capa de mezcla mientras se destruye paulatinamente el estrato estable nocturno.
- 2) Formación de una capa de mezcla de gran espesor en horas centrales del día, delimitada frecuentemente por la presencia de una inversión térmica en la altura.
- 3) Pérdida o disminución de la inestabilidad como consecuencia del desequilibrio térmico que tiene lugar al atardecer.
- 4) Formación final de una nueva inversión térmica radiativa que irá intensificándose a lo largo de la noche.



**FIGURA 5. LA CAPA DE MEZCLA**

Por todo ello el análisis del comportamiento temporal de la altura de la capa de mezcla debe contemplar el ciclo diario de estabilidad nocturna e inestabilidad diurna y los regímenes de tiempo a gran escala en los que se desarrolla este estrato del aire.

Otro de los aspectos interesantes de la capa límite es la relación que existe entre el espesor de este estrato y el nivel de contaminación que se encuentra retenido en esta capa. De esta forma las emisiones que tienen lugar en las capas bajas quedan retenidas en un volumen de aire cuya dimensión vertical está delimitada por la altura de la capa de mezcla. Es por ello que existe una estrecha relación entre los índices de contaminación atmosférica y el espesor de este estrato del aire. Esto produce, por ejemplo, una disminución de la visibilidad en las capas bajas de la atmósfera en ciertos días y horas, lo que es cada vez más evidente en las áreas de influencia de los grandes núcleos urbanos e industriales (7).

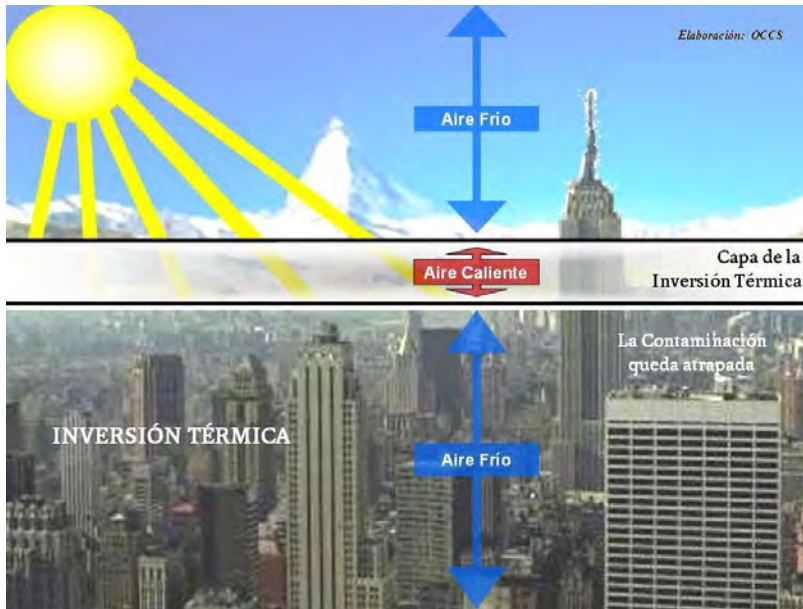
## **2.5 INVERSIONES TÉRMICAS**

Otro fenómeno que se traduce en una condición que fomenta los episodios de contaminación aguda son las inversiones térmicas. Comúnmente la temperatura disminuye con la altitud. El aire más próximo a la superficie terrestre es calentado por ésta, haciéndose menos denso que el aire más frío que hay sobre él, produciendo con ello una circulación vertical del aire que favorece la dispersión de los contaminantes.

Las condiciones meteorológicas pueden causar una inversión del esquema normal de temperaturas. En las noches despejadas el suelo se enfría rápidamente y por consiguiente pierde energía en forma de calor por radiación, a su vez se enfría el aire que entra en contacto con el suelo, haciéndolo más frío que el que está en las capas superiores cercanas. Esto provoca que la capa de aire caliente quede atrapada entre las dos capas de aire frío, impidiendo la circulación vertical del aire y por lo tanto su mezclado, ya que la presencia de la capa de aire frío cerca del suelo le da gran estabilidad, provocando que se mantengan estas condiciones durante la mañana fresca.

Cuando existen condiciones de inversión térmica los contaminantes que se emiten al aire se acumulan aumentando su concentración, debido a que los fenómenos de transporte y difusión de los contaminantes se detienen u ocurren demasiado lentos, y éstos permanecen retenidos; en estos momentos la circulación atmosférica queda paralizada, con lo que no se renueva el aire de las capas bajas provocando condiciones de contaminación peligrosas para la salud de los seres vivos. Las situaciones de inversión más persistentes se producen con cielos despejados y por tanto, con abundante luz solar en el día. Esta luz solar favorece las reacciones entre los contaminantes atrapados produciendo el smog fotoquímico. Las inversiones térmicas son frecuentes en las estaciones de otoño e invierno, y pueden permanecer durante días hasta que las condiciones atmosféricas cambien y la capa de inversión se destruya.





**FIGURA 6. INVERSIÓN DE TEMPERATURA**

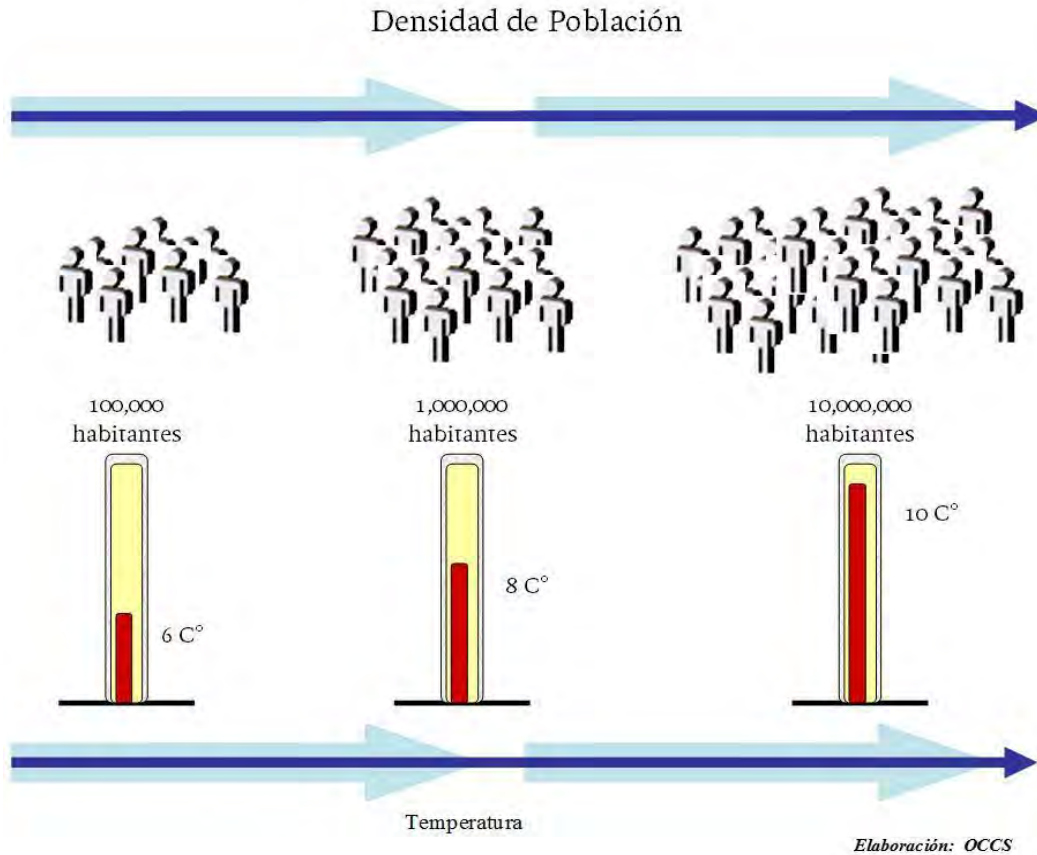
En la Ciudad de México las inversiones de temperatura son comunes, toda vez que las características geográficas provocan que en las noches, el aire frío de las laderas desplace al aire más cálido de la cuenca, acrecentando los factores que pueden formar la capa de inversión.

## 2.6 ISLA DE CALOR

Un aspecto también interesante que tiene relación con la contaminación atmosférica es el de la micrometeorología urbana. Las grandes ciudades crean en su interior y hacia sus alrededores un microclima propio, el **“efecto de la isla urbana de calor”** produciendo un **copete térmico** que afecta en la capacidad de difusión de los contaminantes.

Consiste en la dificultad de enfriamiento durante la noche, cuando las áreas no urbanas disminuyen su temperatura notablemente. Esto provoca vientos locales compensatorios desde el exterior hacia el interior de la ciudad. Esto tiene consecuencias en el establecimiento de la altura de la capa de mezcla, y en la formación de inversiones térmicas más persistentes. El fenómeno de la isla de calor aumenta con el tamaño de la ciudad y es directamente proporcional al tamaño de la mancha urbana.

Con este efecto la temperatura aumenta en 0.5 a 0.8 °C como media y en invierno incluso se registran aumentos de 1.1 a 1.6 °C en las grandes metrópolis respecto a las zonas no urbanas colindantes. El número de habitantes es factor contundente en el aumento del efecto de la isla urbana de calor. Para las ciudades con más de 1 000 000 de habitantes la temperatura del aire puede aumentar en 1.5 °C con respecto a sus alrededores en forma general, no obstante, en la práctica las diferencias máximas observadas son en ocasiones mucho mayores **(8)**, como se muestra en la siguiente figura:



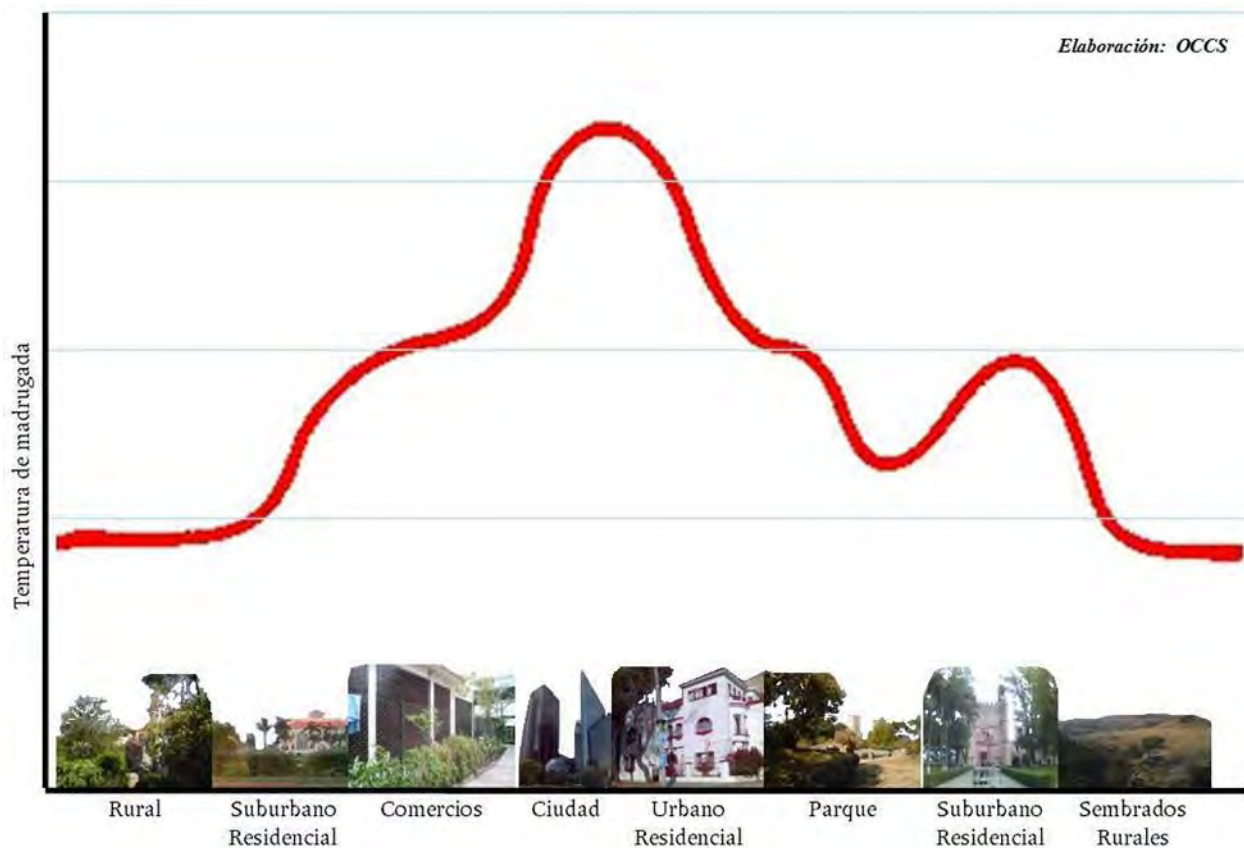
**FIGURA 7. DIFERENCIAS DE TEMPERATURA EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD POBLACIONAL**

Actualmente la isla de calor de la Ciudad de México marca diferencias de hasta 12 grados centígrados respecto a las áreas suburbanas y rurales de la periferia (9). En general esto sucede porque las zonas construidas ofrecen mayor superficie que absorbe energía en forma de calor, irradiándolo lentamente en las horas nocturnas. Los edificios altos tienen un efecto que provoca numerosas reflexiones horizontales de la radiación que reciben, haciendo que ésta tenga más probabilidad de permanecer a nivel del suelo. Aunado a esto existe la falta de zonas verdes y la desecación y entubamiento de ríos, arroyos y otros afluentes acuáticos en la ciudad, con lo que se reduce la transformación de la energía solar a través de la fotosíntesis y la evaporación del agua.

Se ha observado que en las ciudades con edificios pequeños extendidos a lo largo de zonas con suficiente vegetación no se forma el típico efecto de la isla urbana de calor.

Aunada está la presencia en las ciudades de las calles y avenidas construidas con asfalto de color negro y otros cuerpos oscuros, que absorben mucha más energía en forma de calor que los materiales claros.

Así pues, la radiación solar es absorbida por los objetos que integran la ciudad, emitiéndola posteriormente mediante ondas más largas, energía que resulta retenida además por partículas en suspensión y gases invernadero. Esta cápsula adjunta a la ciudad sólo puede ser destruida cuando los vientos son superiores a 20 km/h, pero la presencia de numerosos edificios altos tiende a mantenerla.



**FIGURA 8. ISLA DE CALÓR, SEGÚN EL TIPO DE REGIÓN**

Por supuesto el fenómeno de la isla urbana de calor está íntimamente relacionado con las emisiones antropogénicas de calor y de sustancias contaminantes.

La actividad industrial junto con la doméstica como el aire acondicionado y el transporte generan un aporte importante de calor al medio. La cápsula térmica puede alcanzar los 200 o 300 metros sobre el suelo, lo cual equivale a un promedio de 3 a 5 veces la altura de los edificios.

El fenómeno de la isla urbana de calor es una condición cotidiana en la Ciudad de México y su zona metropolitana, agravándose lógicamente por su situación de valle rodeado de altas montañas que obstruyen la circulación horizontal del aire, haciendo a la isla más constante.

## Capítulo 3

# LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

Se considera zona metropolitana al conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 100 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan los límites del municipio, incorporando dentro de su área de influencia directa, al o a los municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica. También se incluyen aquellos municipios que por sus características particulares son relevantes para la planeación y política urbana de las zonas metropolitanas en cuestión.

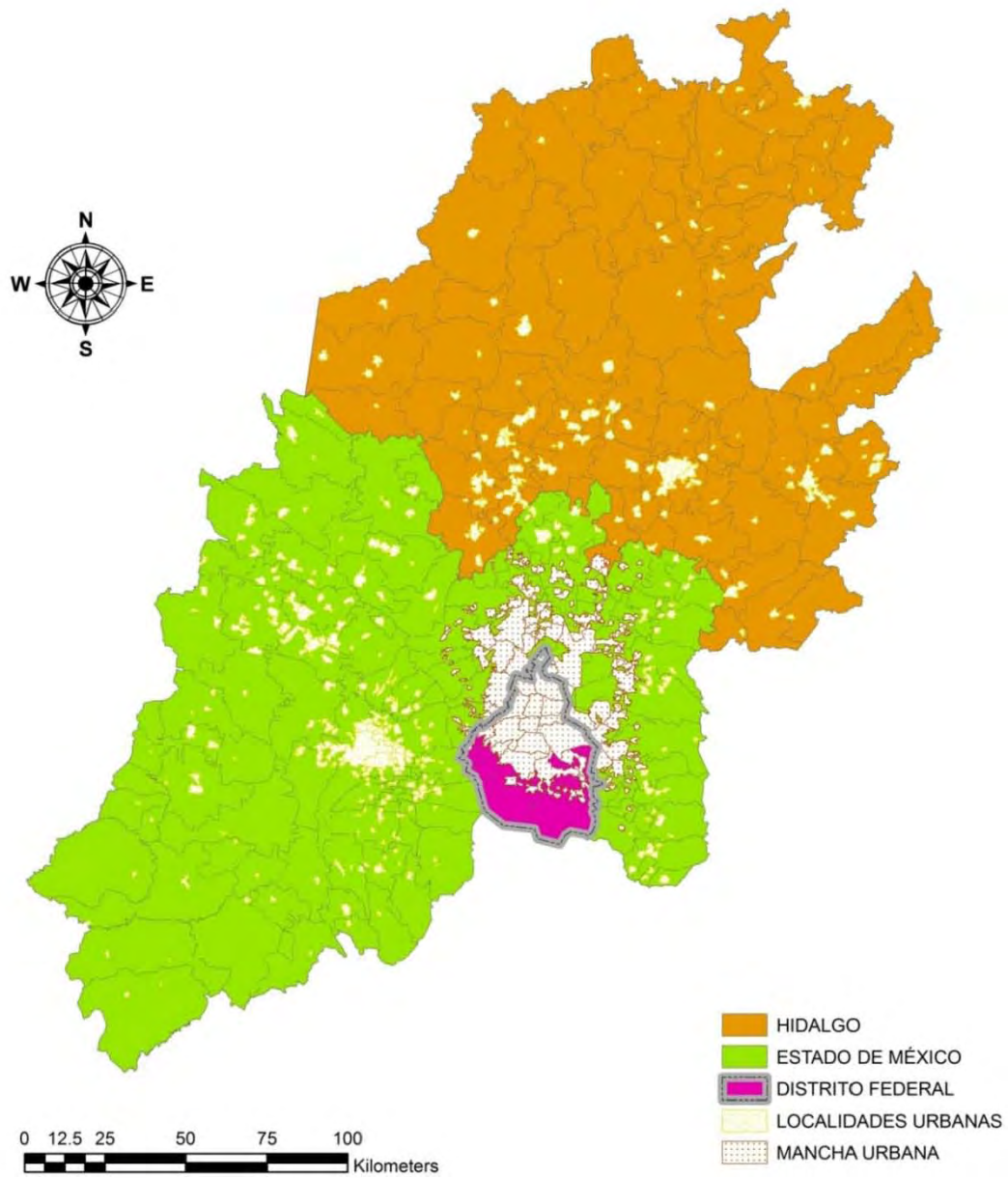
Se contempla también en la definición de zonas metropolitanas, a los municipios con una ciudad de más de 500 mil habitantes; a los que cuentan con ciudades de 200 mil o más habitantes ubicados en la franja fronteriza norte, sur y en la zona costera; y aquellos donde se asienten capitales estatales, estos últimos cuando no están incluidos en una zona metropolitana **(10)**.

### **3.1 SITUACIÓN Y DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA**

Los gobiernos de la Ciudad de México y del Estado de México establecieron una definición oficial de la Zona Metropolitana del Valle de México en el año 2005. Según esta definición la ZMCM está formada por las 16 delegaciones de la Ciudad de México, más sesenta municipios del Estado de México, además de Tizayuca, que es municipio del Estado de Hidalgo **(10)**. Su geografía consta de una cuenca originalmente lacustre con 2 240 metros de altitud, que está rodeada por cadenas montañosas de origen volcánico.

El Valle de México se ubica en medio de Eje Neovolcánico Transversal Mexicano. En dirección oriente está limitado por la Sierra Nevada en la que sobresalen picos con alturas mayores a los 5 200 metros. Por el oeste el Monte de las Cruces separa el Valle de México del Valle de Toluca, con cerros de más de 3 000 metros de altura. El valle se cierra al sur con formaciones montañosas que alcanzan los 4 000 metros como el Cerro del Ajusco. Entre la sierra del sur y la del oriente se halla el Sifón de Yautepec, por donde pueden pasar los vientos provenientes del norte hacia el Valle de Cuautla. En el interior del valle están las Sierras de Guadalupe en el norte y la de Santa Catarina en el oriente, rodeadas ambas hoy por la mancha urbana **(11)**.

# ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO



Guevara Castillo Dalia Elena

**FIGURA 9. MANCHA URBANA DE LA ZMVM**



## **3.2 CLIMATOLOGÍA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO**

El Valle de México presenta un clima templado por su altura sobre el nivel del mar con temperaturas entre los 10 y los 23 °C. Se hallan también en partes de su área ecológica de influencia, los climas frío-húmedo e incluso tundra alpina. Durante todo el año dominan los vientos del noreste, con velocidades medias de unos 2 km/h, contribuyendo a la limpieza del aire. Durante la noche los vientos fríos descienden de las montañas hacia el valle. En los meses de enero y febrero, cuando las lluvias están ausentes, los vientos del noreste se fortalecen y se combinan con los del norte y algunos del sur, depurando a la atmósfera de la Ciudad de México.

Las lluvias inician normalmente en el mes de mayo y alcanzan octubre, siendo más intensas de junio a septiembre, registrándose precipitaciones anuales superiores a los 700 mm en el sur. Al oriente, donde se ubicaba el Lago de Texcoco, el mayor de los lagos del sistema que alimentaba la cuenca, se halla un clima estepario donde la precipitación no supera los 532 mm anuales y en verano se alcanzan los 35 °C (9). En general, cuando la pluviosidad alcanza niveles altos y llueve casi a diario la atmósfera también se limpia en forma importante.

El proceso de urbanización y la consecuente extensión de la mancha urbana han cambiado mucho el microclima del Valle de México, que fue sumamente estable antes y en los primeros años de su poblamiento, ya que el efecto de las montañas y la evaporación de los lagos daba como resultado una humedad ambiental constante y relativamente alta, haciendo del lugar un sistema muy fértil y agradable para vivir.

Sin embargo, actualmente las severas alteraciones hidrológicas y ecológicas del área metropolitana de la Ciudad de México han traído cambios en las condiciones climáticas a nivel regional y microregional.

El 99 % de los antiguos lagos han desaparecido. La desecación de esos sistemas acuíferos, en especial el Lago de Texcoco, trajo como consecuencia la formación de las tolvaneras; el primer problema de contaminación atmosférica de la ciudad **(11)**.

Prácticamente tres cuartas partes de sus bosques de coníferas y encinos han desaparecido, mientras que dos tercios de sus tierras no urbanizadas presentan un avanzado proceso de erosión **(9)**. Hoy el problema de la calidad del aire ha alcanzado grandes dimensiones; el crecimiento acelerado de la población y su demanda de servicios ha incrementado enormemente las necesidades de energía y de transporte en la gran metrópoli.

Vivir en una atmósfera que recibe grandes cantidades de gases tóxicos es una realidad que enfrentamos los habitantes de la capital del país, siendo un fenómeno relativamente reciente, pues la etapa más destacada en la evolución del deterioro ambiental de la ciudad se circunscribe a los últimos 50 años y es consecuencia de las emisiones de contaminantes como los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), monóxido de carbono hidrocarburos, otros compuestos orgánicos y plomo; junto a otros menos frecuentes pero no menos peligrosos como derivados de halógenos, de arsénico, partículas de metales pesados como mercurio, cobre, cinc o de sustancias minerales como el asbesto.

### **3.3 FUENTES DE CONTAMINACIÓN Y CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS**

De los contaminantes más peligrosos que recibe la atmósfera de la Ciudad de México se calcula que el 15 % son polvos provenientes de las áreas secas y carentes de cubierta vegetal y el 85 % son desechos de la combustión de combustibles que se consumen diariamente en esta área, 55 % de éstos en los transportes, 25 % en la industria, 11 % en los hogares, y 9 % en la producción de energía eléctrica **(12)**.

Desde hace años la descentralización de la zona ha causado que la densidad de población disminuya como consecuencia de su movimiento hacia los municipios conurbados en el Estado de México e Hidalgo; contrario a lo que se podría esperar, la emisión de contaminantes a la atmósfera ha aumentado. Esto es debido a que en la Ciudad de México se siguen concentrando las actividades económicas y los empleos, teniendo que viajar más ahora las personas que cambiaron sus hogares, para llegar a sus sitios de trabajo.

Se estima que actualmente alrededor del 55 % de las personas que trabajan en la Ciudad de México, no vive en ella. El problema que ahora se vislumbra es que con la expansión de la Ciudad de México y la de las otras zonas urbanas cercanas como Puebla, Tlaxcala, Pachuca, Toluca y Cuernavaca se formará una unidad urbana que ya se menciona como la megalópolis **(13)**.

Por otra parte, se identifican hoy más de 30 000 industrias ubicadas en su mayoría al norte y al oriente de la zona metropolitana; unas en la Ciudad de México (el 70 %) y las otras en los municipios conurbados. Son de diversos tipos y entre ellas hallamos industrias papeleras, textiles, metal-mecánicas, automotrices, alimentarias, cementeras, de pinturas, cerámicas, etcétera.

Aparte se cuenta con un número superior a 12 000 establecimientos comerciales y de servicios con procesos contaminantes como restaurantes, agencias de servicio automotriz, gasolineras, tintorerías, panificadoras, tiendas de conveniencia y grandes centros comerciales, entre muchos otros.

La contaminación del aire de la ZMCM es un proceso complejo en donde intervienen elementos como la incidencia de fenómenos naturales contaminantes, la cantidad de energéticos consumidos, calidad y tipo de los combustibles (gasolina, diesel, combustóleo, gas natural, carbón, madera, etcétera), tipo y estado de operación de los equipos de combustión, el control de la combustión y de las emisiones, así como las condiciones meteorológicas y fisicoquímicas de la atmósfera, siendo función de esto último, que la atmósfera actúe como un elemento activo en el proceso de contaminación, como difusor de ésta o como mero receptor.

Las corrientes de convección de los vientos dominantes en las capas bajas de la atmósfera ocasionan que se produzca un cierto estancamiento de las sustancias presentes en cada hemisferio, tardando la difusión cerca de dos meses para homogenizar los gases en un mismo hemisferio y unos dos años en hacerlo en toda la troposfera.

En la Ciudad de México existen todo tipo de fuentes y procesos de contaminación. Tradicionalmente se consideran como fuentes emisoras de contaminación atmosférica a dos grupos que se establecen de acuerdo con el origen de los contaminantes en el sentido de si son fenómenos naturales los causantes o procesos humanos; así hay fuentes de contaminación naturales o biogénicas y fuentes artificiales o antropogénicas.

Entre las fuentes naturales se encuentran las emisiones de las erupciones volcánicas de ceniza y gases, los incendios forestales no provocados por el ser humano, tolvánicas, polen, bacterias de la descomposición de la materia orgánica, las actividades de algunos seres vivos y los océanos. En la tabla 2 se muestran algunos contaminantes puntuales que son emitidos por las fuentes naturales.

<b>FUENTE</b>	<b>CONTAMINANTES</b>
<b>VOLCANES</b>	<i>Óxidos de azufre, partículas</i>
<b>INCENDIOS FORESTALES</b>	<i>Monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas.</i>
<b>VENDA VALES</b>	<i>Polvo</i>
<b>PLANTAS VIVAS</b>	<i>Hidrocarburos, polen.</i>
<b>PLANTAS EN DESCOMPOSICIÓN</b>	<i>Metano, sulfuro de hidrógeno.</i>
<b>SUELO</b>	<i>Virus, polvo.</i>
<b>MAR</b>	<i>Partículas de sal.</i>

**TABLA 2. CONTAMINANTES NATURALES COMUNES Y SUS PRINCIPALES FUENTES**

Las fuentes artificiales tienen su origen en las actividades humanas y son los principales focos de contaminación. Las principales fuentes de emisiones contaminantes antropogénicas pueden clasificarse en fijas o estacionarias, en móviles y en compuestas.

Los focos fijos incluyen a las industrias y sus procesos, talleres en general, instalaciones nucleares, termoeléctricas, refinerías de petróleo, plantas procesadoras de cemento, fundiciones de hierro y acero, baños, incineradores industriales, comerciales y domésticos, y los del servicio público; también basureros y los sistemas de calefacción doméstica, entre muchos otros.

Los focos móviles son, entre otros, las plantas de emergencia generadoras de energía eléctrica, plantas elaboradoras de asfalto y los vehículos automotrices de todo tipo como autos, autobuses, aviones, locomotoras, barcos, etcétera.

Como focos o fuentes compuestas se consideran a las aglomeraciones industriales y a las áreas urbanas. En ocasiones se catalogan como focos diversos a procesos como la quema a cielo abierto de cualquier tipo de materia, a los residuos peligrosos o potencialmente peligrosos, al uso de explosivos, etcétera.

Las sustancias contaminantes pueden ser, a su vez, contaminantes primarios o contaminantes secundarios. Entendemos por contaminantes primarios a las sustancias que son vertidas directamente a la atmósfera por las fuentes de emisión. Son numerosos y entre los más importantes está el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre, los hidrocarburos, los compuestos de plomo, las partículas en suspensión con diámetro de hasta 10 micrómetros y las partículas con diámetro mayor a 10 micras, que son sedimentables.

Los contaminantes secundarios no se arrojan a la atmósfera desde los focos emisores, sino que se producen como consecuencia de las reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios entre ellos, con otros componentes de la atmósfera y con la energía en forma de radiación electromagnética proveniente del sol, en el seno de la misma atmósfera. El ozono, el ácido nítrico, el ácido sulfúrico y los nitratos de peroxiacilo se hallan en este grupo, dando como consecuencia alteraciones atmosféricas como la contaminación fotoquímica, la acidificación del medio y la disminución de la capa de ozono estratosférico.

Con frecuencia los contaminantes naturales ocurren en cantidades mayores que los producidos por las actividades humanas **(14)**, sin embargo, como se mencionó, los contaminantes artificiales presentan la amenaza más significativa a largo plazo para la biosfera.

La categoría de contaminantes criterio o contaminantes de referencia está conformada por el conjunto de contaminantes primarios y secundarios que típicamente se encuentran presentes en las zonas urbanas y son los que reúnen mayor atención desde el punto de vista normativo.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), las regulaciones de los Estados Unidos y la Unión Europea en la materia, este conjunto de contaminantes comprende al monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), el ozono (O<sub>3</sub>), el material particulado con radio aerodinámico menor a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) y el plomo (Pb). Las concentraciones de los contaminantes de referencia varían de una localidad a otra dependiendo del tipo e intensidad de la actividad industrial, el tráfico vehicular y del grado de control ambiental existentes en cada una.

La regulación de la contaminación atmosférica se organiza sobre la base de dos conceptos fundamentales que son la emisión y la inmisión de sustancias contaminantes. La emisión está referida a la liberación de contaminantes a la atmósfera provenientes de fuentes móviles o fijas, mientras que la inmisión representa la presencia de contaminantes en la atmósfera en su calidad de cuerpo receptor. La calidad del aire se evalúa por medio de los denominados niveles de inmisión, que vienen definidos como la concentración media de un contaminante presente en el aire durante un periodo de tiempo determinado.

En la siguiente tabla podemos valorar de manera general los contaminantes atmosféricos más comunes en la ZMVM, sus efectos y comportamiento en la troposfera.

<b>SUSTANCIA CONTAMINANTE</b>	<b>CARACTERÍSTICAS Y ALGUNOS EFECTOS EN LA ATMÓSFERA Y EN LA SALUD.</b>
<i>Dióxido de carbono</i>	<i>Se produce por la fotosíntesis y en toda la quema de combustibles tradicionales excepto hidrógeno. Es perjudicial para la salud en concentraciones superiores a 5 000 ppm en 2 a 8 horas. Sus niveles han aumentado a unas 350 ppm por fuentes antropogénicas. Se afirma que esta tendencia contribuye en forma importante al calentamiento global por ser un gas invernadero.</i>
<i>Monóxido de carbono</i>	<i>Proviene de incendios forestales, volcanes, combustión incompleta de combustibles fósiles en motores y algunos procesos industriales. En la atmósfera ayuda a incrementar los niveles de gases invernadero a través de ciertas reacciones como su oxidación para formar CO<sub>2</sub>. El monóxido de carbono es un veneno letal para los seres vivos impidiendo el transporte de oxígeno en la sangre por que se combina fuertemente con la hemoglobina.</i>
<i>Metano</i>	<i>Es el más abundante de los contaminantes atmosféricos. Es un contaminante primario y natural. Se origina en diversas reacciones anaerobias del metabolismo, por la digestión de los animales y la putrefacción. También se desprende del gas natural del que es componente mayor. Así mismo se forma por procesos antropogénicos como la ganadería intensiva, el tratamiento de residuos y el tratamiento y distribución de combustibles fósiles. Se considera que no provoca daño en los seres vivos, pero reacciona con el radical hidroxilo en la atmósfera formando, entre otros compuestos, ozono. Es un importante gas invernadero que fomenta el calentamiento global.</i>
<i>Hidrocarburos</i>	<i>Sus fuentes son los motores de combustión interna, evaporación de disolventes, procesos industriales y la extracción, refinado y uso del petróleo y sus derivados. También están en la atmósfera muchos hidrocarburos de origen natural. Entre los más importantes están el propano y el butano. Sus efectos sobre la salud son variables. Los hidrocarburos intervienen en las reacciones que originan el "smog fotoquímico".</i>



<p>Compuestos orgánicos volátiles (VOC)</p>	<p>Los compuestos orgánicos volátiles son emitidos por la quema de combustibles, como gasolina, diesel, madera, carbón, gas natural y otros. También se escapan de los disolventes, pinturas, pegamentos, dispersantes, agentes desengrasantes, limpiadores y otros productos químicos. Se hallan en esta clasificación además de los mencionados hidrocarburos, el isopreno, pineno, xileno, acetona, benceno, nitrobenceno, clorobenceno, tolueno, formaldehído, alcoholes, etilenglicol y muchos otros. Especialmente en concentraciones altas afectan al sistema respiratorio y podrían causar cáncer, así como problemas neuronales. Tienen efectos en la destrucción del ozono estratosférico, y en la producción de ozono troposférico formando el smog fotoquímico.</p>
<p>Óxidos de azufre</p>	<p>El SO<sub>2</sub> es un contaminante primario. El SO<sub>3</sub> es un contaminante secundario que se forma por la reacción del SO<sub>2</sub> con el oxígeno atmosférico. El dióxido de azufre es emitido en más de la mitad de su concentración por actividades humanas, sobre todo por la combustión del carbón, petróleo y sus derivados, y por la metalurgia. Otra fuente es la oxidación del H<sub>2</sub>S. La fuente natural importante es la actividad volcánica. El SO<sub>2</sub> es un gas venenoso, muy irritante, que provoca aumento de resistencia de vía aérea, broncoespasmo y edema. El SO<sub>3</sub> formado reacciona con el agua formando ácido sulfúrico, contribuyendo fuertemente a la lluvia ácida, provocando daños a la salud, en la reproducción de la vida acuática, induciendo la corrosión de los metales y la destrucción de monumentos y construcciones.</p>
<p>Óxidos de nitrógeno</p>	<p>El conjunto de NO y NO<sub>2</sub> son los considerados NO<sub>x</sub>. Ambos son contaminantes primarios. El monóxido de nitrógeno es emitido en mayor cantidad, pero se oxida rápidamente a dióxido. El NO<sub>2</sub> tiene vida corta, se oxida a [NO<sub>3</sub>] en forma de aerosol o a HNO<sub>3</sub>. Tiene gran trascendencia en la formación del smog fotoquímico e influye en las reacciones de formación y destrucción del ozono troposférico y estratosférico, así como en el fenómeno de lluvia ácida. En concentraciones altas provoca daños a la salud como inflamación de las vías respiratorias, edema pulmonar y bronquiolitis, así como cianosis.</p>
<p>Ozono</p>	<p>El ozono en la troposfera es dañino cuando su concentración excede ciertos niveles, (para el ser humano a partir de unos 150 microgramos por metro cúbico o en la vegetación a partir de unos 30 ppb). Se crea a través de reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV) derivados de fuentes como la quema de combustible. Contribuye a generar un calentamiento en la superficie de la tierra. En los humanos y animales causa irritación de las mucosas, enfermedades respiratorias y reducción de la resistencia a las infecciones. En las plantas ocasiona daños visibles en las hojas y reducción en el crecimiento, la floración y la cosecha. También deteriora materiales como los elastómeros, fibras textiles y colorantes.</p>

<p><i>Partículas suspendidas</i></p>	<p><i>En la atmósfera permanecen suspendidas sustancias muy distintas en forma de partículas como polvo, polen, hollín (carbón), metales (plomo, cadmio), asbesto, sales, pequeñas gotas de ácido sulfúrico, dioxinas, pesticidas, etcétera. Dependiendo de su tamaño, las partículas pueden flotar o sedimentar. Las partículas pueden permanecer suspendidas formando aerosoles desde uno o dos días las de 10 µm o más, hasta varios días o semanas las más pequeñas. Algunas de estas partículas son especialmente tóxicas para los organismos, en especial las de menor diámetro aerodinámico, ya que no son retenidas por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio, siendo un factor de muerte prematura en la población. Los aerosoles también pueden influir sobre el clima produciendo calentamiento al absorber radiación, o pueden provocar enfriamiento al reflejar parte de la radiación incidente. Se ha estudiado la posibilidad de que la exposición de las personas y los animales a las sustancias presentes en algunos de estos aerosoles, aún en dosis bajas, provoquen a largo plazo males como cáncer, defectos de nacimiento, reducción en la fertilidad y cambios en el sistema inmunitario.</i></p>
<p><i>Smog fotoquímico</i></p>	<p><i>Es la mezcla que resulta en una niebla de color café rojiza en la atmósfera de las grandes urbes, como la Ciudad de México. Se considera smog fotoquímico a la combinación de los óxidos de nitrógeno, ozono, compuestos orgánicos volátiles (COV) y nitrato de peroxiacetilo (PAN), siendo este último un componente muy dañino e irritante, que se forma por reacción entre el NO<sub>2</sub>, el O<sub>2</sub> y sustancias derivadas de los COV.</i></p>

**TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DE CONTAMINANTES COMUNES EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

## Capítulo 4

# DINÁMICA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La atmósfera está sujeta a un bombardeo de radiaciones cósmicas extragalácticas y del Sol, así como de partículas provenientes de éste. Esto tiene efectos químicos profundos, especialmente en las capas más externas de la atmósfera. Debido al campo gravitatorio de la Tierra los átomos y las moléculas menos pesadas pueden elevarse más. Por ello la atmósfera superior juega un papel fundamental que determina importantes condiciones de la superficie terrestre, que permiten la vida. Al absorber las radiaciones y las partículas de alta energía, los átomos y las moléculas en el aire experimentan cambios químicos, y la formación de muchas especies activas por la interacción de otras con la luz solar, produce reacciones en cadena, que ocasionan la producción de trazas de otras sustancias en la composición de la atmósfera.

Existe un filtro natural para la radiación electromagnética con longitud de onda comprendida entre los 240 y los 300 nm. Estos fotones son absorbidos por el oxígeno y el nitrógeno atmosféricos, y por el ozono de la estratosfera. En la troposfera sólo son importantes las reacciones químicas que son activadas por fotones de longitud de onda de 300 nm o más.

En el Valle de México, por su altura respecto al mar, incide una alta radiación solar. Es un factor característico que propicia una mayor reactividad fotoquímica que la de otras ciudades localizadas en latitudes más al norte. Por ejemplo, la atmósfera de la ZMCM es aproximadamente un 60 % más reactiva que la de los Ángeles, California. En el Valle de México se recibe la mayor radiación solar en los meses de diciembre a febrero. En el resto del año la nubosidad bloquea parcialmente el paso de la luz solar. Sin embargo, esto no impide que al mediodía y aún con nubes dispersas la radiación sea suficiente para la formación de compuestos fotoquímicos (9).

## 4.1 SMOG FOTOQUÍMICO

Muchas ciudades, entre ellas la Ciudad de México y su zona conurbada, experimentan episodios de contaminación severa del aire, con altas concentraciones de contaminantes secundarios resultantes de reacciones, inducidas por la luz solar, entre algunos contaminantes primarios que se mantienen en cierta cantidad. A la mezcla donde coexisten estos reactivos y productos se le denomina "smog fotoquímico". La formación del smog fotoquímico es favorecida por inversiones térmicas y una fuerte radiación solar. Cuando se forma es reconocible por la acumulación de neblinas amarillentas.

Las sustancias que se incluyen en el smog fotoquímico son los óxidos de nitrógeno, el ozono troposférico, compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, nitratos de peroxiacilo y otros contaminantes que se producen a causa de las reacciones entre algunos de los anteriores.

La Tabla 5 muestra en forma comparativa las características principales de los dos tipos de smog que se producen en la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>SMOG DE CARBÓN</b>	<b>SMOG FOTOQUÍMICO</b>
<i>Hora pico</i>	<i>Temprano en la mañana</i>	<i>Mediodía</i>
<i>Temperatura ambiente</i>	<i>-1 a 4 °C</i>	<i>24 a 32 °C</i>
<i>Condiciones atmosféricas</i>	<i>Húmedo y nublado</i>	<i>Baja humedad, cielo azul y despejado sobre la capa de inversión.</i>
<i>Inversión térmica</i>	<i>Cerca del suelo</i>	<i>Altura variable</i>

<i>Principales efectos</i>	<i>Irritación de bronquios y pulmones y ojos.</i>	<i>Irritación de ojos, daños severos en conchas, pinos, plantas ornamentales. plástico quebradizo</i>
<i>Principales componentes</i>	<i>Hollín y otras partículas, SO<sub>2</sub></i>	<i>O<sub>3</sub>, PAN, NO<sub>x</sub>, aldehídos y CO.</i>
<i>Origen</i>	<i>Combustión del carbón</i>	<i>Escapes de automóviles (hidrocarburos y óxidos de nitrógeno como contaminantes primarios).</i>
<i>Característica química global</i>	<i>Reductor</i>	<i>Oxidante.</i>

**TABLA 4. TIPOS DE SMOG Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS**

El proceso de formación de esta mezcla involucra cientos de reacciones distintas que por consecuencia producen una muy variada colección de especies químicas que actúan simultáneamente.

Se sabe que en la temporada invernal se emiten al aire mayoritariamente material particulado, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno; y en la temporada de calor las emisiones son más ricas en dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles.

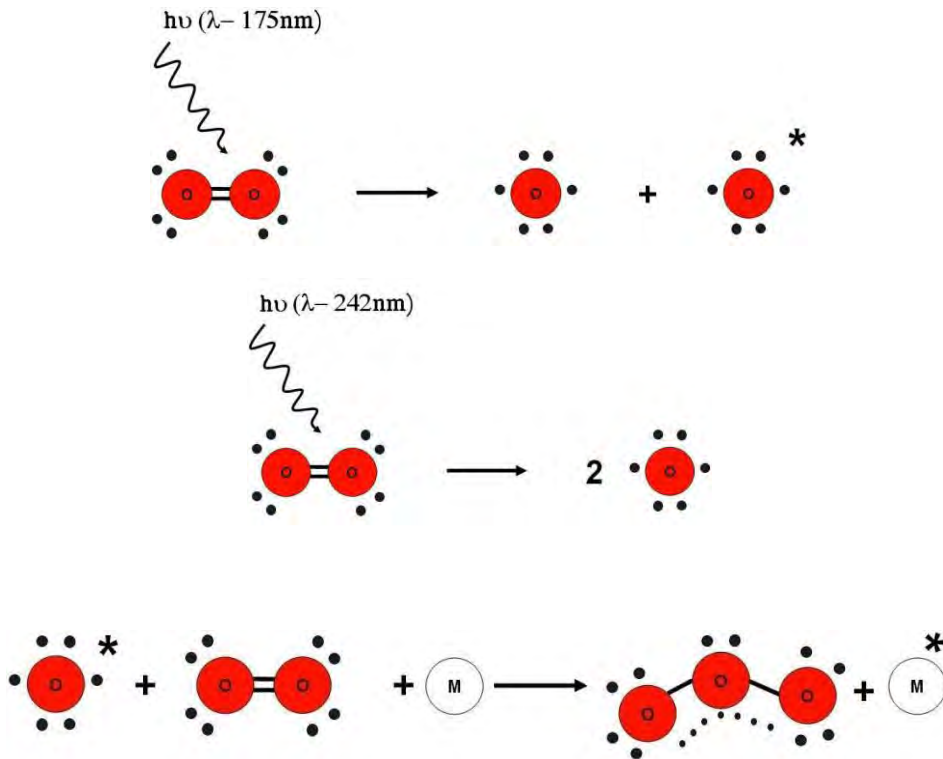
Recientemente se han dado grandes cambios en la explicación científica de la formación del smog fotoquímico y otros procesos de generación de contaminantes secundarios. En otros tiempos se consideró que las especies atmosféricas eran oxidadas por el ozono y por el peróxido de hidrógeno. Hoy se cree que los causantes de dichas oxidaciones son los radicales libres de alta reactividad como el hidroxilo y el hidroperóxilo que se hallan en la atmósfera en concentraciones del orden de las 10 ppt en volumen.

Estos radicales tienen en su capa de valencia el típico electrón no apareado que les da afinidad para atraer otro electrón, lo que les convierte en oxidantes poderosos. El hidroxilo parece ser el radical de mayor incidencia y su descubrimiento constituye la piedra angular de la comprensión actual de la química atmosférica. Su producción se inicia con la fotólisis del ozono.

## **4.2 OZONO Y FORMACIÓN DE RADICALES**

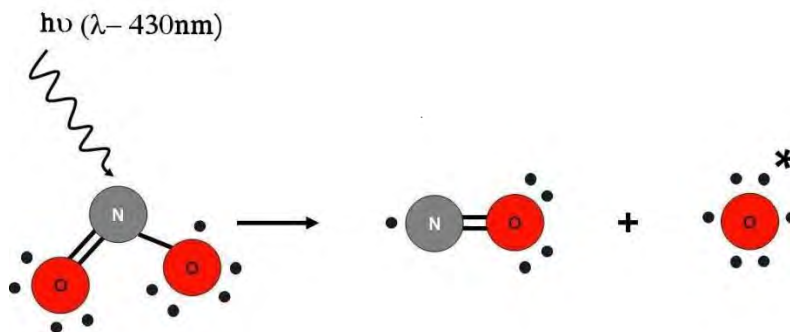
El ozono es un gas azulado de olor picante y poco denso con un fuerte poder oxidante; en la estratosfera es el más abundante de los oxidantes fotoquímicos y realiza una función protectora de la vida en la Tierra, filtrando la radiación ultravioleta de onda corta procedente del Sol. En la baja atmósfera paradójicamente, el  $O_3$  es un contaminante secundario que se produce mediante reacciones fotoquímicas (15).

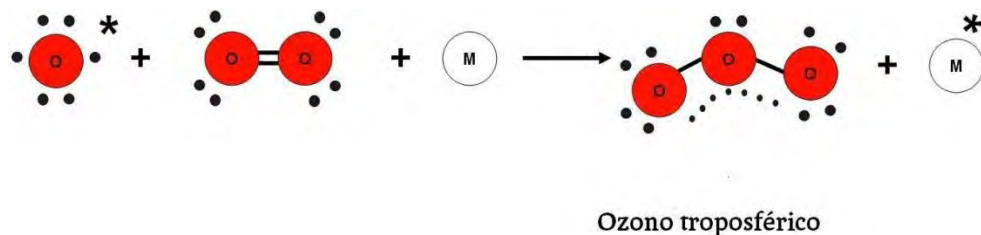
En la estratosfera se forma principalmente por la radiación solar que actúa sobre el oxígeno molecular alrededor de los 25 km, y durante las tormentas eléctricas por el paso de descargas a través de la atmósfera. El proceso lo describen las tres ecuaciones siguientes:



donde M es normalmente otra molécula de  $\text{O}_2$  o una molécula de  $\text{N}_2$

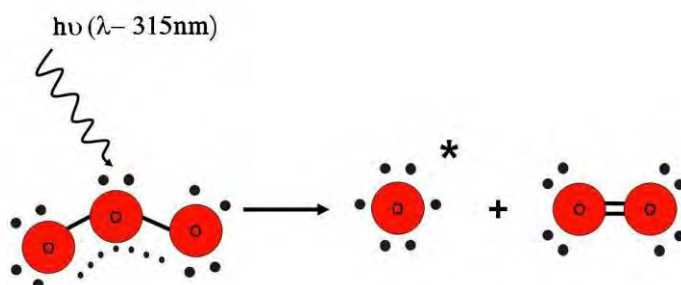
En la atmósfera inferior la formación de ozono involucra al dióxido de nitrógeno y a la radiación solar que absorbe, como se ilustra con las siguientes ecuaciones:





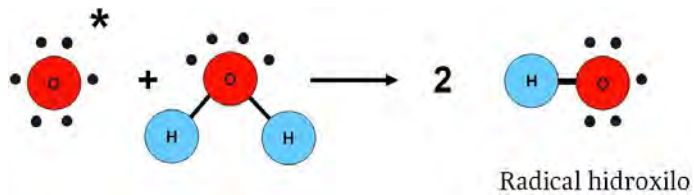
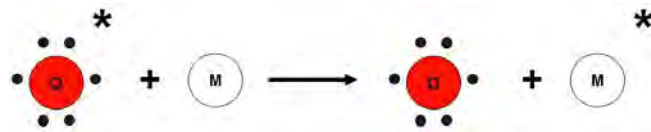
El ozono formado podría reaccionar con el monóxido de nitrógeno producido y así regenerar dióxido de nitrógeno y oxígeno molecular, sin embargo, en este proceso el equilibrio no está favorecido hacia la eliminación del ozono troposférico.

En la estratosfera, cuando el ozono absorbe radiación con longitud de onda menor a 315 nm, se descompone produciendo un oxígeno excitado energéticamente, manteniendo constantes las concentraciones de  $O_2$  y  $O_3$ , con una transformación neta de la radiación UV a calor, de tal manera que la parte dañina de estas ondas para los seres vivos es eliminada.



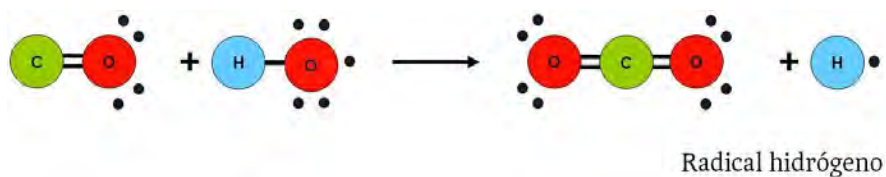
Pero cuando el ozono se halla en las capas bajas de la atmósfera y se produce el oxígeno excitado, el proceso químico es distinto. El tiempo de vida media del oxígeno excitado es de unos 110 segundos por que la transición al oxígeno diatómico no es sencilla, así que éste puede participar en dos reacciones:

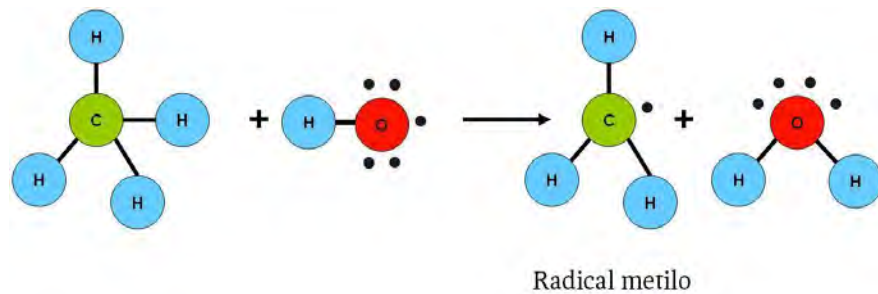




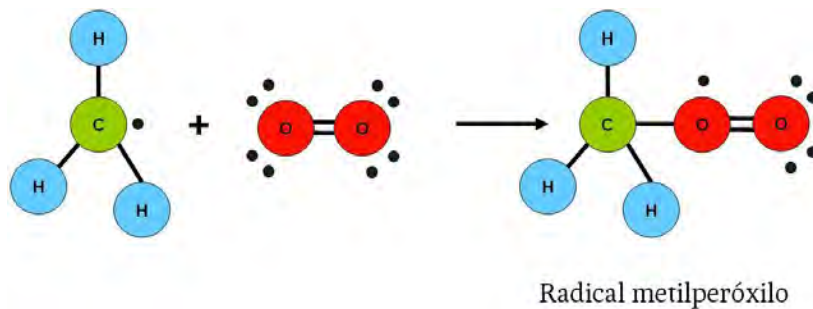
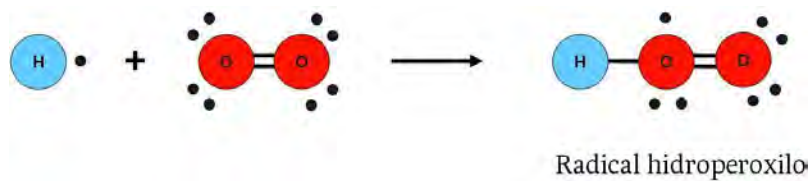
Puede reaccionar con alguna especie inerte y transferirle su energía en exceso; por otra parte, puede interactuar químicamente con el agua para formar al radical hidroxilo. Ésta es la fuente fundamental del radical hidroxilo en la troposfera.

Los radicales hidroxilo reaccionan frecuentemente con el monóxido de carbono o con el metano, formándose los radicales hidrógeno y metilo respectivamente como se muestra a continuación:

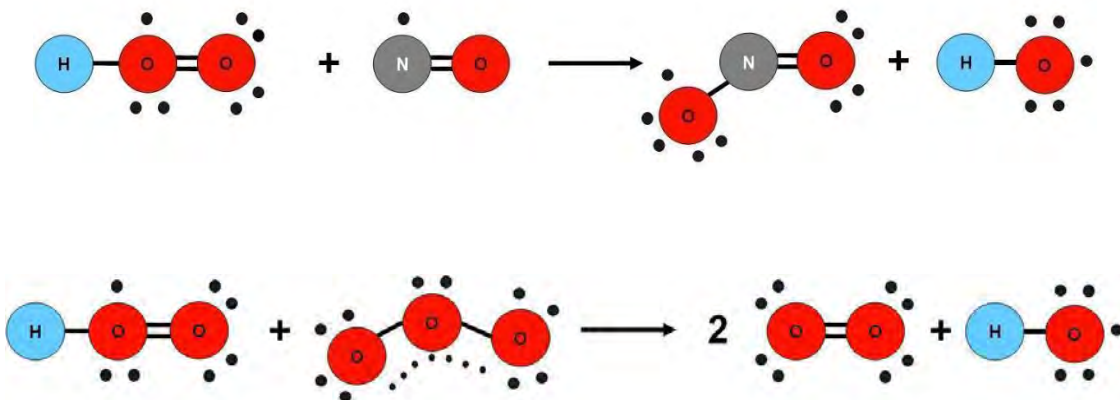




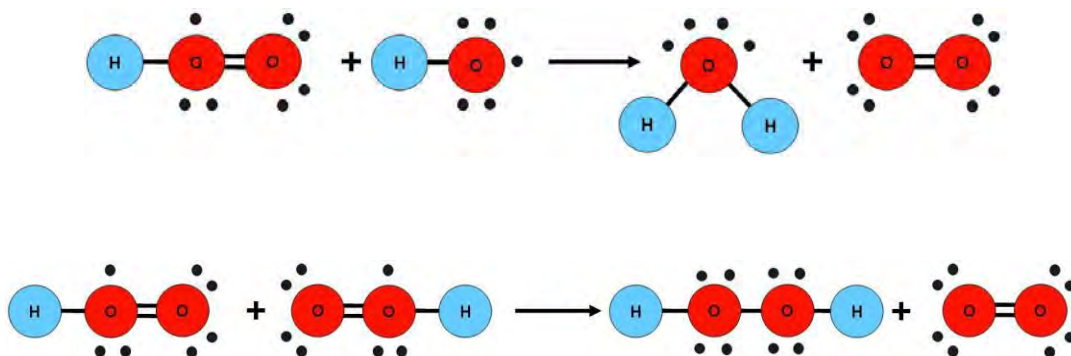
Estos radicales se combinan pronto con el oxígeno molecular para formar los radicales correspondientes, hidroperoxilo y metilperoxilo:



A su vez, el radical hidroperoxilo puede regenerar al radical hidroxilo mediante dos vías donde intervienen el monóxido de nitrógeno y el ozono:



Por otra parte, los radicales hidroperoxilo reaccionan con el radical hidroxilo también para formar agua; y reaccionan incluso entre sí formando al peróxido de hidrógeno, que se desprenderá después de la atmósfera por lavado con precipitación:



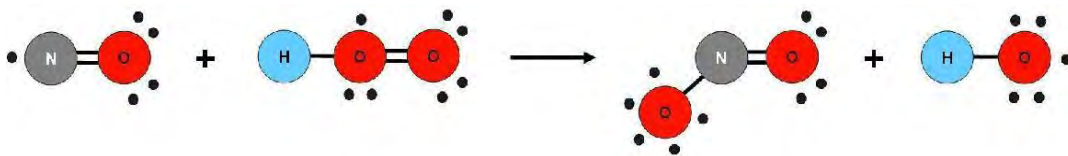
El radical metilperoxilo se comporta en forma mucho más compleja y las investigaciones indican que probablemente por oxidación favorece la producción de monóxido de carbono (16).

## 4.3 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

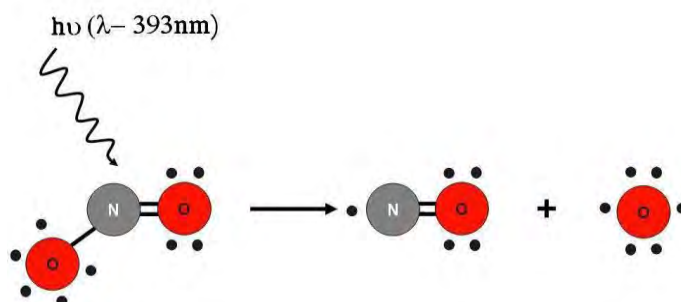
Se conocen ocho óxidos de nitrógeno diferentes, pero como hemos visto sólo tienen interés como contaminantes dos de ellos normalmente: el óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno. El resto se encuentran en equilibrio con estos dos, pero en concentraciones extraordinariamente bajas. La presencia de NO<sub>x</sub> en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es atribuible tanto a la industria como al transporte.

El NO es un gas inflamable, incoloro, inodoro y muy tóxico. El NO<sub>2</sub> es un gas pardo rojizo que no es inflamable pero sí muy tóxico y con un olor asfixiante. El NO<sub>2</sub> reacciona entre sí para formar NO y oxígeno molecular a temperaturas superiores a los 160 °C. La mayor parte de los NO<sub>x</sub> que se emiten a la atmósfera de la Ciudad de México están en la forma NO. Tanto el monóxido como el dióxido se forman en pequeñas cantidades en los cilindros de los motores de combustión interna como consecuencia de una contaminación directa de nitrógeno del aire, que se combina con el comburente, predominando la formación del óxido nítrico, con una entalpía de formación de 90.3 kJ/mol, comparada con el dióxido de nitrógeno  $\Delta H_f = 33.8$  kJ/mol. El NO, que también se forma durante la producción industrial de HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, así como en el proceso de nitración, es un compuesto menos estable que el dióxido, como lo sugiere su mayor  $\Delta G_f^\circ = 86.6$  kJ/mol comparada con 51.3 kJ/mol para el NO<sub>2</sub>.

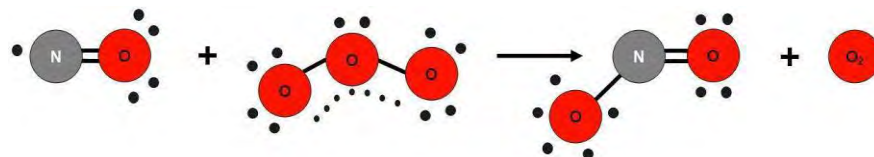
El NO existente en la atmósfera puede oxidarse en el aire muy lentamente al dióxido de nitrógeno en condición normal, sin embargo, lo hace rápidamente en presencia del radical hidropéroxilo, produciendo a su vez al radical hidroxilo:



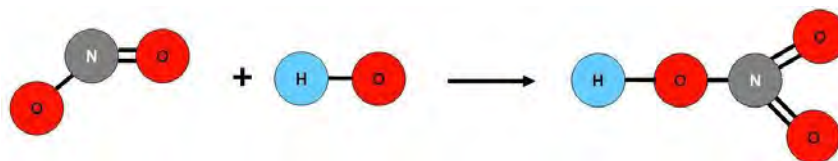
Ya formado el  $\text{NO}_2$ , son necesarios 304 kJ/mol para que se disocie. Estos requerimientos corresponden a un fotón de longitud de onda de 393 nm. Bajo el efecto de la luz solar el dióxido de nitrógeno experimenta esa disociación:



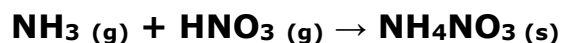
Esta reacción fotoquímica favorece la formación de ozono al producir oxígeno radical. Tanto el hidroxilo formado a partir de hidroperoxilo, así como el ozono potencian la acción oxidante del medio. El ozono por su parte, oxida rápidamente al  $\text{NO}$  para crear más dióxido:



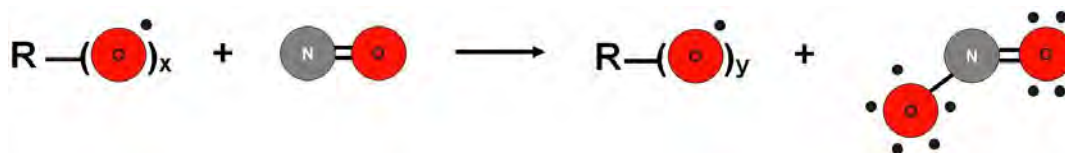
Si el dióxido de nitrógeno reacciona con el hidroxilo se genera  $\text{HNO}_3$ , compuesto altamente soluble en agua, que se elimina del aire con la lluvia en forma de ácido nítrico, contribuyendo a la formación de lluvia ácida:



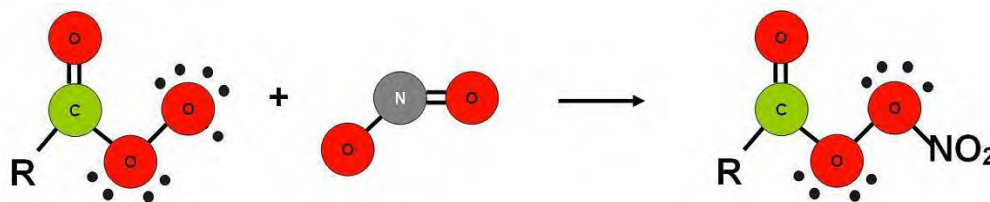
En ausencia de condiciones de lluvia, el ácido nítrico formado no se condensa en cantidades apreciables ya que tiene una presión de vapor alta, y permanece en fase gaseosa. Así, reacciona con el amoníaco atmosférico produciendo nitrato de amonio que es sólido hasta humedades relativas de 62 % aproximadamente, ocasionando la formación de aerosoles:



Como se mencionó anteriormente, el ozono reacciona con el monóxido de nitrógeno produciendo el dióxido de nitrógeno, provocando que las cantidades de  $\text{O}_3$  no se eleven demasiado. Sin embargo, cuando hay presencia de hidrocarburos en la atmósfera y en particular radicales oxigenados, el monóxido de nitrógeno se oxida rápidamente a dióxido, sin la necesidad de que participe el ozono, por lo que éste se acumula en la troposfera:



El dióxido de nitrógeno reacciona con compuestos orgánicos como los radicales acilperoxilo y forma ciertas cantidades de especies como los nitratos de peroxiacilo:



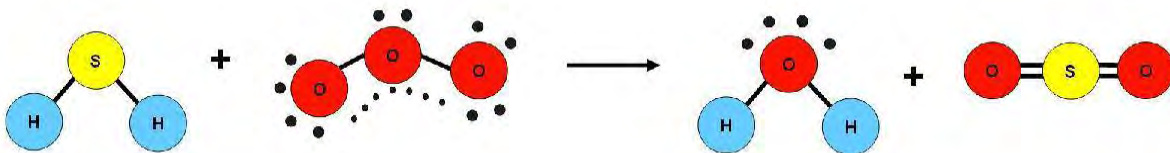
Una sustancia que también se ha podido identificar es el perácido nítrico  $\text{HO}_2\text{NO}_2$ , la cual presenta una alta estabilidad.

## 4.4 COMPUESTOS DE AZUFRE

Los compuestos azufrados se hallan en cierto grado en la atmósfera no contaminada por el ser humano, provenientes de fuentes naturales. Ciertas cantidades de dióxido y trióxido de azufre junto con sulfato se forman en los océanos. Otros procesos biogénicos emiten formas reducidas de compuestos azufrados como  $\text{CS}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{SSCH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc., los cuales se oxidan para producir dióxido de azufre.

Los compuestos de azufre antropogénicos primarios se producen mediante diversos procesos industriales. Muchos de estos forman el  $\text{H}_2\text{S}$  que también se oxida y forma el dióxido de azufre secundario.

El sulfuro de hidrógeno es un gas de olor muy desagradable, es tóxico y no tiene color, puede provocar la muerte incluso, además de afectar el sistema nervioso central e irritar fuertemente las vías respiratorias. La oxidación de éste para producir el dióxido de azufre se ejecuta con la participación del ozono:

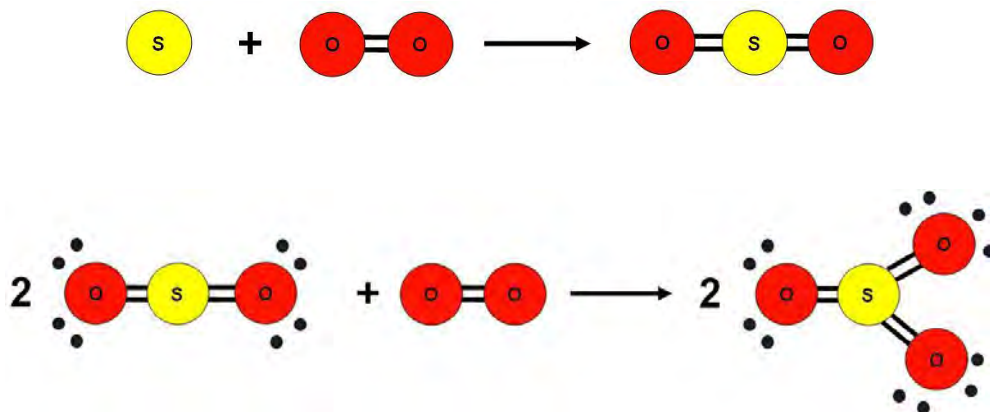


Por supuesto que el transporte es otra fuente importante de sustancias contaminantes que contienen azufre.

El óxido de azufre que se emite a la atmósfera en mayores cantidades es el anhídrido sulfuroso o dióxido de azufre, y en menor proporción el anhídrido sulfúrico  $\text{SO}_3$  no rebasando el 1 o 2 por ciento respecto al dióxido.

El  $\text{SO}_2$  es un gas incoloro de olor picante e irritante en concentraciones superiores a 3 ppm y en ocasiones ha sido considerado como el más perjudicial de los contaminantes. Su destino final es la conversión en la atmósfera en sales de sulfato que se incorporan a la tierra por sedimentación o lavado por la precipitación. Es 2.2 veces más denso que el aire, pero se desplaza rápidamente en la atmósfera ya que reacciona con el agua presente formando el ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , que se incorpora a las gotas de lluvia, a la niebla y a los aerosoles.

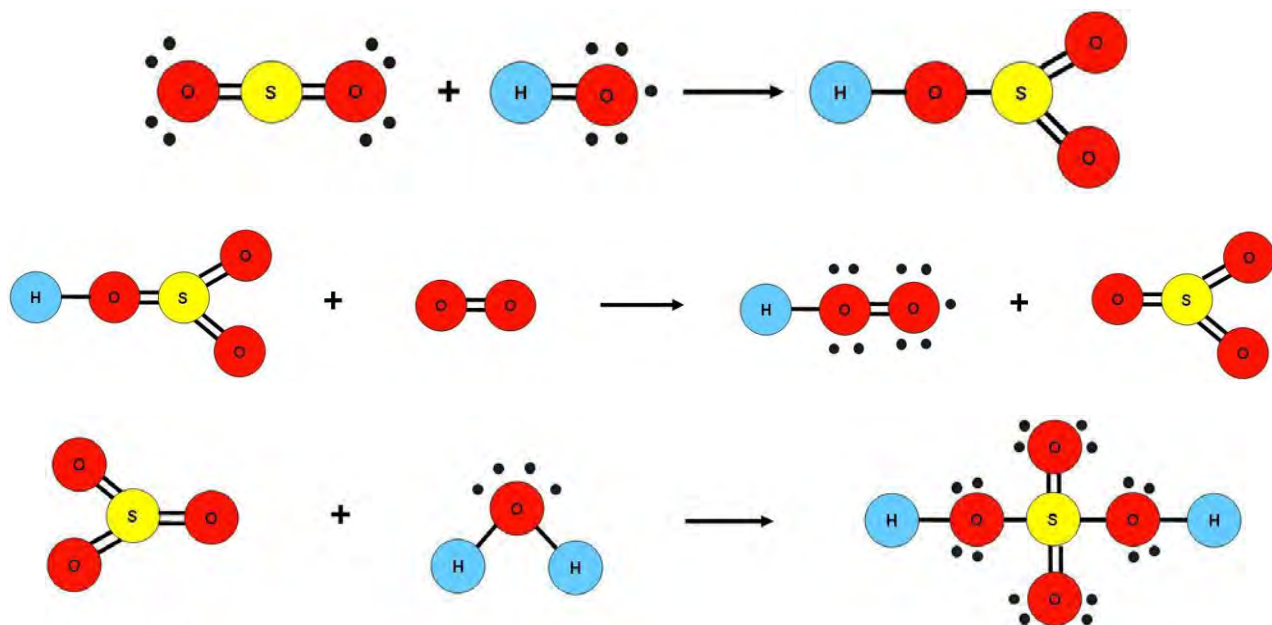
La combustión de cualquier materia que contenga azufre emite dióxido y trióxido de azufre. La cantidad de  $\text{SO}_3$  producida depende de la temperatura de reacción, oscilando entre el 1 % y hasta el 10 % de los  $\text{SO}_x$  producidos. El  $\text{SO}_3$  se presenta en estado líquido o gaseoso ya en la atmósfera, porque su punto de ebullición es de  $44.8^\circ\text{C}$ , es incoloro y tiene sabor amargo. Tanto el  $\text{SO}_2$  como el  $\text{SO}_3$  son agentes que participan en la formación de la lluvia ácida en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Se forman probablemente de la siguiente manera:



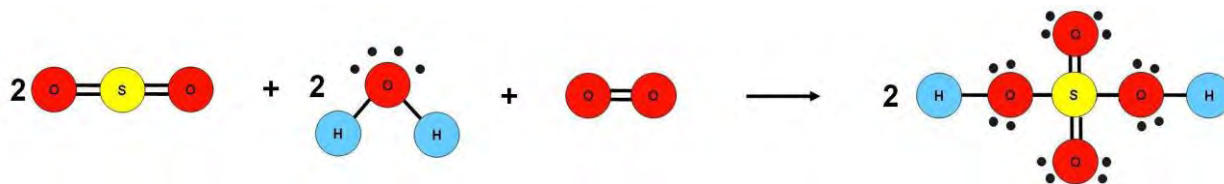


La segunda reacción se lleva a cabo en pequeña escala y tiene lugar lentamente a las condiciones normales troposféricas, pero una vez formado el  $\text{SO}_3$  se disuelve en el agua, formando el ácido sulfúrico que se incorpora pronto a la lluvia, a la nieve y al granizo.

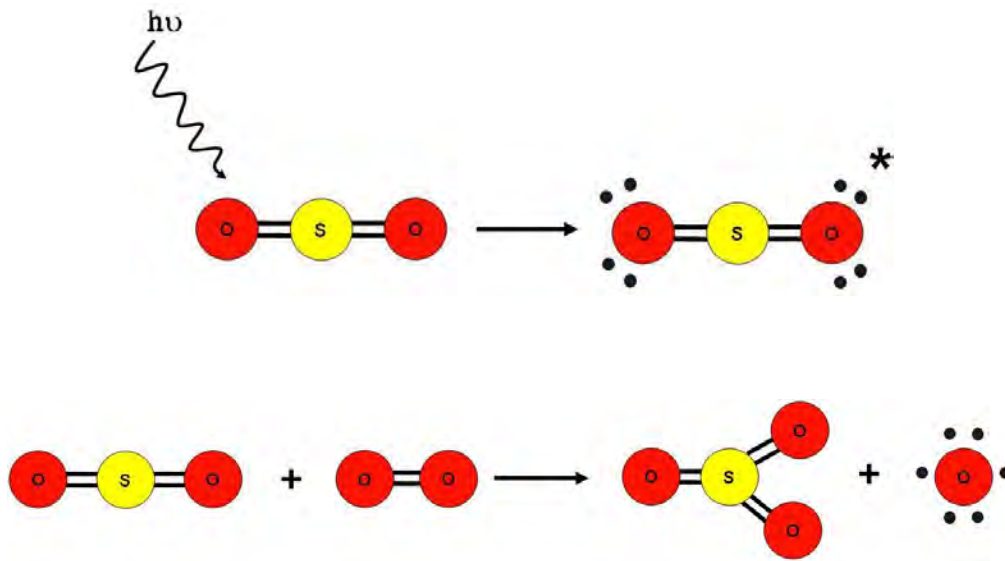
El mecanismo por el cual el  $\text{SO}_2$  se transforma en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  es una reacción en fase gaseosa donde interviene el radical hidroxilo:



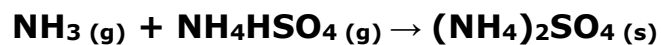
El dióxido de azufre se transforma en ácido sulfúrico también mediante la oxidación catalítica que se lleva a cabo sobre las superficies con iones  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$ , en el proceso de corrosión húmeda o por mojado, cuando hay suficiente humedad en el medio.



Cuando la humedad es baja, la reacción es fotoquímica:



Ya formado el  $\text{SO}_3$ , reacciona con  $\text{H}_2\text{O}$  para dar al ácido sulfúrico. Este ácido reacciona con los iones amonio  $\text{NH}_4^+$  y calcio  $\text{Ca}^{2+}$  de la superficie, formando las sales correspondientes. Cuando reacciona con el amoniaco del aire puede dar lugar a la formación de partículas sólidas:



Tanto el ácido sulfúrico como el ácido nítrico aumentan la acidez del medio ambiente provocando episodios de lluvia ácida.

Se ha observado que los compuestos con azufre contribuyen en mayor proporción a la lluvia ácida respecto a los compuestos nitrogenados, según los patrones regionales de formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y de  $\text{HNO}_3$ .

## 4.5 LLUVIA ÁCIDA

La lluvia normal, no contaminada, tiene un pH de aproximadamente 5.6, acidez debida a la presencia de ácido carbónico, formado en la atmósfera por combinación del dióxido de carbono del aire y el agua. Cuando la concentración de iones hidronio ( $H^+$ ) en el agua de lluvia es suficiente para provocar que el pH sea menor a 5.6 se tiene la lluvia ácida. Esta acidez es dada por la formación de  $H_2SO_4$  y de  $HNO_3$  en la atmósfera, a partir de los  $SO_x$  y los  $NO_x$ , el oxígeno y el agua **(17)**.

El fenómeno de la lluvia ácida se conoce en los países escandinavos y en otras regiones del norte de Europa desde hace mucho tiempo, las primeras apariciones de este fenómeno se observaron en Suecia (1848), en Alemania (1867) y en Inglaterra (1877), donde hubo publicaciones que reportaban que las lluvias eran más ácidas que lo normal por alguna razón. Hoy en Suecia, por ejemplo, son alrededor de 6 000 los lagos que están acidificados, mostrando graves daños en su biología.

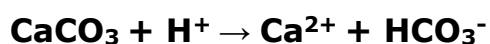
Sin embargo, la acidificación de los lagos y otras masas de agua interiores se está extendiendo cada vez a un número mayor de países. La acidez provoca que disminuyan grandes poblaciones de peces y altera en forma importante otras partes de la red de interdependencia entre las especies vivas dulceacuícolas. Se ha demostrado que todos los organismos integrantes de estos ecosistemas son sensibles a la acidificación **(18)**.

El aumento en la acidez del agua de ríos y lagos provoca un fuerte aumento del contenido de iones aluminio disueltos en el agua, especie muy tóxica para la mayoría de los organismos que mueren por envenenamiento. Otros metales altamente tóxicos como el cadmio, el cinc y el plomo, también encuentran mayor facilidad para disolverse y por lo tanto una mayor accesibilidad a los seres vivos.

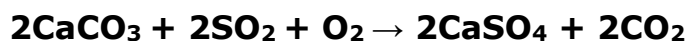
La acidificación de los suelos por la lluvia ácida, es un proceso que depende de la capacidad de amortiguamiento a la acidez, característica que es una función de la composición y del grosor de la capa de humus del terreno, el cual es la capa de productos orgánicos que puede neutralizar parcial o totalmente la acidez del agua de lluvia que la empapa; así como del tipo de roca subyacente. Sin embargo, muchos suelos tienen poca capacidad de amortiguamiento o la han perdido por factores como la deforestación y la erosión, por lo que se acidifican. Uno de los principales efectos de la acidificación del suelo es el incremento en la movilidad de ciertos cationes metálicos básicos como el calcio, el magnesio, el potasio y el aluminio, perdiéndose por lixiviación y posibilitándose su incorporación a las aguas superficiales o subterráneas, provocando daños a los organismos, tanto por toxicidad como por la eutrofización.

Un suelo acidificado muestra franco deterioro de los árboles y plantas en general. Con la lluvia ácida se produce la muerte de los microorganismos que descomponen la materia orgánica, reduciéndose así más el aporte de nutrientes. La zona agrícola, forestal y las áreas naturales protegidas al oeste y al sur de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son las más afectadas por este fenómeno. Entre los efectos más notables están el daño y pérdida de hojas y ramas, un crecimiento lento de los árboles y una mayor vulnerabilidad a ataques de plagas y enfermedades.

Simultáneamente, la lluvia ácida provoca la pérdida de grandes cantidades de dinero por la corrosión que produce en bienes de diversa índole. El impacto de la lluvia ácida en las zonas urbanas afecta a los materiales de construcción de los edificios, monumentos y esculturas. Perjudica a las construcciones y monumentos de piedra caliza o mármol, material cuya composición es básicamente  $\text{CaCO}_3$ . El ácido sulfúrico formado a partir del dióxido de azufre ataca a este material según la siguiente reacción:



Sin embargo, el dióxido de azufre también ataca directamente al carbonato de calcio:

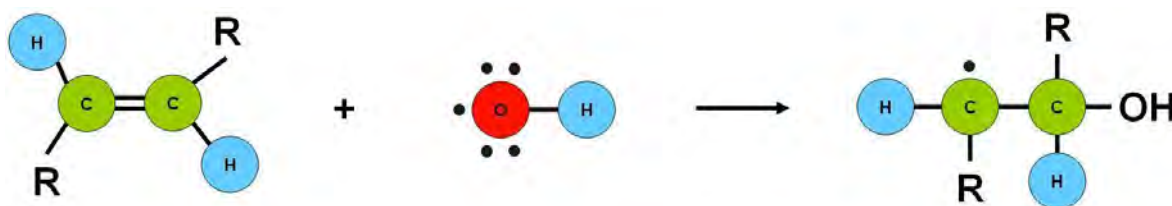


En ambos casos el carbonato de calcio se degrada a dióxido de carbono que se incorpora a la atmósfera en forma gaseosa y en sulfato de calcio, compuesto soluble en el agua.

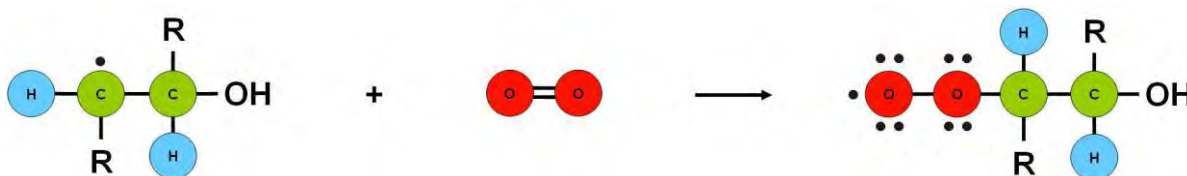
## 4.6 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Entre los compuestos orgánicos volátiles (COV) se encuentran hidrocarburos de variada estructura, así como el benceno, el tolueno, entre otros, provenientes de los combustibles fósiles como gasolina, gas natural y diésel. También se escapan de productos como pinturas, pegamentos, disolventes, limpiadores, humo de tabaco; incluso algunos son contaminantes naturales, emitidos por la vegetación.

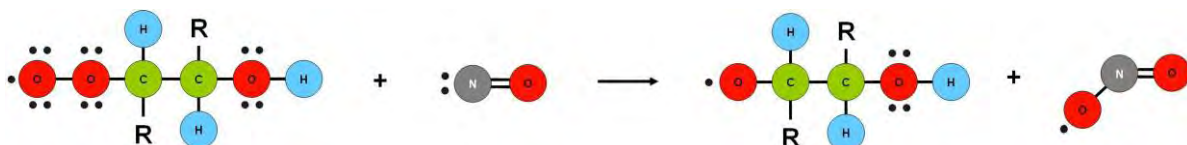
Los compuestos orgánicos volátiles más reactivos en la atmósfera son aquellos que tienen un doble enlace carbono - carbono ya que pueden adicionar radicales libres. Por ejemplo, el eteno reacciona con los radicales hidroxilo:



El nuevo radical formado adiciona a su estructura al oxígeno molecular:

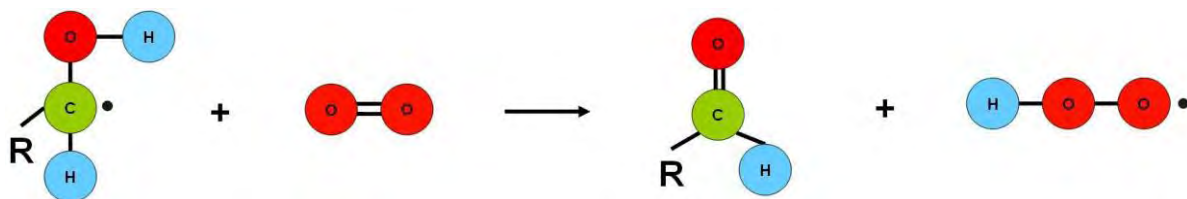


El cual a su vez oxida al monóxido de nitrógeno produciendo el dióxido y otro radical orgánico:



Descomponiéndose este último radical formado, en un aldehído y un nuevo radical. El  $\Delta H$  de esta reacción es cercano a cero ocurriendo espontáneamente en el aire; no requiere un aporte energético ya que la formación del doble enlace carbono - oxígeno compensa la pérdida del doble enlace carbono - carbono original.

El radical  $RHC^*OH$  formado en el proceso anterior reacciona después con una molécula de oxígeno formando otro aldehído y al radical hidroperoxilo:

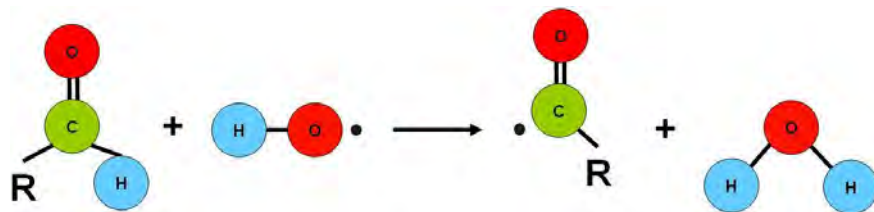
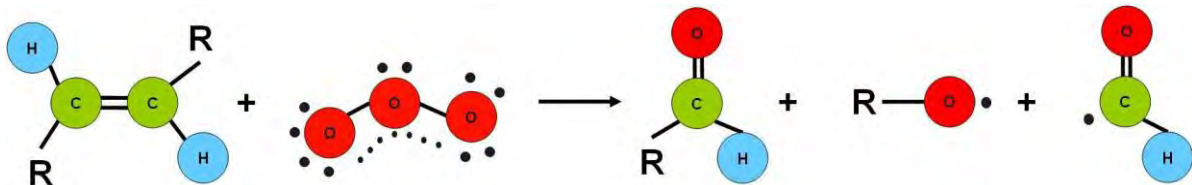


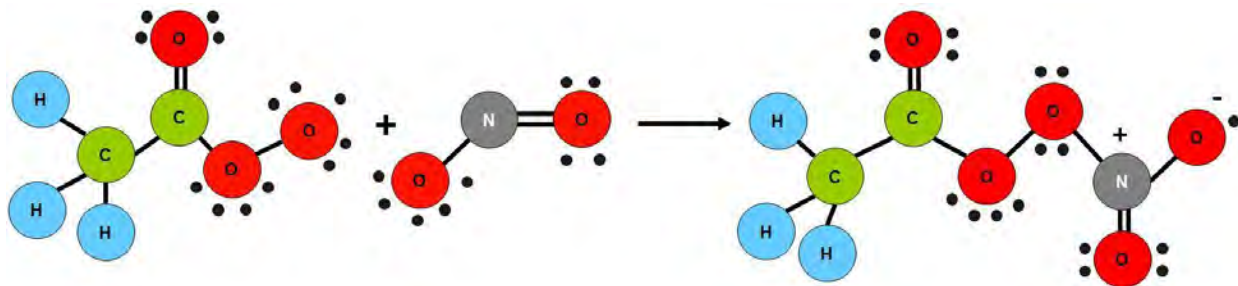
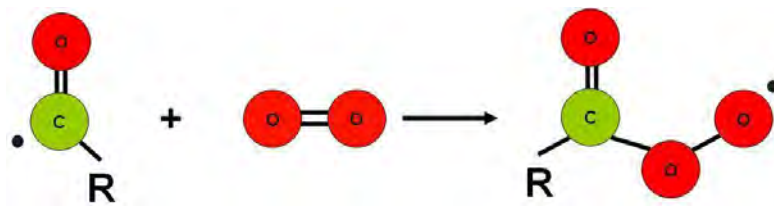
## 4.7 NITRATOS DE PEROXIACILO

Los nitratos de peroxiacilo son compuestos complejos que se encuentran constituyendo el smog fotoquímico. Son formados a partir de hidrocarburos parcialmente oxidados que reaccionan con oxígeno, ozono y óxidos de nitrógeno. Los hidrocarburos que presentan la máxima reactividad en la producción de nitratos de peroxiacilo son las olefinas y los hidrocarburos aromáticos.

Cuando el grupo "R" es metilo, el producto formado es el nitrato de peroxiacetilo (PAN), que se considera el mejor indicador del grado de contaminación fotoquímica. Es un mejor indicador que el ozono porque su concentración en la atmósfera en condiciones normales es prácticamente cero (15). Aún en concentraciones de 0.001 ppm el PAN es un poderoso lacrimógeno, causa dificultad a la respiración por irritación alveolar. También produce daños en las cosechas y puede inactivar algunas enzimas (19).

Los mecanismos principales se describen en seguida:







## 4.8 CARBONILOS

Los compuestos cuya estructura presentan grupos carbonilo, intervienen en, y son afectados por, la química atmosférica. Muchos son contaminantes primarios provenientes de combustiones incompletas. También son compuestos secundarios frecuentes, ya que son intermediarios obligatorios en la fotooxidación de otros compuestos orgánicos en el aire. En la atmósfera, los compuestos carbonílicos pueden adsorberse sobre partículas de tizne, disolverse en la lluvia o niebla debido a su polaridad. Su participación en reacciones fotoquímicas representa una fuente muy importante de radicales libres **(20)**.

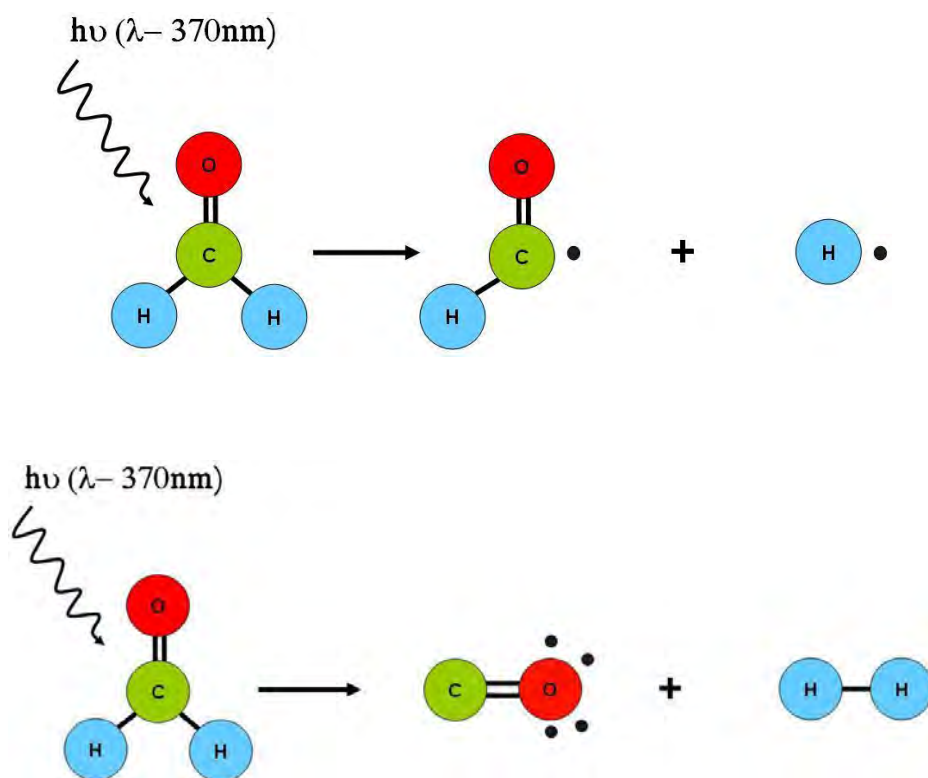
En el área de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México estos compuestos se generan mayoritariamente debido a fuentes antropogénicas como industrias diversas, incineración de basura, la explotación de combustibles fósiles y la operación de vehículos automotores. Los incendios forestales son fuente natural de compuestos carbonílicos. Entre los compuestos de este tipo son dominantes el formaldehído y el acetaldehído, aunque también se encuentran el propionaldehído y butiraldehído **(21)**.

Los aldehídos tienen efectos nocivos para la salud. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se ha determinado que la vida promedio del formaldehído es de 4 a 15 horas, mientras que para el acetaldehído el intervalo se halla entre 27 y 204 horas; tiempos, ambos suficientes para que estos aldehídos puedan causar malestar en los seres vivos **(20)**.

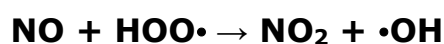
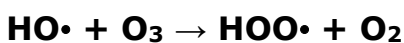
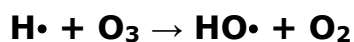
El formaldehído es el carbonílico más abundante en la atmósfera contaminada y estudios específicos han demostrado que posee la mayor contribución al riesgo potencial a la salud. Es irritante de las vías aéreas superiores, de los ojos y piel, y los individuos con asma son más sensibles a los efectos de su inhalación. Se presenta en forma gaseosa a temperatura ambiente y ha sido clasificado como cancerígeno.

El acetaldehído es un líquido con baja presión de vapor, es irritante y probablemente cancerígeno. Ambos presentan concentraciones más altas durante el día a las horas de mayor actividad humana y vehicular, cuando son descompuestos también por la radiación solar del ultravioleta cercano.

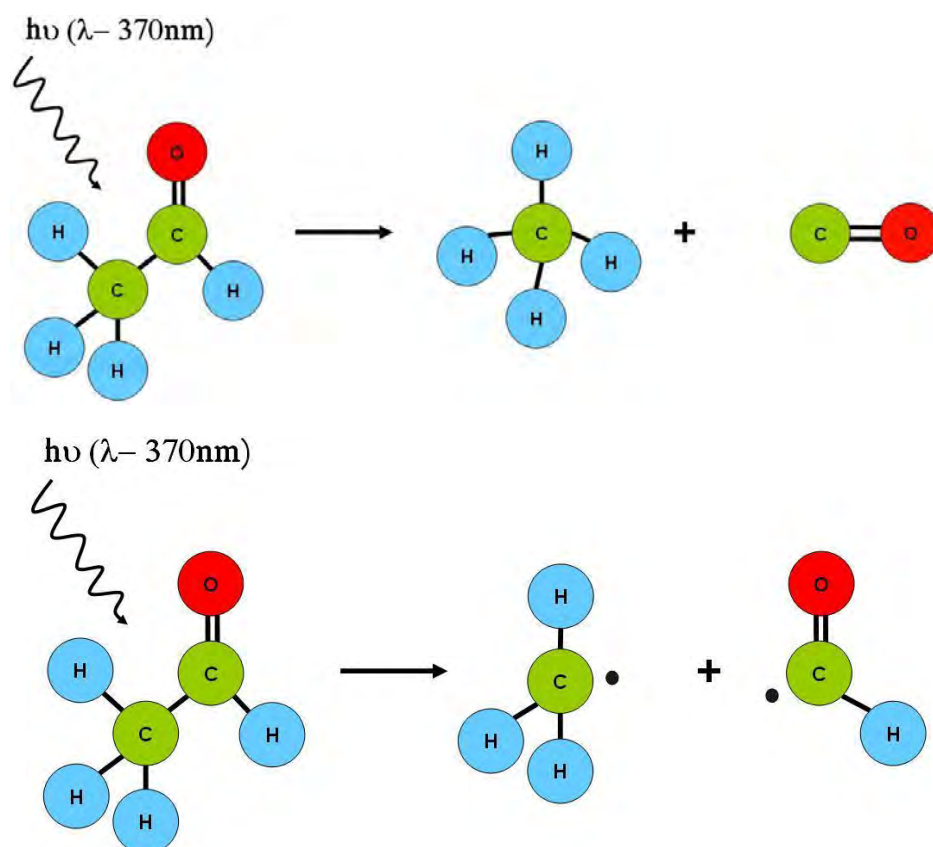
El formaldehído sufre fotólisis de acuerdo con dos vías:

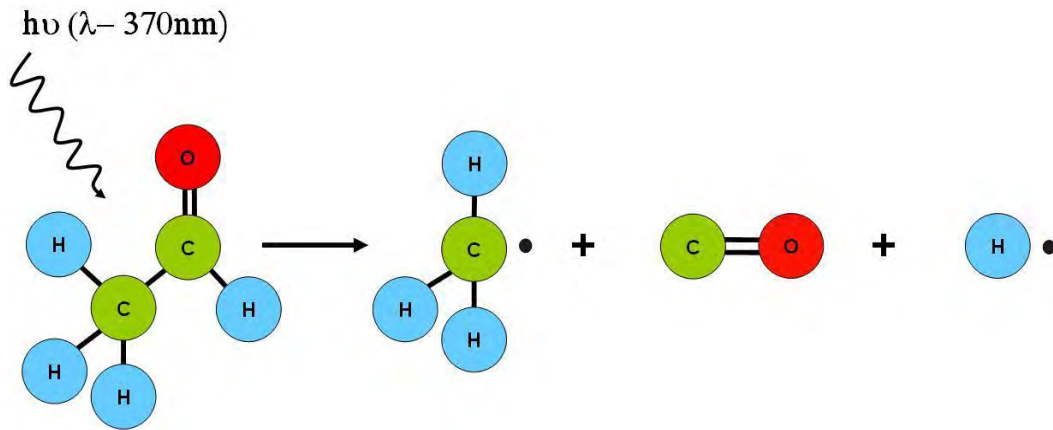


En la primera reacción produce radicales formilo e hidrógeno, y en la otra, hidrógeno molecular y monóxido de carbono. La importancia está en que el radical hidrógeno es iniciador de otros radicales muy reactivos: con  $O_3$  forma el radical hidroxilo más oxígeno molecular; este radical hidroxilo, en exceso de ozono, da el radical hidroperoxilo, el cual, como hemos visto, en presencia de  $NO$  produce nuevamente al radical  $HO$ , según la siguiente secuencia:

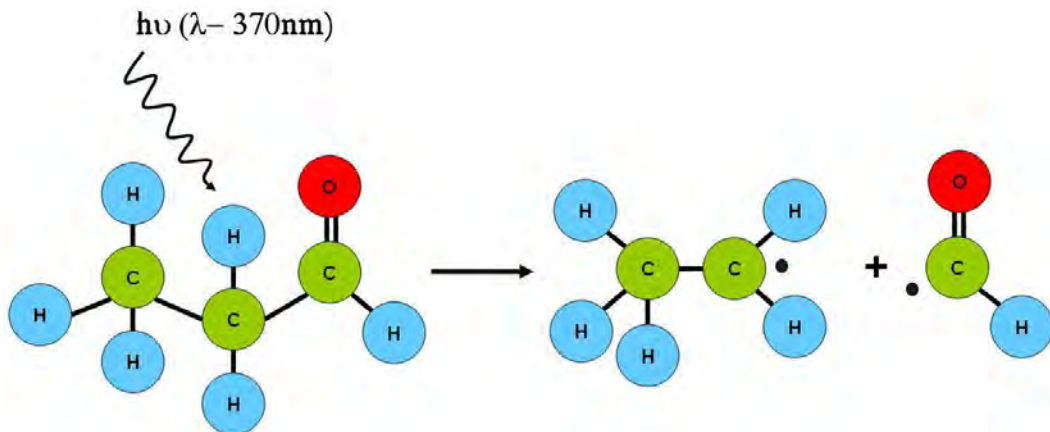


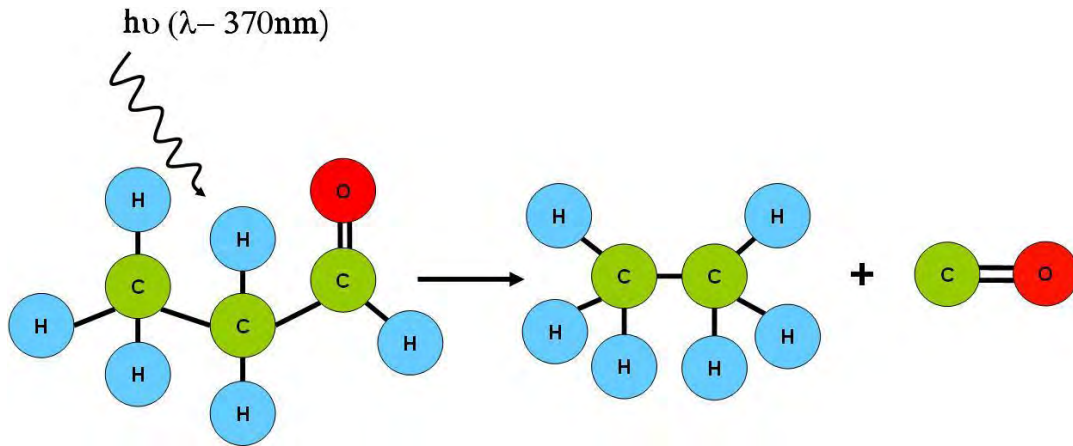
El acetaldehído sufre tres caminos de descomposición fotolítica:





Por su parte el propionaldehído también genera radicales libres. Su concentración en la atmósfera es menor que la de sus dos parientes, por lo que la proporción de radicales formados también es más pequeña. La fotodisociación puede efectuarse de dos maneras, resultando cuatro posibles productos:





## 4.9 PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

Otro indicador importante del grado de contaminación del aire es la concentración de materia particulada suspendida, materia que forma aerosoles atmosféricos. Las partículas son sólidas o líquidas, no sedimentan fácilmente y tienen dimensiones mayores a las moleculares, poseyendo además propiedades morfológicas, químicas, físicas y fisicoquímicas muy variadas. Se definen como partículas suspendidas totales (PST) a la masa total de material particulado que se encuentra suspendido en el aire atmosférico formando una dispersión coloidal (aerosol). Este material puede ser contaminante primario o secundario. Las fuentes primarias de partículas pueden ser igualmente naturales o antropogénicas, como son cenizas volcánicas, sal que se desprende de la espuma del mar, erosión de los suelos, procesos industriales, prácticas de uso de suelos, combustiones diversas (22), así como la condensación de vapores a altas temperaturas. Las partículas secundarias se forman a partir de reacciones químicas en donde están involucrados precursores en fase gaseosa. La formación de partículas secundarias puede dar origen a partículas nuevas o a adición de material a partículas preexistentes.

La nucleación y la coagulación son los procesos involucrados en la formación de material particulado como contaminante secundario. El primero es la condensación de especies con baja presión de vapor para formar una nueva partícula. La nucleación homogénea ocurre cuando los gases forman la partícula sin intervención de una superficie existente; la nucleación heterogénea forma las partículas nuevas sobre una superficie previa **(23)**. La coagulación por su parte se lleva a cabo cuando dos partículas chocan y se quedan adheridas una a la otra (coalescencia). Esta vía afecta principalmente a las partículas más pequeñas.

El diámetro aerodinámico de una partícula es una de sus propiedades físicas más importantes, siendo en realidad una aproximación, al considerar que las partículas son esferas perfectas.

El diámetro aerodinámico se define como el diámetro de una esfera de densidad de  $1 \text{ g/cm}^3$ , que tiene la misma velocidad de sedimentación gravitacional que la partícula en cuestión en el mismo medio. Es importante también el tiempo de residencia del aerosol en la atmósfera, el cual varía desde algunos días hasta varias semanas. Los mecanismos de remoción de los aerosoles son la deposición seca, es decir, la deposición en la superficie de la Tierra y la deposición húmeda, que es su incorporación dentro de las nubes durante la formación de precipitación **(22)**.

Se ha demostrado que la composición química en los aerosoles **atmosféricos con diámetro aerodinámico entre 0.01 y 10  $\mu\text{m}$  se** compone de nitratos y sulfatos con sus ácidos correspondientes, amonio, carbono orgánico, sal de mar y agua. Estudios realizados en la Ciudad de México indicaron que durante el día los aerosoles de diámetro menor a 2.5 micrómetros tienen una composición química de 15 % de sulfatos, 16 % de nitratos, 20 % de carbono orgánico y 49 % de otros compuestos. Dentro de éstos, los nitratos, los sulfatos y el amonio generalmente son secundarios formados de sus precursores en fase gaseosa.

**En general, las partículas menores de 2.5  $\mu\text{m}$  de diámetro se conocen** como partículas finas, mientras que las de mayor diámetro se denominan partículas grandes o gruesas **(22)**. En la fracción gruesa el polvo suspendido es una fuente importante de partículas donde también abundan especies como el calcio, el magnesio, el aluminio, la sílice, el hierro y el potasio. El sulfato, el nitrato y el amonio están presentes en ambas fracciones.

Los efectos que ocasionan las partículas suspendidas en el aire son importantes, tanto en el estado del tiempo como en el clima y en la salud. Estos efectos dependen de la composición y del tamaño del material particulado. Al interactuar con la radiación solar afectan a la temperatura del medio, mediante los procesos de absorción y dispersión de la luz, y también con la formación de nubes. Las corrientes de aire transportan a través de la atmósfera al material particulado a zonas distantes respecto a las que lo produjeron, provocando los cambios en otros puntos de la Tierra y contribuyendo al cambio climático global.

**Las partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 10  $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub> o fracción inhalable)**, son las que penetran al tracto respiratorio, tardan más en sedimentar por lo que la exposición aumenta; al penetrar hasta los pulmones se adsorben sobre las células provocando altos riesgos a la salud **(24)**.

**En especial las partículas con diámetro aerodinámico inferior a 2.5  $\mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub> o fracción respirable)** representan un elevado potencial dañino a la salud de los organismos al llegar a los alveolos pulmonares, causando reducción en la función pulmonar y contribuyendo al aumento de enfermedades respiratorias graves y muerte prematura.

La exposición de la población a estas partículas ha generado gran preocupación en los últimos años porque con mayor frecuencia aparecen estudios que demuestran una asociación significativa entre la concentración ambiental de partículas de la fracción respirable y la mortalidad y morbilidad, además de que parece no existir una concentración mínima en la cual ya no se detecten impactos en la salud. Por otra parte, la fracción  $PM_{2.5}$  al tener un tamaño situado en el intervalo de longitud de onda de la luz, contribuye a la disminución de la visibilidad y provocan cambios en la temperatura ambiente al difundir por dispersión la radiación incidente **(25)**.



## **Capítulo 5**

### **NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE**

La calidad del aire es actualmente tema central en el programa gubernamental de la mayoría de los países de todo el mundo. Organizaciones internacionales como la OMS (Organización Mundial de la Salud) recomiendan estándares para los contaminantes del aire que pueden tener efectos en la salud. Las Naciones Unidas tratan el tema de la calidad del aire en la Agenda 21, programa oficialmente llamado Programa 21, que es un plan detallado de acciones que deben efectuarse a nivel nacional, estatal y local por entidades de la ONU. Algunas otras organizaciones han estado trabajando en una serie de protocolos internacionales. Los estándares de concentraciones máximas para los contaminantes son propios de cada gobierno, y pueden variar de país a país, sin embargo, se está intentando en lo posible unificar las normas.

El mejoramiento de la calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se ha apoyado en el marco legal vigente en los Estados Unidos Mexicanos partiendo de la Constitución Política, donde se manifiesta en el párrafo IV de su artículo 4° que toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar. Para dar cumplimiento a este precepto, México cuenta con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) que establece la responsabilidad para que los estados sean los que formulen, conduzcan y evalúen la política ambiental. En concordancia, el Gobierno de la Ciudad de México cuenta con la Ley Ambiental de Protección a la Tierra del Distrito Federal, y su reglamento respectivo.

Esta ley establece que la institución responsable de su aplicación será la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Esta Ley establece también, que tiene facultades para coordinarse con la federación, entidades federativas y municipios conurbados para la planeación y ejecución de acciones en materia de gestión de la calidad del aire.

Con base en esto, la SMA CDMX integra y mantiene actualizado el inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera, opera un sistema de monitoreo de la calidad el aire e instrumenta el programa de verificación de emisiones de automotores en circulación.

Asimismo, para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, la SMA CDMX, en coordinación con la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno Federal, formuló y está aplicando el Programa de Mejoramiento de la Calidad del Aire en la ZMCM, además de contar con un Comité de Normalización donde se elaboran y aprueban las normas de jurisdicción local.

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se miden en forma continua los contaminantes criterio: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, partículas suspendidas totales (PST), partículas suspendidas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM<sub>10</sub>), partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros de diámetro (PM<sub>2.5</sub>) y plomo. Para cada uno de estos contaminantes se cuenta con un estándar o norma de calidad del aire. Las normas de calidad del aire establecen las concentraciones máximas de contaminantes en el ambiente que no deberían sobrepasarse para que pueda garantizarse la protección adecuada a la salud de la población general y la de los grupos más susceptibles como niños, ancianos y las personas con enfermedades respiratorias crónicas, entre otros.

El nivel de cada contaminante se expresa en unidades IMECA (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire), según el cual, a la concentración máxima que señala la Norma de Calidad del Aire para cada contaminante le corresponden 100 puntos IMECA.

Por lo tanto, la gente sabe que cuando el ozono o las partículas o algún otro contaminante rebasa los 100 puntos IMECA, es que se ha rebasado la norma correspondiente, y la calidad del aire se considera como mala. Por arriba de los 200 puntos es extremadamente mala **(30)**. Actualmente, el índice de calidad del aire se fundamenta en la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006 en donde se establecen los requisitos para su cálculo y difusión.

Se evalúa la calidad del aire registrando el número de días al año en los que la concentración de contaminantes excede los límites establecidos en las normas. En el caso de los oxidantes fotoquímicos y en particular el ozono, han alcanzado niveles que sobrepasan su norma de calidad del aire, en forma recurrente, hasta en el 60 % de los días del año

<b>CATEGORÍAS (PUNTOS IMECA)</b>	<b>CALIDAD DEL AIRE</b>	<b>RECOMENDACIONES Y RIESGOS PARA LA SALUD</b>
I.        0 a 50	Buena	<i>Recomendaciones: Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.</i>
II.       51 a 100	Regular	<i>Recomendaciones: Se pueden llevar a cabo actividades al aire libre.</i>  <i>Riesgos: Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias o cardiovasculares.</i>
III.      101 a 150	Mala	<i>Recomendaciones: Evite las actividades al aire libre, esté atento a la información de calidad del aire. Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardíacos.</i>  <i>Riesgos: Posibles efectos adversos a la salud, en particular niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias</i>
IV.      151 a 200	Muy Mala	<i>Recomendaciones: Evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas, no realice actividades al aire libre, esté atento a la información de la calidad del aire. Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardíacos.</i>  <i>Riesgos: Efectos adversos a la salud de la población en general. Se agravan los síntomas en niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias.</i>
V.       > 200	Extremadamente Mala	<i>Recomendaciones: Proteja su salud, no salga de casa o permanezca en lugares cerrados. Esté atento a la información de la calidad del aire, siga las instrucciones de Protección Civil y las autoridades de salud. Acuda inmediatamente al médico o solicite servicio de emergencia si presenta síntomas respiratorios o cardíacos.</i>  <i>Riesgos: Efectos graves a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones en niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias.</i>

**TABLA 5. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE**

## 5.1 SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO

La información necesaria para la elaboración del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire es recabada por el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) y su Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). El SIMAT vigila y evalúa el estado de la calidad del aire en el Valle de México, e informa a los habitantes sobre los niveles de contaminación del aire. En la actualidad el SIMAT está integrado por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), que cuenta con 29 estaciones distribuidas por toda la ZMCM; la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) que consta de 11 estaciones; la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) que tiene 16 puntos de muestreo y la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), que posee 19 estaciones. Además, el SIMAT cuenta con un Laboratorio Móvil de monitoreo atmosférico para regiones donde no se cuenta con estaciones de monitoreo (27). También forman parte del SIMAT un laboratorio de estándares, un Laboratorio de Análisis Ambiental y un Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA).

La RAMA procesa los resultados de manera electrónica y los transmite al CICA, en donde se difunden como Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) para ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, y partículas suspendidas. Las estaciones están ubicadas donde se espera que se produzcan los índices más altos de contaminación. La Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, a través de la Dirección de Monitoreo Atmosférico, integró los diferentes programas de monitoreo existentes, con la finalidad de homologar y unificar los procedimientos de medición, transmisión, validación y difusión de la información bajo un esquema de mejora continua basado en el Sistema de Gestión de Calidad Norma ISO 9001:2000 (28). Con la operación permanente del SIMAT, se obtienen mediciones de los contaminantes cada hora, y muestreos de partículas suspendidas de 24 horas cada seis días.

El análisis del estado de los contaminantes atmosféricos permite inferir acerca del impacto que tiene la situación de la calidad del aire en la salud de la población, de acuerdo con los límites máximos definidos en las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental (29).

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>NORMA</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>
<b>OZONO</b>	Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O <sub>3</sub> ) en el aire ambiente y criterios para su evaluación.	Establece 2 valores límite de sus concentraciones ambientales, para efecto de la protección a la salud de la población más susceptible. Así, la concentración de O <sub>3</sub> debe ser menor o igual a 0.095 ppm como promedio horario, el cual nunca deberá ser rebasado. Además, la concentración del promedio móvil de 8 horas de O <sub>3</sub> , debe ser menor o igual a 0.070 ppm, tomado como el máximo en un periodo de 1 año calendario.
<b>MONÓXIDO DE CARBONO</b>	Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.	Establece que la concentración de monóxido de carbono, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de 11.00 ppm o lo que es equivalente a 12 595 µg/m <sup>3</sup> en promedio móvil de ocho horas una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible
<b>DIÓXIDO DE AZUFRE</b>	Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.	Define que la concentración de dióxido de azufre como contaminante atmosférico no debe rebasar el límite máximo normado de 288 µg/m <sup>3</sup> o 0.110 ppm promedio en 24 horas, una vez al año; que no debe rebasar el límite máximo normado de 66 µg/m <sup>3</sup> o 0.025 ppm promedio anual, y que el promedio de ocho horas debe ser menor o igual a 524 µg/m <sup>3</sup> , o 0.200 ppm promedio horario para no ser rebasado dos veces al año.
<b>DIÓXIDO DE NITRÓGENO</b>	Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ). Valor normado para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.	Determina que la concentración de dióxido de nitrógeno, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo normado de 0.21 ppm o lo que es equivalente a 395 µg/m <sup>3</sup> , en una hora una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible.
<b>PARTÍCULAS SUSPENDIDAS</b>	NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación.	Establece dos valores límite, tanto para las concentraciones ambientales de las PM <sub>10</sub> como de las PM <sub>2.5</sub> . Para partículas menores a 10 micrómetros se tiene el límite de 75 µg/m <sup>3</sup> , como promedio de 24 horas y de 40 µg/m <sup>3</sup> como promedio anual. A su vez, para partículas menores a 2.5 micrómetros son 45 µg/m <sup>3</sup> , como promedio de 24 horas y 12 µg/m <sup>3</sup> como promedio anual.

**TABLA 6. NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE SALUD AMBIENTAL**

## 5.2 INVENTARIO DE EMISIONES

El Gobierno de la Ciudad de México, a través de la Secretaría del Medio Ambiente, realiza mediciones diarias de la calidad del aire de la ZMVM y mediante diversas metodologías, elabora y actualiza el *Inventario de Emisiones Contaminantes y de Efecto Invernadero*, con la finalidad de conocer el origen, la cantidad y el tipo de emisiones que se generan y liberan a la atmósfera **(30)**.

Es un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire, en él se reportan y analizan de manera conjunta, los contaminantes criterio, los contaminantes tóxicos y los compuestos de efecto invernadero que se generan, con lo que se puede estructurar una concepción más amplia e integral de cómo mejorar la calidad del aire de la metrópoli.

El inventario de emisiones constituye la base para la elaboración del Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire (PROAIRE), y su realización y actualización bienal, permite evaluar éste y otros programas y proyectos dirigidos a la reducción de las emisiones contaminantes y de efecto invernadero, así como al logro de una mejor calidad del aire de la Ciudad de México.

## **5.3 PROAIRE 2011-2020**

El Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México es un instrumento de gestión ambiental en el que los gobiernos locales que integran la Comisión Ambiental Metropolitana, proponen una planeación participativa que relaciona e integra estructuralmente variables y procesos urbanos, de transporte, económicos y sociales, con los procesos de generación de contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero.

En el PROAIRE 2011-2020 se resumen los estudios más recientes sobre el impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población de la zona que nos ocupa. Presenta una estimación de las emisiones a la atmósfera, con la medición, el registro espacial y temporal de los contaminantes. Se identifican las fuentes de generación simultánea o multicontaminantes más importantes **(31)**.

Presenta un diagnóstico del estado actual de la calidad del aire y de las tendencias de los contaminantes con relación al grado de cumplimiento de los límites establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas de salud ambiental. Hace también un análisis de las experiencias que se han acumulado en gestión ambiental con la aplicación de programas en la ZMVM desde 1990 a la fecha.

Se realiza un análisis ecosistémico desarrollado del problema de la contaminación en la ZMVM explorando la relación entre la estructura urbana y el sistema de generación de contaminantes. Simula la generación de emisiones al 2020 y modela la calidad del aire para ese año y propone nuevas alternativas para el manejo de la calidad del aire, constituyendo su eje rector con 8 estrategias:

1. Ampliación y refuerzo de la protección a la salud
2. Disminución estructural del consumo energético de la ZMVM
3. Calidad y eficiencia energética en todas las fuentes



4. Movilidad y regulación del consumo energético del parque vehicular
5. Cambio tecnológico y control de emisiones
6. Educación ambiental, cultura de la sustentabilidad y participación ciudadana
7. Manejo de áreas verdes, reforestación y naturación urbanas
8. Fortalecimiento institucional e investigación científica cuyo cumplimiento se busca, a través de la aplicación de 81 medidas y 116 acciones.

## **Capítulo 6**

# **CONCLUSIONES**

Las características orográficas, topográficas y de variabilidad climática en la zona de la Cuenca de la Ciudad de México, generan el marco propicio para el desarrollo del fenómeno conocido como dinámica atmosférica, en el cual las condiciones climáticas de alta humedad, conjuntamente con altas temperaturas y la variación de las presiones favorecen los procesos de dinamismo y de sinergismo en la atmósfera, donde la gran cantidad de contaminantes primarios arrojados, hallan condiciones favorables para formar una serie de sustancias, hasta no hace mucho desconocidas, mediante reacciones químicas y fotoquímicas, que abren el panorama a nuevas investigaciones. Aunque existen procesos que disminuyen o dispersan las sustancias contaminantes, como es el caso del viento o las precipitaciones, también hay los que acumulan sustancias nocivas como la humedad atmosférica. La dinámica atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, es una suma de procesos y condiciones que crea un sistema complejo, donde la contaminación del aire provoca consecuencias indeseables y potencialmente peligrosas en todo momento, por ejemplo, a bajas temperaturas y en atmósferas secas, la dinámica atmosférica puede provocar situaciones alarmantes por los efectos que tienen las partículas en la salud; asimismo en otras condiciones provocará la formación de lluvia ácida, que es la mayor fuente de deterioro estructural y natural.

Las medidas que han sido implementadas para disminuir la emisión de contaminantes a la atmósfera, hasta el momento y desde ya hace varias décadas, han arrojado resultados parcialmente satisfactorios, y es claro que falta mucho por avanzar en el rubro de gestión ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, con la aplicación de acciones más contundentes y eficaces, así como medidas correctivas para el deterioro ambiental que ha sufrido la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

La autoridad competente reporta que el ozono, en promedio, rebasa la norma el 60 % de los días del año actualmente y en el caso de las partículas suspendidas menores a 10 micrómetros se rebasa el límite en alrededor del 5 al 10 % de los días muestreados. Sucede en forma similar con las partículas menores a 2.5 micrómetros, las cuales incumplen la norma en un 5 % de los días muestreados. Lo anterior sugiere una revisión cuidadosa de los criterios con base en los cuales se han establecido las normas para disminuir las emisiones y para el mejoramiento de la calidad del aire. El PROAIRE 2011-2014 presenta una serie de medidas que buscan impulsar las reformas e innovaciones necesarias para un verdadero avance en este rubro.

Asimismo, y probablemente con mayor importancia, se requiere atraer el interés de los habitantes de la ciudad, en el tema de la contaminación atmosférica y fortalecer la participación ciudadana en la reducción de la generación de emisiones contaminantes. Es necesario brindar una educación que garantice el aprendizaje más profundo de los puntos fundamentales del problema de contaminación atmosférica en la Ciudad de México y su zona conurbada, haciendo énfasis en los procesos físicos, químicos y fisicoquímicos que se involucran, haciéndolo una parte esencial en la cultura de todo ciudadano para su inclusión como agente participativo en la ejecución de medidas preventivas y correctivas de la contaminación, y más aún, para todos aquellos que desean convertirse en expertos en alguna rama técnica o científica orientada de manera franca a la generación de acciones contra el deterioro ambiental.

## REFERENCIAS

1. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal. 2006. **GESTIÓN AMBIENTAL DEL AIRE EN EL DISTRITO FEDERAL. AVANCES Y PROPUESTAS 2000-2006.** México.
2. Bravo Álvarez H. Torres Jardón R., 2007. **EL AIRE EN LA CIUDAD DE MÉXICO: LA GUÍA AMBIENTAL.** Unión de Grupos Ambientalistas, I. A. P. México.
3. García Martínez, Rocío. 2007. **DETERMINACION DE METALES PESADOS EN LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL DE UNA ZONA URBANA (CIUDAD DE MÉXICO) Y DE UNA ZONA RURAL (RANCHO VIEJO, EDO. DE MÉXICO).** Tesis de doctorado. UNAM. México.
4. Figueruelo, Juan E.; Marino Dávila, M. 2004. **QUÍMICA FÍSICA DEL AMBIENTE Y DE LOS PROCESOS MEDIOAMBIENTALES.** REVERTÉ. España.
5. Brown, Theodore L.; LeMay, H. Eugene.; Bursten, Bruce E.; Burdge, Julia R. 2004. **QUIMICA LA CIENCIA CENTRAL, 9 Ed.** Pearson Educación de México. México.
6. Castro M.; González R.; Portela A. 1991. **PARAMETRIZACIÓN DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA EN LOS MODELOS NUMÉRICOS DE PRONÓSTICO METEOROLÓGICO.** Revista "Física de la Tierra", Número 3. Departamento de Geofísica y Meteorología. Facultad de Física. Universidad Complutense de Madrid. España.
7. Núñez Crespi, Sylvia. 2002. **ALTURA DE LA CAPA DE MEZCLA: CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y APLICACIÓN DE UN MODELO METEOROLÓGICO PARA EL ESTADO DE SU EVOLUCIÓN DIURNA.** Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense de Madrid. España.

8. Jiménez Cisneros, Blanca E. 2004. **LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN MÉXICO: CAUSAS, EFECTOS Y TECNOLOGÍA APROPIADA**, LIMUSA Noriega Editores, México.
9. Jáuregui, E. 2000. **EL CLIMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO**. Temas Selectos de Geografía de México. Textos Monográficos. Plaza y Valdez Editores. México.
10. Secretaría de Desarrollo Social. Consejo Nacional de Población. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. **DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS METROPOLITANAS DE MÉXICO 2015**. 2015. México.
11. Lacy, Rodolfo. 1993. **LA CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE MÉXICO**. El Colegio de México, México.
12. Negrete Salas, María E. 2000, **DINÁMICA DEMOGRÁFICA EN LA CIUDAD DE MÉXICO: LA CIUDAD DE MÉXICO EN EL FIN DEL SEGUNDO MILENIO**. El Colegio de México, México.
13. Bravo Álvarez, Humberto. Torres Jardón, Ricardo. 2007. **PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS DEL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. FOTOQUÍMICA DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO: REVISIÓN HISTÓRICA**. Seminario de Aire y Política: acuerdos y desacuerdos en torno a la contaminación atmosférica de la Ciudad de México. Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano. El Colegio de México. México.
14. Lacy, Rodolfo.; López, Mónica.; Ortega, José. 2000. **CONCIENCIA CIUDADANA Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: ESTADO DE SITUACIÓN (MÉXICO)**. CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.

15. Bravo Álvarez, Humberto.; Sosa Echeverría, Rodolfo. 1988. **INCREMENTO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR OZONO EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.** Revista Ingeniería Ambiental 1 (1): 8-14. MEXICO.
16. Ávila Mendoza, Javier.; Genescá Llongueras, Joan. 1996. **MÁS ALLÁ DE LA HERRUMBRE.** Fondo de Cultura Económica. México.
17. Secretaria del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal. 2008. **SERIE DE ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO. ESTADO DE LA LLUVIA ÁCIDA EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO.** México.
18. Rodríguez Montellano, Armando. 2000. **LA LLUVIA ÁCIDA Y SUS EFECTOS.** Recopilación bibliográfica. Universidad Mayor de San Simón UMSS. Facultad de Ciencias y Tecnología. Bolivia.
19. Rojas Rodríguez, Horacio.; Schilman, Astrid. 2013. **LA SALUD AMBIENTAL EN MÉXICO: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS.** Instituto Nacional de Salud Pública. Cuernavaca, Morelos. México.
20. Báez P, Armando. Ma. del Carmen Torres B. y Rocío García M. (2009) **"Carbonilos en la Atmósfera y sus efectos en la salud"**. Rev. Ciencia y Desarrollo. Volumen 35, Núm. 35. Págs. 8-17.
21. García Martínez, Rocío. 2001. **"CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE ALDEHÍDOS EN AMBIENTES INTRAMUROS EN LA CIUDAD DE MÉXICO"** Tesis de maestría. UNAM. México.
22. Seinfeld J. H, Pandis S. N. 1995. **ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND CLIMATE OF THE ATMOSPHERE.** Van Nostrand Reinhold. New York. USA.
23. Jacobson, Z M. 2002. **ATMOSPHERIC POLLUTION. HISTORY, SCIENCE AND REGULATION.** Cambridge University. UK.

24. Mugica Álvarez, V. 2009. **COMPOSICIÓN DE PM Y SUS FUENTES DE EMISIÓN.** Universidad Autónoma Metropolitana. México.
25. Molina, Luisa.; Molina, Mario. (Editors). 2002. **AIR QUALITY IN THE MEXICO MEGACITY. AN INTEGRATED ASSESSMENT.** Kluwer Academic Publishers. Dordrecht-Boston-Londres.
26. Seinfeld J. H, Pandis S. N. 1988. **ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS: FROM AIR POLLUTION TO CLIMATE CHANGE.** John Willey, New York. USA.
27. Perevochtchikova, María. 2009. **LA SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.** Estudios Demográficos y Urbanos. 24 [3]. El Colegio de México. México.
28. IECCZMCM-SMA, 2006. **"INVENTARIO DE EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO"**. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. México.
29. Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Sistema de Monitoreo Atmosférico. 2008. **INFORME DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO. ESTADO Y TENDENCIAS 1990-2007.** PDF. México.
30. **INVENTARIO DE EMISIONES DE LA CDMX 2014, Contaminantes Criterio, Tóxicos y de Efecto Invernadero.** Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. México.
31. Comisión Ambiental Metropolitana. 2011. **PROGRAMA PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO 2011-2020.** México.