

Fundamentos de Contaminación del Aire

Conceptos generales, definiciones y política ambiental



Contenido

1. DEFINICIONES IMPORTANTES EN EL TEMA DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE	1
2. ESQUEMA GENERAL DE LA CONTAMINACIÓN EN EL AIRE AMBIENTE	3
3. CONTAMINACIÓN EN INTERIORES	4
4. PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL AIRE	6
4.1. Compuestos nitrogenados	6
4.2. Compuestos azufrados.....	6
4.3. Compuestos carbonados.....	7
4.4. Otras sustancias importantes	7
4.5. Material particulado	8
4.5.1. Problemas asociados con material particulado	9
5. UNIDADES DE CONCENTRACIÓN.....	10
6. SISTEMAS DE ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AIRE.....	11
7. LEGISLACIÓN.....	13
7.1. Norma de calidad del aire.....	13
7.2. Decreto 979 y Resolución 601 de 2006	14
7.3. Ley 1205 de 2008	16
8. INVENTARIO DE EMISIONES	17
9. EMISIONES PRODUCIDAS POR VEHÍCULOS MOTORIZADOS.....	19
9.1. Emisiones de vehículos operados con gasolina	19
9.2. Emisiones de vehículos operados con ACPM	19
9.2.1. Ventajas y desventajas de los motores diésel	20
9.2.2. Contenido de azufre.....	21
9.2.3. Convertidor catalítico	21
10. METEOROLOGÍA.....	22
10.1. Atmósfera	22
10.1.1. Propiedades de la atmósfera	23
10.2. Movimientos de las masas de aire	23
10.2.1. Fenómenos a macro-escala	23
10.2.2. Fenómenos a micro-escala	24
10.2.3. Movimiento vertical	25
10.2.4. Otras definiciones	26
11. FENÓMENOS GLOBALES DE CONTAMINACIÓN	27
11.1. Decaimiento de ozono estratosférico	27
11.1.1. Destrucción del ozono por acción del hombre	27
11.1.2. Protocolo de Montreal	29
11.2. Cambio climático y calentamiento global.....	29
11.2.1. Ciclo del carbono	30
11.2.2. Protocolo de Kyoto	30

1. Definiciones Importantes

Generalidades

La contaminación del aire en centros urbanos es un fenómeno en constante crecimiento, especialmente en el mundo en desarrollo. En la actualidad el problema se ha vuelto más dramático, no solo como consecuencia del incremento en los consumos de combustible a nivel mundial, sino también porque tendemos a vivir en ciudades con elevadas densidades poblacionales.

De esta forma, la contaminación del aire se puede considerar como una consecuencia y una externalidad del desarrollo económico de la humanidad, en su constante anhelo por lograr una mejor calidad de vida.

La importancia del estudio y el control de la contaminación del aire se relaciona con el conocimiento que se tiene acerca de los impactos negativos que un aire contaminado puede tener sobre la salud de las personas, los animales y otros seres vivos. Por ejemplo, se encuentra ampliamente documentado que elevados niveles del denominado **material particulado** (PM) se encuentran asociados con morbilidad* y mortalidad por enfermedad respiratoria.

* Morbilidad se define como la incidencia y/o prevalencia de enfermedades en la población. Normalmente se expresa como una tasa: el número de casos de la enfermedad por 1,000 personas expuestas al riesgo.

Emisiones biogénicas o naturales:

Son las emisiones producidas por la naturaleza.



Emisiones antropogénicas:

Son las emisiones relacionadas con las actividades realizadas por el hombre. Se clasifican en dos grandes grupos: emisiones provenientes de fuentes fijas y emisiones provenientes de fuentes móviles.



Las fuentes móviles se dividen a su vez en **fuentes dentro de la vía** (buses, camiones, automóviles, taxis y motos) y **fuentes fuera de la vía** (trenes, aviones y maquinaria de construcción).



1. Definiciones Importantes

Contaminantes primarios:

Son aquellos que son emitidos directamente a la atmósfera por una fuente de emisión ya sea ésta biogénica o antropogénica.

Contaminantes secundarios:

Estos contaminantes son el resultado de reacciones en la atmósfera, a partir de contaminantes primarios y otras especies químicas. El contaminante secundario más conocido es el ozono, el cual se genera en presencia de la luz solar y debido a la interacción entre óxidos de nitrógeno e hidrocarburos.

Contaminantes criterio:

Conjunto de especies químicas que se utilizan como criterio para decidir si el aire se encuentra contaminado y que hacen parte de la normativa ambiental de los países. Los contaminantes criterio en Colombia son: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), material particulado respirable (PM₁₀) y ozono (O₃).

Ozono troposférico:

Es el ozono que se encuentra en la primera capa de la atmósfera, denominada tropósfera. Este ozono se considera como un contaminante debido a su alto poder oxidante e irritante de las vías respiratorias. Adicionalmente, el ozono puede producir efectos negativos sobre la productividad de los cultivos.

Ozono estratosférico:

Es el ozono que se encuentra en la estratósfera (capa de la atmósfera que se encuentra después de la tropósfera). En la alta atmósfera el ozono no es considerado como un contaminante. Por el contrario, su presencia es necesaria ya que compone la capa que protege a la tierra de la radiación ultravioleta.



Ozono troposférico y ozono estratosférico

Carbono elemental o carbono negro:

El carbono negro es el componente esencial de las partículas sólidas emitidas durante una combustión incompleta.

Conversión de gas a material particulado:

Es un fenómeno importante y muy frecuente en la atmósfera en donde dos especies gaseosas se fusionan para formar una tercera especie que es sólida a temperatura ambiente.

Tiempo de residencia y destino:

Son conceptos fundamentales en el estudio de la calidad del aire porque son dos propiedades que definen la importancia y el comportamiento de las sustancias en el aire, y determinan la peligrosidad de las mismas.

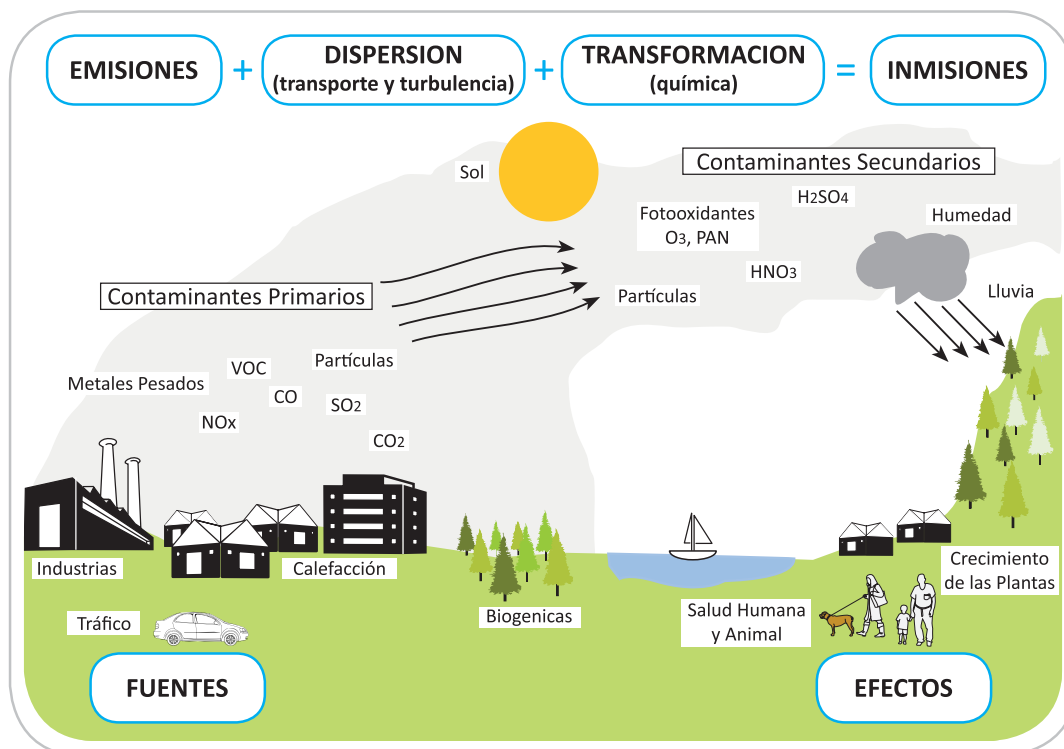
Exposición personal:

Exposición se define como el producto entre las concentración media y el tiempo durante el cual una persona se encuentra sujeta a dicha concentración.

Dosis ingerida:

Cantidad de contaminante que ingresa al cuerpo y que es función de la exposición a dicho contaminante y de la tasa de respiración.

2. Esquema General de la Contaminación



Una vez que las fuentes de emisión (antropogénicas y biogénicas) han generado los contaminantes primarios y éstos llegan a la atmósfera, se llevan a cabo fenómenos de transporte y transformación de los mismos. Debido al fenómeno de transporte, la contaminación producida en un sitio de la ciudad puede sentirse en otro. Por ejemplo, para el caso de Bogotá, la zona industrial de Puente Aranda es uno de los lugares más contaminados de la ciudad debido a sus actividades industriales. Sin embargo, la contaminación que experimenta este sector no es sólo la que se produce al interior del mismo, sino también la consecuencia de los patrones de viento que transportan la contaminación generada en otras partes de la ciudad.

Debido al fenómeno de transformación, los contaminantes se diluyen y reaccionan entre ellos o con otras especies químicas. Después de ocurridos los procesos asociados

a la transformación, transporte y dilución de contaminantes se llega al denominado **nivel de inmisión**, el cual hace referencia a la cantidad (concentración) de especie contaminante presente en la atmósfera.

Los fenómenos de dispersión y las transformaciones químicas de los contaminantes dependen de las condiciones de la **meteorología**. De esta manera, el conocimiento de dichas condiciones es un componente fundamental al momento de analizar los niveles de contaminación que se perciben en un lugar determinado.

Más aún, las condiciones meteorológicas son tan importantes como las dinámicas de las fuentes de emisión al momento de determinar los niveles de inmisión.

$$\text{Emisión} + \text{Meteorología} = \text{Inmisión}$$

3. Contaminación en Interiores

La mayoría de las personas pasan un porcentaje importante de su tiempo diario en espacios interiores (e.d., vivienda, oficina, salones de clase, interior de medios de transporte). Por esta razón la calidad del aire en ambientes cerrados es un tema que ha venido ganando importancia y por lo mismo ha despertado el interés de las autoridades ambientales. Esto no sólo por su reconocida relación con la salud respiratoria y cardiovascular de las personas, sino también por el impacto directo que tiene sobre la calidad de vida. Desafortunadamente, al menos para el caso colombiano, no se cuenta con una legislación que regule la contaminación del aire en ambientes y espacios interiores.

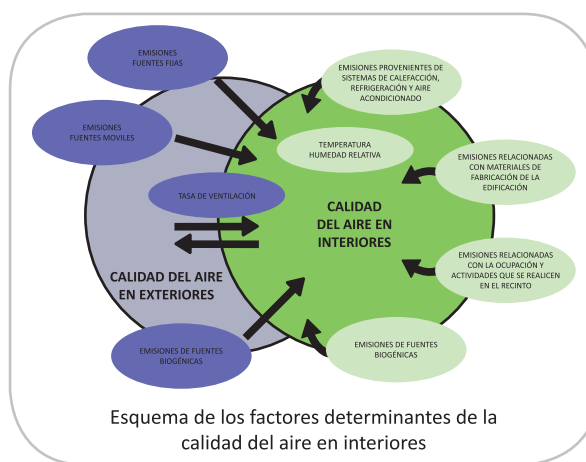
3.1. Dinámica de la contaminación del aire en ambientes y espacios interiores

Además de los principales contaminantes del aire (gases y partículas) al interior de ambientes cerrados hay otras variables como la temperatura y la humedad relativa que son determinantes en la calidad del aire que se percibe en éstos. Dichas variables son importantes no solo porque a ciertas condiciones pueden incrementarse las concentraciones de algunos compuestos contaminantes sino también porque tienen un impacto directo en la sensación de comodidad y en la productividad de las personas. Altos niveles de temperatura y humedad relativa causan fatiga y por lo tanto impiden el desarrollo normal de las actividades.

En general los niveles de contaminación del aire al interior de espacios cerrados dependen tanto de la contaminación generada por fuentes exteriores como de la contaminación producida por fuentes en el mismo espacio interior. La importancia de cada una de estas fuentes es relativa según el ambiente que se estudie y depende de variables como la ventilación

(una inadecuada ventilación puede incrementar los niveles de concentración de los compuestos contaminantes en el espacio interior) y el tipo de actividad que se realice en este espacio. Por ejemplo, al interior de una vivienda, las principales causas de generación de contaminantes incluyen el uso de productos de limpieza (solventes), quema de combustibles fósiles (v.g., gas natural) al cocinar y el consumo de tabaco.

En países en vía de desarrollo es aún común el uso de combustibles sólidos como el carbón, la madera y los residuos agrícolas como fuentes de energía. Sin embargo, utilizar estos combustibles para cocinar y para calefacción tiene como resultados elevados niveles de contaminación al interior de las viviendas.



Equipos de monitoreo de la calidad del aire para espacios interiores

3. Contaminación en Interiores



Monitoreo de la calidad del aire al interior de una vivienda



Monitoreo de la calidad del aire al interior de una vivienda

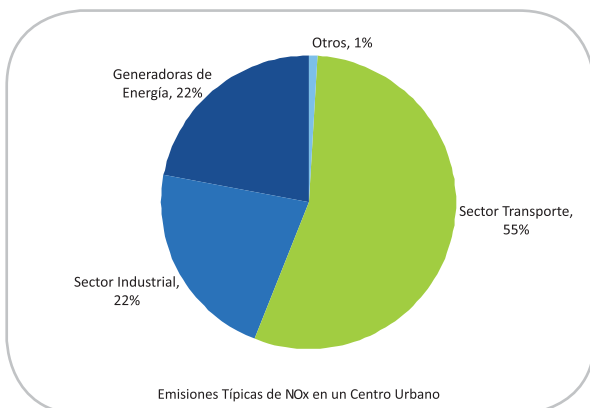
4. Principales Contaminantes del Aire

Los principales contaminantes del aire se pueden dividir en: a) contaminantes gaseosos y b) material particulado. Entre las especies gaseosas más importantes se encuentran los compuestos nitrogenados, compuestos azufrados, compuestos carbonados y el ozono.

4.1. Compuestos Nitrogenados

Óxidos de nitrógeno:

Hacen referencia a la combinación de óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). Son promotores de smog fotoquímico y lluvia ácida, así como de partículas secundarias y sustancias tóxicas y mutagénicas. El NO se forma por la fusión del nitrógeno molecular (N₂) y oxígeno molecular (O₂) que se encuentran en el aire.



Típicamente, un poco más de la mitad de las emisiones de NOx en un centro urbano provienen del sector transporte, seguido por las plantas generadoras de energía y el sector industrial.

Oxido nitroso (N₂O):

También es conocido como el gas de la risa. No es tóxico y tiene un elevado tiempo de residencia en la atmósfera (aproximadamente 150 años). Es una sustancia causante de efecto invernadero (mucho más poderosa que el dióxido de carbono).

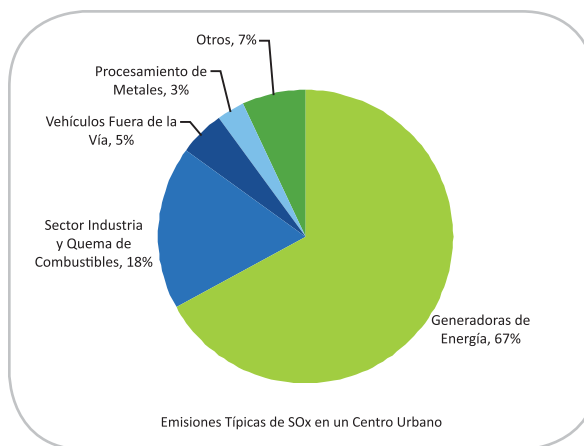
Amoniaco (NH₃):

Es un contaminante muy tóxico y letal. En fase gaseosa y en pequeñas concentraciones causa pérdida del conocimiento.

4.2. Compuestos Azufrados

Óxidos de azufre:

Son excelentes núcleos de condensación y por eso generan problemas de visibilidad en la atmósfera. Corroen materiales, son promotores de lluvia ácida y de partículas secundarias asociadas a enfermedades respiratorias y cardíacas.



El mayor porcentaje de emisiones de SOx en un centro urbano suele provenir de fuentes generadoras de energía (termoeléctricas), seguido por el sector industrial.

Sulfuro de hidrógeno (H₂S):

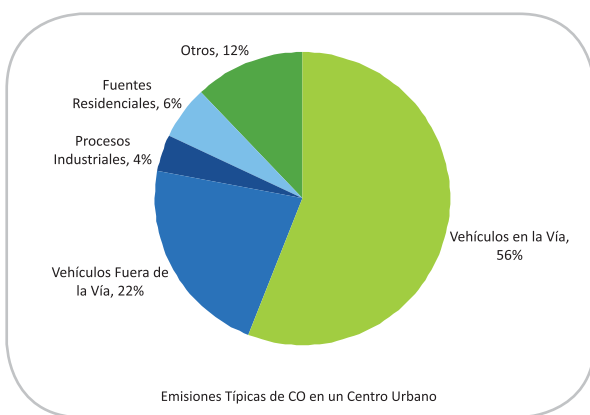
Se produce por la descomposición de materia orgánica en condiciones anóxicas. Este contaminante produce mal olor, es altamente irritante y puede ser letal para exposiciones a altas concentraciones.

4. Principales Contaminantes del Aire

4.3. Compuestos Carbonados

Monóxido de carbono:

Es inodoro, incoloro y tóxico. Es letal a altas concentraciones y causa efectos sobre el sistema nervioso (pérdida de visión e incapacidad para hacer tareas complejas). La peligrosidad del CO se encuentra relacionada con la formación de carboxihemoglobina en la sangre, asociada ésta con una reducción del nivel de oxígeno al interior del flujo sanguíneo.



Dióxido de carbono (CO₂):

Es una sustancia inerte pero debido a las cantidades en que se encuentra en la atmósfera, se considera el principal gas causante del efecto invernadero.

Compuestos orgánicos volátiles (COVs):

No están incluidos entre los contaminantes criterio pero son de gran importancia dadas sus características tóxicas y su capacidad de promover la formación de smog fotoquímico. Proviene de fuentes naturales, móviles y fijas así como de fuentes residenciales.

Metano (CH₄):

Es un potente gas de efecto invernadero.

4.4. Otras sustancias importantes

Radical OH:

No es un contaminante pero es una especie química fundamental en el estudio de la química atmosférica. En el 90% de las reacciones que ocurren en la atmósfera interviene el OH. Estas reacciones son las que determinan el tiempo de residencia de las sustancias. Es difícil de detectar ya que su concentración media en la atmósfera es inferior a 0.1 partes por trillón.

Ozono:

El ozono es un gas que se forma a partir de la reacción de otras especies contaminantes (compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno) en presencia de la luz solar. Cuando este compuesto se encuentra en la parte baja de la atmósfera (Troposfera) se considera una sustancia contaminante. Aún a bajos niveles de concentración, el ozono puede causar problemas en la salud de las personas. Este contaminante es el principal componente del smog fotoquímico.

4. Principales Contaminantes del Aire

4.5. Material Particulado

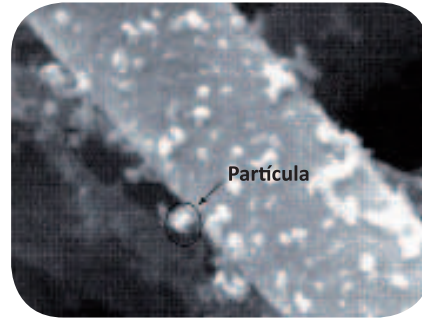
El PM es una mezcla compuesta por partículas extremadamente pequeñas que se encuentran suspendidas en el aire. Estas partículas son peligrosas para la salud de las personas porque tienen la capacidad de penetrar las vías respiratorias. La contaminación por partículas se compone de especies tales como nitratos, sulfatos, carbono orgánico, hidrocarburos poliaromáticos (HPA) y metales pesados (v.g., cromo, estroncio, zinc, silicio y cadmio).

Una propiedad muy importante del material particulado es su tamaño. El rango de tamaños del PM varía desde $0.001 \mu\text{m}$ hasta $1,000 \mu\text{m}$, sin embargo nos enfocamos en estudiar las partículas de tamaños que se encuentran entre los $0.01 \mu\text{m}$ y los $10 \mu\text{m}$ dado que son las más peligrosas para la salud.

Las partículas se denominan de diferente manera según su tamaño:

- Partículas suspendidas totales (PST): Son la todas las partículas que se encuentran en el aire sin importar su tamaño.
- Fracción respirable (PM₁₀): Partículas cuyo diámetro es menor o igual a 10 micrómetros (μm).
- Partículas finas (PM_{2.5}): Partículas cuyo diámetro es menor o igual a $2.5 \mu\text{m}$.
- Partícula ultrafinas: Partículas cuyo diámetro es menor o igual $0.1 \mu\text{m}$.

En la siguiente figura se presenta un ejemplo de una partícula emitida por un avión. Las partículas se recolectaron en filtros de fibra de vidrio de $1 \mu\text{m}$ de diámetro (estructuras tubulares que se observan en la imagen).



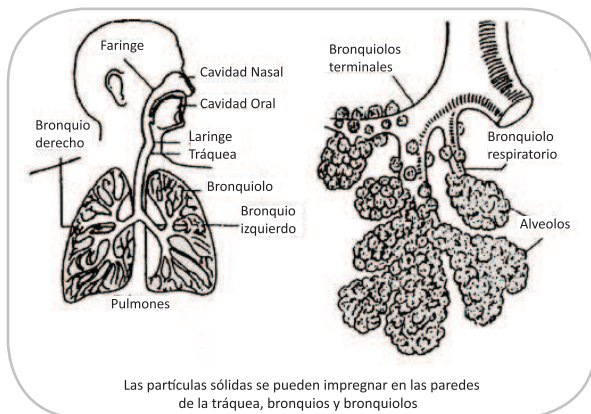
Microfotografía electrónica de material particulado

El PM constituye el principal problema de calidad del aire en los centros urbanos del país. Sus concentraciones ambientales en algunas zonas (v.g. zonas industriales) sobrepasan los valores de referencia establecidos por la normativa nacional.

4. Principales Contaminantes del Aire

4.5.1. Problemas en la salud asociados con material particulado

Existe plena evidencia científica acerca de la relación entre la presencia de PM en el aire y efectos negativos en la salud respiratoria y cardiovascular de las personas. La peligrosidad del material particulado se encuentra asociada con su tamaño y con las sustancias tóxicas que se pueden adherir a su superficie (entre las que se incluyen metales pesados y bacterias). Las partículas más pequeñas pueden entrar y alcanzar lugares más profundos dentro del sistema respiratorio de las personas.



Sistema Respiratorio

A diferencia de lo que sucede con otras especies contaminantes del aire, incluso una exposición a bajos niveles de PM puede tener consecuencias adversas sobre la salud de las personas. Esto quiere decir que el PM es un compuesto para el que no existe un umbral determinado.

La exposición a PM está asociada con el incremento de enfermedades respiratorias, exacerbación de síntomas de asma y bronquitis crónica, decrecimiento de la función pulmonar, muerte prematura y disminución de la

visibilidad. Siendo poblaciones sensibles como los niños y adultos mayores más vulnerables a dichos efectos adversos.

Según estadísticas de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá, la enfermedad respiratoria es la principal causa de morbilidad y mortalidad en la población infantil de la ciudad. Según cifras de la misma institución, la tasa de mortalidad en niños menores de cinco años por enfermedad respiratoria aguda (ERA) es de 14 casos por cada 100,000 menores. Actualmente se presentan cerca de 150,000 consultas médicas para todas las edades por esta causa al interior del régimen subsidiado de salud.



Madre en sala de enfermedad respiratoria aguda (ERA) de Bogotá

5. Unidades de Concentración

El reporte de las mediciones de calidad del aire suele hacerse mediante dos tipos de unidades de concentración: relativas y absolutas.

Relativas: Las concentraciones relativas están basadas en el volumen de aire y por lo tanto dependen de la presión y de la temperatura de la atmósfera. Esto significa que dependen de la ubicación, la altura y las condiciones climáticas. Por ejemplo: microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Absolutas: Las concentraciones absolutas son independientes de las condiciones de presión y temperatura. Por ejemplo: partes por millón (ppm).

Para contaminantes gaseosos:

Concentración molecular:

$$C = \frac{\text{Número de moléculas}}{\text{Volumen de aire}} ; \left[\frac{\text{Número}}{\text{cm}^3} \right]$$

Concentración por peso:

$$C = \frac{\text{Peso del contaminante}}{\text{Volumen de aire}} ; \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right]$$

Concentración absoluta:

$$C = \frac{\text{Volumen del contaminante}}{\text{Volumen de aire}} ; \left[\text{ppm} \right]$$

Para partículas:

Concentración por peso:

$$C = \frac{\text{Peso partículas}}{\text{Volumen de aire}} ; \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right]$$

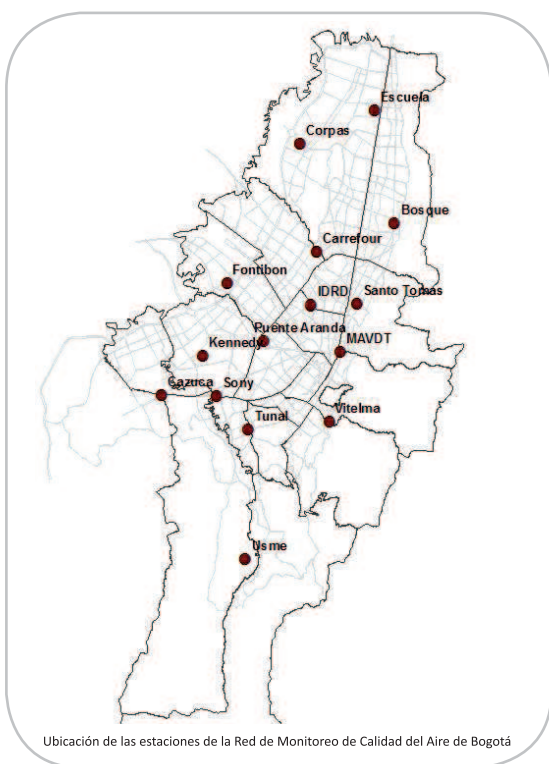
Concentración en número:

$$C = \frac{\text{Número de partículas}}{\text{Volumen de aire}} ; \left[\frac{\text{Número}}{\text{cm}^3} \right]$$

6. Sistemas de Análisis de Calidad de Aire

Para definir qué tipo de emisiones están relacionadas con un nivel de concentración dado, se utilizan modelos matemáticos que expliquen la influencia de diferentes variables sobre el nivel de contaminación. Los modelos permiten identificar qué cambios se requieren en las emisiones para lograr un nivel de concentración de los contaminantes que no interfiera con la salud de las personas.

Los modelos son una abstracción matemática de una simplificación de la realidad con el objeto de entender de mejor manera ciertos procesos, pero ninguno simula completamente lo que sucede en la realidad. La modelación de la calidad del aire es una herramienta fundamental para el diseño de la legislación ambiental, para la evaluación de escenarios futuros y el análisis de alternativas.

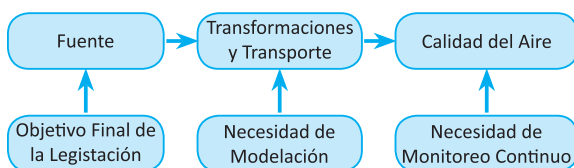


La modelación es una herramienta muy importante como guía para establecer normas ambientales. Sin embargo, no se debe olvidar que una campaña de medición en campo aporta información única que no puede ser reemplazada por un modelo teórico.

7. Legislación

La legislación debe entenderse como una meta a la que deseamos llegar como sociedad. Sin embargo, el cumplimiento de dicha meta depende de los controles que se hagan a las fuentes de emisión. En este sentido, siempre se requiere de modelación y monitoreo continuo de la calidad del aire para entender si las políticas implementadas están funcionando según lo esperado.

Para cumplir la norma de calidad del aire se requiere entonces de reglamentación que controle las emisiones. Esto significa que existen normas para emisiones y normas para calidad del aire. Cada una de éstas tienen fundamentos distintos y son expresadas haciendo uso de unidades diferentes.



- Ejemplo de unidades de la norma de calidad del aire: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm, ppb, ppt.
- Ejemplo de unidades de la norma de emisión: masa de contaminante generado por unidad de combustible utilizado (fuentes fijas) y masa de contaminante generado por unidad de distancia recorrida (fuentes móviles).

7.1. Norma de calidad del aire

El cumplimiento de la reglamentación de aire no se limita a especificar si se cumple con un cierto estándar o no. Por el contrario, esta normativa incluye niveles de cumplimiento en donde se determina qué tanto se están sobrepasando los niveles permitidos. Adicionalmente,

existen varios tipos de norma para un mismo contaminante. Por ejemplo, para el caso de la fracción respirable del material particulado (PM₁₀) se sabe que:

- Norma de larga duración en Colombia (norma anual): $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a partir del año 2011).
- Norma de corta duración en Colombia (norma diaria): $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Estos niveles máximos permisibles se relacionan con la forma en que se puede estar expuesto a la contaminación:

- Nivel de exposición aguda: ocurre cuando se presentan altos valores instantáneos de contaminación.
- Nivel de exposición crónica: ocurre cuando la contaminación permanece durante un tiempo prolongado.

Estos dos tipos de niveles de exposición son perjudiciales y por lo mismo es que la normativa de calidad del aire pretende dar solución a ambos.

La clasificación de una región como zona de no cumplimiento (área fuente de contaminación es el término utilizado en la normativa nacional para referirse a estas zonas), se realiza teniendo en cuenta la norma de larga duración. Se declara un área como **zona de no cumplimiento**, cuando se están incumpliendo los estándares de calidad del aire. Estas zonas se clasifican a su vez en diferentes niveles dependiendo de la severidad en el incumplimiento.

7. Legislación

Han sido declaradas como zonas de no cumplimiento áreas de las ciudades de Medellín y Bogotá; así como algunas áreas de la zona carbonífera del César, en todos los casos por incumplimiento de la norma de material particulado.

La declaración de los niveles de **prevención, alerta y emergencia** se lleva a cabo teniendo en cuenta la norma de corta duración. Estos niveles se declaran cuando se incumple la norma de corta duración con el fin de proteger a las personas de episodios de alta contaminación.

Los antecedentes en la legislación nacional en el tema de calidad del aire están dados principalmente por tres normas: la **Ley 23 de 1973**, la cual sienta las bases jurídicas para establecer el Código Nacional de Recursos Naturales; el **Decreto 2811 de 1974** por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente; y la **Ley 9 de 1979** con la cual se creó el código sanitario para emisiones atmosféricas. Finalmente, la **ley 99 de 1993** es el esqueleto del sistema legal colombiano en temas ambientales.

Entre las principales normas que regulan estos temas en el país se encuentran:

Calidad del aire:

- Decreto 948 de 1995*
- Decreto 979 de 2006
- Resolución 601 de 2006

Calidad de combustibles:

- Resolución 1565 de 2004
- Resolución 1180 de 2006
- Ley 1205 de 2008

Biocombustibles o combustibles limpios:

- Resolución 180158 de 2007
- Resolución 180782 de 2007
- Resolución 180243 de 2008

Ruido:

- Resolución 627 de 2006

Bajo esta resolución se desarrollo el Protocolo Nacional de medición de ruido, ruido ambiental y elaboración de mapas de ruido.

Emissiones de fuentes móviles y fijas:

- Resolución 909 de 2008
- Resolución 910 de 2008

7.2. Decreto 979 y Resolución 601 de 2006

Este decreto y esta resolución representan la norma vigente de calidad del aire en el país. Entre otras cosas incluyen consideraciones de:

- Límites de calidad del aire a nivel nacional.
- Contaminantes no convencionales (sustancias tóxicas) para las que no se realizan monitoreos continuos.
- Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio.
- Reglas para la definición de los niveles de prevención, alerta y emergencia.
- Planes de descontaminación y planes de contingencia.

* Actualmente derogado.

7. Legislación

Contaminante	Unidad	Límite Máximo Permissible	Tiempo de Exposición
PST	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	Anual
		300	24 horas
PM ₁₀	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	70*	Anual
		150	24 horas
SO ₂	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.031 (80)	Anual
		0.096 (250)	24 horas
		0.287 (750)	3 horas
NO ₂	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.053 (100)	Anual
		0.08 (150)	24 horas
		0.106 (200)	1 hora
O ₃	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.041 (80)	8 horas
		0.061 (120)	1 hora
CO	ppm (mg/m^3)	8.8 (10)	8 horas
		35 (40)	1 hora

Nota: mg/m^3 o $\mu\text{g}/\text{m}^3$: a las condiciones de 298,15° K y 101, 325K Pa. (25° C y 760mm Hg)

Niveles máximos permitidos para contaminantes criterio, según la Resolución 601 de 2006.
(*Este valor disminuye a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2009 y a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2011)

Contaminante	Tiempo de Exposición	Unidades	Prevención	Alerta	Emergencia
PST	24 horas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	375 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	625 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	875 $\mu\text{m}/\text{m}^3$
PM ₁₀	24 horas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	300 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	400 $\mu\text{m}/\text{m}^3$	500 $\mu\text{m}/\text{m}^3$
SO ₂	24 horas	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.191 (500)	0.382 (1000)	0.612 (1600)
NO ₂	1 hora	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.212 (400)	0.425 (800)	1.064 (2000)
O ₃	1 hora	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.178 (350)	0.356 (700)	0.509 (1000)
CO	8 horas	ppm (mg/m^3)	14.9 (17)	29.7 (34)	40.2 (46)

Nota: mg/m^3 o $\mu\text{g}/\text{m}^3$: a las condiciones de 298,15° K y 101, 325K Pa. (25° C y 760mm Hg)

Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de alerta, prevención y emergencia, establecidos en la Resolución 601 de 2006.

7. Legislación

7.3. Ley 1205 de 2008

En esta Ley se especifican los plazos para que de manera progresiva se logre una reducción en el contenido de azufre del combustible diésel que se utiliza en el país. A partir del 31 de diciembre de 2012, queda prohibido usar ACPM con un contenido superior a 50 ppm de azufre.

Plazos de implementación de diésel con menor contenido de azufre

Ciudad	Uso	Contenido de azufre (ppm)	Fecha a partir de la cual rige	Fecha hasta la cual rige
Bogotá	SITM	máximo 500	1 julio 2008	
	SITM	< 50	1 enero 2010	
	Demás usos	< 500		31 diciembre 2012
	Demás usos	< 50	31 diciembre 2012	
Resto del país	Sistemas de transporte a diésel	< 3000	1 julio 2008	31 diciembre 2008
	Sistemas de transporte a diésel	< 2500	1 enero 2009	31 diciembre 2009
	Sistemas de transporte a diésel	< 500		31 diciembre 2012
	Sistemas de transporte a diésel	< 50	31 diciembre 2012	
	SITM en los centros urbanos	< 50	1 enero 2010	

* SITM: Sistemas integrados de transporte masivo

8. Inventario de Emisiones

Tal y como ha sido mencionado previamente, para mejorar la calidad del aire se requiere de una reducción de emisiones. De esta forma, para definir una política o mejoramiento de las condiciones de calidad del aire es necesario el conocimiento de las cantidades de contaminantes emitidas por los principales responsables de las emisiones. Esto se logra a través de los inventarios de emisiones, metodologías para contabilizar las descargas de las distintas fuentes. Para el caso colombiano, se cuenta con el Protocolo Nacional de Inventarios de Emisiones.

Para realizar el inventario de emisiones de una ciudad es necesario conocer el número de fuentes existentes, los contaminantes que emiten las diferentes fuentes y la cantidad de contaminantes que emite cada fuente.

Las emisiones para cada tipo de fuente se calculan según la siguiente ecuación:

$$E = F_e \cdot A \cdot N_f$$

En donde:

E = Emisión total
F_e = Factor de emisión
A = Factor de actividad
N_f = Número de fuentes

El factor de emisión se refiere a la cantidad de contaminante emitida por unidad de actividad realizada. El factor de actividad tiene que ver con la cantidad de actividad realizada.

El factor de emisión depende de múltiples variables, tales como el tipo de combustible y el tamaño y el estado de mantenimiento del sistema de combustión.



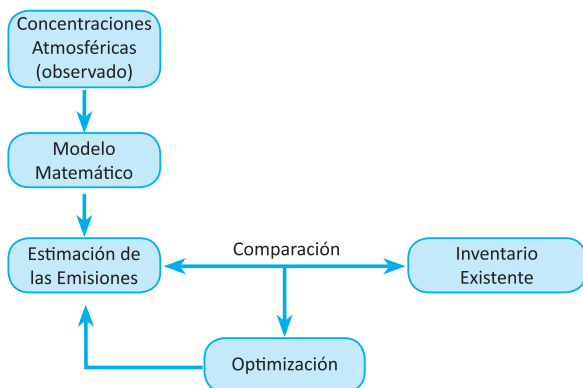
Emisiones de fuentes fijas - Ladrillera

Para el caso de fuentes fijas uno de los protocolos teóricos más utilizados es el denominado AP-42, ideado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). Este método consiste en un compendio de factores de emisión para fuentes fijas que la EPA ha desarrollado durante 15 años por medio de revisión de literatura científica y realización de ensayos de emisiones. Los factores de emisión AP-42 se reportan según la actividad de la industria y el tipo de combustible utilizado. El valor reportado es el promedio de todos los valores disponibles que se consideran válidos. La estimación por medio de este método es muy utilizada en países en desarrollo y se considera un excelente primer paso en los esfuerzos por estimar las emisiones en un lugar determinado.

Para el caso de las fuentes móviles, existen diferentes metodologías para determinar sus factores de emisión. Estas suelen clasificarse en dos grupos principales: metodologías tipo arriba-abajo y metodologías tipo abajo-arriba. En el primer grupo se encuentran estudios de túneles, modelación inversa y balance químico de masas; en el segundo grupo se encuentra la medición de emisiones en ruta, medición remota y ensayos dinamométricos.

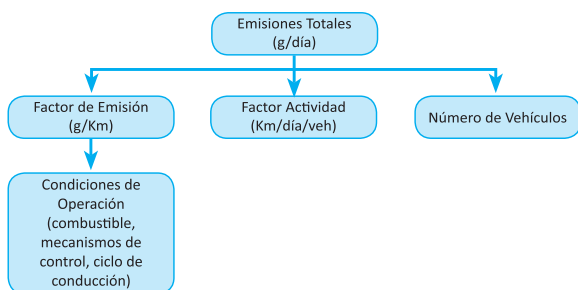
8. Inventario de Emisiones

En la metodología arriba-abajo se suele partir de datos de mediciones de calidad del aire y se observa el comportamiento de los contaminantes aplicando un modelo matemático que relacione emisiones con concentraciones.



Esquema metodología arriba-abajo

En la metodología de abajo-arriba se construye el inventario de emisiones totales a partir de factores de emisión, factores de actividad y número de vehículos.



Esquema metodología abajo-arriba



Medición de emisiones en ruta



Medición de emisiones en ruta



Medición de emisiones en ruta

9. Emisiones Producidas por Vehículos Motorizados

Las emisiones producidas por los vehículos no se limitan a las asociadas con el tubo de escape e incluyen:

- Emisiones por los respiraderos del motor, en donde el escape de gas de los pistones o vapores de aceite son evacuados. De esta forma se generan emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos (HC) principalmente.
- Emisiones evaporativas desde el carburador o la entrada de aire de la inyección de combustible y el tanque de combustible, que son evacuadas a la atmósfera (hidrocarburos principalmente).
- Emisiones en el sistema de escape, en donde los productos de una combustión incompleta son expedidos a la atmósfera (CO, HC, NO_x y PM).

9.1. Emisiones de vehículos operados con gasolina

Los principales contaminantes asociados a la combustión de la gasolina en motores de combustión interna son: dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.

Dióxido de carbono: su producción está asociada a la oxidación de los hidrocarburos que componen el combustible. Un vehículo que consuma más gasolina produce mayores cantidades de CO₂.

Monóxido de carbono: su producción está asociada a la combustión incompleta debido al déficit de oxígeno que se presenta durante la combustión.

Hidrocarburos: la mayoría de sus emisiones están relacionadas con el **fenómeno de enfriamiento de llama**, debido al contacto con superficies frías en los extremos de los cilindros del vehículo. Como producto de la combustión incompleta asociado con dicho fenómeno se generan emisiones de metano, etano, acetileno, formaldehído, aldehídos, propileno y una serie de hidrocarburos de cadena corta. También hay formación de alcanos y alquenos y por quemado lento se produce benceno, tolueno y xileno.

Óxidos de nitrógeno: son el resultado de la fusión de las moléculas de O₂ y N₂ en altas temperaturas. Las moléculas de nitrógeno provienen del aire que entra al proceso de combustión para proveer el oxígeno necesario.

9.2. Emisiones de vehículos operados con ACPM

El motor que opera con combustible diésel (ACPM)* fue inventado y desarrollado de forma anterior al motor que funciona con gasolina. Las emisiones producidas por un motor diésel son similares a aquellas relacionadas con un motor de gasolina, en términos del tipo de especies químicas que son descargadas a la atmósfera. Sin embargo, la importancia relativa de dichas especies es función de la tecnología del motor y el combustible utilizado.

*ACPM: aceite combustible para motores.

9. Emisiones Producidas por Vehículos Motorizados

Estas diferencias se deben a las particularidades de cada tipo de motor, entre las cuales se pueden destacar que si bien los dos motores son de cuatro tiempos, el motor diésel no requiere de bujías durante la fase de combustión y la mezcla de aire-combustible no se lleva a cabo de forma previa a dicha fase.

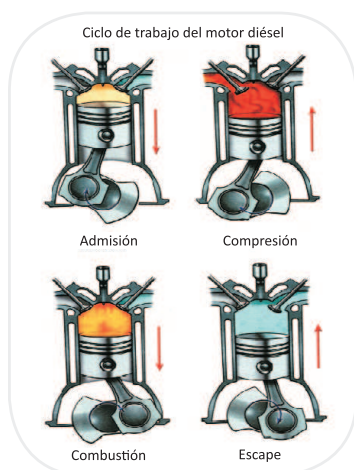


Diagrama de funcionamiento de motor diésel 4 tiempos

9.2.1. Ventajas y desventajas de los motores diésel

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Economía de combustible	Ruidoso
Duradero	Pesado
Baja producción de hidrocarburos	Alta producción de NO _x
Baja producción de monóxido de carbono	Alta producción de material particulado
Alto torque	Baja velocidad
Bajo costo del combustible	Bajo consumo de aire
Bajo costo de mantenimiento	Alto costo del motor

Los motores diésel operan a una mayor temperatura dado que trabajan a tasas de compresión bastante más elevadas que las que se observan en motores de gasolina. Esto se traduce en mayores emisiones de NO_x pero

menos emisiones de hidrocarburos. Del mismo modo, estos motores están fabricados con materiales más resistentes y cuentan con una mayor vida útil que requiere menores costos de mantenimiento.

Dado que la mezcla de combustible es heterogénea hay ciertos hidrocarburos que no alcanzan a quemarse pero las altas temperaturas del motor fomentan el proceso de pirólisis y los subproductos de la misma forman material particulado.

El motor diésel es más económico en lo que se refiere a consumo de combustible, dado el mayor contenido energético del ACPM.

El torque, definido como la fuerza que transmite el motor a las ruedas, suele ser mayor en motores con tecnología diésel en comparación con motores de gasolina. Por esta razón, los vehículos de carga pesada (incluyendo camiones y buses de gran tamaño) típicamente se encuentran provistos de motores diésel.

Los motores diésel tienden a ser más ruidosos en su operación debido al efecto de la auto-ignición, son más pesados y producen mayores emisiones de óxidos de nitrógeno y material particulado.



Vehículo de transporte público que utiliza combustible diésel

9. Emisiones Producidas por Vehículos Motorizados

9.2.2. Contenido de Azufre

El contenido de azufre en los combustibles diésel es una de las variables más importantes al momento de definir su tendencia a la formación de contaminantes tales como el material particulado. A mayor contenido de azufre, mayores serán las emisiones por parte de los vehículos que hacen uso del ACPM.

Tal y como fue mencionado anteriormente, dada la condición heterogénea de la mezcla de aire y combustible en un motor diésel, una fracción importante de hidrocarburos no alcanza a ser quemada durante la combustión y en lugar de esto es sometida a un proceso de pirólisis que forma material particulado. Dicho material se concentra alrededor de los átomos de azufre que hacen las veces de núcleos de condensación.

El azufre es una impureza que se presenta de forma natural en el crudo que debe ser eliminado durante el proceso de refinación. Para dichos propósitos existen diferentes tipos de tecnologías tales como el denominado hidrotratamiento.

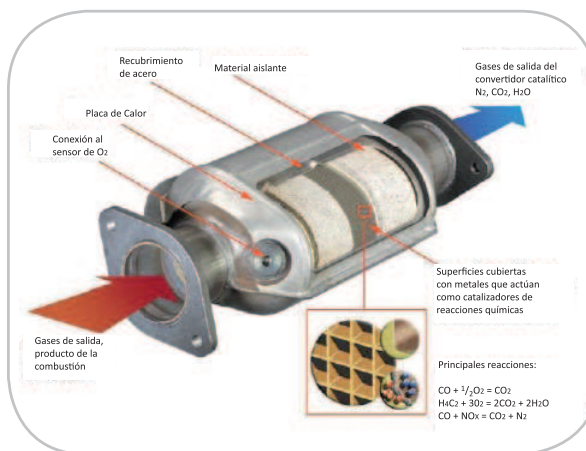
Al bajar el contenido de azufre del ACPM no sólo se logra una disminución en las emisiones de material particulado sino que se abre la posibilidad para el uso de tecnologías de control de emisiones, tales como los filtros de partículas. Esto se debe a que este tipo de filtros sólo funciona cuando los vehículos son alimentados con ACPM de bajo contenido de azufre.

De forma ideal, el contenido de azufre en el ACPM debe ser inferior a 50 partes por millón. En el año 2008 el Congreso de la República

de Colombia aprobó la Ley 1205 en donde se establecieron los límites máximos para el contenido de azufre y el cronograma de cumplimiento de los mismos. Según lo establecido por este acto legislativo, para el 31 de diciembre de 2012 todo el ACPM distribuido en el país deberá tener un contenido de azufre inferior a 50 ppm.

9.2.3. Convertidor catalítico

El convertidor catalítico es una tecnología de control de emisiones que ha sido utilizada de forma exitosa por varias décadas en vehículos operados con gasolina. Este tipo de dispositivos representa uno de los avances más significativos de la industria automotriz dado que a partir de una inversión relativamente pequeña (hoy en día del orden de US\$1,500) se logran reducción de emisiones superiores al 90%. Estos sistemas son particularmente eficientes para el caso de hidrocarburos y monóxido de carbono.



Convertidor Catalítico

10. Meteorología

Meteorología es la ciencia que estudia el estado del tiempo, el medio atmosférico, los fenómenos allí producidos y las leyes que lo rigen.

Las condiciones meteorológicas juegan un papel fundamental al momento de determinar los niveles de contaminación del aire en un lugar determinado. El efecto de las diversas variables relacionadas con el clima y las condiciones de la denominada mezcla atmosférica pueden ser la diferencia entre contar con un aire contaminado y uno que se pueda considerar saludable.

Por ejemplo, si se compara a la ciudad de Santiago de Chile con Bogotá, se puede notar que a pesar de que las emisiones y descargas atmosféricas en la ciudad de Bogotá son mayores que aquellas que se presentan en Santiago, los niveles de contaminación del aire en esta última ciudad son mayores que los que se observan en Bogotá. Esta aparente inconsistencia encuentra explicación en las condiciones meteorológicas que típicamente se presentan en estas dos ciudades. En este caso, Bogotá se ve favorecida por una mayor tendencia a la dispersión de los contaminantes (mayor mezcla atmosférica) así como por una mayor frecuencia de precipitación.

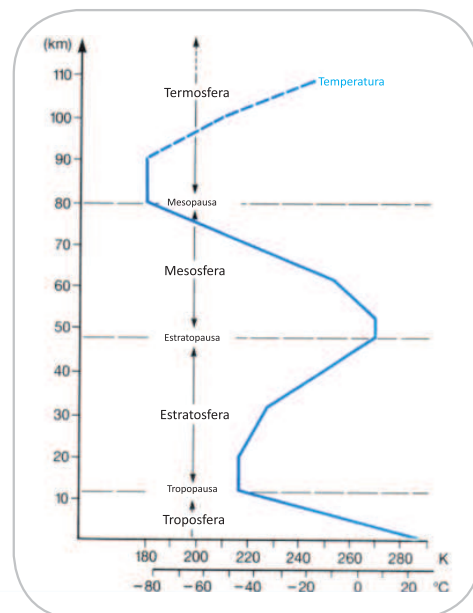
$$\text{Emisiones} + \text{Química y Física de la Atmósfera} = \text{Concentraciones de los Contaminantes}$$

10.1. Atmósfera

La atmósfera es la masa gaseosa que se encuentra por encima de la superficie de la tierra. Se divide en varias capas de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas, es especial el denominado **perfil de temperatura**. La densidad de la atmósfera disminuye con su altura de tal forma que el 50% del total de la masa se encuentra concentrada en los primeros kilómetros.

La primera y más importante (en términos del estudio de la calidad del aire) capa de la atmósfera es la troposfera. Esta es la capa que se encuentra en contacto con la superficie y en la que se presentan los fenómenos de contaminación que afectan de mayor forma la salud y el bienestar de la población. La troposfera presenta un perfil de temperatura negativo (el aire se enfría al aumentar la altura) en donde tienden a presentarse fenómenos de movimiento vertical del aire que favorecen la dispersión de los contaminantes emitidos por las distintas fuentes.

La segunda capa de la atmósfera es la estratosfera, en donde el perfil de temperatura es de carácter positivo, es decir que la temperatura del aire se incrementa con la altura. Esta característica se encuentra asociada con la principal función de dicha capa, en donde opera la denominada **capa de ozono** que filtra la radiación ultravioleta procedente del sol. Otras capas de la atmósfera incluyen a la mesosfera y la termosfera.



Capas de la atmósfera

10. Meteorología

10.1.1 Propiedades de la atmósfera

- **Composición del aire:** las principales sustancias que componen el aire son: nitrógeno molecular (N_2) = 78%, oxígeno molecular (O_2) = 21% y argón y otras trazas = 1%. Esta composición no cambia ni con la posición geográfica (latitud y longitud) ni con la altura y tampoco se ve significativamente influenciada por la presencia de contaminantes del aire.
- **Contenido de humedad:** el contenido de humedad es una propiedad altamente variable que cambia con el tiempo y la posición. La variación de esta propiedad es responsable de muchos de los fenómenos asociados con el movimiento de las masas de aire. El contenido de humedad puede asociarse con el vapor de agua (gas), gotas de lluvia (líquido) y hielo (sólido).

10.2. Movimientos de las masas de aire

Las principales variables meteorológicas en lo que tiene que ver con su incidencia en los niveles de contaminación del aire son la velocidad y dirección del viento así como la estabilidad atmosférica. Esta última hace referencia a la tendencia de la atmósfera a dispersar los contaminantes que son descargadas por las distintas fuentes. Una atmósfera estable será aquella en la que los contaminantes tienden a permanecer mientras que una atmósfera dispersiva será aquella en donde éstos tienden a dispersarse y diluirse.

El movimiento de las masas de aire y la determinación de las condiciones de estabilidad atmosférica son influenciados por fenómenos de

macro-escala y micro-escala que se interrelacionan de forma permanente.

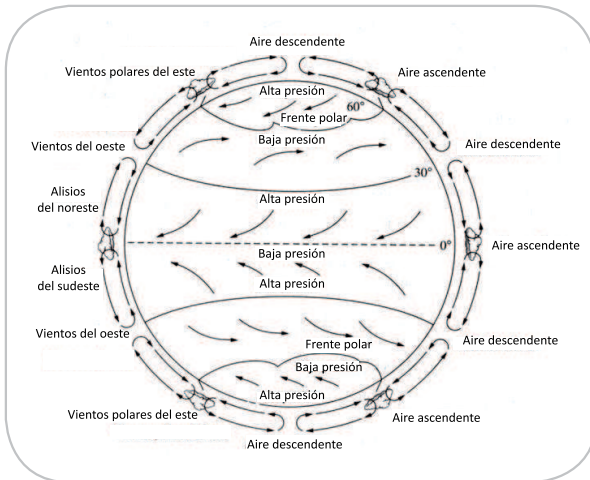
10.2.1. Fenómenos a macro escala

- **Calentamiento desigual de la superficie de la Tierra:** el movimiento horizontal de las masas de aire (la componente horizontal de los vientos) está fundamentalmente relacionado con el calentamiento desigual de las superficies de la Tierra en las diferentes latitudes (v.g., polos vs. zona ecuatorial). Esto se debe a que los diferenciales de presión (y de densidad) son la fuerza motriz de dichos movimientos, en donde se generan vientos desde lugares con mayor presión (mayor densidad) hacia lugares con menor presión (menor densidad).

La Tierra se encuentra ligeramente inclinada sobre su plano de rotación y por esta razón la intensidad de la radiación proveniente del sol no es igual en todas las latitudes. Esta radiación es más intensa en la zona ecuatorial que en los polos y por lo mismo se generan las denominadas celdas de circulación.

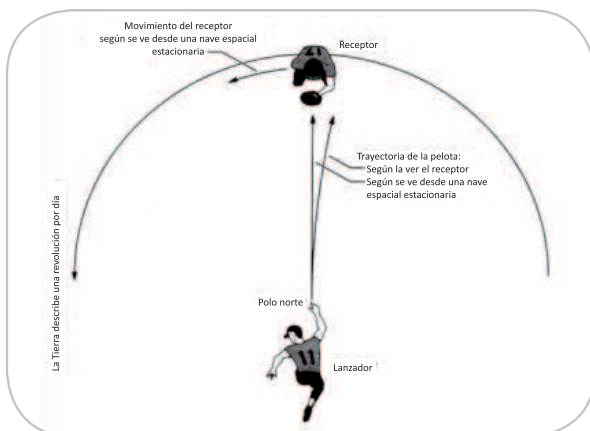
- **Celdas de circulación:** a medida que el aire asciende su densidad disminuye generando inestabilidades que resultan en la formación de sub-celdas de circulación (celdas de Hadley). Estas celdas tienen gran influencia en el clima de toda la Tierra ya que los patrones de aire (ascendente y descendente) asociados con las mismas determinan las zonas de lluvia en las diferentes latitudes del planeta.

10. Meteorología



Celdas de circulación del aire

- **Fuerza de Coriolis:** la fuerza y aceleración de Coriolis corresponde al efecto del movimiento de las masas de aire sobre una superficie (la Tierra) que a su vez se encuentra rotando. Un ejemplo de dicho efecto resulta de la situación hipotética en la que un lanzador de béisbol que se encuentra sobre el polo norte arroja con fuerza una pelota en dirección del Ecuador. La trayectoria de dicha pelota vista desde la perspectiva de quien la recibiría corresponde a una curva en el sentido contrario de rotación de la Tierra. Algo similar ocurre con las trayectorias de las masas de viento.



Efecto Coriolis

10.2.2. Fenómenos a micro-escala

- **Intercambio Tierra-agua:** la capacidad calórica del agua y de la tierra es diferente, lo que implica que sometidas a una misma radiación, estas dos superficies presentarán tasas de calentamiento y enfriamiento muy distintas entre sí. Por ejemplo, la temperatura de un lago es bastante más estable en comparación con la temperatura del pavimento de la ciudad que se encuentre en sus orillas.

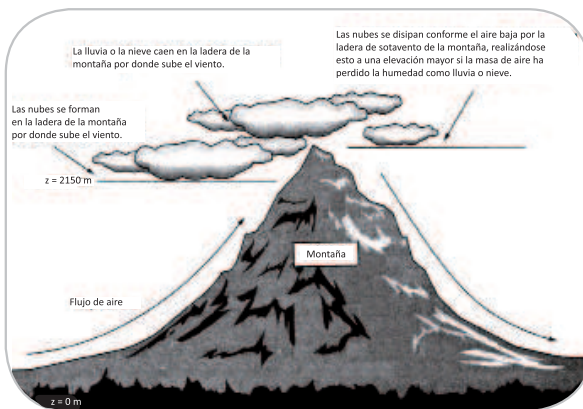
Usando el mismo ejemplo, las diferencias en las tasas de calentamiento y enfriamiento generan diferenciales de temperatura entre las dos superficies (el lago y el pavimento) que a su vez se ven reflejadas en diferenciales de densidad (y gradientes de presión) en las masas de aire que se encuentra encima de las mismas. Estos gradientes resultan en la generación de celdas de circulación (viento horizontal y vertical) cuya dirección e intensidad serán función de la hora del día y de la cantidad de radiación lumínica.

- **Efecto orográfico:** este efecto se observa típicamente en un valle que se encuentre separado del mar o de un lago de gran extensión por medio de una cadena montañosa. El aire proveniente del mar es húmedo y será arrastrado cuesta arriba a ciertas horas del día debido al fenómeno de intercambio tierra-agua. En este proceso la masa de aire perderá temperatura a medida que gana altura y por lo mismo verá disminuida su capacidad de contener agua (al disminuir la temperatura

10. Meteorología

se disminuye la humedad relativa y se llegará a condiciones de saturación más fácilmente).

Una vez la masa de aire haya llegado a condiciones de saturación se generará precipitación (en la zona alta de montaña) de tal forma que cuando el aire siga su recorrido cuesta abajo su contenido de humedad será menor que el que lo caracterizaba antes de la precipitación. En este aire seco el gradiente de temperatura será mayor que el del aire húmedo y por lo mismo cuando el aire gane temperatura al disminuir la altura lo hará de forma más rápida. Esto se traduce en que el valle tendrá unas condiciones meteorológicas caracterizadas por un aire de baja humedad y de una temperatura bastante mayor que la que se observe en frente del espejo de agua al otro lado de la montaña.



Efecto orográfico

10.2.3. Movimiento vertical

Los movimientos horizontales y verticales de las masas de aire interactúan entre sí. La componente horizontal tiende a ser la más importante desde el punto de vista de su magnitud mientras que la componente vertical es la que determina el grado de mezcla atmosférica. Esta última es la principal determinante del nivel de estabilidad y por ende de las condiciones de dispersión de los contaminantes que se puedan encontrar en el aire.

Los movimientos verticales de las masas de aire se encuentran determinados por el **Principio de Boyancia**, según el cual una parcela de aire que sea menos densa que el aire en sus alrededores se desplazará hacia arriba. Del mismo modo, una parcela de aire que sea más densa que el aire en sus alrededores se desplazará hacia abajo. Dado que la densidad del aire es función de las condiciones de presión, temperatura y contenido de humedad, todas estas variables son determinantes del movimiento vertical en la atmósfera.

Densidad del aire según la ley de los gases ideales

$$\rho_{aire} = \frac{P \cdot PM}{R \cdot T}$$

En donde:

ρ_{aire} = Densidad del aire

P = Presión

PM = Peso molecular del aire

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura

10. Meteorología

10.2.4. Otras definiciones

Perfil de temperatura: tal y como ha sido mencionado anteriormente, el perfil de temperatura es una de las propiedades físicas más importantes de la atmósfera ya que determina su grado de estabilidad.

Estabilidad atmosférica: dependiendo del perfil de temperatura, la atmósfera puede ser inestable, neutra, estable o superestable (cuando se presenta el fenómeno de inversión térmica). Cuando la atmósfera es estable la tendencia a la mezcla vertical es baja mientras que si la atmósfera es inestable dicha tendencia es bastante importante.

Inversión térmica: es un fenómeno que se presenta cuando el perfil de temperatura es de carácter positivo (en todos los demás casos los perfiles son negativos, es decir que la temperatura del aire disminuye con la altura). Esto significa que masas de aire de menor densidad (mayor temperatura) se encuentran localizadas encima de masas de aire de mayor densidad (menor temperatura). En esta condición el movimiento vertical será inexistente y por lo mismo no se generará ningún tipo de mezcla atmosférica (superestabilidad).

La inversión térmica es de vital importancia para el estudio de la calidad del aire ya que a pesar de ser una condición que obedece a fenómenos naturales tiene amplias implicaciones en los fenómenos de contaminación en centros urbanos. Esto se debe a que bajo una inversión térmica, las emisiones de las diferentes fuentes generarán rápidamente concentraciones que pueden violar las normas de calidad del aire

(en una condición de superestabilidad los contaminantes emitidos se acumulan y se generan altas concentraciones de los mismos).

La inversión térmica puede darse como consecuencia de múltiples factores climatológicos y puede presentarse de forma local o regional así como de forma permanente o estacionaria. En el caso de Bogotá, por ejemplo, el fenómeno de inversión térmica tiende a presentarse de forma diaria (su intensidad varía según las condiciones generales de nubosidad y temperatura) y muy marcada entre las 6:00 a.m. y las 9:00 a.m. de la mañana. En este mismo caso, dicha condición meteorológica coincide con las horas en las que se presenta el mayor número de vehículos en las calles. Dicha combinación explica por qué en el horario antes mencionado se observan los mayores niveles de contaminación en la ciudad.

Altura de la capa de mezcla: Esta cantidad hace referencia a la altura máxima hasta la cual se presenta dispersión de contaminantes y se encuentra determinada por la turbulencia atmosférica. La dimensión de la altura de capa de mezcla es directamente proporcional al nivel de dispersión atmosférica (a menor dispersión, menor es la altura de la capa de mezcla).



Bogotá, fenómeno de inversión térmica

11. Fenómenos Globales de Contaminación

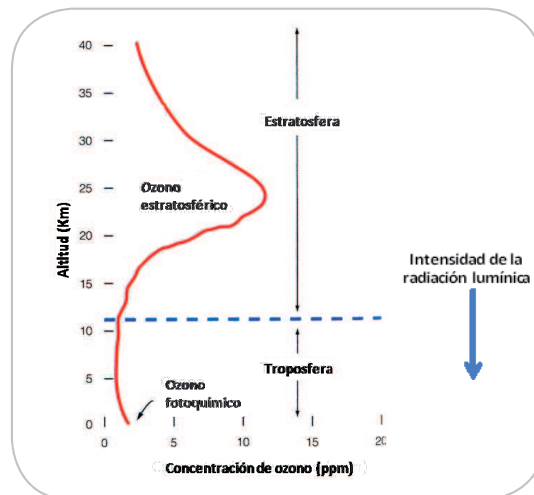
De forma adicional a los fenómenos de contaminación urbana, existen problemas de contaminación que afectan a la totalidad de la Tierra y que obedecen a dinámicas muy distintas a las que han sido discutidas hasta el momento. El decaimiento de la capa de ozono estratosférico y el cambio climático son dos de los fenómenos globales más importantes*.

11.1. Decaimiento del ozono estratosférico

Si bien se trata de la misma molécula (O₃), el ozono a nivel de la troposfera y el ozono estratosférico tienen implicaciones muy distintas desde la perspectiva de la salud humana. El primero se considera uno de los problemas más severos de contaminación en los centros urbanos del mundo y por sus características altamente irritantes y oxidantes se ha convertido en todo un riesgo para la salud del hombre, los animales, e incluso para la supervivencia de algunas especies vegetales.

Por su parte, el ozono estratosférico conforma la denominada **capa de ozono** sin la cual no existiría la vida en la Tierra, tal y como la conocemos hoy en día. Esto se debe a que el ciclo de generación y destrucción permanente de ozono y oxígeno molecular que se presenta en esta capa de la atmósfera tiene la capacidad de absorber y filtrar radiación lumínica altamente energética que sería perjudicial e incluso letal para muchos de los organismos que habitan la Tierra.

*Otro fenómeno relevante a nivel regional es la formación de lluvia ácida, la cual resulta de la combinación de la humedad atmosférica con especies tales como óxidos de nitrógeno y azufre. En interacción con el vapor de agua, estos gases forman ácido sulfúrico y ácidos nítricos, que al acompañar las precipitaciones afectan el pH de las mismas.



Cantidad de O₃ vs. Altura

11.1.1. Destrucción del ozono por acción del hombre

El ciclo regenerativo de destrucción de ozono y oxígeno molecular (que sirve para absorber la radiación ultravioleta) ha estado en equilibrio en la estratósfera desde mucho antes que existiera vida inteligente en la Tierra. Esta situación cambió cuando el desarrollo tecnológico del hombre resultó en la invención de las sustancias conocidas como cloro-fluoro-carbonados (CFC).

Destrucción de ozono en la estratósfera



X = cloro, bromo y flúor



La destrucción del ozono troposférico (capa de ozono) se produce frecuentemente, siendo mayor durante la época de primavera antártica. Las moléculas de cloro principalmente, bromo y flúor reaccionan con el O₃ causando su destrucción.

11. Fenómenos Globales de Contaminación

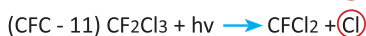
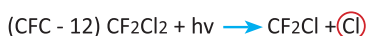
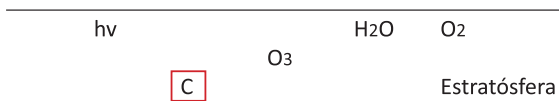
Estas especies (que le merecieron el premio Nobel de química a quien logró sintetizarlas) cuentan propiedades muy interesantes tales como la simplicidad de su manufactura, su condición inerte y no corrosiva y su muy baja capacidad calórica. Esto se traduce en bajos costos de producción así como en una gran conveniencia para su transporte y utilización como agente refrigerante y espumante. Por estas razones, el uso de los CFC fue masivo y promovido en casi la totalidad de los países del mundo.

Esta situación cambió cuando el Profesor Mario Molina¹ logró identificar que los CFC, caracterizados por extensos tiempos de residencia en la atmósfera, perdían su condición inerte una vez alcanzaban la estratosfera. Esto se debe a que en las condiciones de alta radiación que se observan en dicha capa de la atmósfera, los CFC son sometidos a procesos de fotólisis que logran la liberación de átomos de cloro que a su vez cuentan con la capacidad de consumir el ozono allí presente.

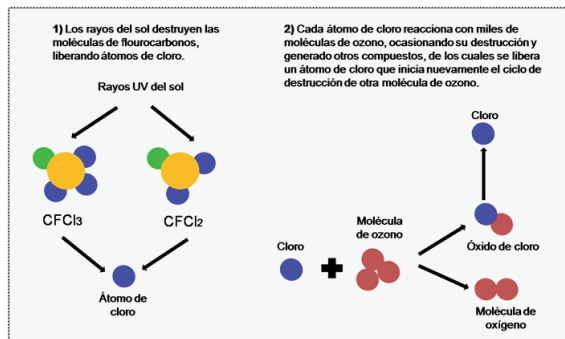
Destrucción de la capa de ozono por acción del cloro



Cloro en la estratosfera

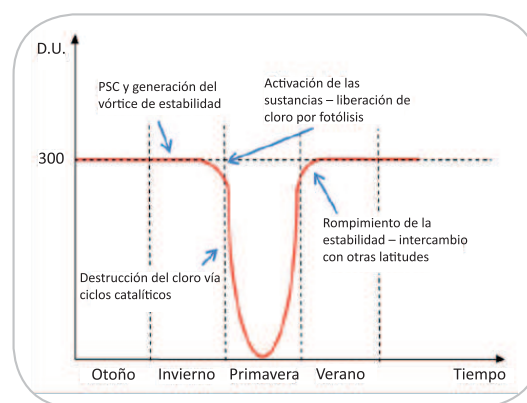


¹ Mario Molina: Premio Nobel de Química por sus aportes al problema de destrucción de la capa de ozono. Científico experto en el área de calidad del aire y de manera específica en la química de la atmósfera.



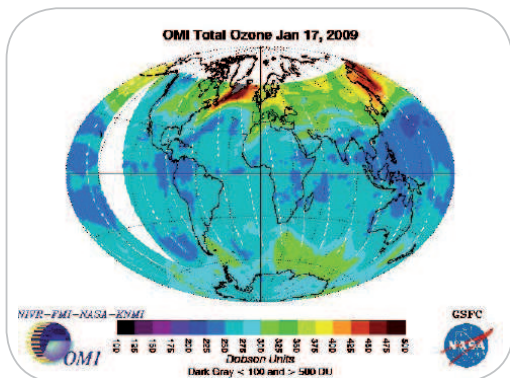
Destrucción de la capa de ozono por acción del cloro

El fenómeno de destrucción del ozono estratosférico es particularmente fuerte en el hemisferio sur en donde dadas sus bajas temperaturas se forma el denominado vórtice de estabilidad que logra aislar esta región del resto del planeta durante el invierno polar. De forma simultánea, dada la ausencia total de luz durante dicha época del año se presenta una acumulación de los CFC que liberan grandes cantidades de cloro una vez llega la primavera y los primeros rayos de sol.



Ozono vs. Tiempo (estaciones)

11. Fenómenos Globales de Contaminación



Capa de ozono

11.1.2. Protocolo de Montreal

El protocolo de Montreal representa uno de los más grandes éxitos de política ambiental internacional. A través de éste, y como consecuencia del descubrimiento del Profesor Molina (mercedor del premio Nóbel en química), se logró que la mayoría de los países del mundo acordaran cesar su producción y utilización de CFC. Hoy en día, a pesar de múltiples complicaciones y limitaciones, existe un cumplimiento masivo de dicho acuerdo y las concentraciones atmosféricas de estas especies ya muestran una tendencia decreciente. Esto significa que gracias a la ciencia y al buen diseño de los mecanismos de política internacional estamos en camino de resolver uno de los problemas ambientales más grandes que hemos enfrentado como sociedad.

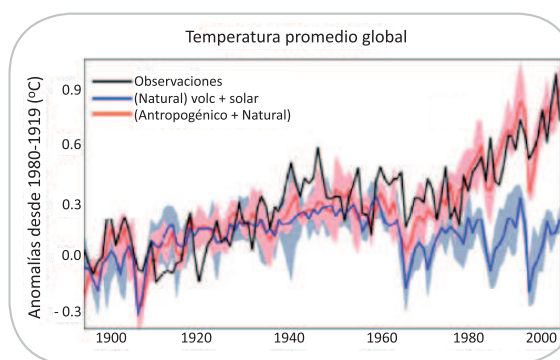
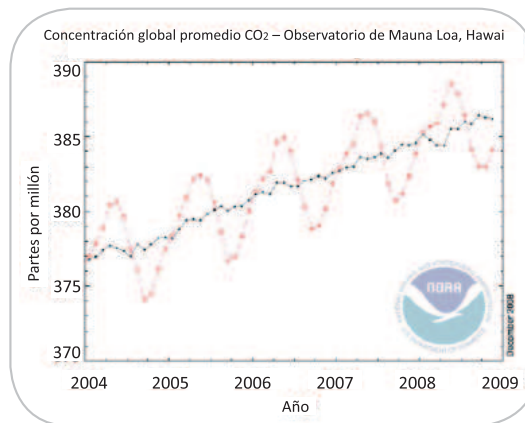
11.2. Cambio climático y calentamiento global

El fenómeno de cambio climático (incluyendo el calentamiento global) se debe a la presencia de especies en la atmósfera que son capaces de generar alteraciones (positivas o negativas) en la temperatura del aire. La más importante de dichas especies es el dióxido de carbono, el cual tiene la capacidad de absorber radiación lumínica (en longitudes de onda de poca energía) para

retornarla en forma de calor a la atmósfera. Algo similar ocurre con el metano y el óxido nitroso.

Hoy en día se encuentra plenamente documentado que si bien el calentamiento global es un fenómeno de origen natural (la temperatura media de la tierra se encontraría por debajo del punto de congelación del agua si no fuera por el CO₂ que se encuentra en el aire), la acción del hombre ha alterado el balance natural que existía y el incremento de dicho fenómeno puede llevar a consecuencias desastrosas para la totalidad del ecosistema terrestre.

En este sentido, se sabe también que existe una relación directa entre la severidad del calentamiento global, la cantidad de CO₂ en la atmósfera y la cantidad de combustibles fósiles que son utilizados para las distintas actividades económicas del hombre.

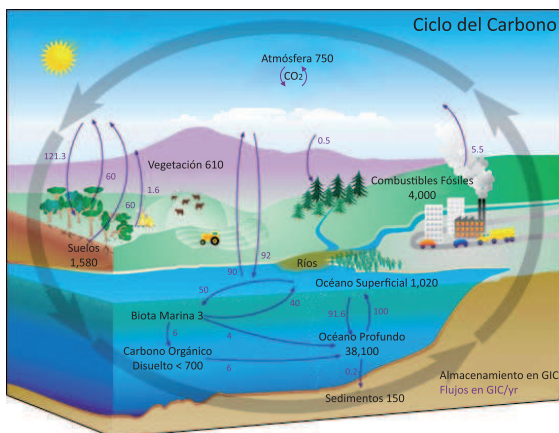


11. Fenómenos Globales de Contaminación

11.2.1. Ciclo del carbono

De forma similar a lo que ocurre para el agua, el carbono cuenta con un ciclo natural en donde sus cantidades se distribuyen en las diferentes fases que existen en la Tierra (litosfera, hidrosfera y atmósfera), existiendo una interacción permanente entre las mismas. El conocimiento de dicho ciclo así como de los flujos que se presentan entre las fases que lo componen es una de las herramientas más importantes con las que se cuenta para diseñar mecanismos de mitigación del fenómeno de cambio climático.

Por ejemplo, se sabe que la cantidad de carbono que se encuentra en la atmósfera es bastante más pequeña que la que se encuentra en la litósfera. De esta forma, incrementando las zonas verdes y la cantidad de vegetación en la tierra se lograría **secuestrar** una fracción importante del carbono que hace parte de la atmósfera. Algo similar ha sido propuesto para promover que los flujos de carbono desde la fase gaseosa hacia el mar se vean incrementados de forma significativa.



A pesar de que existen diversas formas para reducir la cantidad de carbono en la atmósfera, son muchos los autores que insisten en que la

mejor estrategia de todas es evitar las emisiones que generaron el problema. Bajo esta perspectiva, lo importante y fundamental es controlar las emisiones asociadas con el consumo de combustibles fósiles y otras actividades que producen gases de efecto invernadero.

11.2.2. Protocolo de Kyoto

El Protocolo de Kyoto es el acuerdo de carácter internacional que pretende lograr el control de las emisiones de gases causantes del cambio climático. La meta de dicho acuerdo es que para el período comprendido entre 2008 y 2012, el inventario global de emisiones de dichos gases sea un 5% menor que el inventario que correspondía al año 1990.

Si bien la gran mayoría de los países del mundo son signatarios del dicho protocolo, tan sólo las naciones con economías industrializadas (listadas en el denominado Anexo I del Protocolo de Kyoto) están sometidas a requerimientos específicos en lo que se refiere a metas de reducción de emisiones. Los demás países pueden ser partícipes del protocolo a través de figuras tales como el mercado de emisiones, la implementación conjunta y el mecanismo de desarrollo limpio (MDL).

Bajo estas figuras, las reducciones en emisiones que deben ser garantizadas por un país Anexo I pueden ser logradas en un país que no haga parte de dicho listado. Esto tiene sentido ya que al tratarse de un problema global de contaminación, lo fundamental es que se logren reducciones en las emisiones totales de toda la Tierra sin ser muy importante el lugar exacto en donde éstas ocurren.

Listado de Imágenes

Bogotá, Fenómeno de inversión térmica

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Capas de la atmósfera

VALLERO, Daniel. Fundamentals of air pollution. Cuarta edición. Durham, North Carolina, 2008. Pág. 31.

Cantidad de ozono vs. altura

AHRENS, C. Donald. Meteorology today: an introduction to weather, climate and environment. Séptima edición. Pacific Grove, CA, 2003.

Capa de ozono

NASA, Ozone processing team. Total ozone mapping spectrometer (TOMS). Recuperado de <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>

Celdas de circulación del aire

DE NEVERS, Noel. Ingeniería de control de la contaminación del aire. Mac Graw Hill, 2000. Pág. 81.

Ciclo del carbono

NASA, Earth observatory. Recuperado de http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/carbon_cycle4.php.

Concentración promedio CO2

National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. Recuperado de <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Convertidor catalítico

Atmosphere, Climate and Environment Information Programme. Recuperado de: http://www.ace.mmu.ac.uk/Resources/Fact_Sheets/Key_Stage_4/Air_Pollution/images/25a.jpg

Destrucción de la capa de ozono por acción del cloro

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Diagrama de funcionamiento motor diésel cuatro tiempos

MORENO SANCHEZ, Gabriel Felipe. Motores diésel: manual de mantenimiento y reparación. Tomo 3. Bogotá: Uniandes, 2006.

Efecto Coriolis

DE NEVERS, Noel. Ingeniería de control de la contaminación del aire. Mac Graw Hill, 2000. Pág. 83.

Efecto orográfico

DE NEVERS, Noel. Ingeniería de control de la contaminación del aire. Mac Graw Hill, 2000. Pág. 101.

Emisiones antropogénicas

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Listado de Imágenes

Emisiones biogénicas o naturales

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Emisiones de fuentes fijas - ladrillera

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Emisiones típicas de NO_x en un centro urbano

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Emisiones típicas de SO_x en un centro urbano

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Equipo de monitoreo de calidad del aire para espacios interiores

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Esquema de los factores determinantes de la calidad del aire en interiores

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Esquema general de la contaminación

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Estación de monitoreo de calidad del aire

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Imágenes de portada y contraportada

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Madre en sala de enfermedad respiratoria aguda (ERA) de Bogotá

Secretaría Distrital de Salud.

Medición de contaminantes criterio al interior de oficina

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Medición de contaminantes criterio al interior de vivienda

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Medición de emisiones en ruta

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Micrografía electrónica de material particulado

VALLERO, Daniel. Fundamentals of air pollution. Cuarta edición. Durham, North Carolina, 2008. Pág. 15, 62.

Monitoreo de la calidad del aire al interior de una vivienda

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Listado de Imágenes

Ozono troposférico y ozono estratosférico

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Ozono vs. Tiempo

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Sistema respiratorio

Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS). Curso de orientación para el control de la contaminación del aire, CEPIS. Lección 2. Recuperado de <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/E/fulltext/orienta/orienta.html>.

Temperatura promedio global

National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. National Environmental Satellite, Data and Information Service. Recuperado de <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/anomalies/anomalies.html>.

Ubicación de las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.

Vehículo de transporte público que utiliza combustible diésel

Universidad de los Andes - Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional.



Universidad de los Andes
Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR)

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible
(Convenio 062 de 2008)

Elaboración de contenidos
Eduardo Behrentz
Mónica Espinosa
Juan Felipe Franco

Diseño
Diana Fernández

2008