



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

INFLUENCIA DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE  
EL TRANSPORTE DE BIOPARTÍCULAS COMO  
INDICADORES DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA  
ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

**TRABAJO MONOGRÁFICO  
DE ACTUALIZACIÓN**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO

PRESENTA

**PAREDES GÓMEZ ABEL**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>GONZÁLEZ CHÁVEZ JOSÉ LUZ</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>LUNA PABELLO VÍCTOR MANUEL</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>GARCÍA MARTÍNEZ ROCÍO</b>
<b>1er. SUPLENTE:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ THALINA ALEJANDRA</b>
<b>2° SUPLENTE:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>NORIEGA NAVARRO ROXANA ISELA</b>

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA, LABORATORIO DE QUÍMICA ATMOSFÉRICA,  
UNAM. AV. UNIVERSIDAD #3000 COYOACÁN 04510, MÉXICO D.F.**

**ASESOR DEL TEMA:**

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

**SUSTENTANTE (S):**

**Abel Paredes Gómez** \_\_\_\_\_

**ÍNDICE GENERAL**

Índice general.....	1
Índice de tablas .....	3
Índice de figuras.....	4
Resumen.....	6
Capítulo I	
1. Introducción.....	7
Capítulo II	
2. Antecedentes .....	10
2.1.    Objetivo general.....	15
2.2.    Objetivos específicos.....	15
Capítulo III	
3. Material particulado y bioindicadores .....	16
3.1.    Material particulado en la Zona Metropolitana del Valle de México .....	16
3.2.    Diámetro de partícula .....	21
3.3.    Efectos en la salud .....	22
3.4.    Bioindicadores .....	26
Capítulo IV	
4. Circulación atmosférica .....	28
4.1.    La Zona Metropolitana del Valle de México.....	30
4.2.    Climatología de la Zona Metropolitana del Valle de México ..	32

4.3.	Velocidad y dirección del viento en la Zona Metropolitana del Valle de México.....	35
4.4.	Temperatura en la Zona Metropolitana del Valle de México .....	36
Capítulo V		
5.	Aerobiología .....	40
5.1.	Antecedentes de la Aerobiología .....	41
5.2.	Supervivencia de los microorganismos en la atmósfera .....	45
5.3.	Transporte aerobiológico .....	49
5.4.	Equipos de medición .....	54
5.5.	Técnicas de identificación de biopartículas .....	58
Capítulo VI		
6.	Ambientes intramuros y extramuros .....	62
6.1.	Ambientes intramuros .....	62
6.2.	Ambientes extramuros .....	64
Capítulo VII		
7.	Conclusiones .....	67
	Referencias .....	69
Anexos		
	Anexo I Valores Límite en las Normas Oficiales Mexicanas de Calidad del Aire .....	76
	Anexo II Municipios que conforman la ZMVM y estaciones de muestreo de la Red Mexicana de Aerobiología .....	77
	Anexo III Interpretación del IMECA.....	80

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Normas Oficiales Mexicanas sobre Calidad del Aire .....	13
Tabla 2. Clasificación de material particulado en función de su tamaño.....	18
Tabla 3. Valor límite permisible de material particulado NOM-025-SSA1-1993.....	18
Tabla 4. Enfermedades en plantas provocadas por patógenos presentes en el aire .....	44
Tabla 5. Enfermedades en animales provocadas por patógenos presentes en el aire.....	44
Tabla 6. Enfermedades humanas provocadas por patógenos presentes en el aire.....	45
Tabla 7. Fuentes naturales y antropogénicas que contribuyen a incrementar la concentración de bacterias en la atmósfera.....	45
Tabla 8. Principales métodos basados en la unión antígeno-anticuerpo .....	58

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Gestión de la calidad del aire en la Ciudad de México..... 14

Figura 2. Distribución espacial de la concentración promedio anual de PM<sub>10</sub>..... 17

Figura 3. Evaluación anual de PST en el Valle de México ..... 19

Figura 4. Evaluación anual de PM<sub>10</sub> en el Valle de México ..... 20

Figura 5. Evaluación anual de PM<sub>2.5</sub> en el Valle de México ..... 20

Figura 6. Diámetro aerodinámico equivalente ..... 21

Figura 7. Distribución del material particulado en el sistema respiratorio ..... 23

Figura 8. Daños a la salud por contaminación ambiental ..... 25

Figura 9. Distribución de las regiones atmosféricas ..... 29

Figura 10. Altura de la capa de mezclado ..... 30

Figura 11. Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)..... 32

Figura 12. Topografía en la Zona Metropolitana del Valle de México ..... 33

Figura 13. Distribución espacial de la precipitación en la ZMVM ..... 35

Figura 14. Campos de viento promedio para las épocas seca y de lluvia..... 36

Figura 15. Comportamiento mensual de la temperatura ambiente en el  
Valle de México ..... 37

Figura 16. Inversión térmica en el Valle de México ..... 39

Figura 17. Representación del tamaño relativo de biopartículas..... 40

Figura 18. El aeroconiscopio ..... 43

Figura 19. Espectro electromagnético.....	48
Figura 20. El proceso aerobiológico .....	49
Figura 21. Dispersión de humo desde una chimenea en Calcuta .....	51
Figura 22. Trampa de esporas tipo Hirts .....	54
Figura 23. Muestreadores de cascada Andersen de dos y seis etapas .....	55
Figura 24. Muestreadores en fase líquida con fraccionamiento de tamaño .....	56
Figura 25. Muestreador de centrifuga Biotest .....	56
Figura 26. Esquema de una electroforesis de ADN .....	60



## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centra en estudiar el transporte de biopartículas en la atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de México debido a que sus características geográficas y climáticas, aunado al crecimiento poblacional y la alta densidad vehicular propician el movimiento y transporte de partículas suspendidas.

Las partículas son generadas por fuentes naturales y antropogénicas, se encuentran en ambientes intramuros y extramuros, se considera que alrededor del 25 % de material particulado presente en la atmósfera está conformado por material biológico (virus, bacterias, hongos, polen, etc.), se analiza su posible uso como bioindicador de contaminación ambiental. Cabe mencionar que la atmósfera es un ambiente hostil para la supervivencia de microorganismos, por lo que es necesario entender los mecanismos de transporte de partículas y los factores que condicionan la supervivencia de microorganismos en la atmósfera.

Por otra parte, la variabilidad y cantidad de biopartículas dependerá del tipo de ambiente que se estudia, es importante establecer el tipo de biopartícula que deseamos estudiar para elegir el mejor equipo de muestreo de partículas viables, entre los que encontramos el Andersen, el Impinger y el Burkard. Podemos identificar el tipo de biopartícula mediante métodos tradicionales como: el recuento microscópico y cultivos microbianos, sin embargo, las limitaciones de estos métodos tradicionales han llevado al desarrollo de otros métodos, tales como bioquímicos, inmunológicos, y ensayos biológicos moleculares.

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

En México el estudio de la contaminación ambiental ha sido ampliamente estudiado, en particular la presencia de material particulado y sus efectos tóxicos en ambientes intramuros y extramuros.

El monitoreo de la contaminación ambiental empleando organismos vivos es uno de los temas más actuales dentro de la química ambiental y es denominado “biomonitoreo”, desde el siglo XX se ha tenido interés por utilizar organismos como indicadores de contaminación ambiental llamados también bioindicadores. Un bioindicador es un ser vivo que indica las condiciones del medio en que vive, es decir, son aquellos organismos en los que su funcionamiento, existencia y sus reacciones, dependen del medio en que se desarrollan y cambian al modificarse las condiciones ambientales (Capó, 2002).

Los bioindicadores pueden ser desde microorganismos, insectos, plantas, peces, etc. los cuales permiten cuantificar el grado de contaminación en relación a la capacidad del organismo de absorber contaminantes y manifestar algún tipo de reacción (Gutiérrez, 2006; Riquelme, 2008).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que la contaminación atmosférica es responsable a nivel mundial de 1.34 millones de muertes en zonas urbanas y más de dos millones de muertes prematuras, principalmente en países en desarrollo. Lo que implica que la exposición aguda y crónica a la contaminación del aire se asocia con el incremento de la mortalidad (CEMDA, 2013).

Las características geográficas y climáticas de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) son algunos de los principales factores que condicionan la acumulación o dispersión de los contaminantes, generados fundamentalmente por procesos antropogénicos, es decir, de origen humano o derivado de las

actividades del hombre. Una cantidad cada vez mayor de la población vive en áreas urbanas, por lo que la presencia de nuevos edificios modifica la circulación del aire, reduciendo la velocidad del viento en la superficie, incrementando la presencia y permanencia de partículas en zonas urbanas (Hernández, 2007).

Algunos de los síntomas provocados por la exposición a diversos contaminantes son los siguientes:

- El incremento en la frecuencia de enfermedades respiratorias crónicas y agudas.
- Aumento en la frecuencia de muertes asociadas a la contaminación atmosférica.
- Disminución de la capacidad respiratoria.
- Aumento de ataques de asma.
- Incremento de casos de enfermedades cardíacas.
- Aumento en la frecuencia de cánceres pulmonares.

La toxicidad de las partículas depende de diversos factores, por ejemplo de su composición química, de la fuente de emisión, de la frecuencia, de la concentración, del tiempo de exposición y del tamaño de las partículas, ya que éste determina qué tanto penetrarán en el sistema respiratorio (Quénel et al., 2003). Se estima que más del 25 % de las partículas suspendidas en la atmósfera están conformadas por material biológico. El material biológico varía en tamaño, que puede ser desde micrómetros hasta milímetros como: virus, bacterias, hongos, esporas, (protozoo, algas y diatomeas), esporas de plantas (musgos y helechos), polen y pequeños fragmentos de semillas e invertebrados (nematodos, ácaros, arañas e insectos) y son fácilmente transportados por el aire (Lacey y West, 2006; Matthais-Maser, 2000).

Las partículas de un diámetro superior a 10 micrómetros son filtradas por la nariz, las partículas de 4 a 10 micrómetros de diámetro se depositan principalmente en la tráquea y los bronquios (Romieu y Korc, 2002). Las partículas menores a 4 micrómetros llegan en gran cantidad a los alvéolos (PROAIRE 2011-2020).

Los microorganismos que entran a la atmósfera provienen de fuentes naturales como la vegetación, el suelo y los cuerpos de agua; y de las actividades antropogénicas; su supervivencia y distribución están moduladas por factores biológicos, meteorológicos y por la química atmosférica (Rosas, 2004).

## CAPÍTULO II

### 2. ANTECEDENTES

En 1940 los problemas ambientales en la Ciudad de México empezaron a ser relevantes debido a la expansión urbana acelerada que alcanzó la zona conurbana del Estado de México, provocando el incremento del parque vehicular, de fraccionamientos irregulares y la pérdida de áreas boscosas (Lezama, 2000).

En los 70's, se iniciaron las primeras mediciones de concentraciones de algunos contaminantes atmosféricos de la Ciudad de México como: bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM<sub>10</sub>) y plomo (Pb) (Báez, 2001; García, 2007).

A partir de 1982, la política ambiental mexicana comenzó a adquirir un enfoque integral. En ese mismo año se promulgó la Ley Federal de Protección al Ambiente y también se crea la Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), institución que impulsó la instalación y operación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), con el objetivo de generar información cuantitativa sobre el monitoreo de los contaminantes presentes en la atmósfera.

Los datos que generó la RAMA durante sus primeros años confirmaron la magnitud de la crisis ambiental que ya era evidente para los habitantes de la ciudad, el problema era de tal severidad que la Ciudad de México fue reconocida como la ciudad más contaminada del planeta (Calidad del aire, 2011), en 1986 se declararon las primeras contingencias, cuando el ozono (niveles aceptables entre 0-0.05 ppm) alcanzó niveles de 0.4 y 0.5 partes por millón, (más de 400 IMECA<sup>1</sup>), mientras que las partículas suspendidas totales (PST con valores aceptables 210 µg/m<sup>3</sup>) llegaron a niveles extremos, probablemente cerca de 1 000 µg/m<sup>3</sup>; peor

---

<sup>1</sup> **IMECA** (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire). Escala adimensional que sirve para calificar la calidad del aire con respecto a los contaminantes atmosféricos considerados criterio. Consultar Anexo III.

aún, esto se dio en combinación con elevadas concentraciones de óxidos de azufre (Quadri, 1992).

A finales de la década de los 80's creció la sensibilidad y conciencia de los tomadores de decisiones en política pública impulsando la aplicación de nuevas acciones como: la reformulación de gasolinas para reducir el contenido de plomo, la introducción de convertidores catalíticos, el control de emisiones evaporativas y las limitaciones a la actividad de la industria; en algunas termoeléctricas se inició el uso de gas natural en lugar de combustóleo, se implementaron medidas de reforestación, un programa piloto de verificación vehicular y una iniciativa voluntaria denominada "Un día sin Auto", la cual fue apoyada por las autoridades locales para evolucionar en una restricción obligatoria hoy conocida como el programa "Hoy no circula" (PROAIRE 2002-2010).

En 1990 fue integrado y lanzado el primer plan sistemático para combatir la contaminación atmosférica de la Ciudad de México (Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica, PICCA), este plan contó con el apoyo de agencias internacionales como la EPA (Environmental Protection Agency, Estados Unidos) de JICA (Japan International Cooperation Agency), TÜV (Entidad de Control Técnico de Alemania) y del Banco Mundial. En 1996 se diseñó y promulgó un nuevo plan nombrado: Programa para mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000 conocido como PROAIRE I con el propósito de ampliar, reforzar y dar continuidad a las medidas iniciadas a principios de la década. A diferencia del PICCA, el PROAIRE I planteó por primera vez objetivos cuantitativos en materia de calidad del aire en un tiempo definido, siendo uno de ellos la reducción de las concentraciones pico y promedio de ozono, con la finalidad de disminuir el riesgo a la salud asociado con la exposición de corto y largo plazo a este contaminante (Quadri, 1992).

Como resultado, de las medidas de PROAIRE I, durante los 90's se registró una reducción importante de emisiones a la atmósfera y se logró contener los altos niveles de contaminación atmosférica en la ZMVM a pesar del continuo crecimiento de la población y el aumento en el consumo de combustible. La

conciencia y percepción sobre la contaminación atmosférica fue tan evidente entre la sociedad y la comunidad científica, que en la década de los 80's y 90's se llevaron a cabo diversas investigaciones relacionadas con los efectos de la contaminación ambiental y su impacto en la salud de las población (PROAIRE 2002-2010). Actualmente se encuentra vigente el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020.

En el año 2000, la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, a través de la Dirección General de Gestión Ambiental del Aire, inicia la Integración del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), con la finalidad de unificar los esfuerzos destinados a la medición de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos.

En la actualidad el SIMAT está integrado por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) que cuenta con 24 estaciones; la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) que consta de 12 estaciones; la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) que tiene 16 sitios de muestreo y la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) que opera con 16 estaciones. El SIMAT se complementa con un Laboratorio Móvil de Monitoreo Atmosférico, un Laboratorio de Estándares, un Laboratorio de Análisis Ambiental y un Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA).

Cabe señalar que México cuenta con un marco regulatorio vigente para la protección de la salud pública contra los efectos del deterioro ambiental, partiendo de la Constitución Política, que pone de manifiesto que toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar (Artículo 4° párrafo IV), para hacer que se cumpla lo dicho en la constitución se cuenta con Leyes y Normas.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), señala que la calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y regiones del país. Asimismo, la Ley General de Salud establece que las autoridades sanitarias deberán proponer las normas necesarias que regulen

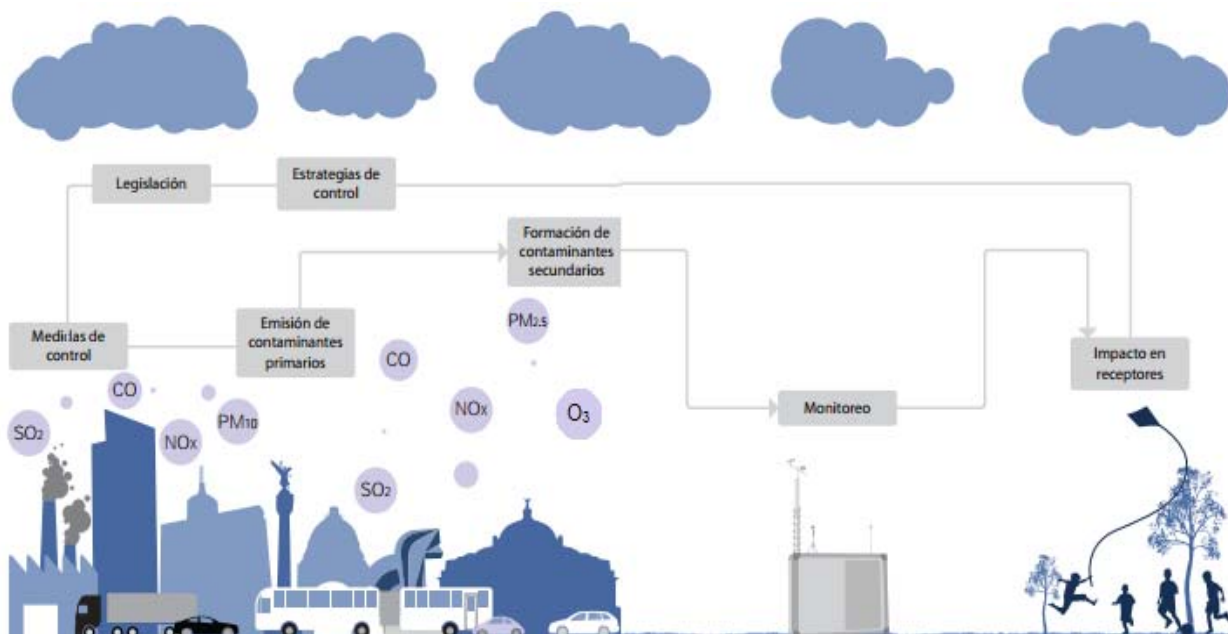
los niveles de contaminantes ambientales y tomar medidas para proteger la salud humana ante riesgos asociados a la contaminación, existen Normas Oficiales Mexicanas que tienen como objetivo proveer de una mejor calidad del aire a los habitantes de todo el territorio nacional (Tabla 1, Anexo I) (Calidad del aire 2010).

**Tabla 1. Normas Oficiales Mexicanas sobre Calidad del Aire.**

<b>Contaminante</b>	<b>Norma</b>	<b>Nombre</b>
Ozono	NOM-020-SSA1-1993	Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O <sub>3</sub> ) de la calidad del aire ambiente. Criterio para evaluar la calidad del aire.
Monóxido de carbono	NOM-021-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población
Bióxido de azufre	NOM-022-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población
Bióxido de nitrógeno	NOM-023-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población
Partículas (PST, PM10 y PM2.5)	NOM-025-SSA1-1993	Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM10 y partículas menores de 2.5 micrómetros PM2.5 de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire



La gestión de la calidad del aire es un proceso cíclico que tiene como único fin mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ciudad (Figura 1). Cuando los niveles de los contaminantes exceden los límites permisibles, es necesario diseñar estrategias de control adecuadas que, a través de la legislación, se convierten en regulaciones que establezcan medidas de control, mismas que deberán ser cumplidas por los habitantes de la ciudad. El monitoreo de los contaminantes atmosféricos nos permite visualizar el riesgo para la población y el medio ambiente, permitiendo diseñar nuevas estrategias con lo que se da inicio a un nuevo ciclo.



**Figura 1.** Gestión de la Calidad del Aire en la Ciudad de México (Calidad del Aire 2011).

## **2.1. Objetivo General**

- Realizar una recopilación monográfica sobre el transporte de las biopartículas como indicadores de contaminación ambiental, en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

## **2.2. Objetivos Específicos.**

- Conocer los mecanismos de transporte de las biopartículas en la atmósfera de la ZMVM.
- Entender la influencia de las condiciones geográficas de la ZMVM en el movimiento y transporte de biopartículas.

## CAPÍTULO III

### 3. MATERIAL PARTÍCULADO Y BIOINDICADORES

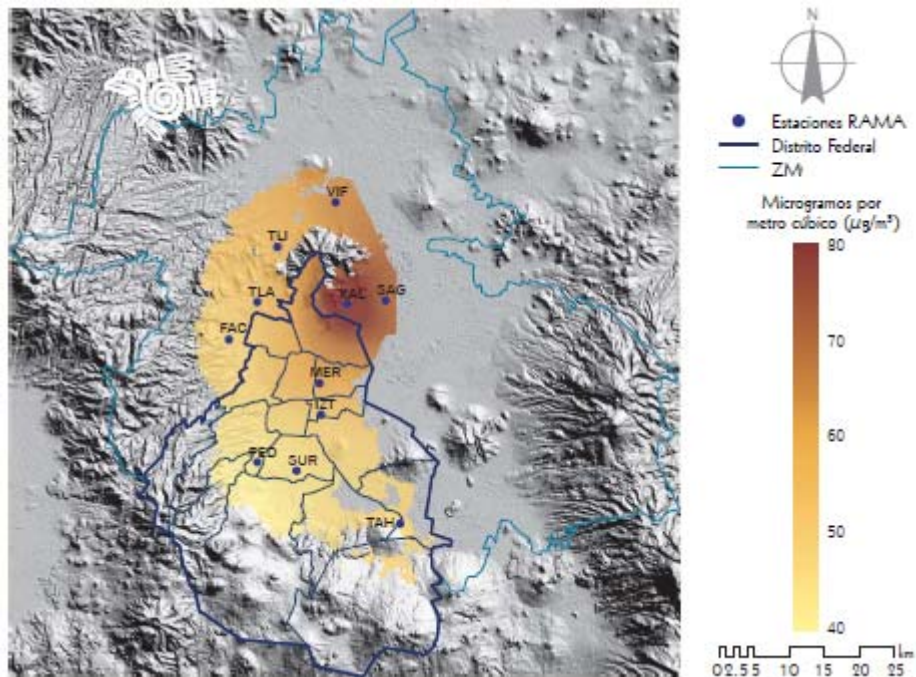
Los contaminantes atmosféricos se clasifican en primarios y secundarios, los primarios son aquellos arrojados directamente a la atmósfera como resultado de un proceso de combustión incompleta, por ejemplo el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), vapores de combustibles y disolventes, plomo (Pb) y material particulado (PM). En la atmósfera, algunos contaminantes primarios presentan reacciones fotoquímicas o llegan a reaccionar con otros compuestos, generando contaminantes de igual o mayor toxicidad, éstos se denominan contaminantes secundarios, como el ozono ( $\text{O}_3$ ), el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y algunos tipos de partículas (Hernández, 2009).

El PM forma una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen. El tamaño del material particulado varía desde 0.005 hasta 100  $\mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico, esto es, desde unos cuantos átomos hasta el grosor de un cabello humano. Las partículas pueden tener una composición fisicoquímica homogénea o estar constituidas por diversos compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre los componentes orgánicos se encuentran: fenoles, ácidos, alcoholes y material biológico (polen, protozoarios, bacterias, virus, hongos, esporas y algas). Entre los compuestos inorgánicos se encuentran nitratos, sulfatos, polímeros, silicatos, metales pesados (fierro, plomo, manganeso, zinc, vanadio, etc.) y elementos derivados de pesticidas y plaguicidas.

#### 3.1 Material Particulado en la Zona Metropolitana del Valle de México.

En la ZMVM las principales fuentes de PM están vinculadas con procesos antropogénicos, por ejemplo procesos de combustión interna de vehículos automotores, la industria de la construcción, el polvo del suelo, la quema de

basura, incendios forestales, la formación fotoquímica de aerosoles con contenido de nitrato y sulfato; y durante la época de estiaje la fuente principal de partículas son las tolvaneras (Calidad del aire, 2011). En la Figura 2 se muestra la distribución espacial de la concentración de  $PM_{10}$  en la ZMVM en el año 2011, en donde se puede observar que la mayor concentración de material particulado ocurre en la zona norte y noreste, esto propiciado por tolvaneras (Calidad del aire, 2011).



**Figura 2. Distribución espacial de la concentración promedio anual de  $PM_{10}$  (Fuente: Calidad del aire 2011).**

En la década de los 80's la regulación ambiental se centró en las partículas suspendidas totales (PST), las cuales son menores de  $100 \mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico. Posteriormente, a mediados de los 90's las autoridades de salud iniciaron un proceso sistemático de investigación epidemiológica acerca de los riesgos a la salud provocados por las partículas menores a  $10 \mu\text{m}$  ( $PM_{10}$ ). Desde 1996 se inició el monitoreo continuo de partículas suspendidas totales y de  $PM_{10}$  utilizando nuevas técnicas de monitoreo, el estudio de las  $PM_{10}$  surgió como una

preocupación creciente debido a sus efectos dañinos en la morbilidad y en la mortalidad, se ha puesto mayor énfasis en el estudio de las partículas finas y ultrafinas, es decir, aquellas menores de 2.5 y 0.1  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Así, las llamadas  $\text{PM}_{10}$  se pueden dividir, por su tamaño, en las fracciones gruesa, fina y ultrafina, siendo la fracción gruesa la compuesta por partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 2.5 y 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5-10}$ ); la fracción fina que involucra aquellas partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ), y finalmente, la fracción ultrafina que incluye a las partículas menores de 0.1  $\mu\text{m}$ . Tabla 2 (EPA, 2006).

**Tabla 2. Clasificación de material particulado en función de su tamaño.**

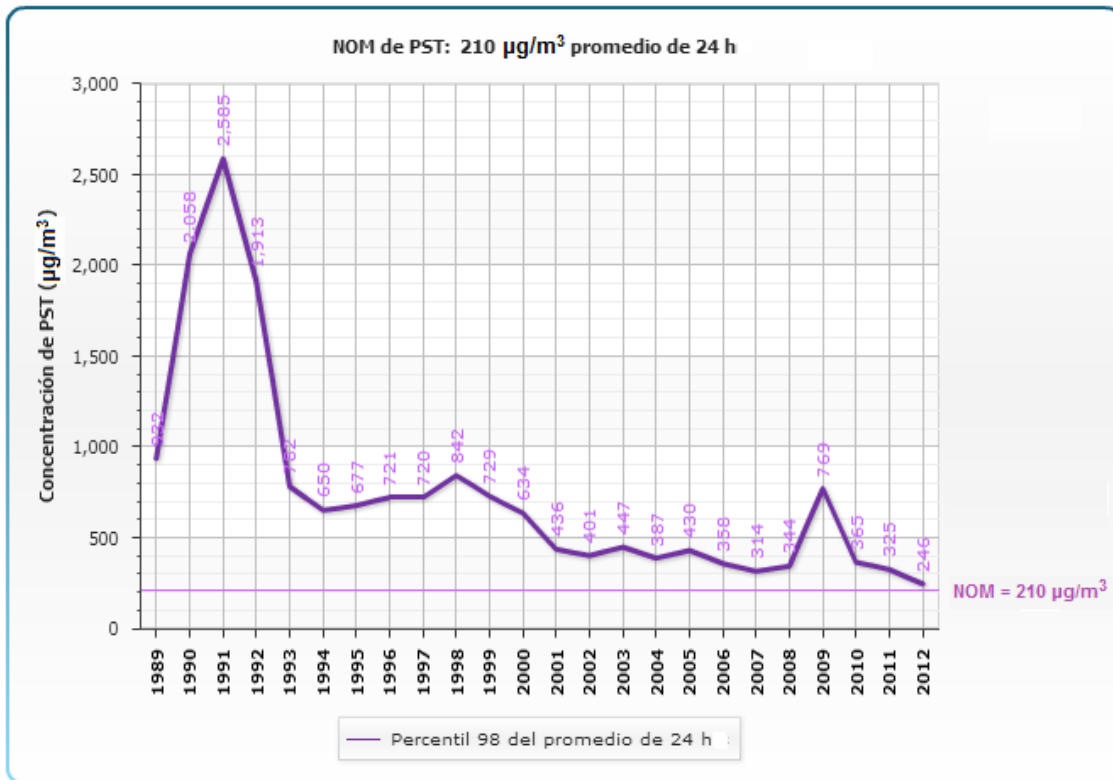
Descripción	Tamaño de partícula
Extra-gruesa	Diámetro > 10 $\mu\text{m}$
Gruesas	2.5 $\mu\text{m}$ <Diámetro> 10 $\mu\text{m}$
Finas	0.1 $\mu\text{m}$ <Diámetro> 2.5 $\mu\text{m}$
Ultrafinas	$\leq 0.1 \mu\text{m}$

Para efectos de protección a la salud de la población más susceptible, se establecen los valores límite permisible para PST,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en el medio ambiente, de acuerdo con la NOM-025-SSA1-1993 los valores máximos permitidos son los siguientes (Tabla 3):

**Tabla 3. Valor límite permisible de material particulado NOM-025-SSA1-1993.**

Tipo de Partícula	Valores de concentración máxima
Partículas Suspendidas Totales PST	210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas
Partículas menores a 10 micrómetros $\text{PM}_{10}$	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas
	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual
Partículas menores a 2.5 micrómetros $\text{PM}_{2.5}$	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas
	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual

En las Figuras 3, 4 y 5 se observan los datos anuales de concentraciones de PST y PM<sub>10</sub> desde el año 1989 hasta el 2012, y de PM<sub>2.5</sub> desde el año 2004 al 2012. Esta evaluación anual nos permite observar que desde los primeros monitoreos de material particulado, no se ha logrado cumplir con los límites establecidos por la NOM-025-SSA1-1993, o se cumple como en el caso de PM<sub>2.5</sub> con valores muy cercanos al límite permitido de 65 µg/m<sup>3</sup> promedio de 24 horas. Sin embargo, es notorio que se ha logrado disminuir considerablemente las concentraciones de material particulado en la ZMVM.



**Figura 3.** Evaluación anual de PST en el Valle de México.

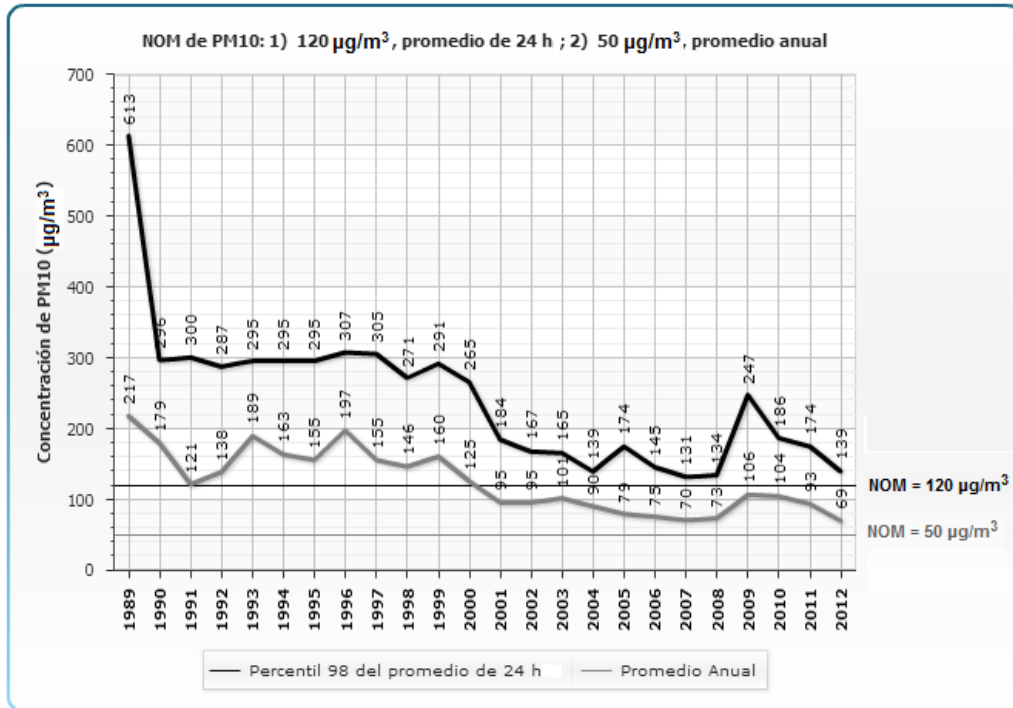


Figura 4. Evaluación anual de PM<sub>10</sub> en el Valle de México.

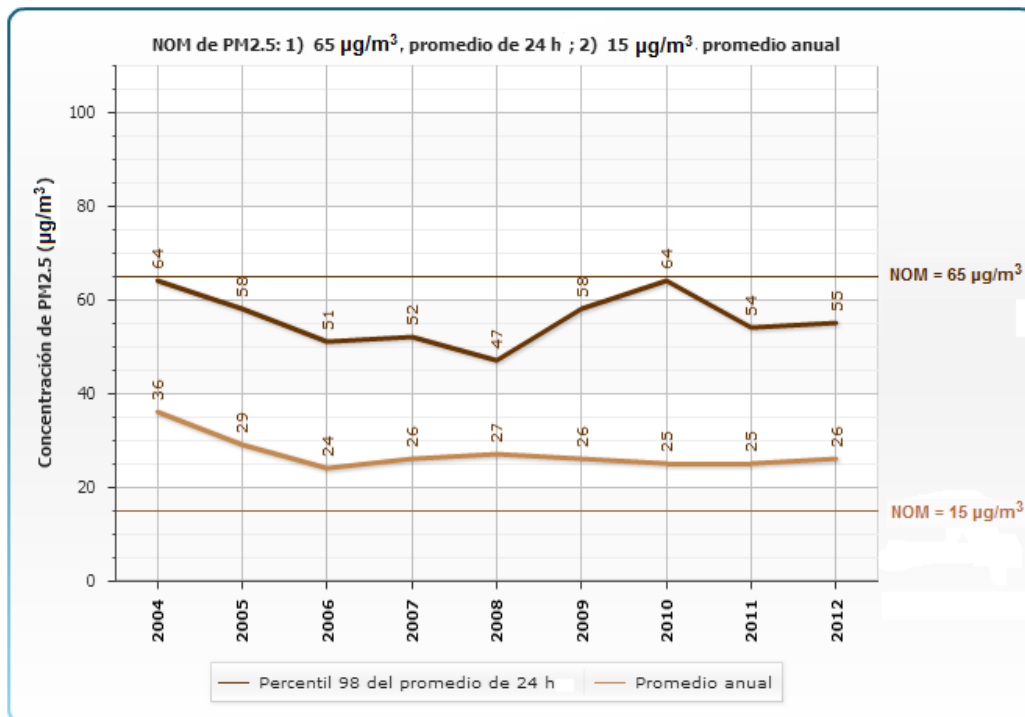
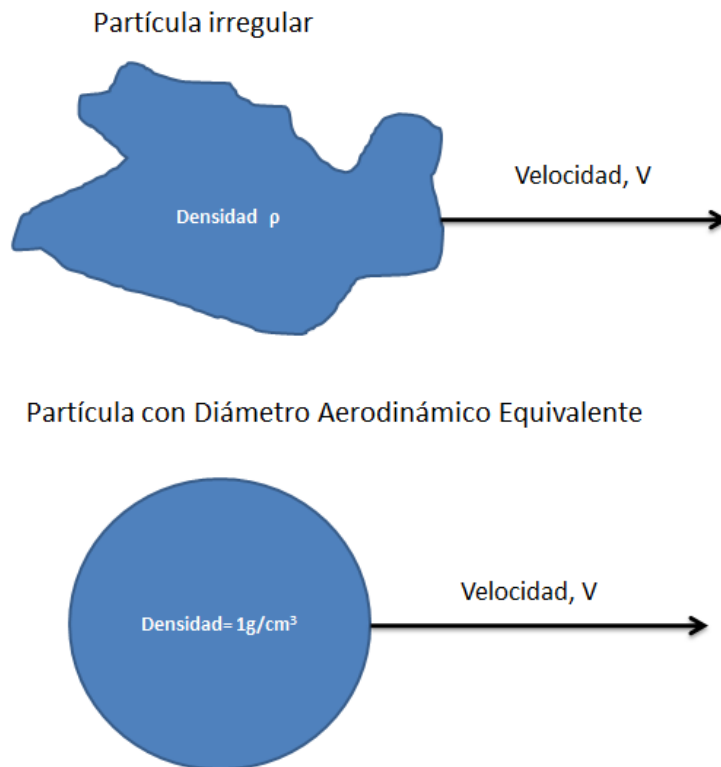


Figura 5. Evaluación anual de PM<sub>2.5</sub> en el Valle de México.

### 3.2. Diámetro de Partícula

El diámetro de una partícula se puede determinar geoméricamente, a partir de microscopía óptica, electrónica, o por su comportamiento aerodinámico. El diámetro es una propiedad fundamental en una partícula esférica, sin embargo muchas veces las partículas atmosféricas pueden ser cubicas, cilíndricas o amorfas, por esta razón se estableció el término “diámetro aerodinámico equivalente”, es decir, el diámetro de una esfera que presenta el mismo comportamiento aerodinámico que una partícula irregular. El diámetro aerodinámico equivalente depende de la densidad de la partícula, este se define como el diámetro de una partícula esférica de densidad  $1 \text{ g/cm}^3$  que presente la misma velocidad de sedimentación que la partícula irregular en cuestión (Figura 6).



**Figura 6.** Diámetro aerodinámico equivalente. (Fuente: Kukarni, 2011)



Los equipos de monitoreo de partículas de tipo “impactador de cascada”, separan partículas basándose en el diámetro aerodinámico equivalente. De igual forma, las definiciones de las partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se basan en los diámetros aerodinámicos equivalentes.

El tamaño de partícula, definido por su diámetro aerodinámico equivalente es un factor importante en la determinación de las propiedades, efectos y destino en la atmósfera de una partícula. La tasa de depositación de las partículas, el tiempo de residencia en la atmósfera, así como la depositación de éstas en el sistema respiratorio, son funciones dependientes del diámetro aerodinámico equivalente (EPA, 2006).

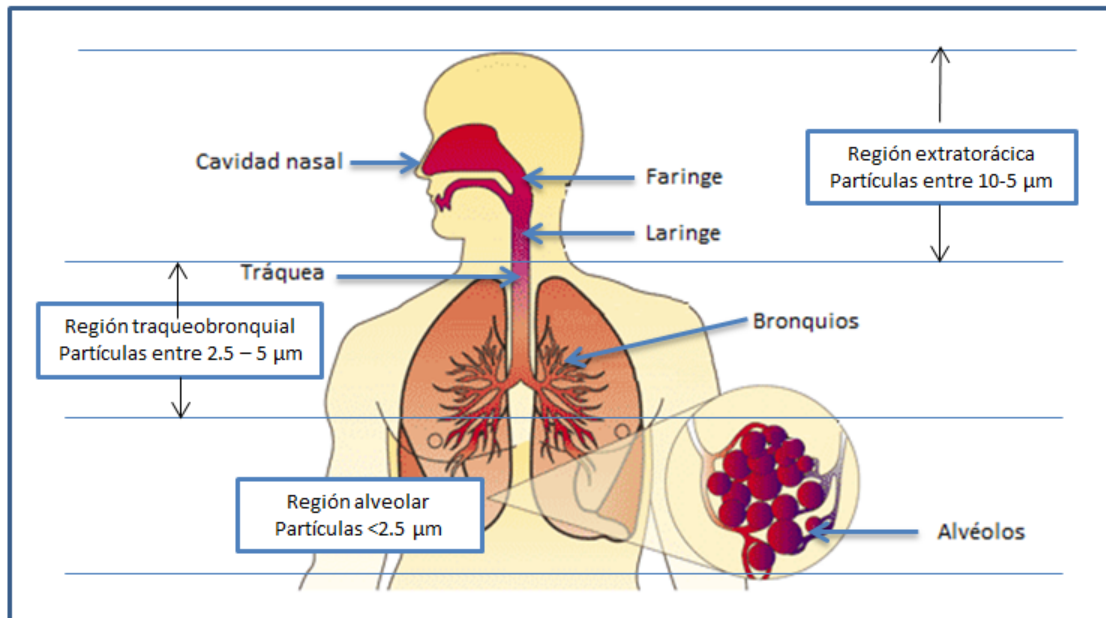
### **3.3 Efectos en la Salud**

La susceptibilidad a la exposición de contaminantes del aire varía de persona a persona, siendo las poblaciones más vulnerables las personas adultas mayores, mujeres en etapa de gestación y los niños. El riesgo depende de las condiciones de salud del individuo expuesto, por ejemplo: el estado de nutrición, sistemas inmunológicos deficientes, enfermedades cardíacas y enfermedades respiratorias, adicciones como el cigarro y el uso de medicamentos. El sistema que se encuentra en mayor contacto con el medio externo es el sistema respiratorio. Se estimó que diariamente inhalamos entre 10000 y 12000 litros de aire, el cual transporta toda clase de contaminantes atmosféricos como gases tóxicos, partículas, microorganismos, etc. (Sierra, 2009).

Las partes generales del sistema respiratorio se ilustran en la figura 7. Los conductos respiratorios inician en la nariz, por donde ingresa el aire; éste desciende a través de la laringe y la faringe hasta llegar a la tráquea, la cual se ramifica para formar bronquios y bronquiolos. Finalmente pasa a los alvéolos, pequeños sacos membranosos altamente irrigados donde se lleva a cabo el intercambio gaseoso entre la sangre y el aire (Solomon et al. 2008).

Los pulmones contienen aproximadamente 300 millones de alveolos, que desplegados ocuparían una superficie de  $70 \text{ m}^2$ , aproximadamente 40 veces la

extensión de la piel. Una vez que las partículas han entrado al tracto respiratorio, dependiendo de su tamaño, pueden acumularse en diferentes sitios dentro del aparato respiratorio. Entre más pequeñas son las partículas pueden penetrar con mayor facilidad en el tracto respiratorio, de acuerdo con su tamaño se pueden depositar en la vía respiratoria superior, llamada también región extratorácica (partículas entre 10-5  $\mu\text{m}$ ); vía respiratoria media o región traqueobronquial (entre 2.5-5  $\mu\text{m}$ ) y la vía respiratoria inferior o región alveolar (<2.5  $\mu\text{m}$ ). Estas regiones se ilustran en la siguiente Figura 7 (Sierra, 2009). La exposición prolongada a partículas finas es un factor importante de riesgo ambiental en casos de mortalidad por cáncer pulmonar y enfermedades cardio-pulmonares (Pope et al., 2002).



**Figura 7.** Distribución del material particulado en el sistema respiratorio (Sierra, 2009)

Los principales mecanismos de defensa del sistema respiratorio son: el calentamiento y humidificación del aire inspirado, el recubrimiento mucoso, la tos y los estornudos y los macrófagos (células que tienen la capacidad de atrapar materiales extraños y transportarlos hacia los bronquiolos, donde el recubrimiento mucoso los lleva fuera del sistema) (García, 2006).

El material particulado puede inducir diversos efectos biológicos como:

- Efectos fibrogénicos: Partículas de asbesto, carbón, berilio y aluminio pueden producir reacciones fibrosas en los pulmones.
- Efectos irritantes: Incluye la irritación de las mucosas de los ojos, del tracto respiratorio y se manifiesta por enrojecimiento, hinchazón, lagrimeo, estornudos y tos.
- Efectos alérgicos: Ciertas partículas casi exclusivamente de origen biológico, tienen la propiedad de originar reacciones alérgicas, por ejemplo: el polen, algunos cereales, esporas, pieles, plumas, etc.
- Efectos carcinogénicos: Varias partículas compuestas por arsénico y sus óxidos, plomo y otros metales pesados están asociados a cáncer de pulmón, de nariz y de piel.
- Efectos tóxicos sistémicos: Las partículas no siempre afectan el sistema respiratorio, sus efectos también pueden trascender más allá del sistema respiratorio y producir alteraciones en otros órganos y sistemas, tales como el hígado, los riñones o el sistema nervioso central. Por ejemplo, el plomo daña el sistema nervioso y la formación de células sanguíneas, pero no produce efectos sobre el tracto respiratorio.

Asimismo, los efectos a la salud asociados con la contaminación del aire son causados tanto por gases (óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, ozono, etc.) como por material particulado. En la Figura 8, se observan algunos de los principales efectos provocados por los contaminantes atmosféricos presentes en el ambiente.

## Daños por la contaminación

### SO<sub>2</sub>

Irritación de vías respiratorias, en altas concentraciones provoca broncoconstricción, bronquitis y traqueítis. Puede agravar enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

### NO<sub>2</sub>

Irritación de las vías respiratorias. En altas concentraciones puede provocar bronquitis y pulmonía.

### CO

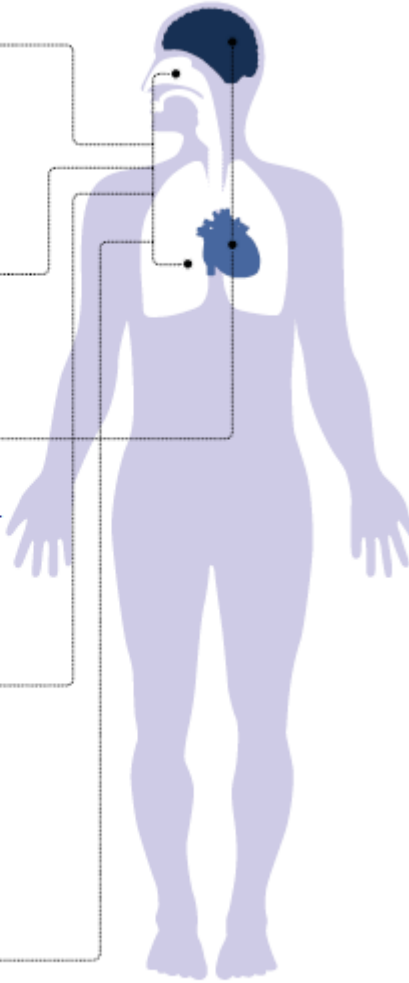
En altas concentraciones inhabilita el transporte de oxígeno hacia las células. Una exposición prolongada puede provocar mareos, dolor de cabeza, náuseas, estados de inconsciencia e inclusive la muerte.

### O<sub>3</sub>

Irrita las vías respiratorias. En altas concentraciones reduce la función pulmonar, agrava el asma, inflama las células que recubren los pulmones, agrava las enfermedades pulmonares crónicas.

### PM<sub>10</sub>

Agravan el asma y enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La exposición crónica a altas concentraciones puede provocar un incremento en el riesgo de morbilidad y mortalidad.



**Figura 8.** Daños a la salud por Contaminación Ambiental (Calidad del Aire, 2011).

### 3.4. Bioindicadores

Los organismos vivos crecen y se desarrollan en condiciones físicas y químicas específicas, las alteraciones naturales o antropogénicas del ecosistema repercutirán en su distribución y sobrevivencia. El uso de organismos como indicadores de contaminación o bioindicadores se remonta a los inicios del siglo XX en Europa (Williams y Feltmate, 1992), donde se desarrolló el primer compendio de evaluación biológica sobre calidad del agua, basado en la presencia de más de 300 especies incluidas en diferentes categorías taxonómicas (Quiroz, 2006).

Los bioindicadores son organismos sensibles a los cambios ambientales y que reaccionan ante ellos, las respuestas provocadas en los bioindicadores dan información acerca del nivel de daño ambiental. Asimismo, se desarrolla el empleo de bioindicadores como método para medir la calidad del agua, aire y suelo. Por ejemplo, las plantas muestran una especial sensibilidad a la mayoría de los contaminantes atmosféricos, de tal forma que sus hojas comienzan a presentar síntomas como clorosis, es decir, deficiencia en la producción de clorofila, la cual es visible por manchas o coloración amarillenta en las hojas. Un estudio reciente fue el realizado en 2012 por un grupo de investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM, en donde se detectó metales pesados en hojas de la especie *Ligustrum vulgare*, árbol mejor conocido como aligustre o trueno, en el Bosque de Tlalpan, en el Distrito Federal.

La capacidad de respuesta de los bioindicadores depende de diversos factores como: la composición genética del organismo (puede favorecer o no su adaptación a los cambios); de su estado de desarrollo (los individuos jóvenes suelen ser más sensibles que los adultos), y de las condiciones ambientales.

Todos los seres vivos responden a factores ambientales, se puede decir que todos ellos son bioindicadores, pero no todos responden de la misma forma a estímulos similares. De acuerdo con la forma de respuesta se pueden clasificar en:

- Detectores: Bioindicadores que viven naturalmente en un área y que, simplemente, muestran respuestas en mortalidad, capacidad reproductora, abundancia, etc. ante los cambios ambientales que se produzcan en su entorno. Por ejemplo, los musgos epífitos que viven en las ciudades se vuelven estériles o se atenúa mucho su capacidad reproductora por causa de la contaminación atmosférica.
- Explotadores: Bioindicadores cuya presencia indica la probabilidad elevada de que exista una perturbación en el ambiente. Son organismos que repentinamente se hacen muy abundantes en un lugar, casi siempre debido a la falta de competidores, que han sido previamente eliminados por algún cambio en las condiciones ambientales. Por ejemplo, la abundancia de ciertas cianobacterias indica que las aguas están eutrofizadas; la abundancia de ortigas indica que hay bastantes materiales ricos en nitratos en ese lugar.
- Centinelas: bioindicadores sensibles (detectan rápidamente los cambios), se introducen en un medio y funcionan como alarmas.
- Acumuladores: Bioindicadores que por lo general son resistentes a ciertos compuestos al ser capaces de absorberlos y acumularlos en cantidades medibles.
- Organismos test o bioensayo: Bioindicadores que se utilizan en el laboratorio a modo de reactivos para detectar la presencia y/o la concentración de contaminantes.

El monitoreo del medio ambiente a través de organismos vivos (biomonitoreo), nos ayuda a conocer las relaciones entre el medio ambiente y los organismos que habitan en él; el biomonitoreo permite establecer si las condiciones de calidad de aire, agua y suelo son adecuadas para la población. Los datos obtenidos pueden servir para predecir futuros cambios que puedan ser importantes para el ser humano. Por eso se puede considerar el biomonitoreo como base para poder desarrollar programas de control efectivo y gestión del medio ambiente (Capó, 2002).

## CAPÍTULO IV

### 4. CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA.

La circulación atmosférica es la responsable de los fenómenos que se producen en la atmósfera, depende de diversos factores tales como: la radiación solar, el movimiento de rotación de la tierra, la configuración de tierras y mares y las propiedades fisicoquímicas del aire, el continuo transporte de energía mediante masas de aire (masas de aire frío y masas de aire caliente), que se desplazan tanto horizontal como verticalmente, permite mantener el equilibrio térmico del planeta (Pérez, 2006).

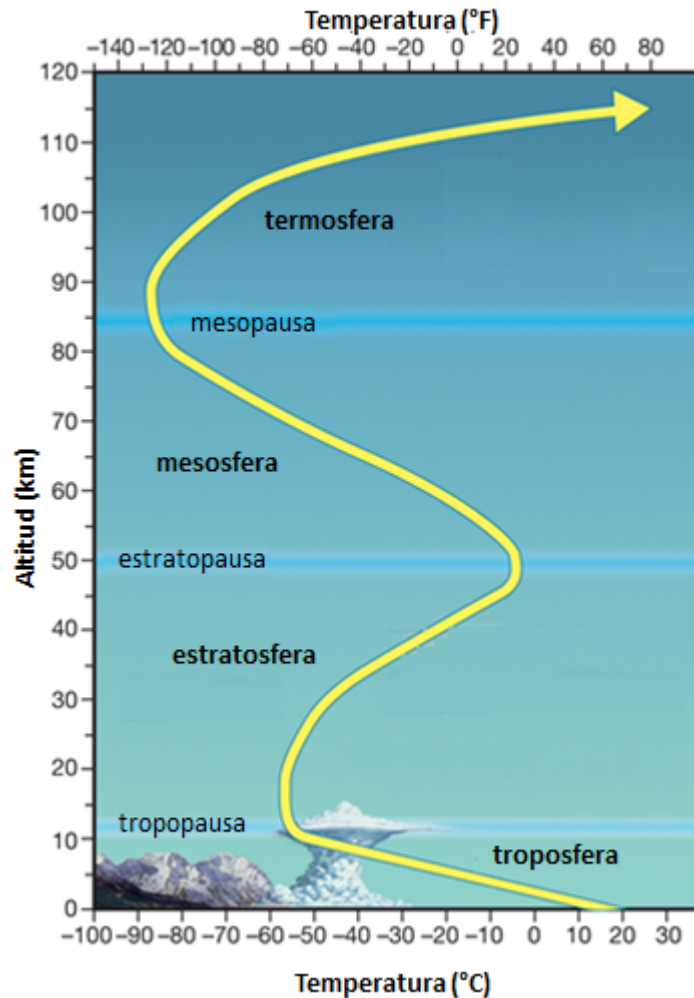
Por las dimensiones de este fluido de gases y partículas que rodea a la superficie terrestre, es necesario describir a la atmósfera considerando sus diferentes capas cuya altura está relacionada con la temperatura, la presión barométrica y la densidad del aire.

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que rodea a la tierra. Protege la vida de la Tierra absorbiendo en la capa de ozono gran parte de la radiación solar ultravioleta, reduciendo las diferencias de temperatura entre el día y la noche, y actuando como escudo protector contra los meteoritos. Los componentes de la atmósfera son: nitrógeno (78.1 %) y oxígeno (20.94 %), con pequeñas cantidades de argón, dióxido de carbono, vapor de agua, neón, helio, kriptón, hidrógeno y ozono.

La presión y la temperatura de la atmósfera varían respecto a la altura, debido a esto se considera una división de la atmósfera en 4 capas que son: troposfera (de 0 a 8-16 km), estratosfera (8-16 a 50 km), mesosfera (50 a 80-85 km) y termosfera (80-85 a 500 km).

Las divisiones entre capas se denominan tropopausa, estratopausa y mesopausa, es en estas capas donde ocurre una inversión en el gradiente térmico, es decir, se

pasa de una tendencia de disminución en la temperatura a una de aumento o viceversa (Figura 9) (Gasca, 2007).



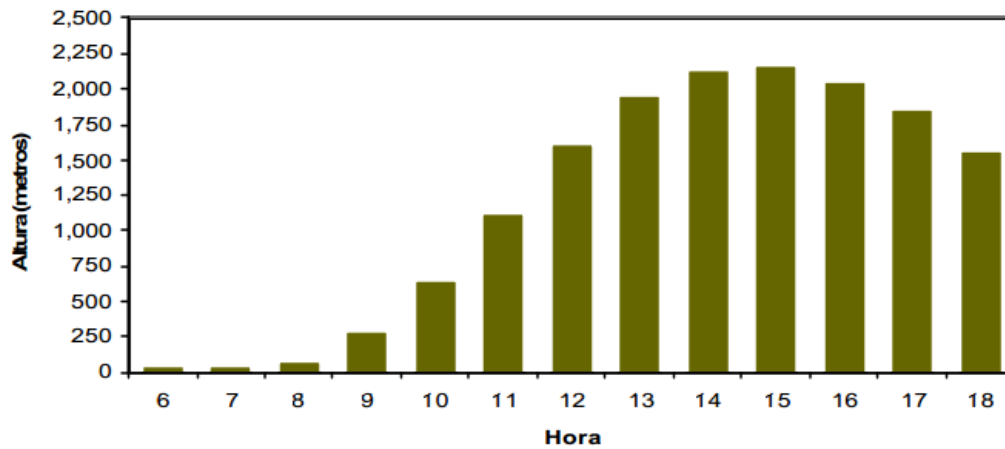
**Figura 9.** Distribución de las regiones atmosféricas (Hernández, 2009).

La troposfera (que comprende alrededor de los primeros quince kilómetros), al ser la capa que está en contacto directo con la superficie, es donde diversas partículas inician su travesía en la atmósfera, dependiendo de la energía disponible (viento, corrientes, remolinos, etc.) lo que les proporcionará flotación y movimiento. También es la capa donde se llevan a cabo la mayoría de los procesos meteorológicos (Lutgens, 2007).

La región de la atmósfera en la cual se dispersan los contaminantes es conocida como capa de mezclado, la altura a la que se encuentra esta capa depende de



diversos factores como el calentamiento del aire, la velocidad del viento, la época del año y el transcurso del día. La capa de mezclado tiene una altura mínima durante las primeras horas de la mañana, pero en el transcurso del día se incrementa en relación con la temperatura, teniendo valores máximos en las horas con máxima temperatura, la capa de mezcla decrece al anochecer y en las horas de la madrugada, siendo mínima entre las seis y ocho de la mañana (Figura 10). La importancia de la capa de mezclado radica en que nos indica la dispersión de los contaminantes en el transcurso del día.



Figura

10. Altura de la capa de mezclado (Fuente: <http://www.sma.df.gob.mx>)

#### 4.1 La Zona Metropolitana del Valle de México.

Las Zonas Metropolitanas (ZM) se originan por la dinámica de crecimiento, tanto de la población como de las actividades económicas, las ZM se encuentran en la mayoría de las entidades federativas de México donde existen un total de 56, excepto en los estados de Baja California Sur, Sinaloa y Campeche (Zonas Metropolitanas, 2009).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) define a la Zona Metropolitana como: El conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades

rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica. La importancia demográfica y económica de las ZM radica en que en ellas se concentran 56 de cada 100 habitantes y generan 73 de cada 100 pesos producidos. Tomando como referencia la población total (112 millones de habitantes), la ZM más importante del país es la del Valle de México donde habitaron 20 116 842 personas durante el 2010, las cuales representaron el 17.9 % del total de la población a nivel nacional.

La zona metropolitana denominada Valle de México ocupa el primer lugar de las 56 zonas ya que es la más poblada, esta zona está conformada por un total de 16 delegaciones del Distrito Federal, un municipio del estado de Hidalgo y 59 municipios del Estado de México. Ver Figura 11 y Anexo II (Zonas Metropolitanas, 2009).

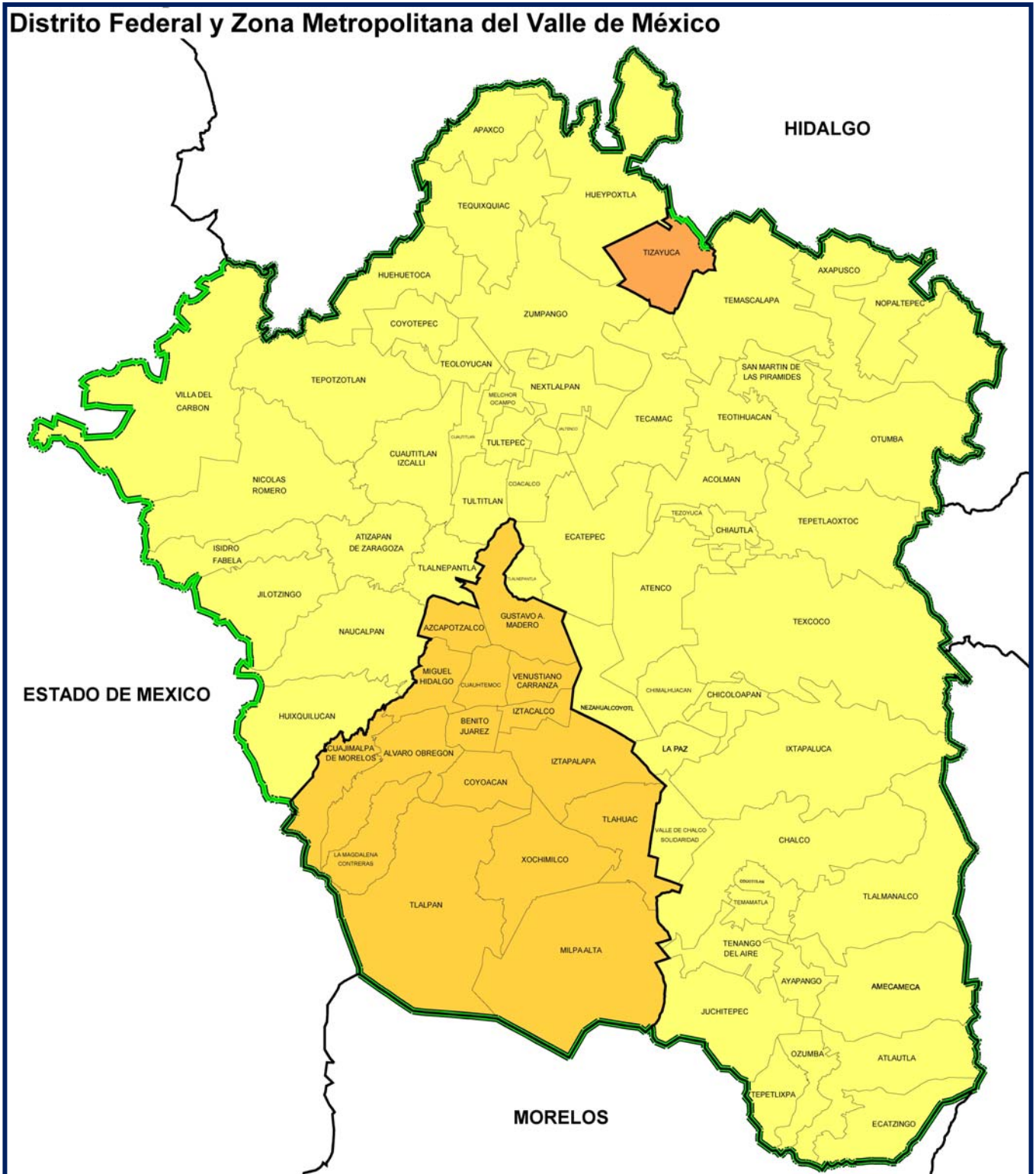
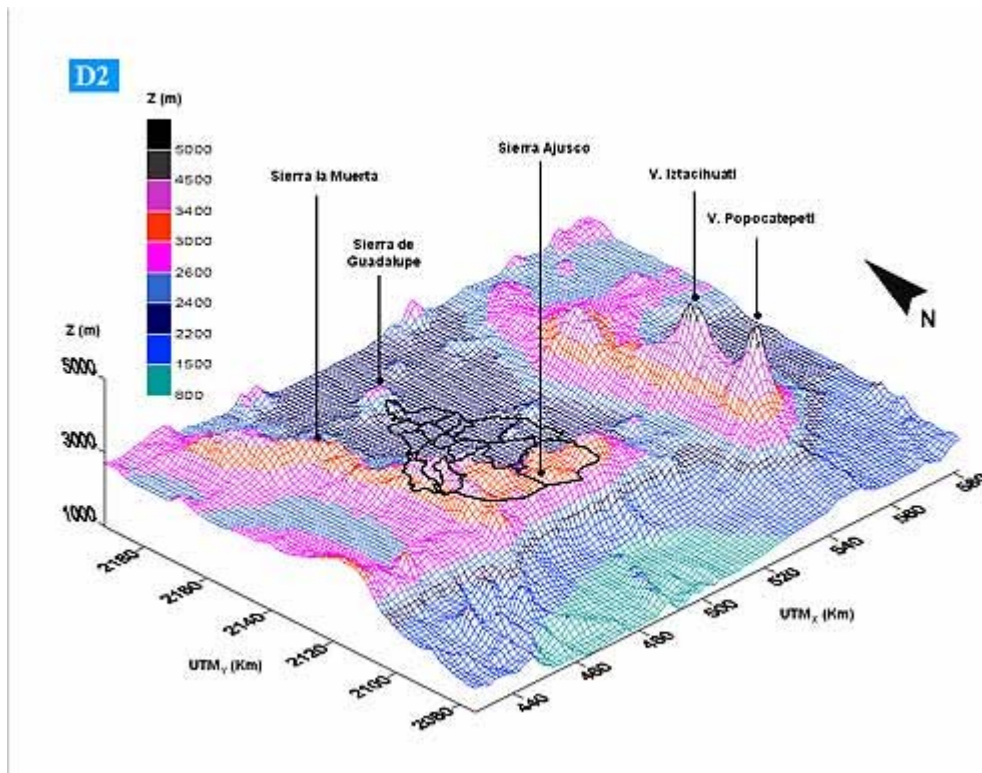


Figura 11. Zona Metropolitana del Valle de México (Zonas Metropolitanas, 2009).

## 4.2 Climatología de la Zona Metropolitana del Valle de México

Se considera al Valle de México como parte de una cuenca endorreica (área en la que el agua no tiene salida superficialmente por ríos hacia el mar), con una superficie de 7854 km<sup>2</sup>. Se sitúa entre los 19° 03´-19° 54´ de latitud Norte, y los 98° 38´-99° 31´ de longitud Oeste. Debido a su elevación de 2240 metros sobre el nivel del mar (msnm), los procesos de combustión son menos eficientes, ya que el contenido de oxígeno es alrededor de un 23 % menor que a nivel del mar (Baez *et al.*, 2001), además de recibir una radiación solar intensa que favorece la presencia de contaminantes fotoquímicos. El terreno es plano cercado por montañas con una altura media entre 600 y 800 metros sobre el nivel del valle, lo rodea la Sierra de Guadalupe al norte, al oeste la Sierra de las Cruces, al sur se encuentra la Sierra del Ajusco y al oriente la Sierra Nevada que incluye a los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl (Figura 12).

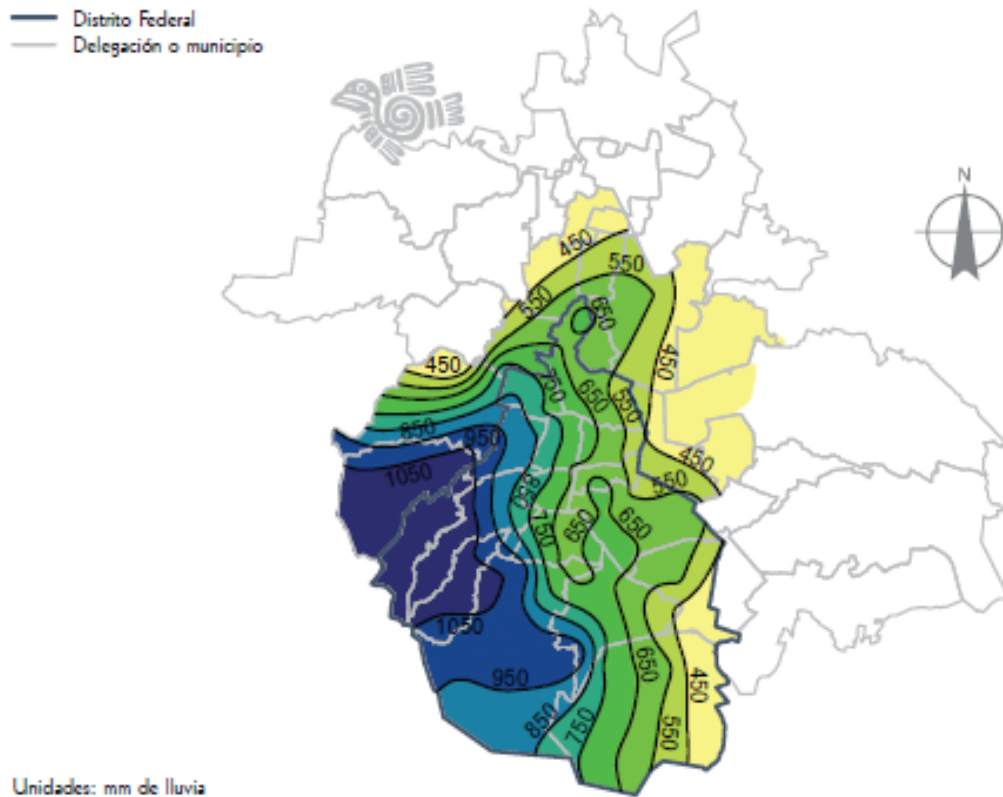


**Figura 12;** Topografía en la Zona Metropolitana del Valle de México (Fuente: <http://www.sma.df.gob.mx/met-model/mapas/ayuda.html>)

La cantidad y distribución de las montañas hacen del Valle de México un terreno complejo que tiene una influencia importante en la manera en la que los contaminantes se comportan en la atmósfera, tiene un clima templado en la porción centro y sur, mientras que el norte y oriente prevalece un clima seco (Jáuregui, 2000).

Por su posición geográfica y las características de los sistemas meteorológicos en el Valle de México se definen tres temporadas climáticas: seca-fría, seca-caliente y lluvias. La temporada seca-fría se caracteriza por escasa precipitación y bajas temperaturas, comprende los meses de noviembre a febrero; durante esta temporada es frecuente observar fenómenos meteorológicos tales como masas de aire frío que se desprenden desde los polos y provocan frentes fríos y nortes. En la temporada seca-caliente, que comprende los meses de marzo a mayo, los sistemas meteorológicos favorecen días calurosos y durante la temporada de lluvias, de junio a octubre, el Valle de México es afectado por sistemas meteorológicos como tormentas tropicales y huracanes (Calidad del aire 2011).

Las zonas de mayor precipitación pluvial en el Valle de México se encuentran hacia el suroeste y sur-sureste; por otra parte, las de menor precipitación son las áreas norte y noreste (Figura 13). El periodo de lluvias es la época en que disminuyen los niveles de contaminantes, ya que la humedad del aire favorece la reacción en fase acuosa de algunos contaminantes gaseosos y en el suelo se inhiben los procesos de liberación y/o resuspensión de partículas. La lluvia es el proceso más eficiente de eliminación de gran parte de los contaminantes en suspensión en la atmósfera, a este proceso se le conoce como lavado atmosférico (Calidad del aire 2011).



**Figura 13.** Distribución espacial de la precipitación en el Valle de México (Fuente: Sistema de aguas de la Ciudad de México).

### 4.3 Velocidad y Dirección del Viento en la Zona Metropolitana del Valle de México.

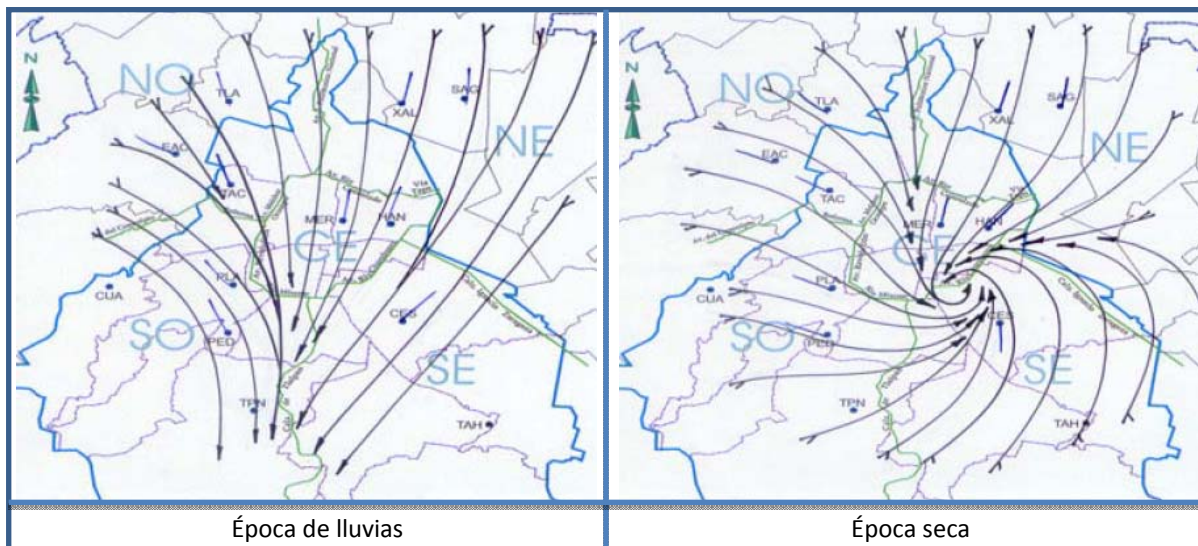
El viento es el desplazamiento horizontal del aire, este movimiento del aire es producido por diferencias de presión atmosférica, atribuidas sobre todo, a diferencias de temperatura. La variación de la presión atmosférica y de la temperatura se debe a la distribución desigual del calentamiento solar y a las propiedades térmicas de la superficie continental y marina. Como el peso del aire caliente es menor, éste asciende sobre el aire más frío y pesado.

Entre los factores climatológicos de mayor importancia se encuentra el viento, ya que tanto su dirección como su intensidad determinan hacia donde se dirigen los contaminantes y si éstos se acumularán o se dispersarán en determinada región.

La intensidad del viento aumenta a medida que avanza el día hasta alcanzar la velocidad máxima entre las 18:00 y 19:00 horas, los vientos de mayor intensidad contribuyen a la dispersión de la contaminación fuera del valle (Gestión Ambiental del Aire, 2006).

En la figura 14 se muestran los campos de viento promedio para las épocas seca y de lluvia; se observa que durante la temporada de lluvias, el flujo de viento tiene una intensa actividad que va del norte hacia todo el valle.

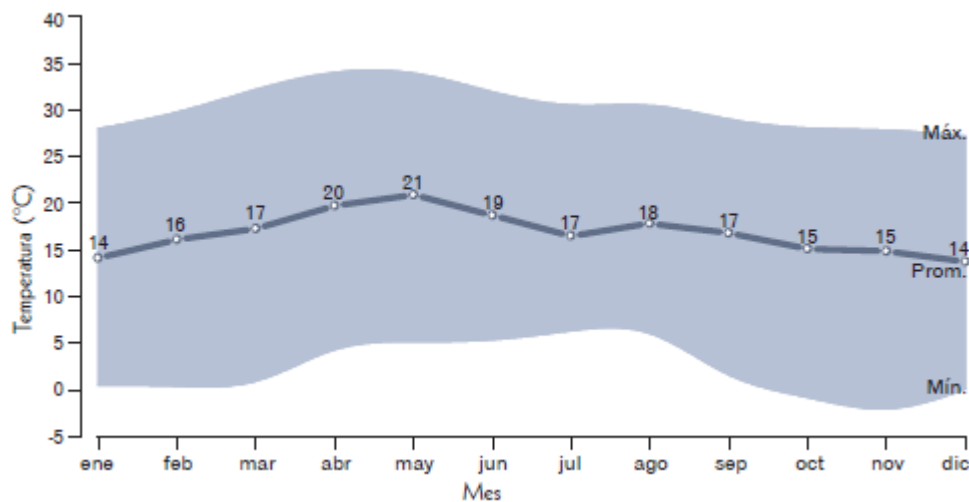
Por otro lado, la temporada seca presenta una característica importante: un vórtice (remolino) se forma muy cerca del centro del Distrito Federal, lo cual se debe al efecto conocido como “Isla de Calor”, situación meteorológica generada por el aumento de la temperatura del suelo de tipo urbano, con materiales de construcción de cemento y asfalto, en contraste con las áreas forestales que la circundan, estos vórtices son importantes porque inducen la acumulación de los contaminantes, este fenómeno se puede originar a cualquier hora y permanecer durante todo el día (Jáuregui, 2000; Gestión Ambiental del Aire, 2006).



**Figura 14.** Campos de viento promedio para las épocas seca y de lluvia. (Gestión Ambiental del Aire, 2006)

#### 4.4 La Temperatura en la Zona Metropolitana del Valle de México

La temperatura es otra variable importante que determina el clima de un lugar, es un parámetro importante que afecta la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire (humedad atmosférica) e influye en la fuerza que ejerce el peso del aire sobre la superficie terrestre (presión atmosférica). Las diferencias de temperatura en la región baja de la atmósfera generan un diferencial en la presión atmosférica que provoca el movimiento de las masas de aire, produciendo el viento, la temperatura máxima y promedio en el Valle de México presenta un característico patrón estacional de acuerdo con la época del año, prevaleciendo valores bajos en la época seca-fría, altos en la seca-caliente y moderados en la de lluvias (Figura 15).



**Figura 15.** Comportamiento mensual de la temperatura ambiente en el Valle de México. (Fuente: Calidad del aire, 2011)

En la época de secas-frías se presenta con mayor frecuencia el fenómeno conocido como “Inversión Térmica”, el cual consiste en el aumento de la temperatura con la altura en alguna región de la troposfera, éste no es un fenómeno común, debido a que en condiciones normales la temperatura disminuye con la altura. El fenómeno de inversión térmica se presenta generalmente durante las largas noches de invierno cuando el suelo se enfría



gradualmente, enfriando a su vez la capa de aire por encima de él haciéndolo más denso y pesado, el aire cálido de menor densidad se mueve sobre esta masa de aire más fría, la cual contiene atrapados los contaminantes de la ciudad. A medida que asciende el sol la inversión se debilita y desaparece generalmente alrededor del mediodía y es en el transcurso de la tarde cuando los contaminantes se dispersan verticalmente.

La topografía del Valle de México influye enormemente en inversiones de temperatura, el aire frío y denso que desciende desde las montañas hacia el valle, se incrusta debajo del aire caliente, creando así una inversión térmica en el centro del valle como se observa en la Figura 16.



**Figura 16.** Inversión Térmica en el Valle de México (Fuente: Calidad del Aire, 2011).

## CAPÍTULO V

### 5. AEROBIOLOGÍA

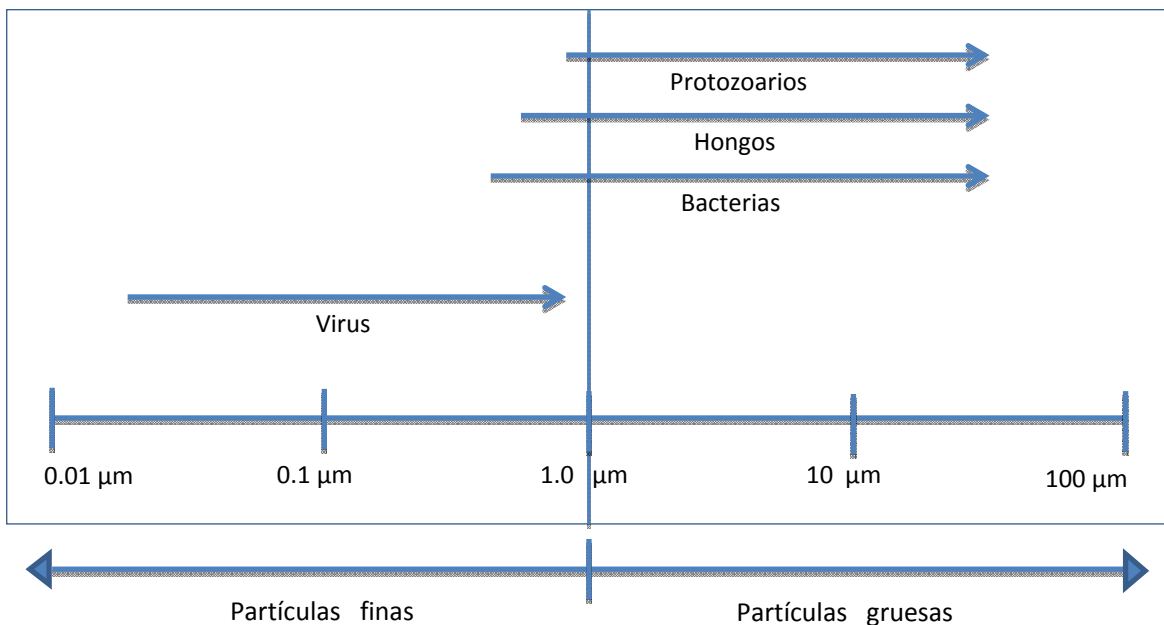
En los años 30's, surge una ciencia de carácter multidisciplinario que conjunta conocimientos de microbiología, meteorología, dinámica atmosférica y química atmosférica, la cual actualmente es conocida como Aerobiología (Rosas, 2004). El campo de estudio de la aerobiología se centra en los organismos y partículas biológicas o biopartículas que están presentes en el aire: su diversidad, modos de vida, mecanismos de liberación, transporte y deposición; así como su impacto en los organismos vivos y su ambiente, comprendiendo los factores meteorológicos y biológicos que influyen en el movimiento de las biopartículas en la atmósfera, la parte de la Aerobiología que involucra el estudio del transporte aéreo de microorganismos con relevancia ambiental incluyendo protozoarios, hongos, bacterias y virus es denominada Aeromicrobiología.

Los protozoarios son organismos unicelulares con tamaños que oscilan entre 5-25  $\mu\text{m}$ . Los hongos se dispersan principalmente mediante la producción de esporas, las cuales son estructuras fácilmente transportadas en el aire y resistentes a factores ambientales. El tamaño de las esporas se encuentra en el intervalo de 1.5-30  $\mu\text{m}$ .

Las bacterias son microorganismos unicelulares que varían en tamaño de 0.5 a 30  $\mu\text{m}$ . Las bacterias pueden ser esféricas, en forma de vara y forma espiral. Muchas bacterias esféricas se encuentran en pares, tétradas, o grupos, por ejemplo, *Micrococcus* y *Staphylococcus*, o en cadenas como *Streptococcus*.

Los virus difieren de otros microorganismos, en que sólo pueden reproducirse dentro de una célula huésped. Por lo tanto, los virus son parásitos intracelulares, pueden infectar bacterias, plantas, animales, y al ser humano. Son los microorganismos más pequeños de todos con un intervalo de tamaño entre 0.02-0.3  $\mu\text{m}$  (Kukarni et.al. 2011).

En la Figura 17 se muestra la relación del tamaño de las biopartículas, el intervalo de tamaño se hace aún más variable considerando que sobre la superficie de los microorganismos se pueden adherir otro tipo de material particulado, incrementando su tamaño original, o incluso podemos recolectar solo partes del microorganismo como lo serían la pared celular, toxinas, etc.



**Figura 17.** Representación del tamaño relativo de biopartículas (Maier et al, 2009).

### 5.1 Antecedentes.

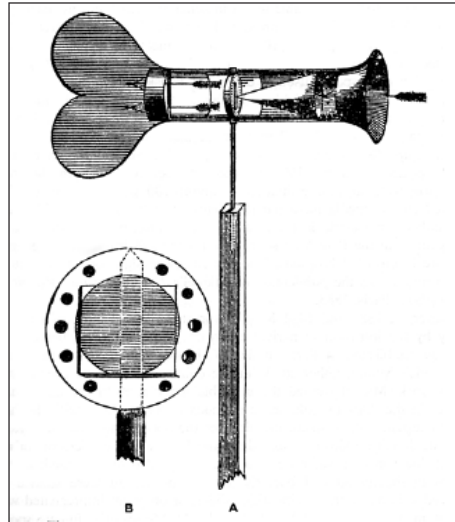
La aerobiología tiene sus orígenes alrededor del 460-377 a.C. cuando Hipócrates afirmaba que los hombres eran atacados por epidemias cuando respiraban contaminantes hostiles a la raza humana. En el año 55 a.C. Lucrecio observó polvo a través de un rayo de sol con lo que dedujo que existen partículas en movimiento en el aire y las cuales pueden ser la causa de algunas epidemias. A pesar de estas observaciones el desarrollo de esta ciencia ocurrió 1500 años después. Fue hasta 1680, cuando Leeuwenhoek reportó la presencia de microorganismos, los cuales podrían ser transportados por el viento junto con las partículas de polvo (Gregory, 1973).

En 1729, Micheli demostró que las esporas de los mohos se dispersaban a través del aire, después de sembrar esporas de mohos en trozos de fruta y observar que las muestras control se contaminaban. A finales del siglo XVIII se realizaron varios estudios sobre la polinización en especial de flores que carecen de corola, personajes como: Koelrueter, Sprengel y Knight demostraron la importancia de la acción del viento en el proceso de la polinización, debido a que el polen es muy ligero y fácilmente transportable (Gregory, 1973).

Los granos de polen de diferentes plantas varían en tamaño, en general su diámetro varía entre 10-100  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, los granos de polen no son parte de la fracción respirable, sin embargo, muchos tipos de polen contienen alérgenos importantes que pueden estar presentes en el aire en fragmentos más pequeños (Kukarni et. al. 2011), para los inicios del siglo XIX se reconoció que el polen de diversas especies de plantas y las esporas microscópicas de helechos, musgos, hongos y protistas eran liberados comúnmente en el aire y transportados por el viento.

Louis Pasteur en 1862 desarrolló un filtro de algodón para extraer polvo suspendido en el aire, el cual observaba en el microscopio, mediante estas observaciones demostró la existencia de esporas en el aire, puntualizando que su concentración debe ser medida mientras se encuentra en suspensión y no después de su deposición en superficies, el trabajo bacteriológico de Pasteur permitió identificar las causas de algunas enfermedades en humanos (Lancey y West, 2007).

En 1870, apareció el “aeroconoscopio” un muestreador de aeropartículas, desarrollado por Maddox, este muestreador consiste en un embudo cónico con la boca dirigida hacia el viento por una veleta y terminando en una boquilla, detrás de ésta, se encuentra una cubierta de cristal pegajoso donde el aire impacta dejando adheridas partículas, Figura 18.



**Figura 18.** El aeroconoscopio A) vista lateral  
B) Superficie adhesiva ubicada detrás de cono.

En 1883 Koch logró identificar los microorganismos causantes del ántrax, tuberculosis y cólera (Gregory, 1973). En 1884 Hesse diseñó un sistema para contar microorganismos, el cual consistía en un tubo estrecho recubierto en su interior de gelatina nutritiva que permitía su crecimiento, tras sus observaciones en cuanto a la relación de abundancia de mohos y bacterias, logró determinar que las esporas de hongos se encuentran usualmente en el aire como partículas individuales, mientras que las bacterias se encuentran como grandes agregados o adheridas a las partículas de polvo.

Edmonds y Benninghoff (1973) publicaron el concepto de la Ruta Aerobiológica, que años más tarde sería retomado por Isard y Gage (2001) como un método sencillo para explicar las diferentes etapas del transporte de los organismos a través del aire. Los estudios aerobiológicos se iniciaron como resultado de un interés epidemiológico, para tratar patógenos de animales, plantas y del ser humano.

Esta ciencia relativamente nueva ha recibido grandes contribuciones durante los últimos 60 años, principalmente con respecto al estudio epidemiológico de las enfermedades de las plantas, el interés y al mismo tiempo necesidad de entender el comportamiento y control de los padecimientos en plantas, se debe al impacto

económico de los fitopatógenos en la producción agrícola, los cuales causan pérdidas económicas de millones de dólares cada año.

Hasta el 70 % de todas las enfermedades de las plantas son causadas por hongos, como la roya del trigo, que se puede propagar por transmisión aérea. La transmisión aérea es capaz de transportar estos fitopatógenos miles de kilómetros.

También son numerosos los microorganismos patógenos transportados por el aire que infectan a los animales, por ejemplo, el virus de la rabia (*Rhabdoviridae*). Por último, los seres humanos también pueden ser infectados por patógenos que se transmiten por vía aérea tales como *Legionella pneumophila* y *Mycobacterium tuberculosis*. (Maier, 2009). Algunos de los microorganismos patógenos para plantas, animales y humanos, que pueden ser transportados por el aire se nombran en las Tablas 4, 5 y 6. (Maier, 2009):

**Tabla 4. Enfermedades en Plantas provocadas por patógenos presentes en el aire**

Enfermedades fúngicas en plantas	Patógeno
Enfermedad holandesa del olmo	<i>Ceratocystis ulmi</i>
Tizón de la papa	<i>Phytophthora infestans</i>
Roya de la hoja	<i>Puccinia recondite</i>
Carbón volador del trigo	<i>Ustilago tritici</i>
Mildiu vellosa	<i>Pseudoperonospora humuli</i>
Roya de maíz	<i>Puccinia sorghi</i>
Mildiu polvoriento	<i>Erysiphe graminis</i>
Tizón del maíz	<i>Helminthosporium maydis</i>

**Tabla 5. Enfermedades en Animales provocadas por patógenos presentes en el aire**

Enfermedad animal	Patógeno
Enfermedades bacterianas	
Tuberculosis	<i>Mycobacterium bovis</i>
Brucelosis	<i>Brucella spp.</i>
Enfermedades fúngicas	
Aspergilosis	<i>Aspergillus spp.</i>
Coccidiodomicosis	<i>Coccidioides immitis</i>
Enfermedades virales	
Influenza	<i>Virus de la Influenza</i>
Rabia	<i>Rhabdoviridae</i>
Fiebre aftosa	<i>Aphthovirus</i>

**Tabla 6. Enfermedades Humanas provocadas por patógenos presentes en el aire**

Enfermedad Humana	Patógeno
<b>Enfermedades bacterianas</b>	
Tuberculosis pulmonar	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>
Neumonía	<i>Klebsiella pneumoniae</i>
Ántrax pulmonar	<i>Bacillus anthracis</i>
Legionelosis	<i>Legionella spp.</i>
Tosferina	<i>Bordetella pertussis</i>
Difteria	<i>Corynebacterium diphtheriae</i>
<b>Enfermedades fúngicas</b>	
Aspergilosis	<i>Aspergillus fumigatus</i>
Coccidioidomycosis	<i>Coccidioides immitis</i>
<b>Enfermedades virales</b>	
Influenza	<i>Virus de la Influenza</i>
Síndrome pulmonar por Hantavirus	<i>Hantavirus</i>
Hepatitis	<i>Virus de la hepatitis</i>
Varicela	<i>Herpesvirus</i>
Resfriado común	<i>Picornavirus</i>

## 5.2 Permanencia de los microorganismos en la atmósfera

Los microorganismos son pequeños seres que sólo pueden ser observados con ayuda de un microscopio, gran variedad de ellos cambian su localización geográfica durante su ciclo de vida, y tienen la capacidad de adaptarse a condiciones extremas impuestas por la temperatura, la humedad, la presión y la radiación, etc. Las actividades antropogénicas, como el tráfico vehicular, las plantas de tratamiento de aguas residuales, las prácticas agrícolas, etc. liberan una gran cantidad de microorganismos a la atmósfera y producen contaminación de las áreas circundantes. Podemos visualizar algunas de estas fuentes y la cantidad de bacterias que aportan a la atmósfera en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Fuentes Naturales y Antropogénicas que contribuyen a incrementar la concentración de bacterias a la atmósfera. (Rosas, 2004)

FUENTE	CONCENTRACIÓN (UFC / m <sup>3</sup> )
<b>Naturales</b>	
Costa	ND – 560
Bosques	385 – 1.2x10 <sup>3</sup>
Pastizales	127 – 587
Matorral desértico	2-283



<b>Antropogénicas</b>	
<b>Zona Urbana</b>	539 – 7.2x10 <sup>3</sup>
<b>Calles transitadas</b>	100 – 13x10 <sup>3</sup>
<b>Parques</b>	100 – 2.5x10 <sup>3</sup>
<b>Estación de transferencia de basura</b>	350 – 14x10 <sup>3</sup>
<b>Planta recicladora de basura</b>	1.1x10 <sup>3</sup> - 2.8x10 <sup>7</sup>
<b>Planta de composteo</b>	1x10 <sup>3</sup> - 11x10 <sup>6</sup>
<b>Planta de tratamiento de aguas residuales</b>	1x10 <sup>2</sup> - 2x10 <sup>5</sup>
<b>Zona rural</b>	202 – 3.4x10 <sup>3</sup>
<b>Campo agrícola</b>	46 – 6.5x10 <sup>3</sup>
<b>Empacadora de algodón</b>	3.3x10 <sup>6</sup> – 19x10 <sup>6</sup>

UFC: Unidades formadoras de colonias, ND: No Detectable

El conjunto de plantas, árboles y cualquier superficie vegetativa es denominada Filosfera; por ser un hábitat natural de muchos microorganismos y con ayuda del viento, la lluvia, incluso el roce de las hojas es considerada otra fuente que ayuda al incremento de microorganismos suspendidos en la atmósfera. La nutrición y los componentes celulares de las plantas proveen una fuente de nutrimentos para varios microorganismos, quienes provocan respuestas morfológicas, bioquímicas o patológicas en el individuo con el cuál están asociados. Otra fuente de microorganismos son los animales y el ser humano, por ejemplo, el hablar, toser y estornudar, libera microorganismos a la atmósfera; heces de animales y humanos contaminan el suelo con microorganismos patógenos permitiendo su posterior transporte en la atmósfera. Los microorganismos presentes en la atmósfera representan un riesgo para la salud al ser inhalados, las partículas biológicas están siempre presentes en dicho ambiente, aunque su número y viabilidad cambien con las horas del día, las condiciones del tiempo, las estaciones del año y su ubicación geográfica.

La atmósfera es un medio hostil para los microorganismos, debido principalmente a factores ambientales como la temperatura, la humedad y la radiación. Sin embargo, muchos de ellos cuentan con mecanismos que les permiten ser resistentes a diversos factores ambientales que promueven la pérdida de actividad biológica. Para los microorganismos que no tienen estos mecanismos, su supervivencia llega a ser medida en segundos, en cambio aquellos con estos mecanismos pueden sobrevivir indefinidamente. La viabilidad depende en gran

medida de las condiciones atmosféricas, el periodo de tiempo que el microorganismo pasa en la atmósfera y el tipo de microorganismo.

Los microorganismos tienen actividad biológicamente activa por periodos de tiempo limitados debido a las condiciones atmosféricas. La pérdida de actividad biológica se conoce como inactivación y en general se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$X_t = X_0 e^{-kt}$$

Dónde:

- $X_t$  Representa a los microorganismos viables en un tiempo  $t$ ,
- $X_0$  Es la concentración inicial
- $K$  Es la constante de inactivación la cual depende de la especie de microorganismo y de las condiciones ambientales.

### 5.2.1. Factores Ambientales

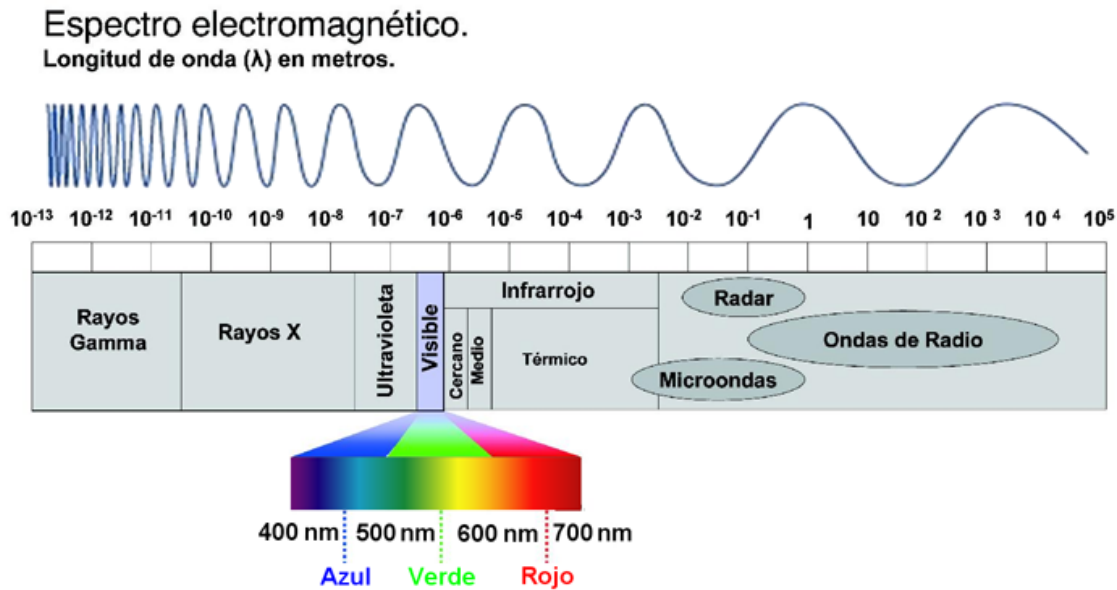
La temperatura en una región está definida por diversos factores como son la variación en la intensidad de la radiación solar, la altitud, la nubosidad, la presencia de cuerpos de agua, el tipo de vegetación y de suelo, etc. En zonas urbanas el uso de suelo contribuye de manera significativa a variaciones de temperatura, la medición de este parámetro proporciona información útil para generar el pronóstico del tiempo (estado de la atmósfera en un lugar y momento determinado) o para generar modelos de dispersión de contaminantes.

La temperatura es el mayor factor en la inactivación de microorganismos, a temperaturas altas se promueve la inactivación, asociado con la desnaturalización de proteínas; y a bajas temperaturas se promueve una supervivencia larga (Mohr, 2001). Cuando las temperaturas se aproximan a la congelación, algunos microorganismos pierden viabilidad ya que se forman cristales de hielo en sus superficies, los efectos de la temperatura están estrechamente relacionados con otros factores como la humedad relativa.

El vapor de agua en la atmósfera tiene un papel fundamental en la vida y en la regulación del clima del planeta, la cantidad de vapor de agua existente en el aire provoca una gran cantidad de fenómenos meteorológicos como la lluvia, el rocío y las nubes, por mencionar algunos. La humedad relativa, es la relación porcentual entre la presión de vapor y la presión de vapor de saturación.

Una humedad relativa del 100 % significa un ambiente saturado a una temperatura específica, cuando la humedad alcanza este valor se produce condensación. Las gotas de vapor de agua pueden funcionar como matriz para una gran cantidad de reacciones químicas que involucran gases contaminantes y partículas, también pueden participar activamente en la formación de contaminantes secundarios. La humedad relativa del aire ha demostrado ser de gran importancia en la supervivencia de los microorganismos. Wells y Riley (1937) estuvieron entre los primeros en estudiar este fenómeno, observaron que a medida que la humedad relativa se aproxima al 100 %, la tasa de mortalidad de la *Escherichia coli* aumenta. La capacidad de un microorganismo para permanecer viable en un bioaerosol está relacionada con la bioquímica de superficie del microorganismo.

La radiación es el proceso a través del cual la energía es transferida de un punto a otro en ausencia de un medio. La mayor fuente de radiación en la Tierra es el Sol. La radiación emitida por el Sol varía en su longitud de onda desde  $10^{-14}$  hasta  $10^{10}$  metros. El intervalo completo que comprende todas las longitudes de onda se conoce como el espectro electromagnético (Figura 19). La radiación electromagnética será más energética cuanto más elevada sea su frecuencia o menor su longitud de onda, es decir que los rayos gamma son de alta energía al tener frecuencias altas y longitudes de onda cortas, en cambio las ondas de radio son de baja energía al presentar frecuencias bajas y longitudes de ondas largas.

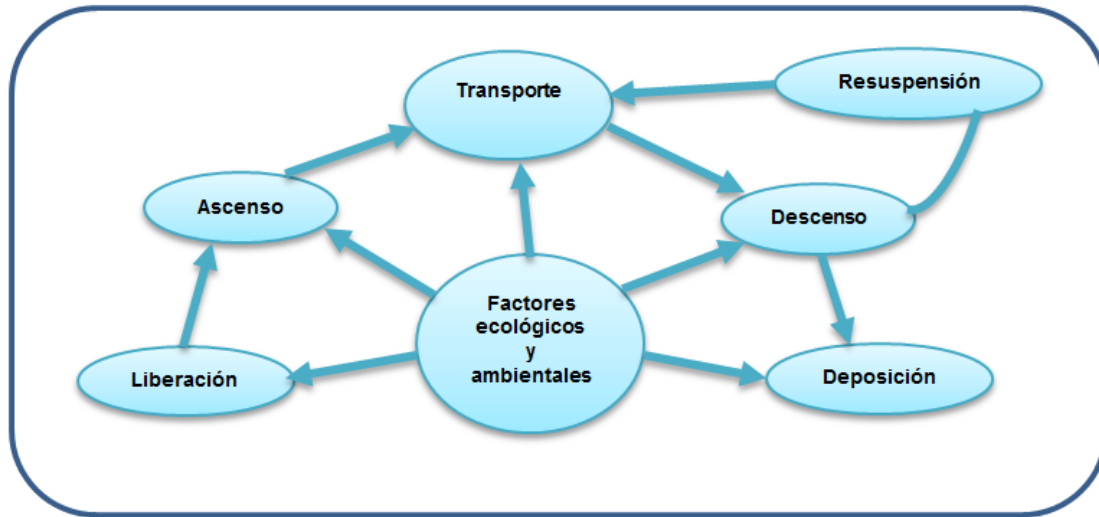


**Figura 19.** Espectro Electromagnético

Las principales fuentes de radiación que provocan daño a los microorganismos son las radiaciones UV y los rayos X. Las radiaciones causan daños en el ADN, esto a su vez provoca la inhibición de la actividad biológica, como la replicación del genoma, la transcripción y la traducción. Existen varios mecanismos por los que los microorganismos se protegen de daños por radiación. Éstos incluyen la asociación de los microbios con grandes partículas en el aire, la presencia de pigmentos como carotenoides, la alta humedad relativa, y la nubosidad, cada uno de estos mecanismos tienden a absorber o bloquear la radiación.

### 5.3 Transporte Aerobiológico

El transporte Aerobiológico comprende varias fases: liberación de biopartículas al aire a partir de una fuente, el transporte o difusión de estas partículas y finalmente su deposición: un ejemplo de esta vía de transporte es el caso de aerosoles líquidos que contienen el virus de la gripe, todo inicia con un estornudo provocando la dispersión del virus en el aire, se inhala y deposita en los pulmones de una persona cercana, donde pueden comenzar una nueva infección. Se describen cada una de las etapas en la Figura 20.



**Fig. 20** El proceso Aerobiológico (Guerrero, 2012).

### 5.3.1. Liberación

Se denomina liberación al proceso mediante el cual las partículas quedan suspendidas en la atmósfera. El origen de este proceso es a partir de fuentes terrestres y acuáticas, ya que en estas fuentes existe mayor concentración de biopartículas que en la atmósfera. Podrían existir fuentes atmosféricas pero este fenómeno está relacionado con la capacidad de un microorganismo para poder reproducirse mientras se encuentra en el aire. Desafortunadamente este aspecto, en el área de la Aeromicrobiología, aún no ha sido muy estudiado. Las biopartículas en suspensión pueden ser liberadas por turbulencias de aire creadas por el movimiento de los seres humanos, animales y máquinas; procesos mecánicos tales como la acción del agua y el viento sobre superficies contaminadas; y la liberación de esporas de hongos o polen en el caso de las plantas como resultado de su ciclo de vida natural.

### 5.3.2. Transporte o Difusión

Transporte o difusión es el proceso mediante el cual se transfiere la energía potencial del viento a las partículas provocando su movimiento de un punto a otro,

el transporte de bioaerosoles puede definirse en términos de distancia y tiempo, en diferentes niveles. El transporte a nivel submicroescala implica periodos cortos de tiempo (menores a 10 min) y distancias relativamente cortas (menores a 100 m); este tipo de transporte es común en espacios intramuros, por ejemplo dentro de los edificios. El nivel microescala considera intervalos de tiempo entre 10 minutos y 1 hora y distancias de 100 metros a 1 km, éste es el tipo más común de transporte; en términos de días y distancias de hasta 100 km hablamos de transporte a nivel macroescala. Debido a que la mayoría de los microorganismos tienen una capacidad limitada para sobrevivir cuando se encuentran suspendidos en la atmósfera, las escalas más comunes consideradas para su transporte son la submicroescala y la microescala; sin embargo, existen microorganismos capaces de transportarse a nivel macroescala (en 1957 una epidemia de gripe aviar comenzó en China y desde allí se extendió rápidamente a África, Australia y América).

Dependiendo de los vientos y la época del año, las nubes de polvo procedentes de África pueden llegar al norte de Europa, América del Norte, Sudamérica, América Central y el Caribe. Aunque durante mucho tiempo se consideró que la transmisión de microorganismos patógenos por esta vía era poco factible, principalmente por el tiempo que tienen que permanecer expuestos a la luz ultravioleta durante el viaje (5-7 días para cruzar el Atlántico y 7-9 días para el Pacífico), se ha mostrado que diferentes microorganismos, incluidos algunos patógenos para humanos, pueden realizar este recorrido y sobrevivir (Griffin *et al.*, 2001).

Cuando las partículas son liberadas comienzan a dispersarse en el aire, por lo tanto su concentración por unidad de volumen comienza a disminuir en cuanto la distancia desde el punto de liberación aumenta. La expansión de la nube de partículas se produce debido a la turbulencia en las corrientes de viento, causando la dilución de la nube de partículas, este fenómeno es visible en la Figura 21.



**Figura 21.** Dispersión de humo desde una chimenea en Calcuta (Lacey y West, 2006).

### 5.3.3. Depositación

El último paso en el transporte Aerobiológico es la depositación. Cuando una partícula se encuentra en la atmósfera transportada por turbulencias de aire, eventualmente sale de estas corrientes para depositarse en alguna superficie. Los mecanismos por los cuales se depositan los aerosoles son: sedimentación gravitacional, impacto con superficies, depositación por lluvia y depositación electrostática. Estos procesos están vinculados de muchas maneras, y a pesar de considerarse por separado se combinan para crear una constante en la depositación de las partículas.

- **Sedimentación gravitacional.**

La acción de la gravedad sobre las partículas es el principal mecanismo asociado con la depositación. La depositación gravitacional está en función de la fuerza de gravedad de la Tierra, la densidad y diámetro de las partículas, y la viscosidad del aire.

- **Impactación en superficies**

En la naturaleza es raro encontrar superficies planas y lisas, por lo tanto las partículas entran en contacto con diversos objetos como pueden ser árboles, paredes, computadoras, etc. Cuando un aerosol choca contra un objeto no significa necesariamente que se produzca una sedimentación permanente. Una vez que el aerosol impacta en una superficie puede rebotar, dando como posibles resultados la deposición gravitacional de la partícula en una superficie cercana; o bien puede entrar de nuevo en una corriente de aire. Este fenómeno se ve influenciado por la velocidad y el tamaño de la partícula, así como el tamaño y la forma de la superficie a la que se aproxima.

- **Lluvia y deposición electrostática.**

La deposición por lluvia se produce como una reacción de condensación entre dos partículas (gotas de lluvia y bioaerosoles), que se combinan y crean un bioaerosol con una masa superior, provocando una deposición con mayor rapidez. La deposición electrostática se basa en la atracción de partículas. Todas las partículas tienden a tener algún tipo de carga asociada. Los microorganismos suelen tener una carga global negativa asociada con sus superficies. Estas partículas de carga negativa se pueden asociar con otras partículas en el aire con carga positiva, lo que resulta en la condensación electrostática. Este fenómeno genera un aumento en la masa y por consiguiente mejora la deposición de los bioaerosoles.



## **5.4. Equipos de Medición**

En los estudios de aerobiología es indispensable contar con muestreadores, los cuales permiten la recolección de partículas suspendidas presentes en la atmósfera, escoger apropiadamente el tipo de muestreador depende de diversos factores como: el tipo de muestra, costos, volumen de aire por muestrear y las condiciones ambientales en que se tomará el muestreo, entre otras. Algunos de los muestreadores más comúnmente utilizados para la colecta de bioaerosoles se basan en el principio de “Impactación”, el cual se basa en la tendencia de una partícula a desviarse del flujo de aire, cuando la corriente de aire choca con una superficie sólida o semisólida, las partículas salen de la corriente y se impactan en esa superficie.

### **5.4.1. Trampa de esporas tipo Hirts (Burkard)**

Este muestreador se utiliza en varios países del mundo para cuantificar polen (partícula alérgica) y esporas de hongos, las cuales son los principales patógenos de plantas. El muestreador consta básicamente de tres unidades: unidad de impacto, veleta y bomba de vacío (Figura 22).

La unidad de impacto consta de un orificio de entrada, de 14 x 2 mm, y de un soporte circular (tambor), sobre el que se encuentra un fragmento de cinta adhesiva, donde las partículas que son succionadas quedan adheridas, minimizando en lo posible los efectos de rebote. Este soporte circular se encuentra conectado a un mecanismo de giro que posibilita el movimiento del soporte a 2 mm cada hora. La veleta que protege la unidad de impacto y mantiene el orificio de entrada en la dirección de los vientos dominantes. La bomba de vacío permite la succión de un volumen de aire de 10 litros/min, similar al volumen de inhalación de aire por el pulmón humano.



**Figura 22.** Trampa de esporas tipo Hirts. (Fuente: [www.burkard.co.uk/7dayst.htm](http://www.burkard.co.uk/7dayst.htm))

#### 5.4.2. Impactador de cascada

El impactador para partículas viables Andersen es de los equipos más utilizados en estudios aerobiológicos, este equipo está constituido desde una hasta seis placas de aluminio, las cuales tienen orificios que varían en cantidad y en diámetro dependiendo del número de placas. Las placas se encuentran conectadas a una bomba de vacío que succiona un flujo de aire de 28.3 L/min (1 pie<sup>3</sup>). Debajo de cada placa se coloca una placa de agar, en cuya superficie se desarrollarán las partículas viables como hongos o bacterias y posteriormente se cuantificarán como unidades formadoras de colonias (UFC por m<sup>3</sup> de aire muestreado). Alternativamente, se pueden utilizar las cintas adhesivas entre las etapas para coleccionar esporas para su identificación visual (Figura 23).

Los muestreadores de una etapa son los más económicos al requerir solo una placa de agar, la desventaja es que la muestra no es fraccionada por tamaños de partícula. Los equipos con dos etapas permiten la separación en fracción respirable y no respirable, cuentan con 200 orificios en cada placa. Por último, los equipos con seis etapas cuentan con 400 orificios cuyo diámetro disminuye

sucesivamente hasta la placa final, donde se depositan las partículas de menor tamaño.



**Figura 23.** Muestreadores de cascada Andersen de dos y seis etapas. (Fuente: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/440/cap1.html>)

### 5.4.3. Impingers

A diferencia de los Impactadores de cascada que recolectan las muestras en placas de agar, el Impinger lo hace en un medio líquido. Estos equipos cuentan con sólo una cámara de colecta y un conducto para la succión de aire, por lo general están hechos con vidrio. El flujo de aire y la cantidad de medio líquido para la recolección suele variar dependiendo del equipo, por ejemplo el equipo AGI-30 (all-glass-impinger) tiene un flujo de aire de 12.5 L/min y utiliza 20 mL de medio. Los impingers al usar un medio líquido nos permite realizar diluciones en caso de obtener muestras con alta concentración de microorganismos.

Existe un Impinger conocido como MSLI (multistage all glass liquid impinger), este equipo permite separar el material particulado en tres fracciones ( $>10\ \mu\text{m}$ ;  $10\text{-}4\ \mu\text{m}$ ;  $<4\ \mu\text{m}$ ) y recolectar en un medio líquido (Figura 24).



**Figura. 24.** Muestreadores en fase líquida con fraccionamiento de tamaño.

#### **5.4.4. Muestreadores de centrífuga.**

Son equipos pequeños y fáciles de manejar, un ejemplo de este tipo de equipo es el Biotest RCS (Reuter Centrifugal Air Sampler), tiene un motor que succiona un flujo de aire de 40 L/min que al girar por el rotor del muestreador, crea una fuerza centrífuga y ocasiona que las partículas choquen sobre las paredes donde se colocan tiras de agar, la desventaja es que estas tiras suelen saturarse muy fácilmente (Figura 25).



**Figura 25.** Muestreador de centrífuga Biotest

## 5.5. Técnicas de Identificación de biopartículas

Existen diferentes maneras de identificar y cuantificar biopartículas. Los métodos tradicionales consideran el recuento microscópico y cultivos microbianos. Sin embargo, las limitaciones de estos métodos tradicionales han llevado al desarrollo de otros métodos, tales como bioquímicos, inmunológicos, y ensayos biológicos moleculares. Con el uso de un microscopio se pueden cuantificar algunos tipos de biopartículas, por ejemplo, los granos de polen y las esporas de hongos se enumeran fácilmente bajo el microscopio óptico por un analista experimentado. Los granos de polen se pueden identificar con base en su morfología, pero la identificación de especies de hongos es limitada con las técnicas microscópicas. Biopartículas pequeñas, como las células bacterianas son fácilmente enmascaradas por otras partículas. El estudio microscópico y el uso de tinciones como la tinción de Gram, nos revelan la forma, la manera de agruparse, la estructura y el tamaño de las células, aunado al uso de pruebas bioquímicas es posible identificar microorganismos específicos. Las partículas que contienen material biológico pueden ser detectadas por un microscopio de fluorescencia mediante tinción de sus ácidos nucleicos utilizando el colorante naranja de acridina (Kukarni et.al. 2011).

El cultivo de microorganismos sobre placas de agar o en medios líquidos permite su cuantificación. Las condiciones de incubación y el medio deben ser adecuados para los organismos de interés, es decir, ideal para todos los microorganismos viables. Sin embargo, no se pueden cultivar todos los microorganismos viables en el mismo medio, por lo que existen gran cantidad de medios selectivos debido a las grandes diferencias metabólicas entre los microorganismos. Los resultados se dan en unidades de UFC/m<sup>3</sup> para las bacterias y los hongos, y en PFU/m<sup>3</sup> para el conteo de virus.

Los inmunoensayos se basan en reacciones antígeno-anticuerpo, por lo tanto son métodos de detección altamente sensibles y específicos (ver Tabla 8). El uso de los procedimientos basados en las reacciones inmunológicas ha representado un importante avance en el análisis de sustancias de interés biológico, la

especificidad de la unión antígeno-anticuerpo y el hecho de que pueda ser visible por los fenómenos de precipitación, aglutinación y otros mecanismos indirectos (marcaje con fluoresceína, con radioisótopos o con enzimas) hacen que estos métodos se empleen ampliamente; sin embargo, su aplicación es restringida debido a la dificultad de desarrollar anticuerpos con la especificidad requerida (Williams et al. 2001).

**Tabla 8. Principales Métodos basados en la unión Antígeno-Anticuerpo (Calderón, 2007)**

Trazador	Denominación
Complejo Ag-Ac	Técnicas de inmunoprecipitación (técnica de Ouchterlony, inmunoelectroforesis, difusión radial Mancini, nefelometría, etc.)
Aglutinado	Técnicas de inmunoaglutinación (Hemaglutinación directa e indirecta y otras técnicas con látex, etc)
Fluorocromo	Técnicas inmunofluorimétricas
Radioisótopos	Técnicas inmunorradiológicas (Radioinmunoensayo-RIA-)
Enzimas	Técnicas inmunoenzimáticas (ELISA)

### 5.5.1. PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa)

La PCR (por sus siglas en inglés Polymerase Chain Reaction), es un método que revolucionó las técnicas en biología molecular, fue inventada en 1985 por el bioquímico estadounidense Kary Banks Mullis. El método consiste en una multiplicación *in vitro* de fragmentos definidos de material genético.

La idea básica de la técnica es multiplicar un fragmento de ADN utilizando una polimerasa proveniente de la bacteria *Thermus aquaticus* (*taq* polimerasa) que puede trabajar a temperaturas elevadas (79 a 85 °C). Cuando hacemos una reacción de PCR simulamos lo que sucede en una célula cuando se sintetiza el ADN, *in vitro* se mezclan todos los ingredientes necesarios para hacerlo: la polimerasa, el ADN del organismo que queremos estudiar, los oligonucleótidos (llamados también primers, iniciadores, cebadores, etc.) necesarios para que se

inicie la transcripción, dinucleótidos (dNTP's), y las condiciones para que la enzima trabaje adecuadamente (cierto pH, determinadas cantidades de sales como  $MgCl_2$  y KCl) (Eguiarte, 2007).

El método se basa en la realización de tres reacciones sucesivas llevadas a cabo a distintas temperaturas. Estas reacciones se repiten cíclicamente entre veinte y cuarenta veces.

En el primer paso, la muestra se calienta, hasta lograr la separación de las dos cadenas que constituyen el ADN, hecho que se conoce como desnaturalización. En el segundo paso, la temperatura se reduce para permitir el apareamiento de cada una de dos cadenas cortas de nucleótidos denominadas oligonucleótidos con cada una de las hebras separadas del ADN molde. Los iniciadores (oligonucleótidos), son segmentos de ADN de cadena simple, sintetizados en el laboratorio y diseñados de manera tal que permiten definir los límites de la secuencia de ADN que se desea amplificar. Para que se pueda producir el apareamiento, cada uno de los oligonucleótidos deben ser complementarios de la secuencia al que tienen que unirse en las cadenas separadas del ADN molde. En la tercera reacción (extensión), la enzima ADN polimerasa sintetiza las secuencias complementarias de las hebras del ADN molde, para ello, la ADN polimerasa usa los dNTPs agregados a la mezcla de reacción.

La temperatura a la que se realiza el tercer paso está condicionada por aquella a la cual trabaja la enzima ADN polimerasa. Al cabo del primer ciclo de tres reacciones (desnaturalización, apareamiento, extensión) el tramo de ADN elegido se ha duplicado y el doble de su cantidad original se encuentra disponible para ser nuevamente replicado en un segundo ciclo. El resultado de la aplicación de numerosos ciclos en cadena da lugar a la amplificación geométrica del segmento de ADN delimitado por los iniciadores (Satz y Kornblihtt, 1993; Alberts et al. 2008).

Una vez replicado el ADN mediante la PCR, con ayuda de la electroforesis, ya sea en geles de agarosa o de acrilamida, podemos separar estos fragmentos de acuerdo con el tamaño de cada uno. Tanto la agarosa como la acrilamida forman

una especie de red con agujeros de tamaños diferentes, por la cual obligamos a pasar los fragmentos de ADN, que son atraídos a través de corriente eléctrica, hacia el polo positivo, ya que la carga de una molécula de ADN es negativa por la presencia de grupos fosfato (P<sup>-</sup>). Los fragmentos más pequeños pasarán primero a través de la red de agujeros, mientras que los más grandes se irán rezagando; de esta manera los fragmentos de tamaños similares migrarán a ritmos similares. Si hay muchos fragmentos de un mismo tamaño se agruparán todos juntos, formando una banda en el gel. Al preparar el gel se agrega la sustancia bromuro de etidio que se intercala entre las bases del ADN y permite visualizarlo al ser iluminado con luz UV. Las bandas luminosas corresponden a los fragmentos de ADN amplificados, ver Figura 26 (Cortázar, 2004).

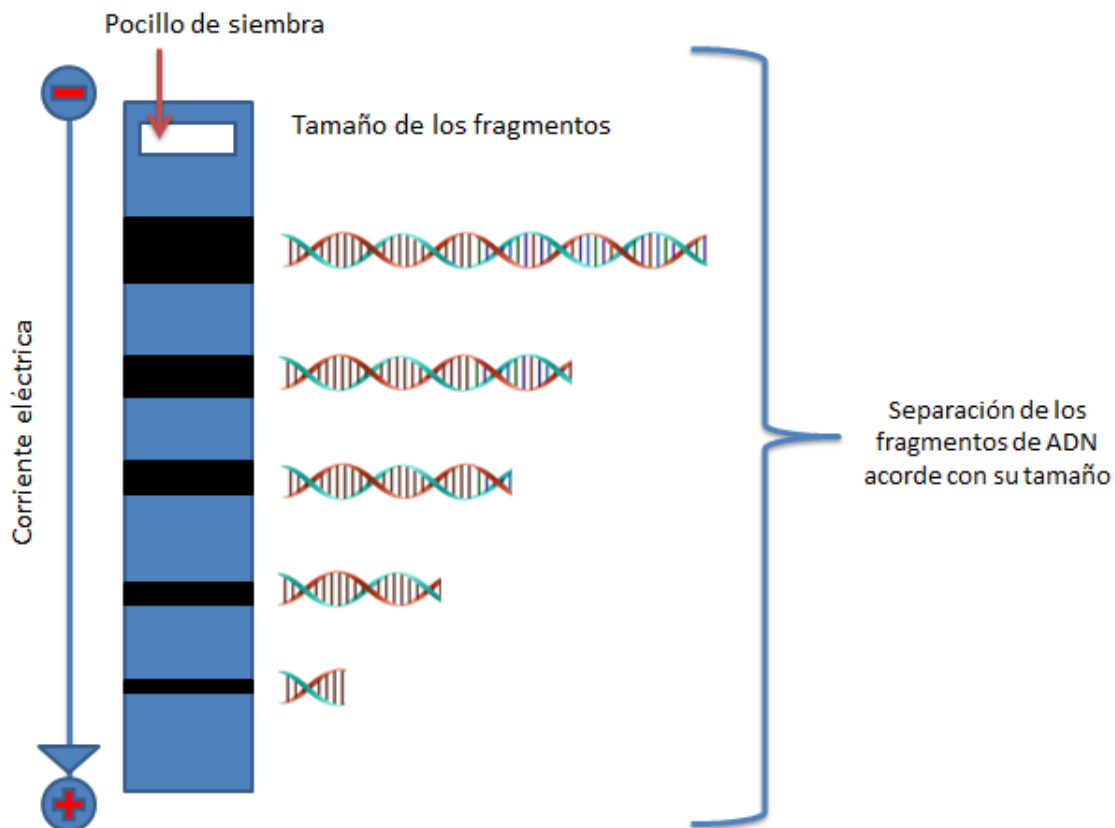


Figura 26. Esquema de una electroforesis de ADN.



## CAPÍTULO VI

### 6. AMBIENTES INTRAMUROS Y EXTRAMUROS

Las biopartículas se encuentran en cualquier ambiente, la presencia de algunas biopartículas patógenas principalmente en lugares como: hospitales, cultivos agrícolas, instalaciones farmacéuticas, etc., pueden poner en riesgo las actividades que se realizan, la calidad de los productos y la salud de los trabajadores o habitantes cercanos a ese entorno.

#### 6.1. Ambientes Intramuros

Los ambientes intramuros son ambientes cerrados como oficinas, hospitales, laboratorios, escuelas, etc. La calidad del aire en espacios cerrados, es uno de los factores más importantes en la calidad de vida de los individuos puesto que pasamos de 80 a 90 % de nuestro tiempo en espacios cerrados (Caballero, 2007). En México se han detectado concentraciones elevadas de partículas en ambientes intramuros (Brauer et al, 1996, Saatkamp et al., 2000, Riojas et al., 2000), en este tipo de ambientes existen diversos factores que propician la supervivencia de microorganismos como: sistemas de aire acondicionado, la salud e higiene de los ocupantes, la cantidad de aire exterior que circula a través de la construcción, la temperatura y la humedad del edificio.

La ventilación y el tipo de actividades humanas realizadas en ambientes intramuros son factores importantes que afectan la concentración de biopartículas transportados por el aire (Balasubramanian, 2011). Las biopartículas han sido estudiadas en gran diversidad de regiones y ambientes intramuros (Aydogdu et al. 2005; Zorman y Jersek 2008), por ejemplo: guarderías (Zuraimi y Tham 2008), refugios de animales (Rosas et al. 2001); panaderías y molinos de harina (Awad 2007) centros de salud (Dharan, 2002), medios de transporte (Múgica, 2012), plantas farmacéuticas (Park et al. 2013) etc.

En el caso de los hospitales se ha sugerido que la cuantificación e identificación de biopartículas en el aire podría ser utilizado como un indicador de contaminación microbiológica (Dharan, 2002).

Los establecimientos de atención de salud son un entorno donde se congregan las personas infectadas y las expuestas a un mayor riesgo de infección. Los pacientes hospitalizados que tienen infección o son portadores de microorganismos patógenos son focos potenciales de infección para los demás pacientes y para el personal de salud, dando origen a las infecciones nosocomiales, es decir, aquellas contraídas por un paciente internado por una razón distinta de esa infección (Yassin, 2010; OMS, 2005).

Salinas en 1998, determinó la presencia de bacterias en la atmósfera de la ZMVM, el estudio consistió en un muestreo en tres zonas distintas (zona norte, zona centro y zona sur), durante un año. Debido a las condiciones geográficas de las diferentes zonas, las concentraciones más altas de aerobacterias se obtuvieron en la época de secas, en las zonas centro y norte. Una segunda etapa de este estudio se enfocó en determinar las concentraciones de aerobacterias en el interior y exterior de 30 casas, los resultados mostraron niveles más altos en el interior que en el exterior de las viviendas.

Hernández y colaboradores, 2014, utilizaron un muestreador Andersen de dos etapas para cuantificar e identificar las biopartículas presentes en el transporte subterráneo "Metro" de la Ciudad de México, el 45 % de las bacterias y el 76 % de los hongos fueron aislados en la segunda etapa del muestreador Andersen, es decir, en la fracción respirable, lo que significa que estos microorganismos son inhalados por los trabajadores y pasajeros. Los resultados muestran concentraciones de bacterias y hongos entre 4 y 6 veces mayores en el metro que en el aire libre.

Aunque el tipo y concentración de biopartículas es variable dependiendo de diversos factores, con respecto a los hongos varios estudios han confirmado que esporas de las especies *Aspergillus* y *Penicillium* son las más abundantes en

ambientes intramuros (Escuredo et al. 2007; Cho et al. 2008; Sen y Asan 2009; Khattab, 2008).

## **6.2. Ambientes Extramuros**

Los ambientes extramuros son aquellos ambientes que se localizan al aire libre; la extensión del espacio y la presencia de turbulencia del aire son los dos factores que controlan el movimiento de biopartículas. Los principales estudios aerobiológicos realizados en ambientes extramuros se enfocan en la propagación de agentes patógenos en cultivos agrícolas, calendarios polínicos y por otra parte en entornos asociados con el control y manejo de residuos como: las plantas de tratamiento de aguas residuales y de desechos sólidos. (Maier *et al*, 2009).

La contaminación de cultivos agrícolas a través de bioaerosoles tiene un gran impacto económico en todo el mundo, la Aerobiología ayuda a la agricultura al ser capaz de detectar y difundir una gran cantidad de información útil para optimizar la producción de muchos cultivos (Freguelli, 1998). Los principales patógenos en cultivos agrícolas son los hongos, los cuales a través de esporas causan devastadoras pérdidas de cosechas. Cualquier planta infectada produce miles de esporas, que son transportadas en el aire por cualquier fenómeno atmosférico o proceso mecánico durante la cosecha. Una vez en el aire, estas esporas se dispersan e infectan otras plantas.

Un factor que complica el control de estas enfermedades es que el tratamiento químico para el control de fitopatógenos se considera indeseable, esto se debe a muchos plaguicidas tienen vidas medias largas y su residencia en un ecosistema puede ser extremadamente dañina. Por lo tanto, en lugar de utilizar fungicidas, se buscan variedades de plantas que sean más resistentes a los hongos. Otro método utilizado para el control de fitopatógenos es el monitoreo atmosférico de esporas de hongos, como una estrategia de control de la enfermedad. En este enfoque, el ciclo de vida de los hongos, en especial la liberación de esporas se hace coincidir con la aplicación del plaguicida para minimizar su uso.

Guerrero (2009 y 2012), monitoreó un cultivo de frijol en riesgo de infección por el hongo fitopatógeno *S. Sclerotium* mediante una trampa de esporas Hirts y con ayuda de la PCR, se determinó la presencia de esporas de este hongo en el aire cuatro semanas antes de observar síntomas de enfermedad en el cultivo. En el año 2012 monitoreó otro hongo fitopatógeno el *P. pachyrhizi* en cultivos de soya en riesgo de infección, los datos obtenidos en este tipo de estudios ayudan a prevenir y controlar el uso de fungicidas fortaleciendo la agricultura.

El polen, una biopartícula que circula por el aire y que causa problemas de salud a la población como alergias y asma, ha sido ampliamente estudiado principalmente en países como Estados Unidos y España. En México el estudio de los principales tipos polínicos y su concentración en el aire a través del año es realizado por la Red Mexicana de Aerobiología (REMA), institución integrada por investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera, que a partir del 2008 se encargan de monitorear la microbiota en el aire de la Ciudad de México.

La REMA tiene como objetivos el generar un Calendario Polínico, es decir, una representación gráfica que resume la dinámica anual de los principales tipos polínicos de una localidad, ordenados en función de su periodo de polinización; y un atlas de pólenes que contenga datos sobre los pólenes existentes en nuestro país, ver Anexo II. El estudio de los pólenes en el aire permitirá que éstos sean utilizados como bioindicadores de la contaminación ambiental de áreas urbanizadas, como es el caso de las Zonas Metropolitanas, ya que dichos pólenes presentan partículas adheridas a su superficie con las que es posible caracterizar los tipos de contaminantes que predominan en cada zona (REMA, 2010).

Desde hace tiempo los patógenos que se propagan por el aire se vinculan principalmente a patógenos que atacan el sistema respiratorio, sin embargo, hay una creciente evidencia de que los agentes patógenos gastrointestinales también se transmiten por vía aérea (Hinton et al., 1983; Whates et al. 1988). Baskerville y col. (1992) pusieron de manifiesto que la *Salmonella enteritidis* en aerosol puede infectar a las gallinas.

Distintos estudios han mostrado una asociación entre la actividad laboral en plantas de tratamiento de residuos sólidos y de aguas residuales con la aparición de distintos síntomas en los trabajadores, como irritación de piel, ojos y mucosas, trastornos gastrointestinales y respiratorios, con la exposición a bioaerosoles (Clark et al. 1984; Dutkiewicz et al. 1997; Gladding et al. 2003).

Solans *et al.* (2007) realizó un estudio en una planta de residuos sólidos en Barcelona, los resultados muestran concentraciones de hongos 16 veces superior a la obtenida en el exterior, 1.8 veces superior para bacterias totales y 62 veces superior en el caso de bacterias gramnegativas.

En un monitoreo realizado en “las islas” Ciudad Universitaria (UNAM) se analizó el tipo de biopartículas que se dispersan en el momento del riego con agua tratada, y se encontraron a las bacterias patógenas: *Staphylococcus saprophyticus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Vibrio damsela*, *Vibrio fluvialis* y *Aeromonas hydrophila* (Corona, 2009).

## CAPÍTULO VII

### 7. CONCLUSIONES

- La densidad poblacional y la turbulencia vehicular de la ZMVM propician el movimiento y transporte de biopartículas, las biopartículas presentes en la atmósfera se pueden cuantificar e identificar mediante ensayos fisicoquímicos, inmunológicos, moleculares. No es posible evaluar todos los componentes de los bioaerosoles utilizando un único método de muestreo y análisis.
- Las características topográficas, orográficas, las variables meteorológicas y el tipo de actividades realizadas en un área, tienen influencia cualitativa y cuantitativa sobre la permanencia de las biopartículas presentes en la atmósfera. Como es el caso al norte de la ZMVM, donde existe mayor cantidad de biopartículas en la atmósfera, dado que se ubica en una zona fundamentalmente industrial y donde prevalece un clima más seco, por otra parte también será mayor la concentración de partículas en los meses de marzo a mayo, ya que durante estos meses predominan altas temperaturas y pocas precipitaciones.
- El uso de bioindicadores de contaminación está más relacionado con la permanencia de los organismos en suelo o en cuerpos de agua y determinar su potencial como indicador al cuantificarlos en atmósfera es una labor complicada. En sentido estricto podemos considerar bioindicadores a aquellas biopartículas con carácter patógeno para humanos, plantas y/o animales, es decir, su simple presencia es indicativa de contaminación microbiológica y representan un riesgo en salud de la población o en pérdidas económicas en agricultura y ganadería. Los métodos tradicionales de salud pública como la inmunización y el tratamiento médico siguen siendo las mejores defensas frente a los bioaerosoles infecciosos, pero es necesario

buscar alternativas para disminuir la cantidad de biopartículas que respiramos en la ZMVM.

- El polen es un bioindicador de contaminación, ya que en su superficie se adhieren otras partículas, haciendo posible determinar los contaminantes que predominan en zonas urbanizadas.
- En México aún se carece de la información adecuada sobre las emisiones y contaminantes atmosféricos, así como de los riesgos asociados a la salud pública y el medio ambiente. La investigación en aerobiología y dinámica atmosférica puede plantear soluciones para disminuir la cantidad de biopartículas que respiramos, generaría datos relevantes para poder predecir cómo, cuándo y dónde serán transportados los microorganismos y prevenir posibles epidemias.
- Se deben establecer redes de monitoreo locales y regionales que se integren a un sistema nacional, que permitan monitorear la concentración de todos los contaminantes en el aire, el desarrollo de inventarios nacionales de emisiones y transferencia de contaminantes sería una gran herramienta para orientar la política ambiental a nivel nacional.

## REFERENCIAS

1. Awad, A. H. A. (2007). "Airborne dust, bacteria, actinomycetes and fungi at a flourmill". *Aerobiología*, 23, 59–69.
2. Aydogdu, H., Asan, A., Otkun, M. T. and Ture, M. (2005) "Monitoring of fungi and bacteria in the indoor air of primary schools in Edirne city, Turkey". *Indoor and Built Environment*, [14], 411–425.
3. Balasubramanian, P. and Rajasekar, A. (2012) "Airborne bacteria, fungi, and endotoxin levels in residential microenvironments: a case study" en *Aerobiología*, [28], 375–390.
4. Baéz P. A., García R.M., and Belmont, R.D., (2001). Trace heavy metals content in rain water collected in México City. Proceedings of the Second International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales. Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey. 494-500.
5. Baskerville, A., Humphrey, T.J., Fitzgeorge, R.B., Cook, R. W., Chart, H., Rowe, B., and Whitehead, A. (1992) "Airborne infection of laying hens with *Salmonella enteritidis* phage type 4". *Vet. Rec.* 190, 395-398.
6. Brauer, M., Bartlett K., Regalado Pineda J. and Pérez Padilla R. (1996) "Assessment of Particulate Concentrations from Domestic Biomass Combustion in Rural Mexico". *Environmental Science and Technology*, [40], 104-109.
7. Caballero M. y Cartin V. (2007) "Calidad del aire en dos centros hospitalarios y ocho clínicas veterinarias en Costa Rica". *Revista Costarricense de Salud Pública*. [30], 17-26.
8. Calderón Pascacio V. (2007) *Curso de Inmunología*, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México. 54 pp.
9. *Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2009*. (2010) México, Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, 177 pp.
10. *Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2011*. (2012) México, Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, 160 pp.



11. *Calidad del aire, breve historia comparada y futuro. Ciudad de México 1970-2020.* (2000) México, Centro de Estudios del Sector Privado para el desarrollo sustentable (CESPEDES) 73 pp.
12. Capó Martí, M. (2002) *Principios de Ecotoxicología, Diagnóstico Tratamiento y gestión del medio ambiente.* México, McGraw-Hill, 314 pp.
13. CEMDA (2013), Recomendaciones de política pública para mejorar la calidad del aire en México, Una visión compartida. Centro Mexicano de Derecho Ambiental.
14. Clark CS, Bjornson H., Schwaertz J., Holland J.W. and Gartside P.S. (1984). "Biological health risk associated with the composting of wastewater treatment plant sludge." *J. Water Pollut Control Fed*, [56], 1269-1276.
15. Corona García, M. G. (2009) *Análisis microbiológico del efluente de las plantas brain y determinación de bioaerosoles en la zona de riego de las islas de C.U.* Tesis de Licenciatura (Químico Fármaco Biólogo) , Facultad de Química, UNAM.
16. Cortázar Martínez A. y Silva Rincón E. (2004) *Métodos fisicoquímicos en Biotecnología*, México, PCR. Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 40 pp.
17. *Delimitación de las zonas metropolitanas de México, México, Secretaría de Desarrollo Social*, (2004) México, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 61 pp.
18. Dharan S, Pittet D. "Environmental controls in operating theatres". (2002) *J Hosp Infect*, [51], 79-84.
19. Dutkiewicz J, (1997) "Bacteria and fungi in organic dust as potential health hazard". *Ann Agric Environ Med.* [4], 11-16.
20. Eguiarte L. E., Souza V., y Aguirre X. (2007). *Ecología Molecular.* México, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, 573 pp.
21. EPA (*Environmental Protection Agency*), March (2006) b. Basic Concepts in Environmental Science, Aerodynamic diameter.

22. Fathi Zereini and Wiseman C. (2011) *Urban Airborne Particulate Matter Origin Chemistry, Fate and Health Impacts*. Berlin, Springer, 577 pp.
23. Figueruelo A. E. (2001). *Química Física del medio ambiente*. México, Editorial Reverté, 606 pp.
24. Frenguelli, G. (1998) "The contribution of aerobiology to agriculture" *Aerobiología*, [2-3], 95.
25. García Lozada, H. M. (2006) "Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión. Estudio de caso: Bogotá", Colombia, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, 73 pp.
26. García, Martínez R. (2007) "Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y de una zona rural (Rancho Viejo, Edo de México)". México, Tesis de Doctorado, UNAM.
27. Gasca, J. (2007). "Caracterización por SEM-EDS de aeropartículas antrópicas de la fracción respirable en la ciudad de Querétaro y su relación con fuentes contaminantes". Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
28. *Gestión Ambiental del Aire en el Distrito Federal. Avances y Propuestas 2000-2006* (2006). México, Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, 262 pp.
29. Gladding T., Thorn J. and Stott D. (2003) *Organic dust exposure and work-related effects among recycling workers*. Am J Ind Med; [43], 584-591.
30. Gregory, P. (1973) "The microbiology of the atmosphere", Segunda Edición, Gran Bretaña, Leonard Hill Books Aylesbury, 251 pp.
31. Guerrero Parra H. A. (2009). "Detección molecular de ascosporas de *Sclerotinia sclerotium* dispersas en la atmósfera de cultivos agrícolas". México, Tesis de Licenciatura (Bióloga). Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
32. Guerrero Parra H. A. (2012) "Estudio Aerobiológico y detección molecular de uredosporas de *Phakopsora pachyrhizi* causante de la roya asiática en

- cultivos de soya en México”. México, Tesis de Maestría. Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México.
33. Gutiérrez Martínez A. (2006). “Caracterización por microscopía electrónica de material particulado en biomonitores de la calidad del aire”. México, Tesis de Licenciatura (Ingeniería Química Metalúrgica), Facultad de Química, UNAM.
34. Hernández Martínez A. (2009). “Dinámica de metales pesados y corrosión atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.” México, Tesis de Licenciatura (Químico), Facultad de Química, UNAM.
35. Hernández Mayén S. (2007). “Variación estacional de las concentraciones de Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPA) en la atmosfera en la ZMCM” México, Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, UAM.
36. Hinton, M., Ali, E. A., Allen, V., and Linton, A. H. (1983) “*The excretion of Salmonella typhimurium in the feces of cows fed milk substitute*”. J. Hyg. 91, 33-45.
37. *Informe Climatológico Ambiental del Valle de México 2005*. México, Gobierno de la Ciudad de México, Red Automática de Monitoreo Atmosférico; Secretaría del Medio Ambiente. 2005, 194 pp.
38. Jaureguí, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México. Temas selectos de geografía de México*. México, Plaza y Valdez Editores. 139 p.
39. Khattab, Abeer A. (2008). *Aerobiology of Penicillium/Aspergillus spores*, Tulsa, The University of Tulsa, ProQuest, UMI Dissertations Publishing.
40. Kukarni Pramod, Baron Paul A., and Klaus Willeke. (2011). *Aerosol Measurement Principles, techniques and applications*, Tercera edición, Estados Unidos, WILEY, 865 pp.
41. Lacey M. E. y West J. S. (2006) *The Air Spora A manual for catching and identifying airborne biological particles*. Estados Unidos, Springer, 156p.
42. Lee, T. (2006). *Bioaerosols in homes without visible mold growth: Relationship between indoor and outdoor levels determined by different methods*. University of Cincinnati. ProQuest Dissertations and Theses, 164 pp.

- 
43. Lezama, J. L., (2000). *Aire dividido, Crítica a la política del aire en el Valle de México*, México, El Colegio de México.
44. Lutgens, F. (2007). *The Atmosphere. An Introduction to Meteorology*. Prentice Hall.
45. Maier Raina M, Pepper Ian L., and Gerba C.P. (2009) *Environmental Microbiology*, Massachusetts, Academic Press Elsevier. 598 pp.
46. Matthais-Maser, S., Obolkin V., Khodzer and T., Jaenicke R. (2000). "Seasonal variation of primary biological aerosol particles in the remote continental region of Lake Baikal/Siberia". *Atmospheric Environment*, [34], 3805–3811.
47. Múgica A.V., Figueroa, J., Romero M., Sepúlveda J., López T. (2012). "Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system" *Atmospheric Environment*, [49], 284–293.
48. NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM10 y partículas menores de 2.5 micrómetros PM2.5 de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire.
49. Park H.K., Han J.-H., Y. Joung, S.-H. Cho, S.-A. Kim and S.B. Kim (2013). Bacterial diversity in the indoor air of pharmaceutical environment. *Journal of Applied Microbiology*. [116], 718—727.
50. Pérez, R. (2006). *Dinámica Atmosférica y los Procesos Tormentosos Severos*, Argentina, Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 137 pp.
51. Pope C.A., Burnett R.T., Thun M.J., Calle E.E., Krewski D., Ito K., and Thurston G.D. (2002). "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution". *Journal of the American Medical Association*. 286 [9], 1132-1141.
52. *Prevención de las infecciones nosocomiales*. (2005). *Guía Práctica*. México, Organización Mundial de la Salud.

- 
53. ProAire (2011). Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020. México.
54. Quadri de la Torre G. y Sánchez Cataño L. R. (1992). *La Ciudad de México y la contaminación atmosférica*, México, Limusa y Grupo Noriega Editores, 316 pp.
55. Querol, X. y Alastuey, A., (2004). “*Contaminación atmosférica por material particulado en suspensión.*” España. Ministerio de medio ambiente, 2004, 305 pp.
56. Quiroz M.H. y Rodríguez C.V. (2006) “Bioindicadores de contaminación en sistemas acuáticos (insectos acuáticos).” Universidad Autónoma de Nuevo León. México, 96 pp.
57. Riojas Rodriguez H., Romano P., Santos C., Smith R. (2001) “*Household firewood use and the health of children and women of Indian communities in Chiapas.*” México. Int. J. Occup. Environ. Health 7[1], 44-53.
58. Riquelme, Acevedo S. (2008). Evaluación del uso de líquenes como indicadores biológicos de contaminación atmosférica en la Quebrada de la Plata, Región Metropolitana. Chile. Tesis de Licenciatura (Ingeniería Forestal), Universidad de Chile.
59. Rosas I., Cravioto A. y Ezcurra E. (2004). *Microbiología Ambiental*. México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 134 pp.
60. Saatkamp, B., Masera, O. and Kammen D. (2000). “Energy and Health transitions in development: fuel use, stove technology, and mobility in Jarácuaro” en *Energy for Sustainable Development*, México. [2], 7-16.
61. Salinas Corte, M. E. (1998). *Caracterización de Aerobacterias entéricas en ambientes intra y extramuros de la Ciudad de México*. México. Tesis de Maestría en Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM.
62. Sierra Vargas M. P. (2009) *Efecto in vitro de las PM<sub>2.5</sub> contaminantes del aire de la Zona Metropolitana Valle de México, sobre la generación de especies reactivas del oxígeno por leucocitos polimorfonucleares humanos.*

- 
- México, Tesis de Doctorado en Investigación en Medicina. Instituto Politécnico Nacional.
63. Solans, X., Alonso, R. M., Constans, A., y Mansilla, A. (2007). “Exposición laboral a hongos y bacterias ambientales en una planta de selección de residuos de envases” en *Revista Iberoamericana de Micología*, México, [24], 131–135.
64. Whates, C., Zaidan, W. AR., Pearson, G.R., Hinton, M., and Todd N. (1988). “Aerosol infection of calves and mice with *Salmonella typhimurium*”, *Vet, Rec.* 123, 590-594.
65. Yassin, M.F., y Almouqatea, S. (2010) “Assessment of airborne bacteria and fungi in an indoor and outdoor environment” *Int. J. Environ. Sci. Technol.* [7], 535–543.
66. *Zonas Metropolitanas de los Estados Unidos Mexicanos, Censos Económicos 2009*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía 2009-2012, 43 pp.
67. Zorman, T., and Jersek, B. (2008). “Assessment of bioaerosol concentrations in different indoor environments”. *Indoor Built Environment*, [17], 155–163.
68. Zuraimi, M. S., and Tham, K. W. (2008). “Indoor air quality and its determinants in tropical child care centers” en *Atmospheric Environment*, [42], 2225–2239.

## ANEXO I

VALORES LÍMITE EN LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE CALIDAD DEL  
AIRE

Contaminante	Exposición aguda		Exposición crónica
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Concentración y tiempo promedio
Ozono (O <sub>3</sub> ) NOM-020-SSA1-1993	0.11 ppm (1 hora)	Ninguna al año	---
	0.080 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	4 veces al año	---
Monóxido de Carbono (CO) NOM-021-SSA1-1993	11 ppm (máximo diario de promedios móviles de 8 horas)	1 vez al año	---
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) NOM-022-SSA1-1993	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (promedio anual)
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) NOM-023-SSA1-1993	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	---
Partículas Suspensas Totales (PST) NOM-025-SSA1-1993	210 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	2 % de mediciones al año	---
Partículas Menores a 10 micrómetros (PM <sub>10</sub> ) NOM-025-SSA1-1993	120 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	2 % de mediciones al año	50 µg/m <sup>3</sup> (promedio anual)
Partículas Menores a 2.5 micrómetros (PM <sub>2.5</sub> ) NOM-025-SSA1-1993	65 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	2 % de mediciones al año	15 µg/m <sup>3</sup> (promedio anual)
Plomo (Pb) NOM-026-SSA1-1993	1.5 µg/m <sup>3</sup> (promedio de 3 meses)	Ninguna al año	---

## ANEXO II

### MUNICIPIOS QUE CONFORMAN LA ZMVM Y ESTACIONES DE MUESTREO DE LA RED MEXICANA DE AEROBIOLOGÍA (REMA)

La ZMVM está formada por las 16 delegaciones del Distrito Federal, un municipio del estado de Hidalgo y 59 del estado de México, se enlistan en la siguiente tabla y se muestran sombreados aquellos municipios que cuentan con una estación de muestreo de la REMA.

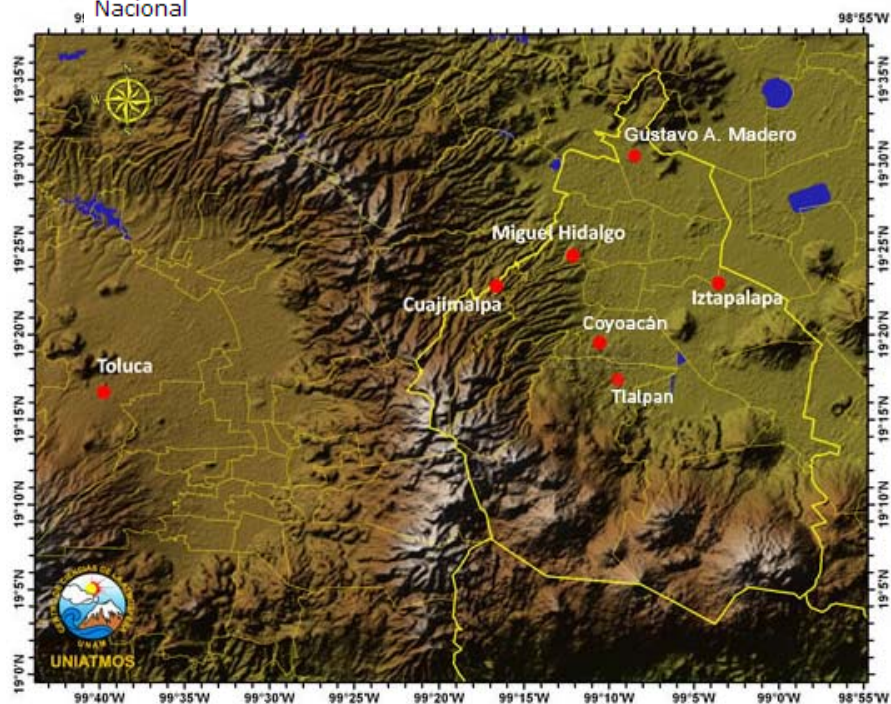
Azcapotzalco, DF	Cocotitlán, Méx.	Ozumba, Méx.
Coyoacán, DF	Coyotepec, Méx.	Papalotla, Méx.
Cuajimalpa de Morelos, DF	Cuautitlán, Méx.	La Paz, Méx.
Gustavo A. Madero, DF	Chalco, Méx.	San Martín de las Pirámides, Méx.
Iztacalco, DF	Chlautla, Méx.	Tecámac, Méx.
Iztapalapa, DF	Chicoloapan, Méx.	Temamatla, Méx.
Magdalena Contreras, DF	Chiconcuac, Méx.	Temascalapa, Méx.
Milpa Alta, DF	Chimalhuacán, Méx.	Tenango del Aire, Méx.
Álvaro Obregón, DF	Ecatepec de Morelos, Méx.	Teoloyucán, Méx.
Tláhuac, DF	Ecatzingo, Méx.	Teotihuacán, Méx.
Xochimilco, DF	Huehuetoca, Méx.	Tepetlaoxtoc, Méx.
Benito Juárez, DF	Hueypoxtla, Méx.	Tepetlixpa, Méx.
Cuauhtémoc, DF	Huixquilucan, Méx.	Tepotzotlán, Méx.
Miguel Hidalgo, DF	Isidro Fabela, Méx.	Tequixquiac, Méx.
Venustiano Carranza, DF	Ixtapaluca, Méx.	Texcoco, Méx.
Tizayuca, Hgo.	Jaltenco, Méx.	Tezoyuca, Méx.
Acolman, Méx.	Jilotzingo, Méx.	Tlalmanalco, Méx.
Amecameca, Méx.	Juchitepec, Méx.	Tlanepantla de Baz, Méx.
Apaxco, Méx.	Melchor Ocampo, Méx.	Tultepec, Méx.
Atenco, Méx.	Naucalpan de Juárez, Méx.	Tultitlán, Méx.
Atizapán de Zaragoza, Méx.	Nezahualcóyotl, Méx.	Villa del Carbón, Méx.
Atlautla, Méx.	Nextlapan, Méx.	Zumpango, Méx.
Axapusco, Méx.	Nicolás Romero, Méx.	Cuatitlán Izcalli, Méx.
Ayapango, Méx.	Nopaltepec, Méx.	Valle de Chalco Solidaridad, Méx.
Coacalco de Berrlozábal, Méx.	Otumba, Méx.	Tonanitla, Méx.

Fuente: Zonas Metropolitanas de los Estados Unidos Mexicanos, Censos Económicos 2009, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2009-2012.



La REMA sólo tiene siete estaciones de monitoreo atmosférico en la República Mexicana, seis de ellas en el Distrito Federal y una en Toluca, se muestran en la siguiente tabla y mapa, respectivamente:

Estación	Long	Lat
<b>Cuajimalpa</b> Colegio Franco-Inglés	99°16'38.78" W	19°22'52.00" N
<b>Coyoacán</b> Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM)	99°10'33.00" W	19°19'32.00" N
<b>Iztapalapa</b>	99°03'34.00" W	19°23'01.00" N
<b>Miguel Hidalgo</b> Museo de Historia Natural, Chapultepec	99°12'07.15" W	19°24'38.55" N
<b>Tlalpan</b> Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER)	99° 9'33.37" W	19°17'29.40" N
<b>Toluca</b> Clínica Médica Bosques	99°39'45.69" W	19°16'36.58" N
<b>Gustavo A. Madero</b> Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía, Instituto Politécnico Nacional	99°08'18.20" W	19°30'41.25" N



Fuente:

[http://www.atmosfera.unam.mx/rema/estaciones\\_muestreo.html](http://www.atmosfera.unam.mx/rema/estaciones_muestreo.html) consultada el 28/04/2014.

A continuación se muestra un ejemplo de la información que proporciona la REMA en la estación de monitoreo de Tlalpan, para el periodo comprendido del 23 al 29 de Abril de 2014, con un pronóstico de una calidad biológica del aire “regular” respecto a la concentración de granos de polen suspendidos en la atmósfera; los tipos polínicos mantendrán concentraciones bajas, excepto Pinus y Quercus que podrían alcanzar concentraciones moderadas en días soleados o sin lluvia.

REMA Estación Tlalpan	Alergenicidad	Actualización en Base de datos							Pronóstico Del 23 al 29 de abril de 2014
		14-abr-14	15-abr-14	16-abr-14	17-abr-14	18-abr-14	19-abr-14	20-abr-14	
<i>Alnus</i> (Aile, Aliso)	A	●	○	●	●	○	○	●	●
Cupressaceae (Cedro, Junípero, Tuya)	A	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Fraxinus</i> (Fresno)	A	○	●	○	●	○	●	○	●
Myrtaceae ( Eucalipto)	B	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Pinus</i> (Pino)	M	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Quercus</i> (Roble, Encino)	A	●	●	●	●	●	○	○	●
Rosacea ( Durazno, Ciruela)	M	●	●	○	●	●	●	●	●
<i>Salix</i> (Sauce)	A	○	○	●	●	●	●	○	●
<i>Schinus</i> (Pirul)	B	○	●	●	●	○	○	●	●
Chenopodiaceae-Amaranthaceae (Quintonil, Cenizo)	A	●	○	●	●	○	○	○	●
Poaceae (Pastos)	A	●	●	●	○	●	○	●	●
Niveles de concentración para granos de polen / m <sup>3</sup> de aire (gp/m <sup>3</sup> )									
		Nulo ○	Bajo ●	Moderado ●	Alto ●	Muy Alto ●			
Niveles de alergenicidad									
Baja	(B)								
Moderada	(M)								
Alta	(A)								

Fuente: [http://www.atmosfera.unam.mx/rema/estaciones\\_muestreo.html#](http://www.atmosfera.unam.mx/rema/estaciones_muestreo.html#) consultada el 28/04/2014.

## ANEXO III

## INTERPRETACIÓN DEL IMECA

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) es una escala numérica de 0 a 500 puntos o una escala de colores asociadas a la prevención de riesgos, para transmitir el estado que guarda la calidad del aire a los habitantes de la Ciudad de México.

Las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental establecen límites permisibles para proteger la salud de la población ante los contaminantes atmosféricos. Este límite permisible equivale en el IMECA a 100 puntos, por lo que si el valor del IMECA es menor a 100 significa que hay menos riesgo de enfermarse y si es mayor 100 el riesgo se incrementa.

En la Ciudad de México el IMECA se complementa con colores para facilitar su comprensión por parte de la población, “**verde**” para el intervalo de 0 a 50 puntos, “**amarillo**” para el intervalo de 51 a 100 puntos, “**naranja**” para el intervalo de 101 a 150 puntos, “**rojo**” para el intervalo de 151 a 200 y “**púrpura**” si es mayor a 200.

Valores	Clasificación	Recomendaciones
0 - 50	Buena	Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.
51 - 100	Regular	Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades.
101 - 150	Mala	Causante de efectos adversos a la salud en la población, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.
151 - 200	Muy mala	Causante de mayores efectos adversos a la salud en la población en general, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.
>200	Extremadamente mala	Causante de efectos adversos a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones graves en los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.

En noviembre del año 2006 se publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006, que establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de los contaminantes criterio, ozono (O<sub>3</sub>), partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO). Esta Norma Ambiental incluye los algoritmos para el cálculo del IMECA:

INTERVALOS (IMECA)	CONCENTRACIONES	ECUACIONES
<b>Partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>)</b>		
<b>PM<sub>10</sub></b>		
	IMECA	µg/m <sup>3</sup>
	0-50	0-60
	51-100	61-120
	101-150	121-220
	151-200	221-320
	>200	>320
		Ecuaciones
		$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/6$
		$I[PM_{10}] = 40 + C[PM_{10}] * 0.5$
		$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/8$
<b>Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>)</b>		
<b>PM<sub>2.5</sub></b>		
	IMECA	µg/m <sup>3</sup>
	0-50	0-15.4
	51-100	15.5-40.4
	101-150	40.5-65.4
	151-200	65.5-150.4
	>200	>150.4
		Ecuaciones
		$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 50/15.4$
		$I[PM_{2.5}] = 20.50 + C[PM_{2.5}] * 49/24.9$
		$I[PM_{2.5}] = 21.30 + C[PM_{2.5}] * 49/24.9$
		$I[PM_{2.5}] = 113.20 + C[PM_{2.5}] * 49/84.9$
		$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 201/150.5$
<b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>		
<b>O<sub>3</sub></b>		
	IMECA	ppm
	0-50	0-0.055
	51-100	0.056-0.110
	101-150	0.111-0.165
	151-200	0.166-0.220
	>200	>0.220
		Ecuaciones
		$I[O_3] = C[O_3] * 100/0.11$
<b>Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)</b>		
<b>NO<sub>2</sub></b>		
	IMECA	ppm
	0-50	0-0.105
	51-100	0.106-0.210
	101-150	0.211-0.315
	151-200	0.316-0.420
	>200	>0.420
		Ecuaciones
		$I[NO_2] = C[NO_2] * 50/0.105$
		$I[NO_2] = 1.058 + C[NO_2] * 49/0.104$
		$I[NO_2] = 1.587 + C[NO_2] * 49/0.104$
		$I[NO_2] = 2.115 + C[NO_2] * 49/0.104$
		$I[NO_2] = C[NO_2] * 201/0.421$
<b>Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)</b>		
<b>SO<sub>2</sub></b>		
	IMECA	ppm
	0-50	0-0.065
	51-100	0.066-0.130
	101-150	0.131-0.195
	151-200	0.196-0.260
	>200	>0.260
		Ecuaciones
		$I[SO_2] = C[SO_2] * 100/0.13$
<b>Monóxido de Carbono (CO)</b>		
<b>CO</b>		
	IMECA	ppm
	0-50	0-5.50
	51-100	5.51-11.00
	101-150	11.01-16.50
	151-200	16.51-22.00
	>200	>22.00
		Ecuaciones
		$I[CO] = C[CO] * 50/5.50$
		$I[CO] = 1.82 + C[CO] * 49/5.49$
		$I[CO] = 2.73 + C[CO] * 49/5.49$
		$I[CO] = 3.64 + C[CO] * 49/5.49$
		$I[CO] = C[CO] * 201/22.01$