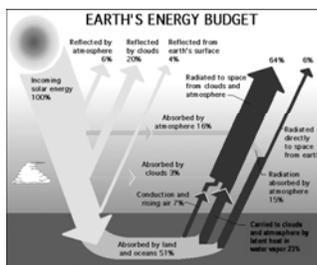


# Flujo de materia y energía III

## EL AIRE

### Balance radiativo



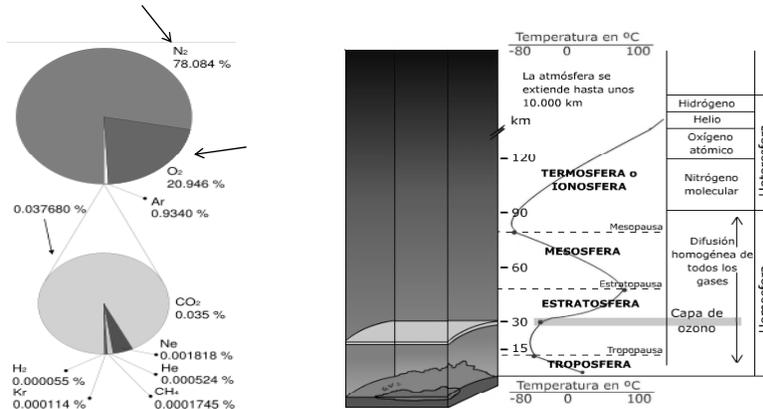
Permite la mantención de una temperatura constante



ENTRANTE	SALIENTE	
<b>Balance de calor de la superficie de la tierra</b>		
Radiación solar	170	Radiación terrestre 390
Radiación atmosférica	324	Evaporación 80
		Conducción y Convección 24
Total	494	Total 494
<b>Balance de calor de la atmósfera</b>		
Radiación solar	70	Radiación al espacio 200
Condensación	80	Radiación a la superficie 324
Radiación terrestre	390	Radiación de la tierra al espacio 40
Conducción	24	
Total	564	Total 564
<b>Balance de calor planetario</b>		
Radiación solar	342	Reflejada y dispersada 102
		Radiación de atmósfera y nubes al espacio 200
		Radiación de la tierra al espacio 40
Total	342	Total 342

El gran responsable de este balance es la atmosfera

# LA ATMOSFERA



*La Tierra está rodeada por una cubierta de gases que se presentan en concentraciones y distribución diferencial según la altura (Atmósfera). Esta cubierta tiene un grosor aproximado de 1.000 km. y se divide en capas de grosor y características distintas:*

## La tropósfera

Contiene el 80% de toda la masa de gases de la atmósfera (aire) y el 99% de todo el vapor de agua.

Consta en particular, en 99% de dos gases, el Nitrógeno (N<sub>2</sub> 78%) y Oxígeno (O<sub>2</sub>, 21%)  
 El 1% que resta consta principalmente de Argón (Ar, 0,1%) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>, 0,035%).

El vapor de agua se encuentra en cantidades variables de acuerdo a condiciones locales, por ejemplo, desde 0,01% en los polos hasta 5% en los trópicos



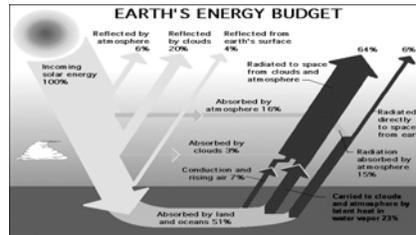
### Temperatura atmosférica (balance energético)

Gran parte de estos gases (nitrógeno, oxígeno y argón) son transparentes a todo tipo de radiación procedente del Sol, no la absorben, y ésta puede llegar hasta el suelo.

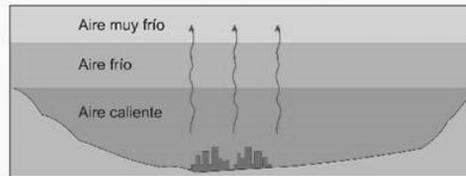
Sobre el suelo, la radiación calienta la superficie de la Tierra, calentando el aire de la parte inferior de la atmósfera.



Este aire está más caliente que el de arriba y sube (flotabilidad).



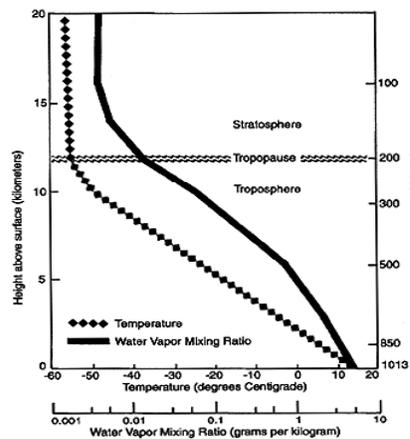
Situación normal



Con la altura, la presión desciende y el aire que sube se expande y enfría (expansión adiabática). Energía calórica liberada es absorbida por el vapor de agua o liberada como radiación.



En consecuencia, la temperatura de la tropósfera va decreciendo con la altura en conjunto con la concentración de vapor de agua.

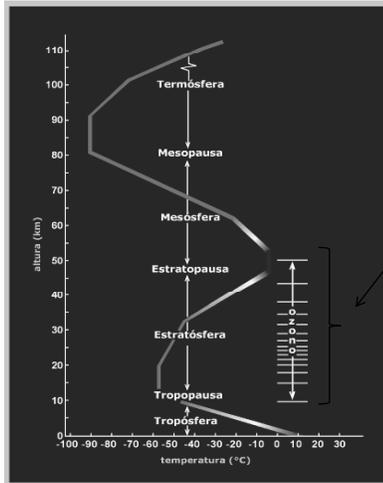


Al finalizar la tropósfera (12km), la temperatura alcanza unos -60°C. marcándose el comienzo de la Estratosfera (descenso de 6.5°C cada km. )

¿Porque la temperatura de la tierra no es menor entonces?



**CAPA DE OZONO** (estratósfera a 25 km ).



**Absorbe el ultravioleta solar,** definiendo una segunda fuente de calor. Este ingreso de calor detiene la caída de temperatura con la altura.

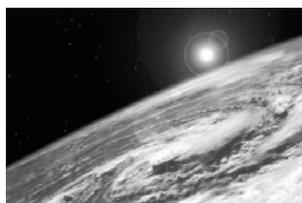
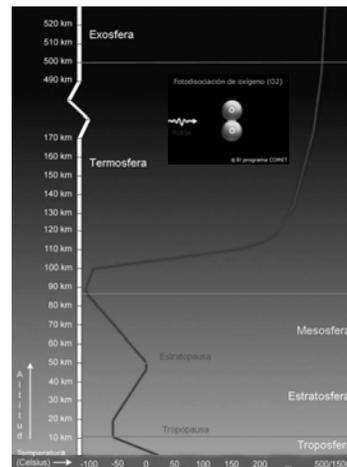
Se forma un gradiente positivo de temperatura entre la troposfera y la estratósfera, lo que **reduce** el intercambio vertical de temperatura ("**convección**")

Sobre esta capa, en la **mesósfera**, la **temperatura decrece por efecto adiabático y por el enfriamiento debido al escape de radiación infrarroja emitida.**



La temperatura nuevamente con la altura a raíz de la absorción de UV solar lejano debido a la **fotodisociación** de moléculas de oxígeno.

Esto conduce a la formación de la temperatura en la **termósfera**.

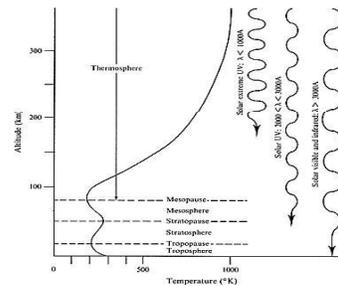
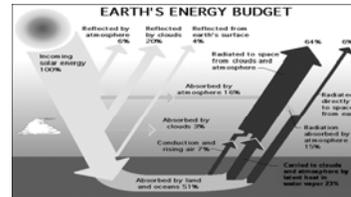


Puede alcanzar temperaturas sobre los 1,500° C

En consecuencia, respecto al balance radiativo tenemos que:

Producto de la **absorción** y/ o reflejo de la **radiación ultravioleta** (100 a 400 nm) por las **capas altas de la atmosfera**.

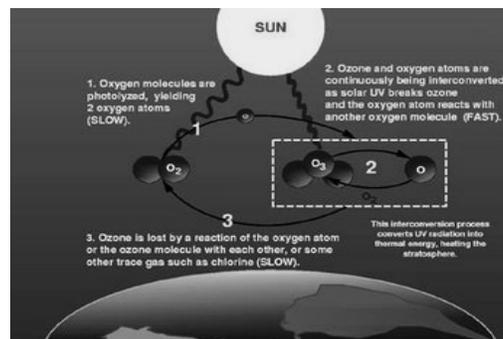
La **radiación visible** (400 a 700 nm) e **infrarroja** llegan a la superficie siendo absorbidas por los cuerpos e **irradiadas de regreso en forma de energía calórica a la atmósfera**.



## Ozono, principal responsable de la temperatura de la tierra

### Ozono estratosférico:

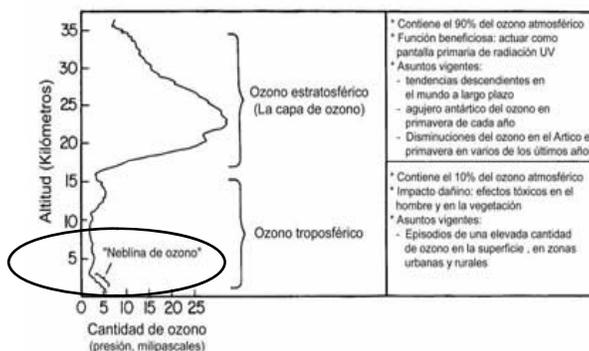
Se forma por acción de la radiación UV, que disocia las moléculas de oxígeno molecular ( $O_2$ ), los cuales son altamente reactivos, pudiendo reaccionar estas con otra molécula de  $O_2$  formándose el ozono.



El ozono se destruye por acción de la propia radiación UV. La radiación con **longitud de onda menor de 290 nm** hace que se desprenda un átomo de oxígeno de la molécula de ozono.

Se forma así un **equilibrio dinámico** en el que se forma y destruye ozono en **forma continua**, consumiéndose la mayoría de la radiación de longitud de onda menor de 290 nm.

### Distribución de ozono con la altura



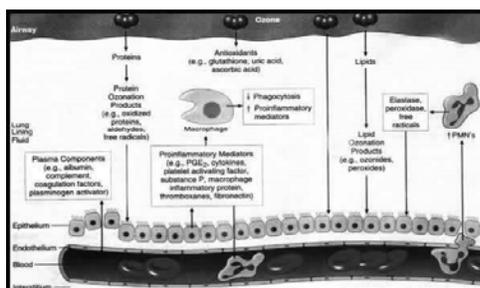
Está presente en dos capas de la atmósfera; en la parte más alta de ésta, forma la capa que protege la tierra de los rayos ultravioletas. Sin embargo, al nivel del suelo, el ozono se considera un serio contaminante del aire.



### ¿En qué afecta el Ozono (O<sub>3</sub>) a la salud humana?

La exposición de corta duración a una concentración punta de ozono puede afectar de forma temporal a los pulmones, el tracto respiratorio y los ojos. También puede aumentar la susceptibilidad a los alérgenos respiratorios.

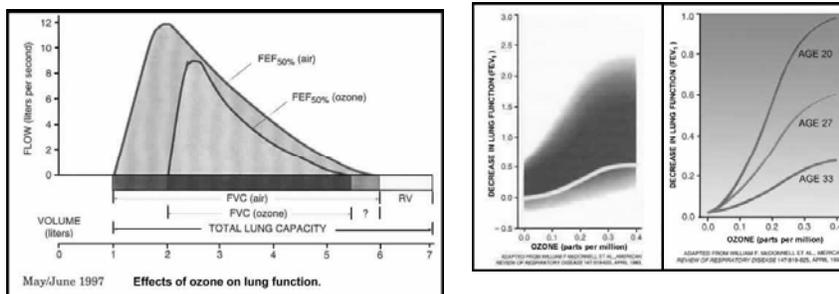
La exposición a largo plazo a concentraciones de ozono relativamente bajas puede provocar una disminución de la función pulmonar.



Altamente reactivo en el tracto respiratorio, interactuando con proteínas y lípidos en la superficie celular o presentes en las capas de fluido que lo recubren.

Las células del tejido epitelial son el blanco principal de ozono. La reacción de las células puede atraer macrófagos alveolares que pueden inducir una inflamación

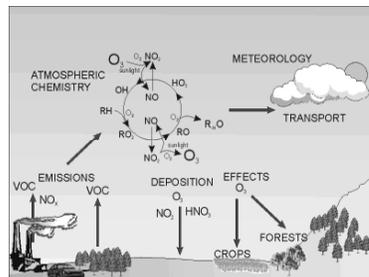
### Efecto sobre la función pulmonar



- Reduce la capacidad de inspiración máxima (izquierda curva) y puede incrementar levemente el volumen residual (derecha).
- Reducción en la inspiración máxima causa una reducción en el flujo expiratorio.
- La magnitud del efecto es edad dependiente

### El ozono en la troposfera se origina de manera diferente al estratosférico.

Gran parte del ozono se forma cuando **óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en general, reaccionan en presencia de luz solar (400 nm), liberándose O el que reacciona con O<sub>2</sub> para formar O<sub>3</sub>.**



Algunas reacciones involucradas:

- El CO y COVs son oxidados (OH, radical hidroxilo) a vapor de agua y CO<sub>2</sub>.
  - El H reacciona rápidamente con O<sub>2</sub> dando radicales peroxy HO<sub>2</sub>
  - HO<sub>2</sub> luego reacciona con NO dando NO<sub>2</sub> el que es fotolizado liberando un O el que reacciona con O<sub>2</sub>, formando ozono
- $$\text{OH} + \text{CO} (\text{o COV}) \rightarrow \text{H} + \text{CO}_2$$
- $$\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2$$
- $$\text{HO}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{OH} + \text{NO}_2$$
- $$\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}$$
- $$\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3$$

Oxido nítrico (NO) destruye el ozono troposférico

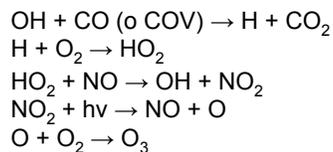


## Ozono troposférico natural y artificial

Los **óxidos de nitrógeno** se producen:

- **Quema** de combustibles fósiles. **ARTIFICIAL**
- **Incendios** forestales, volcanes, basuras.

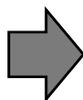
**NATURAL**



Los compuestos orgánicos volátiles proceden (**CO y COV en general**):

- **Evaporación** de combustibles líquidos, disolventes y productos químicos orgánicos (pinturas, limpiadores..) y **combustión incompleta** de la gasolina y otros combustibles **ARTIFICIAL**.
- Emisión de compuestos orgánicos volátiles por plantas **NATURAL**

↓  
**Actividades humanas**



Configuran un **desequilibrio** en los componentes del aire, y consecuentemente **contaminación**

## **Esmog (de smoke: humo y fog: niebla)**

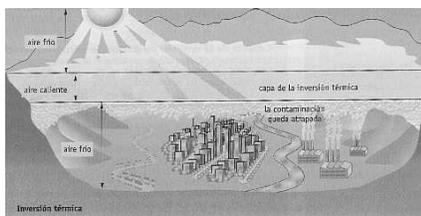
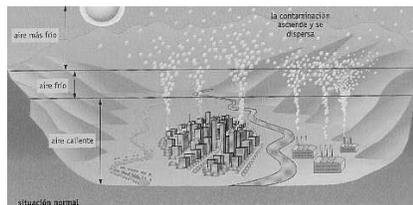
El **ozono troposférico** no es el único contaminante de la tropósfera. Sus precursores junto a otros elementos forman parte de los compuestos contaminantes del aire, que en su conjunto se denominan **ESMOG**.

Origina a partir de la **combinación del aire con contaminantes específicos durante un largo período**



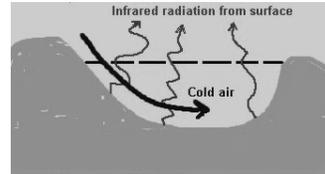
### Inversión térmica

Una capa de aire más cálido se sitúa sobre el aire superficial más frío e impide la ascensión de este último (más denso), por lo que la contaminación queda encerrada y va aumentando

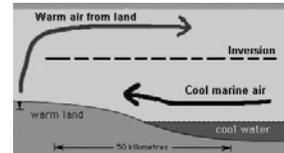
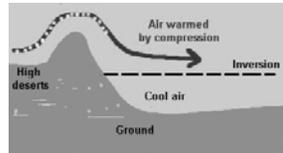


### Elementos que desencadenan la inversión térmica

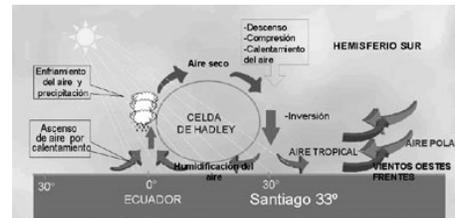
• Situación de calma anticiclónica y cielo despejado. El aire próximo al suelo está más frío que en las capas superiores, perdiéndose rápidamente la temperatura (**Radiación**)



• Sobreposición de una masa de aire caliente debido a que es empujada hacia la tropopausa por masas de aire frías o por efectos orográficos (**Advección**).



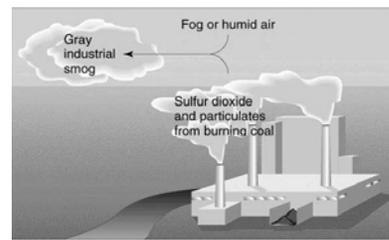
• Presencia en altitud de aire cálido y subsidente. Masas de aire que tienden a moverse hacia el suelo y que ejercen una presión hacia la superficie. (**Subsidencia**)



### Hay dos tipos muy diferentes de smog:

#### Esmog Industrial

Producto de la quema de carbón y petróleo pesado, con mucho azufre, en instalaciones industriales y de calefacción (SO<sub>2</sub>, metales pesados), sobre las ciudades se formaban gotitas de **ácido sulfúrico** (SO<sub>2</sub> + PM + Vapor de agua), que originaba una espesa niebla cargada de contaminantes.



(a) Industrial smog

En la actualidad, en países desarrollados la tecnología permite que raramente se encuentra este tipo de contaminación, pero en países en vías de industrialización como China o algunos países de Europa del Este, todavía es un grave problema en algunas ciudades.



## Esmog fotoquímico

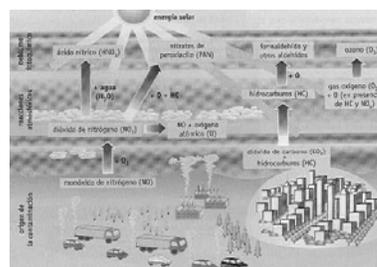
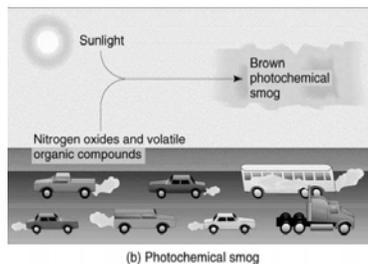
Se dio por primera vez en Los Ángeles (1943), observándose una capa café rojiza que cubría la ciudad



Los principales precursores son los óxidos de nitrógeno (NOX), los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM), el metano (CH4) y el monóxido de carbono (CO) (**Contaminantes primarios**).



La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos, siendo el ozono (O3) y el PAN (peroxiacetilnitrato) los más importantes por su abundancia y toxicidad (**Contaminantes secundarios**).



## Esmog fotoquímico, componentes

TABLA COMPUESTOS ORIGINARIOS DEL SMOG	
TIPO CONTAMINANTE	FUENTE DE CONTAMINACIÓN
Monóxido de carbono (CO)	Gases de escape de vehículos de motor. Algunos procesos industriales.
Dioxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	Instalaciones generadoras de calor y electricidad que utilizan petróleo o carbón con contenido sulfuroso; plantas de ácido sulfúrico.
Partículas en suspensión	Gases de escape de vehículos de motor; procesos industriales; incineración de residuos; generación de calor y electricidad; reacción de gases contaminantes en la atmósfera.
Plomo (Pb)	Gases de escape de vehículos de motor, fundiciones de plomo; fábricas de baterías.
Óxidos de nitrógeno (NO, NO <sub>2</sub> )	Gases de escape de vehículos de motor; generación de calor y electricidad; explosivos; fábricas de fertilizantes.
Oxidantes fotoquímicos (fundamentalmente ozono (O <sub>3</sub> ))	Se forman en la atmósfera como reacción a los ácidos de nitrógenos, hidrocarburos y luz solar.
Hidrocarburos (incluye etano, etileno, propano, butanos, pentanos, acetileno)	Gases de escape de vehículos de motor; evaporación de disolventes; procesos industriales; eliminación de residuos sólidos combustión de combustibles.
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Todas las fuentes de combustión.

Mezcla de contaminantes de origen primarios (NOx e hidrocarburos volátiles) con secundarios (ozono, peroxiacilo, radicales hidroxilo, etc.).

Estos últimos como consecuencia de reacciones producidas por la luz solar con los contaminantes primarios más elementos naturales de la atmósfera

**El smog no es un contaminante atmosférico per se, sino que es una consecuencia de la contaminación atmosférica.**

## Efectos sobre la salud

Los efectos del smog fotoquímico afectan directamente a la salud de las personas, plantas y animales. Los contaminantes atmosféricos son diversos y cada uno de ellos afecta de distinta manera al organismo.



## Aerosoles y partículas

- Constituyen una amplia gama de contaminantes formados por polvo grueso (mayor de 100  $\mu\text{m}$ ), polvo fino (menor de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro), vapores (0,001-1  $\mu\text{m}$ ) y neblinas (0,1-10  $\mu\text{m}$ ).

- Está constituido por contaminantes de origen **natural** (polen y tierra, por ejemplo) y **antropogénico**.



Contaminantes primarios, (hollín y metales, entre otros); y secundarios

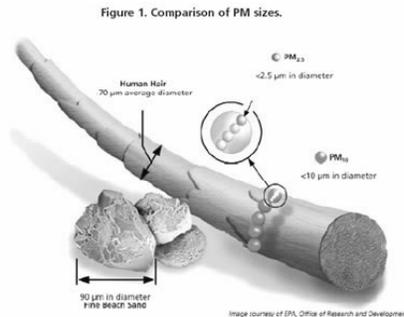
**C secundarios** son capaces de transportar compuestos orgánicos (COVs), metales pesados, compuestos nitrogenados y sulfatos, cuyo origen son las fuentes primarias de óxidos de nitrógeno (NOx) y óxidos de azufre (SOx).



## ¿Cómo afectan las partículas en suspensión (PM) a la salud humana?

Los efectos dependen del tamaño de las partículas, siendo más nocivas las de menor tamaño. Presentan un mayor grado de penetración y permanencia en el sistema respiratorio.

La mayoría de las partículas cuyo diámetro es mayor a  $5\ \mu\text{m}$  se depositan en las vías aéreas superiores (nariz) y en la tráquea y bronquios. Aquellas cuyo diámetro es inferior tienen mayor probabilidad de depositarse en los bronquiolos y alvéolos a medida que su tamaño disminuye.



Los efectos en salud vinculados a la exposición prolongada al PM son:

- Aumento en la frecuencia de cáncer pulmonar
- Muertes prematuras
- Síntomas respiratorios severos
- Irritación de ojos y nariz
- Agravamiento en casos de asma
- Agravamiento en caso de enfermedades cardiovasculares

Su acumulación en los pulmones origina enfermedades como:

- Silicosis
- Asbestosis

Una vez que las partículas se han depositado en el sistema respiratorio, su acción irritante es producto de:

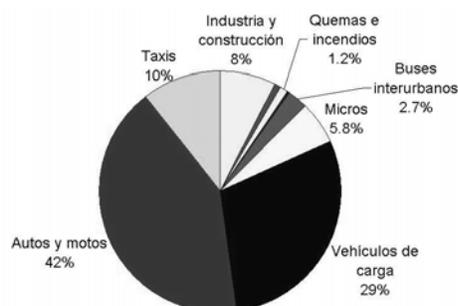
- Su composición química y su toxicidad y
- Su facilidad de absorber otras sustancias en su superficie, produciéndose un efecto sinérgico que incrementa su agresividad.

## Principales fuentes y composición del material particulado en Santiago

Según el tamaño se clasifican en:

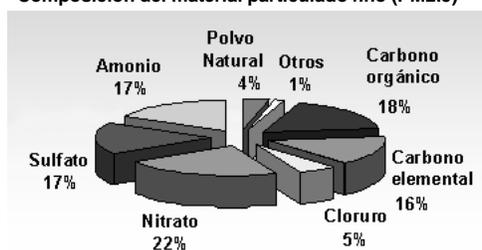
- **FRACCION GRUESA:** Partículas de tamaño entre 2.5 to 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$  -  $\text{PM}_{2.5}$ ).
- **FRACCION FINA:** Partículas de tamaño menor a 2.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ). Las partículas inferiores a 0.1  $\mu\text{m}$  se denominan **partículas ultrafinas**. (SMOG)

### Responsabilidad en el Material Particulado (emisiones y resuspensión de polvo)



La fracción fina, mayor peligro, se conforma principalmente por aerosoles o contaminantes secundarios.

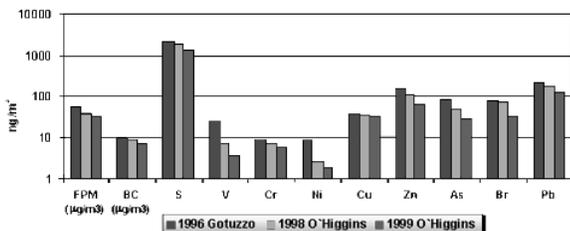
### Composición del material particulado fino ( $\text{PM}_{2.5}$ )



Los más peligrosos son los derivados del carbono conocidos como "**carbono orgánico**", debido a la acción cancerígena de algunos de sus compuestos y a las propiedades tóxicas de otros (**quema combustibles fósiles**).

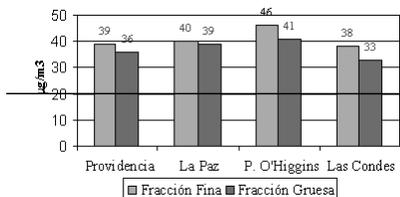
El "carbono elemental" es también relevante ya que es sobre el cual se adsorben (adhieren) gases como  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$  que, junto con la humedad atmosférica, generan la acidez del material particulado. **Lluvia ácida**

**Evolución de las concentraciones promedio de aerosoles (componentes relevantes) en el PM2,5**

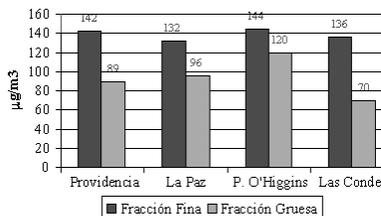


Fuente: CONAMA RM-SESMA  
 Nota: Promedio de campañas de mediciones julio-agosto de cada año. FPM: Fracción fina del material particulado. BC: Black carbon o carbón elemental. ng: 1 nanogramo corresponde a una milésima de microgramo (ug) S: Azufre V: Berilio Cr: Cromo Ni: Niquel Cu: Cobre Zn: Zinc As: Arsénico Br: Bromo Pb: Plomo

**Promedios anuales de fracción fina (PM2,5) y gruesa (PM10), 1999. Estaciones históricas.**



**Máximos valores diarios para la fracción fina y la fracción gruesa de material particulado respirable. Estaciones históricas.**



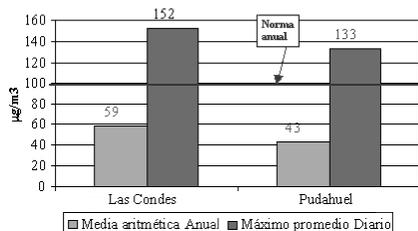
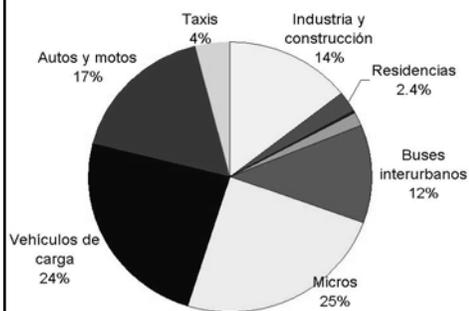
**Situación del aire en la región metropolitana en general.**

	Contaminantes (Ton/año)			
	PM10	SOx.	NOx.	CO.
Fuentes fijas				
Calderas.	1.67	9.16	5.49	3.03
Industrias.	1.14	975.0	5.39	1.22
Residencias	1.35	7.82	1.56	
Quema Basuras	65.0		1.0	410
Polvo calles	32.98			
Fuentes Móviles	3.15	30.94	225.99	28.41

**fuentes fijas:** industrias y domicilios

**fuentes móviles:** responsables en mayor proporción de la contaminación del aire.

### Responsabilidad en Óxidos de Nitrógeno



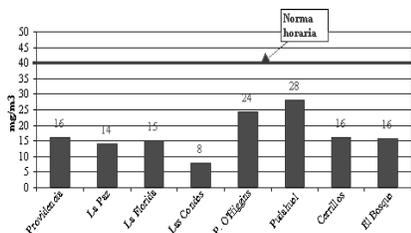
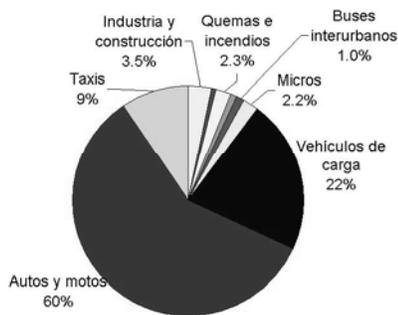
Santiago 1999

- Irritación de la piel y mucosas.
- Penetra los alvéolos.
- Aumento del metabolismo antioxidante.
- Daño celular en el pulmón.
- En el tejido pulmonar daña las paredes capilares, causando edema luego de un periodo de latencia de 2-24 horas.

•Los síntomas típicos de la intoxicación aguda son ardor y lagrimeo de los ojos, tos, disnea y finalmente, la muerte.

•El dióxido de nitrógeno es un oxidante que unido a la hemoglobina produce metahemoglobina y que en concentraciones altas causa bronquiolitis obliterante, fibrosis bronquiolar y efisema.

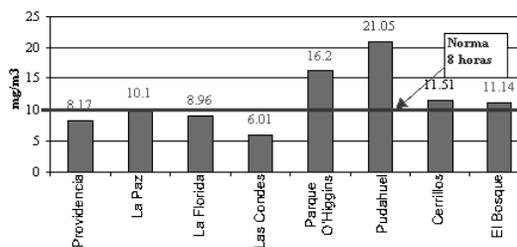
### Responsabilidad de monóxido de carbono



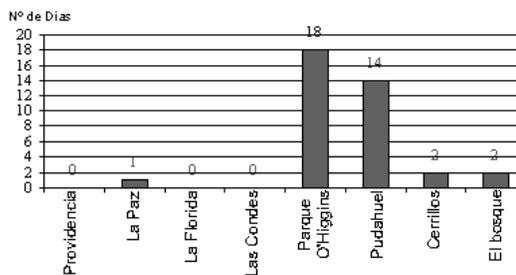
- Reduce la capacidad de transporte de oxígeno a la sangre.
- Afecta la concentración.
- Hace más lentos nuestros reflejos.
- Disminuye las funciones neuroconductuales.
- Causa somnolencia.
- Aumento de angina en pacientes susceptibles.
- Origina problemas cardiovasculares.
- En mujeres embarazadas pone en peligro el crecimiento y desarrollo mental del feto.
- En altas concentraciones, provoca la muerte.

Máximas concentraciones de promedios horarios, 1999.

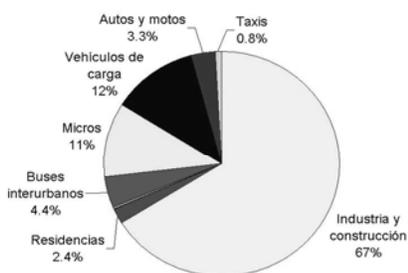
**Máximas concentraciones de promedios móviles de 8 horas, 1999.**



**Número de días sobre la norma media de 8 horas, 1999.**

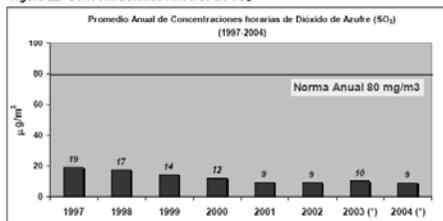


**Responsabilidad en Óxidos de Azufre**



- Opacamiento de la córnea (queratitis).
- Dificultad para respirar.
- Inflamación vías respiratorias.
- Irritación ocular por formación de ácido sulfuroso sobre las mucosas
- Alteraciones psíquicas.
- Edema pulmonar.
- Paro cardíaco.
- Colapso circulatorio

Figura 22: Concentraciones Anuales de SO<sub>2</sub>



Fuente: SEREMI de Salud RM- CONAMA Metropolitana  
 (\*) Datos 2003 y 2004 no validados

Cuales son las medidas tomadas y sus resultados, las veremos más adelante...