



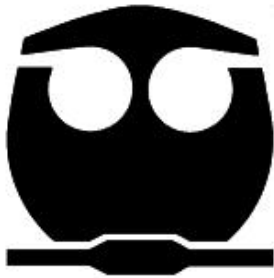
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**DINÁMICA DE METALES PESADOS Y CORROSIÓN  
ATMOSFÉRICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA  
CIUDAD DE MÉXICO**

**TRABAJO MONOGRÁFICO  
DE ACTUALIZACIÓN  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
Q U Í M I C O  
P R E S E N T A  
ANTONIO HERNÁNDEZ MARTÍNEZ**



MÉXICO D.F.

2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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:** ARMANDO MARÍN BECERRA.  
**VOCAL:** AURORA DE LOS ÁNGELES RAMOS MEJÍA  
**SECRETARIO:** ROCÍO GARCÍA MARTÍNEZ  
**1er. SUPLENTE:** MARÍA ISABEL GRACIA MORA  
**2° SUPLENTE:** MARÍA KENIA ZAMORA ROSETE

**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.

**ASESOR DEL TEMA:**

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

**SUSTENTANTE:**

**Antonio Hernández Martínez** \_\_\_\_\_

## AGRADECIMIENTOS

*A la UNAM*

*Por la educación de excelencia brindada por los profesores de la Facultad de Química, por las becas y apoyos otorgados durante mis estudios.*

*A la Dra. Rocío García Martínez.*

*Por su asesoría y facilidades prestadas en la redacción de este trabajo, por sus enseñanzas, amistad y confianza brindada, por preocuparse por la superación académica de sus estudiantes.*

*Al Centro de Ciencias de la Atmósfera*

*Y al Laboratorio de Química Atmosférica por permitirme utilizar las instalaciones para la realización de este trabajo.*

*A los miembros del H. Jurado.*

*A la Dra. Aurora de los Ángeles Ramos Mejía y al Dr. Armando Marín Becerra, por su dedicación al revisar este trabajo, por sus comentarios y correcciones realizadas.*

## DEDICATORIAS

*A mi mamá*

*Maura Martínez, que te preocupaste día a día por mis hermanos y por mi, que te desvelaste y nos atendiste para nuestro bienestar, sacrificando tu tiempo en nosotros, y que eres parte fundamental en este logro, gracias mamá.*

*A mi papá*

*Anastasio Hernández, por tu entereza, valor y fortaleza que has tenido para estar a nuestro lado dándonos jalones de orejas y consejos que me han permitido llegar hasta aquí. Cada logro te lo dedico porque eres mi inspiración, gracias papá.*

*A mis hermanos*

*Roger, por los momentos divertidos, travesuras y compañía, porque sin ti no sería tan ocurrente como tú, tan divertido como tú y sobre todo tan buen hermano como tú, eres parte de esto, gracias carnal.*

*Lalito, porque desde que llegaste fuiste mi fortaleza y mi vitalidad, alegraste nuestro hogar y tus travesuras me recuerdan una niñez conocida y no muy lejana, gracias hermanito.*

*A Mary*

*Porque cada día que pasa sigues ahí apoyándome, acompañándome durante la mayor parte de la carrera, compartiendo los buenos y malos momentos, demostrando lo tenaz que eres y dando los consejos apropiados para seguir adelante. Eres parte esencial de este logro y todo tu sacrificio tiene demasiado valor para mí. Te amo mucho chaparrita, gracias por estar conmigo y gracias a tus papás y hermano por todo su apoyo.*

*A mis colegas y amigos*

*A Ahmed, Selene, Victor, Erandi, Jesus, Israel, Virginia, Luis Enrique, Moises, Eduardo, Karla, Miguel, Cinthia, Eddú, Gustavo, Sergio, Saúl, Oscar Sol, Antonio Soto y algunos más que faltaron, gracias por su compañía y apoyo durante estos años.*

**ÍNDICE**

**INDICE DE TABLAS.....V**

**ÍNDICE DE FIGURAS.....VI**

**CAPITULO I**

**1. INTRODUCCIÓN.....1**

**CAPÍTULO II**

**2. ANTECEDENTES.....3**

2.1. REGIONES ATMOSFÉRICAS.....3

2.2. REACTIVIDAD ATMOSFÉRICA.....4

2.3. OBJETIVO GENERAL.....7

2.4. OBJETIVOS PARTICULARES..... 7

**CAPÍTULO III**

**3. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.....8**

3.1. PRUEBAS DE CORROSIÓN.....11

3.2. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN INTERIORES.....14

**CAPÍTULO IV**

**4. ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (ZMCM) 15**

4.1. TOPOGRAFÍA.....15

---

4.2.	CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y CLIMÁTICAS.....	18
4.3.	TEMPERATURA E INVERSIÓN TÉRMICA .....	21
4.4.	CAPA DE MEZCLADO.....	22
4.5.	SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO (SIMAT).....	23
 <b>CAPÍTULO V</b>		
5.	<b>DINÁMICA DE LOS METALES PESADOS.....</b>	<b>25</b>
5.1.	METALES PESADOS EN AEROSOLES.....	32
5.2.	METALES PESADOS EN LLUVIA.....	37
 <b>CAPÍTULO VI</b>		
6.	<b>SMOG FOTOQUÍMICO.....</b>	<b>39</b>
6.1.	OZONO (O <sub>3</sub> ).....	41
6.2.	CARBONILOS.....	43
6.4.	PRECURSORES DE NO <sub>x</sub> Y SO <sub>x</sub> Y FORMACIÓN DE ÁCIDOS.....	48
6.4.1.	ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO <sub>x</sub> ).....	48
6.4.2.	ÓXIDOS DE AZUFRE (SO <sub>x</sub> ).....	51
6.5.	COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV).....	56
6.6.	NITRATO DE PEROXIACETILO (PAN).....	59
6.7.	LLUVIA ÁCIDA.....	60

**CAPÍTULO VII**

**7. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN AIRE.....63**

7.1. FUENTES ANTROPOGÉNICAS.....63

7.2. FUENTES BIOGÉNICAS.....65

**CAPÍTULO VIII**

**8. CONCLUSIONES.....68**

**CAPITULO IX**

**9. BIBLIOGRAFÍA.....70**

**ANEXO I.....78**

ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS.....78

POBLACIÓN.....78

VIVIENDA.....79

INDUSTRIA.....80

TRANSPORTE.....81

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN.....81

**ANEXO II.....83**

AII.1. NORMAS OFICIALES MEXICANAS NIVELES MÁXIMOS DE EMISIÓN PERMISIBLES DE METALES A LA ATMÓSFERA.....83



**AII.2. NORMAS OFICIALES MEXICANAS SOBRE EMISIÓN DE PARTÍCULAS A LA ATMÓSFERA (NO  
ESPECIFICAN METALES PESADOS).....85**

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1 Contaminantes atmosféricos de importancia.....	6
Tabla 2 Usos, limites de esposición y toxicidad de algunos metales.....	27
Tabla 3 Fuentes de emisión de metales por fuentes naturales y por actividad industrial.....	29
Tabla 4 Metales evaluados para la ZMCM.....	30
Tabla 5 Principales tipos de smog y sus características.....	39
Tabla 6 Emisiones diarias por temporada climática de la ZMCM, 2006.....	40
Tabla 7 Emisiones por día de la semana de la ZMCM, 2006.....	41
Tabla 8 Principales contaminantes emitidos por el uso de distintos combustibles.....	64
Tabla 9 Emisión de contaminantes tóxicos por entidad en la ZMCM, 2006.....	67
Tabla 10 Límite de emisión de metales a la atmósfera por fabricación de cemento.....	83
Tabla 11 Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos.....	84
Tabla 12 Límites máximos permisibles de metales en agua potable (NOM-127-SSA1-1994). Los valores de “limite permisible” incluyen tanto la parte soluble como insoluble.....	84
Tabla 13 Límites máximos permisibles de metales en agua tratada (NOM-003-ECOL-1997 sección 4.3, NOM-001-ECOL-1996 tabla 3).....	84
Tabla 14 Niveles Máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas.....	86

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 Distribución de las regiones atmosféricas.....	4
Figura 2 Velocidad de corrosión a diferentes espesores de película de humedad.....	9
Figura 3 Principales reacciones que llevan a la corrosión de superficies metálicas.....	10
Figura 4 Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 2006.....	16
Figura 5 Altitud en la ZMCM.....	17
Figura 6 Precipitación anual promedio por región 2006.....	19
Figura 7 Rosas de viento anual ZMCM, 2006.....	20
Figura 8 Temperatura mínima, máxima y promedio mensual, 2006.....	21
Figura 9 Representación de situación normal y de inversión térmica en la atmósfera de la ZMCM.....	22
Figura 10 Altura promedio mensual de la capa de mezclado del año 2006.....	23
Figura 11 Contribución porcentual de metales.....	30
Figura 12 Principales emisores de PM2.5 por sector.....	34
Figura 13 Principales emisores de PM10 por sector.....	35
Figura 14 Principales emisores de NOx por sector.....	49
Figura 15 Principales emisores de SO2 por sector.....	52
Figura 16 Principales emisores de COV por sector.....	56
Figura 17 Reacciones y deposición de contaminantes.....	61

Figura 18 Población de la ZMCM por entidad.....79

Figura 19 Nivel de equipamiento de viviendas en la ZMCM.....80

Figura 20 Crecimiento de la flota vehicular en circulación y ventas acumuladas de autos.....81

Figura 21 Uso de suelo y vegetación de la ZMCM.....82

**CAPITULO I****1. INTRODUCCIÓN**

La corrosión atmosférica es una de las causas más frecuentes de la destrucción de materiales de origen estructural y natural. El fenómeno de corrosión atmosférica es la acción conjunta de los factores de contaminación y meteorológicos que determinan la intensidad y naturaleza de los procesos corrosivos, que al actuar simultáneamente, aumentan sus efectos. Es importante mencionar las condiciones de exposición, el tipo de aleación del metal y las propiedades del óxido formado, influyen en los procesos de corrosión.

La contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se deben principalmente a las fuentes antropogénicas fijas y móviles como resultado del crecimiento de la Ciudad de México a partir de los años cuarenta (IECCZMCM-SMA, 2006).

Las especies traza que se forman en la atmósfera se encuentran reducidas; las sustancias que regresan de la atmósfera a la superficie terrestre, usualmente por dilución en las gotas de lluvia o por sedimentación, están altamente oxidadas. La relación entre estas especies reducidas y oxidadas constituyen las reacciones fotoquímicas atmosféricas, dando lugar de esta manera a un ciclo en el cual los gases reducidos son incorporados a la atmósfera, se oxidan fotoquímicamente y regresan a la superficie terrestre. En la actualidad existe certeza acerca de los efectos en la salud provocados por las diferentes especies químicas, la mayoría de los estudios apuntan al impacto que causan los compuestos orgánicos volátiles (COV), especialmente hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), óxidos de

azufre (SO<sub>x</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), partículas (<0,1 μm) y determinados metales como Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V y Zn.

## CAPÍTULO II

## 2. ANTECEDENTES

## 2.1. REGIONES ATMOSFÉRICAS

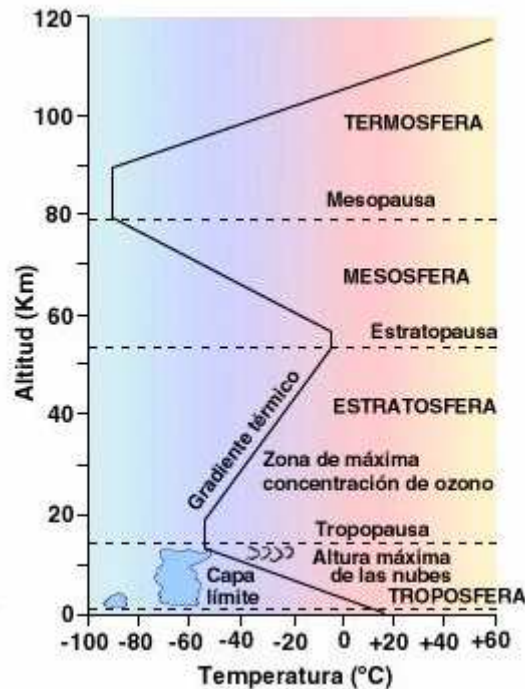
**Tropósfera.** Se extiende de la superficie a la tropopausa, a una altura aproximada de 18 km en los trópicos y 12 km en las latitudes medias. Esta capa contiene alrededor del 85-90% de la masa de la atmósfera, es a menudo dinámicamente inestable con rápidos intercambios verticales de energía y masa asociados con una actividad convectiva. La tropósfera termina en la tropopausa. En la tropopausa la temperatura no cambia con la altitud (PMAC, 2008).

**Estratósfera.** Se extiende desde la tropopausa hasta la estratopausa, a una altura de 50 km de altura, en esta región la temperatura se incrementa con la altitud y termina en la estratopausa. En la estratopausa no hay cambio de temperatura con la altura (PMAC, 2008).

**Mesósfera.** Se extiende desde los 50 km hasta la mesopausa, a 85 km en altitud. En la mesósfera la temperatura decrece rápidamente con la altura, esta capa es muy importante en los procesos fotoquímicos (PMAC, 2008).

**Termósfera.** Es la capa que se encuentra por encima de la mesopausa y se extiende desde los 85 km hasta el espacio exterior. En esta región la temperatura se incrementa con la altitud dependiendo fuertemente de los niveles de la actividad solar. Los gradientes de temperatura son el resultado de la absorción de la energía, debida principalmente a la radiación ultravioleta con una longitud de onda inferior a 1750 Å que es gradualmente absorbida por los gases atmosféricos y gran parte de esta absorción es utilizada para calentar la termósfera (PMAC, 2008).

En la figura 1 se muestra la distribución de las regiones atmosféricas así como la temperatura en cada una de ellas.



**Figura 1** Distribución de las regiones atmosféricas  
(Fuente: <http://meteo.maicas.net/circula.html>)

## 2.2. REACTIVIDAD ATMOSFÉRICA

Un contaminante es definido como toda materia en cualquiera de sus estados físicos y formas que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición o condición natural. Se denominan contaminantes atmosféricos a algunas sustancias, compuestos o formas de energía se encuentran en el aire en concentraciones o niveles tales que pueden causar daños o molestias a personas, animales, vegetación o materiales.

La contaminación se origina por la emisión de compuestos denominados contaminantes primarios, que son el monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos (HC)<sub>n</sub>, aerosoles (partículas sólidas y



líquidas), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), plomo (Pb), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y otros compuestos; estos contaminantes primarios dan lugar a otros compuestos, entre los que cabe destacar los oxidantes fotoquímicos, y se les denomina contaminantes secundarios porque no se emiten, sino que se generan por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. Varios gases controlan en gran parte la capacidad oxidativa de la troposfera, así como la abundancia del ozono ( $\text{O}_3$ ). Las emisiones de  $\text{NO}_x$  y CO son básicamente generadas por las actividades humanas.

Se denomina contaminación fotoquímica a la originada por gases y aerosoles formados en las reacciones producidas en la atmósfera en presencia de la radiación.

En las reacciones fotoquímicas forman una serie de sustancias complejas, cuyos productos de reacción son el  $\text{O}_3$ , aldehídos, peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), nitrato de peroxiacilo (PAN), así como radicales libres que son de importancia en los núcleos urbanos.

En la estratósfera, el  $\text{O}_3$  es el más abundante de los oxidantes fotoquímicos y realiza una función protectora de la vida animal y vegetal de la Tierra, filtrando la radiación ultravioleta de onda corta procedente del sol. En la baja atmósfera, paradójicamente, el  $\text{O}_3$  es un contaminante secundario ya que no es emitido directamente a la atmósfera sino que se produce en la tropósfera baja mediante reacciones fotoquímicas.

El  $\text{H}_2\text{O}_2$  en la troposfera es de gran importancia en la composición química y en los ciclos de la misma, sufriendo cambios por reacciones fotoquímicas involucradas.

Las sustancias enlistadas en la tabla 1 son consideradas como contaminantes atmosféricos importantes, en virtud de su potencial de reaccionar en las condiciones naturales de las capas inferiores de la tropósfera (Botello *et al*, 1996).

El transporte vertical y horizontal en la atmósfera de estos compuestos no solo afecta a las propiedades químicas de cada uno de ellos, sino que también afecta su estado físico, ya que en un gas o metales suspendidos pueden ser absorbidos y transformados por una partícula o aerosol, o por gotas de agua y ser sujetas a remoción.

**Tabla 1** Contaminantes atmosféricos de importancia

<b>Sustancias</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>Gases</b>		
(HC) <sub>n</sub> del petróleo	Si	Si
(HC) <sub>n</sub> halogenados	Si	Si
CO <sub>2</sub>	No	-
SO <sub>x</sub>	si	Si
NO <sub>x</sub>	Si	Si
O <sub>3</sub>	Participa	Si
CO	No	Si
<b>Metales suspendidos</b>		
Pb	-	-
Hg, As	Si	Si
Se, Sb, Zn, Cd	-	-
Cu, Ni, Cr, V	No	-

A= Sujeta a remoción por una partícula o gotas de agua

B= Sujeta a transformación por reacciones fotoquímicas

### **2.3. OBJETIVO GENERAL**

Realizar una investigación monográfica acerca de los factores y los precursores atmosféricos que promueven la corrosión atmosférica y el efecto de la dinámica de los metales pesados presentes en la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

### **2.4. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Analizar la influencia de las condiciones meteorológicas en la ZMCM que alteran las condiciones atmosféricas y el papel que juegan en el fenómeno de corrosión atmosférica.
- Describir la dinámica de los metales pesados y la serie de reacciones fotoquímicas en la ZMCM, que repercuten en la contaminación del aire.
- Establecer la relación entre las reacciones fotoquímicas, corrosión atmosférica y la dinámica de los metales pesados.

## CAPÍTULO III

**3. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA**

La corrosión atmosférica es la oxidación paulatina de las sustancias metálicas por acción de agentes externos. Cualquier parte metálica ya sea en interiores como en exteriores, en los que se incluyan equipos, partes electrónicas, monumentos, etc., expuestos a la atmosfera sufren daños directamente por corrosión y por la interacción de la humedad, gases contaminantes, cloruros y agentes catalíticos como el  $O_3$  y la luz ultravioleta. Estos deterioros dependen de la composición química de la atmósfera (tipos de contaminante y su concentración), variación de la temperatura, así como de la sensibilidad de los materiales y recubrimientos a las condiciones del ambiente.

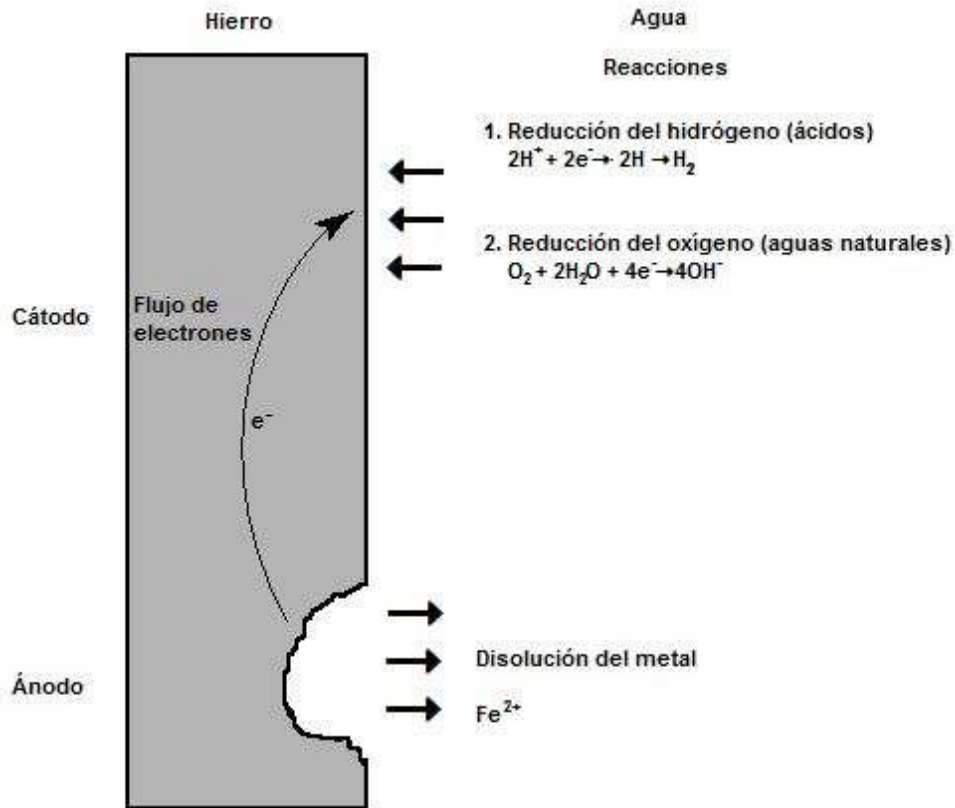
La corrosión depende de la presencia de capa humectante en la superficie metálica. El espesor de esta capa, ocasionará la resistencia o facilidad del efecto corrosivo. En la figura 2 se presenta la dependencia entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa de electrolito sobre la superficie metálica (Pizarro y Anaya, 1989).

La corrosión atmosférica se inicia a partir de la formación de una capa acuosa en la superficie del material, el cual proviene de la humedad del ambiente y está determinada por precipitaciones pluviales, niebla o cualquier factor climatológico. Ya sea por la deposición seca en dicha capa o por que la capa ya esta acidificada, ésta actuará como solvente para ciertos contaminantes aumentando las reacciones electroquímicas que tienen como resultado la oxidación del metal.



**Figura 1** Velocidad de corrosión a diferentes espesores de película de humedad

La corrosión está estrechamente relacionada con la electroquímica. Para que ocurra la corrosión se necesitan los componentes de una celda electroquímica, un ánodo, un cátodo, una conexión entre el ánodo y el cátodo (circuito externo) y finalmente una disolución conductora (circuito interno, agua). El ánodo y el cátodo están situados en el metal (puede ser el mismo o diferentes metales) que tienen una diferencia de potencial entre ellos. Cuando esto sucede, la oxidación sucede en el ánodo. En la práctica la disolución del metal sucede en el ánodo, liberando el metal a la solución (Gray, 1994). La figura 3 muestra las reacciones presentes en el fenómeno de corrosión en superficies metálicas.



**Figura 2** Principales reacciones que llevan a la corrosión de superficies metálicas (Fuente: Gray, 1994)

Los principales contaminantes gaseosos, desde el punto de vista de corrosión atmosférica son el O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y el Cl en varias formas y de los cuales los primeros cuatro se encuentran en ZMCM teniendo en cuenta la alta densidad de población y en consecuencia el aumento de emisiones de estos contaminantes. El cloruro (Cl<sup>-</sup>), en cambio, se presenta en grandes concentraciones en las regiones cercanas a las costas, factor que facilita el proceso de corrosión. Además de estos contaminantes, la humedad del ambiente y la variación de la temperatura influyen directamente en la corrosión.

La falla de algunos equipos electrónicos es debida al efecto corrosivo atmosférico. Pequeñas cantidades de contaminantes o de productos de corrosión pueden causar daños que conllevan a la falla de un equipo (Guttenplan, 1987). La corrosión en equipo

electrónico puede ocurrir durante la manufactura, almacenaje, transportación o durante el servicio.

Se han estudiado casos de corrosión de componentes de hardware mediante análisis por microscopía electrónica y EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), determinando que gases contaminantes 10 veces menores al límite permitido para el hombre, pueden dañar el equipo electrónico (Gouda *et al.*, 1989).

### 3.1. PRUEBAS DE CORROSIÓN

La corrosión atmosférica es uno de los fenómenos de deterioro más estudiado, y a la fecha, todavía se tienen dudas en cuanto a su modelado y caracterización mediante ensayos de laboratorio; sin embargo, ha sido definida como la degradación que sufren los materiales, que están en contacto con el aire, y por ende, los constituyentes y contaminantes del mismo (Ortiz-Prado *et al.*, 2002).

Los factores más importantes que provocan la corrosión son:

- a) Variación de temperatura
- b) Ciclos de humedad
- c) Contaminantes gaseosos presentes en el aire (Composición y concentración)
- d) Partículas contaminantes (Composición, tamaño y concentración)

Para evaluar el comportamiento de los materiales durante su exposición en la atmósfera, se estructuran diversos tipos de ensayos, estos se clasifican en:

1. Las pruebas de campo: son aquellas en las que el testigo es expuesto a las variables existentes en el ambiente sin que estas puedan ser manipuladas.

2. Las pruebas de laboratorio: en las que ciertas variables pueden ser controladas.

Entre ellas se encuentran:

- a) Cámara de niebla salina
- b) Cámara de niebla salina + ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
- c) Cámara de niebla salina + dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )
- d) Cámara acelerada de niebla salina +  $\text{Cu}^{2+}$
- e) Cámara de ciclos de humedad
- f) Cámara de gases

Los contaminantes y condiciones climatológicas se han agrupado en diferentes tipos de ambiente (Ortiz-Prado *et al.*, 2002):

**Ambiente industrial urbano:** Tiene todo tipo de contaminación por azufre en forma de  $\text{SO}_2$ . Adicionalmente, a este contaminante se encuentran los  $\text{NO}_x$ .

**Ambiente marino:** Posee altas concentraciones de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ). La concentración en el ambiente del cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) es superior a  $15\text{mg}/\text{m}^2$  al día. La presencia de industria, temperatura y vientos dominantes aumenta la corrosividad.

**Ambiente rural:** No se compara con los dos anteriores al no presentar alta densidad de población, ni de industria; sin embargo los fertilizantes y la descomposición de materia orgánica, activa otros mecanismos de corrosión debida a la presencia de iones amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitratos, etc.

Las pruebas de corrosión utilizan ensayos en los que se pretende evaluar el efecto del medio ambiente. Las condiciones ambientales, aún en interiores, no se pueden generalizar para cualquier país o región.



En México el clima es muy diverso debido a la topografía y altitud, pasando desde tropical lluvioso a templado y hasta desértico. Las temperaturas mínimas y máximas absolutas son de  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$  respectivamente, mientras que la humedad relativa varía entre el 30% y 100%.

Dada la variabilidad de los factores ambientales anteriormente mencionados, resulta muy difícil realizar un modelado matemático que permita determinar con precisión el comportamiento del material. Los factores que tienen mayor influencia en el fenómeno de corrosión son el tiempo de humectación y la cantidad de contaminantes que pueden depositarse en la superficie metálica.

Las pruebas aceleradas para simular el efecto de la corrosión tiene como objetivo determinar las velocidades del daño producido, para así proporcionar información que permita encontrar el tiempo de vida real de un producto, además de evaluar la problemática de las fallas que por corrosión se generan en el equipo.

A lo largo de 60 años se han desarrollado una gran variedad de métodos de prueba que generalmente incluyen uno o varios de los siguientes contaminantes:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . También se han evaluado las variables de temperatura y humedad, las cuales pueden permanecer constantes durante el ensayo o variar en forma cíclica, de esta manera es posible simular varias condiciones de trabajo.

La “American Society for Testing Materials” (ASTM) propone pruebas de corrosión estandarizada. Estas pruebas no presentan una correlación con sucesos reales, ya que son simulaciones simplificadas del ambiente con condiciones de exposición severas, su empleo se limita al análisis comparativo del comportamiento de materiales y recubrimientos.

En la ZMCM se han realizado aproximaciones para la clasificación de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales típicos. Estudios realizados por Muñoz y Uruchurtu indican que en San Agustín, Pedregal, Tlalnepantla, Acatlán, Cerro de la Estrella y Hangares presentan bajo nivel de corrosividad y en Plateros, Coacalco, Merced y Tacuba presenta un nivel de media a alta corrosividad (Muñoz y Uruchurtu, 2002).

### **3.2. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN INTERIORES**

Se considera que existen diferencias importantes entre las condiciones en interiores y exteriores. La capa de electrolito formada en exteriores depende de las variaciones estacionales y diarias de humedad de la precipitación, rocío o niebla. En interiores la capa formada depende de condiciones con menor variación del nivel de humedad, esto quiere decir, que en interiores los ciclos de humedad o seco son menos drásticos y notorios.

La diferencia en la concentración de contaminantes en interiores y exteriores se debe principalmente a la concentración de gases y partículas en interiores y a la disminución de las variaciones atmosféricas exteriores por medio de sistemas de ventilación (Ortiz-Prado *et al.*, 2002).

La mayor parte de los contaminantes encontrados en interiores provienen del exterior, aunque algunos se producen dentro como productos de calefacción, partículas sólidas, contaminantes de estufas y calentadores de gas, nieblas de aceites, grasa de cocina o cigarros (Lázaro, 1996).

## CAPÍTULO IV

**4. ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (ZMCM)**

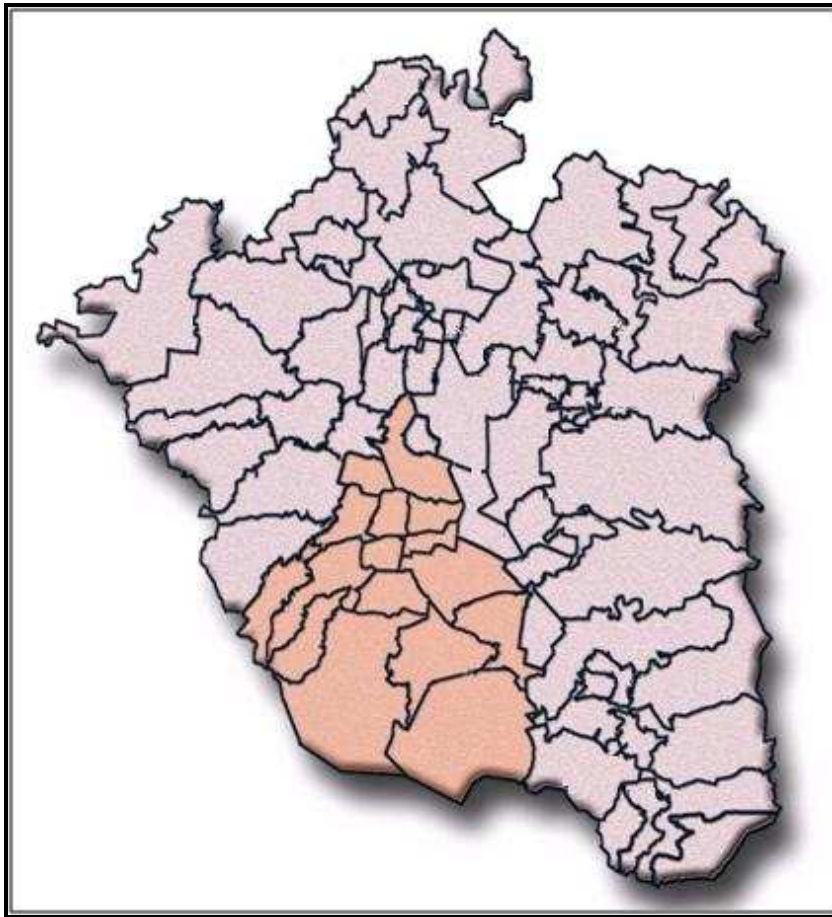
El crecimiento acelerado de la ZMCM durante las últimas dos décadas la ha transformado en una de las megaciudades<sup>1</sup> más importantes en el mundo. En la ZMCM habita 20% de la población total del país (Negrete, 2000), en donde se centraliza la mayor parte de la actividad industrial, política y comercial, pero también se concentran riesgos diversos entre los que destacan el incremento en los niveles de contaminación ambiental que responden a los ritmos y efectos indirectos del consumo de combustibles. La migración del campo a la ciudad, el crecimiento en la densidad poblacional, el proceso de industrialización, las condiciones geográficas, la desorganizada red de transporte público, la demanda en el uso de automóviles, la insuficiencia de la red vial, junto con la producción y el consumo de gasolina, surgen como las determinantes más importantes del deterioro en las condiciones y la calidad del aire en la ZMCM.

**4.1. TOPOGRAFÍA**

La ZMCM forma parte de una cuenca, con una altitud promedio de 2,240 metros sobre el nivel del mar (msnm), abarca la totalidad del Distrito Federal y parte del Estado de México (IECCZMCM-SMA, 2006). Por las características de crecimiento, dinámica social, económica y ambiental, en el año 2006 se declaró la ampliación de la ZMCM, la cual quedó integrada por las 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México (Figura 4); ésta nueva superficie representa 0.25% (INEGI, 2002) de la superficie total del país.

---

<sup>1</sup> La denominación *megaciudad* ha sido establecida de acuerdo al número de habitantes. Los demógrafos las definen como ciudades con 10 millones de habitantes o más. *Proyecto MILAGRO 2006*



**Figura 1** Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 2006 (Fuente: INEGI, 2007)

La ZMCM, presenta valles intermontañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos, en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. También se encuentran prominencias topográficas aisladas, como el Cerro de la Estrella y algunas sierras. Se encuentra rodeada por una cadena montañosa de formación volcánica constituida por sierras del Ajusco, Chichinautzin, Nevada, Las Cruces, Guadalupe y Santa Catarina. En esta cadena montañosa destacan los volcanes de Popocatepetl (5,452 msnm) e Iztaccíhuatl (5,286 msnm) (Figura 5).

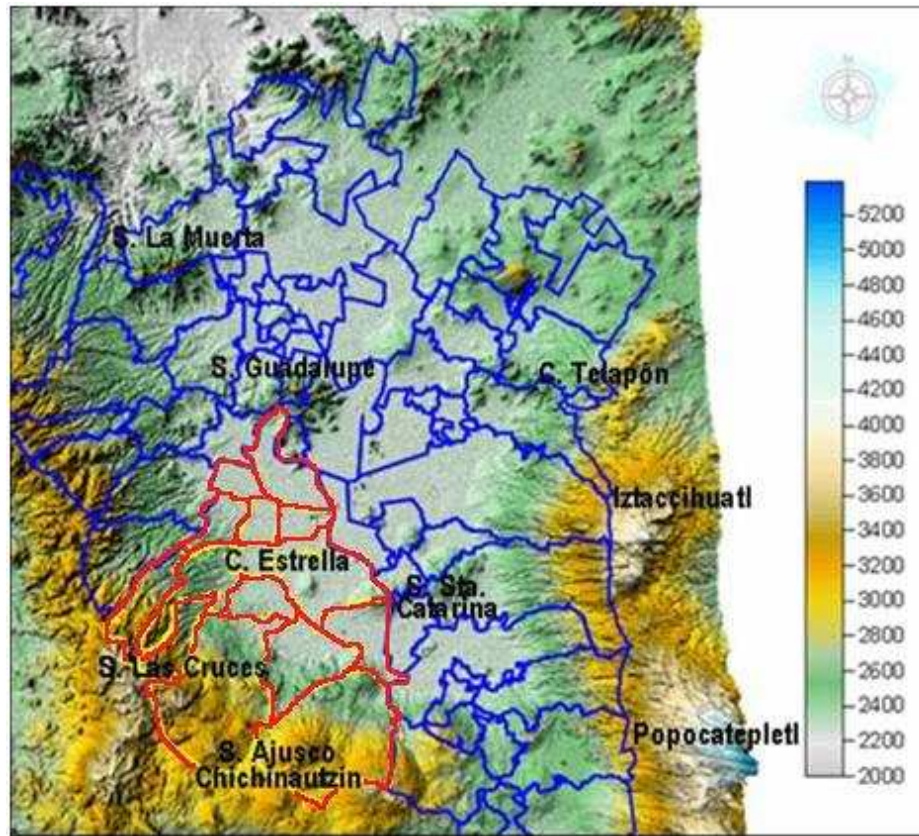


Figura 2 Altitud en la ZMCM (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

La altitud a la que se encuentra las ZMCM, ocasiona que los procesos de combustión operen deficientemente y emitan una mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera; esto como consecuencia del bajo contenido de oxígeno ( $O_2$ ) del aire, el cual es aproximadamente 23% en volumen (Baez *et al*, 2001), menor que al nivel del mar, así mismo, la cadena montañosa que la rodea, propicia el estancamiento de los contaminantes.

Asociado a esto, su posición latitudinal ocasiona que reciba una radiación solar intensa que acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos como el  $O_3$  y los carbonilos. Aunado a esto, su ubicación en el centro del país permite que a lo largo del año, la ZMCM resulte afectada por sistemas anticiclónicos, los cuales mantiene el cielo despejado y aumentan la capacidad fotoquímica de la atmósfera; además, estos

sistemas también inducen a que la velocidad de los vientos disminuya cerca de la superficie del suelo, situación que inhibe la convección del aire, dificultando la dispersión de los contaminantes (IECCZMCM-SMA, 2006).

#### 4.2. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y CLIMÁTICAS

El clima y la orografía en la ZMCM se consideran como unos de los principales factores que favorecen la acumulación de los contaminantes, generados fundamentalmente por procesos antropogénicos. Así mismo, tanto el clima y como el microclima de la ZMCM, tiene considerables influencias que afectan la calidad del aire y el comportamiento de los contaminantes.

Hay dos factores importantes para la presencia de contaminantes en la ZMCM, la lluvia y el viento. La temporada de **lluvia** inicia a mediados de mayo, siendo más intensa entre los meses de junio y octubre, ocasionando que descendan los niveles de algunos contaminantes por la inestabilidad atmosférica. El incremento de la precipitación pluvial propicia un efecto de "**lavado troposférico**", lo cual favorece una mejor calidad del aire de la zona, puesto que disminuye la formación de partículas. La figura 6 muestra la precipitación promedio a lo largo del año 2006 en diferentes regiones.

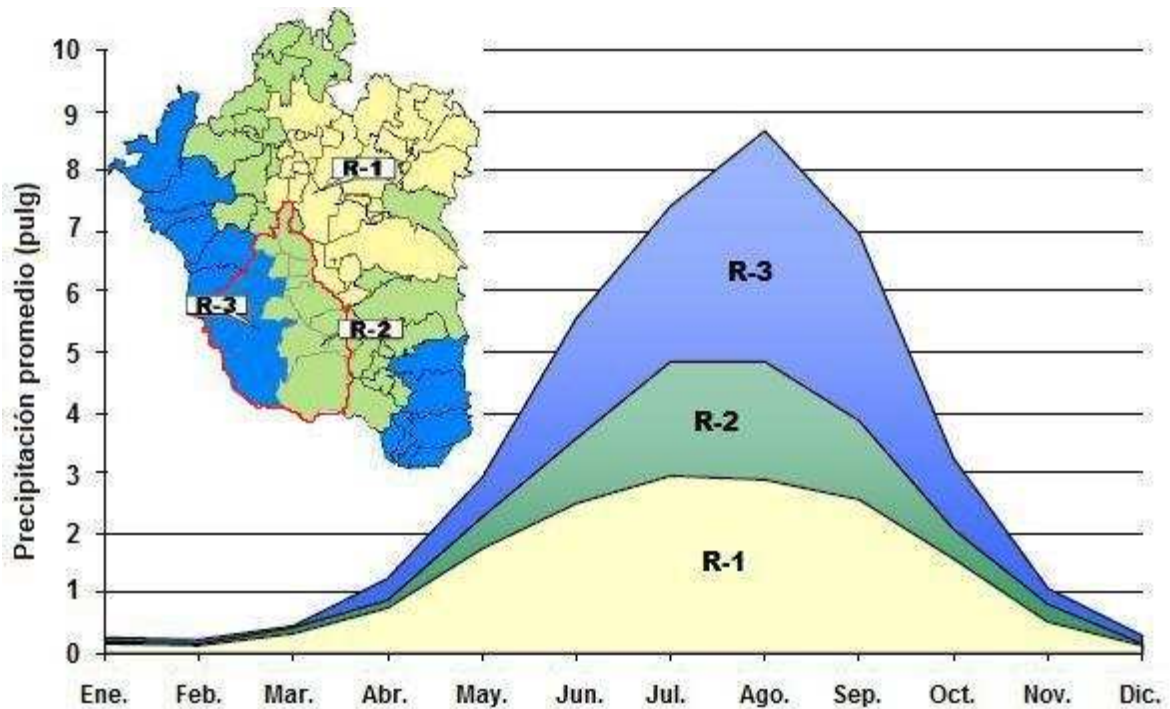
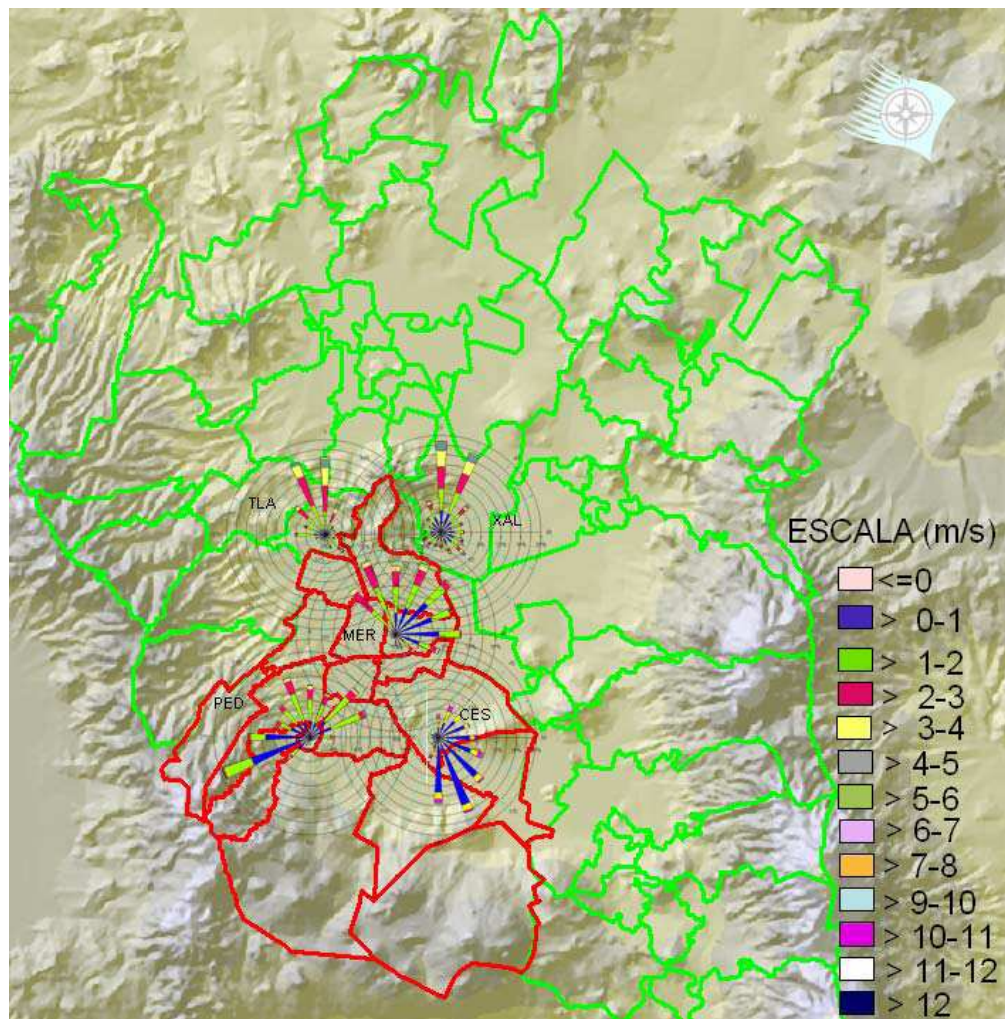


Figura 3 Precipitación anual promedio por región 2006 (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

El **viento** es determinante para la contaminación atmosférica, ya que a partir de su dirección, se identifican los sistemas meteorológicos que afectan a determinado lugar e igualmente la intensidad determina si los contaminantes en capas cercanas a la superficie se acumulan o se dispersan.

En la figura 7 se presentan las rosas de viento con datos promedio de 5 estaciones meteorológicas de la Red Meteorológica en el año 2006. Al centro de la ZMCM (Tlalnepantla-TLA, Xalostoc-XAL, Merced-MER), se observa una dirección de viento variable, sin embargo, la componente principal es del norte. Así mismo, las velocidades de viento en esta zona, llegan a alcanzar los 6 m/s en su componente principal. En las estaciones del sur, como la del Cerro de la Estrella (CES), los vientos dominantes provienen del sureste y en el caso del Pedregal (PED), la dirección predominantes es del suroeste. La velocidad del viento de dichas estaciones, se mantuvieron en el rango de 1-4 m/s.



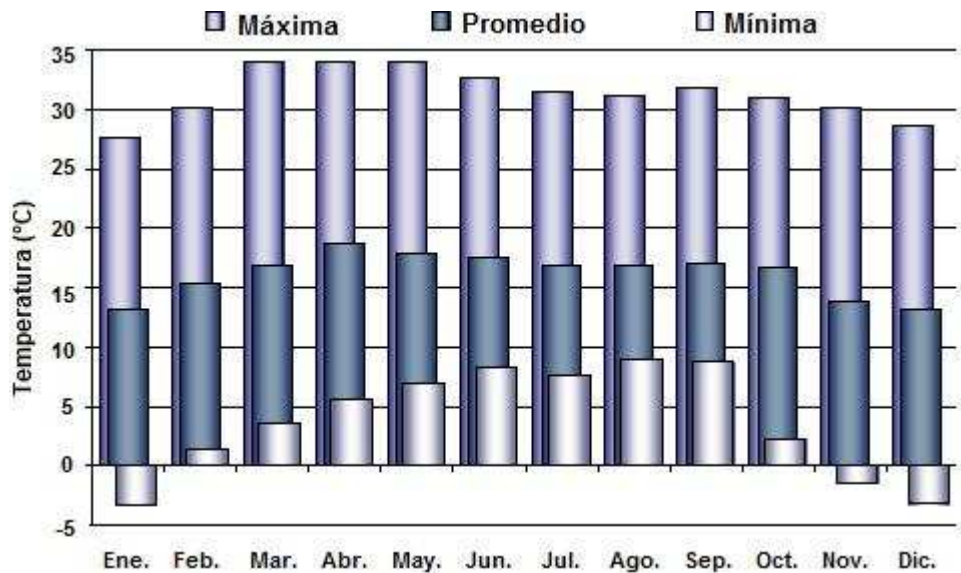
**Figura 4** Rosas de viento anual ZMCM, 2006 (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

En cuanto a la dispersión del viento a través del día, prevalece la dirección del norte en las horas de la mañana, con baja velocidad; se va incrementando a lo largo del día y presenta los máximos en la tarde. Después de medio día y durante las siguientes tres horas, la dirección del viento comienza a ser más variable, coincidiendo con la máxima altura de la capa de mezclado, dicha mezcla es producida por el calor almacenado en las capas inferiores.



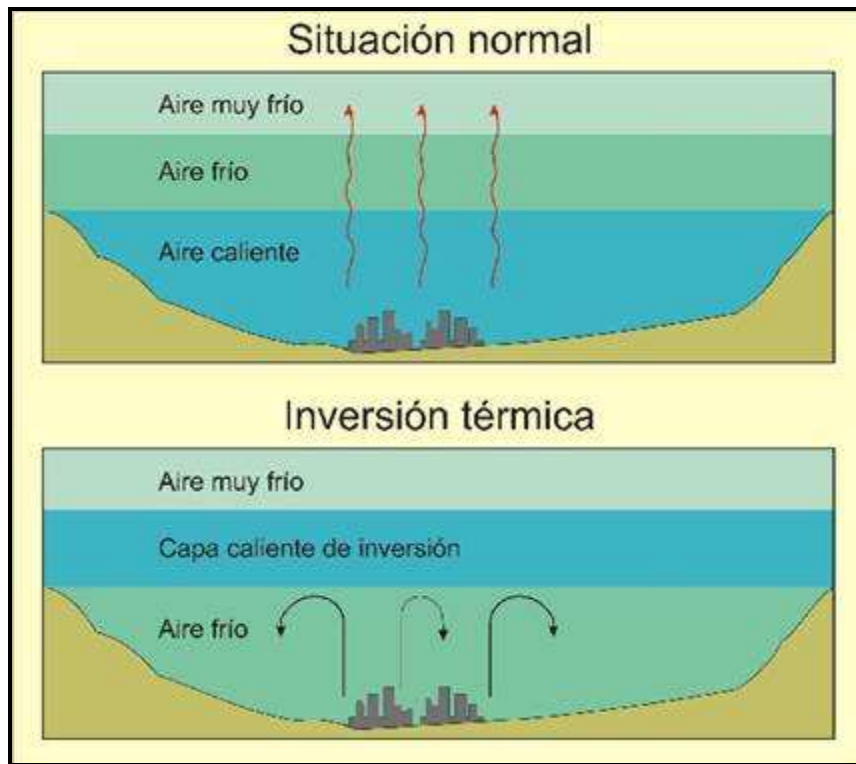
### 4.3. TEMPERATURA E INVERSIÓN TÉRMICA

Dependiendo la época del año en la ZMCM se presentan niveles de temperatura bajos y altos, en la figura 8 se presenta los valores de temperatura máxima, mínima y promedio mensual. También se presentan valores moderados durante la época de lluvias, en donde las nubes disminuyen la intensidad de luz solar.



**Figura 5** Temperatura mínima, máxima y promedio mensual, 2006 (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

En la troposfera es normal que la temperatura del aire descienda con la altitud. Sin embargo, en ocasiones se puede encontrar una masa de aire caliente encima de una más fría y al espacio que ocupa la capa caliente se le denomina inversión térmica, precisamente porque no se cumple la condición normal antes descrita. En la figura 9 se muestra la comparación de una situación de inversión térmica y normal. Las inversiones térmicas son fenómenos naturales que pueden aparecer a distintas alturas desde el nivel del suelo (ICAZMCM2005-SMA, 2006).

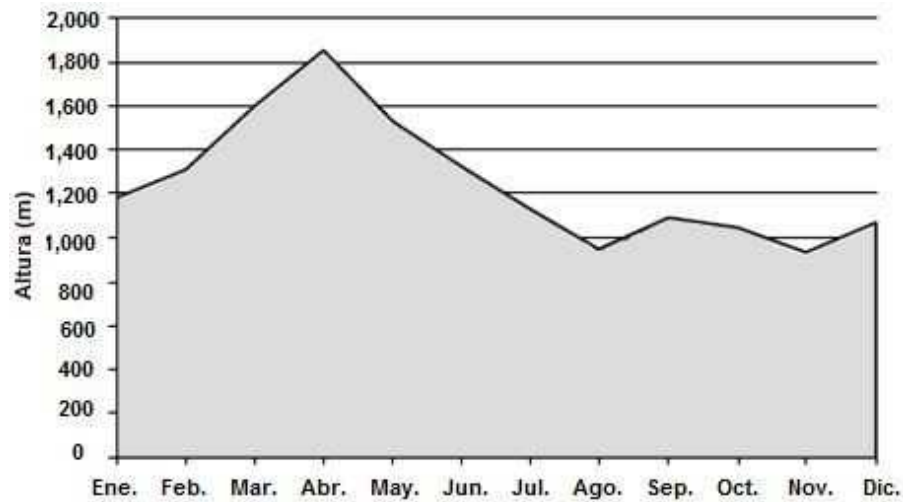


**Figura 6** Representación de situación normal y de inversión térmica en la atmósfera de la ZMCM  
(Fuente: [http://www.ine.gob.mx/dgicur/calair/inv\\_termica.html](http://www.ine.gob.mx/dgicur/calair/inv_termica.html))

La inversión térmica en la ZMCM es de tipo radiativa, ocasionada por la presencia de sistemas de alta presión, provocando cielo despejado durante la noche y la fuga de calor del suelo, por los que se registrarán temperaturas bajas en las capas inferiores y estancamiento de aire (ICAZMCM2005-SMA, 2006).

#### 4.4. CAPA DE MEZCLADO

Esta capa es la región en la que se dispersan los contaminantes y esta en función de la estabilidad atmosférica (calentamiento del aire y velocidad del viento). Su altura varía constantemente y presenta evolución a través del día y a lo largo del año (Figura 10). Este parámetro da una idea del volumen del aire en el que se está llevando a cabo la mezcla de contaminantes, a causa de la turbulencia atmosférica en las capas bajas.



**Figura 7** Altura promedio mensual de la capa de mezclado del año 2006 (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

La altura de la capa de mezclado presenta un mínimo en la mañana a la salida del sol y un máximo al momento de máxima insolación. La Capa de Mezclado en la ZMCM, generalmente alcanza la altura máxima anual en los meses de abril, mayo y junio.

#### **4.5. SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO (SIMAT)**

El mejoramiento de la calidad del aire es uno de los retos que, a pesar de los constantes esfuerzos hechos por ciudadanos y autoridades, aún representa un desafío para la ZMCM. El SIMAT ha sido herramienta de gestión para informar a la población los niveles de contaminación y así realizar acciones de prevención y control de la contaminación ante situaciones que ponen en riesgo la salud.

Al concluir el año 2006 el SIMAT tenía en operación 47 estaciones de monitoreo, 36 ubicadas en el Distrito Federal y 11 en el Estado de México, con un total de 175 equipos automáticos y 39 equipos manuales, 23 de los cuales son para partículas suspendidas y 16 para el depósito atmosférico.

El SIMAT integra los siguientes subsistemas:

Red Automática de Monitoreo Atmosférico. Aporta registros minuto a minuto de  $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , CO, partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ). Con la información que provee se genera el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) y se evalúa el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental (NOM).

Red Meteorológica (REDMET). Aporta registros minuto a minuto de humedad relativa, temperatura ambiente, dirección y velocidad del viento, presión barométrica, radiación fotosintéticamente activa, radiación global y radiación ultravioleta en las bandas A y B.

Red de Depósito Atmosférico (REDDA). Se conoce también como Red de Lluvia Ácida, aporta muestras de depósito seco y húmedo (agua de lluvia) para determinar: acidez, conductividad,  $SO_x$ ,  $NO_x$ , cloruros, carbonatos, amonio, sodio, calcio, magnesio, potasio y metales pesados.

**CAPÍTULO V****5. DINÁMICA DE LOS METALES PESADOS**

Un metal es un material distinguido por su habilidad para conducir calor y electricidad. Están agrupados en la tabla periódica de elementos y tienen de 1 a 3 electrones de valencia, siendo sus átomos poco electronegativos y teniendo una baja energía de ionización. Los metales tienen propiedades físicas características: pueden ser brillantes, tener alta densidad, ser dúctiles y maleables, tener un punto de fusión alto, ser duros.

Por su densidad, los metales pesados se pueden dividir como se muestra a continuación (García, 2007(1)):

- a) Ultraligeros: Densidad inferior a  $2 \text{ g/cm}^3$ .
- b) Ligeros: Densidad entre 2 a  $4,5 \text{ g/cm}^3$ .
- c) Pesados: Densidad superior a  $4,5 \text{ g/cm}^3$ .

El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una alta densidad y sea tóxico en concentraciones bajas. Los ejemplos de metales pesados incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd), el talio (Tl), y el plomo (Pb) (LENNTECH, 2008).

Es importante mencionar que pequeñas cantidades de metales son comunes en nuestro medio ambiente y en la dieta. Son necesarios para mantener la salud, pero una cantidad mayor de cualquiera de ellos puede causar intoxicación afectando el sistema nervioso central, la disminución de los niveles de energía, y daños a la composición de la sangre, pulmones, riñones, hígado y otros órganos vitales (LEF, 2008).

El envenenamiento agudo es más probable por la inhalación o contacto de la piel de polvo, humos o los vapores que contengan metales tóxicos en el lugar de trabajo. Sin embargo, pocos niveles de contaminación pueden ocurrir en sitios urbanos, particularmente en hogares con la pintura de plomo o instalaciones de plomería vieja.

Los metales pesados, como se ha mencionado, son considerados tóxicos por lo que los metales de la primera serie de transición no serán considerados así, dado que metales como Cr, Fe y Zn son esenciales, en cantidades traza, para mantener el metabolismo del cuerpo humano. En la tabla 2 se muestran los usos, límites permisibles y toxicidad de algunos metales.

La Agencia de Protección Ambiental (por sus siglas en inglés EPA) y la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (por sus siglas en inglés ATSDR) compiló una lista de 20 sustancias peligrosas. Los metales pesados Pb, Hg y Cd aparecen en esta lista, al igual que el As y Cr<sup>6+</sup>.

Tabla 1 Usos, límites de exposición y toxicidad de algunos metales

Metal	Usos	Límites de exposición	Toxicidad
<b>Cd</b>	Aleaciones con bajo punto de fusión, cojinetes, baterías recargables Ni-Cd.	0.005 mg/L en agua continuamente y 0.04 mg/L en agua potable (hasta por 10 días) (EPA, 2008). Exposición de trabajador hasta 5 µg/m <sup>3</sup> . (OSHA, 2008)	Forma complejos con proteínas que dañan los riñones. Daña pulmones por inhalación y por ingestión irritación grave de estómago.
<b>Cr</b>	Metalurgia para aportar resistencia a la corrosión y un acabado brillante. Sus cromatos y óxidos se emplean en colorantes y pinturas	1 mg/L en agua potable (hasta por 10 días) (EPA, 2008). Exposición de trabajador a un promedio de 0.0005 mg/m <sup>3</sup> de Cr (VI), 0.5 mg/m <sup>3</sup> de Cr (III) y 1.0 mg/m <sup>3</sup> de Cr (0) (OSHA, 2008)	Niveles altos de Cr (VI) pueden dañar la nariz y producir cáncer. Niveles altos de Cr (VI) puede producir anemia o dañar el estómago o los intestinos. El Cr (III) es un elemento nutritivo esencial (entre 50 y 200 µg/día)
<b>Fe</b>	Acero inoxidable (73 % Fe, 18 % Cr, 8 % Ni) resistente a la corrosión (utensilios de cocina instalaciones químicas) Acero al tungsteno (94 % Fe, 5 % W), se utiliza en herramientas de corte a alta velocidad. Acero al Manganeseo (86 % Fe, 13 % Mn) para piezas expuestas a esfuerzos cortantes (ejes, brocas, etc) Permalloy. 78 % Ni, 21 % Fe). Electroimanes. Acero elástico (1 % Si) para resortes.	La dosis tóxica se encuentra entre 20 y 60 mg/kg de peso corporal, de 20 - 30 mg/kg se presentan vómitos, dolor abdominal y diarrea, dosis por encima de los 40 mg/kg ocurre un estado de coma. La dosis potencialmente letal es mayor a 60 mg/kg de peso corporal. 10 mg/m <sup>3</sup> Fe (III)	Parte esencial de la hemoglobina. En exceso de este metal puede provocar conjuntivitis si contacta con los tejidos y permanece en ellos. La inhalación crónica de concentraciones excesivas de vapores o polvos de óxidos de hierro puede resultar en el desarrollo de una neumoconiosis, llamada siderosis. El hierro en exceso se acumula en el hígado y provoca daños en este órgano.
<b>Hg</b>	Termómetros y tensiómetros, enchufes, rectificadores eléctricos, interruptores, lámparas fluorescentes y como catalizador. Se encuentra también en los pescados y mariscos	En agua potable de 2 ppb. En ríos, lagos y arroyos no excedan 144 ppt. Ingesta diaria de 2 ppb (para un adulto de peso corporal promedio) (EPA, 2008).	La exposición prolongada o repetida (personas que trabajan con él habitualmente sin tomar precauciones), puede provocar lesiones en riñones, cerebro y sistema nervioso.
<b>Mn</b>	Se utiliza en aleaciones con Al, Cu y Fe; con Cu y Ni para resistencias eléctricas. Aleaciones con hierro.	0.3 mg/L en agua continuamente y 1 mg/L en agua potable (hasta por 10 días) (EPA, 2008). Exposición de trabajador hasta 5 mg/m <sup>3</sup> . (OSHA, 2008)	Exposiciones prolongadas a compuestos de manganeso, de forma inhalada u oral, pueden provocar efectos adversos en el sistema nervioso, respiratorio, y otros.
<b>Ni</b>	Recubrimiento metálico, aleaciones acuñables (Plata, 25 % Ni), hidrogenación catalítica, aleaciones de alta resistencia eléctrica por ejemplo cromo-níquel.	No más de 0.1 mg/L de agua (EPA, 2008). Exposición de trabajador hasta 1 mg/m <sup>3</sup> de aire (OSHA, 2008)	Efectos de la piel. Inhalación en grandes cantidades de compuestos de níquel desarrolla bronquitis crónica y cáncer del pulmón.

<b>Pb</b>	Fabricación de baterías y en el revestimiento de cables eléctricos, redes de tuberías, tanques y aparatos de rayos x. Debido a su elevada densidad y propiedades nucleares, se usa como blindaje protector de materiales radioactivos. Una gran parte del plomo se emplea en forma de compuestos, sobretodo en pinturas y pigmentos.	En agua potable a 15 µg/L (EPA, 2008)	Daña el sistema nervioso, los riñones y el sistema reproductivo
<b>V</b>	Principalmente como aleaciones de acero (ferrovanadio) para herramientas de rápida acción y hojas de corte. También se utiliza como catalizador.	Exposición en el aire del trabajo de 0.05 mg/m <sup>3</sup> para polvos de V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> y de 0.1 mg/m <sup>3</sup> para vapores de V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Irritación de los pulmones, dolor del pecho y tos
<b>Zn</b>	Aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales. Revestimiento para prevenir corrosión, en compartimientos de baterías secas y, mezclado con otros metales, para fabricar aleaciones como el latón y bronce	En agua potable que contenga no más de 5 mg/L de agua (EPA, 2008). Exposición en el aire de trabajo 1 mg/m <sup>3</sup> para vapores de ZnCl <sub>2</sub> y de 5 mg/m <sup>3</sup> de ZnO (polvos o vapores) (OSHA, 2008)	Calambres estomacales y anemia, y puede alterar los niveles de colesterol. Bajos niveles de Zn son necesarios para mantener la salud

En la ZMCM las emisiones de metales pesados se rigen por un nivel máximo permisible de emisión, dadas por las Normas Oficiales Mexicanas (Ver Anexo II).

Los metales son constituyentes típicos de la corteza terrestre, forman parte de los minerales que conforman las rocas, arenas y arcillas, a su vez integrantes del suelo del fondo de los océanos. Se encuentran también en los cuerpos de agua natural, como océanos, ríos, lagunas y arroyos.

El Al es el metal más abundante en la corteza terrestre, alrededor del 25 % que se extrae se usa en la construcción, el 18 % en transportes, 17 % en embalaje y recipientes, 14 % en líneas de energía eléctrica, el resto en otros usos; el Fe es el segundo metal más abundante en la corteza terrestre, sus fuentes principales son la



hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y la magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; el vanadio se encuentra muy disperso pero se conocen lugares donde se concentra, el Mn y Ni se emplean en catalizadores y aleaciones con otros metales.

Las emisiones de metales frecuentemente forman la mayor parte de las emisiones de partículas  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ . De acuerdo a estudios realizados en la ZMCM, se observa que aproximadamente del 70% al 80% de las  $\text{PM}_{10}$ , está conformado por metales (Chow *et al.*, 2002). En el Inventario de Emisiones en la ZMCM (IECTZMCM-SMA, 2006), el 13% de las  $\text{PM}_{10}$ , fueron metales tóxicos. En la tabla 3 se muestra las fuentes de emisión de metales.

**Tabla 2** Fuentes de emisión de metales por fuentes naturales y por actividad industrial

Elemento	Fuente de Emisión
Al	Erosión de suelos, descomposición de plantas, industria metalúrgica, uso de explosivos.
Cd	Fundición y refinación del zinc, volcanes, incendios forestales, desecho de baterías recargables.
Fe	Extracción y procesos metalúrgicos de hierro, depósitos de chatarra (óxidos de hierro), suelos.
Mn	Suelos, industria del vidrio, pilas secas.
Ni	Procesos metalúrgicos.
V	Fabricación de catalizadores, colorantes para cerámicas, incendios forestales, suelos.

Así mismo, se ha observado que el 66% de las emisiones de  $\text{PM}_{10}$  proviene de suelos sin vegetación, incluyendo los caminos no pavimentados y el 34% restante es generado por suelos con vegetación escasa (Báez *et al.*, 2001).

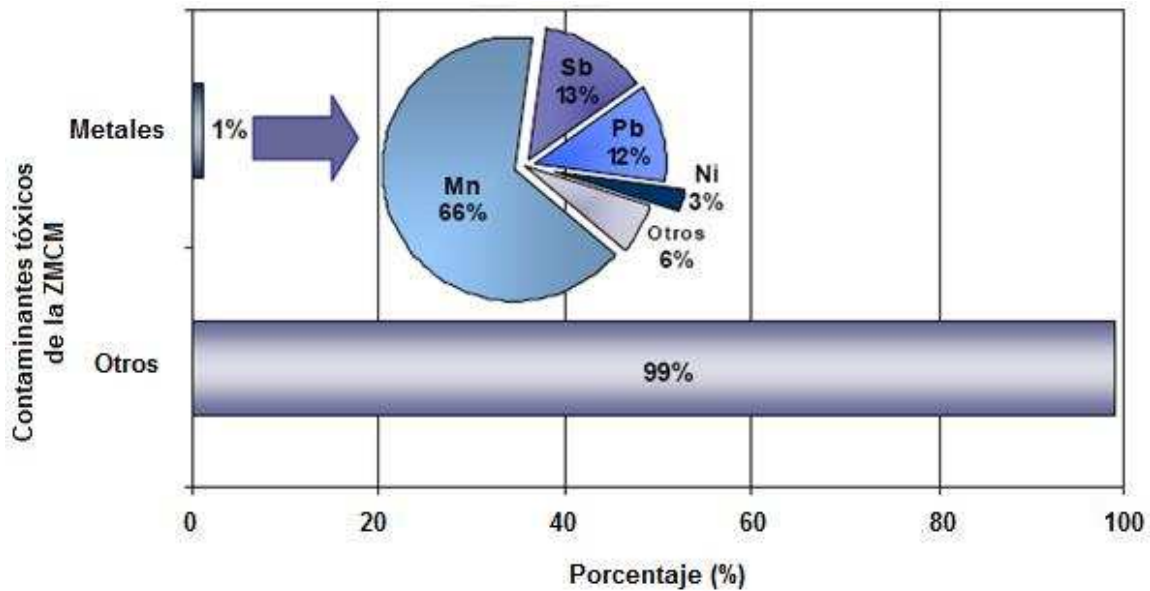
En la tabla 4 y figura 11 se presenta los porcentajes de metales contaminantes; sin embargo, éstos contribuyen tan sólo con el 1% del total de contaminantes tóxicos en la ZMCM. El Mn es el que se emite en mayor proporción con 1,283 toneladas al año, lo que representa el 66% del total de los metales. Le siguen el Sb y el Pb, los cuales

contribuyen en conjunto con el 25%. Estos tres metales son los más significativos y provienen principalmente de caminos no pavimentados (IECTZMCM-SMA, 2006).

**Tabla 3** Metales evaluados para la ZMCM

Contaminante <sup>†</sup>	[ton/año]	%
Mn	1,283	66
Sb	243	13
Pb	241	12
Ni	54	3
As	28	1
Cr	28	1
Cd	19	1
Hg	18	1
P	15	1
Otros metales	22	1
<b>Total</b>	<b>1,951</b>	<b>100</b>

<sup>†</sup>Encontradas como partículas metálicas y compuestos



**Figura 1** Contribución porcentual de metales (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

Los contaminantes atmosféricos se emiten en fase de gas y sólidos (partículas suspendidas totales) y son alterados químicamente por diversos mecanismos de la química atmosférica mientras permanece en la atmósfera.

Las emisiones de metales a la atmósfera es, por una parte, de origen antropogénico que provienen de procesos industriales, de la combustión de combustibles que contienen Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb y Zn, los cuales pueden estar en forma de partículas muy finas y en ocasiones se presentan en forma gaseosa (Cd y Pb) y por otra, por la presencia de metales pesados en partículas atmosféricas, asociada principalmente a la fracción inorgánica, siendo las fuentes naturales de emisión de aerosoles las que contienen trazas de metales, entre las que se incluyen el polvo terrestre, el aerosol marino, las emisiones volcánicas, los incendios forestales.

La remoción de un contaminante de la atmósfera puede ocurrir por deposición húmeda (precipitación) y por deposición seca (Duce *et al.*, 1983); la deposición húmeda tiene lugar en forma intermitente, mientras que la deposición seca es continua. En la precipitación húmeda, los gases y partículas son transportados hacia la superficie por gotas de agua, donde colisionan, son absorbidos o experimentan reacciones químicas en fase acuosa (Seinfeld J.H, y Pandis 1998; Stockwell *et al.*, 1995). Las reacciones en fase acuosa juegan un papel importante en la formación de ácidos en la atmósfera, el principal proceso que contribuye a la deposición de especies ácidas es la precipitación pluvial. La remoción de partículas por lluvia es aproximadamente dos veces más grande que la deposición seca.

El transporte atmosférico y la deposición húmeda, son procesos importantes en el ciclo global de los metales traza y las características químicas de estos metales, permiten relacionarlos con sus fuentes de emisión.

## 5.1. METALES PESADOS EN AEROSOLES

Se denomina aerosol a la dispersión de partículas sólidas o líquidas en un medio gaseoso (Holgate, 1997) y han sido consideradas como de interés en el problema de contaminación atmosférica en la ZMCM.

Los aerosoles pueden ser subdivididos de acuerdo a su forma física de las partículas y su método de generación, dando lugar a las siguientes definiciones:

**Bioaerosoles.** Es un aerosol de origen biológico e incluyen los virus, microorganismos como los hongos, bacterias y productos de organismos, como el caso de las esporas de los hongos y polen.

**Polvos.** Son partículas sólidas pequeñas (de 1 a 1 000  $\mu\text{m}$ ), que se forman por el rompimiento de partículas mayores en procesos como molienda, cribado o explosiones. Generalmente se forman en las industrias donde se manejan carbón, cemento o granos. Su desplazamiento no se realiza por difusión sino por medio de corrientes de aire mientras se encuentran en suspensión.

**Humo.** Son partículas muy finas que resultan de la combustión incompleta de sólidos orgánicos como carbón, madera y tabaco. Tiene diámetros que se sitúan en el intervalo de 0,5 a 1  $\mu\text{m}$ .

**Fumos.** Son partículas sólidas finas, generalmente de óxidos metálicos de Pb y Zn, que se forman por la condensación de los vapores en procesos como sublimación, destilación, calcinación y fundición. Mide entre 0,03 y 0,3  $\mu\text{m}$ .

**Cenizas.** Son partículas no combustibles muy finas que se tienen en los efluentes gaseosos de la combustión del carbón. Estas cenizas tienen características similares

con los anteriores. Son de tamaño entre 1 y 1 000  $\mu\text{m}$ , producto de la combustión y son sustancias inorgánicas de metales. Se componen principalmente de óxidos de silicio, Al, Ca y Fe.

**Niebla.** Son pequeñas gotas que se forman por condensación de vapor, dispersión de un líquido o como producto de una reacción química. Tiene un tamaño de 5 a 10  $\mu\text{m}$ .

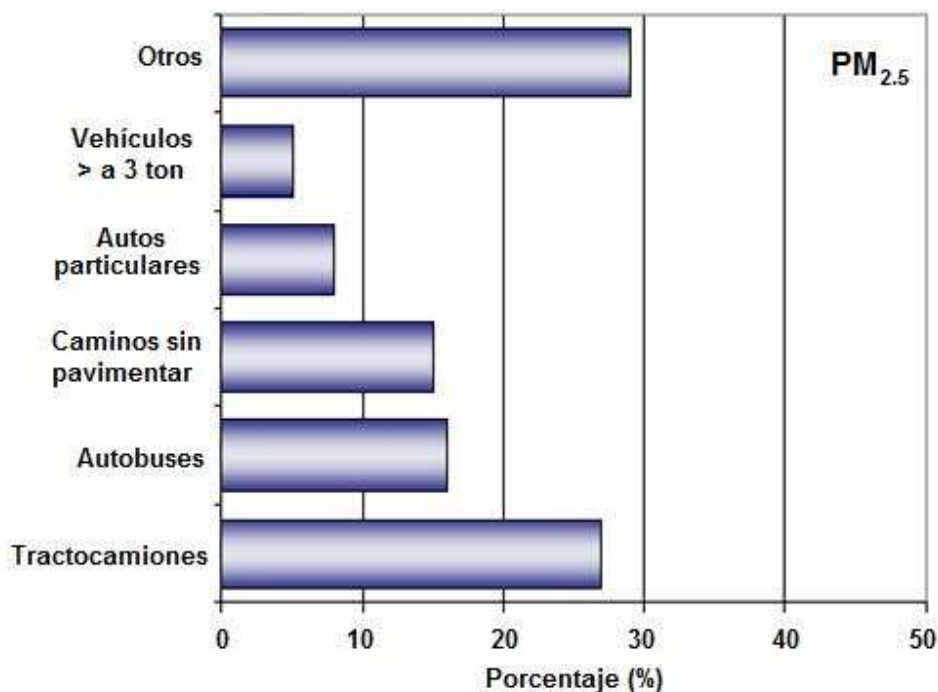
**Spray.** Son pequeñas gotas que se forman por atomización de líquidos, como es el caso de los herbicidas y pesticidas. Estos aerosoles tienen un tamaño entre 10 y 1000  $\mu\text{m}$ .

Las partículas o aerosoles pueden ser clasificadas también en relación a su origen como primarias y secundarias. Las partículas primarias son aquellas emitidas directamente por fuentes naturales y antropogénicas. Las partículas secundarias son aquellas producidas en la atmósfera a través de reacciones químicas en la fase gaseosa.

El tamaño mas pequeño de las partículas de aerosoles se puede establecer en unos cuantos nanómetros (1 nanómetro= $1 \times 10^{-9}$  m), equivalente al tamaño de las moléculas más grandes. Las partículas con diámetros mayores a 100  $\mu\text{m}$  (1 micrómetro= $1 \times 10^{-6}$  m) no se consideran suspendidas en virtud de que rápidamente tienden a sedimentarse.

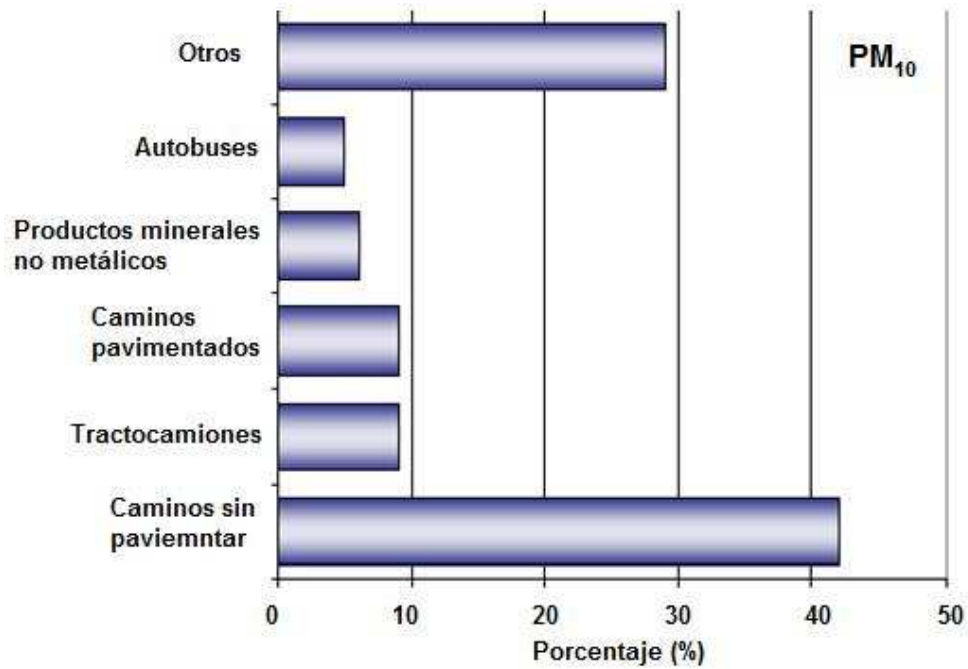
Las partículas finas son aquellas con un diámetro de 2.5  $\mu\text{m}$  o inferior (**PM<sub>2.5</sub>**). Estos niveles se sobrepasan con facilidad en las grandes ciudades. El control de las partículas resulta difícil, ya que su procedencia es muy variada. La mayoría del aerosol urbano procede de emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y NH<sub>3</sub> además de los humos de escape de

los motores de diesel. Los principales emisores de  $PM_{2.5}$  por sector se muestran en la figura 12.



**Figura 2** Principales emisores de  $PM_{2.5}$  por sector (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

Las partículas gruesas son aquellas con diámetro de  $10\ \mu m$  o inferior ( $PM_{10}$ ), históricamente la mayor fuente de emisión de estas partículas fue el sector industrial, especialmente la producción de metales ferrosos y no ferrosos, minerales y la industria del cemento. Esta fracción  $PM_{10}$ , ha recibido especial atención debido a los posibles efectos en la salud (Pope III, 1989). Los principales emisores de  $PM_{10}$  se muestran en la figura 13.



**Figura 3** Principales emisores de PM<sub>10</sub> por sector (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

Dentro de la fracción fina, los componentes que se presentan en mayor concentración son;  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Pb, C (orgánico y elemental) y compuestos orgánicos condensables así como compuestos carcinógenos y metales (As, Cd, Se y Zn), mientras que la fracción gruesa los dominantes son: Al, Ca, Cl, Fe, Na y Si.

Una vez presentes las partículas o aerosoles en la atmósfera, su tamaño, número y composición química cambia por diversos mecanismos hasta que finalmente son removidas por procesos naturales.

Los metales en más altas concentraciones en el polvo son: Al, Fe, Mn y Zn. En los océanos la cantidad de metales disminuye, en mayor cantidad de encuentra el Fe, Mn, Pb, V y Zn. La ceniza volcánica puede tener grandes cantidades de As, Co, Fe, Mn, Sb, V y Zn. Finalmente, emanaciones biológicas contienen bajas concentraciones de As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, V y Zn.

Los metales son frecuentemente asociados con la contaminación del aire por partículas de fuentes de origen antropogénico, los cuales tiene generalmente un diámetro menor a 2,5  $\mu\text{m}$ . Producto de la combustión incompleta de  $(\text{HC})_n$ , fundidoras, incineradores, hornos de cemento y de vehículos automotores.

El uso de combustibles fósiles es la principal fuente antropogénica de Be, Co, Hg, Mo, Ni, Sb, Se, Sn y V, así como también de contribuir considerablemente en las emisiones de As, Cr, Cu, Mn y Zn. Emisiones de combustibles para vehículos como la gasolina y diesel, contienen cantidades variables de Cd, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn, y la abrasión del caucho de las llantas es una fuente de Zn.

El Fe es el metal con mayor concentración en las fuentes de emisión de partículas. Una excepción es la ceniza de aceites que contiene cantidades traza de compuestos de Ni y V. Estas cenizas son emitidas en plantas de energía y otras industrias que queman aceite y también pueden producir grandes cantidades de otros metales incluyendo As, Co, Cr, Cu, Mn, Pb, Sb y Zn.

Las cenizas del quemado de carbón de plantas de energía tienen altas concentraciones de As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Ni, Pb, Sb, V y Zn. La incineración municipal de basura es fuente importante de metales al aire como el As, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn y Zn. Hornos en fundidores de acero son una fuente de Cr, Cu, Fe, Mg, Ni, Pb y Zn.



## 5.2. METALES PESADOS EN LLUVIA

Los metales pesados contenidos en la precipitación pluvial, constituyen una herramienta muy útil para estimar el grado de contaminación existente en una región determinada. Los metales que comúnmente se encuentran son Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb y Zn. El Cu y Zn son esenciales, su deficiencia o exceso provocan problemas en la salud o toxicidad respectivamente. (Barrie *et al.*, 1987)

La disolución, deposición, precipitación de metales y así como la erosión de suelos son factores determinantes para la existencia de metales contaminantes en una determinada zona. La acumulación de metales en estas zonas depende de su distribución a causa del viento y a su estancamiento en zonas urbanas, creando así, episodios de contaminación local.

Los metales son emitidos en grandes cantidades al ambiente, predominantemente a la atmósfera, son transportados a los ecosistemas terrestres, por medio de la lluvia, la nieve, la deposición seca y el flujo atmosférico.

El transporte atmosférico y la deposición húmeda, son procesos importantes en el ciclo global de los metales. En general los metales pesados están disueltos en la precipitación pluvial (García, 2007(1)).

Para que los metales pesados sean incorporados a la precipitación pluvial, estos necesitan estar en forma diluida, es decir, cualquier metal que se someta a un disolvente ácido, se incorpora y a partir de ahí estará en forma acuosa.

La solubilidad de los metales en la lluvia, depende principalmente del pH de ésta, 89% de los metales que se disuelven entran a los organismos después de ser depositados a los suelos y vegetación.

A partir de estudios realizados en la determinación de metales pesados, se ha concluido la evidente importancia el proceso “rain-out<sup>1</sup>” de partículas alcalinas y metales pesados, ya que al inicio de la temporada de lluvias el pH es más ácido y conforme la temporada de lluvia avanza, el proceso “wash-out<sup>2</sup>” contribuye a neutralizar la acidez del agua de lluvia incrementando la remoción de metales pesados (García, 2007(1)). La concentración de aluminio disuelto en lluvia es mayor seguida en orden decreciente por Mn, V, Pb, Cr y Cd y dependiendo del pH en el que la solubilidad a un pH  $\leq$  5 son superiores que en un pH  $\geq$  5, dado el nivel de acidez alto (García, 2006(2)).

---

<sup>1</sup> Rain-out: Mecanismo que consiste en la remoción de gases por disolución o absorción de gotas de nube, donde son transformados por reacciones químicas en fase acuosa. Se conoce como remoción dentro de las nubes. El contaminante absorbido puede reaccionar dentro de la nube para formar productos secundarios que también pueden ser removidos por precipitación

<sup>2</sup> Wash-out: Mecanismo que consiste en la remoción de un contaminante por gotas de lluvia que caen debajo de las nubes

## CAPÍTULO VI

## 6. SMOG FOTOQUÍMICO

Muchas áreas urbanas en el mundo sufren episodios de contaminación del aire durante los cuales se producen niveles altos de  $O_3$  a nivel del suelo, como resultado de reacciones inducidas por la luz entre los contaminantes. Este fenómeno se denomina *smog*<sup>1</sup> fotoquímico, y a veces descrito como “una capa de ozono en un lugar erróneo” (Baird, 2001). En la tabla 5 se muestran los tipos principales de *smog* así como sus características

Tabla 1 Principales tipos de *smog* y sus características

CARACTERÍSTICA	SMOG DE CARBÓN	SMOG FOTOQUÍMICO
Concentración pico	Temprano en la mañana	Medio día
Temperatura ambiente	-1 a 4°C	24 a 32°C
Condiciones atmosféricas	Húmedo y nublado	Baja humedad, cielo azul y despejado sobre la capa de inversión.
Inversión térmica	Cerca del suelo	Altura variable
Principales efectos	Irritación de bronquios y pulmones	Irritación de ojos
Principales componentes	Hollín y otras partículas, $SO_2$	$O_3$ , PAN, $NO_x$ , aldehídos y CO.
Origen	Combustión del carbón	Escapes de automóviles (hidrocarburos y óxidos de nitrógeno como contaminantes primarios).
Índices dominantes de contaminación	$SO_2$ y partículas	$O_3$ , CO, $NO_x$ y $SO_x$
Otros efectos	Reductor	Daños severos en conchas, pinos, plantas ornamentales. Plástico quebradizo
Característica química global		Oxidante.

La formación del *smog* fotoquímico se produce por la reacción de los  $NO_x$  con los hidrocarburos  $(HC)_n$  volátiles, compuestos cada vez más comunes en los ambientes

<sup>1</sup> Es comúnmente encontrar en la literatura la denominación de *smog*, palabra que se origina de la contracción de otras dos: *smoke* (humo) y *fog* (niebla). El nombre apareció probablemente, en Inglaterra en 1911. Actualmente, se emplea para designar al aire contaminado en el cual la visibilidad es reducida y hay irritación en los ojos y pulmones.

urbanos. Las sustancias que se evaporan fácilmente, incluidos los  $(HC)_n$  y sus derivados, se denominan compuestos orgánicos volátiles (COV).

La formación del *smog* fotoquímico se favorece en condiciones de inversión térmica y en zonas expuestas a la radiación solar. En la ZMCM, como se ha mencionado, convergen una serie de condiciones que facilitan su formación: tráfico denso, abundancia de radiación solar y situación de inversión térmica frecuentes. La presencia de *smog* se caracteriza por la acumulación de neblinas amarillentas constituidas por ozono y otros oxidantes (Spiro *et al.*, 2003).

El proceso de formación de *smog* involucra centenares de reacciones diferentes, que a su vez implican decenas de compuestos químicos actuando simultáneamente, de hecho, las atmósferas urbanas han sido referidas como “reactores químicos gigantes”.

En la tabla 6 se muestra que en la temporada seca fría (noviembre a febrero) se emiten mayoritariamente las partículas, CO y  $NO_x$ , y en la temporada seca caliente (marzo a mayo) se emiten mayoritariamente el  $SO_2$  y COV. En la tabla 7 se muestra las emisiones por día de la semana en la ZMCM, de los contaminantes que intervienen en la formación de *smog* fotoquímico.

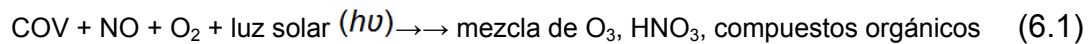
**Tabla 2** Emisiones diarias por temporada climática de la ZMCM, 2006 (IECCZMCM-SMA, 2006)

Temporada	Emisiones (ton/día)					
	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	COV
<b>Seca fría</b>	70.0	17.6	18.6	5,545.0	535.6	1,546.3
<b>Seca caliente</b>	61.3	17.6	19.2	5,409.3	531.8	1,555.9
<b>Lluvias</b>	61.2	16.7	19.0	5,410.1	532.6	1,551.3

**Tabla 3** Emisiones por día de la semana de la ZMCM, 2006  
(IECCZMCM-SMA, 2006)

Contaminante	Emisiones (ton/semana)	Emisiones (ton/día)		
		Día hábil	Sábado	Domingo
<b>PM<sub>10</sub></b>	424	61	61	59
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	113	16	17	16
<b>SO<sub>2</sub></b>	133	19	19	18
<b>CO</b>	38, 248	5, 435	5, 806	5, 268
<b>NO<sub>x</sub></b>	3, 743	534	560	513
<b>COV</b>	10, 884	1, 561	1, 574	1, 506

La luz solar, provoca incrementos en la concentración de radicales libres que participan en los procesos químicos en la formación de *smog*. Los productos finales del *smog* son O<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> y compuestos orgánicos (a veces nitrados) parcialmente oxidados.



Como se ha mencionado, sustancias como el NO, (HC)<sub>n</sub> y otros COV que se emiten inicialmente al aire, se denominan contaminantes primarios; aquellos que se forman a partir de estos últimos como O<sub>3</sub> y HNO<sub>3</sub>, se denominan contaminantes secundarios (Baird, 2001).

### 6.1. OZONO (O<sub>3</sub>)

Es un gas azulado de olor picante, poco denso y tiene un fuerte poder oxidante. El O<sub>3</sub> se produce en forma natural durante las tormentas eléctricas por el paso de descargas a través de la atmósfera, se encuentra en la estratosfera en la llamada “capa de ozono”. La formación del O<sub>3</sub> en la tropósfera requiere de la presencia de NO<sub>x</sub>, luz solar (*hν*) y O<sub>2</sub>.

Aproximadamente, entre los 16 y 40 km (en la estratósfera) la radiación ultravioleta proveniente del sol, interactúa con las moléculas de oxígeno, especialmente, alrededor

de los 25 km las radiaciones con longitud de onda ( $\lambda$ ) inferior a 242nm son absorbidas por este elemento que se descompone y se recombina para formar  $O_3$ , de acuerdo con:



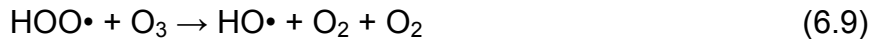
A su vez el  $O_3$  absorbe la radiación UV con  $\lambda$  entre 240 y 320nm, descomponiéndose en:



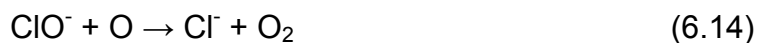
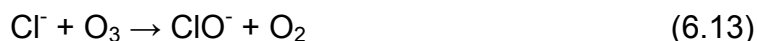
Estas tres ecuaciones forman un ciclo dinámico del  $O_2$  y  $O_3$ . El balance global da por resultado que tanto la concentración de  $O_2$  como la de  $O_3$  se mantengan constantes, pero con una transformación neta de la radiación UV a calor. De tal manera que la parte dañina de la luz solar para los seres vivos es eliminada. La destrucción más significativa de la capa de ozono la realizan los  $NO_x$ , los cuales aparecen en la estratósfera.



Otro elemento que consume  $O_3$  son los fragmentos de las moléculas de agua. El agua, que normalmente existe en la atmósfera, es desintegrada por la radiación UV, en una serie de compuestos de la forma de  $H\cdot$  (radical de hidrógeno),  $OH\cdot$  (hidróxilo) y  $HOO\cdot$  (hidroperóxilo)



Adicionalmente los derivados de cloro también consumen  $\text{O}_3$ . Las reacciones las reacciones más comunes son:



## 6.2. CARBONILOS

Entre los derivados químicos más importantes que intervienen y son afectados por las emisiones naturales y antropogénicas y que están involucrados en la contaminación fotoquímica, se encuentran los compuestos que presentan grupos carbonilo, los cuales representan un papel importante desde el punto de vista de la química atmosférica por las siguientes razones:

1. Constituyen los compuestos primarios más comunes (principalmente como residuos de combustiones incompletas)
2. Constituyen compuestos secundarios más frecuentes ya que son intermediarios obligatorios en la fotoxidación de compuestos orgánicos en la atmósfera.
3. Constituyen los compuestos fotolizados más abundantes en la atmósfera (excepto por el  $\text{NO}_2$ ) son una fuente esencial de radicales libres para la química troposférica

y constituyen el contaminante más importante en atmósferas moderadas y fuertemente contaminadas.

4. Debido a su naturaleza polar, los compuestos carbonilos pueden actuar fácilmente con partículas de material condensado, adsorción sobre tizne (hollín), solución en lluvia y niebla.

Los compuestos que presentan grupos carbonilo tienen efectos nocivos a la salud, sobre todo en habitantes de las grandes ciudades con atmósferas contaminadas, en donde contribuyen a la formación de *smog* fotoquímico (Finlayson-Pitts, 1986).

En las áreas urbanas con atmósferas contaminadas, los compuestos con grupos carbonilo deben su presencia predominantemente a fuentes antropogénicas. Existen muchas industrias que emiten gran variedad de compuestos carbonilos: petroquímica y refinación, plásticos, pinturas y recubrimientos, plantas de tratamientos de desechos, tostado de café y por supuesto las plantas donde se sintetizan estos compuestos. La quema de madera, así como los incendios forestales también son una fuente de carbonilos (en forma de aldehídos). Sin embargo, las fuentes principales son la incineración de basura y la explotación de combustibles fósiles, para la producción de energía, calentamiento industrial y doméstico; así como la operación de vehículos automotores.

En el aire urbano los compuestos con grupos carbonilo que son dominantes son el formaldehído y el acetaldehído, los cuales se originan tanto en fuentes primarias como secundarias, aunque también y no menos importante se encuentran el propionaldehído y butiraldehído.



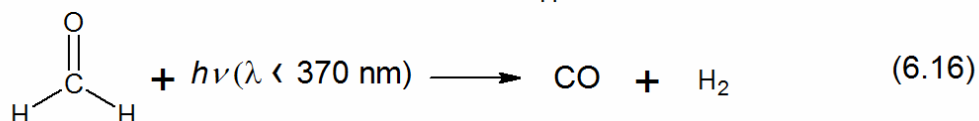
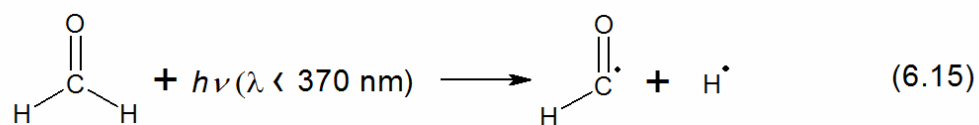
Los aldehídos son importantes como productos de oxidación de casi todos los hidrocarburos presentes en el aire; son precursores de aerosoles orgánicos como los óxidos y los ácidos de nitrógeno.

Aproximadamente el 81% del formaldehído generado en la ZMCM proviene de las fuentes móviles y está ampliamente ligado a las emisiones por escape de los vehículos pesados a diesel. En el centro de la ZMCM es donde se concentran las mayores emisiones, ya que es donde se presenta un intenso flujo vehicular (IECTZMCM-SMA, 2006).

La destrucción fotolítica del formaldehído involucra la formación de radicales HO<sub>x</sub>, la reacción fotolítica del CH<sub>3</sub>CHO y C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>CHO es además responsable de la producción de nitratos de peroxiacetilo.

Como se mencionó anteriormente los compuestos con grupos carbonilo de interés más importantes en la atmósfera son el formaldehído y el acetaldehído, los cuales en la atmósfera son descompuestos a causa de la radiación solar en el cercano ultravioleta.

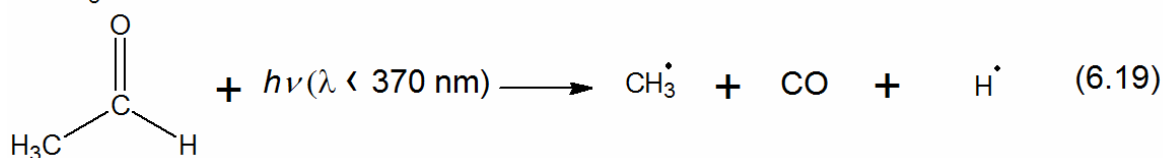
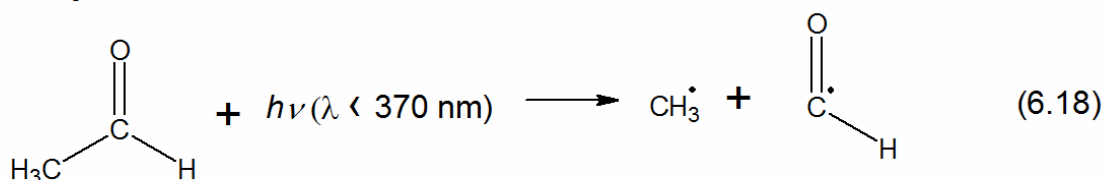
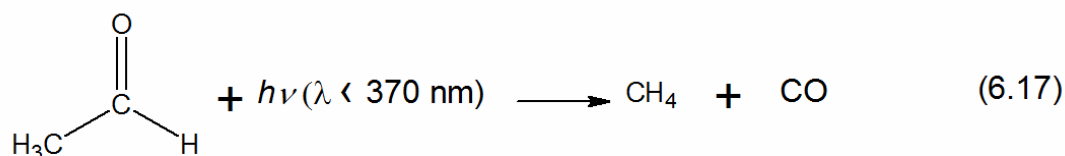
El formaldehído sigue dos caminos de fotólisis como se presenta en las reacciones 6.15 y 6.16:



Donde la reacción 6.15 produce H• y radicales formilo, el H• reaccionan rápidamente con O<sub>2</sub> para formar el radical HO<sub>2</sub>• y la reacción 6.16 produce una molécula de H<sub>2</sub> y

otra de CO, el H• es una especie iniciadora de radicales que reacciona con O<sub>3</sub> (Ver reacción 6.10) y estando en exceso el O<sub>3</sub> da por resultado HOO• (Ver reacción 6.8), el cual en presencia de NO da lugar a la formación del radical HO• (Ver reacción 6.27) que es el principal oxidante en la tropósfera.

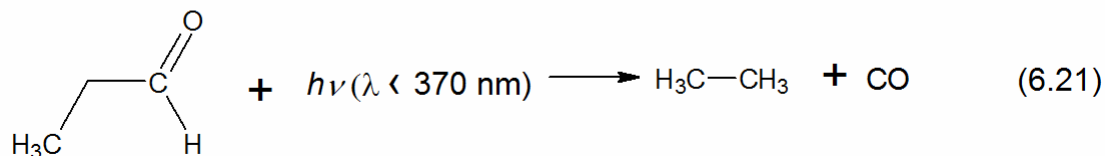
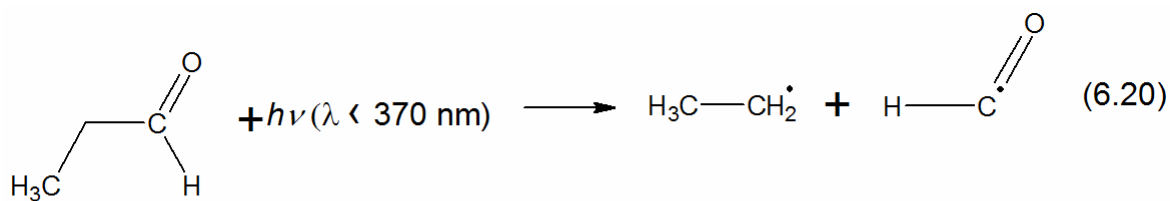
Para el acetaldehído los caminos primarios de disociación son los siguientes:



Las reacciones también producen radicales libres, metano (CH<sub>4</sub>), CO y H•.

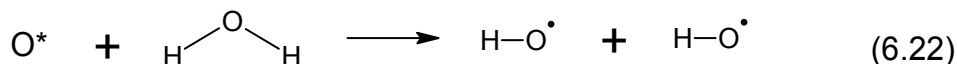
La mayor parte de los estudios sobre aldehídos involucran al formaldehído y al acetaldehído, debido a que ambos son típicamente encontrados en mayores concentraciones en el aire.

Otros aldehídos generadores de radicales libres pero en una menor proporción es el propionaldehído, esto se debe al hecho de que se encuentra en concentraciones menores que el formaldehído y el acetaldehído. De la reacción de fotodisociación se tienen dos posibles productos:



### 6.3. HIDROPERÓXIDOS

Los hidroperóxidos son conocidos como productos secundarios de reacciones fotoquímicas y se forman radicales a partir de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ . El origen primario del radical  $\text{HO}\cdot$  se resume a continuación: la fotólisis del  $\text{O}_3$  (Ver reacción 6.4) debido a la radiación de onda corta de 320 nm, permite a los átomos de O excitados reaccionar con el vapor de agua, de acuerdo a:



La mayoría de los  $\text{O}^*$  reacciona con los  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$

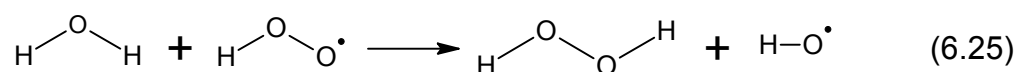
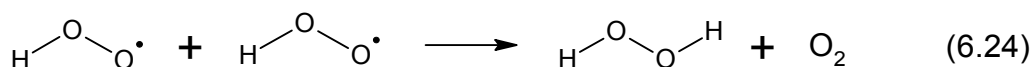


La fotólisis de  $\text{O}_3$  en presencia de vapor de agua es la mayor fuente del radical  $\text{OH}\cdot$  en la tropósfera baja cuando la razón de mezclado es alta. El radical  $\text{OH}\cdot$  es el precursor de las especies reactivas en la tropósfera, ya que reacciona con compuestos orgánicos y con los clorofluorocarbonos (CFCs) (Atkinson, 2000).

<sup>2</sup> M es un sustrato aceptor de energía, llamado tercer cuerpo. Puede ser  $\text{O}_2$  o  $\text{N}_2$ .

El conocimiento del papel que juega el radical  $\text{OH}\cdot$  aun a pesar de su baja concentración fue el paso principal para entender la química atmosférica. Los tiempos de vida media de la mayoría de los gases atmosféricos, están determinados por las concentraciones del radical  $\text{OH}\cdot$  y por sus coeficientes de reacciones correspondientes. Los gases que no reaccionan con el  $\text{OH}\cdot$  tienen una larga residencia en la atmósfera, pero son destruidos en la estratósfera y tienen una influencia notable en la química del  $\text{O}_3$  estratosférico.

El  $\text{H}_2\text{O}_2$  se produce en reacciones que involucran a los radicales  $\text{HOO}\cdot$  y el  $\text{HOO}\cdot$  hidratado:



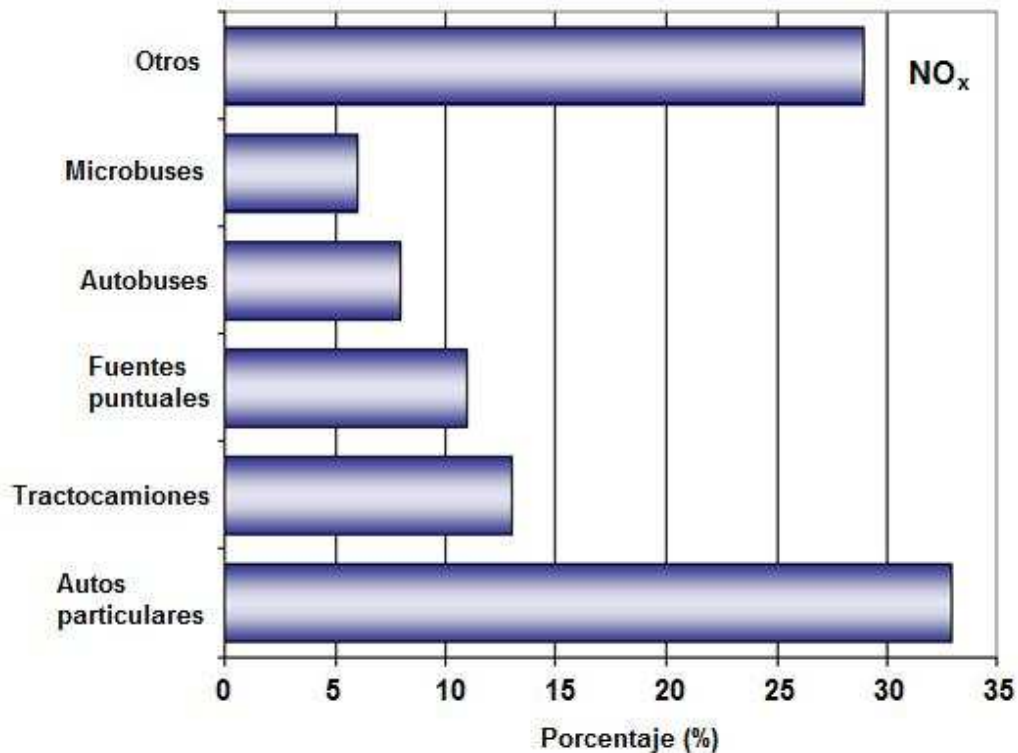
En las reacciones de degradación de los COV se produce intermediarios como los radicales  $\text{RO}_2\cdot$  y  $\text{HO}_2\cdot$  (Ver reacciones 6.42 y 6.43); estos radicales reaccionan con el NO para convertirlo en dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) (Ver reacciones 6.44).

## 6.4. PRECURSORES DE $\text{NO}_x$ y $\text{SO}_x$ Y FORMACIÓN DE ÁCIDOS

### 6.4.1. ÓXIDOS DE NITRÓGENO ( $\text{NO}_x$ )

Los compuestos de nitrógeno son nocivos para los animales y para la vegetación. Los compuestos  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{HNO}_3$ , son los principales presentes en la atmósfera y provocan reacciones fotoquímicas y aumentan de manera considerable en ciudades con mucha luminosidad y contaminadas. En la ZMCM las concentraciones de los  $\text{NO}_x$  son atribuibles tanto a la industria como al transporte (Jiménez, 2004). La figura 14 muestra los principales emisores de  $\text{NO}_x$  por sector en la ZMCM, en donde las fuentes

puntuales son referidas a las plantas de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo, fábricas, etc.

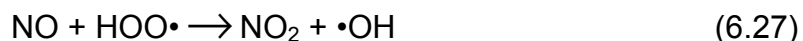


**Figura 1** Principales emisores de NO<sub>x</sub> por sector (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

El único elemento que permanece estable en presencia de oxígeno es el nitrógeno. El enlace que mantiene unido los dos átomos de nitrógeno es tan estable que la transformación de N<sub>2</sub> a NO requiere un gasto elevado de energía. Sin embargo, en la atmósfera aparecen NO y NO<sub>2</sub>, que una vez formados, se transforman lentamente a N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.

El NO es un gas incoloro, inerte en temperatura normal pero oxidante en temperaturas altas, se obtiene por la reacción entre el O<sub>2</sub> y el N<sub>2</sub> del aire en combustiones realizadas a más de 1,100°C, también se forma durante la fabricación de los HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, así como en la nitración industrial. Se estima que el 10% del NO es originado en procesos industriales, mientras que el 90% restante es proveniente de la combustión del petróleo

y sus derivados, el carbón o gas natural. Comúnmente en presencia de iones  $\text{HOO}^\bullet$ , el NO se oxida rápidamente obteniendo así el  $\text{NO}_2$



La formación de NO sólo es significativa cuando el aire está caliente, como ocurre en descargas eléctricas. Las fuentes naturales de NO atmosférico son tormentas e incendios forestales y las fuentes antropogénicas la quema de combustibles, con valores comparables a los naturales.

La obtención de NO se logra también a partir de la fotodisociación del  $\text{NO}_2$ , obteniendo NO y O (6.28). El O reaccionando a su vez con el  $\text{O}_2$  molecular obteniendo así el  $\text{O}_3$  troposférico (Ver reacción 6.3) o con  $\text{H}_2\text{O}$  para formar  $\text{OH}^\bullet$  (6.29). El NO restante reaccionará con el  $\text{O}_3$  (Ver reacción 6.5).



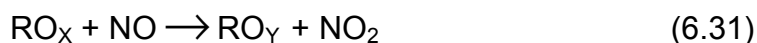
El  $\text{NO}_2$  es un gas de color pardo rojizo y olor desagradable que en temperatura ambiente está en equilibrio con el NO. Se origina en combustiones a altas temperaturas, tanto en industrias como en vehículos, en la fabricación de  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , en la nitración industrial y durante las tormentas eléctricas.

Entre sus efectos se encuentran la irritación pulmonar y el ataque al sistema cardiovascular. En los materiales destiñe pinturas y ataca los conductores eléctricos. En las plantas provoca inhibición en el crecimiento, provoca la caída prematura de hojas, además, disminuye la visibilidad.

El NO produce gran cantidad de OH• con una acción oxidante en el medio y a su vez se pasa a NO<sub>2</sub>. La reacción siguiente será la obtención de HNO<sub>3</sub> (6.30), y estas moléculas de ácido son altamente higroscópicas y son absorbidas en las gotas de agua atmosférica, cayendo en forma de agua pluvial. Este es el mecanismo natural de eliminación de los NO<sub>x</sub> de la atmósfera.



La presencia de radicales oxigenados origina la oxidación de NO a NO<sub>2</sub>

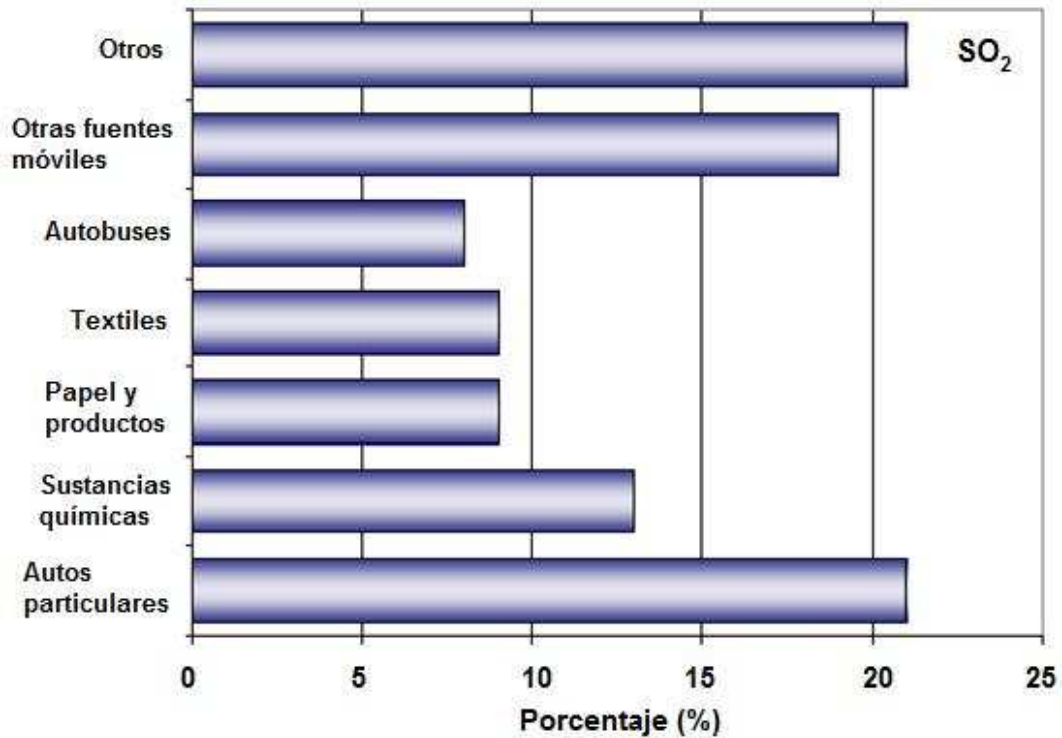


#### 6.4.2. ÓXIDOS DE AZUFRE (SO<sub>x</sub>)

Los SO<sub>x</sub> pueden ser contaminantes tanto primarios como secundarios. Las centrales eléctricas, las industrias, los volcanes y los océanos emiten SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en forma directa, como contaminantes primarios. Además, los procesos biológicos de descomposición y algunas fuentes industriales emiten H<sub>2</sub>S, que oxida y forma el contaminante secundario SO<sub>2</sub>.

El SO<sub>2</sub> es un gas de condensación fácil, incoloro, de olor picante e irritante y más pesado que el aire. Se disuelve ligeramente en el agua formando ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) que acelera la corrosión de los metales y de los materiales de construcción (en

especial ataca la piedra caliza). El  $\text{SO}_2$  provoca irritación del tracto respiratorio, agrava bronquitis y favorece el enfisema pulmonar. En la ZMCM el  $\text{SO}_2$  lo emite en el sector industrial principalmente (Figura 15) (IECCZMCM-SMA, 2006).



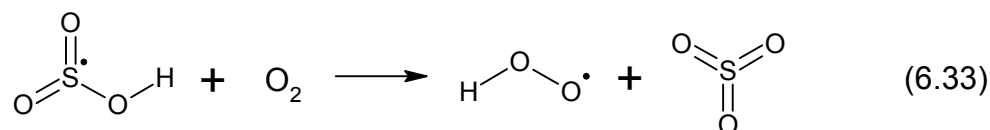
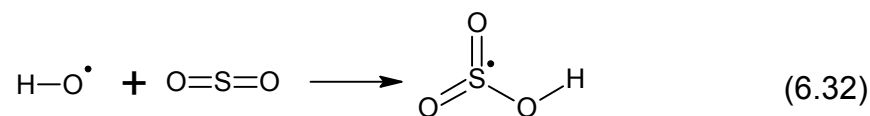
**Figura 2** Principales emisores de  $\text{SO}_2$  por sector (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

El  $\text{SO}_3$  se presenta en estado líquido o sólido en la atmósfera, ya que tiene una temperatura de ebullición de  $44.8^\circ\text{C}$ . Es incoloro y de sabor amargo, mucho más intenso que el  $\text{SO}_2$ . Tiene elevada afinidad con el agua, de tal forma que cuando se descarga en la atmósfera se combina rápidamente con ella para formar  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , incorporándose rápidamente a la precipitación pluvial, nieve y granizo.

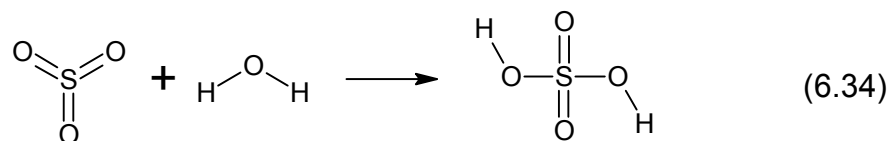
El mecanismo predominante de la conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , es una reacción homogénea en fase gas; el mecanismo de la conversión consiste de varias etapas secuenciales. Como es habitual para gases traza atmosféricos, es el radical  $\text{HO}\cdot$  el que



inicia el proceso. Puesto que las moléculas de  $\text{SO}_2$  contienen enlaces múltiples pero no hidrógeno, se espera que el  $\text{OH}\cdot$  se adicione a la molécula sobre el átomo de azufre:



La molécula de  $\text{SO}_3$  rápidamente se combina con una molécula de agua, para formar  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Finalmente, las moléculas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  reaccionan con agua, ya sea en forma de vapor de agua, o para formar un aerosol de gotas, siendo cada una de ellas una disolución acuosa de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .



Tanto el dióxido como el trióxido de azufre intervienen en la formación de la lluvia ácida, alteración particularmente importante en la ZMCM.

El  $\text{H}_2\text{S}$  es un gas tóxico, incoloro y de olor desagradable. Es un contaminante del aire que proviene de la descomposición natural de plantas o de algunos procesos industriales. Provoca la pérdida del olfato, irritación en vías respiratorias, dolor de cabeza, náuseas, daños en el sistema nervioso central y muerte (Jiménez, 2004)

La reacción de oxidación más importante del  $\text{H}_2\text{S}$  parece ser aquella donde interviene el  $\text{O}_3$ :



La quema de combustibles fósiles que contiene azufre produce  $\text{SO}_2$  en proporción directa a la cantidad de azufre en el combustible.



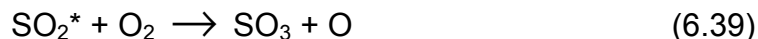
El destino final de la mayor parte del  $\text{SO}_2$  atmosférico es su conversión en sales de sulfato, que se eliminan mediante la sedimentación o el lavado con precipitación. La conversión a  $\text{SO}_2$  va por alguna de las dos rutas: oxidación catalítica u oxidación fotoquímica. El primer proceso tiene más eficacia si hay gotas de agua que contengan  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  o  $\text{NH}_3$  (Davis *et al.*, 2004).



A humedades relativas bajas el principal proceso de conversión es la oxidación fotoquímica. El primer paso es la fotoexcitación del  $\text{SO}_2$ :



Después la molécula excitada reacciona con facilidad con  $\text{O}_2$  para formar  $\text{SO}_3$ :

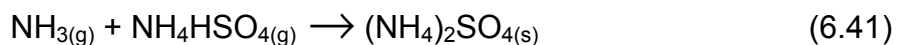


Gran parte de las consecuencias de esta reacción se presentan en la lluvia ácida que se presenta en alto grado en la ZMCM.

El  $\text{H}_2\text{SO}_4$  reacciona con los iones  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , formando las correspondientes sales. Cuando el contenido de estos iones no es suficientemente alto y existe predominancia del  $\text{SO}_2$ , hace que exista un exceso de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , que junto con el  $\text{HNO}_3$  son responsables de la lluvia ácida.

La reacción más importante de oxidación en fase gaseosa del  $\text{SO}_2$  atmosférico, es con radicales libres como el  $\text{HO}\cdot$ ,  $\text{HOO}\cdot$  y el metilperoxilo ( $\text{H}_3\text{COO}\cdot$ ). Parece ser que entre todos estos radicales, el  $\text{HO}\cdot$  es el principal responsable de esta oxidación (Ver reacción 6.32).

El  $\text{H}_2\text{SO}_4$  formado tiene una presión de vapor baja y se condensa fácilmente en presencia de  $\text{H}_2\text{O}$ . De la misma manera que el  $\text{HNO}_3$  y el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  puede dar lugar a un proceso de transformación de gas a partículas sólidas por reacción, principalmente con el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) presente en la atmósfera:



Se ha encontrado que el  $\text{SO}_4^{2-}$  contribuye en mayor proporción a la acidez en comparación con  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2$  lo cual esta de acuerdo con los patrones regionales de formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$ , con las velocidades relativas de su oxidación en la atmósfera a productos secundarios, y con las eficiencias de remoción atmosférica de compuestos de nitrógeno y azufre por precipitación.

### 6.5. COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)

En los  $(HC)_n$  la volatilidad se relaciona con el número de carbonos, a mayor número, el punto de ebullición es más elevado

Son sustancias químicas que fácilmente se vaporizan a temperatura ambiente. Los COV incluyen una amplia gama de sustancias individuales tales como benceno y tolueno provenientes de los vehículos.

Los combustibles fósiles tales como, gasolina y gas natural son la mayor fuente de COV aunque también son emitidos por productos como: pinturas y lacas, disolventes de pintura, productos de limpieza, pesticidas, materiales de construcción y mobiliarios, equipos de oficina tales como fotocopiadoras e impresoras, marcadores permanentes y soluciones fotográficas. En la figura 16 se muestra los principales emisores de COV por sector en la ZMCM.

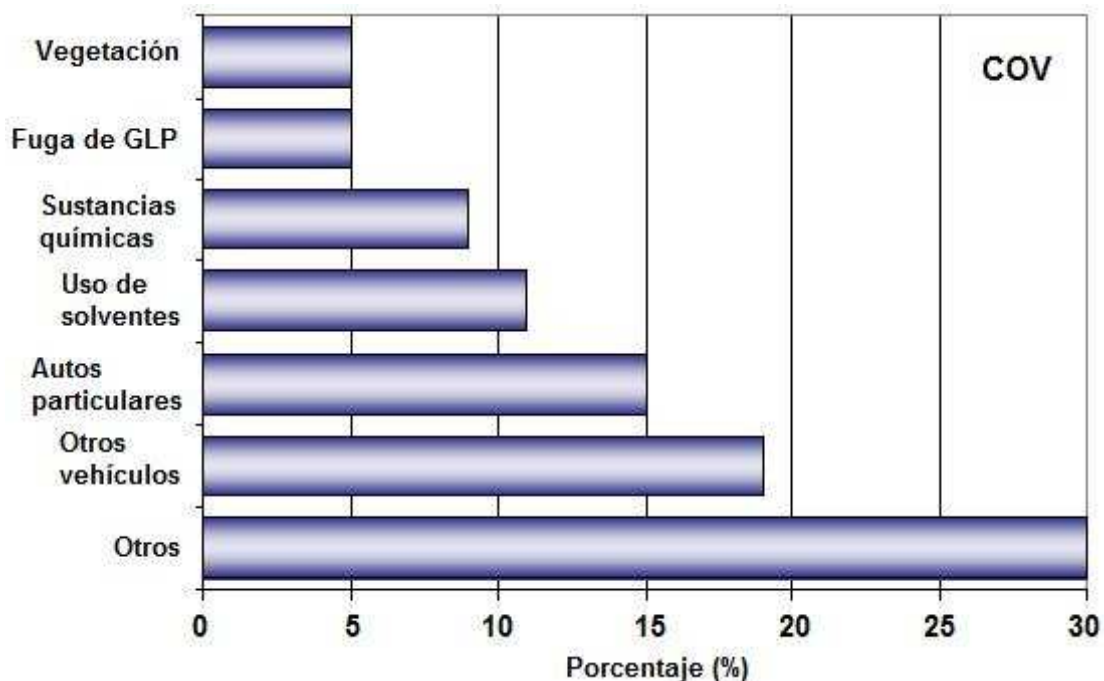


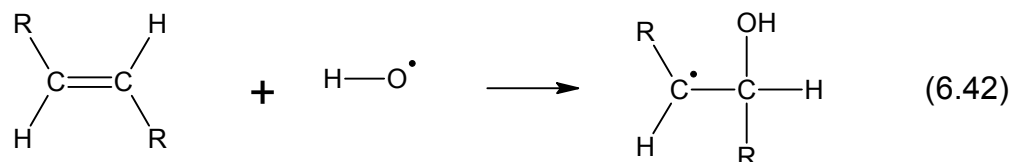
Figura 3 Principales emisores de COV por sector (Fuente: IECCZMCM-SMA, 2006)

Algunos COV son bastante tóxicos, incluyendo el benceno, PAHs y butadieno. Fuentes de emisión de butadieno incluyen la confección de gomas sintéticas, máquinas de gasolina y humo de cigarrillo.

Los COV, al estar en la atmósfera, pueden reaccionar con la luz ultravioleta y óxidos de nitrógeno provenientes del ozono troposférico (Proyecto MILAGRO, 2006).

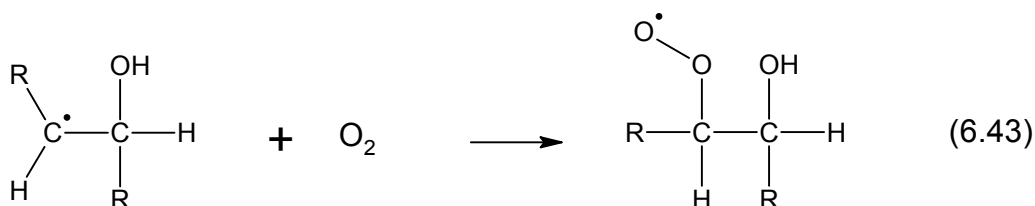
Los COV más reactivos en el aire urbano son los hidrocarburos que contienen un doble enlace carbono-carbono, C=C, ya que pueden adicionar radicales libres. El ejemplo más simple es el eteno, H<sub>2</sub>C=CH<sub>2</sub>. Se considera un hidrocarburo general de tipo RHC=CHR, y la parte reactiva es el doble enlace ya que es el sitio selectivo en las reacciones atmosféricas.

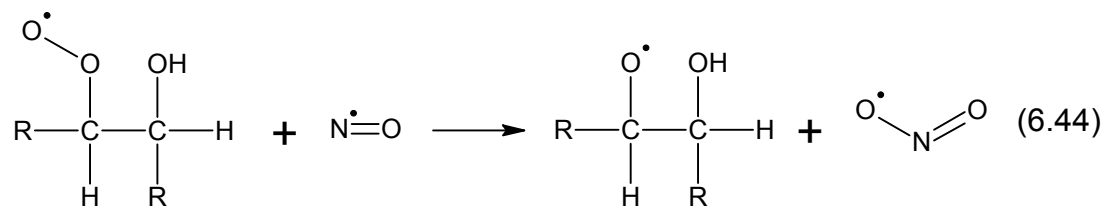
En el aire, reacciona con radicales HO• por acción del enlace C=C



Esta reacción de adición es un proceso más rápido, ya que posee una energía de activación más baja, que la alternativa reacción de abstracción de hidrógeno.

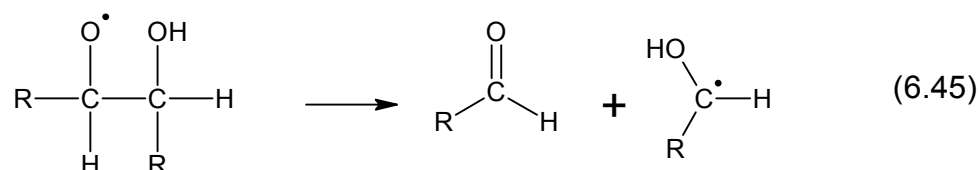
Los radicales a base de carbono, producidos a partir del radical hidroxilo con el hidrocarburo (6.42), adicionan O<sub>2</sub> para dar un radical ROO• (6.43), el cual a su vez oxida al NO• a NO<sub>2</sub>• (6.44):





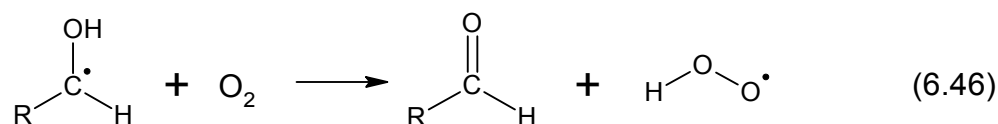
Al obtener  $\text{NO}_2^\bullet$  se realizan las reacciones 6.5 y 6.6

Al no perder el H por abstracción por medio del  $\text{O}_2$ , se descompone espontáneamente por la ruptura del enlace C—C para obtener un aldehído y un radical:

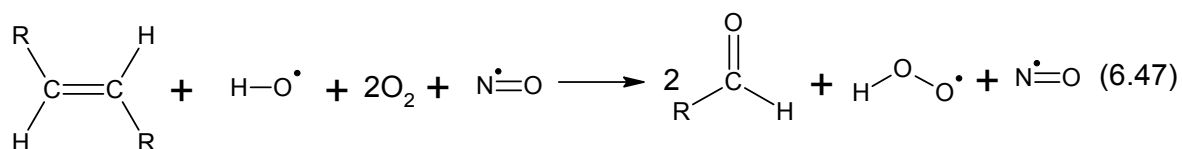


Esta reacción no requiere un aporte de energía, es decir,  $\Delta H$  es cercano a cero, debido a que, en este caso, la formación de un enlace  $\text{C}=\text{O}$  a partir de  $\text{C}-\text{O}$  compensa energéticamente la pérdida del enlace  $\text{C}-\text{C}$ . Puesto que la descomposición de este radical no es un proceso endotérmico, su energía de activación es pequeña y por tanto ocurre espontáneamente en el aire (Baird, 2001).

El radical  $\text{RHC}^\bullet\text{OH}$  producido en la reacción anterior, reacciona posteriormente con una molécula de  $\text{O}_2$  con la pérdida del hidrógeno hidroxílico por la acción y la formación del doble enlace  $\text{C}=\text{O}$ :



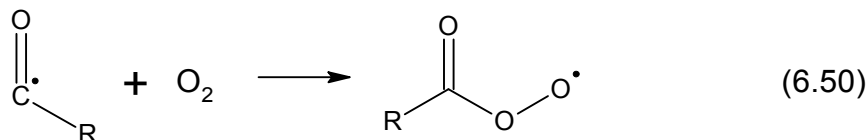
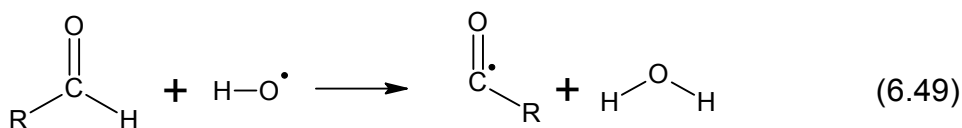
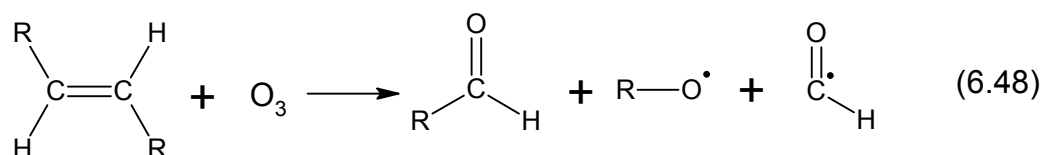
Al realizar una síntesis de las reacciones anteriores se obtiene:



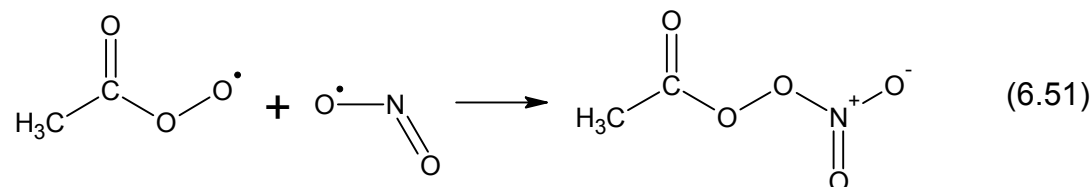
### 6.6. NITRATO DE PEROXIACETILO (PAN)

Son compuestos complejos que se encuentran en el *smog* fotoquímico. En su formación intervienen (HC)<sub>n</sub> parcialmente oxidados, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>.

A continuación se presentan las reacciones de la formación de nitratos de peroxiacilo:



Para el caso común donde R sea CH<sub>3</sub>, el producto de nitrato formado es el PAN, el cual es un potente irritante de los ojos, y también tóxico para las plantas.



La etapa que ocurre por la tarde de un episodio de *smog* fotoquímico, se caracteriza por el aumento de agentes oxidantes como el O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub> y el PAN (Baird, 2001).

### 6.7. LLUVIA ÁCIDA

Se denomina *lluvia ácida* aquella cuya concentración de iones hidronio ( $H^+$ ) que sea menor a un pH de 5.6, el cual corresponde a un pH en equilibrio del  $CO_2$  con el agua en una atmósfera contaminada debido a la presencia de ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ) en la atmósfera (Reacción 6.52).



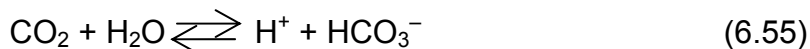
Los materiales expuestos a condiciones naturales intramuros están sujetos a diversos procesos de degradación, tanto por mecanismos naturales de intemperismo (disolución por lluvia natural, depositación de aerosoles marinos, ataque de microorganismos, etc.) como por contaminantes del aire. Debido a su naturaleza química, la piedra caliza o carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) resulta altamente sensible a soluciones acuosas ácidas (Reacción 6.53) (Bravo *et al.*, 2000).



El  $HCO_3^-$ , siendo un ácido débil, coexiste en equilibrio con los productos de su disolución (Reacción 6.54).



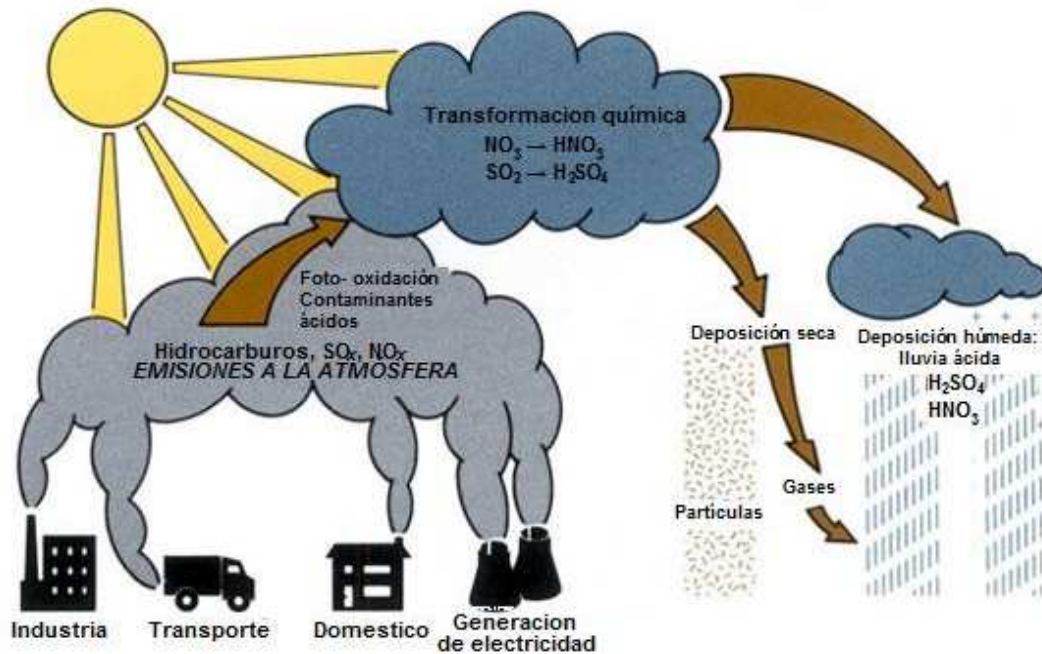
De las ecuaciones 6.52 y 6.54 se obtiene:



El fenómeno de lluvia ácida, se presenta cuando el  $SO_2$  y  $NO_x$  reaccionan con la humedad de la atmósfera y propician la formación de  $H_2SO_4$  y  $HNO_3$ , respectivamente. Estos ácidos fuertes que dan el carácter ácido a la lluvia, nieve, niebla o rocío, se miden en las muestras de agua recolectadas en forma de iones sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) y nitrato



( $\text{NO}^3$ ), respectivamente. En la figura 17 se muestra las reacciones y la deposición característica de la formación de lluvia ácida.



**Figura 4** Reacciones y deposición de contaminantes (Fuente: [http://portal.unesco.org/education/en/ev.php-URL\\_ID=29442&URL\\_DO=DO\\_TOPIC&URL\\_SECTION=201.html](http://portal.unesco.org/education/en/ev.php-URL_ID=29442&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html))

En las gotas de lluvia se incorporan algunos compuestos químicos o aerosoles por efecto de arrastre, al caer como precipitación. Sin embargo, el principal mecanismo de formación de lluvia ácida se realiza en la fase líquida jugando un papel muy importante el equilibrio químico.

Los aerosoles son transportados por efecto del viento depositados por gravedad dependiendo del tamaño y forma de la partícula.

La lluvia ácida preocupa por sus efectos negativos en ecosistemas acuáticos y terrestres provocando el deterioro de árboles y plantas. Al nivel del ecosistema ocasiona la muerte de microorganismos que descomponen la materia orgánica del suelo que aportan nutrientes para las plantas, también reduce la disponibilidad de

minerales y ocasiona la lixiviación de nutrientes, y puede incrementar la solubilidad de iones tóxicos (Al, Fe, Mn, Hg, etc.) que con el paso del tiempo pueden contaminar el agua superficial o subterránea y afectar a los organismos que las habitan o consumen (Fenn *et al.*, 2002).

## CAPÍTULO VII

**7. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN AIRE****7.1. FUENTES ANTROPOGÉNICAS**

Una fuente de contaminación es aquella que da origen a la misma. Las emisiones antropogénicas se concentran en áreas específicas, como en grandes ciudades o en zonas industriales, donde son más importantes que las emisiones naturales; es importante mencionar que toda emisión antropogénica puede ser controlada. Las emisiones antropogénicas se pueden clasificar en:

**Fuentes puntuales (también conocidas como fuentes estacionarias o fijas).** Una fuente puntual se refiere a una fuente en un punto fijo o estacionario, existen cientos de miles de fuentes estacionarias de contaminación del aire, como las plantas de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo, fábricas, etc. Según la industria o proceso específico, las fuentes estacionarias pueden emitir uno o varios contaminantes criterio del aire además de muchos otros contaminantes peligrosos.

Una de las mayores preocupaciones en todo el mundo, es la emisión de contaminantes como el  $\text{SO}_2$  y partículas en la generación de energía eléctrica, pues su proceso involucra la combustión de grandes cantidades de combustibles fósiles. Las industrias químicas, entre otras son responsables de emitir muchos contaminantes peligrosos como los compuestos orgánicos volátiles (ISCA-INE, 2007).

Una de las principales fuentes de emisión antropogénica es el uso de combustibles. El tabla 8 muestra un listado de los principales contaminantes relacionados con el uso de distintos combustibles en calderas. Si bien estos listados no son exhaustivos, sí contienen los principales contaminantes de interés en cada caso, aunque es posible

que no todos los contaminantes se emitan siempre que se utiliza cada combustible. Por ejemplo, en el caso del gas natural predominan las emisiones de  $\text{NO}_x$  e hidrocarburos no quemados; en el caso del carbón, las principales emisiones son de  $\text{SO}_2$ , partículas,  $\text{NO}_x$ , y metales pesados, dependiendo de su composición y lugar de origen (EDPECT-INE, 2007).

**Tabla 1** Principales contaminantes emitidos por el uso de distintos combustibles

Combustible	Contaminantes emitidos	
<b>Carbón</b>	Monóxido de carbono (CO) Pb $\text{NO}_x$ Partículas suspendidas primarias $\text{SO}_x$ Sb y sus compuestos Be y sus compuestos	Metales (Cd, Cr, Co, Hg, Ni) y sus compuestos Dioxinas y furanos Etilbenceno Formaldehído Ácido clorhídrico (HCl) y ácido fluorhídrico (HF) Aromáticos (benceno, tolueno y xileno)
<b>Gas natural</b>	Monóxido de carbono (CO) Pb $\text{NO}_x$ Partículas suspendidas $\text{SO}_x$	Metales (Cd, Cr, Co, Hg, Ni) y sus compuestos Formaldehído Aromáticos (tolueno y benceno)
<b>Combustibles pesados (combustóleo)</b>	Monóxido de carbono (CO) Pb $\text{NO}_x$ Partículas suspendidas primarias $\text{SO}_x$ Benceno Be y sus compuestos	Metales (Cd, Cr, Co, Hg) y sus compuestos Dioxinas y furanos Etilbenceno Formaldehído Mn y sus compuestos

En lo que respecta al combustóleo, las principales emisiones asociadas con su combustión son las de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y partículas; cabe mencionar que este combustible es un producto residual de la refinación del petróleo, y su calidad depende de la calidad del petróleo crudo del que provenga.

**Fuentes móviles.** Las fuentes móviles incluyen a las diversas formas de transporte tales como automóviles, camiones y aviones, etc.

La principal fuente móvil de contaminación del aire es el automóvil, pues produce grandes cantidades de CO y cantidades menores de NO<sub>x</sub> y COV.

Los programas para el control de emisiones de automóviles, como el programa de verificación vehicular y el uso de convertidores catalíticos, han reducido considerablemente la cantidad de contaminantes del aire. Además, las normas que especifican la calidad del combustible de los automóviles y límites de emisiones de vehículos nuevos y en circulación, también han contribuido a una mayor eficiencia y menores emisiones. Por ejemplo, la transición de la gasolina con plomo a la gasolina sin plomo, ha reducido sustancialmente la cantidad de plomo en el aire ambiental. Sin embargo, debido al creciente número de vehículos, los automóviles siguen siendo la principal fuente móvil de contaminación del aire (ISCA-INE, 2007).

**Fuentes de área.** Las fuentes de área incluyen actividades económicas numerosas y dispersas, en conjunto, éstas generan la mayor cantidad de contaminantes tóxicos del aire en la ZMCM, ya que la mayoría de las emisiones están ligadas al consumo de la población, en actividades tales como: el lavado en seco, operaciones de limpieza y desengrase, artes gráficas, gasolineras, el uso de madera para cocinar o calentar la casa, las imprentas, las tintorerías, etc. (IECTZMVM-SMA, 2006).

## 7.2. FUENTES BIOGÉNICAS

Las emisiones a la atmósfera generadas en la naturaleza forman parte de los ciclos propios del planeta, ayudan a regular la temperatura a escala global, propician el balance químico de la atmósfera y han determinado en gran medida la evolución de los ecosistemas.

Además de las actividades humanas, los fenómenos naturales y la vida animal y vegetal pueden jugar un papel importante en el problema de la contaminación del aire.

Un gran número de investigadores han establecido que la vegetación (ejemplo: pastos, cultivos, arbustos, bosques, etc.), emiten cantidades significativas de hidrocarburos a la atmósfera.

El óxido nitroso ( $N_2O$ ) es producido naturalmente en los suelos como parte de los procesos de desnitrificación (es decir, la reducción de nitritos y nitratos a nitrógeno gaseoso como  $N_2$  o  $NO_x$ ). Por su parte, los fertilizantes nitrogenados comerciales constituyen una fuente adicional de nitrógeno, lo cual incrementa las emisiones del suelo de  $N_2O$ . Se estima que las emisiones de  $NO_x$  provenientes de los suelos constituyen un 16% de la cantidad global de  $NO_x$  en la tropósfera.

La **erosión eólica** es otro fenómeno natural que genera emisiones. Sin embargo, debido a que dichas emisiones típicamente están asociadas con suelos perturbados, frecuentemente son tratadas como fuentes de área. Otras categorías más pequeñas de fuentes naturales incluyen a las termitas quienes emiten ( $CH_4$ ), los relámpagos emisiones de  $NO_x$ , los volcanes y la actividad geotérmica emisiones de  $SO_x$  (ISCA-INE, 2007).

Las emisiones anuales de contaminantes tóxicos de la ZMCM se presentan en la tabla 9 se observa que las fuentes con mayor aportación son las de área, con el 51% de los contaminantes tóxicos de la zona, seguida de las fuentes móviles, con un 29% del total. Es importante señalar que el 14% de las emisiones de las fuentes de área se generan

en actividades industriales de limpieza y recubrimiento de superficies (IECTZMCM-SMA, 2006).

**Tabla 2** Emisión de contaminantes tóxicos por entidad en la ZMCM, 2006

Fuente	Distrito Federal	Estado de México	ZMCM	
	[ton/año]	[ton/año]	[ton/año]	[%]
Puntuales	15,744	14,206	29,950	17
Área	35,748	53,100	88,848	51
Móviles	19,306	31,003	50,309	29
Naturales	2,099	3,674	5,773	3
<b>Total</b>	<b>72,897</b>	<b>101,983</b>	<b>174,880</b>	<b>100</b>

En el caso de los COV naturales son relativamente insignificantes, comparados con los antropogénicos, ya que representan el 5% de los COV estimados en la ZMCM.

Dentro de los contaminantes tóxicos generados por la vegetación, el metanol es el compuesto de mayor importancia, ya que representa el 88% de las emisiones naturales. El acetaldehído y el formaldehído contribuyen en menor proporción con un 9% y 3%, respectivamente, del total de las emisiones de fuentes naturales en la ZMCM. Por último, los metales tóxicos liberados por los suelos no son significativos para las emisiones de fuentes naturales.

**CAPÍTULO VIII****8. CONCLUSIONES**

El proceso de corrosión atmosférica es la suma de los procesos parciales (individuales) de corrosión que tienen lugar cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal. Las precipitaciones acuosas (lluvia, nieve o niebla) y la condensación de humedad por cambios de temperaturas (rocío), conjuntamente con la presencia de partículas depositadas en la superficie metálica, son, sin duda, los principales promotores de la corrosión en la atmósfera. Del mismo modo los productos de las reacciones fotoquímicas son base fundamental para que suceda el fenómeno de corrosión, obteniendo de estas reacciones, precursores químicos como  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , y en combinación con las condiciones climáticas, provocará la formación de lluvia ácida, que es, en zonas urbanas como la ZMCM, la mayor fuente de deterioro estructural y natural.

La variabilidad climática en nuestro país, el creciente deterioro ambiental sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como, los efectos tóxicos de los metales sobre la salud de los habitantes de la Ciudad de México y el continuo crecimiento Industrial, generan las condiciones propicias para la Corrosión Atmosférica. Las condiciones ambientales de alta humedad, conjuntamente con altas temperaturas, como se presenta en las zonas costeras favorecen, los procesos de deterioro de los materiales en la atmósfera. Por el contrario, a bajas temperaturas y en atmósferas secas, la corrosión atmosférica sobre los metales o deposición de partículas, puede ser aún más alarmante por los efectos que tienen las partículas en la salud.

Actualmente no existe en nuestro país un estudio específico sobre la Dinámica de los metales pesados y su relación directa con la Corrosión Atmosférica, el comportamiento



de los metales en diferentes ambientes urbanos, semi-urbanos, rurales y marítimos de México, que permita determinar el grado de corrosión de estos sobre los metales presentes en la Atmósfera. La difusión de este tipo de información es muy importante para las Autoridades Federales, Estatales y Municipales debido a los efectos que los metales pesados tiene sobre la salud de los habitantes de las diferentes zonas, además del deterioro sobre Monumentos Históricos y el Patrimonio Cultural de nuestro país. Con este trabajo de investigación se pretende contribuir al conocimiento de la corrosión atmosférica debido a procesos biogénicos y antropogénicos por metales pesados.

## CAPITULO IX

**9. BIBLIOGRAFÍA**

1. ATSDR, 2008, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA) Priority List of Hazardous Substances for 2007, Atlanta, USA  
<http://www.atsdr.cdc.gov/cercla/07list.html>
2. Atkinson, R., Atmospheric chemistry of VOCs and NOx, Atmos. Environ. 34 (2000) 2063 – 2101.
3. Baird, C., 2001, Química Ambiental, España, Editorial Reverté S. A., pp 32-35, 114-160
4. Báez P. A., García, R. M., Belmont, R. D., 2001. Trace heavy metals content in rain water collected in Mexico city, Mexico. Proceedings of the Second International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales. Istanbul Thechnical University, Istambul, Turkey. 494-500.
5. Barrie, L. A., Limberg, S. E., Chang, W. H., Ross, H. B., Arimoto, R., Church, T. M., 1987, On the concentration of trace metals in precipitation. Atmospheric Environment, 21 (5): 1113-1135
6. Botello, A. V. J. L.; Rojas-Galaviz, J. A.; Benítez y D. Zárate-Lomelí (Eds), 1996. Golfo de México, Contaminación e Impacto ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX Serie Científica 5
7. Bravo, H. A., Saavedra, M. R., Torres, R. J., Sánchez, P. A., Granada, L. M., Soto, R. A., Harris, J., Efecto potencial de la lluvia ácida en monumentos mayas, Ciencia y desarrollo, Vol. 26-153 pp 49-57

8. Chow, J. C.; Watson, J. G.; Edgerton, S. A. y Vega, E., 2002, Chemical composition of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Mexico City during winter 1997. *The science of the total environment*, 287, pp. 177-201.
9. CONAPO, 2001, La distribución territorial de la población en México. Consejo Nacional de Población, <http://www.conapo.gob.mx/publicaciones/Lapoblacion/07.pdf>
10. Contreras, A. L.; Molero, M. M.; 2001, Introducción al Estudio de la Contaminación y su Control, 2ª Ed, 4ª reimp, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España, pp 32-33
11. CORENADER-IAVUDF, 2003. Inventario de las áreas verdes urbanas del Distrito Federal, <http://www.sma.df.gob.mx>
12. Davis, M. L.; Masten, S. J., 2004, Ingeniería y Ciencias Ambientales, Ed. Mc Graw Hill, México, pp 174-175
13. Duce A. R., Mohnen V. A., Zimmerman P. R., Grosjean D., Cautreels W., Chatfield R., Jaenicke R., Ogree J. A., Pellizari E. D. y Wallace G. T. 1983. Organic material in the global troposphere. *Rev. Geophys. Space Phys.* 21: 921-952.
14. EDPECT-INE, 2007, “Emisiones Derivadas de la Producción de Energía en centrales Termoeléctricas”, Capítulo 2, Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/496/cap2.html>
15. EPA, 2008, United States Environment Protection Agency, Washington, DC, USA, <http://www.epa.gov/lawsregs>
16. Fenn, M. E.; de Bauer, L. I. y Hernández-Tejeda, T. (Editors). *Urban Air Pollution and Forests. Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Ed. Springer. Serie Ecological Studies. Vol. 156. New York, USA. 2002..

17. Finlayson B. J., Pitts Jr. J.N. (1986). Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques, Wiley, New York.
18. García, R. M., Torres M. C., Báez. P. A., 2005, Determinación de metales pesados en una zona urbana, Ciudad de México, Reunión Anual 2005, UGM-SELPER-AGM. pág. 12-13. Puerto Vallarta Jal., México, 30 de Octubre al 4 de Noviembre de 2005.
19. García, R. M., Torres M. C., Báez. P. A., 2006(1), Determinación de metales pesados en aerosoles atmosféricos en la en la Zona Sur de la Ciudad de México, XLI Congreso Mexicano de Química. XXV Congreso Nacional de Educación Química. Sociedad Química de México, A.C. Journal of the Mexican Chemical Society. Pág. 47. Palacio de Minería, México, D.F.
20. García, R. M., Torres, M. C., Padilla, H., Belmont, R. D., Azpra, E., Arcega-Cabrera, F., Báez, P. A., 2006(2), Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural Wooded area in the State of Mexico, Mexico, Atmos. Environ., 40 6088-6100
21. García, R. M., 2007(1), Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y de una rural (Rancho Viejo, Edo. de México), Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México
22. García, R. M., Torres M. C., Báez. P. A., 2007(2), Caracterización de metales pesados en lluvia y aerosoles atmosféricos en la Ciudad de México, 2003-2004. XLII Congreso Mexicano de Química. XXVI Congreso Nacional de Educación Química. Sociedad Química de México, A.C. Guadalajara, Jalisco, del 22 al 26 de septiembre de 2007.

23. García, R. M., Torres M. C., Báez. P. A., 2008. "Determination of trace elements in total suspended particles at the Southwest of Mexico City from 2003 to 2004". *Chemistry and Ecology*. 24(2), pp 157-167.
24. García, R. M., Torres, M. C., Padilla, H., Belmont, R. D., Báez P. A., 2009, "Trace metals and inorganic ions measurements in rain from Mexico City and a nearby rural area". *Chemistry and Ecology* (prensa).
25. Gouda, V. K., Carew, J.A., Riad, W.D., 1989, Investigation of Computer Hardware Failure Due to Corrosion. *British Corrosion Journal*, 24(3):192
26. Gray N. F., 1994, *Calidad del agua potable problemas y soluciones*, Ed. Acribia, S.A., Zaragoza España, pp 271-276
27. Guttenplan, J. D., 1987, Corrosion in the Electronics Industry. *Metals Handbook*, ASM International, Vol. 13, 1107-1112.
28. Holgate, S. T., Samet, J. M., Koyen, H. S., Maynard, R.L., 1997. *Air pollution and health, USA*, Academic Press, pp 619
29. ICAZMCM2005-SMA, 2006, Secretaría del Medio Ambiente, Informe climatológico ambiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 2005, [http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/informeclimatologico/07capitulo2b\\_2005.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/informeclimatologico/07capitulo2b_2005.pdf)
30. 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, <http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/inventario2006>
31. IECTZMCM-SMA, 2006, "Inventario de Emisiones de Contaminantes Tóxicos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México" Secretaría del Medio Ambiente del

- Distrito Federal, <http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/inventariotoxicos2006>
32. INE, 2007, Metales Pesados, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, Investigación sobre Sustancias Químicas y
33. INEGI, 2007, Síntesis de Resultados. II Censo de Población y Vivienda 2005, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática <http://www.inegi.gob.mx>.
34. INEGI, 2002, Marco Geoestadístico Municipal, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
35. ISCA-INE, 2007, “Invesigación Sobre la Calidad del Aire”, Fuentes de Contaminantes, Instituto Nacional de Ecología , SEMARNAT, <http://www.ine.gob.mx/dgicur/calair/fuentes.html>
36. Jiménez, B.C., 2004, La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada, Limusa Noriega Editores, México, pp 225-230, 232-235, 352
37. Lázaro-López, C., 1996. Determinación de la corrosión en el interior de los edificios de Ciudad Universitaria. Tesis Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México
38. LEF, 2008, Life Extension Foundation, Heavy Metal Toxicity, Lauderdale, Florida, USA <http://www.lef.org/protocols/prtcl-156.shtml>
39. LENNTECH, 2008, Water purification & Air Treatment – Lenntech Complete Water treatment and Air filtration solutions. <http://www.lenntech.com/espanol/metales%20pesados.htm>

40. Muñoz, R. L., Uruchurtu, J. C., 2002, Caracterización de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, rev. Int. Conam. Ambient. 18 (1) 27-32
41. Negrete, S. M. 2000, Dinámica demográfica en la Ciudad de México: la Ciudad de México en el fin del segundo milenio. México, D.F., El Colegio de México, pp 247-255.
42. NOM-043-SEMARNAT-1993, "Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas", Secretaria del Medio Ambiente y recursos Naturales, SEMARNAT, <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-ECOL-043.pdf>
43. NOM-085-SEMARNAT-1994, "Contaminación Atmosférica, fuentes fijas, para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento directo por combustión", Secretaria del Medio Ambiente y recursos Naturales, SEMARNAT, [http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM\\_085\\_DOF.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM_085_DOF.pdf)
44. NOM-098-SEMARNAT-2002, "Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes atmosféricos", Secretaria del Medio Ambiente y recursos Naturales, SEMARNAT,

- [http://www.semarnat.gob.mx/leyesyformas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM\\_098\\_SEMAR\\_02\\_1\\_OCT\\_04\\_COMP.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesyformas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM_098_SEMAR_02_1_OCT_04_COMP.pdf)
45. Ortiz-Prado, A., Schouwenaars, R., Cerrud-Sanchez, S.M., 2002, Metodología para la simulación acelerada del deterioro que por corrosión atmosférica se presenta en equipo electrónico, Ingeniería. Investigación y Tecnología Vol III, 4, 145-156
46. PMAC, 2008, Portal de medio ambiente en Cuba, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), <http://www.medioambiente.cu/download/meteorologia.pdf>
47. Pizarro, R. C., Anaya, A. P., 1989, Ensayos para la determinación de la corrosión de metales en diferentes ambientes de Lima y Callao, UNMSM, Rev. Per. Quím. Ing. Quím. Vol. 2(1), 63-71
48. Pope III, C. A., 1989. Respiratory disease associated with community air pollution and a steel mill, Utah Valley. Am. J. Pub. Health, Vol. 79, No. 5, 623-628
49. PPAIA1999-SMA, 2000, Secretaría del Medio Ambiente, Programa de precipitación ácida Informe Anual 1999, Publicación de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. México D.F. [www.sma.df.gob.mx/simat/pdf/folletolluvia.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/simat/pdf/folletolluvia.pdf)
50. Proyecto MILAGRO, 2006, Megacity Initiative: Local and Global Research Observations [http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/milagro/milagro\\_intro.sp.html&edu=high](http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/milagro/milagro_intro.sp.html&edu=high)
51. Seinfeld J. H, Pandis, 1998. Atmospheric chemistry and physics. New York: John Willey and Sons; 1326 pp.
52. Seoáñez, C. M., 1999, Ingeniería del Medio Ambiente Aplicada al Medio Natural Continental, Ediciones Mundi-Prensa, 2ª Ed, Mexico, pp 57-58



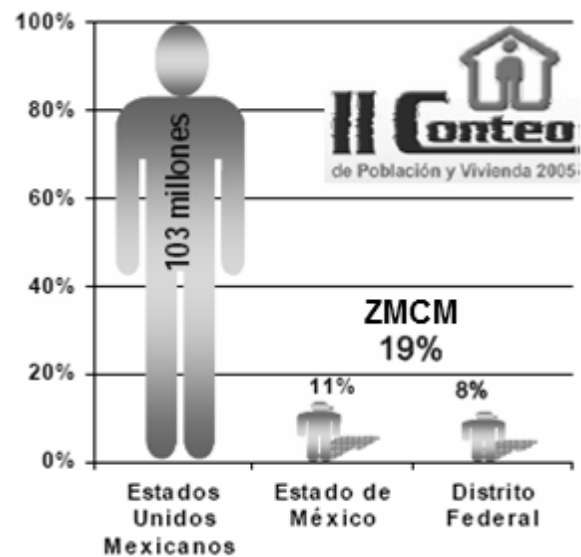
53. SMA-DGGAA, 2007, Dirección General de Gestión Ambiental del Aire, 2007. Secretaría del Medio Ambiente Cédula de Operación Anual, Año Base 2006.
54. SMA y GDF, 2007 “La Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1986-2006. Informe del Estado y Tendencias de la Contaminación Atmosférica”, Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal, [http://www.sma.df.gob.mx/simat/anuales/informe\\_anual\\_2006.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/simat/anuales/informe_anual_2006.pdf)
55. Spiro, T. G.; Stigliani, W.M., 2003, Química Medioambiental, Pearson Prentice Hall, Inc., España, pp 181-182, 191-194, 230
56. Stockwell W.R., Middleton, R.P., Chang, J.S., Tang, X. 1995. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *Journal Geophysical Research*. 95: 16343-16367.

**ANEXO I****ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS****POBLACIÓN**

El proceso de reestructuración que se ha presentado en los últimos años ha modificado las tendencias de la distribución territorial de las actividades económicas y de población. Sin embargo, estas tendencias siguen siendo polarizadas manteniendo alta concentración de población en un número reducido de ciudades y gran dispersión de la población en miles de localidades pequeñas (CONAPO, 2001).

En la actualidad el principal escenario socioeconómico del país es ZMCM, dado que el Estado de México es la entidad más poblada seguida del Distrito Federal (Figura 18).

De acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2005, la ZMCM registró para este año alrededor de 20 millones de habitantes, cifra que representa el 19% del total nacional, de ellos el 44% vive en las 16 delegaciones del D. F., el 56% en los 59 municipios del Estado de México. Cabe mencionar que más de la mitad de la población de la ZMCM vive aglutinada en 5 delegaciones del D. F. y 5 municipios del Edo. de México.

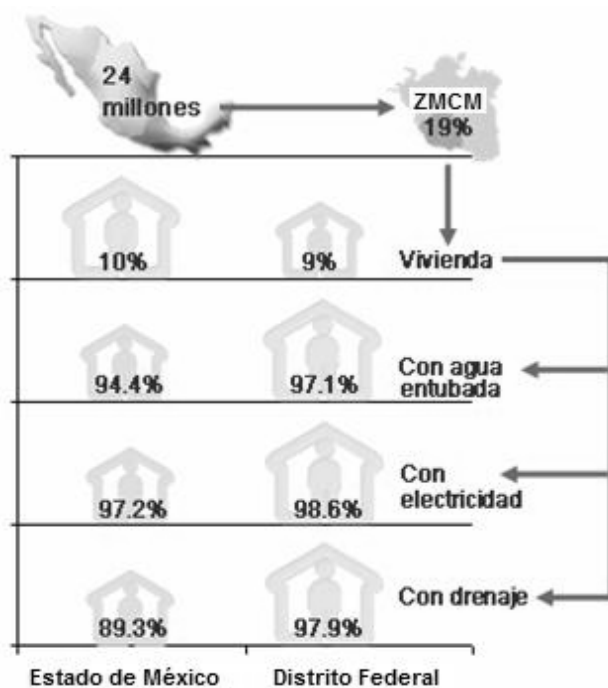


**Figura 1** Población de la ZMCM por entidad (Fuente: INEGI, 2007)

## VIVIENDA

En el desarrollo urbano, tiene gran relevancia la vivienda, promoviendo el desarrollo económico y social. De acuerdo a los datos del II Conteo de Población y Vivienda 2005, hay más de 24 millones de viviendas particulares a nivel nacional, de las cuáles el 19% se concentra en la ZMCM, siendo aproximadamente cinco millones; el 52% de estas se ubica en los municipios conurbados del Estado de México.

En la figura 19 se muestra los porcentajes del nivel de equipamiento en viviendas en la ZMCM. En comparación con datos a nivel nacional, la ZMCM presenta el mayor desarrollo en equipamiento en viviendas y sobre todo para el Distrito Federal.



**Figura 2** Nivel de equipamiento de viviendas en la ZMCM (Fuente: INEGI, 2007)

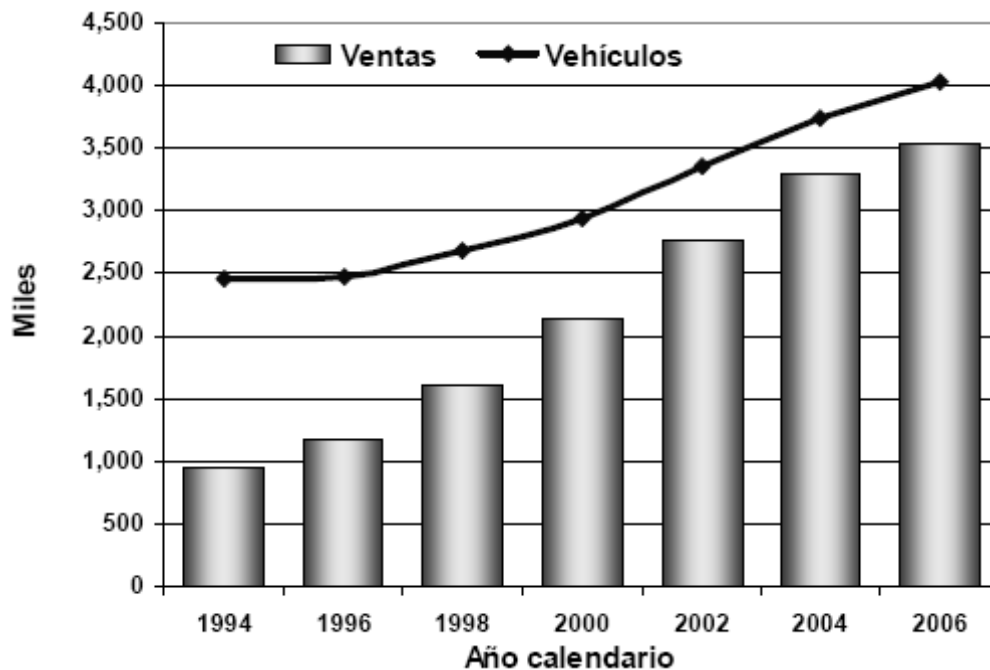
## INDUSTRIA

Con datos del Censo Económico 2004, realizado por el INEGI, existen más de 328 mil industrias manufactureras a nivel nacional, y el 16% se encuentra ubicado en la ZMCM. En el Distrito Federal existen 28,025 establecimientos del sector manufacturero, por lo cual, ocupa el segundo lugar a nivel nacional. El subsector correspondiente a la producción de alimentos, bebidas y tabaco, es el giro de mayor representación con un 36%, le siguen las manufacturas de productos metálicos con el 23% y la producción de papel, productos de papel, imprentas y editoriales con el 15%.

De acuerdo con el tamaño de la industria, los establecimientos manufactureros ubicados en el Distrito Federal se distribuyen de la siguiente manera: el 92% corresponde a la industria micro, el 5% a la pequeña, el 2.6% a la mediana y sólo el 0.4% a la industria grande (SMA-DGGAA, 2007).

## TRANSPORTE

Sin el ordenamiento y planeación ha ido en aumento la mancha urbana en la ZMCM y los tiempos y distancias de traslado también. La falta de transporte metropolitano masivo y eficiente, ha ocasionado que continúe creciendo la flota vehicular de uso particular principalmente (Figura 20).



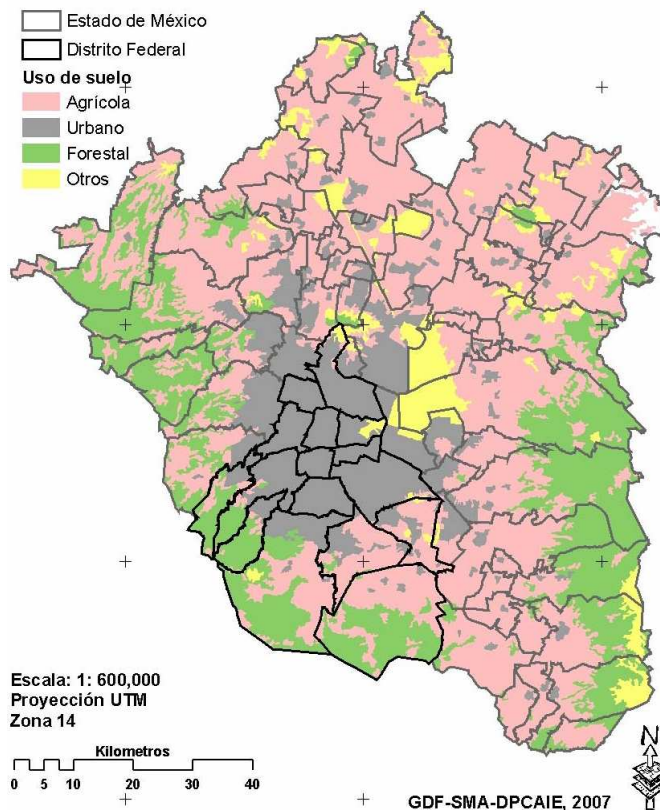
**Figura 3** Crecimiento de la flota vehicular en circulación y ventas acumuladas de autos (IECCZMCM-SMA, 2006)

## USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

En lo que respecta a la ZMCM, la vegetación original se encuentra modificada o simplemente ha desaparecido. El uso de suelo en la ZMCM se clasifica en: bosques, pastizales, matorrales, agricultura y zona urbana (Figura 21).

La vegetación tiene gran importancia para el ambiente y el ser humano, tanto a nivel ecológico como económico, entre los aspectos más importantes se puede mencionar: la protección del suelo, la regulación de los escurrimientos de agua, la generación de

alimento, la regulación del clima, así como el embellecimiento del paisaje y limpieza del aire, por mencionar algunas. Sin embargo, a pesar de los beneficios, también libera al aire COV, que junto con los NO<sub>x</sub> que se generan en el suelo por el proceso de nitrificación y desnitrificación de la materia orgánica, son precursores de O<sub>3</sub>.



**Figura 4** Uso de suelo y vegetación de la ZMCM (CORENADER-IAVUDF, 2003)

De los 7,734 km<sup>2</sup> de superficie que comprende la ZMCM, los principales usos de suelo se distribuyen de la siguiente manera: 55% es de uso agrícola, 22% es urbano y un 17% son suelos de uso forestal.

<b>ANEXO II</b>
-----------------

## AII.1. NORMAS OFICIALES MEXICANAS NIVELES MÁXIMOS DE EMISIÓN PERMISIBLES DE METALES A LA ATMÓSFERA

A continuación se presentan las NOM que señalan la emisión máxima permisible de metales a la atmósfera por parte del sector industrial, las unidades se expresan en mg de contaminante por m<sup>3</sup> de gases emitidos (mg/m<sup>3</sup>).

a) Modificación a la Norma Oficial Mexicana **NOM-040-SEMARNAT-2002**, Protección ambiental, fabricación de cemento hidráulico, niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera, publicada el 18 de diciembre del 2002, especifica los niveles que se muestran en la tabla 10.

**Tabla 1** Límite de emisión de metales a la atmósfera por fabricación de cemento.  
Fragmento tomado de la tabla 4 de la modificación a la NOM-040-SEMARNAT-2002.  
<sup>1</sup> Suma total de metales.

PARÁMETRO	Límite de Emisión mg/m <sup>3</sup>
Sb, As, Se, Ni, Mn	0,70 <sup>1</sup>
Cd	0,07
Hg	0,07
Pb, Cr, Zn.	0,70 <sup>1</sup>

b) Norma Oficial Mexicana **NOM-098-SEMARNAT-2002**, Protección ambiental- Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes atmosféricos, los cuales se presentan en la tabla 11.

**Tabla 2** Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos.  
Fragmento tomado de la tabla 1 de la NOM-098-SEMARNAT-2002.  
<sup>2</sup>Suma total de metales.

Contaminante	Límite de Emisión (mg/m <sup>3</sup> )
As, Se, Co, Ni, Mn y Sn	0,70 <sup>2</sup>
Cd	0,07
Pb, Cr, Cu y Zn	0,70 <sup>2</sup>
Hg	0,07

En la tabla 12, se expresan en mg/l, los límites máximos permisibles de algunos metales en el agua apta para el consumo humano (NOM-127-SSA1-1994), lo que quiere decir que, concentraciones superiores a éstas de metales, son perjudiciales para los seres vivos y medio ambiente, las cantidades de níquel y vanadio no se especifican en esta norma.

**Tabla 3** Límites máximos permisibles de metales en agua potable (NOM-127-SSA1-1994). Los valores de "límite permisible" incluyen tanto la parte soluble como insoluble.

METAL	LÍMITE PERMISIBLE (mg/L)
Al	0,200
Cd	0,005
Fe	0,300
Mn	0,150
Ni	No especificado
V	No especificado

En la Tabla 13 se expresan en mg/L los límites máximos permisibles de metales en aguas residuales tratadas para reuso en servicios al público (NOM-003-ECOL-1997 sección 4.3, NOM-001-ECOL-1996 tabla 3).

**Tabla 4** Límites máximos permisibles de metales en agua tratada (NOM-003-ECOL-1997 sección 4.3, NOM-001-ECOL-1996 tabla 3).

METAL	LÍMITE PERMISIBLE (mg/L)
Al	No especificado
Cd	0,2
Fe	No especificado
Mn	No especificado
Ni	2
V	No especificado



---

## **AII.2. NORMAS OFICIALES MEXICANAS SOBRE EMISIÓN DE PARTÍCULAS A LA ATMÓSFERA (NO ESPECIFICAN METALES PESADOS).**

**a)** La Norma Oficial Mexicana **NOM-042-SEMARNAT-2003** que establece los límites de emisión de contaminantes a la atmósfera de vehículos automotores nuevos cuyo peso vehicular no exceda los 3 857 kg, establece para uso de combustible diesel una emisión máxima permisible de material particulado (carbón, cenizas, metales pesados, etc) entre 0,050 a 0,075 g/km en los primeros 80 000 km de uso, hasta 100 000 km se permiten 0,100 g/km.

**b)** La Norma Oficial Mexicana **NOM-043-SEMARNAT-1993** que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas, marca los niveles máximos permisibles de emisión de partículas sólidas según el flujo de gases emitidos donde se encuentran los metales pesados pero no están especificados. (tabla 14).

**Tabla 5** Niveles Máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas. Zonas Críticas. Principales ciudades del país como la ZMCM, Guadalajara, etc. NOM-043-SEMARNAT-1993.

Flujo de Gases m <sup>3</sup> /min	Zonas Críticas mg/m <sup>3</sup>	Resto del país mg/m <sup>3</sup>
5	1536	2304
10	1148	1722
20	858	1287
30	724	1086
40	641	962
50	584	876
60	541	811
80	479	719
100	437	655
200	326	489
500	222	333
800	182	273
1000	166	249
3000	105	157
5000	84	127
8000	69	104
10000	63	95
20000	47	71
30000	40	60
50000	32	48

Tabla AII.3. Niveles Máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas. Zonas Críticas. Principales ciudades del país como la ZMCM, Guadalajara, etc. NOM-043-SEMARNAT-1993.

c) La **NOM-085-SEMARNAT-1994** Contaminación Atmosférica, fuentes fijas, para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento directo por combustión, sólo marca la emisión de partículas suspendidas totales entre 60 y 75 mg/m<sup>3</sup> en la ZMCM que comprende diferentes usos de combustibles, pero no especifica la cantidad máxima permisible de emisión de metales pesados a la atmósfera. La emisión de partículas suspendidas totales se mide a través

de un monitoreo continuo automático con un mínimo de 15 lecturas en un periodo no menor a 60 minutos y no mayor a 360 min.

**d) NOM-105-SEMARNAT-1996** que establece los niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de partículas sólidas totales y compuestos de azufre en los procesos de recuperación de químicos de las plantas de fabricación de celulosa, establece entre 350 y 500 mg/m<sup>3</sup> de emisión de partículas sólidas totales en hornos de recuperación, y entre 420 a 600 mg/m<sup>3</sup> en hornos de cal para plantas ya existentes, para plantas nuevas entre 56 y 180 mg/m<sup>3</sup> aproximadamente en ambos hornos.