



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**MONITOREO DE PARTÍCULAS PM_{2.5} PARA EVALUAR LA
CALIDAD DEL AIRE EN EL INTERIOR DEL RECORRIDO DE LA
RED URBANA DE TRANSPORTE ARTICULADO EN EL
MUNICIPIO DE PUEBLA**

TESIS PROFESIONAL

PARA PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:

LIC. EN INGENIERIA AMBIENTAL

PRESENTA:

LUIS ERNESTO VILLA DÍAZ DE LEÓN

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. MARÍA DE LOS ÁNGELES VELASCO HERNÁNDEZ

PUEBLA, PUEBLA, 2022

INDICE

INTRODUCCIÓN

JUSTIFICACIÓN

HIPÓTESIS

OBJETIVOS.....

1. Capítulo 1. Antecedentes

1.1. Contaminación del aire

1.1.1. Clasificación de los contaminantes

1.1.2. Contaminantes primarios y secundarios

1.1.3. Efectos a la salud, vegetación y materiales

1.2. Calidad del aire

1.2.2. IMECAS

1.2.3. Programas de gobierno en beneficio de la calidad del aire

1.3. Legislación en México

1.3.1. Normatividad de la Secretaría de Salud

1.3.2. Normatividad de la SEMARNAT

1.4. Clasificación de las partículas

1.4.1. Efectos de las Partículas

1.4.2. Comportamiento de las partículas

1.4.3. Partículas menores a 2.5 micrómetros

1.4.4 Contaminación de aire en interiores

1.4.5. Efectos de la contaminación del aire en interiores

1.4.2. Legislación de partículas en interiores

Capítulo 2. Metodología

2.1. Metodología

2.1.1. Utilización del equipo de análisis para partículas PM2.5

2.1.2. Fuentes identificadas en el recorrido de la RUTA 1 y 2

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.2.1. RUTA

3.2.2. RUTA 2

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la contaminación del aire es un tema relevante, dado que cada vez son más los países industrializados que sufren de un índice alto de contaminación atmosférica debido al incremento de sus actividades, lo cual se refleja en la salud de la población.

El interés científico en la contaminación de interiores ha estado aumentando, sobre todo a partir de la segunda mitad de la década de los años ochenta del siglo pasado, considerando que la mayor parte de la población gasta entre un 70 y un 85% de su tiempo en interiores, pudiendo alcanzar hasta el 100% en los grupos más vulnerables (ancianos, enfermos y lactantes) y donde los contaminantes atmosféricos están menos diluidos que en el exterior (Lebowitz et al 2000).

Los ambientes interiores incluyen viviendas, lugares de trabajo, escuelas y guarderías, bares, oficinas y vehículos. Los contaminantes comunes en interiores son el humo del tabaco, el dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono, los compuestos orgánicos volátiles y el material particulado que corresponde a uno de los contaminantes criterio, los cuales son la causa de efectos nocivos para la salud humana y para el medio ambiente (Vargas Marcos et al 2005).

Es un hecho que la contaminación del aire es una importante amenaza para la salud de las poblaciones en todo el mundo; de ello se desprende que más de dos millones de personas mueren al año de manera prematura, debido a los efectos provocados por la polución del aire en espacios urbanos, tanto abiertos como cerrados, según expone la Organización Mundial de la Salud (OMS). Según el mismo organismo adscrito a la Organización de las Naciones Unidas, más del cincuenta por ciento de dichas afecciones recae en los países con menor nivel de desarrollo (OMS, 2006).

La contaminación del aire representa una amenaza importante para la salud pública en todo el mundo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) más de dos millones de muertes prematuras anuales son atribuibles a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados. Más

de la mitad de esta carga de enfermedad recae en las poblaciones de los países en desarrollo (OMS, 2006).

Al mismo tiempo, es sabido que son bastante diversas las actividades humanas que son factibles fuentes de contaminación y participar de diversas formas y magnitudes en este problema. En el ambiente urbano, las actividades que se realizan no son ajenas a este problema; más aún, en algunos casos se agravan por desfavorables condiciones meteorológicas, lo que acentúa la presencia de los contaminantes en el espacio aéreo.

Diversos estudios establecen que en materia de movilidad urbana el 83 por ciento de los viajes en transporte público, mientras que el 17 restante en vehículos de particulares. Se estima que alrededor de 238 mil personas acuden a diario al centro de la ciudad de Puebla, de las cuales 147 mil utilizan autobuses o diversos tipos de transporte privado; cada día, en la capital del estado, se generan alrededor de 3 millones 640 mil traslados de personas, de ellos, más de 2 millones 850 mil utilizan transportación pública (López et al 2005-2008).

El presente trabajo de investigación fue realizado al interior de las instalaciones del Departamento de Calidad del Aire y Cambio Climático (DCACC), que se localiza en la Secretaría de Desarrollo Social, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial del Gobierno del Estado, abarcando el tema relacionado con la contaminación atmosférica y la calidad del aire en el en el municipio de la ciudad de Puebla, desarrollado dicho estudio junto con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Para ello, se utilizaron equipos de alta tecnología mediante los cuales se obtuvieron resultados de alta fidelidad, aplicando técnicas de análisis de monitoreo de impacto personal; dichos resultados se refieren a la exposición de contaminantes atmosféricos sobre los usuarios de la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA), en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP).

Es preciso considerar la urgente necesidad de establecer proyectos que contemplen la profunda relación que existe entre la contaminación ambiental y la salud pública, por lo que se pone de relieve la importancia de transferir los resultados al nivel de la comunidad, al igual que con los encargados de las instituciones u organismos

responsables en materia de salud pública, lo mismo que de la prevención y cuidado del entorno ambiental.

JUSTIFICACIÓN

Se estima que poco más de un millón 576 mil personas de Puebla capital están expuestas diariamente a altas concentraciones de diversos contaminantes (INEGI.,2015).

La contaminación atmosférica, especialmente por partículas en la región, es a menudo una gran preocupación y en los últimos años se relaciona directamente con los cambios climáticos y la salud de los seres humanos. El material particulado a menudo incluye las partículas más finas (<2.5 µm) y gruesas (<10 µm), que es una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas. Incluyen fuentes naturales, es decir, polvo volcánico, compuestos biológicos y polen, así como por actividades humanas, tal como la combustión de combustibles fósiles, emisiones industriales, desgaste de vehículos y carreteras, etc. (Morales et al., 2013).

La importancia del monitoreo atmosférico es fundamental para llevar a cabo la elaboración de programas que mejoren la calidad del aire de los ciudadanos, así como la implementación de auditorías en las fuentes fijas y móviles, ya que son las principales aportadoras de contaminantes.

Si las concentraciones de emisiones en la Región Centro del país, tanto en fuentes fijas como móviles, se controlaran para cumplir con las normas de protección a la salud se podría evitar al año alrededor de 12 mil muertes prematuras anuales (OMS., 2014).

Se ha supuesto tradicionalmente que la contaminación de la atmosférica solo se trata de un fenómeno al aire libre y que los edificios proporcionan refugio de los contaminantes del aire. Sin embargo, a través de la ventilación e infiltración, algunos contaminantes atmosféricos pueden penetrar en interiores en una medida variable y pueden ser aún más persistentes en un grado que depende de la ventilación / infiltración y la reactividad de dichos contaminantes (Bruce et al., 2006).

De acuerdo a los antecedentes sobre el surgimiento y posterior avance de los contaminantes que existen en el aire, se considera la importancia del presente estudio.

Este trabajo se enfocó al modelaje de los diversos componentes de material particulado $PM_{2.5}$, de manera que permite recomendar acciones tendientes a la prevención para evitar eliminar daños a la salud y al medio ambiente.

Es muy importante reconocer que las autoridades locales y del país han de enfocarse al entendimiento sobre la problemática de la contaminación de la atmósfera y la dimensión de sus consecuencias en la sustentabilidad ciudadana y de las comunidades aledañas.

HIPÓTESIS

El monitoreo de los contaminantes por partículas permite evaluar la calidad del aire en el recorrido de la RUTA 1 y 2, en el municipio de Puebla, para tomar medidas de prevención, como identificar fuentes fijas y móviles, lo mismo que para evitar o disminuir los daños a la salud pública que podría provocar mediante el cumplimiento de eficaces programas de gobierno.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Monitorear material particulado para evaluar la calidad del aire en el interior del recorrido de la Red Urbana de Transporte Articulado en las Rutas 1 y 2 (R1 y R2) en la zona urbana del municipio de Puebla.

Objetivos específicos

- Monitorear y cuantificar la cantidad de partículas en el interior de la RUTA 1 y RUTA 2.
- Analizar los resultados obtenidos.
- Identificar posibles efectos negativos a la salud y al ambiente • Describir en el recorrido de la RUTA 1 y RUTA 2, fuentes de origen de las partículas $PM_{2.5}$

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1 Contaminación del aire

La importancia del aire limpio para la salud humana y del ambiente no necesita de argumentos. Pero establecer justamente qué tan limpio debe ser el aire, es motivo de un debate importante. Sea cual sea el nivel de contaminación que se considere aceptable, se debe establecer la medida de la concentración de contaminantes en el aire del ambiente para cumplir con los lineamientos regulatorios, rastrear las tendencias de la contaminación y proveer un nivel base contra el cual sea posible predecir las consecuencias de los aumentos de emisión presupuestos. La actividad humana, por supuesto incluyendo la más cotidiana, provoca diversos tipos de contaminación, ya sea por el uso de electricidad en todos los sentidos, la transportación en vehículos automotores, el uso de metales, plásticos o pinturas; cuando se consumen alimentos, medicamentos o productos de limpieza; cuando se enciende el clima artificial para generar frío o calor o se calienta la comida o el agua, por citar algunas. (*Wark et al., 2012*).

La contaminación atmosférica está relacionada con los efectos sobre la salud, pero especialmente sobre los niños y ancianos. En los problemas de las enfermedades el factor económico casi nunca es presentado; por ejemplo, en Puebla, casi 45 millones de dólares fue el costo de enfermedades respiratorias como el asma, disminución de la función pulmonar, ataques cardíacos y muerte en algunos casos. (*Castillo et al., 2011*).

El continuo monitoreo sobre la atmósfera nos ofrece información sobre el estado del aire en las ciudades y, por ello, es una herramienta de primer orden para la construcción y posterior desarrollo de los Programas de Gestión de la Calidad del Aire que aplican las autoridades responsables del cuidado del medio ambiente y demás sectores involucrados.

Los estudios que nos ofrece la meteorología son determinantes para definir la distribución de los contaminantes en el espacio, ya que de ella depende la velocidad con que se dispersan, transportan, reaccionan y acumulan los contaminantes en una cuenca atmosférica. Ya sea de hora a hora o de unos días a otros, mediante la observación de las variaciones de la calidad del aire en una zona específica, es posible reconocer la importancia de las condiciones meteorológicas, no obstante que las emisiones tóxicas permanezcan de manera prácticamente constantes. Por la manera en que influyen sobre la calidad del aire, las más destacadas variables meteorológicas a tener en cuenta, son el transporte convectivo horizontal que, como se sabe, depende de la dirección y velocidad del viento, así como el transporte convectivo vertical, que se relaciona con la estabilidad atmosférica e igual depende del fenómeno llamado inversión térmica de las diversas capas de la atmósfera (*Wark y Warner, 2012*).

La dispersión horizontal de los contaminantes es transportada por el viento y con ello, en cierta medida, determina las áreas que estarán expuestas a las afectaciones. Cuanto más fuerte es la velocidad del viento, generalmente reduce las concentraciones de contaminantes al nivel del suelo, pues generará una mayor dispersión y mezcla. Es a través de dos variables vectoriales que se puede describir al viento: dirección y velocidad., Los indicadores obtenidos a través de la medición de estos parámetros se pueden graficar en una rosa de los vientos, lo que facilita observar hacia dónde se dirige el viento de mayor predominancia y cual es su frecuencia, además de que contribuye a ofrecer información sobre la rapidez de desplazamiento del aire, lo que ayuda a una mejor identificación de las zonas y las distancias que pueden resultar más afectadas por las concentraciones al nivel del piso. Con los estudios previos existentes sobre la circulación de los vientos en la ciudad de Puebla se puede apreciar que la citada circulación del viento en gran medida depende de la topografía regional (*Balderas et al. 2004*).

Aunque son muchos los tipos de contaminantes que se descargan en el aire, la explicación se limita a los contaminantes que fijan los criterios designados por la

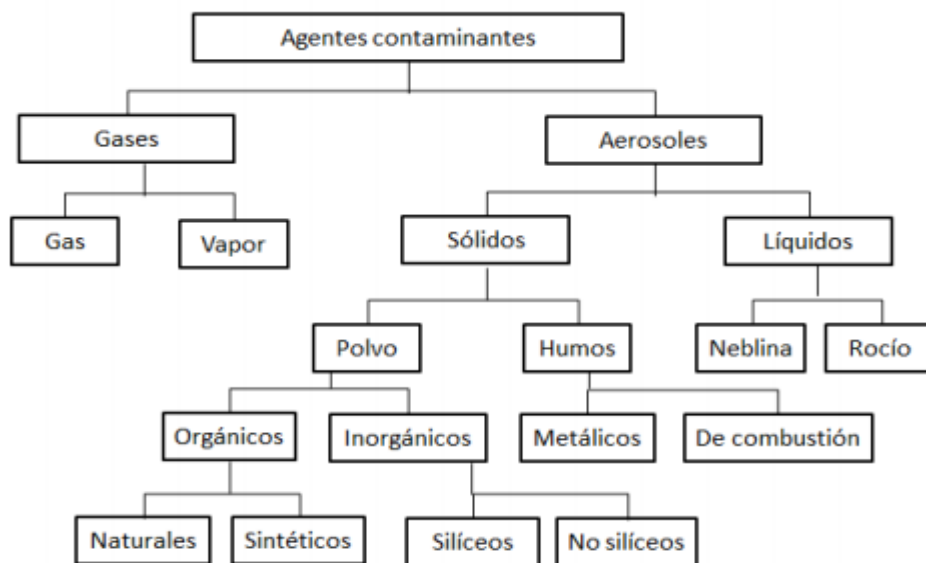
EPA: partículas, ozono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y plomo (Catalán et al., 2006).

1.1.1. Clasificación de los contaminantes

La atmósfera terrestre principalmente se compone por tres gases: Nitrógeno con 78 por ciento, Oxígeno con 21 por ciento y casi uno por ciento de Argón. Además existen otros gases como el bióxido de carbono, el metano, óxidos de nitrógeno, ozono, vapor de agua y los llamados gases inertes, como son el helio y el neón, los cuales se encuentran en mucha menor cantidad y se cuantifican en unidades de partes por millón (ppm). Cuando se habla de parte de por millón de un gas determinado, se infiere que de un millón de moléculas de los gases que constituyen el aire, nada más existe una molécula del gas mencionado (Asquith et al. 2011). Cuando gases como el Metano (CH₄), Carbono (CO) y Ozono (O₃), por mencionar algunos, exponen un incremento fuera de lo normal en sus concentraciones naturales, es cuando inicia el fenómeno llamado contaminación atmosférica.

Las fases en las que se pueden encontrar los contaminantes, por su estado físico, se pueden observar en la figura 1.1

Figura 1.1. Clasificación de los contaminantes por su estado físico



Fuente: Domínguez et al., 2015

Los gases son sustancias cuyo punto de ebullición se encuentra por debajo de la temperatura ambiente, como por ejemplo el CO₂, el SO₂. Los vapores, por su parte, provienen de sustancias cuyo punto de ebullición se encuentra por encima de la temperatura ambiente, entre ellos el cloroformo, el éter y el vapor de agua.

Los aerosoles, por su parte, son dispersiones coloidales o soluciones de sólidos o líquidos en fase gaseosa; los aerosoles que dispersan sólidos lo pueden hacer en forma de humos o en forma de partículas sólidas (PM₁₀); los humos pueden ser de metales sometidos a altas temperaturas que causan vaporización (humos metálicos) o provenientes de procesos de combustión.

Los polvos pueden ser orgánicos: sustancias naturales o sintéticas, e inorgánicos: materiales silíceos o no silíceos; esta última división debido al especial efecto sobre las vías respiratorias del material. (Domínguez et al., 2015)

Para clasificar los contaminantes del aire, se definen los denominados **contaminantes criterio** y **contaminantes no criterio**; los primeros de ellos se han identificado como dañinos para la salud y afectan el bienestar de los seres humanos. Se les dice contaminantes criterio porque han sido objeto de evaluaciones probatorias expuestas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos (EEUU), con el propósito de definir niveles que permitan proteger la salud, el medio ambiente y las condiciones de bienestar de la gente. En la actualidad, el concepto “contaminantes criterio” es asumido en diversos países. Para cada uno de los contaminantes criterio se han elaborado guías y normas; las guías tratan sobre recomendaciones acerca de los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos, a fin de disminuir los riesgos o escudarse de los efectos nocivos.

Por su parte, las normas definen las concentraciones máximas permisibles de los contaminantes atmosféricos durante un tiempo o período definido; estos indicadores límite se diseñan con un determinado margen de protección ante los riesgos con la finalidad de proteger la salud de las personas y el medio ambiente (Semarnat., 2007).

Los contaminantes criterio que emiten las actividades del ser humano se enlistan a continuación:

1. Material Particulado (PM₁₀)
2. Material Particulado (PM_{2.5}).
3. Bióxido de Azufre (SO₂).
4. Óxidos de Carbono (CO_x)
5. Óxidos de Nitrógeno (NO_x)
6. Ozono Troposférico (O₃)

Por su composición química los contaminantes se han clasificado como:

- Orgánicos: son aquellos que contienen carbono e hidrógeno (hidrocarburos, alcoholes, ácidos, aldehídos, cetonas, éteres, compuestos nitrogenados, azufrados, entre los principales) (*González et al., 2003*).
- Inorgánicos: carecen de compuestos de carbono, excepto el monóxido y dióxido de carbono, así como partículas metálicas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, ácidos, bases y sales (*González et al., 2003*).

Por el sitio en el que se encuentran:

- Aire del exterior: aire atmosférico
- Aire del interior: aire dentro de los inmuebles (*González et al., 2003*).

1.1.2. Contaminantes primarios y secundarios

Cuando hablamos de contaminantes primarios nos referimos a sustancias vertidas de manera directa a la atmósfera desde diversas fuentes de emisión, con

lo que surge la denominada contaminación convencional. La naturaleza física y composición química de estos contaminantes son muy variadas, las cuales pueden ser agrupadas en relación con su estado físico (caso de partículas y metales), o elemento químico común (caso de los contaminantes gaseosos), entre otras particularidades que les caracterizan (Marcano *et al*, 2007).

Algunos de los contaminantes primarios gaseosos más comunes se describen a continuación:

El bióxido de azufre (SO_2) es un gas incoloro de olor fuerte, y sus fuentes de emisión más identificadas son por combustión de combustibles fósiles que contienen azufre, como son las plantas termoeléctricas que utilizan carbono o combustóleo (Radian International. 1997) y vehículos a Diésel. Entre los efectos a la salud se encuentran: irritación de los globos oculares, aumento de las enfermedades de nariz y garganta, de las vías respiratorias (asma). Así mismo, provoca corrosión en gran parte de los metales, especialmente el hierro y el zinc, decolora el verdor de la vegetación. El SO_2 es de poca estabilidad en la atmósfera. Cuando se combinarse con el oxígeno del aire, una gran parte se oxida a SO_3 para después reaccionar con el vapor atmosférico de agua y forma ácido sulfúrico (H_2SO_4), muy corrosivo y que por su mayor peso específico cae en forma de llovizna, la cual es conocida como lluvia ácida (SIMAT, 2000).

El monóxido de carbono (CO) es un gas inodoro, incoloro, insípido e inflamable, que arde con llama azul (Marcano, 2007). Cuando este gas se combina con el oxígeno de la atmósfera se forma bióxido de carbono (CO_2). Esto se produce en los procesos de combustión en los que hay combustión incompleta; se trata del contaminante de mayor abundancia. Son mayormente emitidos por los vehículos automotores, fábricas de acero y otras industrias, así como refinerías de petróleo. Sus efectos en la salud son de muy alta toxicidad para los seres humanos, al grado de poder provocar la muerte por asfixia. Entre otros efectos, puede afectar gravemente los sistemas respiratorios y circulatorio, así como provocar cefalea, alteraciones psíquicas, afectaciones en los reflejos y sobre la memoria. Cuando llega a reaccionar con la hemoglobina de la sangre (Hb), forma carboxihemoglobina

(COHb), disminuyendo la capacidad del torrente sanguíneo para transportar oxígeno. Las personas que fuman tienen niveles de dos a cuatro veces más de COHb de quienes no fuman (Radian Internacional, 1997; SIMAT, 2000).

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) proceden de combustiones a elevadas temperaturas. Como incoloro, inodoro, tóxico y gas no inflamable se tiene definido como gas al óxido nítrico (NO), mientras que el dióxido de nitrógeno (NO₂) es un gas no inflamable, de color rojizo y tóxico (Marcano, 2007). Entre sus fuentes de emisión destacan son los automóviles con motor de combustión interna, los procesos en las fábricas de acero, petroquímicas, incineradores y centrales termoeléctricas. Los daños que provoca a la salud son, entre otros: ardor o irritación de ojos, nariz y bronquios. En abundancia es capaz de provocar edema y hasta la muerte. Provoca daños a la vegetación y retarda su desarrollo. Cuando se llega a descargar en una atmósfera cargada con mucho vapor puede llegar a formar ácido nítrico (HNO₃), el cual al ser arrastrado por la lluvia o la nieve se deposita sobre la tierra en forma de lluvia ácida (EPA, 1999; Radian Internacional, 1997).

Los hidrocarburos (HC's) se componen de carbono e hidrógeno, ejemplos de ellos son el benceno, el acetileno, el metano, el benceno y el tolueno, etc. Altamente contaminantes, destacan como emisores son los vehículos motorizados de combustión interna, así como transportes de hidrocarburos y diversas industrias que procesan productos petroquímicos. Entre los daños a la salud que se presentan, principalmente al inhalarlos, son distintos dependiendo del tipo de estos contaminantes de hidrocarburo. Los aromáticos como benceno y tolueno son de los más irritantes, y llegan a provocar lesiones de suma importancia en las membranas mucosas al ser inhalados sus vapores. Los no saturados son considerados los de mayor riesgo en peligrosidad pues pueden reaccionar fácilmente con la radiación solar, provocando con ello el conocido smog fotoquímico.

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas con las características de incoloro, inodoro y no tóxico. Forma parte del aire en el natural de las atmósferas puras. A este gas no se le considera contaminante (de la atmósfera), pero cuando se llega a alterar su ciclo por las actividades humanas, pudiera dar lugar a modificaciones del clima del

planeta, destacando entre ellas el llamado efecto invernadero. Entre las principales fuentes de donde surge este gas por actividad humana, se puede mencionar la quema de combustibles fósiles, calefacciones de las viviendas, vehículos motorizados y la quema sin control de basura u otros tipos de residuos (IPCC, 2001; Radian Internacional, 1997).

Los contaminantes primarios pueden también ser sólidos o líquidos en suspensión, mejor conocidos como aerosoles. Los aerosoles pueden mantenerse en suspensión durante cierto tiempo dependiendo de su tamaño. Un ejemplo que se puede tomar para ilustrar lo anterior, es el aerosol formado por las partículas de gasolina no quemada que son arrastradas por los gases calientes que emiten los tubos de escape de los motores de los vehículos. Las partículas sedimentables son aquellas con diámetros superiores a $100\ \mu\text{m}$, al ser más pesadas, tienden a depositarse rápidamente sobre el suelo y bienes de uso y no deben considerarse como emisiones al aire. Las partículas suspendidas totales (PST) emitidas se componen de materia sólida, líquida y de vapores, pero que se encuentran en el aire como partículas sólidas o líquidas; entre ellas se pueden mencionar: todas las partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a $100\ \mu\text{m}$. Las denominadas partículas primarias contemplan los materiales sólidos o líquidos emitidos directamente del proceso (de las chimeneas o tubos de escape de vehículos, por ejemplo) y que pueden transformarse en partículas a la temperatura y presión ambiente (IPCC, 2001; Radian Internacional, 1997).

Los contaminantes secundarios se producen por diversos tipos de transformaciones y de reacciones químicas o fotoquímicas de los llamados contaminantes primarios en la atmósfera; su emisión no es de manera directa hacia la atmósfera. Entre los contaminantes secundarios más relevantes destacan el ácido sulfúrico, H_2SO_4 , el cual se forma por la oxidación del SO_2 , el dióxido de nitrógeno NO_2 , al oxidarse el contaminante primario NO y el ozono, O_3 , a partir del oxígeno O_2 y el llamado Material Particulado (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) (Marcano, 2007).

Algunos de este tipo de contaminantes secundarios se forman a partir de contaminantes primarios (precursores) mediante reacciones generadas por las

luminiscencias solares. Cuando las temperaturas son elevadas este compuesto es estable, el cual es posible obtenerlo mediante reacción reversible con base en el oxígeno a 1500°C. En contraste, en bajas temperaturas es un gas relativamente inestable y puede descomponerse para generar oxígeno según la reacción:

Cuanto más concentrado se encuentra, esta descomposición es tanto más fácil; igualmente lo descomponen ciertos productos sólidos, como el bióxido de manganeso y el carbón. Esta inestabilidad explica sus propiedades altamente oxidantes. El ozono, por su parte, se concentra en la estratósfera en una altura entre 12 y 40 kilómetros. En este caso se forma una capa que funge como filtro protector, de este modo evita que la radiación ultravioleta llegue a la superficie del planeta con una intensidad que resultaría dañina para la vida (Delgado, 2004; Lomelí, 2007).

La producción fotoquímica de ozono es un paso crítico en un episodio de smog fotoquímico, ya que las reacciones fotoquímicas que se originan deben su origen o son importantes en la producción de ozono (Baird, 2001). Este

Fotoquímicos en los que intervienen hidrocarburos y óxidos de nitrógeno que se dispersan en la atmosfera por las emisiones de automotores, vegetación, industria y otras fuentes.

En zonas urbanas, bajo condiciones meteorológicas estables (sin intercambio vertical y con poca ventilación), dichas reacciones emiten nitrato de peroxiacetilo (PAN), aldehídos, ozono, cetonas, entre otros. El ozono (NO_x e HC's) tiene precursores que se aglomeran en el día, en las horas pico de tráfico y en horas tempranas, y consecuentemente, la máxima densidad de ozono se alcanza en las primeras horas del atardecer. Estos contaminantes se trasladan en dirección del viento y dañan diversas zonas aledañas a las zonas metropolitanas (Manahan, 1994). Cierta cantidad del ozono transportado se elimina al reaccionar con óxido nítrico emitido localmente por automotores.

1.1.3. Efectos a la salud, vegetación y materiales

a.- Efectos a la salud.

La Organización Mundial de la Salud considera la contaminación atmosférica como una de las más importantes prioridades mundiales en salud (OMS., 2002). En un reciente informe se ha estimado que la contaminación ambiental debida a partículas es responsable de 1.4% de todas las muertes en el mundo. (Cohen et al., 2003)

Se encuentra una cercana relación cuantitativa entre los parámetros de exposición de pequeñas partículas (PM₁₀ y PM_{2,5}) en altas concentraciones y el aumento de la morbilidad ó mortalidad medida día a día y a largo plazo. Dichos estudios muestran que esta relación sucede inversamente dando como resultado la mortalidad conexas que desciende cuando las concentraciones de partículas pequeñas y finas disminuyen. Estos parámetros, brindan información a las instancias normativas que les permiten realizar proyecciones relacionadas a mejorar la salud de las comunidades, en lo que se podría esperar efectos de reducción de contaminantes del aire con partículas (Ballester et al., 2005).

Los contaminantes en forma de partículas, incluso en muy bajas concentraciones conllevan a efectos nocivos sanitarios; en donde, no se han identificado por encima de los límites permisibles daños para la salud. Consecuentemente, dichos límites se enfocan como un objetivo prescindible de lograr las concentraciones mas bajas posibles.

Una gran cantidad de investigaciones señalan un mayor deterioro en la salud por partículas, el cual, lo originan compuestos altamente tóxicos y carcinogénicos como compuestos orgánicos (especialmente los hidrocarburos aromáticos policíclicos), el carbono, nitratos y determinados metales (arsénico, cadmio, fierro, zinc y níquel) y sulfatos.

De acuerdo con los efectos predominantes sobre la salud de los individuos sometidos a dichas exposiciones, se ha designado la siguiente clasificación: (Domínguez et al., 2015).

1. Irritantes: Se trata de partículas corrosivas que afectan actúan las vías respiratorias del ser humano; más que la duración a la exposición, lo que provoca mayores efectos nocivos es la concentración del propio contaminante. Las afectaciones puede suceder al instante, de manera inmediata.
2. Asfixiantes: Pueden ser sustancias no tóxicas, que desplazan el oxígeno en elevadas; o asfixiantes químicos que alteran los procesos de intercambio de oxígeno en el organismo.
3. Anestésicos y narcóticos: Los anestésicos disminuyen o eliminan la sensibilidad, en tanto que los narcóticos causan inconsciencia.
4. Tóxicos sistemáticos: atacan de preferencia a los órganos, ó al sistema en general. Algunos de estos se eliminan con facilidad del organismo y otros son eliminados lenta y paulatinamente.

De acuerdo a un estudio realizado en la capital del país, se considera que el contenido soluble en agua de vanadio, níquel y cobre de las partículas se encuentra asociado con la reactividad que estas mismas partículas provocan en el ácido desoxirribonucleico (ADN) in vitro. Por otra parte, diversos estudios realizados de manera reciente exponen que los metales que contienen dichas partículas podrían vincularse a daños cerebrales, como respuesta a efectos inflamatorios en jóvenes residentes de la Ciudad de México, con manifestaciones dañinas sobre el bulbo olfatorio, daños en la composición cerebral de infantes, con neuroinflamación, con manifestaciones adversas en el olfato y desequilibrios de la respuesta inmune (Prieto et al., 2007).

La contaminación de la atmósfera que producen los SO_x y NO_x daña de manera directa o indirecta al agua, a la tierra y a los diversos ecosistemas. Esto es, porque los óxidos de azufre y de nitrógeno presentan una serie de fenómenos como transporte a grandes distancias, diversas reacciones químicas, así como

precipitación y deposición. Con el paso del tiempo, dichos óxidos y los diversos compuestos que de ellos derivan regresan a la superficie terrestre y, al final, llegan a ser absorbidos por los suelos, el agua o la flora. Este proceso de retorno a la tierra puede presentarse de dos formas (Marcano, 2007; Lomelí, 2007):

Deposición seca. Se trata de que una parte o fracción de los óxidos emitidos a la atmósfera regresa a la superficie terrestre en forma de gas o de aerosoles; lo anterior llega a ocurrir de manera cercana a sus fuentes de origen (de los contaminantes) o a distancia tan lejanas que pueden llegar hasta varios cientos de kilómetros, según las condiciones en que pueden dispersarse. Aún así, la llamada deposición en seco es más común en las áreas cercanas a la fuente de emisión (Marcano, 2007; Lomelí, 2007).

Deposición húmeda. Se denomina así a la mayor parte de los SO₂ y NO_x que al mantenerse en el aire presentan un proceso de oxidación que deriva en la formación de ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido nítrico (HNO₃). Este tipo de ácidos se disuelven en las partículas de agua que componen las nubes y en las posteriores gotas que llegando al suelo en forma de precipitaciones pluviales. Una parte de estos ácidos forman iones de amonio (NH₄⁻), luego de ser neutralizada por sustancias presentes en el aire, como es el caso del amoníaco. (Marcano, 2007, Lomelí, 2007).

Estos ácidos disueltos son iones de sulfato (SO₄⁻), iones nitrato (NO₃⁻) e iones de hidrógeno (H⁺), los cuales se encuentran en las gotas de lluvia, lo que provoca su acidificación o la llamada lluvia ácida. De igual manera, se producen partículas secundarias, como pueden ser los aerosoles que se crean en el aire mediante gases con reacciones químicas atmosféricas. El término PM₁₀ se refiere a las emisiones de partículas de diámetro aerodinámico mayores o iguales a 10 µm. Así mismo, el PM_{2.5} hace referencia a las partículas de diámetro aerodinámico iguales o menores a 2.5 µm. La dimensión tan pequeña de las PM₁₀ o las PM_{2.5}, les facilita entrar en los alvéolos pulmonares, donde pueden llegar a alojarse y causan daños a la salud, con síntomas y afecciones como tos, jadeos y anomalías en la función respiratoria y en los pulmones (Radian Internacional, 1997).

Se han demostrado varios episodios de contaminación atmosférica que vinculan las muertes cardiopulmonares con exposiciones crónicas de concentraciones anormalmente altas de contaminación del aire (*Machado et al., 2008*).

Las concentraciones máximas de contaminantes en el ambiente, de acuerdo a las normas de calidad del aire, no deben ser excedidas de manera frecuente, pues se trata de garantizar la salud del humano, sobre todo de los grupos más vulnerables como los niños, las personas de la tercera edad y las personas con problemas respiratorios crónicos.

b.- efectos sobre materiales vegetación y animales.

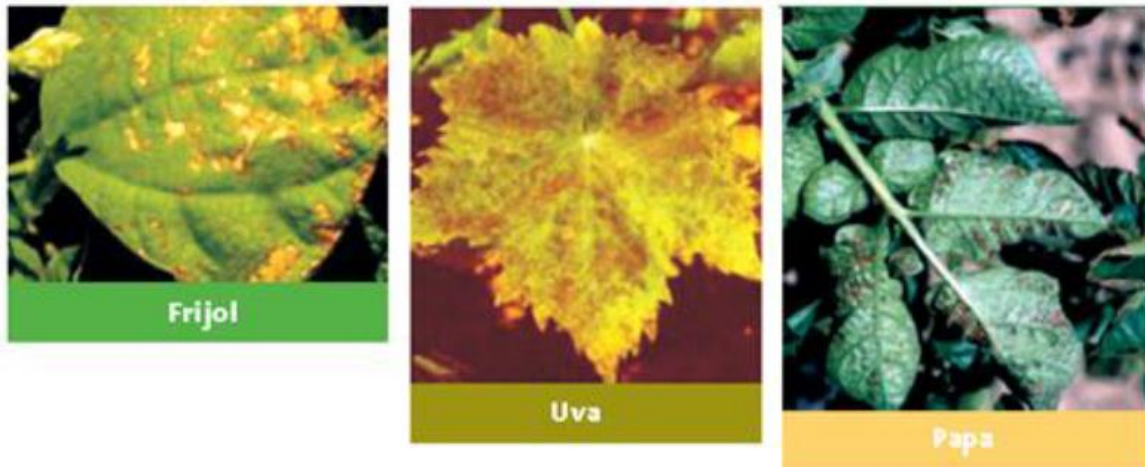
El acero se corroe de dos a cuatro veces de manera más rápida en las zonas con asentamientos industriales en relación con las áreas rurales, esto es debido a la contaminación en partículas con compuestos azufrados. Este tipo de contaminación provoca un deterioro más rápido de las estatuas y edificaciones, lo mismo que de los suelos, las vestimentas, los vehículos y las viviendas. El ozono daña los materiales textiles, diversos tipos de colorantes, plásticos y caucho.

Los fluoruros pueden llegar a actuar como venenos que se acumulan en la vegetación, provocando daños al tejido de las hojas. Estas partículas oxidantes blanquean y vitrifican la lechuga, el cardo, las espinacas, el tabaco, la alfalfa y otras plantas de hoja. El etileno, hidrocarburo que se puede adherir a las partículas que se encuentran en los gases de escape de los automóviles y los motores de diésel, daña los pétalos de los claveles y destruye las flores secando sus sépalos (*Turk et al., 2004*).

El material con contenido de dióxido de azufre daña las tierras madereras y la vegetación. Esto ha causado una declinación en la producción de naranjas en la cuenca de Los Ángeles, marchitando los cultivos de pinos y de cítricos en Florida. El ganado padece de Fluorosis (debido al flúor de la vegetación). A niveles elevados de SO_x y NO_x las plantas sufren de envejecimiento precoz (ver figura 1.1.3.). Se puede concluir, que lo anterior es una amenaza muy seria para las

verduras con fronda, los cultivos, los arbustos, los frutales y los árboles. (Ayers et al., 2007).

Figura 1.1.3. Daños causados por contaminación en algunos cultivos.



Fuente: Semarnat 2014

1.2. Calidad del aire

La definición de calidad del aire es el conjunto de trazas componentes presentes en la atmosfera en un intervalo de tiempo que satisfacen a la salud de un individuo ó población, así como la generación de un impacto positivo ecológico e inclusive materiales con valor económico (SSAOT., 2012).

Los contaminantes criterio de acuerdo a una región, establecen la calidad del aire. Dichos contaminantes, se han clasificado e identificado, debido a que en líneas de tiempo anteriores, fueron publicados como objeto de evaluación en términos de calidad del aire en USA, con el fin de fijar limites permisibles para la protección ambiental y salud pública.

En términos específicos, la Ciudad de Puebla en México, los contaminantes emitidos en la atmosfera comienzan a tener presencia cada vez mas preocupante, con niveles significativos de polución a partir de los años 60's y 70's, resaltando en paralelo con la subida demográfica, empresarial y comercia, que

consecuentemente, demandan mayores insumos de bienes y servicios, así como de transporte (Semarnat., 2006).

La definición de “contaminantes criterio” en diversos países (incluyendo México), definen los siguientes criterios para las partículas: menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), el bióxido de azufre (SO_2), el ozono (O_3), el monóxido de carbono (CO) y bióxido de nitrógeno (NO_2).

El monitoreo ambiental en forma continua e integrado a contaminantes, sirve para determinar la calidad del aire en regiones específicas de acuerdo a las comparaciones vs niveles permisibles fijados para la protección de la salud y el ecosistema.

Los contaminantes se distribuyen espacialmente en el aire en los que intervienen varios parámetros ambientales, y debido a los mismos, se cuenta con datos que presentan con que acumulación, transporte, dispersión, rapidez y reacción se encuentran los contaminantes en una cuenca atmosférica (Semarnat, 2006).

Existen limitaciones en la medición de $PM_{2.5}$ aún cuando se trata de un compuesto contaminante de gran relevancia por los efectos tan negativos que provoca en la salud, quizá el más destacado en cuanto a mortalidad prematura, las formas en que se miden las $PM_{2.5}$ todavía no acaban de consolidarse en las redes de monitoreo que tienen los equipos para este tipo de mediciones. Sólo fue posible examinar el cumplimiento de la normatividad en el Valle de México en todos los años y por sólo tres años en Mexicali, Baja California.

En la capital de Nuevo León, Monterrey, pese a que se efectuaron diversas mediciones, apenas fue suficiente la información que logró recopilarse para lograr la evaluación de la cantidad de días en los que se superó la norma en cada día: en la capital de Jalisco, Guadalajara, por su parte, se declararon definitivamente no válidos los datos por las personas responsables de la red.

En la ciudad de Puebla actualmente hace falta más atención a este parámetro, ya que solo se concentran en las Partículas Suspendidas Totales (PST).

Es importante tener una buena calidad del aire sobre todo en zonas metropolitanas ya que es donde hay mayor actividad antropogénica, así como transformación de materia y energía; entre los años que comprenden del 2005 al 2010 se registraron alrededor de 38 mil personas fallecidas por cáncer de pulmón, así como por cardiopulmonares e infecciones diversas en las vías respiratorias relacionadas con la exposición a los citados agentes contaminantes, (Stevens et al., 2008); de esas muertes, 5 mil fueron de niños y 6 de cada 10 decesos se presentaron en las áreas citadinas del Valle de México, Monterrey, Toluca, Puebla y Guadalajara. Basta decir, que sólo en el año 2008 la Organización Mundial de la Salud registró más de 14,700 muertes prematuras en México (OMS, 2008).

1.2.1. IMECAS

Un indicador diseñado para informar a los ciudadanos sobre la calidad que guarda la calidad del aire es el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (conocido como IMECA, por sus siglas), el cual expone los parámetros de la contaminación y qué tanto pueden ser dañinos para la salud. A partir del año 2006, en la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-009.AIRE-2006 se encuentran los fundamentos para el citado índice de calidad del aire, incluidos los requerimientos para su cálculo y difusión.

Son cinco los contaminantes criterios: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y material particulado, los que se calculan a partir del citado índice; este se presenta a partir de una escala de 0 a 500, en la cual el valor de 100 se contempla para cada contaminante por la Norma Oficial Mexicana. En todo caso, un valor por debajo de 100 es considerado satisfactorio y representa poco riesgo para la salud; en contraparte, todo valor por arriba de 100 significa un riesgo para la salud y, así mismo, entre más elevado sea el indicador por encima de 100, es mayor la contaminación y, por tanto, el riesgo para la población (ProAire Puebla., 2012)

Por su parte, si el IMECA se encuentra entre 0 y 50, tal como indica la Norma Técnica Ambiental del Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006, se considera que existen las condiciones para que toda persona realice actividades al aire libre ya es menor el riesgo; empero, si el IMECA registra un valor superior a **51** pero menor a **100**, se considera que la calidad del aire es “**Regular**” y, en estas condiciones, los grupos vulnerables como niños, personas de la tercera edad o con enfermedades cardiovasculares o respiratorias, podrían estar en riesgo de sufrir molestias o síntomas en sus vías respiratorias.

Más aún cuando se rebasa el valor de 100 puntos del IMECA y aumenta todavía más, también se incrementan los riesgos para la salud de las personas: un valor entre **101** y **150** equivale a una “**Mala**” calidad del aire para la población y especialmente para los grupos más vulnerables, por lo que se recomienda estar atentos al surgimiento de todo tipo de síntomas o molestias mientras se realizan actividades al aire libre, como caminatas rápidas o ejercicios intensos.

En el caso de que los registros superen los **150** puntos del IMECA y continúen al alza, la mencionada Norma Técnica Ambiental del Distrito Federal expone que la calidad del aire es “**Muy Mala**” o “**Extremadamente Mala**” y, por tanto, se elevan los riesgos a la salud pública, con mayor énfasis entre la población más vulnerable, tal como se muestra en la tabla 1.1:

Tabla 1.1. Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

IMECA	Calificación	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 cardiovasculares y/o respiratorias como asma
101-150	Mala	Causante de efectos adversos a la salud en la población, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades y/o respiratorias como asma
151-200	Muy mala	Causante de mayores efectos adversos en la salud en la población, en particular los niños y los adultos mayores, con enfermedades y/o respiratorias como 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 y/o respiratorias como asma

Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006. Establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de los contaminantes criterio.

El propósito del índice es facilitar la comprensión del vínculo entre los niveles de contaminación del aire y los efectos en la salud. Con este fin, el índice se divide en cinco categorías, cada una corresponde a un intervalo en el índice y señala el nivel de riesgo para la salud, Para simplificar su interpretación, cada intervalo se representa mediante un color.

1.2.2. Programas de gobierno en beneficio de la calidad del aire

La Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial del Gobierno del Estado de Puebla, en tareas de coordinación con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) del gobierno federal, el Programa de Gestión de la Calidad del Aire (ProAire) para el período comprendido entre los años 2012 al 2020, en el que se exponen los lineamientos en búsqueda de garantizar el mejoramiento de la calidad del aire en la ciudad capital del estado.

En consecuencia, se construyeron líneas de acción a cargo de la Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial con el propósito de dar cauce a una viabilidad ambiental tomando en cuenta el desarrollo de los sectores económicos y la actividad social, lo cual demanda una eficaz y oportuna toma de decisiones con medidas de regulación y control controlar de las fuentes de emisión, lo cual deriva en la mitigación del deterioro de la calidad del aire tanto en la capital del estado, como en el resto de las ciudades y zonas rurales de la entidad (ProAire Puebla., 2012).

Es por ello que el **ProAire** se crea como un instrumento rector que especifica los objetivos, líneas de acción, metas e indicadores que deben ser realizados por los distintos niveles de gobierno, academia y sociedad con el objetivo de mejorar la calidad del aire mediante un esquema de sustentabilidad y, al mismo tiempo, ofrece

diversos tipos de oportunidades de participación a los sectores y actores involucrados.

Al tener una información más precisa y oportuna sobre la calidad del aire que respira toda la población es, como es sabido por todos, de vital importancia. Así las cosas, se precisa tener un conocimiento en calidad y cantidad suficientes de los factores que inciden en las condiciones de calidad del aire, dando seguimiento a las actividades necesarias para su mejoría y protección.

Conjuntar los esfuerzos colectivos de todos los niveles de gobierno e instituciones educativas como la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), fue la premisa indispensable para el desarrollo del ProAire Puebla 2012-2020.

Este programa, el ProAire, debe considerarse como un instrumento de primer orden con el objetivo de mejorar la calidad del aire en las áreas citadinas y rurales de la entidad; en este programa se establecen con precisión las acciones a seguir para tener éxito con base en la participación de los actores de relevancia y sectores claves de la sociedad. Es de suma relevancia desarrollar, al mismo tiempo, tareas en los ámbitos de la educación y una emprender una comunicación estratégica para alcanzar el éxito deseado (ProAire., Puebla 2021-2020).

La premisa es clara: Sólo lo que se puede medir es susceptible de mejorarse, y sólo aquello que se puede describir se puede medir.

El objetivo del monitoreo de la calidad del aire es generar información para:

La información que se obtiene mediante el monitoreo de la calidad del aire tiene como objetivo:

1. Sirve para verificar si se cumplen las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de salud del medio ambiente;

2. Valora la calidad del aire en relación con la concentración de los contaminantes criterio;
3. Cuantifica qué tanto está expuesta la población a la contaminación del aire en el medio ambiente;
4. Sirve para comunicar y, en su caso, alertar a la población sobre los niveles de contaminación y sus posibles riesgos;
5. Ofrece información inmediata y oportuna para activar o desactivar, según sea el caso, alertas o acciones de emergencia, a partir de qué tanto están concentrados los contaminantes, ya sea por actividades humanas o fuentes naturales, lo cual podría representar riesgos para la salud pública o el entorno ambiental;
6. Sirve para emitir información oportuna a los pobladores sobre la situación de la calidad del aire;
7. Es información valiosa para evaluar la manera en que se distribuyen los contaminantes atmosféricos y su transportación;
8. Genera datos importantes y confiables para evaluar y dar seguimiento a las estrategias implementadas para la gestión de la calidad del aire, y
9. Evaluar la tendencia histórica de los contaminantes criterio (SIMAT 2015).

Para la gestión de la calidad del aire se define una estrategia que se basa en las variables que a continuación se enuncian: los niveles de contaminación, las fuentes e inventarios de emisiones, la capacidad de dispersión de los contaminantes, los efectos en la salud y el medio ambiente, la gestión y marco legal en materia atmosférica, la capacidad de las instituciones y su potencial de actividad, las oportunidades que derivan y el costo-beneficio.

“Ubicar al Estado de Puebla como la entidad con menores niveles de contaminación del aire, estableciendo la adecuada aplicación de políticas de regulación y control de fuentes de emisiones contaminantes, la irrestricta observancia a la legislación y normatividad vigente, el fortalecimiento de las capacidades institucionales y la participación activa de los distintos sectores sociales” (ProAire Puebla., 2012).

Si se admite que el medio ambiente y el ser humano pertenecen a la misma entidad y, por lo mismo, provocar daños al entorno medioambiental nos afecta a todos, partimos del hecho de que nuestra contribución al mejoramiento de la calidad del aire que todos respiramos, implica necesariamente que mejoramos nuestra propia calidad de vida.

En este eje se incluyen medidas que tienen como objetivo identificar aquellos sectores en los que es posible avanzar hacia una disminución en el uso y consumo de las energías y su eficiencia. Cumplir estas acciones permite avances para mitigar la contaminación del aire, así como el cambio climático, derivados en gran parte por los excesos en el uso y consumo de las energías como parte de la actividad humana.

Actores involucrados: Gobierno del Estado de Puebla, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Secretarías de Salud del Estado y del Gobierno Federal, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Secretaría de Educación Pública y Dirección de Protección Civil, así instituciones académicas de educación superior, organismos de investigación organizaciones no gubernamentales, instituciones y grupos internacionales, y gobiernos municipales en correspondencia con lo establecido en la reglamentación y aquellos grupos o instituciones que considere necesarios el Subcomité de Calidad del Aire y Cambio Climático.

Beneficios esperados:

- Que se aplique de manera efectiva las medidas contempladas en el ProAire;
- Que disminuyan las emisiones de contaminantes del aire;
- Dar seguimiento efectivo a las acciones establecidas en el ProAire, y
- Difundir los resultados y avances Difusión del ProAire

Tabla 1.2 Gases involucrados en el reglamento.

Gases y/o contaminantes involucrados:							
PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COV	Tóxicos	GEI
.

Fuente: Programa de gestión de la calidad del aire ProAire Puebla 2012.

Meta: Garantizar el cumplimiento del ProAire.

Se estima un costo de alrededor de 500 mil pesos

(ProAire Puebla., 2012-2020).

Cuando se trata de mejorar la calidad del aire (ProAire), los programas de gestión amplían la oportunidad de reducir las emisiones provenientes de vehículos automotores (carros), de las instalaciones industriales y otras actividades humanas relacionadas con la producción, lo que deriva en el mejoramiento de la calidad del aire, atenuar las afectaciones a la salud pública y definir protocolos para la gestión de riesgos. De igual manera, incluye a diversos sectores que se relacionan con el uso de la atmósfera.

1.2.3. Legislación en México

En nuestro país las autoridades federales, a través de la Secretaría de Salud, establecen los rangos que definen la permisividad de los límites de concentración de contaminantes capaces de afectar a la población, de acuerdo a la normatividad oficial en la materia.

Así, se han establecido guías y normas para los contaminantes criterio.

En el caso de las guías, sirven para recomendar los niveles de exposición a los diversos contaminantes con el objetivo de disminuir los riesgos y de proteger a la gente de las afectaciones por toxicidad; las normas, por su parte, definen los rangos máximos de concentración permisibles de contaminantes del aire durante períodos determinados de tiempo, estos valores se establecen con parámetros de protección de riesgos con el fin de salvaguardar la salud humana y del entorno medioambiental (Gobierno del Distrito Federal, 2010).

Con base en lo anterior, se realiza la medición de los llamados contaminantes criterio, lo que es un trabajo técnico bastante complejo que incluye la utilización de equipos especializados, personal calificado para operarlos e instalaciones con infraestructura adecuada para realizar esta actividad y sistemas de comunicación eficientes.

Es necesario tener en cuenta que, además de la medición, se precisa asegurar que los datos que se generen puedan describir apropiadamente la calidad del aire; así, pues, para la operatividad del monitoreo se necesitan metodologías y estándares para realizar la citada medición, lo mismo que programas que permitan dar continuidad de aseguramiento de la calidad.

Debemos tener muy en cuenta que para la gestión de calidad del aire el monitoreo es el punto de partida, pues a partir de ahí se comparan los datos que se obtienen con las normas ambientales en vigor. De igual modo, es muy importante formular inventarios de emisiones que permitan tener conocimiento qué tipo y qué cantidad de emisiones se generan, así como las fuentes de las que surgen.

Impulsados por la gran crisis ambiental a que todos nos preocupa, los temas ambientales han cobrado gran importancia desde hace varios años, sobre todo, por las negativas afectaciones y degradación en los ecosistemas, así como en la salud humana, lo que derivan en menos condiciones de bienestar y de calidad de vida para la población de prácticamente todo el planeta.

A partir de que la exposición a los contaminantes del aire en gran está fuera del alcance del control individual de las personas, se precisan medidas y acciones implementadas por las autoridades de los tres niveles de gobierno, con el propósito de disminuir las afectaciones sobre la salud de la sociedad (LGEEPA, 2014).⁴

Con las adiciones al artículo 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en la que se cambia el concepto “adecuado” por el de “sano”, se crea

un precedente que, sin duda, obliga a las diversas autoridades de los diversos niveles de gobierno a implementar acciones tendientes a beneficiar la calidad del aire que todos respiramos.

Figura 1.3 *Ubicación geográfica de ProAires y población beneficiada*



Ubicación geográfica de Programas de Gestión de la Calidad del Aire.

Fuente: ProAire Puebla (2012-2020)

De esa manera, son cuatro las agendas científicas que lleva a cabo el Instituto Nacional de Ecología, entre ellas la llamada Agenda Gris, misma que se relaciona con los procesos de control de contaminación en lo concerniente a los ámbitos locales, regionales y globales.

Por su parte, y de manera excepcional, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos contempla en su Artículo 73, Fracción XXIX-G, una variante a la

distribución de las facultades, lo cual deriva del sistema de competencias, pues indica en materias específicas la coordinación y responsabilidades, así como la concurrencia de los tres niveles de gobierno: federal, estatal y municipal.

Con ese mandato de la Carta Magna del país, es decir la Constitución, se establece la concurrencia de las autoridades en los gobiernos federal, estatal y municipal, de acuerdo a sus respectivas competencias, para la protección al medio ambiente, así como la preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Por su parte, el Poder Legislativo Federal, es decir el Congreso de la Unión integrado por Diputados Federales y Senadores, emitió en el año de 1988 la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente (LGEEPA), todavía vigente, la cual establece con precisión, desde sus primeros artículos, las facultades de los gobiernos, en sus tres niveles, en las materias contempladas por la ley y los instrumentos para hacerlas valer.

Para definir las facultades y obligaciones que corresponden a cada nivel de gobierno, el Congreso de la Unión cumplió con el requisito de basarse en el sistema de competencias enmarcado en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y en construyó un mecanismo que vincula y complementa el quehacer de los tres niveles de gobierno; en consecuencia, la citada coordinación deriva de las responsabilidades que competen tanto al ámbito federal, como a los estados y municipios (SEMARNAT, 2012).

En este sentido, la responsabilidad de evaluar la calidad del ambiente, así como diseñar y promover los sistemas de información en la materia, corresponden a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Por lo anterior, de ahí deriva el Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, el cual incluye la información del monitorio de la calidad del

aire, del agua y del suelo, a partir de los mecanismos establecidos y los resultados obtenidos.

Así mismo, la Ley General de Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente dispone que cada uno de los tres niveles de gobierno deben llevar un registro de las emisiones y transferencias al aire, agua, suelo y subsuelo, de los materiales y residuos que a cada uno de ellos competen, e igualmente están obligados a remitir a la SEMARNAT sus reportes sobre el monitoreo de la atmósfera y, de igual manera, dispone que los estados y municipios deben vigilar que se cumplan las Normas Oficiales Mexicanas en materia ambiental.

En todos los estados las leyes ambientales tienen en sus normas elementos que se relacionan con el Sistema de Información Ambiental, así como la necesidad de monitorear la emisión de contaminantes, mecanismos de control y de prevención de la contaminación del aire, excepto el estado de Tlaxcala.

Tanto las 31 entidades federativas del país como la Ciudad de México poseen disposiciones referentes al medio ambiente y a la necesidad del equilibrio ecológico en sus marcos constitucionales y las leyes relativas a estos temas; empero, sólo dos estados contienen en sus Constituciones Políticas referencias específicas sobre el tema atmosférico.

Si se analiza la conformación de las leyes ambientales en cuanto a la contaminación de la atmósfera, existen diversos instrumentos de gran importancia como los que se refieren a los siguientes conceptos: cambio climático, programas y normatividad de la calidad del aire, verificación de las emisiones de las fuentes móviles y el desarrollo de los factores económicos.

En relación con lo anterior, sólo en diez estados del país existen leyes en materia ambiental que se refieren al cambio climático; siete de ellas no incluyen planes o programas sobre la calidad del aire y dos de las diez mencionadas no incluyen en

sus articulados referencias a instrumentos económicos; aún así, todas ellas incluyen en su normatividad disposiciones con el objetivo de regular la contaminación que emana de fuentes móviles (SDSORT., 2011).

Respecto a la Constitución Política del Estado Libre y Soberano de Puebla, cabe mencionar que en su Artículo 112 precisa que el Ejecutivo del Estado y los gobiernos municipales deben promover, a través de sus respectivas competencias y normatividad, mejoras a la calidad de vida de la población mediante la preservación del medio ambiente y del equilibrio ecológico, sin que ello implique comprometer la satisfacción de las futuras necesidades de las generaciones venideras, para lo cual habrán de emitirse las leyes y regulaciones convenientes para tal finalidad (SEMARNAT., 2005).

Las disposiciones que dan sustento legal al Programa de Gestión para la Calidad del Aire del Estado de Puebla están contenidas en la Ley para la Protección del Ambiente Natural y el Desarrollo Sustentable del Estado de Puebla, así como el objetivo para establecer disposiciones para sentar las bases en materia de prevención y control de la contaminación del aire, del agua y del suelo; las obligaciones de elaborar un programa para disminuir la producción, transporte, uso y comercialización de cualquier sustancia identificada como nociva para la capa de ozono, ya sea de manera directa o indirecta y, más aún, hace referencia a programas “para controlar la contaminación y prevenir contingencias ambientales”.

1.3.1. Normatividad de la SEMARNAT

Lo mismo que en el ámbito internacional, las Normas Mexicanas sobre la calidad del aire disponen que debe asegurarse el criterio de que debe considerarse que está completo cuando una evaluación cumpla con por lo menos un 75 por ciento de datos efectivamente validados para evaluar la calidad del aire, según los términos establecidos en una norma o guía recomendadas. En ese sentido, en el Artículo 135 de la Ley Estatal de Salud del Estado de Puebla se estipula que la Secretaría de la Secretaría de Salud del Estado debe dar seguimiento de manera sistemática y

permanente a una investigación sobre los riesgos y daños a la salud pública que genere la contaminación ambiental.

Para cada contaminante criterio se debe seguir de manera particular un procedimiento en base al uso y aplicación de la normatividad, lo que incluye desde una validación preliminar de los datos, hasta el cumplimiento de un proceso de completación (es decir, que estén completos) de datos; esto último se refiere a la mínima cantidad de datos requeridos para elaborar un análisis representativo en términos estadísticos. Por lo demás, ese mismo criterio ha llegado a aplicarse en situaciones que buscan evaluar una tendencia en términos estadísticos sobre determinada concentración o indicadores de calidad del aire (SEMARNAT, 2008).

Para los contaminantes criterio existen límites permisibles que están descritos en las Normas Oficiales Mexicanas, las cuales están sujetas a una revisarse de manera periódica para considerar la información más reciente sobre las afectaciones en cuestiones de salud y sobre la gestión de la calidad del aire.

Son dos tipos de normas las utilizadas para monitorear la calidad del aire: las primeras son las NOM en materia de salud ambiental, la cuales precisan los límites que se permiten para los llamados contaminantes criterios; las otras son las NOM técnicas, las cuales definen los métodos para medir los contaminantes criterio.

Las NOM en materia de salud vigentes son las siguientes:

Tabla 1.3.1. NOM en materia de salud

Contaminante	NOM	Publicación	Descripción
Dióxido de azufre (SO ₂)	NOM-022-SSA1	8 de septiembre de 2010	.110 ppm, máximo promedio de 24 hr .200 ppm, máximo anual de 8 hr .025 ppm, promedio anual

Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1	23 de diciembre de 1994	11 ppm, máximo anual.
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSA1	23 de diciembre de 1994	.210 ppm, promedio horario
Ozono (O ₃)	NOM-020-SSA1	19 de agosto de 2014	.095 ppm, promedio horario .070 ppm, máximo anual
PM ₁₀	NOM-025-SSA1	20 de agosto de 2014	75µg/m ³ promedio 24 hr 40 µg/m ³ promedio anual
PM _{2.5}	NOM-025-SSA1	20 de agosto de 2014	45 µg/m ³ promedio 24 hr 12 µg/m ³ promedio anual

Fuente: SEMARNAT. 2007

Las definiciones de los métodos de definición recomendados se encuentran contenidos en las NOM técnicas, las cuales se utilizan para el monitoreo de los contaminantes criterios, mismos que pueden ser equivalentes o de referencia. Por lo general, las NOM proponen estos métodos en correspondencia con los emitidos por Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, como también se le conoce por sus siglas en inglés), y cuando en una NOM cuando no existe una NOM con definiciones sobre un contaminante criterio, suele utilizarse la recomendación de la US EPA.

Las NOM técnicas vigentes se describen a continuación:

Tabla 1.3.2. NOM métodos de medición.

Contaminante	NOM	Publicación	Descripción
Dióxido de azufre (SO ₂)	NOM-038-SEMARNAT-1993	18 de octubre de 1993	Método equivalente. Fluorescencia ultravioleta
Monóxido de carbono (CO)	NOM-034-SEMARNAT-1993	18 de octubre de 1993	Método de referencia: absorción en infrarrojo
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-037-SEMARNAT-1993	18 de octubre de 1993	Método de referencia: quimioluminiscencia en fase gaseosa
Ozono (O ₃)	NOM-036-SEMARNAT-1993	18 de octubre de 1993	Método equivalente: fotometría ultravioleta
PM ₁₀	No se cuentan con un NOM de métodos de medición, sin embargo se recomienda el método equivalente a la US EPA		Gravimetría o atenuación de radiación beta.

PM _{2.5}	No se cuentan con un NOM de métodos de medición, sin embargo se recomienda el método equivalente a la US EPA	Gravimetría o atenuación de radiación beta.
-------------------	--	---

Fuente: SEMARNAT. 2007

Además de la ya citadas, existen en la actualidad otras dos normas, una que contempla los requerimientos para formular el índice de calidad del aire, la cual fue publicada en el año 2006 por el Gobierno del Distrito Federal (hoy en día Ciudad de México), y otra cuya función es regular el monitoreo de la calidad del aire, a través del establecimiento y operación de monitoreos específicos, misma que el gobierno federal publicó en el año 2012.

Tabla 1.3.3. NOM IMECA y operación de monitoreo.

Norma	Publicación	Descripción
NADF-009-AIRE-2006	29 de noviembre de 2006	Establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire.
NOM-156-SEMARNAT-2012	16 de julio de 2012	Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

Fuente: SEMARNAT. 2007

Material Particulado

1.3. Clasificación de partículas

Las clasificaciones de las partículas se agrupan de tres maneras: según su tamaño, de acuerdo a su proceso de formación y según su composición

a) Clasificación por tamaño

En la clasificación por tamaño tienen un diámetro interno llamado diámetro aerodinámico, esto define su tamaño y se expresa en micrómetros (μm). Según las técnicas para medirlas y el sitio donde se depositan en el aparato respiratorio y, por

estas características, las partículas pueden llegar a clasificarse en Partículas Suspendidas Totales (PST), Partículas de la Fracción Gruesa Torácica (PM10), Partículas Finas (PM2.5) y Partículas Ultra Finas (UFP) (Tabla 2.1).

Tabla 1.4.1. Clasificación de las partículas según su tamaño

Fracción del material particulado	Abreviatura	Diámetro aerodinámico
Partículas suspendidas totales	PST	$\leq 25-45 \mu\text{m}$
Partículas torácicas, fracción gruesa	PM10	$\leq 10-2.5 \mu\text{m}$
Partículas torácicas, fracción fina	PM2.5	$< 2.5 \mu\text{m}$
Partículas Ultra Finas	UFP	$< 0.1 \mu\text{m}$

Fuente: EPA (2008)

Partículas Suspendidas Totales (PST/TSP)

Este caso, las partículas tienen con una gran diversidad de dimensiones, mismas que pueden ingresar o no ingresar al sistema respiratorio humano. Al respecto, hay controversia en relación al diámetro aerodinámico de este rango. Durante la década de los años setentas, la Environmental Protection Agency de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) estableció que las Partículas Suspendidas Totales se localizan en un rango igual o menor a los $25 \mu\text{m}$ y en ningún caso mayor a $45 \mu\text{m}$ con base en la capacidad y la precisión de los aparatos muestreadores gravimétricos de alto volumen que existían durante esa época (EPA, 2008). En años más recientes, algunos autores consideran que el diámetro aerodinámico más grande de estas partículas llega a alcanzar los $100 \mu\text{m}$ (Pérez., et al 2010).

Cabe mencionar, que el rango anteriormente citado se midió de manera extensiva en los Estados Unidos de América y en algunas ciudades de Europa durante el período comprendido entre los años setentas y ochentas del siglo pasado; aun así, en la actualidad todavía no se considera todavía como un buen indicador de los efectos contaminantes en el sistema respiratorio del ser humano, ya que algunas partículas no llegan a ingresar en su organismo (WHO., 2000).

Empero, la presencia de las Partículas Suspendidas Totales puede llegar a provocar diversos efectos ambientales, entre ellos la modificación del proceso de fotosíntesis de algunas plantas ya que disminuye la superficie que queda expuesta a la radiación solar porque disminuye la visibilidad.

Sin embargo, la presencia de las PST puede generar otros efectos ambientales, como la modificación de la actividad fotosintética en algunas plantas debido a la disminución de la superficie expuesta a la radiación solar, o la disminución de la visibilidad.

PM₁₀

Las partículas torácicas de la fracción gruesa (coarse particles, en inglés) incluyen el rango de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 μm hasta antes de los 2.5 μm . Estas partículas en su mayoría provienen de efectos como el polvo del suelo o por actividades como agricultura; en el caso de las ciudades, esto puede originarse por almacenaje o uso de carbón, escombros por trabajos de construcción y el polvo de autopistas o carreteras (Araujo., et al 2011).

PM_{2.5}

La llamada fracción fina (fine particles, en inglés) contempla las partículas torácicas cuyo tamaño es igual o menor a 2.5 μm . Cabe decir, que la mayor parte de estas partículas proceden de actividades humanas (antropogénicas), como el hollín, sulfatos y nitratos que son emitidos desde centrales eléctricas, refinerías, tubos de escape y emisiones por desgaste de frenos de automóviles e incendios forestales (Araujo., et al 2011).

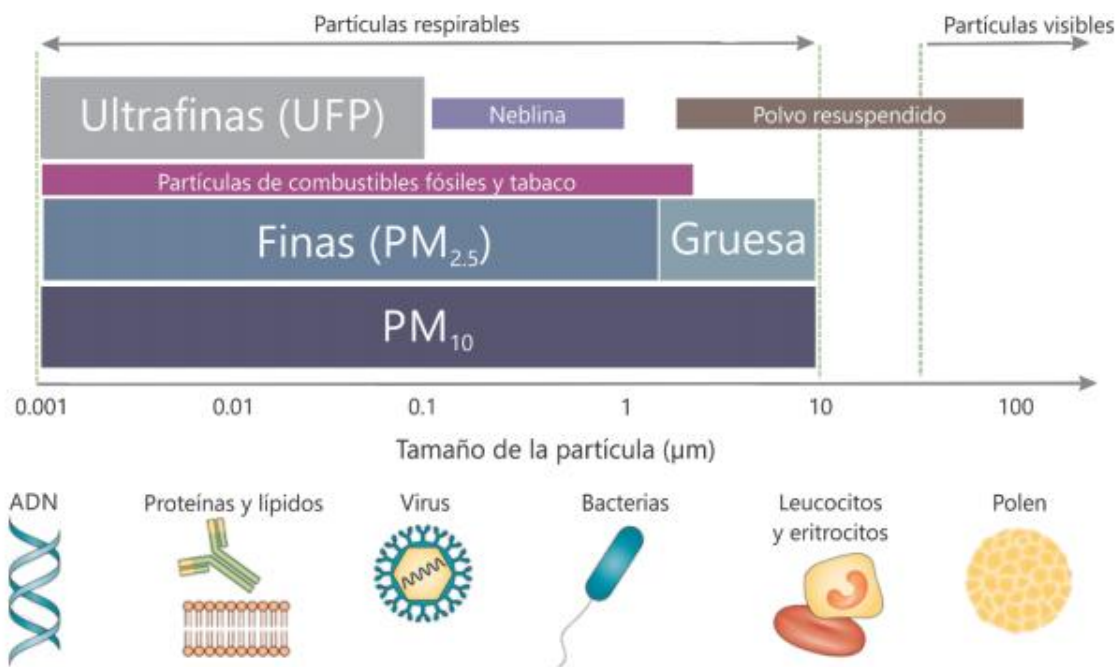
Partículas Ultrafinas (UFP)

En el caso de las partículas ultrafinas (ultrafine particles, en inglés), se trata de las que tienen un tamaño menor a 0.1 μm y pueden llegar hasta pocos nanómetros. Estas partículas se generan, en gran parte, por tubos de escape de fuentes vehículos motorizados (automóviles, motocicletas, etcétera), sobre todo de los que utilizan diésel, como por ejemplo autobuses, camiones de volteo y aviones. Aún

cuando participan poco en la masa total del material particulado, estos vehículos dominan por sus grandes dimensiones (HEI., et al 2013).

Debido a que pueden ingresar a partes más profundas del aparato respiratorio, como por ejemplo los vasos sanguíneos, estas partículas son consideradas de alta peligrosidad, pues además de mucho más tóxicas y reactivas que las partículas de mayor tamaño, tienen un área de superficie mayor por unidad de masa (HEI., et al 2013). (Figura 2.1).

Figura 1.4.1 Clasificación de las partículas según su diámetro aerodinámico



Fuente: Environmental factors in cardiovascular disease NATURE. (Cosselman., et al 2015).

Las partículas tienen una distribución log-normal, cuando el logaritmo de la misma sigue una distribución Gaussiana o normal. La modalidad de dichas distribuciones estaría asociada con los mecanismos de formación de las mismas.

b) Clasificación por formación

Las partículas igual se clasifican en tres modos según su formación: **modo de nucleación** con un diámetro medio aproximado de 0.018 µm; **modo de**

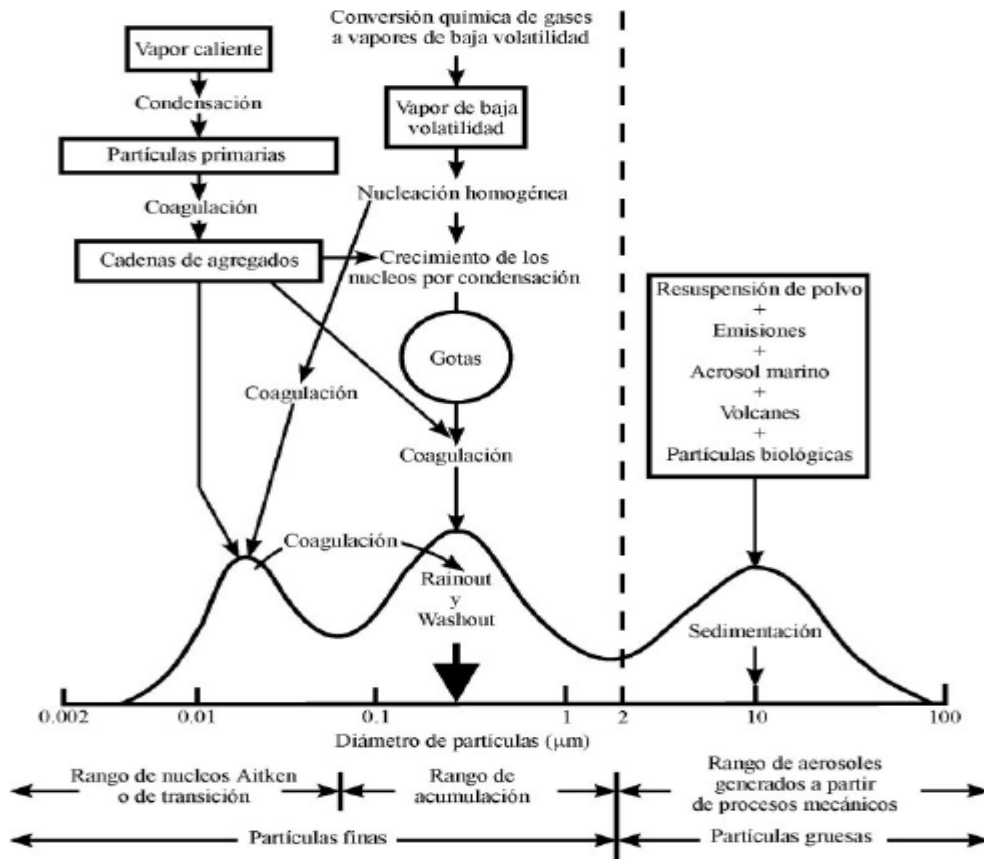
acumulación con $0.21 \mu\text{m}$ y **modo grueso** con $4.9 \mu\text{m}$. En la figura 2.1, se representan esquemáticamente los tres rangos así como sus principales procesos de formación.

Partículas en el rango de **nucleación o Aitken**, tienen un diámetro inferior a los $0.08 \mu\text{m}$ y también se les conoce como **partículas ultra finas**. Estas se forman en procesos de combustión, por condensación de gases súper saturados a partículas, las cuales forman agregados por coagulación. Este proceso aumenta el tamaño de la partícula, aunque no tanto como para poder considerarlas en el rango de acumulación (Kalberer., et al 2006).

El modo de **acumulación** está constituido por partículas con diámetros comprendidos entre los $0.08 \mu\text{m}$ y aproximadamente $2 \mu\text{m}$. Estas partículas se crean a través de procesos de conversión de gas a partícula mediante reacciones químicas, entre ellas: por condensación de especies volátiles, por coagulación de partículas más pequeñas y en menor medida por partículas de polvo muy finamente divididas (Kalberer., et al 2006). Las partículas por condensación tienen un ritmo de crecimiento que disminuye al incrementarse su tamaño, pero el crecimiento sigue hasta producir su eliminación, por lo común uno o dos días más tarde. De este modo, no alcanzan a extender más de unos pocos micrómetros de diámetro y continúa separado del modo grueso.

El llamado grueso se forma por partículas gruesas, principalmente; o sea por resuspensión de polvo, aerosol marino y por cuestiones de orden biológico como esporas o polen. En cuanto a su tamaño, puede considerarse relativamente grande y desaparece del entorno atmosférico por efectos de sedimentación, salvo durante los días en que hace mucho viento durante los que se presenta un aporte de partículas de tamaños por resuspensión. Cabe mencionar, que estas partículas gruesas igual pueden eliminarse de la atmósfera por efectos de lavado debido a las lluvias (Kalberer., et al 2006).

Figura 1.4.2 Esquema de distribución y tamaños de partículas.



Fuente: Esquema de la distribución de partículas y sus principales procesos de formación y eliminación (adaptado de Whitby., et al 1993)

c) Clasificación por Composición

Esta clasificación se entiende por aquellas partículas o material particulado atmosférico que comprenden cualquier sustancia, excepto el agua pura, que está presente en la atmósfera ya sea por estado líquido o sólido en condiciones de normalidad y su tamaño se presenta entre los 0.002 μm y los 100 μm de diámetro (Finlayson-pitts., et al 2002).

Por lo general, las palabras aerosol y partícula se usan de manera indistinta, aunque los aerosoles se especifican como son las suspensiones que tienen una relativa estabilidad de partículas sólidas y líquidas en un gas. Para establecer una

diferencia, entonces, se trata de la consideración que se añade del medio gaseoso que contienen las partículas.

Tratándose del material particulado, este se constituye por una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas con variable composición física y química. En el caso de las características físicas, se contempla que ejercen influencia tanto en su transporte, como en su tiempo de permanencia y la disponibilidad de deposición, tanto en el ambiente como en las vías respiratorias del ser humano, por lo que su composición química participa de manera directa en las afectaciones a la salud de las personas (Lozada et al., 2009).

Entre sus características físico-químicas, que son numerosas, que son determinantes en sus efectos sobre el medio ambiente, entre ellas el tamaño, número, forma, composición, índice de refracción, etcétera), una de las más importantes es el tamaño. En este caso, la determinación es esencial ya que, por una parte, otras propiedades que son importantes tratándose de las partículas, como son el volumen, la masa o velocidad de depósito gravitacional, dependen de esa característica, es decir, el tamaño. Entre los mecanismos principales de formación de partículas, es importante tener en cuenta que las partículas producen rangos determinados y definidos en cuanto al tamaño.

Generalmente, para considerar el tamaño de una partícula se refiere a su dimensión característica su radio o su diámetro, como si se trata de una forma esférica. En virtud de que las partículas presentan en su naturaleza, por lo general, formas bastante irregulares, su tamaño se expresa en término de diámetro, ya sea equivalente o efectivo, mismo que se relaciona más con cierta propiedad física que con alguna de tipo geométrico. Cuando se refiere a un diámetro equivalente, se trataría del diámetro de alguna propiedad determinada, que la partícula considerada de forma irregular (Baron y Willeke., et al 2013). A partir de lo anterior, es como se definen y se utilizan diversos diámetros efectivos.

Tratándose del material particulado, sus propiedades en mucho dependen de su origen. De este modo, las emisiones naturales o biogénicas son las provocadas por fenómenos de tipo natural, como es el caso de la re-suspensión del suelo y de la sal de mar, las emisiones que surgen de volcanes en erupción, los incendios, la que de biomasa y de las partículas derivadas de la degradación de compuestos que proceden de la vegetación. Las llamadas emisiones antropogénicas, por su parte, en su mayoría surgen de procesos mecánicos y de combustión. Estas contemplan, principalmente, las emisiones surgidas de actividades mecánicas y de la agricultura, en gran parte por el tráfico rodado y por los procesos de demolición y construcción, así como por el uso de combustibles domésticos y las que proceden de la degradación química por emisiones gaseosas antropogénicas o provocadas por el ser humano (Hallquist., et al 2009).

En cuanto a las propiedades de las partículas atmosféricas, se consideran muy variables términos de temporalidad y de espacio por los cambios que llegan a sufrir en la atmósfera. Más todavía, el material particulado atmosférico depende de factores climatológicos como temperatura, lluvia, humedad, radiación y recirculación del aire, así como de factores relacionados con la geografía, como pueden ser la topografía, proximidad a zonas áridas o costeras y/o cobertura del suelo, de una determinada región (Henze., et al 2008).

En cuanto a la composición química del material particulado, este se relaciona de manera profunda con factores diversos, como pueden ser su fuente, su tamaño y mecanismos de formación.

(tabla 1.4.2)

Tabla 1.4.2 relación con diferentes factores del material particulado

Factores	Categoría	Compuestos
<i>Fuente</i>	Origen natural	polvo mineral, emisiones marinas, erupciones volcánicas, productos de biomasa, materiales biológicos como fragmentos de plantas, polen, etc.
	Origen antropogénico	partículas minerales, derivadas de procesos de combustión y de procesos industriales
<i>Mecanismo de formación</i>	Primario	material particulado inorgánico, hidrocarburos policíclicos aromáticos, plaguicidas
	Secundario	compuestos semi-volátiles oxigenados (ácidos carboxílicos, peroxiacetilnitratos), oligómeros
<i>Tamaño</i>	Fracción gruesa	compuestos cristalinos (silice, magnesio, calcio, aluminio...), cloruro sódico, elementos biológicos primarios (polen, esporas, larvas de insectos...), cenizas de carbón
	Fracción fina	sulfatos, nitratos, componentes orgánicos, metales (plomo, hierro, cobre, níquel...), carbono elemental

Fuente: *universidad politécnica de valencia; caracterización de material particulado atmosférico generado en reactores fotoquímicos y procedentes de muestras ambientales, Esther M. Borrás 2013*

La fracción inorgánica con especies como el sulfato y el nitrato amónico es la que forma parte de la composición mayoritaria del material particulado. Empero, esta fracción orgánica también está formada por miles de compuestos, desde moléculas de minúsculo tamaño hasta sustancias polimérica con una gran masa molecular, ya sea en estado líquido o sólido, pero su contribución es bastante inferior (Hallquist., et al 2009).

Los nitratos orgánicos como los peroxiacetilnitratos, los alquilnitratos y diversos polímeros, así como los productos derivados de la degradación fotoquímica de compuestos naturales y sintéticos, son los compuestos mayoritarios. Se ha llegado a describir que muchos de esos compuestos poliméricos se originan de aldehídos de cadena corta, como es el caso del glioxal y el metilglioxal, que al ser monómeros significa que son compuestos que aparecen en la fase gaseosa, aunque en presencia de partículas forman polímeros. Aun cuando la contribución de estas especies continúa siendo desconocida experimentalmente, se calcula que aproximadamente un 75 por ciento forma parte de la fracción orgánica (Finlayson-pitts., et al 2002).

Se le llama **nucleación** a la formación de una nueva partícula. Por lo general, se trata de partículas que son generadas desde compuestos que se encuentran en fase gaseosa como H_2SO_4 , NH_3 , así como los denominados compuestos orgánicos volátiles. En cuanto al tamaño de este tipo de partículas, por lo común tiende a ser menor a 1nm y su período de vida es bastante reducido, ya que suelen crecer de manera bastante rápida. En este caso, se generan mediante diversos mecanismos en relación con la temperatura, la humedad y la forma en que se concentran los gases precursores. Respecto a la denominada **nucleación binaria**, esta sucede cuando la presión de vapor de la mezcla de ácido sulfúrico/agua ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$) es mayor a la presión de vapor de saturación, por lo que se trata de un mecanismo minoritario. Por su parte, la **nucleación ternaria** llega a producirse con la aparición de la especie NH_3 , misma que incide sobre la presión de vapor de la mezcla $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ (Holmes., et al 2007). Por lo que se refiere a la **nucleación inducida por iones**, es cuando las cargas de partículas generan una interacción de diversos compuestos a partir de las fuerzas electrostáticas que así se establecen. Por último, los llamados procesos de **nucleación que implican los compuestos orgánicos** se originan por reacciones fotoquímicas en los momentos que éstas alcanzan su punto de sobresaturación. En cuanto a la existencia de compuestos de suspensión, éstos actúan como semillas de nucleación (identificados como aerosol seeds) y llegan a actuar como sustrato cuando pueden condensar los compuestos en fase gaseosa (Kroll., et al 2007).

Es a través de la coagulación con otras partículas como se produce el aumento de las partículas y/o la condensación de la fase gaseosa en la superficie de las partículas que ya se encuentran nucleadas. Respecto a la **coagulación, esta se trata de** la colisión de partículas entre si reduciendo la cantidad de partículas, pero siguen conservando la totalidad de la masa. Entre partículas de distintos tamaños, este proceso es más eficaz ya que las partículas de mayor tamaño suministran una superficie bastante mayor para la interacción, mientras que las partículas de menor tamaño poseen una mayor tasa de difusión. En términos normales, la condensación deriva del proceso de partición de especies orgánicas e inorgánicas, misma que se encuentra entre la fase gaseosa y particulada, lo que resulta de la diferencia de

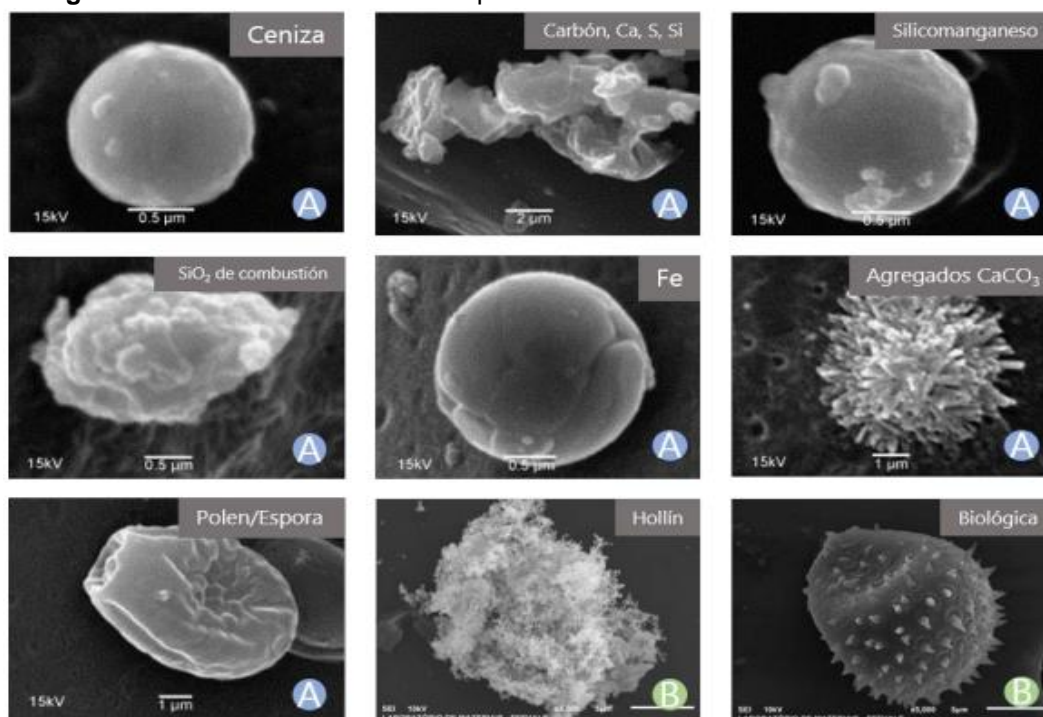
concentración entre el ambiente y las concentraciones de equilibrio. Se considera que es función de la presión vapor del compuesto y de la superficie de la partícula (Curtis., et al 2006).

El material particulado contiene numerosos compuestos orgánicos e inorgánicos y se puede clasificar en diferentes categorías (Gieré., et al 2010)

- Del tipo y uso de los suelos, es como depende el **material mineral**, mismo que llega a variar de unas zonas a otras. Entre sus principales materiales, aparecen los cuarzos, fosfatos, sulfatos y óxidos metálicos. Por lo común, son de origen natural y estas partículas se emiten de forma primaria.
- Respecto al **material marino**, este proviene de la re-suspensión del material que se origina de los mares y de los océanos, en gran parte compuesto por la sal marina (NaCl), entre lo que se encuentran cloruros, sulfatos y productos derivados de la descomposición biogénica de algas y plancton.
- Por su parte, el **material compuesto de carbono** se integra por las partículas compuestas con predominancia de C, H, O, así como cantidades más pequeñas de diversos elementos. A éste material le corresponde el llamado carbono elemental, así como el carbono orgánico y al igual que a todos los compuestos que proceden de procesos de degradación fotoquímica. Estas partículas se originan tanto de situaciones biogénicas como antropogénicas, es decir, de actividades humanas y es alrededor del 5 por ciento de la totalidad de la masa, sin embargo se caracteriza porque aparece de manera preferente en ambientes urbanos al igual que en ambientes industriales y tiende a provocar severas afectaciones a la salud humana y al entorno ambiental.
- Por lo que toca a el **material derivado del azufre**, este llega a ser de origen biogénico y antrópico, ya sea primario como secundario. En este caso, es posible englobar a los sulfatos orgánicos e inorgánicos.

- En cuanto al **material derivado del nitrógeno**, su origen puede ser **biogénico** (suelos, combustión de biomasa, etcétera) o antrópico (combustibles fósiles, agricultura, ganadería, etcétera). Se compone mayormente del nitrato, sobre todo del nitrato amónico, que se origina de la reacción del ácido nítrico, mismo que, a su vez, procede de la oxidación de NO_x , y del amoníaco.
- Los **bioaerosoles**, por su parte, pueden ser polen, esporas, virus, bacterias y agregados biológicos, lo mismo que los productos y sub productos que se unen a partículas no biológicas. Estos bioaerosoles poseen un impacto considerable sobre la toxicidad y en el clima, donde llegan a actuar como núcleos de condensación potencialmente iniciadores de precipitaciones.

Figura 1.4.3 Diversidad del material particulado



Fuente: *Brazilian Journal of Biology* Modificado de (Alves et al. 2015)

1.4.2. Efectos de las Partículas –

En la atmósfera, la presencia de material particulado tiene su parte fundamental en los procesos de intercambio con la litósfera, la biósfera y la hidrósfera, a través de la constante transportación de diversos materiales, entre ellos el polen, lo que permite que se reproduzcan especies vegetales.

Igualmente, se pueden encontrar virus y diversos microorganismos en las partículas, los que pueden utilizarlas como vehículos para desplazarse y reproducirse; algunos polvos que surgen de la erosión del suelo, así como cenizas y otras partículas litogénicas que son parte de los ciclos bioquímicos que suceden en el planeta.

Por la presencia de material particulado, otros procesos se relacionan de manera directa con el intercambio de agua. En este caso, la higroscopicidad es la capacidad que tiene el material particulado de absorber agua en su estado líquido o de vapor. Por ejemplo, esta propiedad se relaciona con su aumento en condiciones húmedas, originando así que, a mayor humedad relativa, la partícula tendrá más capacidad de formar gotas en las nubes.

Las partículas atmosféricas por lo general envejecen en las nubes, mismas que se forman por la condensación de vapor de agua en las partículas ya preexistentes, las cuales son conocidas como núcleos de condensación de las nubes y como núcleos de hielo, según sea el caso. Las moléculas orgánicas tienen la capacidad de influir en la higroscopicidad del material particulado e

El envejecimiento de las partículas atmosféricas generalmente se produce en las nubes, que se forman por condensación de vapor de agua en las partículas preexistentes, conocidas como núcleos de condensación de las nubes y núcleos de hielo. Las moléculas orgánicas pueden influir en la higroscopicidad del material particulado, ya que tienen efectos en la actividad del agua como en la tensión superficial.

En su mayoría, las nubes se re-evaporan y es entonces cuando las partículas modificadas se liberan nuevamente en forma de gotas de la nube de evaporación o, según sea el caso, como cristales de hielo (nube de procesamiento). Empero, estas partículas de la nube crean precipitaciones hasta llegar a la superficie del

planeta; además de los núcleos de condensación, otras partículas son rescatadas en el trayecto a la superficie terrestre y se alejan de la atmósfera (Baltensperfer., et al 2015).

El material particulado provoca **efectos radiactivos** que tienden a afectar el calentamiento del planeta, con un balance que puede ser de energía final positivo (por su contribución al calentamiento) o que puede ser negativo (por su contribución al enfriamiento), de acuerdo a su composición.

Podemos citar como ejemplo, que las partículas que son ricas en sulfatos, nitratos, carbono orgánico o minerales provocan efectos negativos, en tanto que el carbono elemental provoca efectos positivos; estos pueden tienden a ser directos, ya que tienen la capacidad de absorber o de dispersar la radiación, o pueden ser indirectos, pues son capaces de formar las nubes que, por su parte, crean efectos de reflexión de la radiación (Holmes., et al 2007).

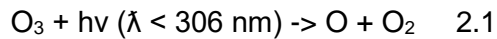
1.4.3. Comportamiento de las partículas

En general, como ya se había mencionado, los llamados componentes orgánicos que son de origen secundario y que más abundan en las partículas son los sulfatos, seguidos de los nitratos y los cloruros. Se considera que los compuestos inorgánicos secundarios que con más frecuencia aparecen en el aerosol atmosférico, son el ácido sulfúrico solo o combinado, formando sulfato amónico $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$, bisulfato amónico (NH_4SO_4) y el nitrato amónico (NH_4NO_3) (Fuchs., et al 2010).

Los sulfatos se forman a partir del SO_2 , el cual puede ser emitido directamente a la atmósfera de forma natural, como por ejemplo de las emisiones volcánicas, o se puede formar por reacciones en las que intervienen radicales hidroxilo OH y otros compuestos que contienen azufre procedentes del océano o de la corteza terrestre y de las plantas como pueden ser: H_2S , DMS (dimetilsulfuro), CS_2 entre otros.

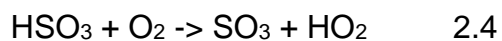
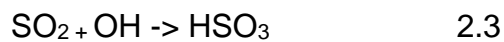
Los sulfatos se originan a partir de la oxidación del SO_2 a ácido sulfúrico H_2SO_4 , seguida por un proceso de neutralización por amoníaco NH_3 . Además este proceso de neutralización es progresivo, por lo que pueden aparecer mezcladas en una misma muestra de aire una serie de sustancias distintas (Fuchs., et al 2010).

En los procesos de oxidación del SO₂ a H₂SO₄ en fase gas (reacciones homogéneas), ésta se produce fundamentalmente por efecto del radical hidroxilo OH. En estas reacciones interviene la luz del sol, puesto que el radical OH es producido foto químicamente por la acción de la radiación solar sobre el O₃ y otros compuestos gaseosos secundarios (HNO₂, H₂O₂).



Por ello la oxidación presenta variaciones diarias y estacionales por el irregular ritmo de formación de este radical. Estudios realizados desde los 90 indican que los ritmos máximos teóricos de conversión del SO₂ a H₂SO₄, varían entre 34 y 49% SO₂/24h en primavera-verano y entre 3.1 y 4.7% SO₂/24h en los meses de otoño-invierno, lo cual hasta la fecha se sigue usando como referencia.

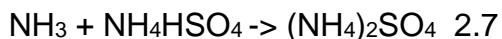
El mecanismo de oxidación en fase gas del SO₂ a H₂SO₄ por efecto del radical hidroxilo OH es el siguiente:



El ácido sulfúrico en fase gas forma rápidamente gotas por nucleación y crece condensando vapor de agua, por coalescencia con otras gotas por efecto del movimiento browniano y por coagulación con partículas de aerosol ya existentes. De este modo se alcanza una distribución de partículas estable con tamaños variados comprendidos en los rangos de nucleación y acumulación.

Una vez formado el ácido sulfúrico, bien por un proceso u otro, si hay NH₃ presente se producirá la formación de sulfato amónico (NH₄)₂SO₄. Este es quizá el compuesto

secundario inorgánico más abundante en la atmosfera y uno de los más estables. Se encuentra en el rango de tamaño de partículas finas (Fuchs., et al 2010).



Cabe mencionar que el NH_3 es el compuesto alcalino más abundante e importante presente en la atmosfera y el papel que juega en la química de los aerosoles es fundamental. Es emitido en estado gaseoso principalmente por efecto de la materia orgánica y también por la combustión de los combustibles fósiles, aunque a menor escala. Es extremadamente soluble en agua y es muy reactivo con los compuestos ácidos, por lo cual es eliminado muy eficientemente de la atmosfera al interactuar con partículas acuosas y ácidas (Fuchs., et al 2010).

Los nitratos son generados a partir de óxidos de nitrógeno NO_x , estos pueden ser emitidos por fuentes naturales o antropogénicas. La fuente natural más importante es la actividad bacteriana en el suelo que causa la descomposición de compuestos nitrogenados. De igual manera, la producción de óxidos de nitrógeno puede derivar de la actividad volcánica debido al elevado calor que se produce, debido a que durante el proceso la combustión a altas temperaturas tanto el nitrógeno como el oxígeno del aire reaccionan para formar NO y NO_2 .

Con base en lo anteriormente citado, es comprensible que puede ser muy compleja la dinámica de las partículas, pues sus interacciones se realizan de forma bastante diversa, en lo que participan factores meteorológicos que inciden en su manera de comportarse; entre ellos, se pueden enunciar las precipitaciones, la temperatura, la velocidad y dirección del viento, al igual que todos estos factores combinados durante las diferentes estaciones del año.

- Temperatura

De manera general, se puede mencionar que puede mejorar su calidad en temperaturas bajas en el aire, ya que la emisión de muchos contaminantes puede reducir, aunque ello sucede de manera principal en los gases. Por otro lado, el factor anteriormente citado puede llegar a influir en la movilidad de las partículas ya que la termoforesis (gradiente térmico), mediante la cual se desplazan de una región caliente a una región fría (Janhäll., et al 2015), aunque en la actualidad la influencia de este aún no es comprendida en su totalidad.

Relacionado con lo anterior, las partículas durante la presencia de inversiones térmicas aumentan su período de residencia y, por tanto, su probabilidad de ser depositadas.

- Precipitación

La remoción de contaminantes en la atmósfera se lleva a cabo mediante procesos naturales de deposición, donde las gotas absorben partículas que son transportadas a superficies de contacto en la corteza del planeta. Debido a ello, la concentración de partículas puede reducirse en el medio aire cuando hay precipitaciones.

- Dirección y Velocidad del Viento

El material particulado puede ser movilizado por la velocidad y la dirección del viento, lo que influye en el tiempo que reside en la atmósfera.

La dirección, por su parte, puede hacer entendible el origen y destino de los contaminantes, de tal modo que es posible localizar las principales fuentes de emisión y las áreas que podrían estar expuestas a ellos.

Así mismo, las partículas pueden cambiar su velocidad y trayectoria debido al llamado efecto cañón urbano que se forma en las avenidas con edificaciones elevadas o al cruzar otros obstáculos como las barreras de vegetación (Janhäll, 2015).

- Temporada del año

En el transcurso del año, las variaciones del clima pueden crear efectos combinados con capacidad de influir en la dinámica de las partículas en la atmósfera.

Es posible que se presentes aumentos en la concentración de contaminantes en la temporada fría y seca (invierno) de un área o territorio, ya que los gases y las partículas llegan a dispersarse de forma más lentas con temperaturas bajas, y con la ausencia de humedad se provoca la lentitud de los procesos de limpieza de los contaminantes en la atmósfera (Díaz et al., 1999).

Ante la falta de viento que suele presentarse durante las temporadas cálidas y secas (primavera), de igual manera pueden incrementarse las concentraciones, ya que no existen flujos con capacidad de dispersar los contaminantes.

1.4.4 Contaminación de aire en interiores

En cuanto a la contaminación del aire en interiores es un tema que ha tomado relevancia en los últimos años, debido a que cada vez son más las poblaciones afectadas por este tipo de contaminación.

Ya que se han vertido los contaminantes al aire, o una vez que se han formado en el mismo, de ningún modo es evitable la exposición. Pero esto no sucede de la misma manera en otros medios como el suelo, el agua o los alimentos y, por este motivo, es difícil encontrar grupos no expuestos.

Puede ser diferente de manera considerable la exposición del ambiente exterior de la del ambiente interior, esto se debe a la presencia de fuentes interiores, a la deposición y a los distintos tipos de ventilación. Empero, en los lugares donde no existen fuentes interiores significativas, viene determinada la calidad del aire interior, de una importante manera, debido a las concentraciones en el exterior (Orozco., et al 2003).

La Agencia de Protección Ambiental (EPA., 2014) realizó diversos estudios que demostraron que los niveles de contaminación en el interior pueden ser superiores hasta en 5 veces que en el exterior. Dichos niveles pueden provocar daños a la

salud, sobre todo en los menores de edad, con afectaciones que van desde el sistema respiratorio e incluso cambios en el rendimiento escolar.

Poco se conoce sobre la necesidad de un control de calidad del aire en interiores y sus potenciales afectaciones para la salud de las personas. En la mayor parte de los casos, los interiores usan la ventilación mecánica, como los sistemas de refrigeración con aire acondicionado, en vez de los protocolos establecidos para ventilar, lo que no permite la renovación del aire. Lo anteriormente expuesto, expone la necesidad de tener un mejor control de la calidad del aire en interiores, así como más información para los usuarios y los responsables, sobre todo para la protección a su salud.

La calidad del ambiente en interiores, tanto como disciplina científica como sector de actividad económica, empieza a construirse como una realidad en España y otras naciones más desarrolladas, en lo que participan organismos públicos y privados.

Abundando en el tema, la Calidad del Ambiente Interior con (con las siglas IEQ en inglés), se usa para hacer una descripción sobre los problemas que suceden en inmuebles o edificios que no son de tipo industrial, en lo que pueden incluirse oficinas, instalaciones o centros comerciales, planteles escolares y vehículos de combustión interna, por citar algunos (Haverinen., et al 2012).

Quienes utilizan determinados espacios han llegado a vincular afectaciones a su salud y bienestar con el tiempo que permanecen en dichas instalaciones y lo vinculan a la contaminación del aire, sea de tipo químico, microbiológico, material particulado (PM) o, incluso, factores de tipo físico como puede ser el ruido. En los hechos, las anteriormente mencionadas son las causas más recurrentes de problemas en un ambiente interior, pero igual puede ocurrir que intervengan factores de tipo ergonómico y/o psicológico. Todos esos factores, en conjunto, son la potencial materialización del denominado edificio enfermo (Guarro., et al 2006).

Empero, en ambientes construidos la calidad del aire cambia de manera constante debido a la interacción de ciertos elementos físicos como llegan a ser el viento, la temperatura, los ruidos, la radiación solar, etcétera; igual pueden interactuar

factores químicos, lo mismo que compuestos y/o sustancias de tipo orgánico e inorgánico, al igual que algunos agentes de tipo biológico. Lo anterior, explica que puede existir una mezcla de diversos contaminantes y, por esa situación, es difícil determinar la clase de riesgos que implican para la salud. Más todavía, aún no se determina la existencia de un “ambiente interior tipo”.

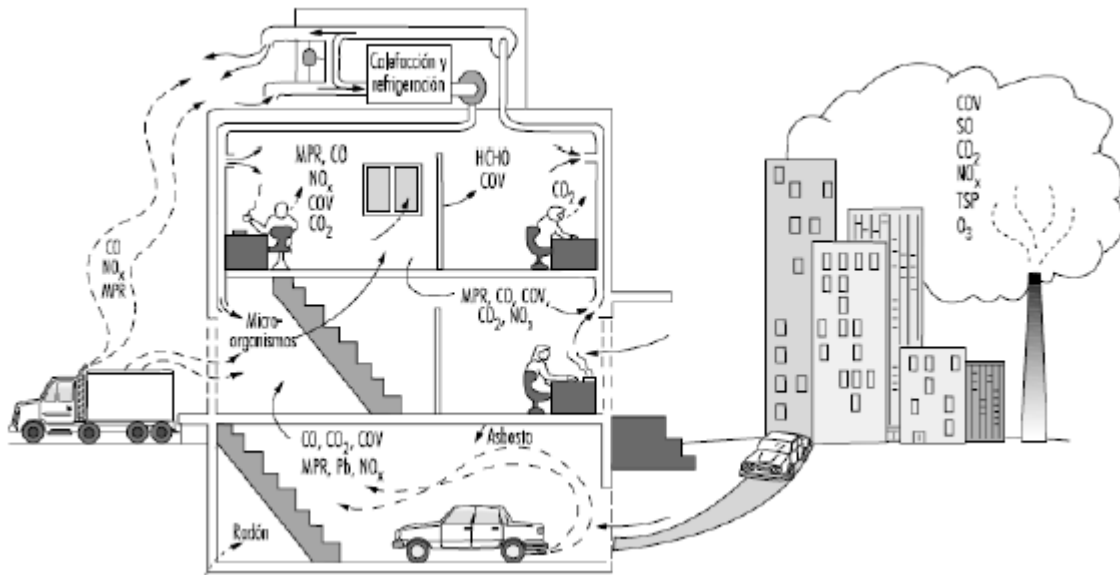
Varios estudios del Comité Científico de los Riesgos Sanitarios y Medioambientales (CCRSM) han llegado a exponer que en un ambiente interior se puede llegar a contener una cantidad superior a 900 sustancias químicas, al igual que partículas y materiales de tipo biológico con potenciales afectaciones para la salud humana y, así mismo, dichos estudios contemplan que factores como la ventilación, las condiciones de limpieza e higiene, las dimensiones y características del edificio, así como los productos que usan en las casas, los hábitos y costumbres, lo mismo que el ambiente exterior y el clima llegan a influir en la calidad del aire interior (Varela., et al 2010).

De igual manera, factores como una escasa ventilación y la humedad pueden incrementar la contaminación del aire interior.

Es sabido que algunas sustancias químicas que emiten productos para el hogar y por aparatos electrodomésticos pueden provocar irritación en ojos, nariz y garganta. Empero, aun no existe información suficiente sobre los efectos a la salud, como cáncer o en la capacidad reproductiva, que provocan muchas de las sustancias químicas que se presentan en el aire interior, luego de una exposición a largo plazo.

Son motivo de especial preocupación los productos de combustión que se utilizan en sistemas de calefacción y otros aparatos electrodomésticos que usan gas, madera o combustible, por las emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) y material particulado que se condensa (PM).

FIGURA 1.4.4: Comportamiento de contaminantes y su relación en interiores



Fuente: Enciclopedia de la salud 44

Los efectos a la salud que provocan los contaminantes de manera individual y que han sido descubiertos, son conocimientos que no necesariamente permiten sacar conclusiones sobre los efectos que podrían provocar las mezclas. De hecho, las diversas sustancias químicas son capaces de interactuar entre ellas mismas y, por tanto, provocar afectaciones adversas mayores (o menores) a los efectos individuales que una sola sustancia química. Hasta ahora, es poco lo que se sabe acerca de los efectos combinados que provocan los contaminantes del aire interior. Es rara la posibilidad de evaluar los riesgos que consideren las consecuencias de la exposición combinada y los efectos que se acumulan del aire interior (Varela., et al 2010).

La Calidad del Ambiente Interior con (con las siglas IEQ en inglés) incluye la calidad del aire interior (IAQ, indoor air quality, en inglés), la cual depende de varias condiciones como: calidad del aire exterior, compartimentación de los interiores, las fuentes de contaminación interiores (que contemplan desechos de tipo metabólico y productos que usan las personas en los interiores); diseño del clima artificial o aire acondicionado, en caso de que exista, así como las formas en que funciona o se le

da mantenimiento; humedad, temperatura y movimiento del aire, lo mismo que la percepción sensorial, en concreto de los olores (Bartual., et al 2002).

COMPONENTES DEL MEDIO INTERNO

Varios elementos que forman parte el ambiente, además de que no se pueden eludir, son estrictamente necesarios para que se desarrolle la vida, como el oxígeno, la luz y la temperatura, por citar algunos. Además de la necesidad de conservarlos para el entorno del ser humano, es preciso mantenerlos en términos adecuados y, al mismo tiempo, tratar de evitar los agentes indeseables o dañinos que solemos llamar contaminantes. Identificamos como contaminantes a todos los agentes con presencia en el medio ambiente y que tiene el potencial de provocar efectos dañinos para el bienestar humano, incluyendo a su salud. En este concepto se contemplan diversas categorías de agentes con capacidad de provocar daños, sean de índole física, química o biológica (Rey., et al 2006).

- Los **contaminantes físicos** son aquellos que poseen diversas formas de energía que son generadas por fuentes concretas y que son capaces de provocar efectos indeseables a quienes se exponen a ellas. Este tipo de energías pueden ser de índole mecánica (como vibraciones o ruidos), electromagnéticas, térmicas, radiaciones ionizantes o no ionizantes (entre ellas las lumínicas), etcétera. Suelen derivar en efectos muy distintos entre sí y requieren, así también, aplicarse métodos de análisis y medidas muy particulares.

De igual manera, aunque pueden llegar a incidir a través del aire, no sucede en todos los casos, así que para considerarlos como contaminantes atmosféricos depende de si derivan de una vinculación a agentes químicos que les sirvan de soporte en ese medio, tal como sucede en la contaminación radioactiva.

- Se considera **contaminante químico** a toda aquella sustancia, orgánica o inorgánica, natural o sintética, que mediante una fabricación, manejo, transporte, almacenamiento o utilización, tiene la posibilidad de integrarse al medio ambiente en suficiente cantidad para provocar afectaciones o lesiones a la salud de los seres humanos que llegan a contactarse con ellas. Los contaminantes químicos son materia no viva (inerte), ya que de lo contrario se consideraría como un contaminante de tipo biológico. Los contaminantes químicos tienen la posibilidad de llegar a los alimentos, al agua o al aire.

Para la IAQ importan de manera especial los contaminantes químicos, los cuales son susceptibles de hacer presencia en el aire como moléculas individuales o como grupos de moléculas unidas. De acuerdo a la forma en que se presentan, tenemos:

Material particulado

- **Polvo:** este tipo de material surge de procesos físicos de disgregación de la materia. Aunque es amplio el tamaño de las partículas y puede variar entre 0,1 y 25 μ m. Los polvos pueden sufrir agregación (que viene siendo la unión de partículas pequeñas, para formar otras más grandes) mediante el efecto de fuerzas electrostáticas y se sedimentan por la fuerza de gravedad.
- **Humo:** Los procesos de combustión incompleta generan este tipo de partículas.
- **Humo metálico:** Las partículas metálicas son generadas mediante procesos de condensación del estado gaseoso, y parten de la sublimación o volatilización de un material metálico. Por lo común se acompaña de una reacción química, usualmente de oxidación. Este tipo de partículas sufren procesos de agregación.
- **Nieblas:** Se trata de pequeñas gotas de líquido que surgen a través de la condensación de un estado gaseoso o mediante la desintegración de un estado líquido. Su tamaño tiene un margen entre 0,01 a 10 μ m.

- Brumas: Son pequeñas gotas de líquido que se pueden ver relativamente fácil, surgen a través de la condensación de un estado gaseoso. Sus dimensiones varían entre 2 y 60µm.
- Gases. Se trata del estado físico normal de una sustancia que se encuentra en 25 °C y una presión de 760mm de Hg.
- Vapores. Es una sustancia en fase gaseosa, cuyo estado se encuentra ordinariamente sólido o líquido a 25°C y 760mm de Hg. de presión, pero cuya fase gaseosa pasa por la descompresión o el aumento de la temperatura.
- Contaminantes biológicos: Por lo general son parásitos (principalmente artrópodos), microorganismos infecciosos y alérgenos.

CONTAMINANTES DE ORIGEN INTERIOR.

Son los contaminantes de naturaleza química que pueden surgir del mismo medio interno; a partir de las siguientes fuentes de contaminación (WHO, 2002):

- Los seres humanos, como bioefluentes (por sus emisiones corporales), de manera especial el anhídrido carbónico.
- El trabajo que ejecutan las personas, entre ellos por el uso de equipo y utensilios de oficina, polvo que se barre, basuras y otros desechos.
- Productos como materiales de limpieza, insecticidas, pesticidas, desinfectantes, artículos de tratamiento para la madera, materiales para sacar brillo, máquinas para fotocopiado, artículos para maquillaje, aerosoles, humo de cigarro y superficies con polvo.
- Gases de combustiones: combustibles de tipo fuel de estufas, calderas de calefacción, chimeneas domésticas, calentadores, etcétera, especialmente aquellos sin salida hacia el exterior o que se encuentran en deficientes condiciones. Todos ellos emiten óxidos de carbono, óxidos nítricos, partículas, COV y SO₂.

- Los productos previamente allí existentes, entre los que se encuentran los tapices, alfombras, cortinas y superficies textiles, etcétera.

En la TABLA 1.4.4 se presentan los principales productos contaminantes.

TABLA 1.4.4 contaminantes químicos como contaminantes del medio interno

PRODUCTOS	ORIGEN
Ozono	Máquinas de Fotocopiado e impresoras
Mezcla de gases inorgánicos: como amoniaco, dióxido de azufre, etcétera.	Líquidos para limpiar cristales, así como lubricantes, combustiones y equipos de microfilmación.
Óxidos de carbono: estos productos tienen una muy diferente significación el dióxido del monóxido de carbono	Surgen de combustiones en atmósferas que carecen de oxígeno suficiente, y en espacios confinados influye una mala ventilación, como sucede al poner encender los automóviles en cocheras mal ventiladas, lo que puede provocar la muerte. También pueden originarse desde exterior y de tabacos encendidos.
Sulfuro de hidrógeno (SH ₂): Contaminante que niveles bajos produce un intenso olor y a más altos es irritante y/o asfixiante.	Es la descomposición de productos orgánicos que contienen azufre, y pueden entrar en edificios por los desagües mal sifonados.
Partículas.	Las partículas del aire interior generalmente se parecen a las que proceden del exterior, salvo la que se producen en el interior por combustiones en cocinas, calentadores y humo de cigarro, tóner de impresoras, de la piel y del papel o la combustión por uso de motores en interior de vehículos.
Fibras o partículas filamentosas (Schneider., et al 2003): Se han llegado a producir fibras de amianto y fibras de vidrio a partir de silicatos; en su mayor parte, las fibras de tipo mineral artificiales son silicatos amorfos.	El amianto es un grupo de fibras minerales que resisten al fuego y puede ser un buen aislante. Las fibras de vidrio han sustituido al asbesto. El 80 por ciento son fibras de cristal. En carros y edificios la principal fuente son los aislamientos. Salvo los filamentos de cristal, su inhalación es posiblemente cancerígena.

Compuestos orgánicos volátiles (COV): entre estos están la gasolina y disolventes. Incluyen hidrocarburos alifáticos, clorados y aromáticos; también aldehídos, éteres, cetonas, alcoholes y ácidos. También tricloroetileno, benceno y tolueno. Los compuestos orgánicos tienen carbono y algunos de los siguientes elementos: oxígeno, hidrógeno, azufre, nitrógeno, halógenos, silicio o fósforo que pueden coagularse con partículas en crecimiento para dar lugar a otros productos.	Surgen de aislamientos, cerámicas y otros recubrimientos para desinfectar, limpiacristales ambientadores, quitamanchas, desengrasantes, pulidores de suelos o de muebles, limpiadores, material de construcción, alfombras, fotocopiadoras, pegamentos, impermeabilizantes, pinturas, disolventes, lacas, cosméticos y perfumes, entre otros. También del alcanfor, productos de combustión, gasolina.
---	--

Productos	Origen
Isocianatos, tolueno, difenilmetano, hexametileno, naftalinas, etcétera.	Adhesivos, impermeabilizantes, revestimientos de difenilmetano, suelos, paredes y tabaco, entre otros. También del desprendimiento de formaldehído e isocianatos por muebles, alfombras, cortinas y material de construcción.
Ácido acético	De impermeabilizantes de silicona.
Nitrosaminas	Compuestos de caucho, aditivos, cosméticos, etcétera.
Gas natural	Gas combustible.

Fuente: Caracterización de material particulado atmosférico (*Esther M. Borrás et al 2013*)

CONTAMINACIÓN DEL AIRE INTERIOR DESDE FUENTES EXTERIORES

Por lo general, el aire en interiores depende del aire que se centra en el exterior, mayormente en las áreas urbanas. Se tiene conocimiento de que las emisiones pueden surgir de vehículos automotores, polvo de obras en construcción, gases que emanan calderas y del aire de desecho que recircula por tomas de ventilación en los edificios, baños, sanitarios, cocinas y filtraciones desde cloacas o de algunos componentes que se infiltran en el terreno y pueden llegar para mezclarse en los interiores.

Cuando se incrementa o se reduce la concentración de un contaminante en el exterior, igual se incrementa o reduce en el interior, pero de manera más lenta (el llamado “efecto escudo”), en lo que puede influir tanto la ubicación del edificio como las actividades que se realizan en el exterior y el lugar donde se encuentren las ventanas o tomas del aire acondicionado (Esther M. Borrás et al 2013).

1.4.5 Efectos de la contaminación del aire en interiores

Estudios realizados acerca de la calidad del aire en interiores (IEQ, por sus siglas en inglés) se enfocan en la interacción de múltiples factores, mismos que son capaces de provocar afectaciones en la salud, percepción, comodidad y hasta en la productividad de la gente en el ambiente interior. Entre estos factores aparecen la temperatura, una deficiente iluminación, la humedad, el diseño interior y otros componentes que se integran en dichos espacios, lo que incluye la calidad del aire.

Sólo en Colombia se presentan alrededor de 6,000 fallecimientos a causa de la contaminación del aire, de acuerdo a un análisis del Banco Mundial. De esas muertes, casi el 60 por ciento se asocian con la exposición a altos niveles de contaminación del aire en espacios cerrados. Debido a ello, las autoridades ambientales y las relacionadas con la salud han empezado a ver con más detenimiento el fenómeno de la contaminación en interiores.

Por su parte, el Comité Científico de los Riesgos Sanitarios y Medioambientales de la Comisión Europea, ha expuesto que la contaminación del aire, sea interior o exterior, se ha convertido en un problema de salud de importancia, pues puede derivar en preocupantes consecuencias como las enfermedades de tipo respiratorio, entre ellas el cáncer de pulmón o el asma (Esther M. Borrás et al 2013).

SÍNDROME DEL EDIFICIO ENFERMO (SEE)

Cuando se presentan quejas de los habitantes de un edificio y los síntomas señalados superan al 20 por ciento, es decir, más de lo razonablemente esperado

y resulta difícil identificar las causas debido a que sus orígenes obedecen a varios factores, es cuando se produce el llamado “síndrome del edificio enfermo”. Su diagnóstico es por exclusión. Al respecto, la Organización Mundial de la Salud (OMS), de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), estima que en el mundo ha llegado a ocurrir en alrededor del 30 por ciento de los edificios públicos, tanto nuevos como reformados (Esther M. Borrás., et al 2013).

Aunque los síntomas (Burge., et al 1992) no suelen ser muy específicos, se sabe que tienen predominancia los de tipo neuropsíquicos, así como los oculares, dermatológicos y nasofaríngeos. Estos síntomas por lo común se presentan entre dos y seis horas de estancia en el edificio, y suelen ser temporales. Por lo tanto, es común que las quejas se presenten más por la tarde, y menos por la mañana. Primeramente, se llegó a describir en edificios con mucha presencia de público, aunque después se presentó en todos los edificios, fuesen o no de tipo residencial. Por lo general, se trata de edificios bastante cerrados y con notable aislamiento térmico para disminuir el consumo de los sistemas de ventilación, de aire acondicionado o de ventilación, por lo que tienden a retener diversos tipos de emisiones en sus interiores (Bishop et al 1992).

A principios de la década de los setentas el aumento del precio del petróleo, a causa del embargo de los países árabes, motivó a incrementar la eficiencia en el consumo de energía en las edificaciones nuevas. Ello derivó en la imposición forzada del aire de los sistemas de ventilación asociados a los aparatos de climatización artificial, con el objetivo de disminuir el consumo de calefacción. Por lo que buscaba un homogéneo ambiente térmico. Esto se presentaba con mayor énfasis en edificios públicos y de oficinas administrativas, con labores sedentarias, con bastante ocupación, con uso de computadoras y con archivos abiertos de papel; se trataba de edificaciones de enorme tamaño, con una antigüedad de más de 15 años, con bastante deterioro, localizados en los centros ciudadanos, techos bajos, sistemas centralizados de aire acondicionado y con un deficiente mantenimiento. En este tipo de edificios, imperaba la humedad, altas temperaturas, pocas o casi nulas renovaciones del aire exterior. Además, se llegó a observar que en las áreas del

edificio donde se encontraban usuarios que toman aire fresco del exterior, éstos prácticamente no presentaban los síntomas asociados al “síndrome del edificio enfermo”.

El llamado “edificio enfermo” (Vaquero y Castrodeza et al. 1997), al que acertadamente algunos llaman edificio patógeno, por lo general cuenta con aire acondicionado o clima artificial, con alguna toma de aire exterior que se distribuye en el interior, aunque igual pueden disponer de ventilación natural. Son trata de edificios bien cerrados y, aunque pueden tener ventanas, por lo común no se usan para la ventilación natural, y sólo se utilizan para efectos de iluminación.

Por tanto, se han contemplado factores de índole física, biológicos, químicos y psicosociales en la aparición de los “edificios enfermos” o SEE (Bishop et al 1992).

- Entre los factores físicos se toman en consideración la temperatura, humedad relativa (ya que si es poca reseca las mucosas), baja ventilación (insuficiente aire fresco y con mala distribución y diferencias de presión), así como la movilidad del aire. También influye un nivel bajo de iluminación, insuficiente contraste, demasiados brillos y destellos y la utilización de tubos fluorescentes de baja frecuencia con parpadeo subliminal. A eso se suma el ruido de baja frecuencia.
- Los factores químicos (38, Prev. Exprés, 1991) son los principales, en cuya exposición se combinan diversos agentes, aunque sea a baja concentración. De igual manera, contaminantes conteniendo polvo acumulado, COVs y emanaciones de tipo gaseoso de materiales de limpieza, lo mismo que el ozono de fotocopiadoras e impresoras. Otros factores son la construcción de bajo costo y los recubrimientos de suelos y paredes con material textil. De la misma manera se incluye la contaminación del exterior que procede del tráfico vehicular, así como las infiltraciones desde la cimentación y algunos productos de construcción.
- Diversos microorganismos son parte de los factores biológicos.

- Las condiciones que forman parte de los factores psicosociales son las que provocan más susceptibilidad en las personas y las particularidades del trabajo que ejecutan en el edificio, con problemas relacionados con un poca o nula satisfacción laboral, estresantes relaciones con sus compañeros y superiores, determinadas cargas de trabajo, monotonía, poca motivación, etcétera.

1.4.6 DIRECTRICES Y NORMATIVA SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

En los últimos años las fuentes documentales sobre la calidad del aire interior, que sirven de guía en el presente estudio, han crecido de una forma importante. Para una aproximación a las mismas caben varios puntos de partida, aunque sus contenidos confluyen en la mayoría de sus aportaciones y sus conclusiones. En su elaboración inicial se encuentran las recomendaciones y guías de múltiples organizaciones de expertos. Diferentes organismos internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (WHO; OMS) y el Consejo Interterritorial de Investigación de Edificios-International Council of Building Research (CIBC), y entidades privadas, como la ASHRAE, e Instituciones de países, como Estados Unidos y Canadá o en España el INSHT o AENOR, entre otros, han ido estableciendo normas y directrices de exposición.

La Norma UNE 100011:1991 tiene por objeto (3, AENOR, 1991; 280, Rey y Velasco, 2007) establecer los criterios de ventilación para obtener una buena calidad de aire en los locales con instalaciones de ventilación y climatización, destinadas al bienestar de las personas. Según la norma, un aire de aceptable calidad es “aquél que no contiene sustancias contaminantes en cantidades tales que resulten nocivas para la salud y cuya calidad sea juzgada satisfactoria por al menos el 80% de las personas expuestas a sus efectos”. Para establecer esto se propone una tabla de caudales de ventilación mínimos y máximos.

Múltiples agencias extranjeras y también españolas se han ocupado del aire interior en el ámbito laboral. En Estados Unidos está el referente de la ACGIH (ACGIH, 2005), NIOSH y OSHA. En España el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), que fija los límites VLA, sobre contaminantes en el aire, publica la serie de Notas Técnicas de Prevención (NTP) y Guías Técnicas, como la de

locales de trabajo (INSHT, 2003), derivada del Real Decreto 486:1997, sobre el tema. Dicha guía hace indicaciones sobre la calidad ambiental en el Anexo III

Última normativa sobre evaluación de la calidad ambiental en interiores:

- ♣ UNE EN 15251:2008: Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética, incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido.
- ♣ UNE 171.210:2008. Calidad ambiental en interiores. Buenas prácticas en los planes de desinfección, desinsectación y desratización.
- ♣ UNE 171.220:2008. Calidad del ambiente interior. Buenas prácticas en las operaciones de limpieza.
- ♣ Normas de la Serie UNE 171330. Calidad ambiental en interiores. Redactadas por el Subcomité 3 del CT 171 de AENOR. Se componen de las siguientes partes:
 - UNE 171330-1:2008. Calidad ambiental en interiores. Diagnóstico de calidad ambiental interior (28, AENOR 2008).
 - UNE 171330-2:2009. Calidad ambiental en interiores. Procedimientos de inspección de calidad ambiental en interiores (31, AENOR, 2009).
 - UNE 171330-3:2010. Calidad ambiental en interiores. Sistema de gestión de los ambientes interiores.
 - El Grupo de Trabajo 4 del Subcomité 3 del CT 171 prepara la Norma UNE 171330-4, sobre validación y evaluación de salas de ambiente controlado (Vidal Lucena et al 2010).

Capítulo 2. Metodología

Se realizaron mediciones simultáneas para determinar las concentraciones de material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros

(PM_{2.5}) al interior de los camiones que integran las dos líneas troncales de la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA) de Puebla. La campaña tuvo una duración de 4 semanas: a partir del 14 de mayo y hasta el 10 de junio del 2016. Las mediciones se llevaron a cabo de lunes a domingo, en uno de los horarios críticos —tráfico vehicular y alta demanda de transporte público—, comprendido de las 7:30 am a las 9:30 am.

Para la realización de las mediciones se les proporcionaron analizadores y muestreadores a un grupo técnico, conformado por 12 personas quienes los portaron cerca del área respiratoria, mientras simulan ser usuarias y usuarios de las dos líneas troncales de la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA), así como, de un auto particular que cubrió —alternándose— el mismo recorrido de las dos líneas troncales.



IMAGEN 2.1 Actividades realizadas por el personal técnico que participó durante la campaña de mediciones al interior de los vehículos empleados para transporte público para determinar la exposición personal a PM_{2.5}.

Durante las mediciones el grupo técnico empleó formatos de campo para el registro del horario de medición, así como, las condiciones en las cuales se realizaron las mediciones y colecta de muestras, anotando condiciones tales como: ventanas abiertas, aforo del vehículo y ubicación al interior del vehículo y eventos tales como congestionamiento vial, y tipo de transporte que circula en el entorno.

Tabla 2 Distribución de equipos, durante el periodo del 14 de mayo al 10 de junio del 2016, para la determinación de las concentraciones a las que están expuestos las usuarias y los usuarios de la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA).

Equipo	Microambiente
1	Línea troncal uno
2	Línea troncal uno
3	Línea troncal uno
4	Línea troncal dos
5	Línea troncal dos
6	Línea troncal dos
7	*Auto particular

*El auto realizó el mismo recorrido que los autobuses de la RUTA —sin invadir el carril confinado— y circulando a una velocidad en función del tráfico en la zona.

Al inicio de la campaña se integraron 7 equipos de trabajo (listados en la tabla 1) y se distribuyeron tres equipos en cada una de las líneas troncales de la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA), y un séptimo equipo en un auto particular, el cual realizó de manera alternada el mismo recorrido que los autobuses de las dos líneas troncales de la RUTA.

2.1 Sitios de medición



Figura 2.1 Ubicación geográfica de la Zona Metropolitana de Puebla

La Zona Metropolitana de Puebla (ZMP) está ubicada en el centro del estado de Puebla y el sur del estado de Tlaxcala. La ZMP se integra por un total de 38 municipios poblanos y tlaxcaltecas ubicados en el Valle de Puebla-Tlaxcala. En ella opera, desde el 2013, la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA), la cual cuenta con dos líneas troncales que realizan los recorridos: Chachapa – Tlaxcalancingo / Tlaxcalancingo – Chachapa y Diagonal Oriente – Limones / Limones – Diagonal Oriente, respectivamente línea 1 y línea 2.

Algunas de las principales características de este corredor son: carril confinado — exclusivo para sus unidades— y un total de 38 estaciones de ascenso – descenso y dos terminales. Cuenta con dos rutas troncales y alimentadoras, las cuales realizan pequeños circuitos en las colonias próximas a las estaciones para acercar a los usuarios hacia la ruta troncal. En ambas líneas circulan autobuses de 12

metros de largo (con dos puertas) y autobuses articulados (con cuatro puertas) con tecnología Euro V.

Línea base de exposición personal a contaminantes atmosféricos en la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA) de Puebla, Pue.

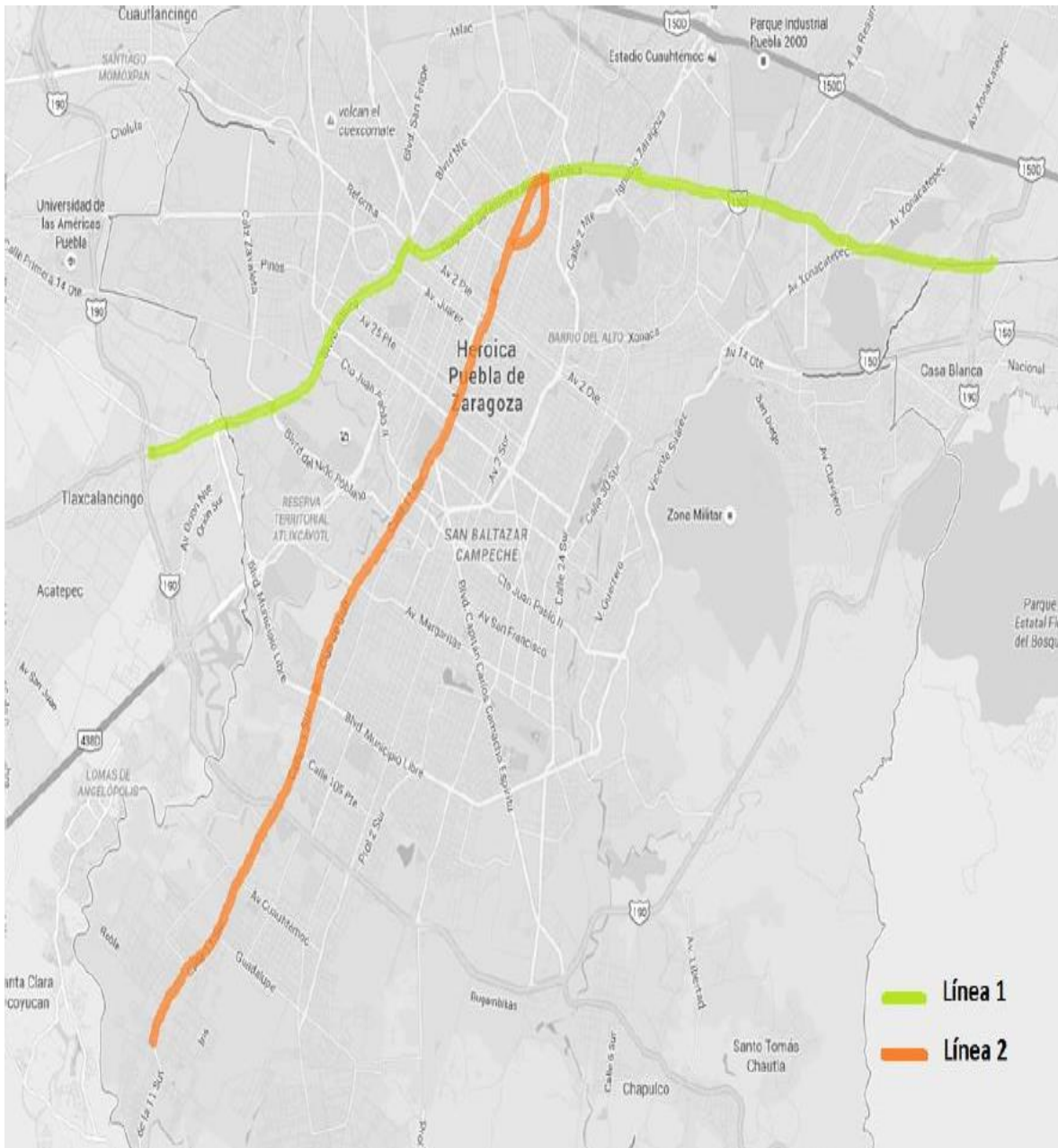


Figura 2.2 Mapa de los recorridos que realizan las dos líneas de la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA) de Puebla.

2.2. Utilización del equipo de análisis para partículas PM2.5

Para la medición de los niveles de concentración de contaminantes atmosféricos al interior de los modos de transporte público y privado, el personal técnico portó los equipos descritos a continuación:



Para la colección de muestras integradas de partículas suspendidas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros (PM2.5), se emplearon bombas de succión con un flujo de 4 L/min, marca SKC, modelo 224-PCXR8 con muestreadores personales marca MSP-Corp, modelo 200. La bomba succiona aire a través de un filtro de teflón o cuarzo de 37 milímetros de diámetro, sobre el cual se acumulan las partículas suspendidas. La

determinación gravimétrica de la concentración de PM2.5 se efectuó pesando los filtros antes y después de la colección de la muestra, implementando la metodología que se presenta en la siguiente sección.



En el caso de las partículas suspendidas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros (PM2.5) también se empleó un monitor portátil de aerosoles —DustTrack, modelo 8534, de la marca TSI— el cual mediante un fotómetro láser, determina la concentración en masa de aerosoles y la registra en tiempo real.

Los datos generados con este monitor, permitirán mapear las concentraciones de PM2.5 en función de la posición, durante la realización de los recorridos de los vehículos.



Para la colección de muestras ambientales de material particulado con un diámetro aerodinámico, menor o igual a 2.5 micrómetros (PM2.5), se empleó un muestreador de aire de alto volumen, el cual aspira aire que es acelerado y dirigido a una superficie de impactación, donde se retienen aquellas partículas con diámetros mayores a 2.5 μm , mientras que las restantes —por su inercia— continúan hacia un filtro de cuarzo, donde se acumulan las partículas.



Para establecer y registrar la posición en coordenadas de latitud, longitud y altitud se empleó un GPSMAP® 62sc, Garmin. El GPS necesita tener cobertura de al menos tres satélites, de los que recibe unas señales con la identificación y la hora del reloj de cada uno. Con base en estas señales, sincroniza el reloj del GPS y calcula el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo, y de tal modo mide la distancia al satélite mediante "triangulación". Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a los tres satélites. Conociendo además las coordenadas o posición de cada uno de ellos por la señal que emiten, se obtiene las coordenadas del punto de medición.

2.3 Métodos de análisis

A continuación, se describen los métodos que se emplearon para el análisis instrumental de las muestras colectadas durante la campaña de muestreo. En el caso de las concentraciones de monóxido de carbono y de PM2.5 —determinadas con el contador de partículas—, los equipos generan una base con los registros que no involucra un análisis instrumental.

2.3.1 Análisis gravimétrico

Para el desarrollo del presente estudio se emplearon filtros de teflón y cuarzo de 37 mm de diámetro, los cuales fueron acondicionados y pesados antes y después del muestreo. El pesaje de los filtros se realizó en los laboratorios del INECC con una ultra microbalanza analítica (CAHN C-35, con una resolución mínima de 1.0 µg, incertidumbre de ± 0.005 mg, precisión: 1.0 µg, exactitud: 0.0012%). El control de calidad en laboratorio incluye: (1) acondicionamiento durante 48 horas antes y 48 horas después del monitoreo a una temperatura de 22°C (± 3 °C) y una humedad relativa de 40% (± 5 %); (2) uso de pulsera y tapete antiestáticos; (3) uso de filtros como blancos de laboratorio.

2.3.2 Determinación PM2.5 en muestras de filtros.

Se empleó la técnica de espectroscopia de emisión con plasma de acoplamiento inductivo, las muestras de partículas se digieren para tener una disolución acuosa, la cual por medio de una bomba peristáltica es llevada hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados/excitados. Al volver a su estado fundamental, estos iones o átomos excitados emiten radiaciones de una longitud de onda que es característica de cada elemento. Esta radiación pasa a través de un sistema óptico que separa la radiación según su longitud de onda. A continuación, un detector mide la intensidad de cada una de las radiaciones, relacionando ésta con la concentración de cada elemento en la muestra.

CAPÍTULO 3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Material particulado (PM_{2.5})

En las siguientes secciones se presentan las concentraciones determinadas a partir del análisis instrumental de las muestras obtenidas durante la campaña de mediciones, por contaminante y microambiente caracterizado.

Al concluir el análisis gravimétrico de las 202 muestras y duplicados —colectadas al interior de unidades de las líneas troncales de la RUTA y un auto particular—, se determinaron las concentraciones, a partir de las cuales se elaboró la Tabla 3, con la estadística descriptiva. Es importante mencionar que del total de las muestras, 5 fueron invalidadas debido a la ruptura y/o contaminación del filtro durante la manipulación de los mismos.

Tabla 3. Estadística descriptiva de las concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³), determinadas a partir de muestras colectadas al interior de las unidades de las líneas troncales de la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA) y de un auto particular.

	RUTA Línea 1	Auto Línea 1	RUTA Línea 2	Auto línea 2
Máximo =	139.7	63.3	121.9	134.5
Promedio =	74.6	40.7	70.3	54.8
Mediana =	70.0	43.3	69.0	50.9
Mínimo =	20.3	16.0	22.1	5.0
Desviación Estándar =	25.0	13.5	22.2	37.0
n =	86	11	84	16

Tabla: 3.1

Al observar las concentraciones reportadas en la Tabla 3 vemos que, al interior de los vehículos de las dos líneas troncales de la RUTA, con motores a diésel, se determinaron mayores concentraciones de PM_{2.5} que al interior del vehículo particular, con motor a gasolina, mientras realizó recorridos similares a las unidades de la RUTA, así mismo podemos observar que, en las concentraciones de material

particulado no se identifica una diferencia significativa entre los valores determinados en las líneas troncales 1 y 2 de la RUTA, así como las obtenidas en las mediciones realizadas al interior de un auto particular cuando circulo en ambos bulevares.

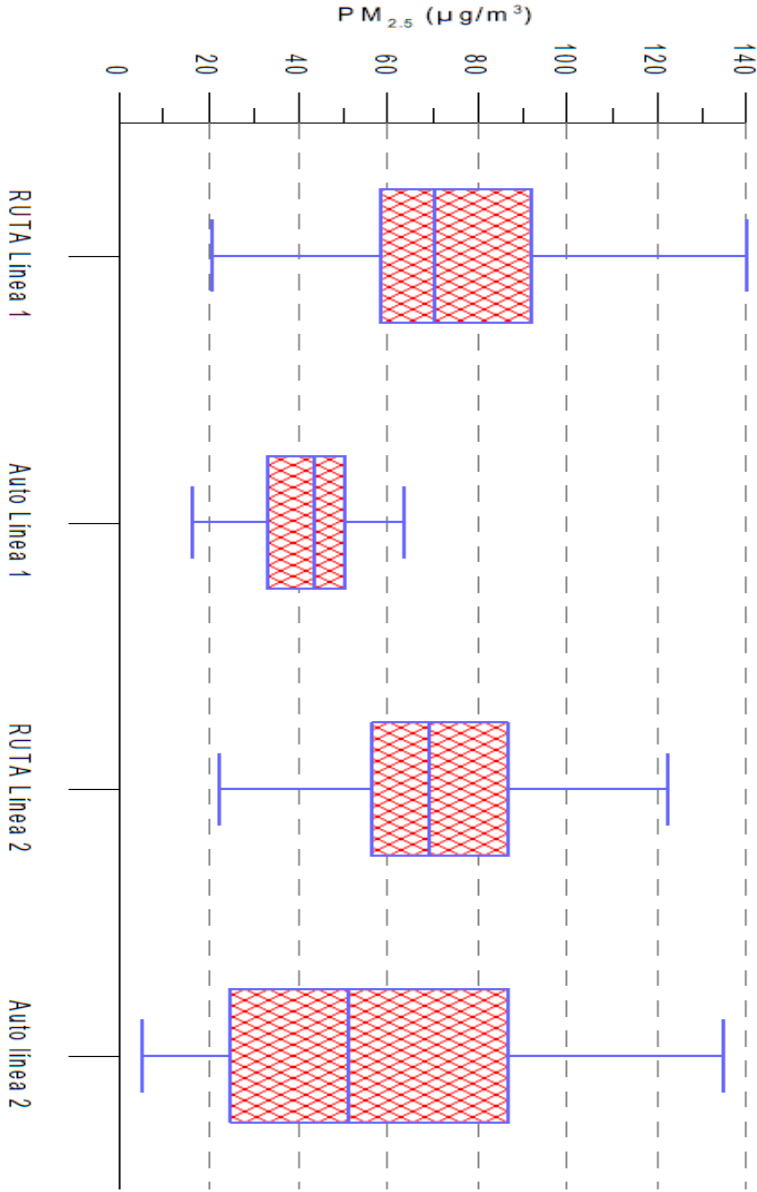


Figura 3.1 Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) determinadas al interior de las unidades de las dos líneas troncales de la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA) y de un auto particular.

De manera gráfica en la figura 3.1 se presenta la caracterización de las muestras de PM_{2.5} colectadas al interior de las unidades de las dos líneas troncales de la RUTA.

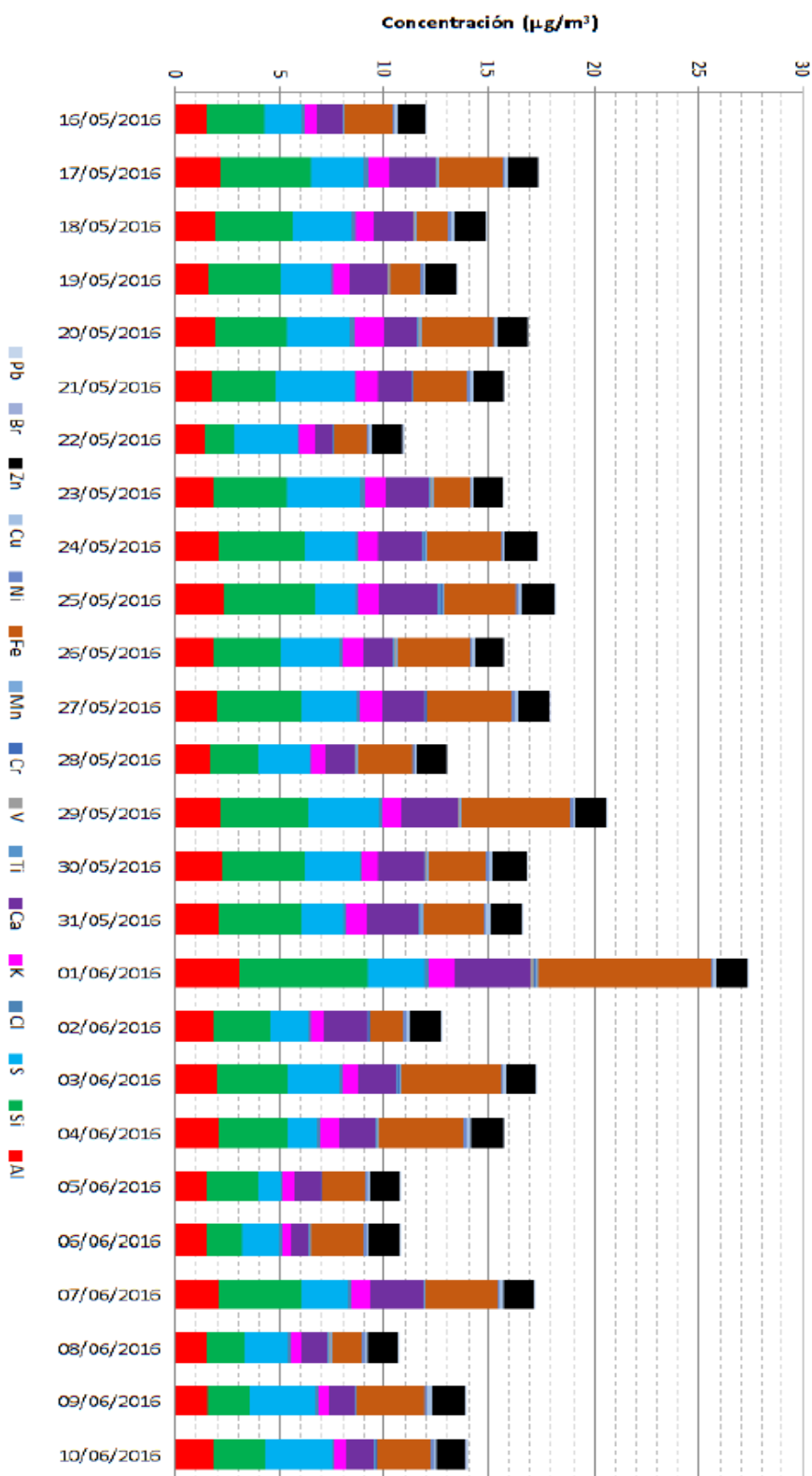


Figura 3.2 Determinación de metales presentes en las muestras de material particulado, colectado al interior de vehículos de la línea 1, de la RUTA de Puebla

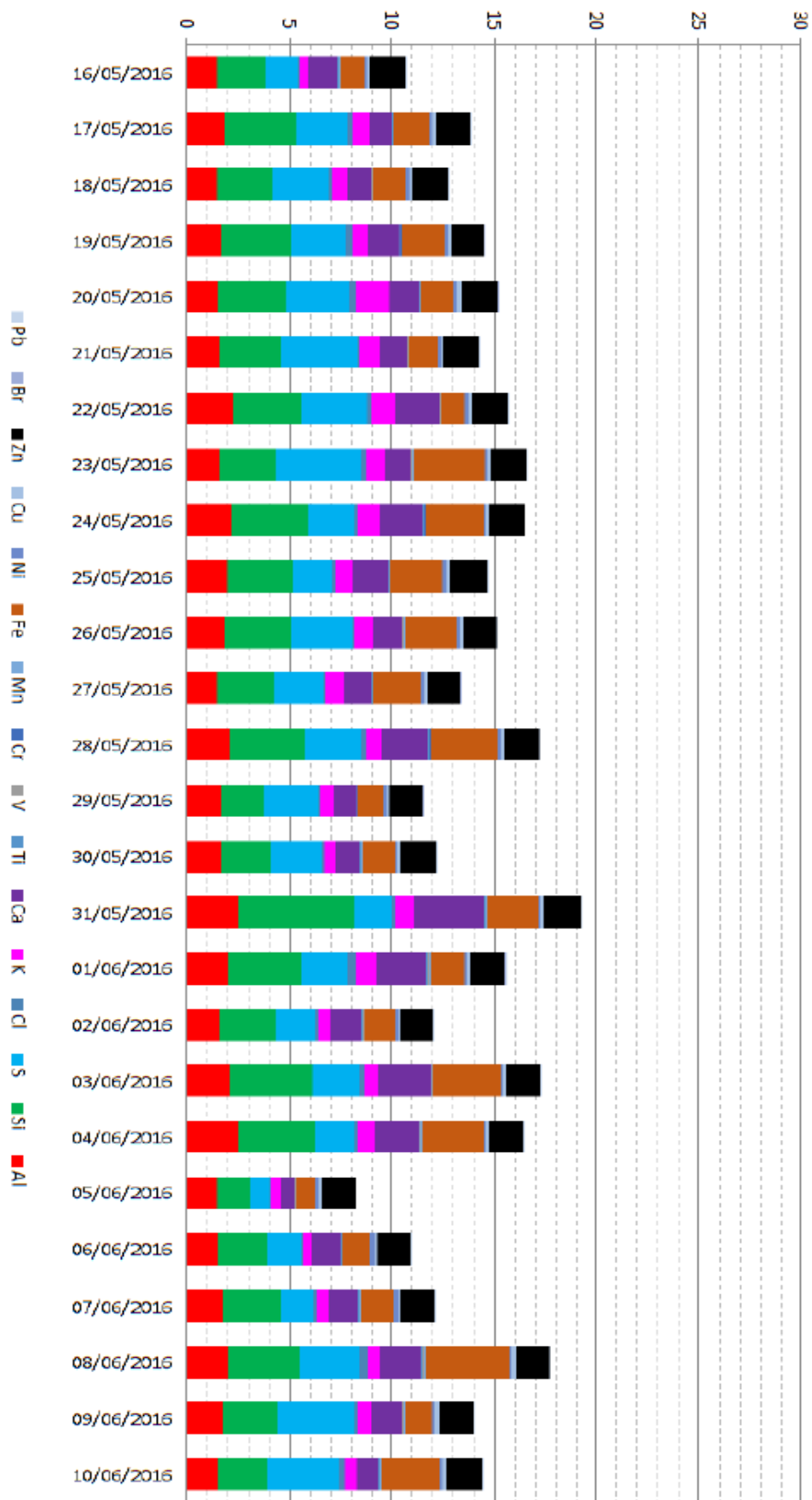


Figura 3.3 Determinación de metales presentes en las muestras de material particulado, colectado al interior de vehículos de la línea 2, de la RUTA de Puebla.

Es importante recordar que los metales presentes en las partículas tienen como fuente de emisión no sólo el escape del motor, sino también de la abrasión de los neumáticos, el desgaste de los frenos, así como, de la resuspensión de la superficie de la carretera

3.1 Análisis de resultados

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio, determinadas al interior de las unidades de las dos líneas troncales de la RUTA (74.6 y 70.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), fueron superiores a las determinadas al interior del auto particular (40.7 y 54.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), lo cual se pudiera explicar debido a que los vehículos que emplean diésel como combustible producen mayores emisiones de partículas que los vehículos que emplean gasolina. Esta información permite identificar un área de oportunidad para realizar intervenciones, orientadas a reducir las emisiones y con ello la exposición de la población usuaria en el corredor y mejorar la calidad del aire.

Conclusiones y comentarios

Se sabe que las emisiones vehiculares contribuyen en gran medida a las concentraciones de contaminantes atmosféricas, y sus precursores, en zonas urbanas y diversos estudios han demostrado que la exposición a estos contaminantes tiene efectos perjudiciales en la salud humana.

Con el objeto de mitigar los impactos de las emisiones de los motores a diésel se han identificado diversas medidas a implementar, entre ellas se pueden mencionar la introducción de tecnologías más eficientes o accesorios, como los filtros de partículas en los escapes de los vehículos a diésel, y el uso de combustibles “limpios y renovables” y, con ello reducir las emisiones a la atmósfera. A este respecto, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) en colaboración con el Gobierno del

Estado de Puebla actualmente realizan la gestión para la instalación de los filtros antes mencionados a algunos de los vehículos que integran las dos líneas troncales de la Red Urbana de Transporte Articulado (RUTA).

Al respecto es importante mencionar que los incentivos para pasar del transporte público concesionado a sistemas de transporte sustentable, como lo son los corredores BRT, deben ir acompañados de normas y políticas que incentiven la introducción de tecnologías más eficientes, el uso de mejores combustibles y de planificación urbana, como carriles exclusivos, mejor ventilación en vehículos y en estaciones de ascenso–descenso del transporte público, y otros instrumentos destinados a reducir las emisiones vehiculares.

Por otra parte, se obtienen grandes beneficios sociales de un entorno activo que favorece a la población usuaria, lo que afecta a otros factores de riesgo relacionados con el tráfico, como el ruido, los accidentes de tránsito, la calidad de vida y la cohesión social, entre otros.

Imágenes y tablas

Figura 1.1 *Domínguez A. W. Presentación Espacial por interpretación con Kringin de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la zona metropolitana del Valle de Toluca. UAM 2015.*

Figura 1.1.3 SEMARNAT. 2014. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Artículo 3°, fracción XIV. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales Diario Oficial de la Federación, 28 de enero de 1998. Última reforma publicada DOF 12-02- 2014.

Tabla 1.1 Gaceta Oficial del Distrito Federal, Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006. Establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de los contaminantes criterio.

Tabla 1.2 ProAire Puebla. Programa de Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012-2020.

Tabla 1.3.1. SEMARNAT. 2007. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Artículo 3°, fracción XIV. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, 28 de enero de 1998. Última reforma publicada DOF 12-02- 2007.

Tabla 1.3.2. SEMARNAT. 2007. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Artículo 3°, fracción XIV. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, 28 de enero de 1998. Última reforma publicada DOF 12-02- 2007.

Tabla 1.3.3. SEMARNAT. 2007. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Artículo 3°, fracción XIV. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación 28 de enero de 1998. Última reforma publicada DOF 12-02- 2007.

Figura 1.3. ProAire Puebla. Programa de Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012-2020.

Tabla 2.1 Integrated Review Plan for the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. North Carolina: Environmental Protection Agency. EPA (2008).

Figura 2.1 Cosselman, K., Navas, A., & Kaufman, J. (2015). Environmental Factors in Cardiovascular Disease. *Nature Reviews. Cardiology*, 12(11), 627-42. <http://doi.org/10.1038/nrcardio.2015.152>.

Figura 2.2 Whitby K.T., 1993. On The Multimodal Nature of Atmospheric Aerosol Size Distributions. Presented at 8th. Conf. On Nucleation, Leningrad, U.S.S.R.

Figura 2.3 Alves, D., Osório, D., Rodrigues, M., Illi, J., Bianchin, L., & Benvenuti, T. (2015). Concentrations of PM_{2.5-10} and PM_{2.5} and metallic elements around the Schmidt Stream area, in the Sinos River Basin, southern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 75(4 Suppl 2), 43-52. <http://doi.org/10.1590/1519-6984.00113suppl>.

Tabla 2.1 Universidad Politécnica de Valencia; Caracterización de Material Particulado Atmosférico Generado en Reactores Fotoquímicos y Procedentes de Muestras Ambientales, Esther M. Borrás 2013.

Tabla 3

Figura 3.1

Figura 3.2

BIBLIOGRAFIA

1. M Lebowitz, J. (2000). Respiratory symptoms and peak flow associated with indoor and outdoor air pollutants in the southwest. *Air Pollut. Control Ass.* 35, 1154 -1158.
2. Vargas Marcos, F., & Gallego Pulgarín, I. (2005). Calidad Ambiental Interior: Bienestar, Confort y Salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), 243-251.
3. OMS, Organización Mundial de la Salud (2014). Contaminación Atmosférica <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.
4. López, A. Edmundo, Programa Vial para la Ciudad de Puebla 2005-2008.
5. INEGI(instituto Nacional de Estadística y geografía),2015 <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/poblacion/densidad.aspx?tema=me&e=21>
6. S. S. Morales-García & P. F. Rodríguez-Espinosa & M. P. Jonathan & M. Navarrete-López & M. A. Herrera-García & N. P. Muñoz-Sevilla. (2013). *Characterization of As and Trace Metals Embedded in PM10 Particles in Puebla City, México*
7. OMS, Organización Mundial de la Salud (2014). Contaminación atmosférica <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.
8. Bruce, N., Rehfuess, E., Mehta, S., Hutton, G., & Smith, K. (2006). Indoor Air Pollution.
9. Wark, K., Warner C. F., Contaminación Del Aire. Ed. Limusa Noriega. México. 2012.
10. CASTILLO-VELÁZQUEZ, J. I., RUBIO-RODRIGUEZ, H. T., & EUDAVE-LOERA, (2011) C. A. AIR POLLUTION IN PUEBLA CITY: A MATHEMATICAL MODEL
11. Balderas, G. D., Mayorga, R., Jáuregui, E., (2004) Patrones de viento y topografía local en la Ciudad de Puebla. Presentado en: Congreso Internacional "Climatología Urbana, Contaminación Atmosférica y Bioindicación". La Paz - Bolivia, Junio 2004.
12. Catalán Vázquez, M. (2006). Estudio de la percepción pública de la contaminación del aire y sus riesgos para la salud: perspectivas teóricas y metodológicas. *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 19(1), 28-37.
13. Asquith, William H., *Distributional Analysis with L-moments Statistics using the R Environment for Statistical Computing*, primera edición (2011)

14. Domínguez A. W. *Presentación Espacial por interpretación con Kringin de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la zona metropolitana del Valle de Toluca. Universidad Autónoma del Estado de México 2015.*
15. González, G. M. A. & Villafaña, E. L. V., 2003. Contaminación atmosférica en principios básicos de la contaminación ambiental. México: UAEM
16. SEMARNAT. 2007. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Artículo 3º, fracción XIV. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, 28 de enero de 1998. Última reforma publicada DOF 12-02- 2007.
17. Marcano, J. E. 2007. Los Contaminantes Atmosféricos. [1 pag.] [en línea] [consultado 27-06-2007]: Disponible en:
<http://www.jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf2.html>
18. Radian International. 1997. Fundamentos de inventarios de emisiones. Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México: Volumen II. Asociación de Gobernadores del Oeste y Comité Asesor Binacional. 0389. Old Placerville Road Sacramento, CA 95827. Diciembre de 1997.
19. SIMAT. 2000. Dióxido de Azufre (SO₂). Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). [1 pag.] [en línea] [consultado 18-07-2007]: Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnso2.htm>
20. Radian International. 1997. Fundamentos de inventarios de emisiones. Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México: Volumen II. Asociación de Gobernadores del Oeste y Comité Asesor Binacional. 0389. Old Placerville Road Sacramento, CA 95827. Diciembre de 1997.
21. IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)], pp. 881, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
22. Delgado, S.J.M. 2007. Validación e implementación de técnicas de captación pasiva para el estudio de los niveles y efectos de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno

- en un área costera mediterránea. Tesis doctoral, Universitat Jaime I. Castellon de la Palma. España. <http://www.tdx.cesca.es/TDX-0415105-125337/>
23. Baird, C. 2001. Química Ambiental. Ed. Reverté, Barcelona, España.
 24. Manahan, S.E. 1994. Environmental Chemistry. CRC Press, Inc., Florida, USA.
 25. Radian International. 1996. Técnicas Básicas de estimación de emisiones: Volumen III. Asociación de Gobernadores del Oeste y Comité Asesor Binacional. 0389. Old Placerville Road Sacramento, CA 95827. Mayo de 1996.
 26. SIMAT. 2000. Dióxido de Azufre (SO₂). Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). [1 pag.] [en línea] [consultado 18-07-2007]: Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnso2.htm>
 27. EPA. 1999. Óxidos de nitrógeno (NO_x), ¿Por qué y cómo se controlan?. EPA-456-F-00-002., (Noviembre de 1999), 1-53
 28. IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)], pp. 881, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 29. Delgado, S.J.M. 2004. Validación e implementación de técnicas de captación pasiva para el estudio de los niveles y efectos de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno en un área costera mediterránea. Tesis doctoral, Universitat Jaime I. Castellon de la Palma. España. <http://www.tdx.cesca.es/TDX-0415105-125337/>
 30. OMS, Organización Mundial de la Salud (2002). Contaminación atmosférica <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
 31. Cohen AJ, Anderson HR, Ostro B, Pandey KD, Kryzanowsky M, Kuenzly N, et al. Mortality impacts of Urban Air Pollution. En: Ezzati M, Lopez AD, Rodgers A, Murray CJL (2003). Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
 32. Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), 159-175.

33. Prieto, C., José, M., Mancilla, F., Astudillo, O., Reyes, P., & Román, A. (2007). Exceso de morbilidad respiratoria en niños y adultos mayores en una comuna de Santiago con alta contaminación atmosférica por partículas. *Revista Médica de Chile*, 135(2), 221-228.
34. Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D., & Velásquez, H. (2008). Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni, y Cr) en aire, sedimentos viales y suelos en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24(4), 171–182.
35. Turk, A., Turk, J. & Wittes, J.T., 2004. *Ecología- Contaminación- Medio Ambiente*. (Ottenwaelder C.G., Trad.): Mc Graw-Hill.
36. Ayers, M., 2007. Teoría básica de la contaminación del aire. En Roberts Alley E. & Associates. *Manual de control de la calidad del aire*. (hidalgo M.C., Trad). Mc Graw-Hill.
37. Domínguez A. W. *Presentación Espacial por interpretación con Kringin de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la zona metropolitana del Valle de Toluca*. Universidad Autónoma del Estado de México 2015.
38. Semarnat, SSAOT, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Programa de Gestión de Calidad del Aire del estado de Puebla 2012-2020, (2012)
39. Semarnat, SSAOT, Puebla, Programa de Gestión de calidad de la zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2011, (2006).
40. Stevens, G.A., Dias, R.H. & Ezzati, M., 2008. The effects of 3 environmental risk on mortality disparities across Mexican communities. National Academy of Sciences of the United States of America.
41. Organización Mundial de la Salud (OMS)., 2011. Estadísticas Sanitarias Mundiales 2011. [En línea] Disponible en:
http://www.Who.int./whosis/whostat/ES_WHS2011_Full.pdf
42. *ProAire Puebla. Programa de gestión de la calidad del aire del estado de Puebla 2012-2020*

43. SIMAT. 2015. Dióxido de Azufre (SO₂). Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). [1 pag.] [en línea] [consultado 18-07-2007]: Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnso2.htm>
44. Gobierno del Distrito Federal-Gobierno del Estado de México-SEMARNAT Secretaría de Salud (2002). Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. México
45. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmosfera 2014.
46. SEMARNAT. (s.f.). SEMARNAT. Recuperado el 29 de Octubre de 2012, de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/06:atmosfera/cap6_3.html
47. Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial del Estado de Puebla (2011). Programa de Verificación Vehicular, Puebla.
48. Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales del Estado de Puebla (2005). Programa de Contingencias Ambientales en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla. Puebla
49. SEMARNAT. (s.f.). SEMARNAT. Recuperado el 14 de Agosto de 2017, de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/05_atmosfera/cap5_3. Html SEMARNAT-
50. Environmental Protection Agency. *Integrated Review Plan for the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter*. North Carolina: Environmental Protection Agency EPA (2008).
51. Pérez, H., Lunagómez, M., & Acosta, L. (2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM₁₀), en Cunduacán, Tabasco. *Universidad y Ciencia*, 26(2), 151-162. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018629792010000200003&lng=es&nrm=iso&tlng=pt.
52. Particulate matter. En *WHO Air Quality Guidelines for Europe (CD-ROM version)* Copenhagen. Recuperado de http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0019/123085/AQG2ndEd_7_3Particulatematter.pdf?ua=1 WHO (2000).

53. Araujo, J. (2011). Particulate air pollution, systemic oxidative stress, inflammation, and atherosclerosis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 4(1), 79-93. <http://doi.org/10.1007/s11869-010-0101-8>.
54. HEI Review Panel on Ultrafine Particles. (2013). *Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles. HEI Perspectives 3*. Boston. Recuperado a partir de <http://pubs.healtheffects.org/view.php?id=394>.
55. Finlayson-pitts B.J. and Pitts J.N. jr., 2002. Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques. John Wiley and Sons, Inc. New York.
56. Kalberer, M., Sax, M., Samburova, V. Molecular size evolution of aerosols collected in urban atmospheres and generated. *Environmental Science and Technology* 2006, 40, 5917-5922.
57. LOZADA, H. M. (2009). Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión Héctor. Estudio de Caso Bogotá. Bogotá: Universidad Nacional del Colombia.
58. Baron P.A. and Willeke K., 2013. Aerosol Fundamentals. Chapter in "Aerosol Measurements: Principles, Techniques and Applications". Ed; by Willeke K., and Baron P.A., van Nostrand Reinhold, New York, 876pp.
59. Whitby K.T., 1993. On the multimodal nature of atmospheric aerosol size distributions. Presented at 8th. Conf. On nucleation, leningard, U.S.S.R.
60. Hallquist, M., Wenger, L.C., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues. *Atmospheric chemistry and physics*, 2009, 9, 5155-5236.
61. Henze, D.K., Seinfeld J.H. Global modeling of secondary organic aerosol formation from atmospheric. *Chemistry and physics*, 2008, 8, 2405-2420
62. Hallquist, M., Wenger, L.C., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues. *Atmospheric chemistry and physics*, 2009, 9, 5155-5236.
63. Finlayson-pitts B.J. and Pitts J.N. jr., 2002. Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques. John Wiley and Sons, Inc. New York.
64. Holmes, S.N. A review of particle formation events and growth in the atmosphere in the various environments. *Atmospheric environment*, 2007, 41, 2183-2210.

65. Kroll, J.H., Chan, A. W. F. Secondary organic aerosol formation from m-xylene, toluene and benzene. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2007.
66. Curtius, J. Nucleation of atmospheric aerosol particles. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7, 1027-1045.
67. Gieré, R., Querol, X. Solid particulate matter in the atmosphere. *Elements*, 2010, 6, 215-222.
68. Baltensperger, U., Kalberer, M. Secondary organic aerosols from anthropogenic and biogenic precursors. *Faraday Discussion*, 2015, 130, 265-278.
69. Holmes, D.N. A review of particle formation events and growth in the atmosphere in the various environments, *Atmospheric Environment*, 2007, 41, 2183-2210.
70. Fuchs, H., Ball, S.M., Bohn, B., Brauers. Intercomparison of measurements of NO₂ concentrations in the atmosphere simulation chamber SAPHIR during. *Atmospheric measurement techniques*, 2010, 3, 21-37
71. Janháll, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130137. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>.
72. Díaz, P., García, I., Iturbe, J. L., Granados, F., & Sánchez, J. C. (1999). Air pollution in the atmosphere of the Toluca Valley, Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15(1), 13-17. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37015102>.
73. Orozco Barrenetxea, C., Pérez Serrano, A., González Delgado, M. N., Rodríguez Vidal, F. J., & Alfayate Blanco, J. M. (2003). Contaminación ambiental. *Madrid-España*, 678 Págs.
74. Haverinen-Shaughnessy, U., Borrás-Santos, A., Turunen, M., Zock, J. P., Jacobs, J., Krop, E. J. M., ... & Hyvärinen, A. (2012). Occurrence of moisture problems in schools in three countries from different climatic regions of Europe based on questionnaires and building inspections—the HITEA study. *Indoor Air*, 22(6), 457-466.
75. Guarro, J., Kantarcioglu, A. S., Horr , R., Luis Rodríguez-Tudela, J., Cuenca Estrella, M., Berenguer, J., & Sybren De Hoog, G. (2006). *Scenedosporium*

- apiospermum: changing clinical spectrum of a therapy-refractory opportunist. *Sabouraudia*, 44(4), 295-327.
76. Varela, J. C. (2010). *Riesgos sanitarios y medioambientales: Derecho de la Unión Europea y de la Organización Mundial del Comercio*. Editorial Reus.
77. Bartual Sánchez, J.; Berenguer Subils, M.J.; Bernal Domínguez, F. et al: "Calidad del aire interior." Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo; Madrid, 2002.
78. Rey Martínez, F.J., Ceña Callejo, R.: "Edificios saludables para trabajadores sanos: calidad de ambientes interiores." Consejería de Empleo y Fomento, ISBN 84-933938-5-1; Junta de Castilla y León, 2006.
79. Schneider, T.; Sundell, J.; Bischoff, W., et al.: "EUROPART. Airborne particles in the indoor environment. A European interdisciplinary review of scientific evidence on associations between exposure to particles in building and health effects." *Indoor Air*, 2003; 13: 38-48.
80. Universidad Politécnica de Valencia; Caracterización de material particulado atmosférico generado en reactores fotoquímicos y procedentes de muestras ambientales, Esther M. Borrás 2013
81. WHO: "Air Quality Guidelines for Europe." World Health Organization Office for Europe. Regional Publications; European Series nº 23; 2002.
82. Burge, P.S.: "The sick building syndrome: where are we in 1992." *Indoor Environment*, 1992; 1 (4): 199-203.
83. Bishop, V.L.: "The sick building syndrome." *Nat Saf Health News*, 1985; V.132, nº 6: 31-41.
84. Vaquero Puerta J.L., Castrodeza Sanz J.J.: "Nuevos problemas epidemiológicos relacionados con el medio ambiente: Síndrome del edificio enfermo y múltiple sensibilización química." *Medicina Preventiva*, 1997; III (4): 26-9.
85. Bishop, V.L.: "The sick building syndrome." *Nat Saf Health News*, 1985; V.132, nº 6: 31-41
86. WHO: "Health aspects to indoor air quality. Report on a WHO working Group." World Health Organization, WHO EURO Reports and Studies 21, Regional Office for Europe; Copenhagen, 1979

87. AENOR: Norma UNE 171330-1:2008. "Calidad ambiental interior. Parte 1: Diagnóstico de calidad ambiental interior."
88. ACGIH: Committee Activities and Reports: "Guidelines for the assessment of bioaerosols in the indoor environment." American Conference of Governmental Industrial Hygienists; Cincinnati, Ohio, USA, 2005.
89. INSHT-Martí Solé, M.C.; Alonso Espadalé, R.M.; Constans Aubert, A.: "Calidad del aire interior: evaluación de la presencia de polen y esporas fúngicas." Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, NTP 335; Madrid, 2003
90. Vidal Lucena, J.: "Norma UNE 171330-4." Jornadas BioMérieux-Bioseguridad en Áreas Quirúrgicas; Madrid, 29 de junio de 2010.