

Anexo A. Atmósfera, aire y sus contaminantes

La atmósfera es una mezcla de gases y pequeñas partículas líquidas y sólidas que envuelve a la Tierra, es resultado de los cambios geológicos que gestaron en la evolución de nuestro planeta como parte del sistema solar y de la acción continua de los seres vivos (Flores, 1995); la cual está compuesta de varias capas que se denominan: troposfera, estratosfera e ionosfera. Tiene un espesor aproximado de 10 000 km y cerca de 95% de su masa se encuentra en los primeros 19 km.

Los componentes de la atmósfera son nitrógeno y oxígeno en porcentaje casi constante 79% y 21% aproximada y respectivamente. A pesar de que su composición es relativamente estable, la atmósfera está siempre en equilibrio dinámico debido a la acción que sobre ella ejercen los seres vivos, así como los diversos fenómenos geoquímicos (Ídem).

La tabla A.1 presenta la composición de aire seco y puro a nivel del mar. Si los óxidos de nitrógeno y azufre, así como de monóxido de carbono y ozono llegan a concentraciones superiores de los presentados en la tabla siguiente, se consideran contaminantes. Es importante señalar que en el aire se encuentran concentraciones variables de agua (humedad), esto dependiendo de las distintas ubicaciones geográficas y épocas del año.

Tabla A.1
Componentes del aire seco y puro del mar

Componente	Volumen (%)	Peso (%)
Nitrógeno	78.03	75.58
Oxígeno	20.99	23.08
Argón	0.94	1.28
Bióxido de carbono	0.035	0.053
Neón	0.0024	0.0017
Otros gases inertes	0.24	0.0017
Hidrógeno	0.00005	0.000004

Fuente: Flores, 2003

Los fenómenos climáticos provocan variaciones en los componentes del aire, es por ello que el movimiento de los vientos, los cambios de temperatura o el nivel de humedad en el ambiente, determinan en distinta medida el comportamiento de las sustancias presentes en el aire. El ciclo diario de movimientos de masas de aire con diferentes temperaturas, nos conduce a la *inversión térmica*.

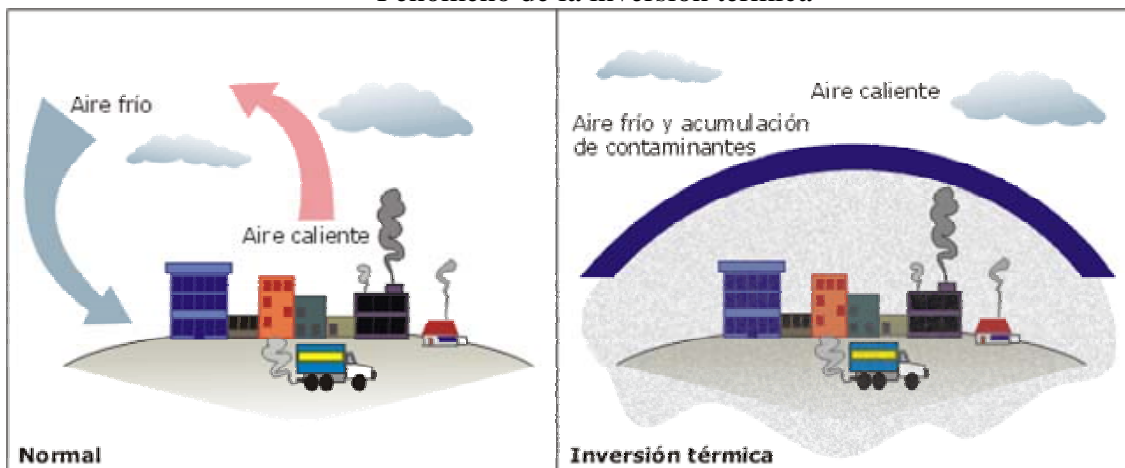
El fenómeno de *inversión térmica* se presenta cuando en las noches despejadas el suelo se enfría rápidamente¹, las capas de aire cercanas a él se enfrían en mayor medida que las capas superiores de aire lo cual provoca que se genere un gradiente² positivo de temperatura con la altitud (que es un fenómeno contrario al que se presenta normalmente, la temperatura de la troposfera disminuye con la altitud).

Lo anterior ocasiona que la capa de aire caliente quede atrapada entre las dos capas de aire frío sin poder circular, ya que la presencia de la capa de aire frío cercana al suelo le da gran estabilidad a la atmósfera porque prácticamente no hay convección térmica, ni fenómenos de transporte y difusión de gases; provocando la disminución en la velocidad de mezclado vertical entre la región que hay entre las dos capas frías de aire (ver figura A.2). Este fenómeno natural se torna un problema ecológico si en la zona geográfica donde se produce existen contaminantes atmosféricos, dado que se pierde los efectos del mezclado vertical de la atmósfera y, por lo tanto existe una menor dispersión de los mismos (Jiménez, 2001).

¹ El decremento de la temperatura se produce a razón de $6^{\circ}\text{C}/1\ 000\text{m}^2$.

² El gradiente de temperatura es la pendiente de la curva $T=f(x)$ en un punto determinado de un cuerpo situado a una distancia x de un foco térmico; es siempre negativa porque el calor fluye en la dirección que x crece y T disminuye en esa dirección. Si el cuerpo está aislado y en un régimen estacionario dT/dx es constante a lo largo de x .

Figura. A.1
Fenómeno de la inversión térmica

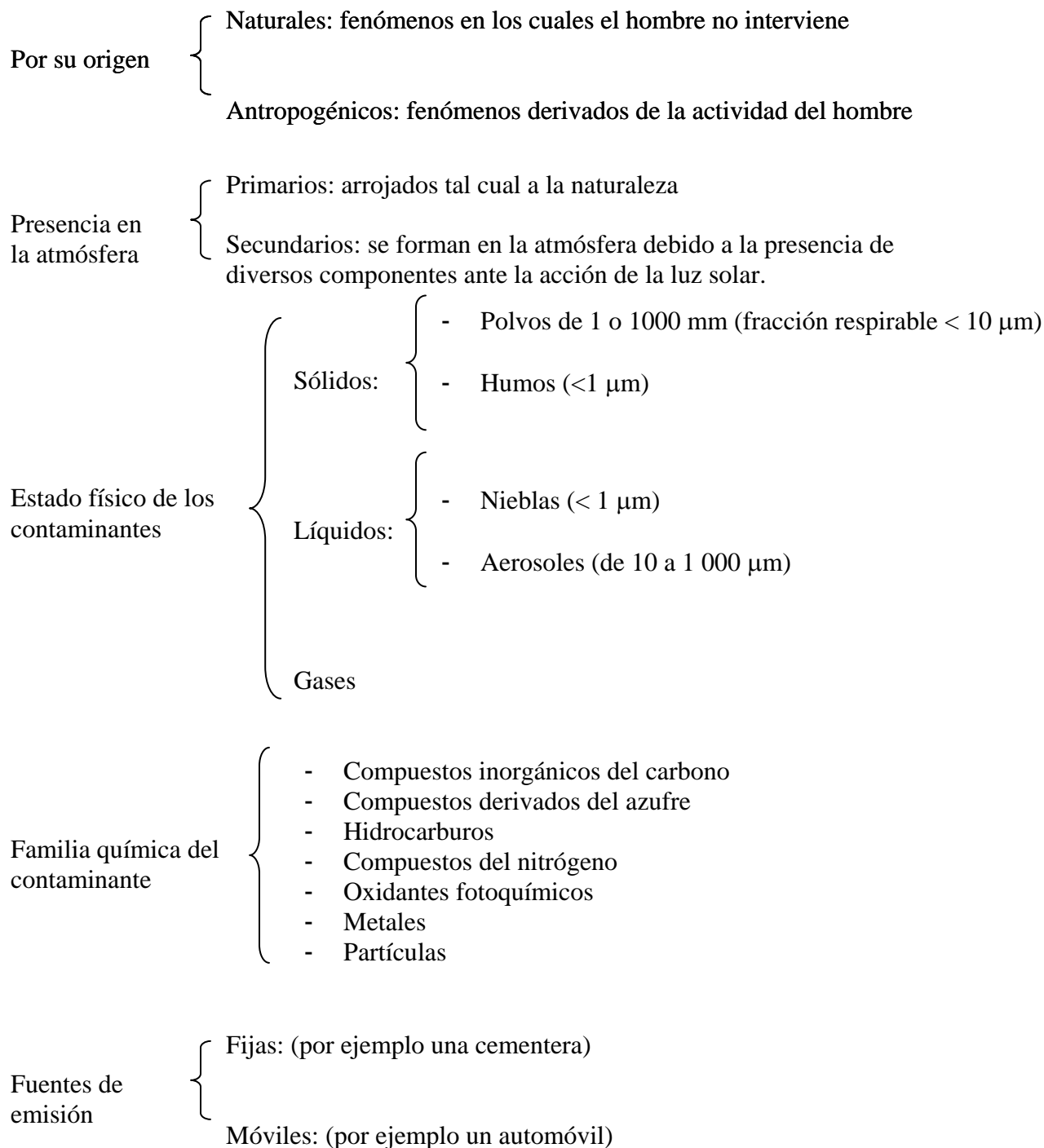


Fuente: http://www.conam.gob.pe/educamb/cont_aire.htm

Existen distintas definiciones de contaminación atmosférica. Por ejemplo, el Consejo de Europa en 1967 dice que “existen contaminantes del aire cuando la presencia en él de una sustancia extraña o una variación importante en la proporción habitual es capaz de provocar un efecto perjudicial o una molestia, teniendo en cuenta los conocimientos científicos del momento”; por otro lado, en México según la Ley Federal para el Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente de 1988 establece que “se entiende por contaminación la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes (materia o energía) o de cualquier combinación de ellos que causa desequilibrio ecológico” y; además en Francia, la norma AFNOR NFX43-001 (Chabrier de la Saulnière, 1969) asegura que “es la presencia de impurezas en el aire que pueden provocar un perjuicio notable en la salud, la comodidad o los bienes humanos. Esta contaminación puede deberse a gases, vapores, partículas sólidas o líquidas e incluso radiaciones”. (Ídem)

Los contaminantes pueden ser clasificados de la siguiente manera (Jiménez, 2001).

Figura A.2
Clasificación de los contaminantes



Los contaminantes se clasifican de formas distintas: por su origen, la manera en que son depositados en la atmósfera, estado físico, la fuente, como se muestra en la cuadro A.1. A continuación se señalan los principales contaminantes atmosféricos clasificados según familia química a fin de conocer como se producen y la manera en que se depositan en la atmósfera, así como sus efectos en la salud humana.

1. Descripción de los principales contaminantes del aire (clasificación por familia química)

Compuestos inorgánicos del carbono

Monóxido de carbono, CO

El CO es un gas incoloro, inodoro, insaboro y tóxico, es más ligero que el aire y posee una alta difusividad, se forma cuando existe una combustión deficiente; existen en concentraciones muy altas en los gases de la combustión del carbón, el gas natural o el petróleo. Sus principales fuentes son naturales y artificiales: los derivados de fuentes naturales se dividen a su vez en oxidación natural del metano, respiración de los seres vivos, incendios accidentales de bosques, minas y campos de cultivo; en cuanto a los de fuentes artificiales encontramos a la combustión de fuentes fijas, procesos industriales, disposición de desechos sólidos y combustión de transportes (Jiménez, 2001).

Este compuesto orgánico entra al flujo sanguíneo y reduce el transporte de oxígeno a células y tejidos (cuando se combina con la hemoglobina de la sangre se reduce automáticamente el transporte de oxígeno al cuerpo) También provoca una sobrecarga de trabajo para el corazón. El CO se asocia con la disminución de la percepción visual, capacidad de trabajo, destreza manual y habilidad de aprendizaje. La

población más sensible son las personas con enfermedades cardiovasculares como angina de pecho o enfermedades cardioperiféricas (Ídem).

Dióxido de carbono, (CO₂)

El CO₂ es un gas incoloro, inodoro e insaboro, utilizado en extinguidotes y bebidas gaseosas; es más denso que el aire y, en su forma sólida, se conoce como “hielo seco” y; es producto de la combustión de la materia orgánica debida al proceso de respiración o a las combustiones artificiales completas. Cabe mencionar que este compuesto es unas de las principales materias primas para la fotosíntesis, no es tóxico pero puede producir asfixia por desplazamiento del oxígeno³ (Jiménez, 2001).

El aumento del dióxido de carbono en la atmósfera ha dado lugar al fenómeno denominado *efecto invernadero*⁴. El dióxido de carbono y el agua retienen las radiaciones infrarrojas provenientes de la irradiación de la luz solar por parte de la Tierra, teniendo como consecuencia la elevación de la temperatura ambiental.

Compuestos derivados del Azufre

Dióxido de azufre, SO₂

El SO₂ está formado por la oxidación de combustibles fósiles contenidos en el azufre, 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 (H₂SO₃) que acelera la corrosión de los metales y de los materiales de construcción (Jiménez, 2001). Este compuesto se genera tanto de fuentes naturales, como de la combustión de

³ El tiempo calculado de residencia en la atmósfera es de 2 a 4 años (Wark, 1994)

⁴ Es uno de los fenómenos más conocidos y comentados, debido a sus graves efectos posibles. Es causado por el aumento en la concentración de los gases de invernadero: el dióxido de carbono (CO₂), los clorofluorocarbonados (CFC), el metano (CH₄), el óxido de nitrógeno (N₂O) y el ozono de la troposfera. La radiación solar pasa a través de ellos, pero atrapan y conservan el calor de la radiación infrarroja reflejada por la superficie del suelo, aumentando así la temperatura de la atmósfera baja. La consecuencia principal del efecto de invernadero es el calentamiento global de la atmósfera

compuestos ricos en azufre, es hidrosoluble y al hidrolizarse da lugar a ácidos que le confieren sus características potencialmente agresoras.

Esta sustancia se asocia con la humedad de las mucosas conjuntival y respiratoria; constituye un riesgo en la producción de irritación e inflamación aguda o crónica; suele asociarse también con las partículas suspendidas (PTS) y dar lugar a un riesgo superior, puesto que su acción es sinérgica.

Esta combinación, bióxido de azufre/partículas suspendidas totales (SO_2 /PST), en condiciones favorables para su acumulación y permanencia en la atmósfera, ha sido la responsable de episodios poblacionales, así como del incremento de la morbilidad y la mortalidad en enfermos crónicos del corazón (Chavez, 2000).

El contaminante se genera principalmente por la quema de combustibles que contienen azufre y por la producción de energía en las plantas termoeléctricas, además de los vehículos automotores. Se transforma en ácido sulfúrico en el aire y contribuye a formar la lluvia ácida, además de ser un precursor del ozono. Las concentraciones más altas de este bióxido se presentan en las áreas de mayor actividad industrial y tránsito vehicular.

El bióxido de azufre y el ozono se asocian a padecimientos como conjuntivitis, disminución de la agudeza visual, enfermedades del aparato respiratorio y también puede provocar reacciones alérgicas. Sus efectos más frecuentes son la irritación de la piel, ojos y el sistema respiratorio. Puede causar severos daños a los pulmones, como sucede cuando se fija en partículas pequeñas de tal forma que llega a los alvéolos

pulmonares. También provoca alteraciones de la mucosa y el epitelio⁵ nasal, edema, enfisema en fumadores, así como reactividad bronquial en fumadores y personas asmáticas (Idem).

La tabla A.2 enumeran los efectos en la salud de la exposición de las distintas concentraciones de SO₂ y PST de manera combinada.

Tabla A.2
Efectos en la Salud por la exposición de SO₂ y PST combinados

Concentraciones de:		Efectos
SO ₂	PST	
0.91 ppm (promedio diario)	500µg/m ³ (promedio diario)	Aumento de la mortalidad y de las hospitalizaciones
0.09 – 0.10 ppm (promedio diario)	250 µg/m ³ (promedio diario)	Empeoramiento de enfermedades pulmonares
0.04 ppm	250 µg/m ³ (media aritmética anual)	Síntomas respiratorios
0.03 ppm	100 µg/m ₃ (media geométrica anual)	Efectos sobre la visibilidad y molestias leves

Fuente: Jiménez, 2001.

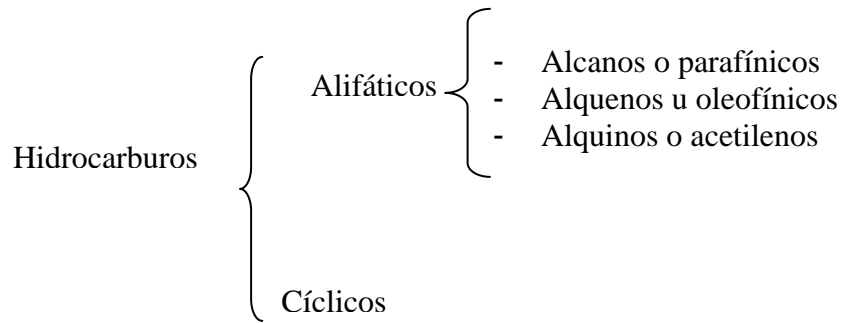
Hidrocarburos

Es la familia de compuestos químicos cuyas moléculas están formadas de carbono e hidrógeno, entre los cuales encontramos al petróleo y al gas natural. Dicha familia posee la siguiente clasificación (Jiménez, 2001):

⁵ Se refiere a las células que recubren los órganos huecos y las glándulas y que forman la superficie del cuerpo. Las células epiteliales ayudan a proteger o circundar los órganos; algunas producen secreciones mucosas o de otros tipos y pueden estar dispuestas en capas simples o múltiples, según su tipo. Medline Plus Enciclopedia Medica <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/002363.htm>

Figura A.3

Clasificación de la Hidrocarburos



Fuente: Jiménez, 2001

Los hidrocarburos son considerados contaminantes primarios, porque son emitidos directamente a la atmósfera a partir de las fuentes generadoras. Entre los principales hidrocarburos se encuentran los derivados de la combustión de las gasolinas, diesel, queroseno y combustóleo. No se puede olvidar a las evaporaciones de “thinner”, lacas, aguarrás, pinturas, barnices, derivados volátiles de los aceites lubricantes y asfalto, que también provocan elevación de las concentraciones de este tipo de contaminantes del aire (Flores, 1995).

Se han registrado efectos en la salud debido a los hidrocarburos, tanto directos como indirectos, por ejemplo: el metano principalmente de origen natural, es dañino cuando se descompone y produce monóxido de carbono; y por otro lado tenemos al benceno, el cual es uno de los hidrocarburos que es asociado al cáncer (Lezama, 2000).

En la Ciudad de México se observa, a las 8:00 horas, un máximo matutino atribuible a las emisiones vehiculares y un mínimo alrededor de las 14:00 horas, momento de intensa actividad fotoquímica, en la que la mayor parte de los hidrocarburos reaccionan para formar otro tipo de compuesto.

Oxidantes fotoquímicos

Ozono (O₃)

El ozono es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno, que se forma directamente por la acción de la luz solar sobre el bióxido de nitrógeno (Vallejo, 2003). Este gas azulado de olor picante, poco denso y con un poderoso efecto oxidante; es producido en forma natural durante las tormentas eléctricas, debido al paso de las descargas a través de la atmósfera. Su formación requiere de la reacción entre óxidos de nitrógeno con vapores de hidrocarburos en presencia de la luz solar (Jiménez, 2001). Las mucosas de las vías respiratorias en el ser humano son el principal sitio de acción del ozono (Vallejo, 2003). Resultados de numerosos estudios indican que la exposición a ozono puede ocasionar inflamación pulmonar⁶, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones pulmonares, cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar, y efectos sistémicos en órganos blandos distantes del pulmón, como por ejemplo el hígado (INE 1995-2000).

Metales

Plomo (Pb)

Es uno de los principales metales contaminantes del aire, es 11 veces más denso que el agua y se obtiene del sulfuro de plomo (PbS) El plomo se volvió problema ambiental por dos motivos: aplicación en pinturas y su adición a las gasolinas. El aire no urbano contiene una concentración de plomo, por lo general, de 0.5µg/m³ mientras que en ciudades muy contaminadas puede exceder de 20µg/m³. En México no existe norma,

⁶ El Ozono puede ocasionar una reducción en la función pulmonar de los individuos. US Environmental Protection Agency <http://www.epa.gov/airnow/health/smog1.html>

pero internacionalmente se recomienda no exceder $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de plomo como promedio en 3 meses (Jiménez, 2001).

El plomo al entrar al organismo es absorbido por los pulmones y el tracto digestivo y se introduce al torrente sanguíneo, donde es distribuido a todos los tejidos del cuerpo. Si existen niveles excesivos de plomo, este puede dañar al cerebro, riñones, sistema nervioso y el sistema reproductivo. El grado de daño provocado esta relacionado directamente al nivel de la concentración expuesta. Algunos efectos son reversibles, si se reduce el nivel de exposición, sin embargo existen daños que no pueden ser revertidos, aunque se disminuya el nivel de concentración del contaminante.⁷

Partículas suspendidas

El tamaño de las partículas puede variar entre 0.0002 a 500 μm , pero se encuentran dispersas en la atmósfera una mayor cantidad de partículas cuyo tamaño oscila entre 0.1 y 10 μm ⁸. De acuerdo al tamaño de la partícula varia la velocidad de asentamiento de la misma de la siguiente forma:

Tabla A.3
Descripción de la Velocidad de asentamiento de las partículas suspendidas dependiendo de su diámetro

Diámetro de la Partícula	Velocidad de asentamiento
0.1 μm	$4 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ⁹
1 μm	$4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
10 μm	0.3 cm/s
100 μm	30 cm/s

Fuente: Vallejo, 2003

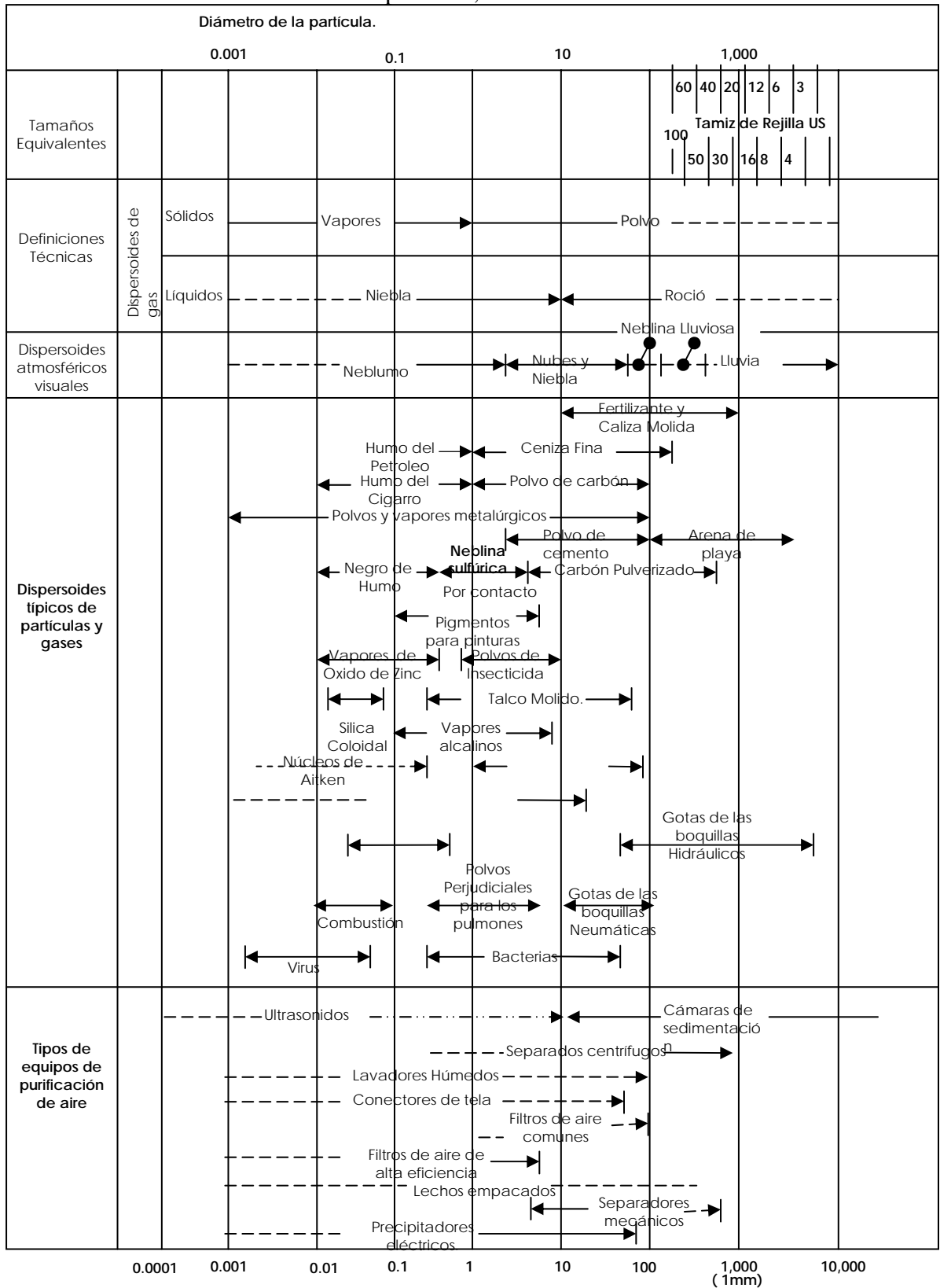
⁷ Environmental Health, Safety & Risk Management , Lead Information, University of Wisconsin-Milwaukee, Department of Environmental Health, Safety and Risk Management, <http://www.uwm.edu/Dept/EHSRM/ASB/leadgeneral.html>

⁹ Velocidad de asentamiento de las partículas con una densidad de $1 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Los valores mostrados en la tabla anterior indican la razón por la cual existe una marcada diferencia en el comportamiento de las partículas. Las partículas inhaladas por los seres humanos son depositadas en el sistema respiratorio, las partículas de mayor dimensión se depositan en la vía respiratoria superior, entre menor sea su tamaño viajan a una mayor profundidad en los pulmones y son retenidas allí por más tiempo.

Figura A.4

Diámetro de la partícula, Micrómetros.



La siguiente figura muestra el intervalo de tamaños de las partículas para varios materiales.¹⁰, como podemos observar en la figura A.3, existen materiales particulados en cada momento de nuestras vidas, y en diferentes proporciones, de allí la preocupación por estudiar sus efectos.

Las normas y la contaminación en México

En nuestro país se miden y se norman los siguientes contaminantes atmosféricos: bióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM₁₀) y Plomo (Pb). Para cada uno de ellos se cuenta con una norma de calidad del aire, que establece los valores máximos permisibles de concentraciones de los contaminantes (ver tabla A.5) los cuales no se sobre pasan más de una vez por año, con lo cual se garantiza que se protege adecuadamente a la población.

Las concentraciones de los contaminantes se expresan en unidades tales como: ppm¹¹, ppb¹², ug/m³.¹³, los cuales resultan complicados de reconocer para la mayoría de la población, por ello se han establecido índices de contaminación que son fácilmente de identificar, en nuestro país se utilizan los llamados IMECA¹⁴, las concentraciones que señala la norma de calidad de aire para cada contaminante, dictan un nivel de 100 puntos

¹⁰ Terminología utilizada en la tabla A.6) Partículas: Cualquier material, excepto agua o combinada, que existe en el estado sólido o líquido en la atmósfera o en una corriente de gas en condiciones normales. B) Aerosol: Una dispersión de partículas microscópicas, sólidas o líquidas, en medios gaseosos. C) Polvo: Partículas sólidas de un tamaño mayor que el coloidal capaces de estar en suspensión temporal en el aire. D) Ceniza fina: Partículas de ceniza finamente divididas arrastradas por el gas de la combustión. Las partículas pueden contener combustible no quemado. E) Niebla: Aerosol visible. F) Vapores: Partículas formadas por condensación, sublimación, o reacción química, predominantemente mayores a 1µm (humo o tabaco). G) Partícula: Masa discreta de materia sólida y líquida. H) Humo: Partículas pequeñas arrastradas por los gases, que resultan de la combustión. I) Hollín: Una aglomeración de partículas de carbón.

¹¹ partes por millón

¹² partes por billón

¹³ micro gramos por metro cúbico

¹⁴ Índice metropolitano de la calidad del aire

IMECA, para se considerada una calidad del aire buena o satisfactoria. La tabla siguiente nos muestra los distintos niveles del índice de IMECA para la ZMVM.

Tabla A.4

Índice Metropolitano de la calidad del Aire en México

Calidad del Aire	IMECA
Buena o Satisfactoria	0-100
Regular o No Satisfactoria	101-150
Mala	151-200
Muy Mala	201 en adelante

Fuente: (INE, 1995-2000)

Las normas que se siguen actualmente fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación en diciembre de 1994, dichas normas son elaboradas por la Secretaría de salud en coordinación con la SEMARNAP, además de la participación de representantes de la academia, de los sectores productivos y de grupos ambientales. (INE 1995-2000).

Tabla A.5

Valores normados para los contaminantes

Contaminante	Valores límite		
	Exposición Aguda		Exposición Crónica (Para protección de la salud de la población susceptible)
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	
Ozono (O ₃)	0.11 ppm (1 hora)	1 vez cada 3 años	—
Bióxido de azufre (SO ₂)	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (1 horas)	1 vez al año	—
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 horas)	1 vez al año	—
Partículas suspendidas totales (PST)	260 µg-m ³ (24 horas)	1 vez al año	75 µg-m ³ (media aritmética anual)
Partículas fracción respirable (PM10)	150 µg-m ³ (24 horas)	1 vez al año	50 µg-m ³ (media aritmética anual)
Plomo (Pb)	—		1.5 µg-m ³ (promedio aritmético en 3 meses)

Fuente: Diario Oficial de la Federación 3 de diciembre de 1994

En julio de 2000 se publicó un proyecto de modificación de las norma de ozono, la cual mantiene el límite vigente y adiciona uno nuevo de 0.08 ppm en promedio de 8 horas.

Con el objeto de evaluar la calidad del aire, se llevan a cabo programas de muestreo de los principales contaminantes, y se realizan comparaciones con las normas de protección de la salud.

A continuación se muestra la cronología de la gestión de la calidad del aire en la ZMVM: (Páramo, 2003).

1966- Se crea la Dirección de Higiene Industrial en Secretaría de Salubridad con 4 estaciones de monitoreo de SO₂, PST y polvo sedimentable.

1967- 14 estaciones de monitorios de la nueva red Panamericana de monitoreo SSA-OPS.

1971- Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente

- Ley Federal de Prevención y Control de la Contaminación.
- Red Manual de Monitoreo con 19 estaciones
- Reglamento por emisión de humos y polvos

1975- Se establecen los primeros Centros de verificación vehicular, con apoyo de la Dirección general de policía y transito del DF.

1976- Decreto que fija límites de emisiones de gases del escape en vehículos nuevos.

1978- Comisión Intersecretarial de Saneamiento Ambiental (PEMEX, DDF, Edomex, alianza de Camioneros) se establece la Red Automática de Monitoreo con 22 estaciones.

1980- Norma sobre emisiones de gases del escape en vehículos nuevos.

1982 – Subsecretaria de Ecología en SEDUE, Ley Federal de Protección al Ambiente Comisión de Ecología del Distrito Federal.

1986- Decreto del 14 de febrero con 21 medidas del programa voluntario de verificación (DGRUPE) Comisión estatal de ecología del Estado de México.

1987- Programa “100 acciones necesarias contra la contaminación”

1988- Ley general del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), Reglamento sobre contaminación a la atmósfera (La verificación vehicular se hace obligatoria – Programa de contingencias ambientales).

1989- Se inicia el programa de Hoy no Circula. (Todos los autos según número de placa)

1990- Programa integral contra la contaminación Atmosférica (PICCA). Inicia el suministro de gasolina sin plomo.

1991- Cierre de la refinería 18 de marzo, según la Ley de Protección al ambiente del Estado de México, Secretaria de Ecología del estado de México.

1992- Comisión Metropolitana para la PCCA Creación de INE y PROFEPA dentro de SEDESOL.

1993- Se introduce el Diesel Sin, con bajo contenido de azufre, convertidores catalíticos de tres vías.

1994- Publicación de normas de calidad del aire creación de la secretaria del medio ambiente, recursos naturales y pesca (SEMARNAP).

1995- Secretaría del medio ambiente del DF, Comisión ambiental metropolitana programa PROAIRE 1995- 2000, se establece el fideicomiso ambiental, programa de vigilancia epidemiológica.

1996- Modificaciones a la LGEEPA

1997- Se elimina por completo la gasolina con plomo, Se modifica el Hoy no circula (“0,1 y 2”), se modifica el impuesto de Impuestos especiales sobre productos y servicios.

1998- Se modifica el programa de contingencias, se consolida la recuperación de vapores, exención de verificación.

1999- Se intensifica el programa de reconversión de vehículos a gas natural y gas LP, Inicia el PIREC, inicia el programa para mitigar la emisión de partículas en el Valle de México.

2000- Proyecto para el diseño de una estrategia integral para la gestión de la calidad del aire en el Valle de México 2001 – 2010 (Dr. Mario Molina).

2001- La SEMARNAT se transforma en la secretaria de medio ambiente y recursos naturales / SEMARNAT, modificaciones a la LGEEPA.

2002- Programa para mejorar la calidad del aire de la zona metropolitana de valle de México 2002-2010. Inicio de la segunda etapa del proyecto para el diseño de una estrategia integral para la gestión de la calidad del aire en el valle de México 2002-2010 (Dr. Mario Molina).

2003- Inicia la medición de partículas $PM_{2.5}$