

Introduction to tropospheric aerosol

Graciela B. Raga

Micro- and Mesoscale Interactions Group

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México

raga.graciela@gmail.com

<https://www.atmosfera.unam.mx/ciencias-atmosfericas/interaccion-micro-y-mesoescala/>

School of Atmospheric Measurements in Latin America and the Caribbean (SAMLAC)

Puerto Rico, 12-17 November 2018

Temario:

- ✓ Relevancia de partículas de aerosol atmosférico en el planeta.
- ✓ Conceptos generales de fuentes y de caracterización de partículas
- ✓ Conceptos generales de interacción de partículas con radiación solar: efecto directo
- ✓ Conceptos del rol en la formación de nubes y de interacción de nubes con radiación solar: efecto indirecto

Definición de aerosol atmosférico

Suspensión de partículas líquidas y/o sólidas
en un gas

- El gas en nuestro caso es la atmósfera y las partículas pueden ser el resultado de:
 - Emisiones primarias naturales
 - Emisiones primarias antropogénicas
 - Emisiones secundarias (naturales o antropogénicas)

Impactos de gases y partículas

- Salud:
Efectos crónicos y agudos
- Visibilidad y daños a materiales/edificios
- Ecosistemas: tóxicos, vs. nutrientes
- Nubes, clima y cambio climático



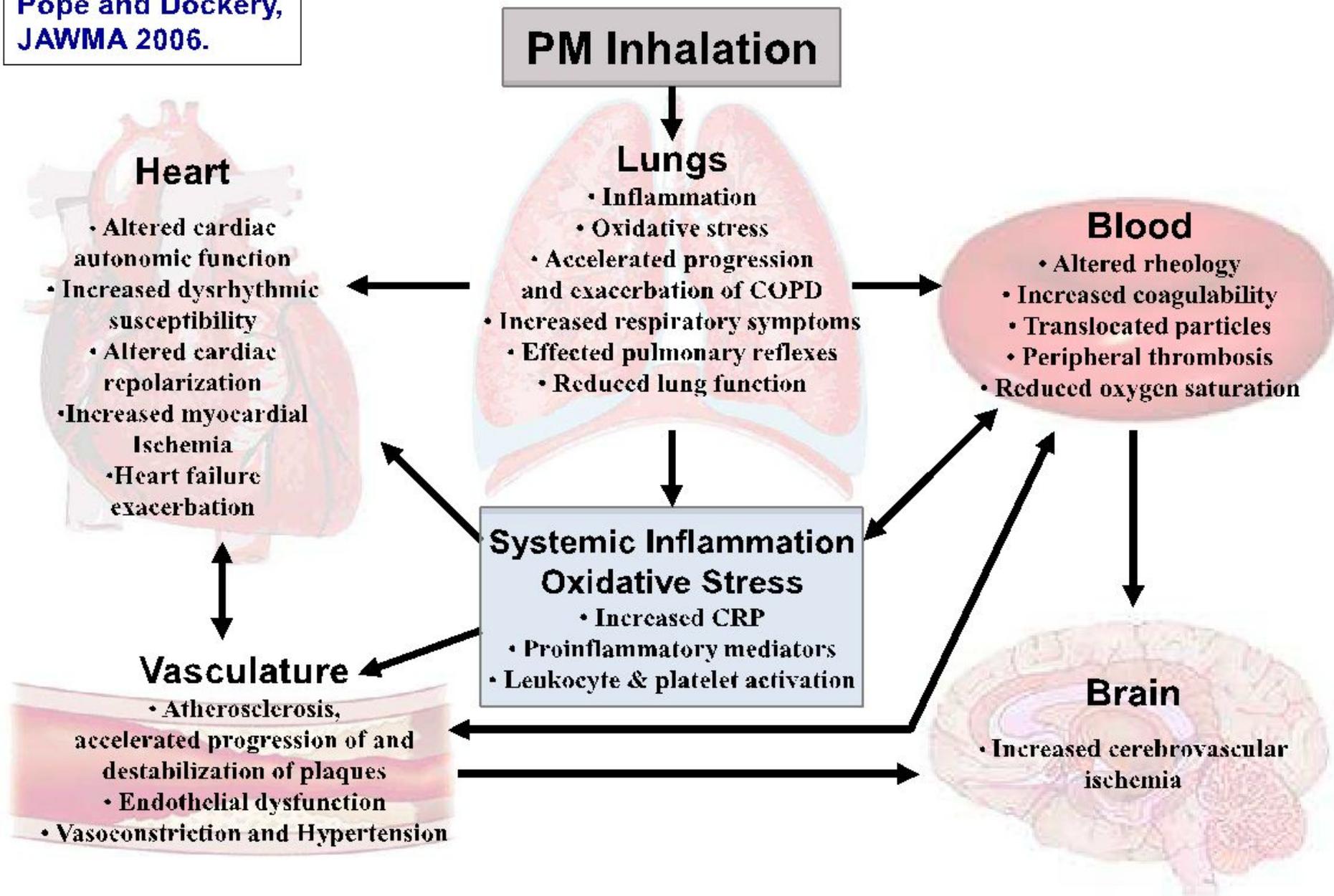
<http://strakul.blogspot.com/2013/05/smog-in-santiago.html>



<http://www.marketplace.org/topics/sustainability/we-used-be-china/what-would-your-city-look-beijings-air-smog-simulator>

Table 1: Ranking of selected risk factors: 10 leading risk factor causes of death by income group, 2004

Risk factor		Deaths (millions)	Percentage of total	Risk factor		Deaths (millions)	Percentage of total
<i>World</i>				<i>Low-income countries^a</i>			
1	High blood pressure ★	7.5	12.8	1	Childhood underweight	2.0	7.8
2	Tobacco use	5.1	8.7	2	High blood pressure ★	2.0	7.5
3	High blood glucose	3.4	5.8	3	Unsafe sex	1.7	6.6
4	Physical inactivity	3.2	5.5	4	Unsafe water, sanitation, hygiene	1.6	6.1
5	Overweight and obesity ★	2.8	4.8	5	High blood glucose ★	1.3	4.9
6	High cholesterol ★	2.6	4.5	6	Indoor smoke from solid fuels	1.3	4.8
7	Unsafe sex	2.4	4.0	7	Tobacco use	1.0	3.9
8	Alcohol use	2.3	3.8	8	Physical inactivity	1.0	3.8
9	Childhood underweight	2.2	3.8	9	Suboptimal breastfeeding	1.0	3.7
10	Indoor smoke from solid fuels	2.0	3.3	10	High cholesterol ★	0.9	3.4
<i>Middle-income countries^a</i>				<i>High-income countries^a</i>			
1	High blood pressure ★	4.2	17.2	1	Tobacco use	1.5	17.9
2	Tobacco use	2.6	10.8	2	High blood pressure ★	1.4	16.8
3	Overweight and obesity ★	1.6	6.7	3	Overweight and obesity ★	0.7	8.4
4	Physical inactivity	1.6	6.6	4	Physical inactivity	0.6	7.7
5	Alcohol use	1.6	6.4	5	High blood glucose ★	0.6	7.0
6	High blood glucose ★	1.5	6.3	6	High cholesterol ★	0.5	5.8
7	High cholesterol ★	1.3	5.2	7	Low fruit and vegetable intake	0.2	2.5
8	Low fruit and vegetable intake	0.9	3.9	8	Urban outdoor air pollution	0.2	2.5
9	Indoor smoke from solid fuels	0.7	2.8	9	Alcohol use	0.1	1.6
10	Urban outdoor air pollution	0.7	2.8	10	Occupational risks	0.1	1.1



Discriminación de partículas para cuestiones regulatorias para la salud

- PST: masa de partículas suspendidas totales
 - PM_{10} (fracción respirable): masa de partículas con $d_a < 10 \mu m$
 - $PM_{2.5}$ (finas): masa de partículas con $d_a < 2.5 \mu m$
 - PM_1 (ultrafinas): masa de partículas con $d_a < 1 \mu m$
- (d_a : Diámetro aerodinámico)

Table 3
Air quality guidelines for particulate matter.

Body	$PM_{2.5}$ annual mean ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}$ 24-h mean ($\mu g/m^3$)	PM_{10} annual mean ($\mu g/m^3$)	PM_{10} 24-h mean ($\mu g/m^3$)
World Health Organization	10	25	20	50
European Commission	25	N/A	40	50
Australian National Environment Protection Council	8	25	N/A	50
Chinese Ministry of Environmental Protection (Class II level)	35	75	70	150
Pollution Control Board of India	40	60	60	100
US Environmental Protection Agency	12	35	N/A	150

*China MEP Class II level which applies to residential, commercial, cultural, industrial, and heavily trafficked areas (Cao et al., 2013).

1. Caracterización: Tamaño de partículas

- Diámetros en un rango de 1 nm a 100 μm (una variación de 5 órdenes de magnitud), para partículas esféricas.
- Para partículas irregulares se define un diámetro equivalente: diámetro aerodinámico
- En base a las observaciones se consideran 3 modas en la distribución de tamaños:

- moda de partículas gruesas: $d_a > 2 \mu\text{m}$
- moda de acumulación: $0.1 < d_a < 2 \mu\text{m}$
- moda de partículas ultrafinas: $d_a < 0.1 \mu\text{m}$

1. Caracterización: Distribución de Tamaño

- Distribución de número
- Distribución de superficie
- Distribución de masa/volumen

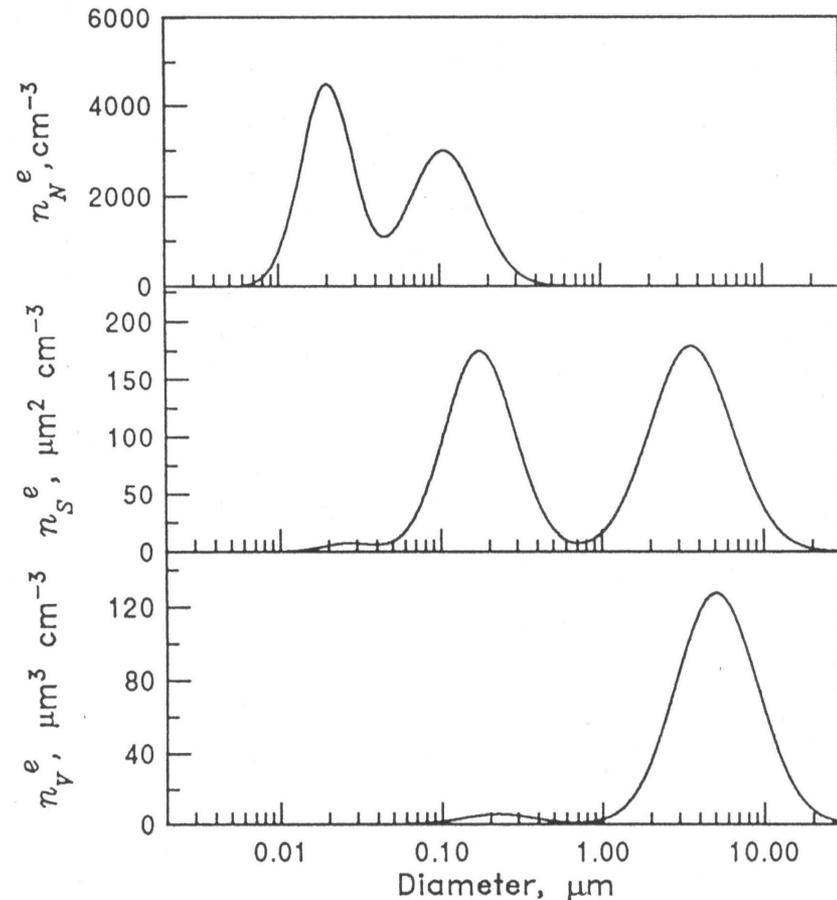
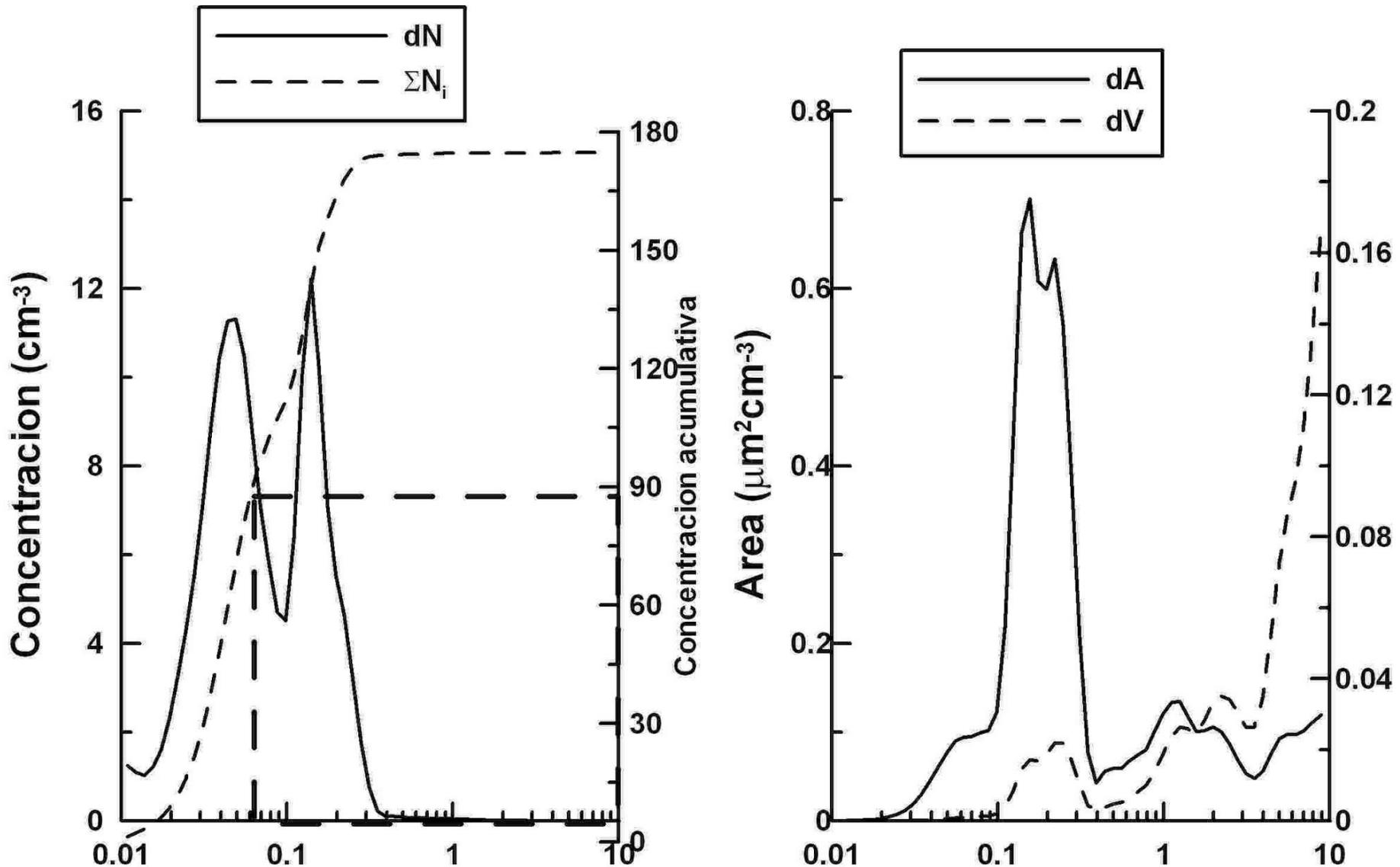
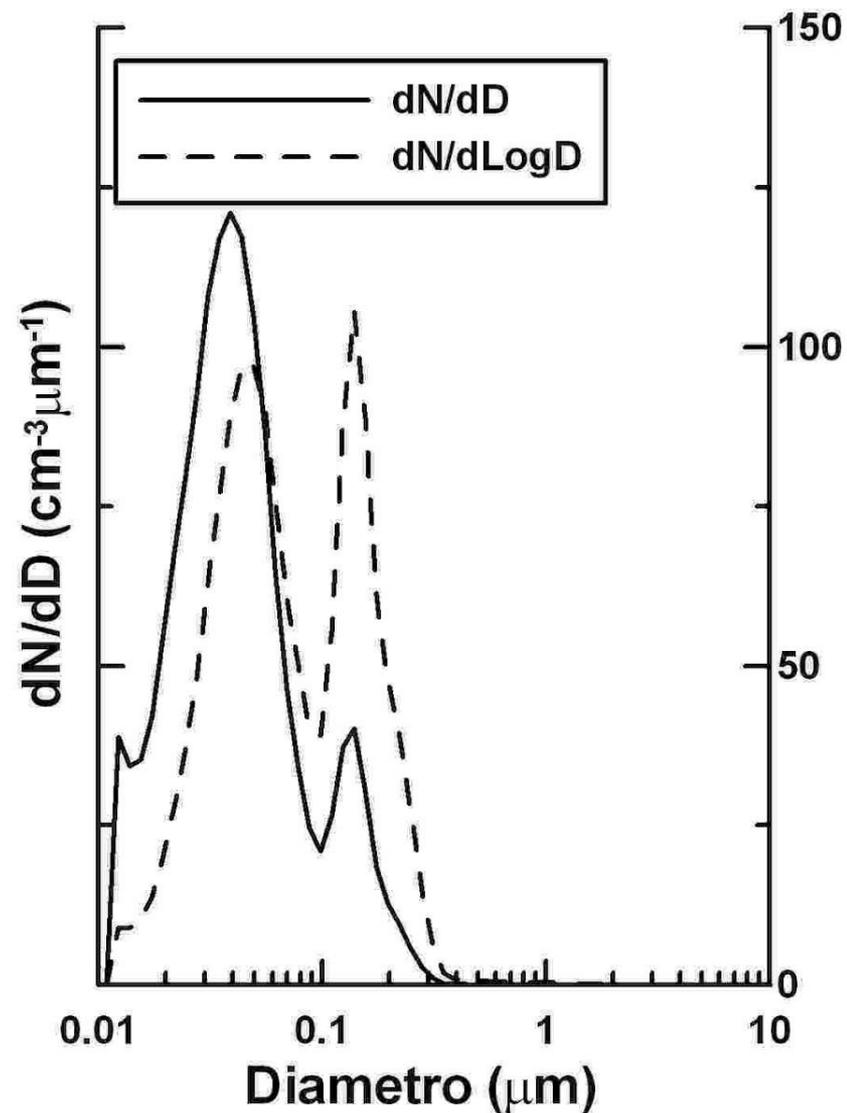
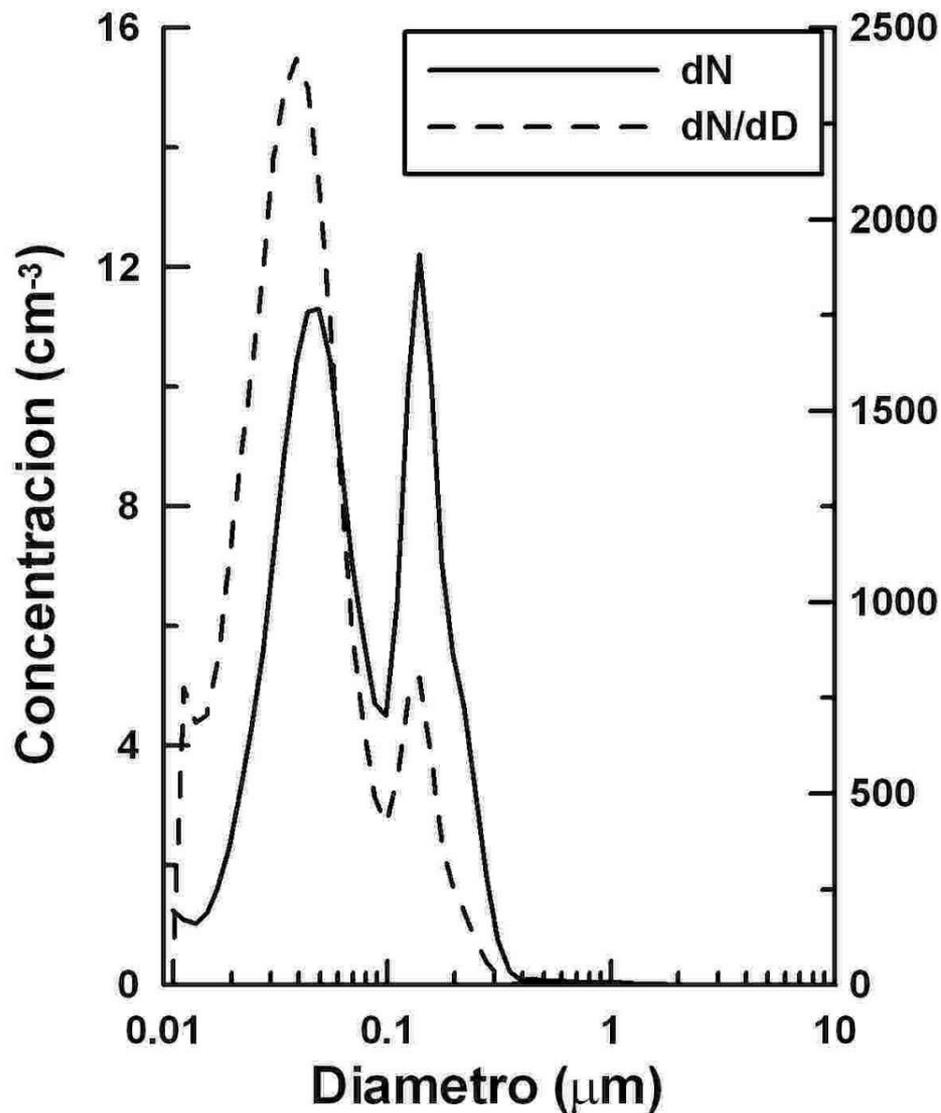


FIGURE 7.6 The same aerosol distribution as in Figures 7.4 and 7.5 expressed as a function of D_p and plotted versus $\log D_p$. Also shown are the surface and volume distributions. The areas below the three curves correspond to the total aerosol number, surface, and volume, respectively.

Formas de representar la distribución de tamaños de partículas



Formas de representar la distribución de tamaños de partículas



1. Caracterización: Distribución de Tamaño

Momentos de la distribución:

- Orden cero: Concentración total

$$M_0 = \int_0^{\infty} n(r) \cdot dr$$

- Primer orden

$$M_1 = \int_0^{\infty} r \cdot n(r) \cdot dr$$

Cociente: 1^{er} orden/ orden cero: radio promedio

$$\bar{r} = M_1 / M_0$$

- Segundo orden: proporcional a la superficie total de las partículas

$$M_2 = \int_0^{\infty} r^2 \cdot n(r) \cdot dr$$

- Tercer orden: proporcional al volumen total de las partículas

$$M_3 = \int_0^{\infty} r^3 \cdot n(r) \cdot dr$$

2. Fuentes y Procesos de formación

- *Partículas primarias*

- Naturales: océanos
- Naturales: continentes (suelos, vegetación, volcanes...)
- Antropogénicas: Zonas urbanas e industriales

- *Procesos:*

- Mecánicos -> vientos
- Combustión interna
- Quema de biomasa

- *Partículas secundarias*

- Naturales: océanos
- Naturales: continentes (suelos, vegetación, volcanes...)
- Antropogénicas: Zonas urbanas e industriales

- *Procesos:*

- Nucleación: Conversión gas-partícula
- Condensación
- Procesos en fase acuosa

Tasa de emisión de fuentes naturales vs. antropogénicas

Table 1 Approximative present-day range of anthropogenic and natural emission rates of primary aerosols and aerosol precursors. Units are Tg per year, as mass of sulfur for sulfur dioxide and DMS, mass of nitrogen for ammonia, and mass of carbon for VOCs and carbonaceous aerosols

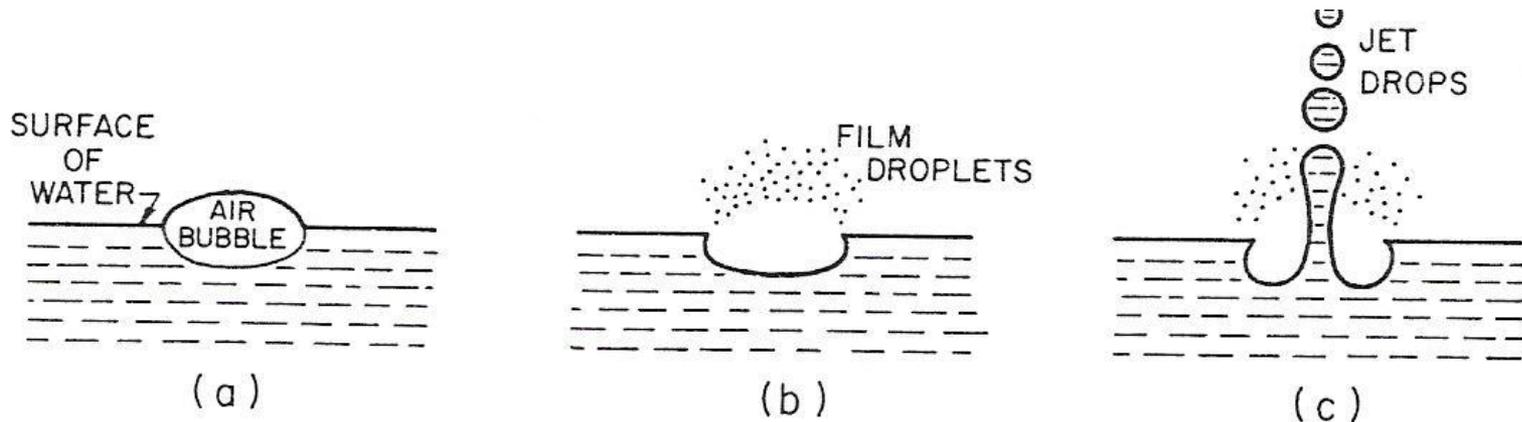
<i>Primary aerosol or precursor</i>	<i>Anthropogenic emission rate</i>	<i>Natural emission rate</i>
Sulfur dioxide (SO ₂)	50–90	10
Ammonia (NH ₃)	20–50	10
VOCs	5–40	<u>80–200</u>
Carbonaceous aerosols from fossil fuels	20–50	
Carbonaceous aerosols from biomass burning	<u>50–90</u>	20–40
Mineral dust aerosols	40–130	1000–3000
Sea-salt aerosols		2000–10 000
DMS		10–60
Biogenic bacteria and pollens		100–1000



VOCs, Volatile organic compounds; DMS, Dimethylsulfide.

2. Fuentes primarias: Océanos

El principal mecanismo de producción de partículas es el rompimiento de gotitas de agua que se evaporan en la atmósfera y dejan como residuo una partículas sólida (*gotitas de spray*)



También se forman gotas más grandes cuando el viento hace volar la espuma de las crestas de las olas (*gotas de espuma*).

Esta fuente depende de la velocidad del viento cerca de la superficie

$$\ln C = aU + b$$

Se generan partículas menores que $1\mu\text{m}$, que actúan como CCN y juegan un papel importante en la iniciación de precipitación en nubes marítimas y también tienen un rol climático.

Global Marine Sources: Seasonal distribution

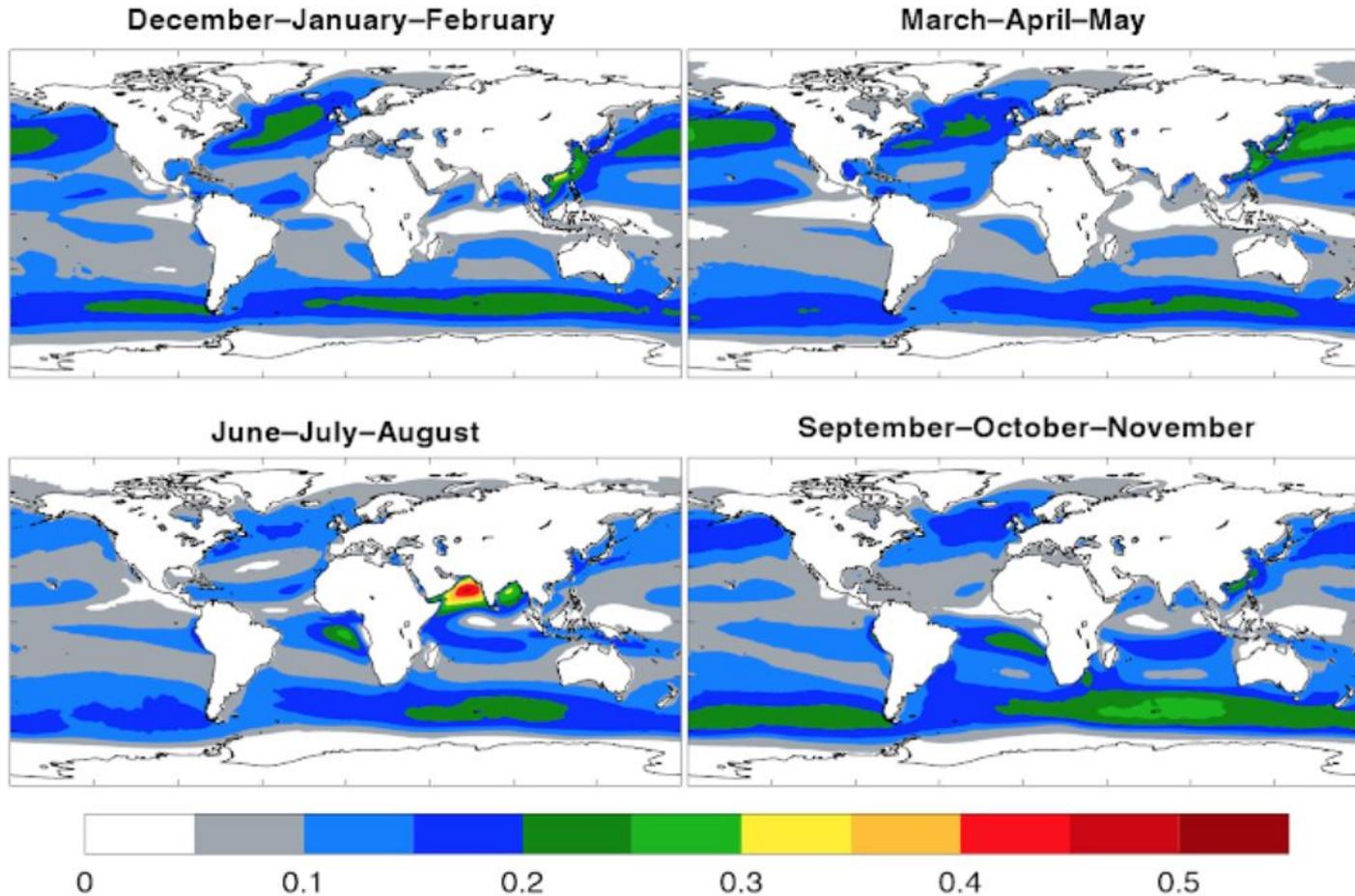


Figure 5 As Figure 2, but for marine aerosols.

2. Fuentes primarias: Continentes

Suelo

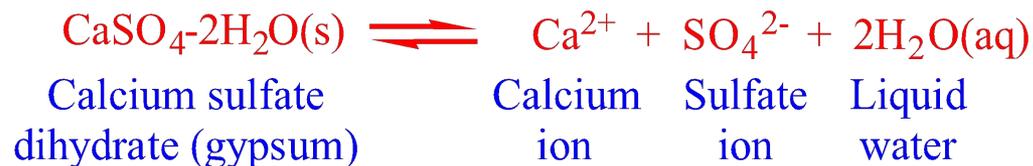
Minerales naturales y materia orgánica en forma suelta, no-consolidada, que se encuentran encima de las rocas en la superficie de la Tierra. Se origina por el rompimiento de las rocas y el deterioro de plantas y animales muertos.

Tipos de Rocas

- Sedimentarias: Cubren el 75% de la superficie terrestre y se forman por depósito de carbonatos, sulfatos, cloruros, fragmentos de conchas, etc.
- Ígneas: Se forman por enfriamiento del magma. Ejemplo: Granito.
- Metamórficas: Se forman por la transformación de rocas pre-existentes bajo grandes temperaturas y presión. Ejemplo: Mármol

La partículas de suelo (polvo) se pueden producir por procesos físicos o químicos:

- ***desintegración física*** de roca a partículas de suelo cuando existen grandes presiones aplicadas a una roca. Cuando hay ciclos de congelamiento y calentamiento las rocas se van debilitando y se quiebran y se producen fragmentos. La erosión por los vientos y el agua también genera fragmentos
- ***desintegración química*** de roca a partículas de suelo, por reacciones como por ejemplo al disolverse una sal en agua:



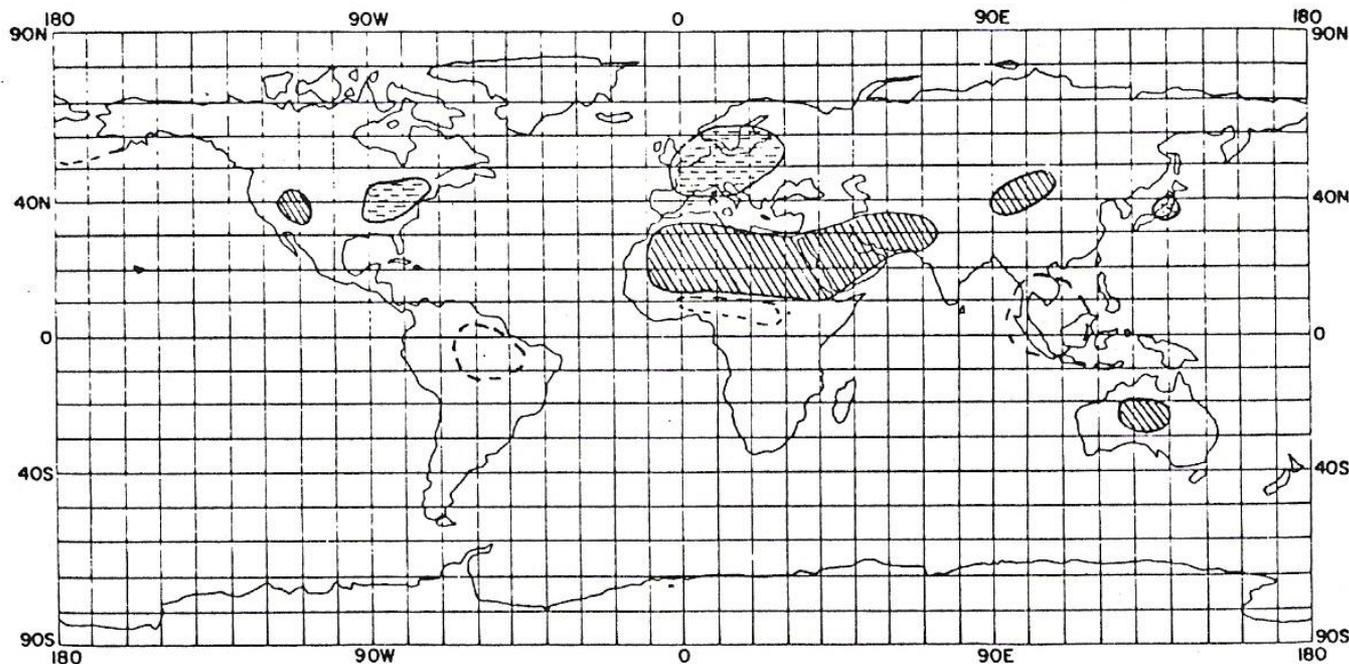
2. Fuentes primarias: Continentes

Los *desiertos* del planeta constituyen la principal fuente de partículas a nivel global, aunque solo cubren 1/3 de la superficie continental.

Los desiertos contienen partículas sólidas pre-formadas y de muy variada composición. Pero no todas las regiones en los desiertos generan partículas de igual forma. Las *dunas* son productoras “pobres” de partículas, comparadas con los *valles* en zonas desérticas.

Las zonas que en el pasado estaban cubiertas por agua y ahora están secas, son muy efectivas en la producción de partículas.

Se generan principalmente partículas $< 0.1 \mu\text{m}$



Continental Dust Storms



Fig. 3. Dust storm approaching the village of Qulandy, near the Aral Sea in Kazakhstan (Photo: ©Nick Middleton).



Fig. 1. Sydney harbour bridge obscured by thick dust during the notorious Red Dawn event in Australia in September 2009 (Photo: Mrcricket48).

Table 1

Maximum mean aerosol index (AI) values for major global dust sources determined from TOMS (from Goudie and Middleton, 2006, Table 4.2).

Location	AI value	Average annual rainfall (mm)
Bodélé Depression of south central Sahara	>30	17
West Sahara in Mali and Mauritania	>24	5–100
Arabia (southern Oman/Saudi border)	>21	<100
Eastern Sahara (Libya)	>15	22
Southwest Asia (Makran coast)	>12	98
Taklamakan/Tarim Basin (China)	>11	<25
Etosha Pan (Namibia)	>11	435–530
Lake Eyre Basin (Australia)	>11	150–200
Mkgadikgadi Basin (Botswana)	>8	460
Salar de Uyuni (Bolivia)	>7	178
Great Basin (USA)	>5	400

Main Global Dust Sources:

(Sokolik, 2015)

Global Dust Sources: Seasonal distribution

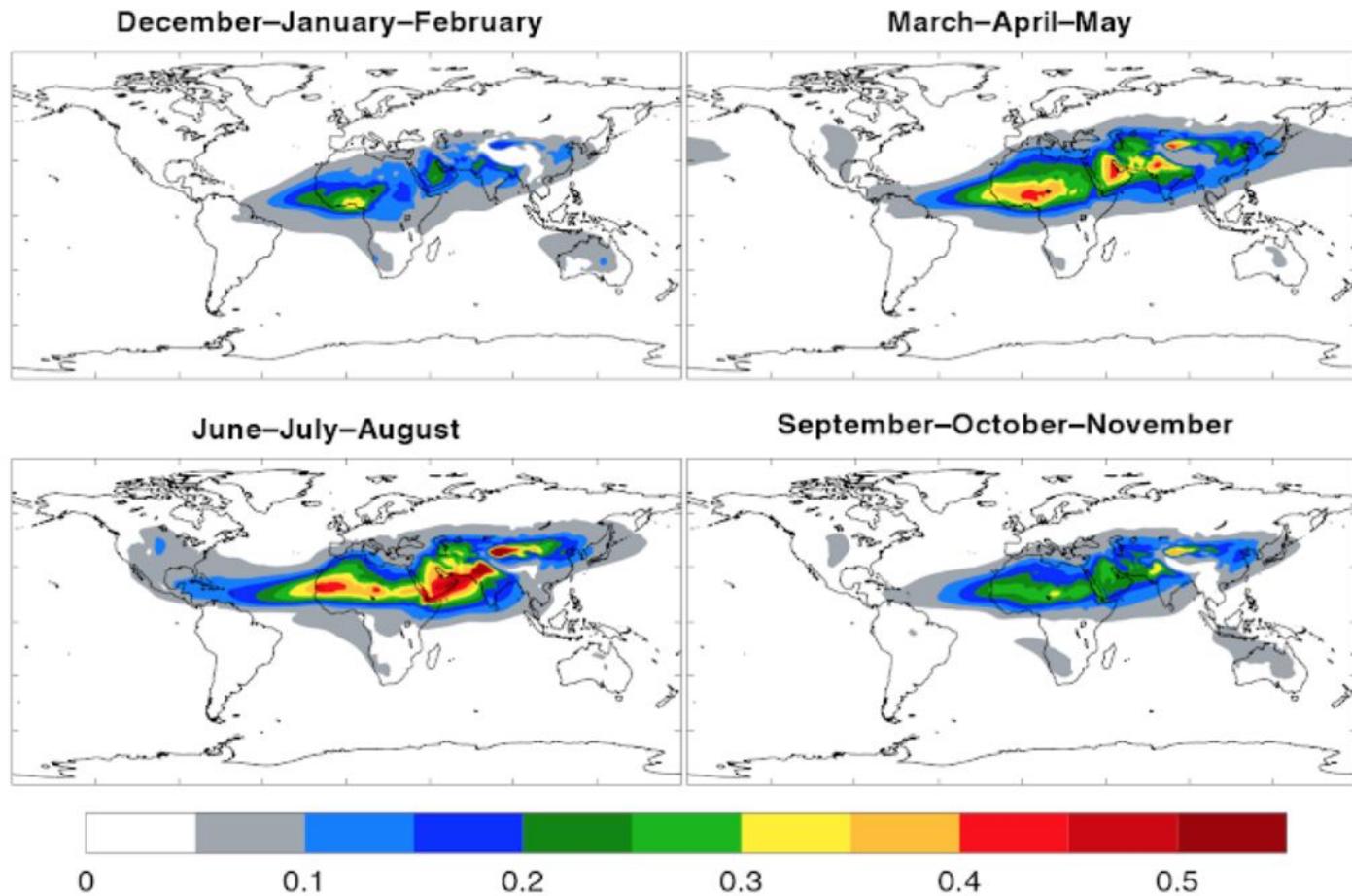


Figure 4 As **Figure 2**, but for mineral dust aerosols.

SAHARAN DUST STORMS

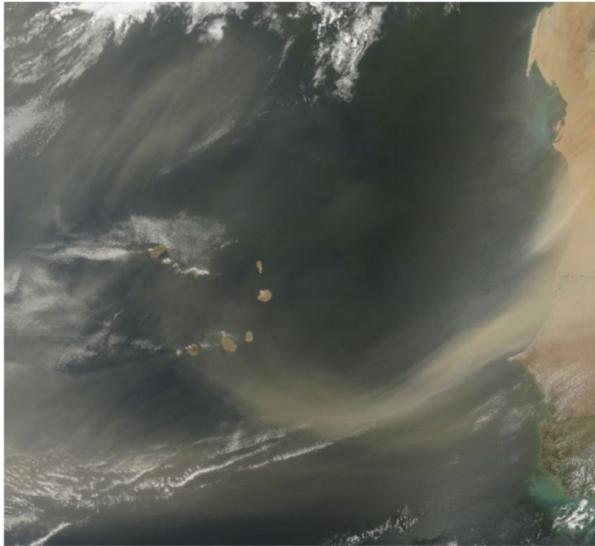
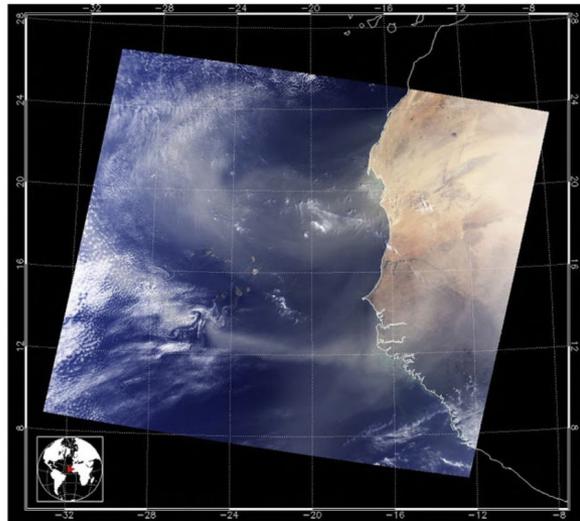
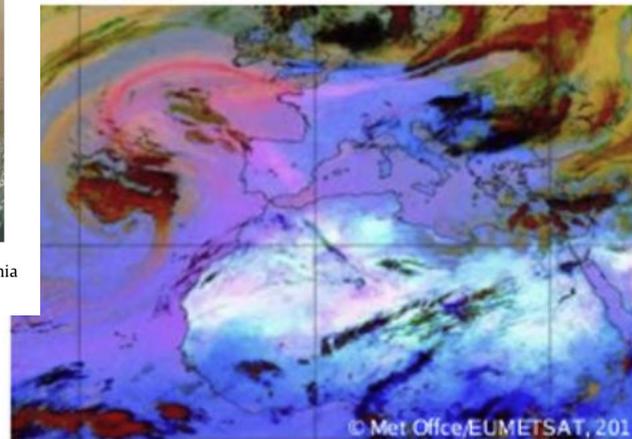


Fig. 2. Long-range transport of Saharan dust blowing off the coasts of Mauritania and Senegal over the Atlantic towards Cape Verde (Image: NASA MODIS).



12:00 7 April:

'Dust RGB' satellite image from EUMETSAT MSG



Pink indicates dust
 Black indicates thin cloud
 Orange indicates thick liquid cloud
 Red indicates thick ice cloud
 The land/sea surface is blue

Modelled Dust Aerosol Optical Depth (with NASA AERONET Observations)

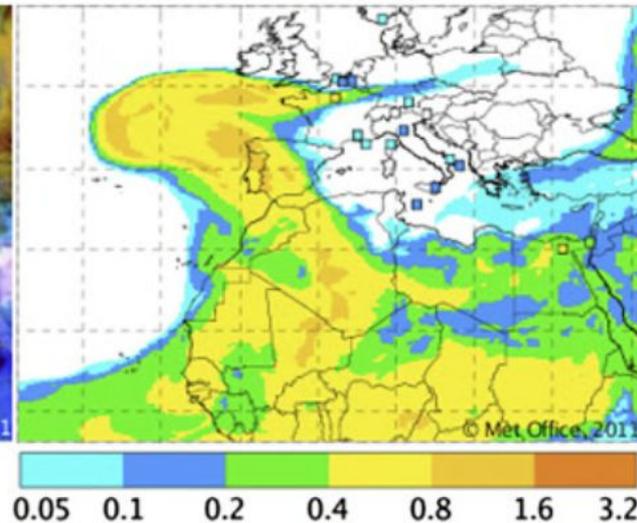


Figure 7 Transport of mineral dust aerosol from the Sahara to Western Europe on 7 April 2011 at 12 a.m. GMT. The left-hand side panel shows an analysis of Meteosat Second Generation satellite observations where mineral dust is highlighted in pink. The right-hand side panel shows the corresponding forecast of mineral dust optical depth by the UK Met Office numerical forecast model. © Crown.

MAIN IMPACTS OF DUST AEROSOL

N. Mahowald et al. / *Aeolian Research* 15 (2014) 53–71

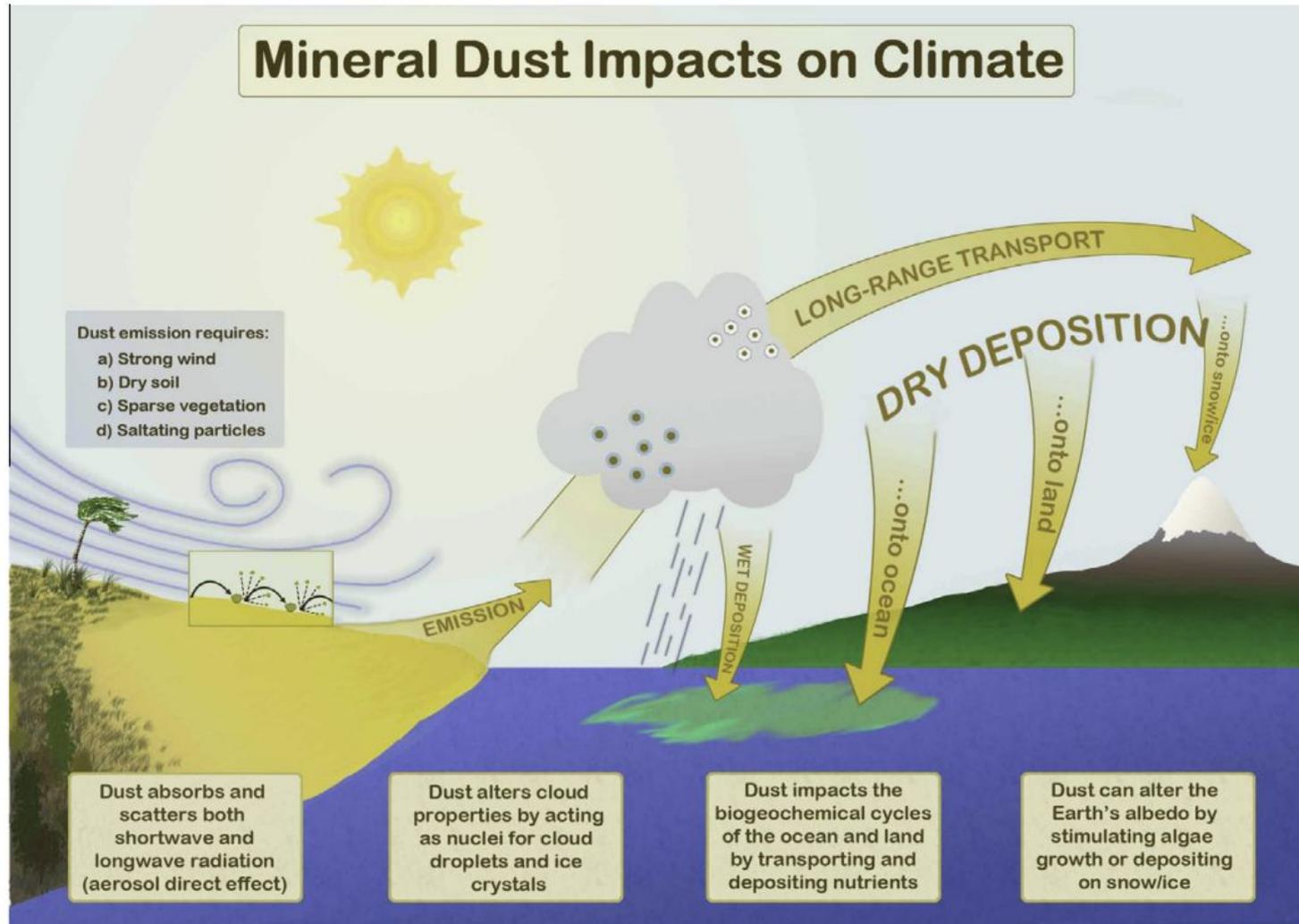


Fig. 1. Schematic of interactions between dust and climate and biogeochemistry.

MAIN IMPACTS OF DUST AEROSOL

Table 1 Major impacts caused by dust aerosol and their importance

<i>Impact</i>	<i>Importance</i>
Direct radiative impacts	
Causes radiative forcing at the top of the atmosphere	Affects energy balance of the Earth's climate system
Causes radiative forcing at the surface	Affects surface temperature and surface-air exchange processes
Causes radiative heating/cooling within a dust layer	Affects temperature profile and atmospheric dynamics
Affects visibility	Decreases visibility, posing a traffic hazard
Impacts on clouds	
Serves as ice nuclei	Affects the properties and amount of ice clouds
Serves as cloud condensation nuclei	Affects the properties and amount of water clouds
Impacts on atmospheric composition and chemistry	
Alters actinic flux	Affects photolysis rates and photochemistry
Provides particle surfaces for heterogeneous chemical reactions	Alters the abundance of radiatively important atmospheric gases and aerosols
Impacts on land and ocean ecosystems	
Alters photosynthetic active radiation	Affects plant photosynthesis and growth
Alters surface energy balance	
Transports nutrients (iron and phosphorous)	Affects biogeochemical processes

2. Fuentes naturales: Volcanes

Cientos de volcanes activos, que emiten gases y partículas. Esta fuente puede ser *muy importante para las condiciones del tiempo y del clima* ya que se pueden introducir grandes cantidades de *partículas en la estratósfera*, donde el tiempo de residencia es muy superior al de la tropósfera.

La presencia de partículas de origen volcánico en la estratósfera puede llevar a una reducción de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, ocasionando incluso *una disminución* de la temperatura en superficie.



Volcan Puyehue, Chile,
2011

2. Fuentes biogénicas (continentes y océanos)

En esta categoría debemos diferenciar *al polen y las esporas*, con tamaños típicos mayores que $1\mu\text{m}$, de *las bacterias y virus* que en su mayoría son sub-micrométricas.

Esta fuente puede ser natural o antropogénica, como es el caso en zonas urbanas (principalmente en países en vías de desarrollo).

No hay actualmente una cuantificación adecuada de esta fuente a nivel global, aunque se reconocen ciertas características, tales como variaciones estacionales.

Los bosques tropicales (e.g. Amazonas) constituyen una fuente *muy importante*, tanto de partículas biogénicas como de gases que, una vez emitidos a la atmosfera, tienen el potencial de producir partículas secundarias.

2. Fuentes antropogénicas: Combustibles Fósiles

Carbón mineral

Roca sedimentaria carbonácea formada por la compactación de material vegetal degradado. Se puede encontrar en sus varias etapas de transformación, desde “peat” (blando, color marrón-negrusco) hasta antracita (duro, negro)

Petróleo

Hidrocarburo combustible natural en estado líquido, muy grasoso y viscoso que se forma de la descomposición a escala geológica de plantas y animales.

Gas Natural

Gas inflamable incoloro, principalmente compuesto de metano, se encuentra a menudo cerca de depósitos de petróleo.

Kerosene

Combustible líquido con un fuerte olor que se obtiene a partir de destilación de petróleo

Diésel/combustóleo

Combustible líquido más viscoso que kerosene que se obtiene a partir de destilación de petróleo

2. Fuentes antropogénicas: Combustibles Fósiles

Gases

NO_x , ROGs, CO, CO_2 , CH_4 , SO_2

Partículas

Hollín (BC+OC), o pueden contener sólo OC, también sulfatos dependiendo del contenido de SO_2 , metales, ceniza (“fly ash”). La ceniza (“fly ash”) puede contener O, Si, Al, Fe, Ca, Mg.

2. Fuentes antropogenicas industriales: Toxicidad

<u>Industria</u>	<u>Metales en las partículas</u>
Plantas eléctricas (combustóleo)	V, Ni, Fe
Plantas eléctricas (carbón)	Fe, Zn, Pb, V, Mn, Cr, Cu, Ni, As, Co, Cd, Sb, Hg
Incineradores municipales	Zn, Fe, Hg, Pb, Sn, As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Sb
Hornos acereros	Fe, Zn, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb

MUCHOS de estos metales son muy tóxicos para los humanos!!

2. Fuentes antropogénicas: Quema de biomasa

En muchas regiones del planeta esta es una fuente muy importante y puede ser por quema agrícola o quema de bosques para aumentar la frontera agrícola (e.g. Amazonas, Bolivia y Paraguay)

Se emiten a la atmósfera tanto gases como partículas primarias.

Gases : CO , CO_2 , CH_4 , NO_x , SO_2

Partículas: Ceniza, plantas, polvo, material orgánico y hollín.

La composición del **hollín** incluye carbono grafitico (“black carbon”) y compuestos orgánicos primarios.

Estas partículas con “black carbon” son muy importantes en el *balance radiativo global*, ya que absorben fuertemente la radiación solar.

Global Sources of Anthropogenic Aerosol: Seasonal distribution

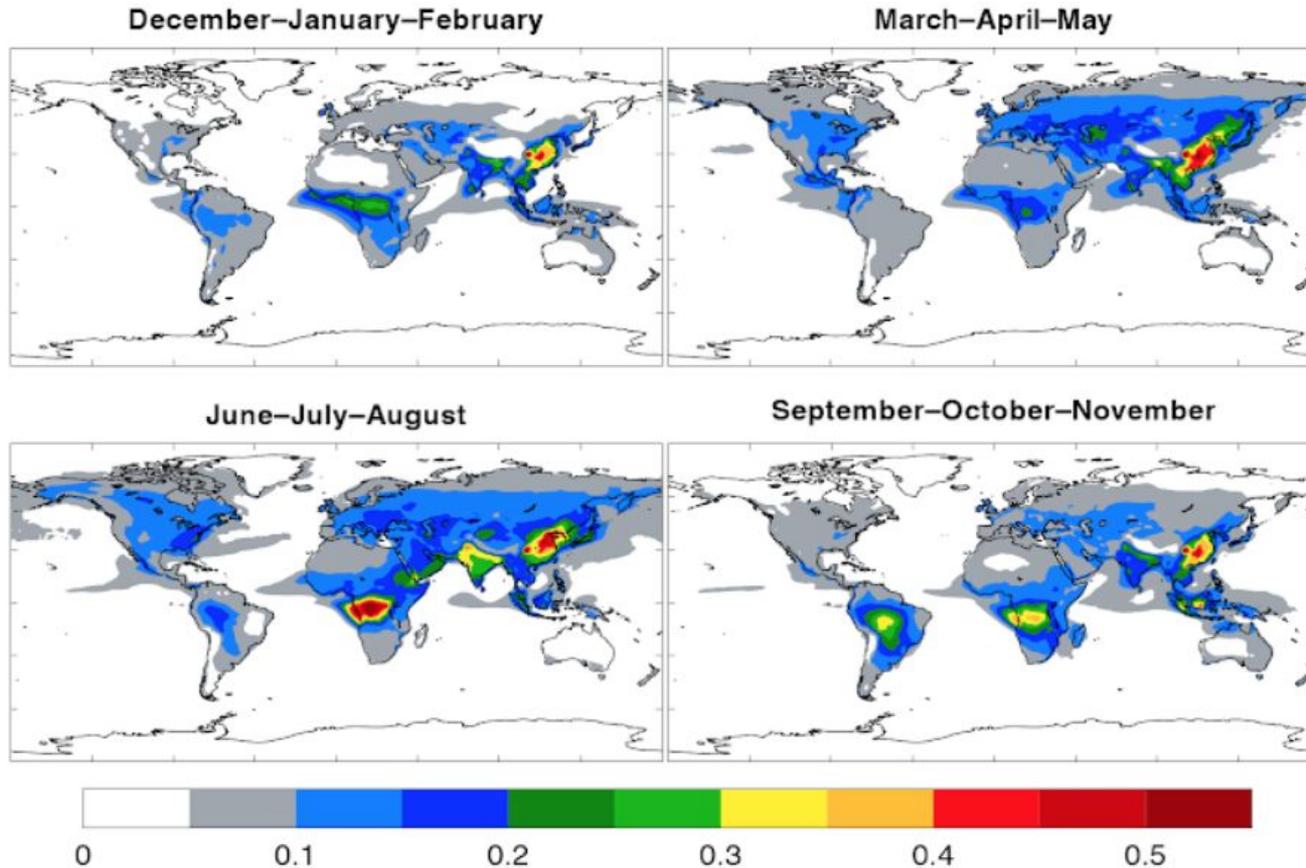


Figure 2 Seasonal distributions (2003–10) of aerosol optical depth at 0.55 μm attributed to fine-mode anthropogenic aerosols in the Monitoring Atmospheric Composition and Climate reanalysis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecast forecast model with assimilation of Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer total aerosol optical depth retrievals.

2. Fuentes secundarias: Por conversión de gas a partícula

Nucleación homogénea:

homomolecular: 1 gas sin efectos de superficie pre-existente

binaria: 2 gases sin efectos de superficie pre-existente

ternaria: 3 gases sin efectos de superficie pre-existente

Los 3 principales compuestos en partículas provenientes de CGP son sulfatos, nitratos, hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles (“secondary organic aerosol” - SOA)

Nucleación heterogénea:

homomolecular: 1 gas condensa sobre un núcleo pre-existente

binaria: 2 gases condensan sobre un núcleo pre-existente

Las partículas con mayor superficie por unidad de volumen son las preferidas energéticamente para que ocurra la nucleación heterogénea.

Biological material in dust aerosol

Dust particles are mostly inorganic and do not contain biological material.

However, dust storms can pick up biological materials, including bacteria, pollen spores, fungi and viruses (Table 6), and transport them over long distances.

Evidence also indicates that it is the biological component of dust particles the one that causes allergic reactions and also directly associated with certain diseases and infections. Studies in Japan have quantified enhanced asthma in adult population in days when dust storms carried pollen versus dust storms without it.

Table 6
Examples of biological materials carried in dust storms.

Source	Location	Material
Leski et al. (2011)	Kuwait & Iraq	<i>Mycobacterium</i> , <i>Brucella</i> , <i>Coxiella Burnetii</i> , <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Bacillus</i>
Thomson et al. (2009)	West Africa	<i>Neissera meningitides</i>
Chen et al. (2010)	Taiwan	Influenza virus
Watanabe et al. (2011a)	Japan	Pollen spores
Polymenakou et al. (2008)	Crete	Bacteria
Jeon et al. (2011)	Korea	Bacteria
Grishkan et al. (2012)	Israel	Fungal communities
Soleimani et al. (2013)	Iran	Fungi: <i>Cladosporium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> and <i>Rhizopus</i>
Perfumo and Marchant (2010)	Turkey	Thermophilic bacteria (<i>Geobacillus</i>)
Schlesinger et al. (2006)	Israel	Bacteria and fungi
Najafi et al. (2013)	Iran	Bacteria and fungi

2. Fuentes secundarias: Por conversión de gas a partícula

Producción natural de “Sulfatos”:

Principalmente los compuestos gaseosos que contienen azufre provienen de la biósfera y de volcanes. Compuestos tales como SO_2 , H_2S , CS_2 , COS , CH_3SCH_3 (llamado *DMS*, emitido por fitoplancton) y CH_3SSCH_3 son los principales.

Las partículas con sulfatos se concentran en el rango de tamaños entre 0.1 y 1 μm . Sin embargo, partículas tan grandes no se forman por CGP homogénea...

Lo que sucede es que las partículas recién formadas coagulan rápidamente y crecen hasta quedar en el rango mencionado.

2. Fuentes secundarias: Producción natural de “Nitratos”

Sobre los continentes y en la atmósfera baja, los nitratos se observan en partículas $d > 1 \mu\text{m}$. Sin embargo, las partículas no pueden formarse directamente por CGP a esos tamaños...

Generalmente dichas partículas son el resultado de gotas de nube que se han evaporado, en las cuales se ha disuelto gases con nitrógeno (e.g. NO_2) y convertido en ácidos

En la estratósfera el N_2O se descompone en N_2 y NO y este último reacciona con O_3 para producir NO_2 , que al reaccionar con el radical OH forma ácido nítrico en forma gaseosa y dar lugar a partículas que forman las *nubes estratosféricas polares*.

2. Fuentes secundarias: Producción de compuestos orgánicos en partículas por conversión de gas a partícula

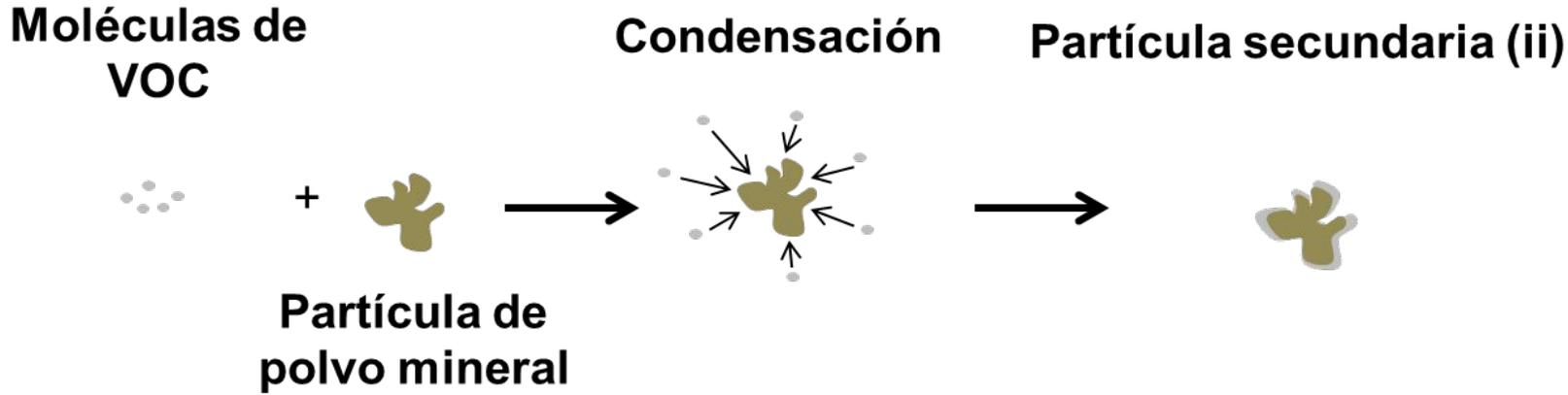
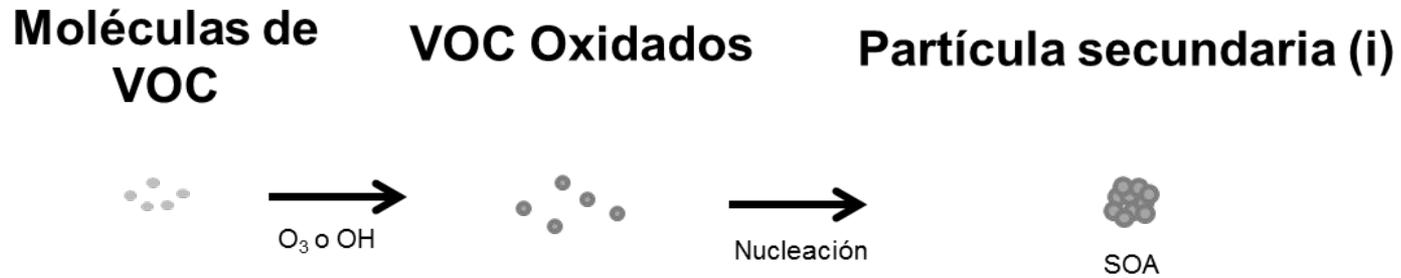
Se producen a partir de gases precursores en general emitidos por la biósfera, tanto como parte del metabolismo mismo de plantas y árboles, como por la quema de biomasa.

También existe una componente de emisiones de petróleo, a través de la superficie terrestre.

Los tamaños son generalmente $< 0.25 \mu\text{m}$.

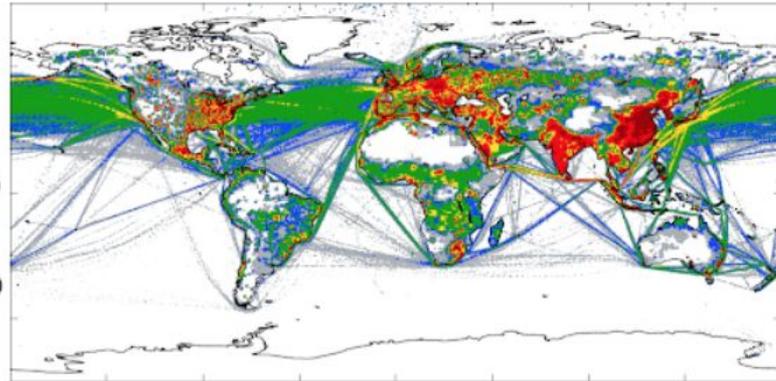
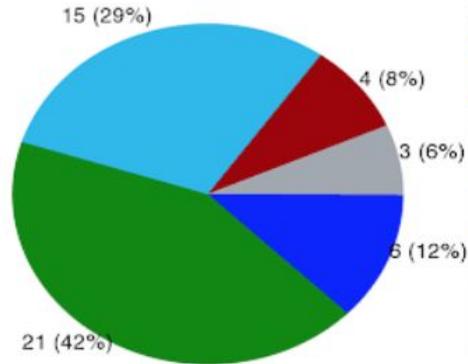
Compuestos *orgánicos volátiles* existen en forma simultánea en fase gaseosa y condensada a temperatura y presión atmosféricas. Sólo compuestos orgánicos con *mayor número de carbonos* son candidatos a estar presentes como partículas.

2. Fuentes secundarias: Producción de compuestos orgánicos en partículas por condensación



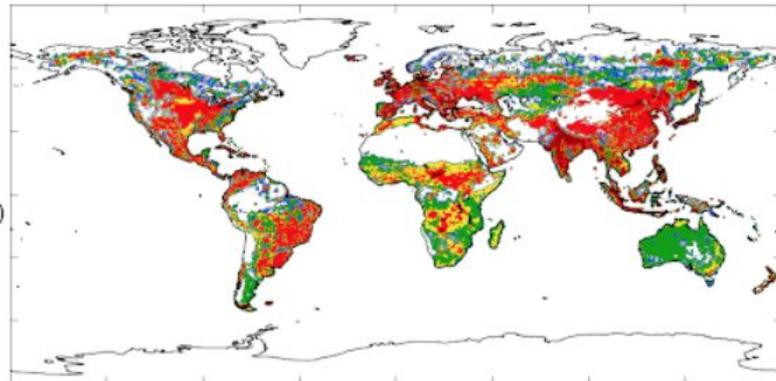
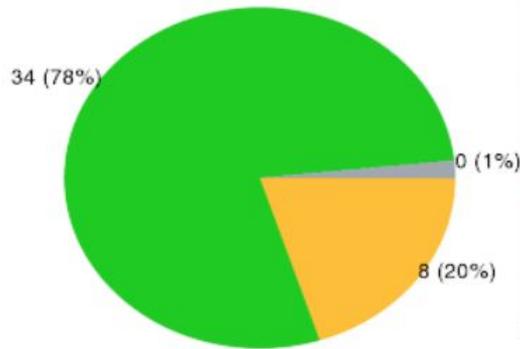
Global Sources of Anthropogenic Aerosol: Speciation by sectors

Sulfur dioxide



Total: 50.8 Tg[S] per year

Ammonia



Total: 43.4 Tg[N] per year



Global Sources of Anthropogenic Aerosol: Speciation by sectors

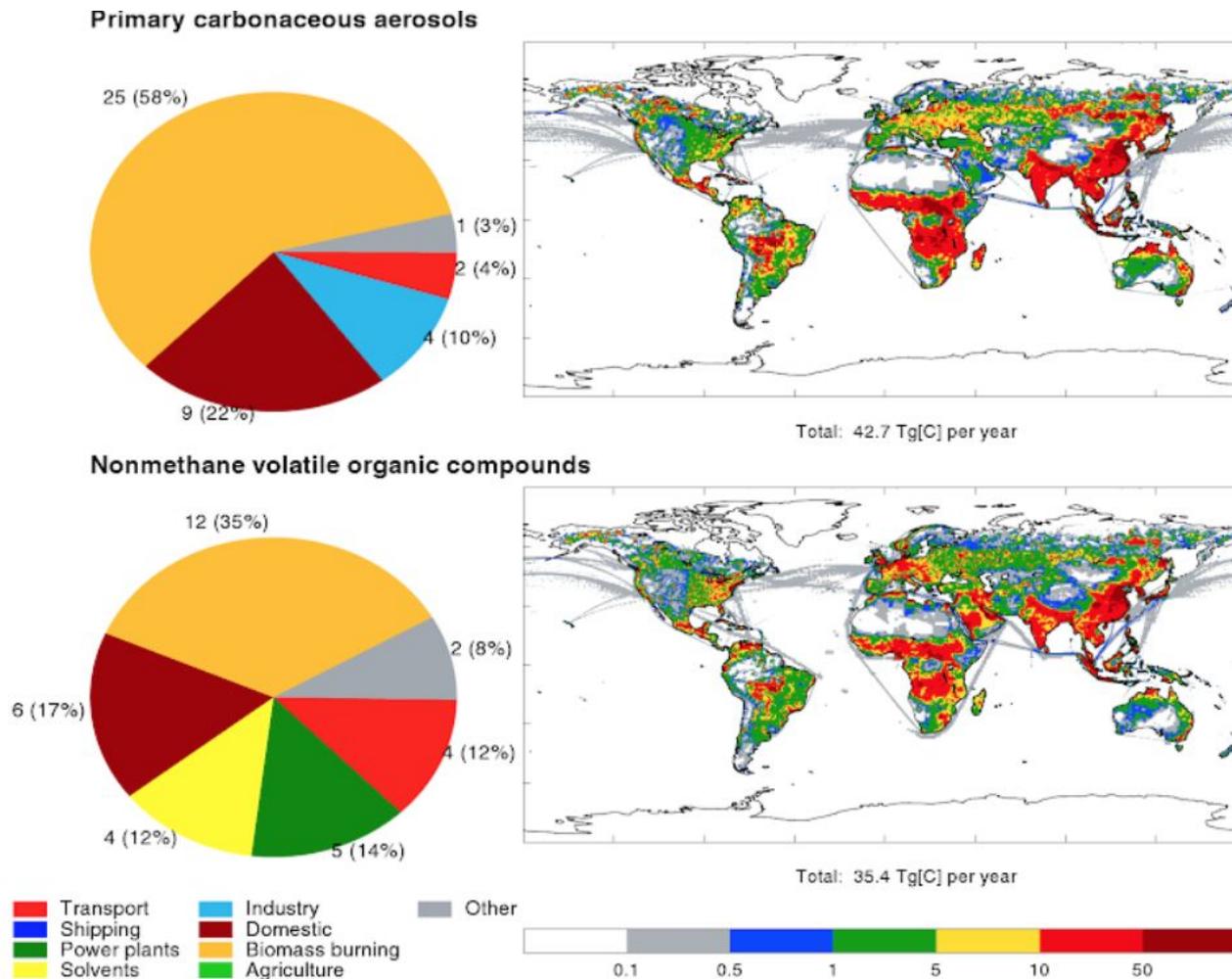
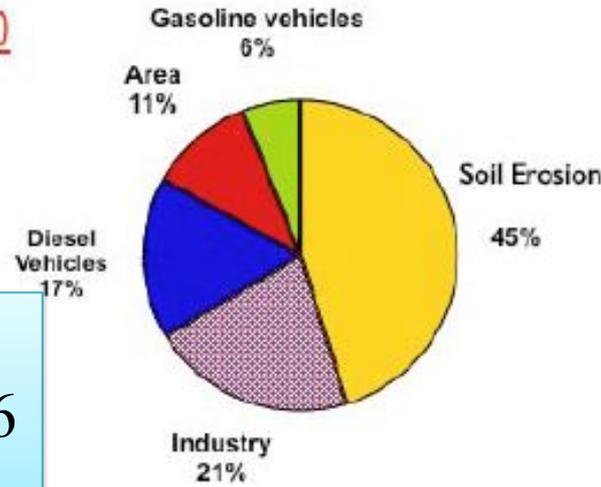


Figure 3 Anthropogenic emissions of aerosols and aerosol precursors for the year 2010, according to the datasets developed as part of the Climate Model Intercomparison Project Phase 5. Left column: sector-based charts, in Tg per year. Right column: Distributions of total emissions, in $\text{ng m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Emissions of sulfur dioxide, ammonia, and carbonaceous aerosols and volatile organic compounds are given as masses of sulfur, nitrogen, and carbon, respectively.

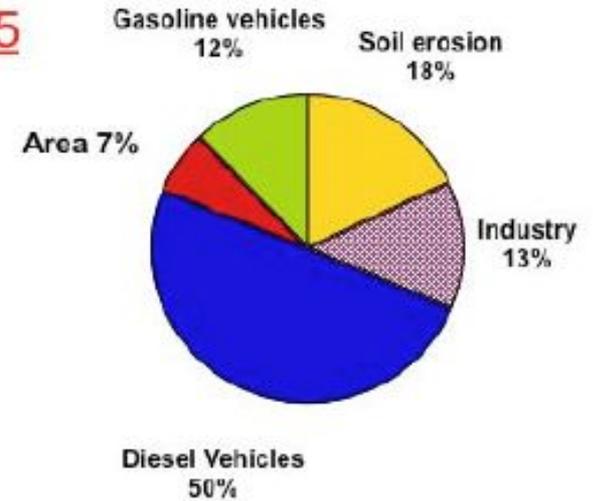
“MILAGRO”
Campaign in 2006
Mexico City

PM10



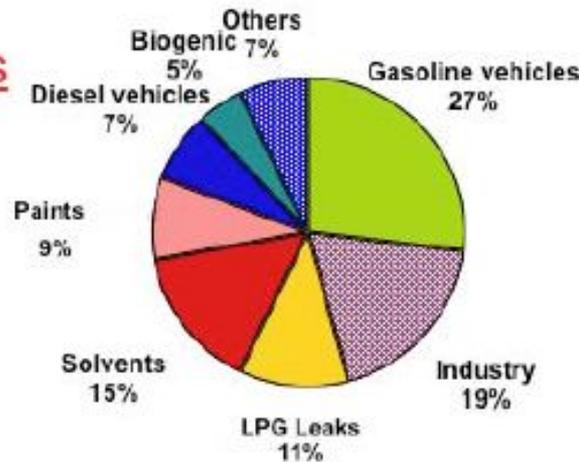
Total: 23,000 tons/yr

PM2.5



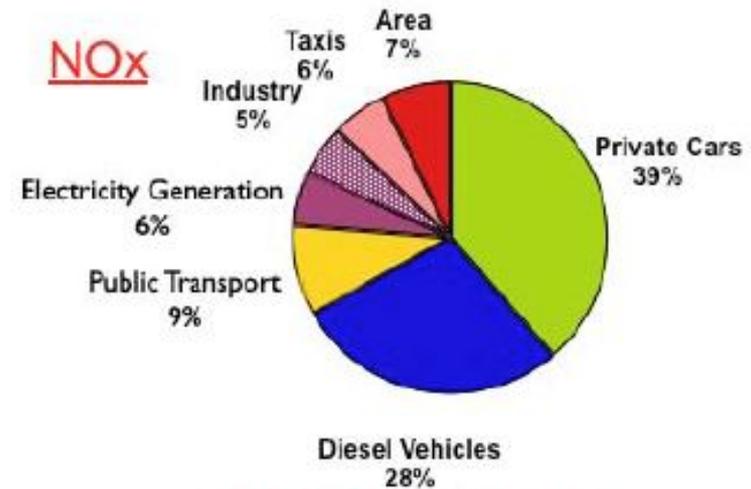
Total: 6,200 tons/yr

VOCs



Total: 566,000 tons/yr

NOx



Total: 195,000 tons/yr

Fig. 6. Emissions Inventory of the MCMA for the year 2006 (Source: www.sma.df.gob.mx/simat).

“MILAGRO”
Campaign in 2006
Mexico City

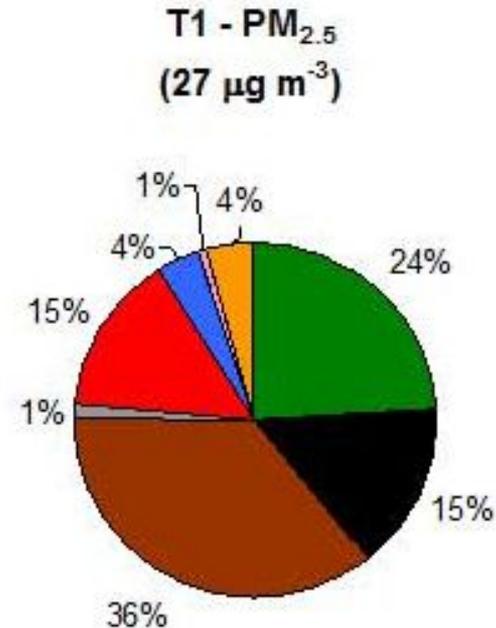
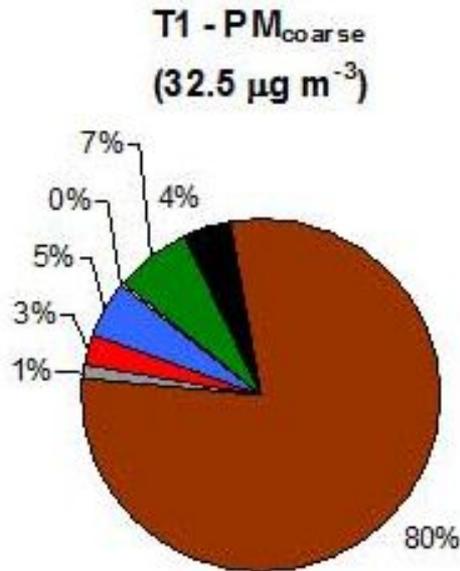
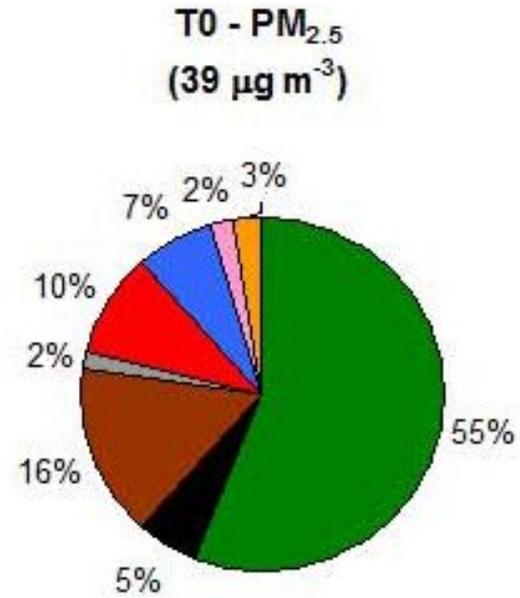
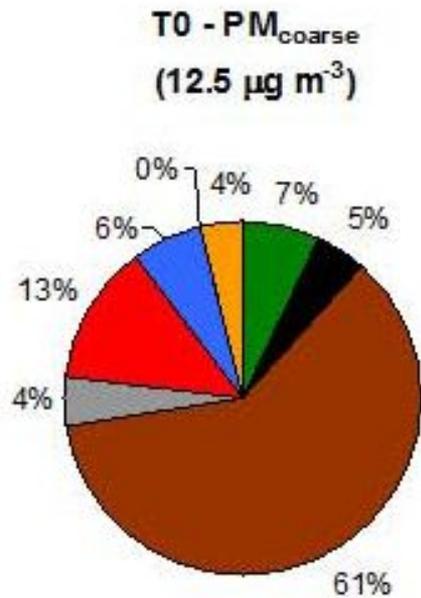
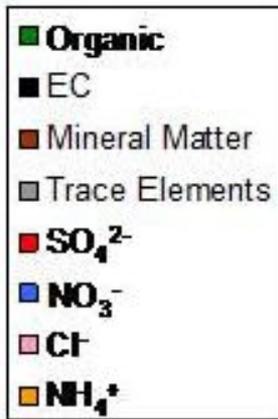


Fig. 12. Average composition of $\text{PM}_{\text{coarse}}$ (PM_{10} – $\text{PM}_{2.5}$) and $\text{PM}_{2.5}$ at the T0 and T1 supersites, based on the results of Querol et al. (2008). OA was calculated from the measured OC based on the average measured OA/OC ratio of 1.75 at T0 (Aiken et al., 2008). The T1 site was affected by local resuspension of dust, which explains the unusually large contribution of mineral matter at this site. Molina et al, 2008

¿Qué cosa es el hollín???

Son partículas sólidas de composición compleja que absorben la radiación solar principalmente en longitud de onda visible y también algo en ultravioleta (en inglés: soot)

Siempre incluye una componente insoluble de carbono negro (“black carbon”, BC) que es la que principalmente absorbe radiación.

Dependiendo de las fuentes, la composición puede incluir diversos metales y compuestos orgánicos pesados dañinos a la salud, incluso carcinogénicos.

Dependiendo de la fuente y de la temperatura de combustión, la mezcla de compuestos será diferente. Se puede usar la variación de absorción con la longitud de onda para inferir la fuente.

Fuentes principales:

- vehículos a diesel y biocombustibles (combustión incompleta)
- generación de electricidad (por carbón mineral o combustóleo)
- extracción de petróleo e industria petroquímica
- quema de biomasa (BC y “carbono café” o “brown carbon”)
- quema doméstica (cocina y calefacción)



No hay un estándar para la cuantificación de BC, diferentes grupos de investigación usan diferentes métodos!

4. Morfología y composición

Partículas de hollín: cadenas

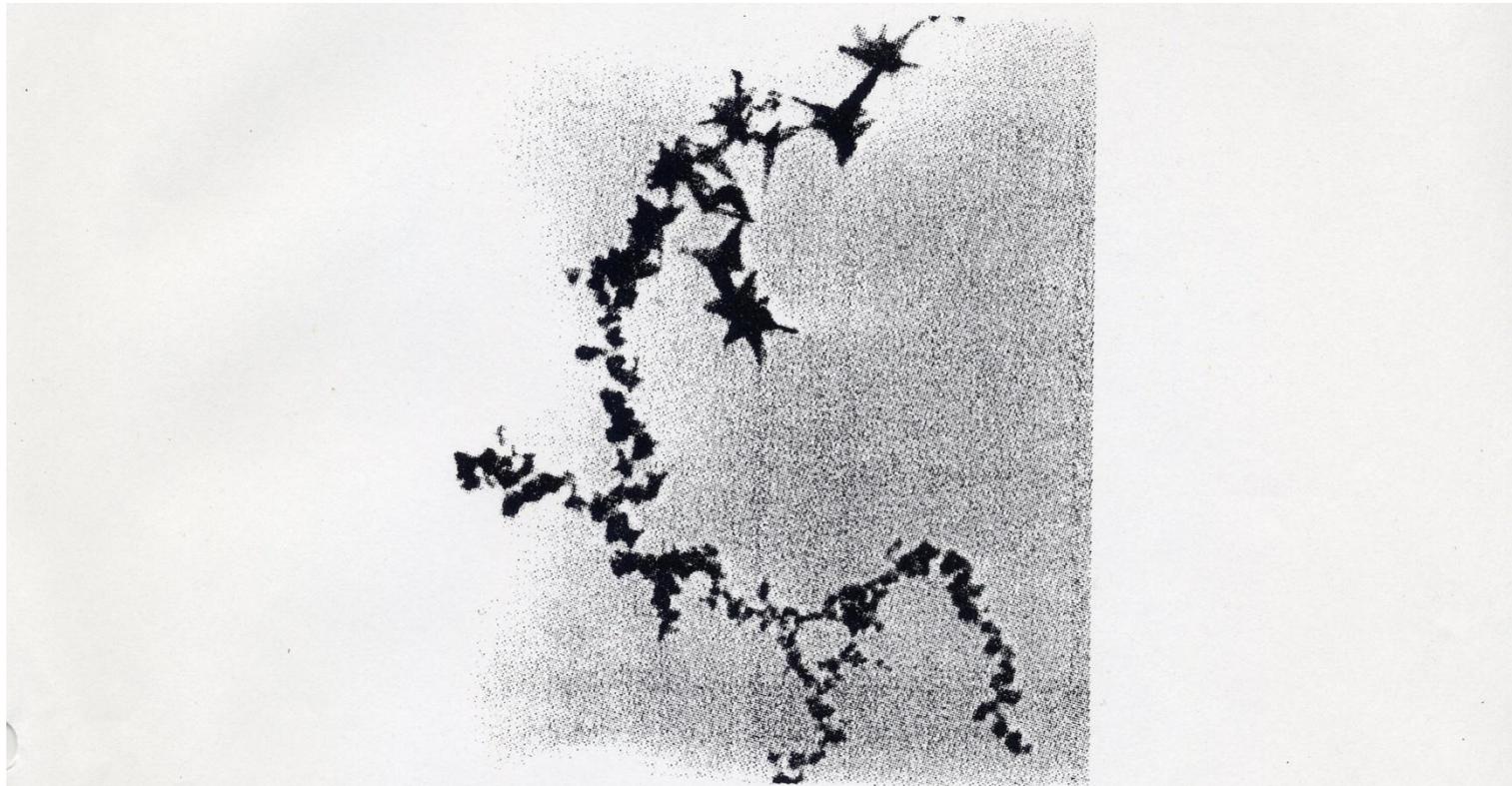


Fig. 3-3. A typical fume particle is an agglomerate of smaller particles formed from condensed vapor. This is a zinc oxide fume particle indicating condensation components with different levels of crystallization.

Partículas de hollín

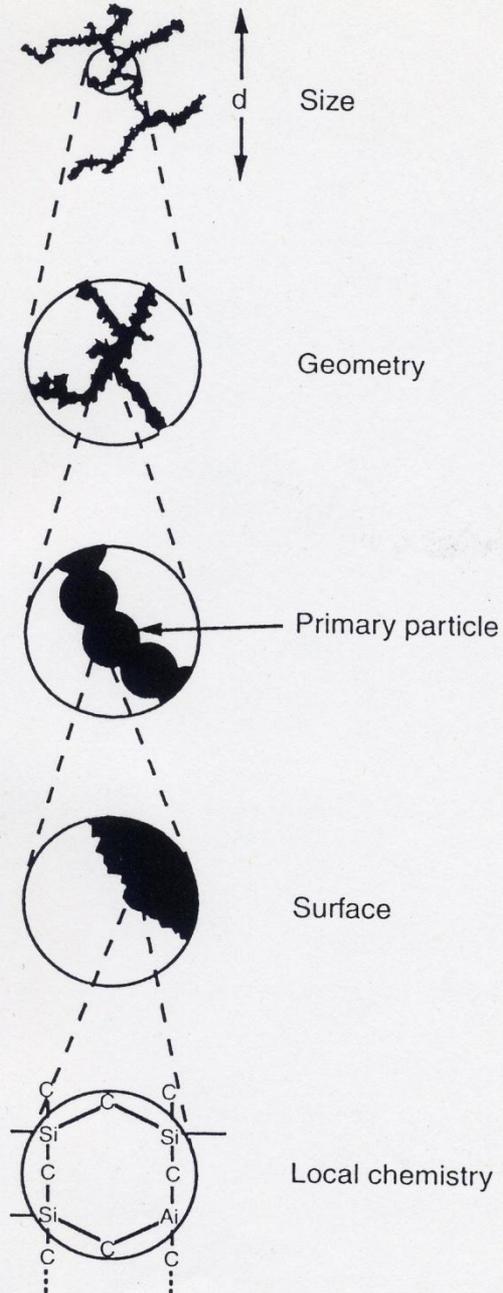
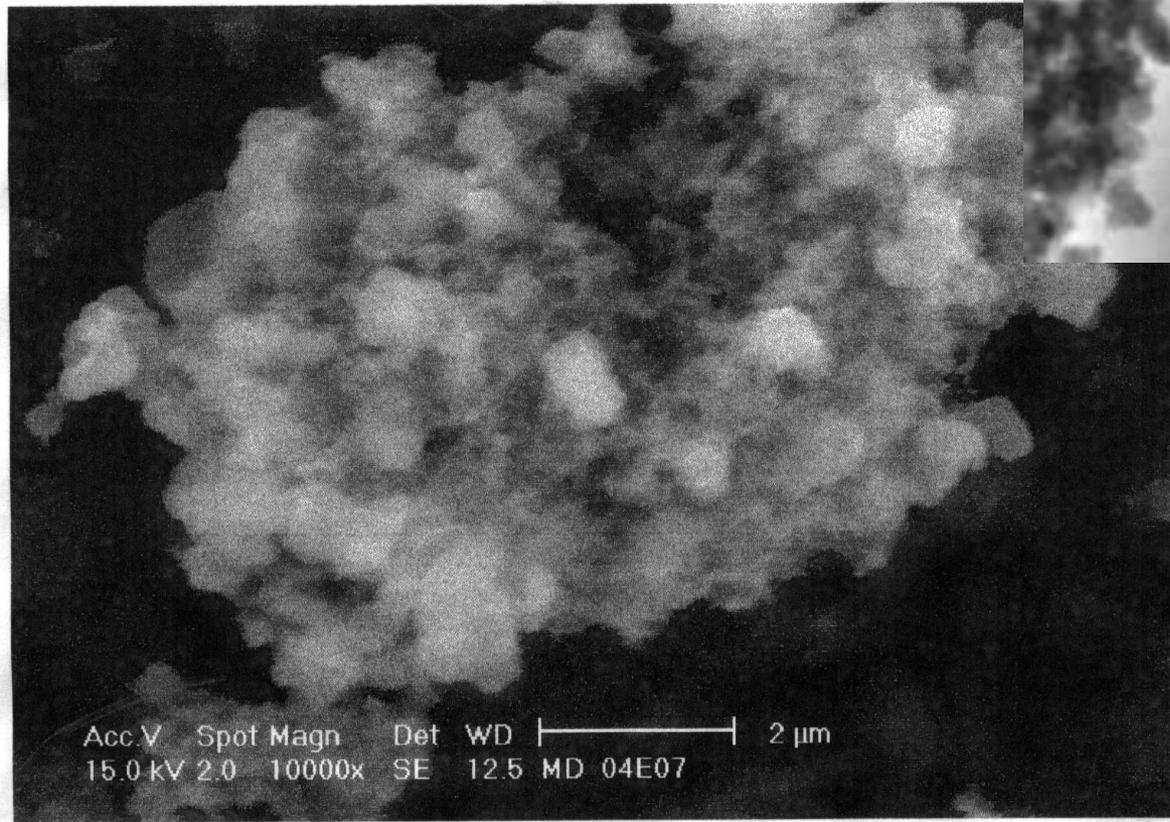
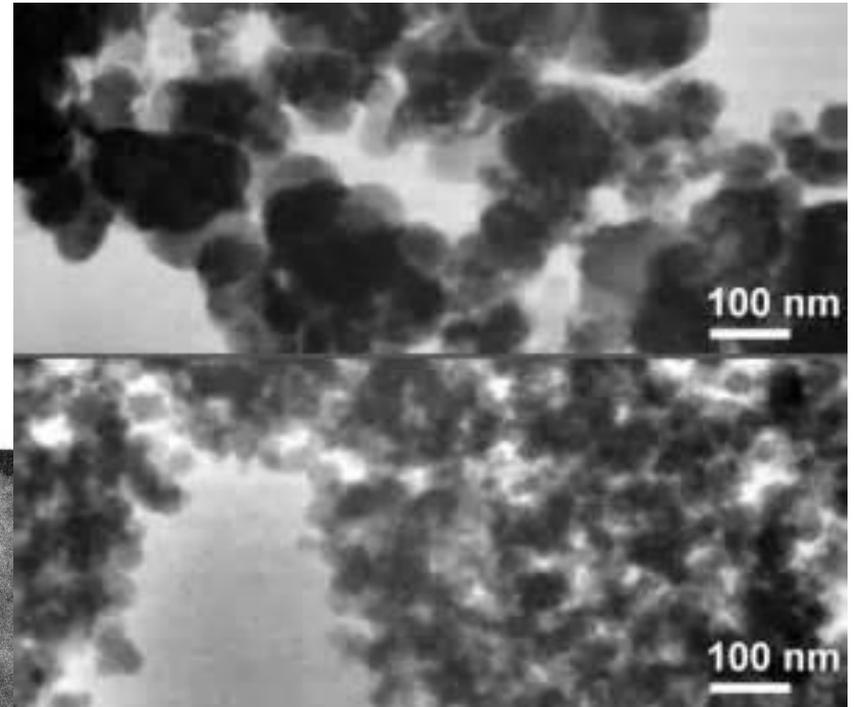


Fig. 3-2. Schematic structure of an agglomerate in two-dimensional space. Scanning down the figure corresponds to viewing the particle at ever higher magnification. (Adapted from Schaefer and Hurd, 1990.)

¿Cómo se ven las partículas de BC?

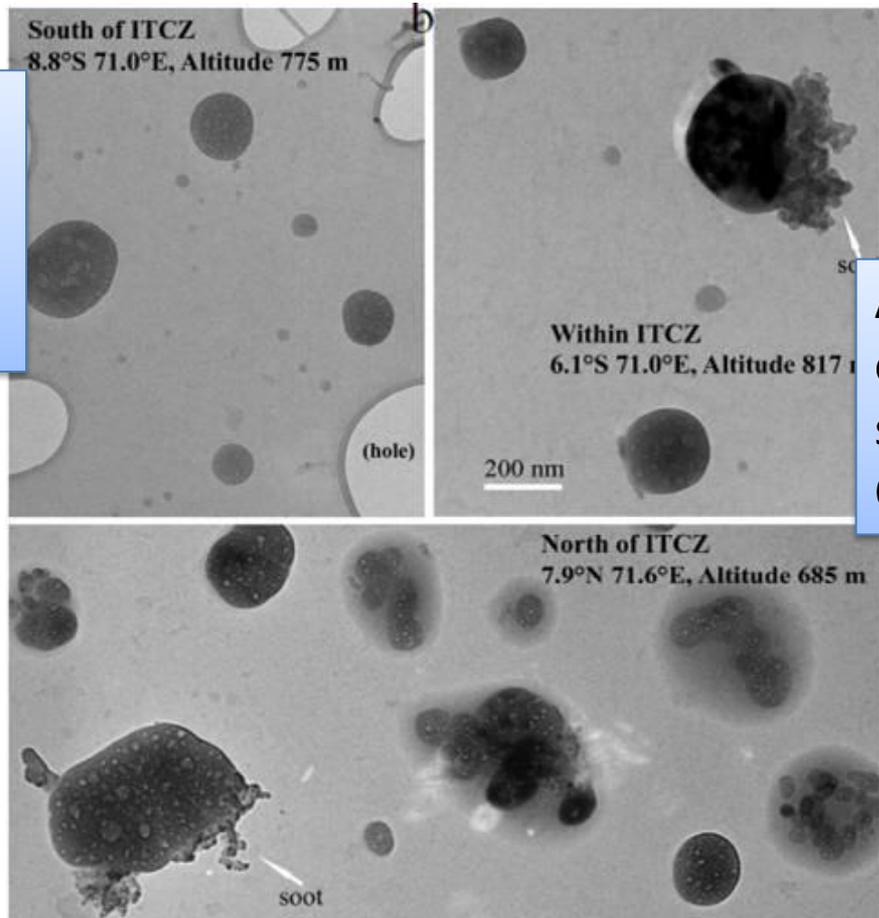
Agregados de esférulas



Crecen al combinarse entre sí y se hacen mas compactas a medida que pasa el tiempo y se alejan de las fuentes.

Envejecen al oxidarse y al condensarse sobre su superficie otros gases y cambia su higroscopicidad.

¿Cómo se ven las partículas de BC en zonas marinas?



Aire limpio
sobre el
Océano
Indico

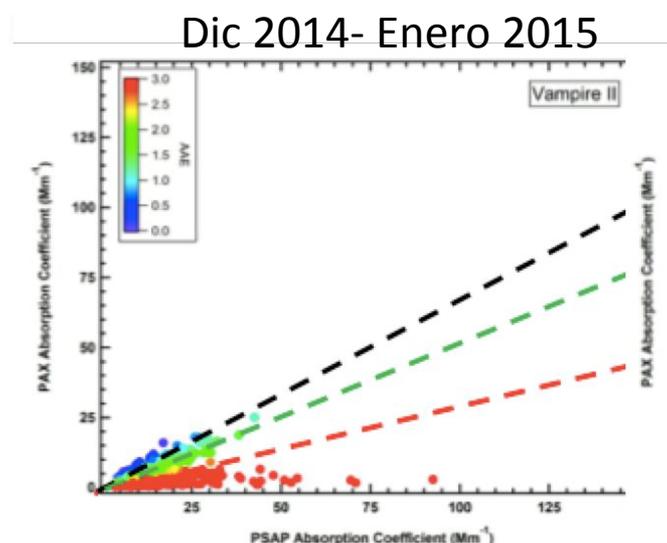
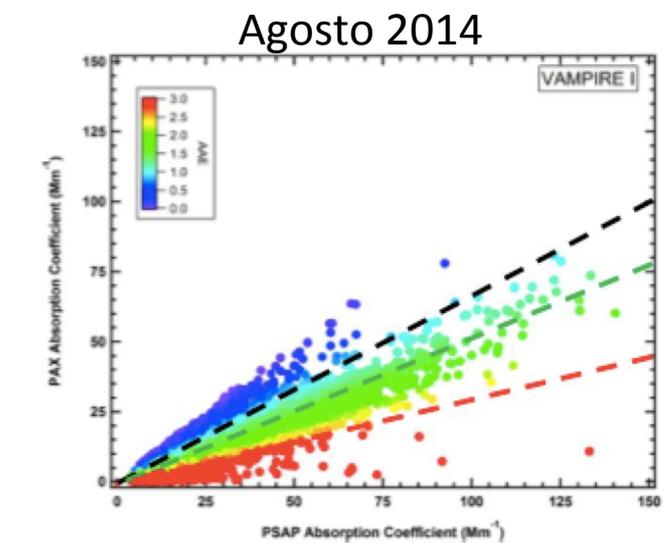
Aire
contaminado
sobre el
Océano Indico



Fuentes de partículas que absorben radiación en Valparaíso, Chile

Usando los coeficientes de absorción medidos por el PSAP (550nm) y el PAX (870nm), se puede determinar el Exponente de Absorción de Angstrom (AAE), que permiten discriminar tres fuentes de emisión diferentes para las partículas que absorben radiación:

- Emisiones Diesel (buses) asociados a BC caracterizados por $AAE < 1$ (línea negra y puntos azules)
- Aerosol orgánico (camiones, barcos) asociado a brown carbon (BrC), con $1 < AAE < 2$ (línea verde)
- Quema de Biomasa (quema de madera domiciliaria e incendios forestales), BrC, $AAE > 2$ (línea roja)



5. Procesos de evolución: Distribución de tamaño

- Difusión
- Coagulación
- Colisión y coalescencia

- Sedimentación
- Remoción húmeda

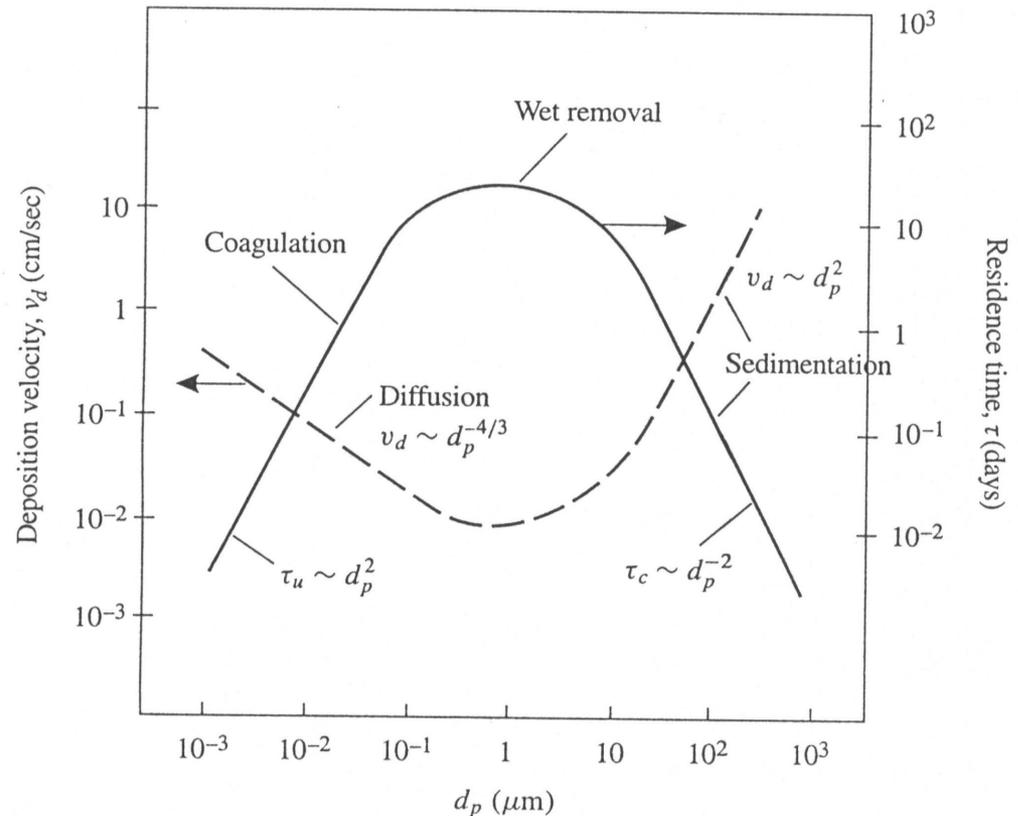
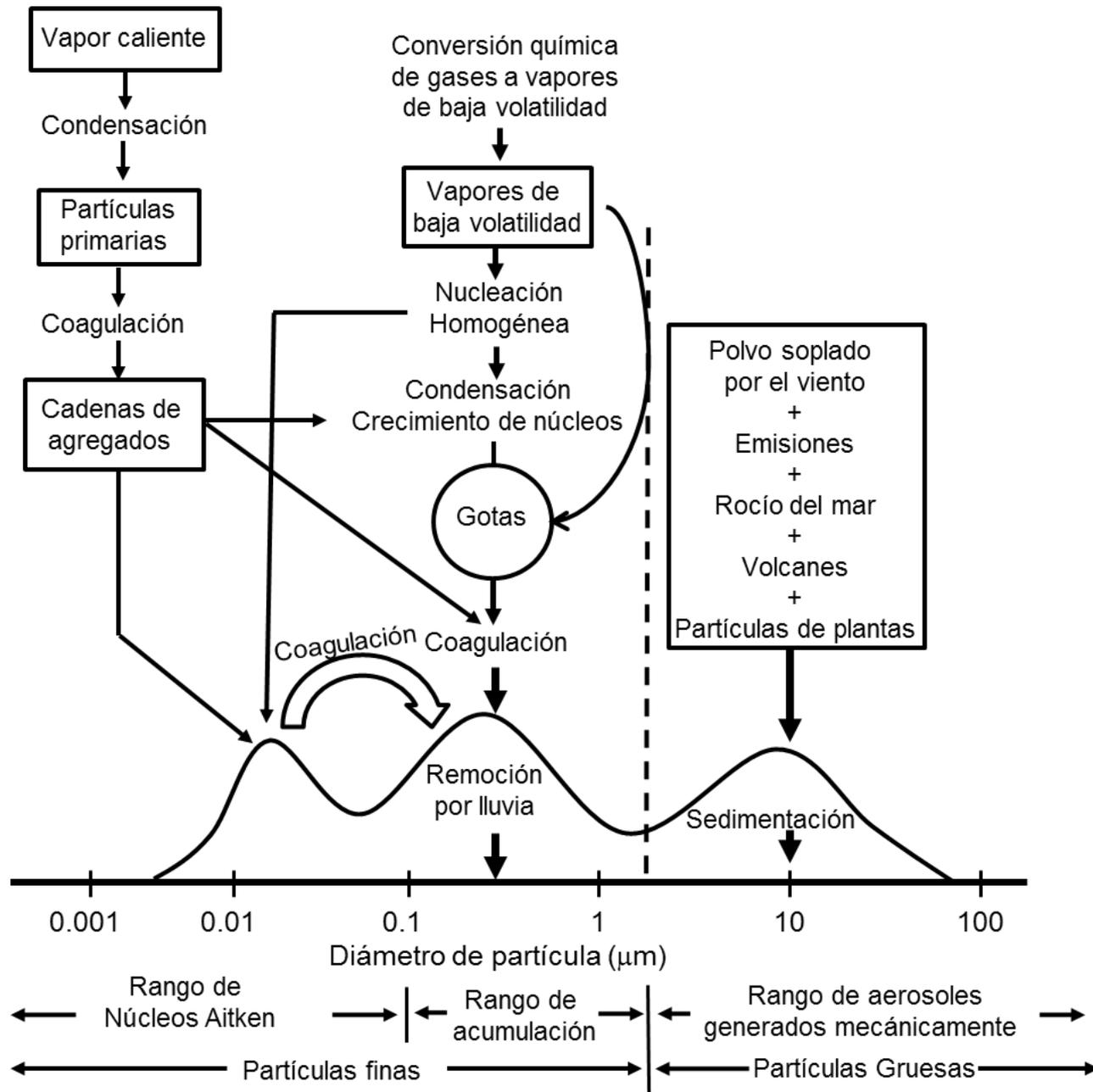


Figure 13.4 The atmospheric aerosol residence time goes through a maximum in the size range corresponding to the accumulation mode $0.1 < d_p < 2.5 \mu\text{m}$. Smaller (ultrafine) particles rapidly attach to the accumulation mode by Brownian motion. Larger particles are lost by sedimentation. The estimated residence times are for a continental aerosol with $N_\infty = 1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ and height of the mixed layer 1.5 km (After Jaenicke, 1980.) Also shown is a dry deposition velocity curve with a characteristic minimum in the accumulation mode size range. The deposition velocity approaches the settling velocity for large particles, and settling controls their residence time. Diffusion and interception dominate deposition for submicron particles (Chapter 3) but do not usually have a significant effect on their residence times as explained in the text.

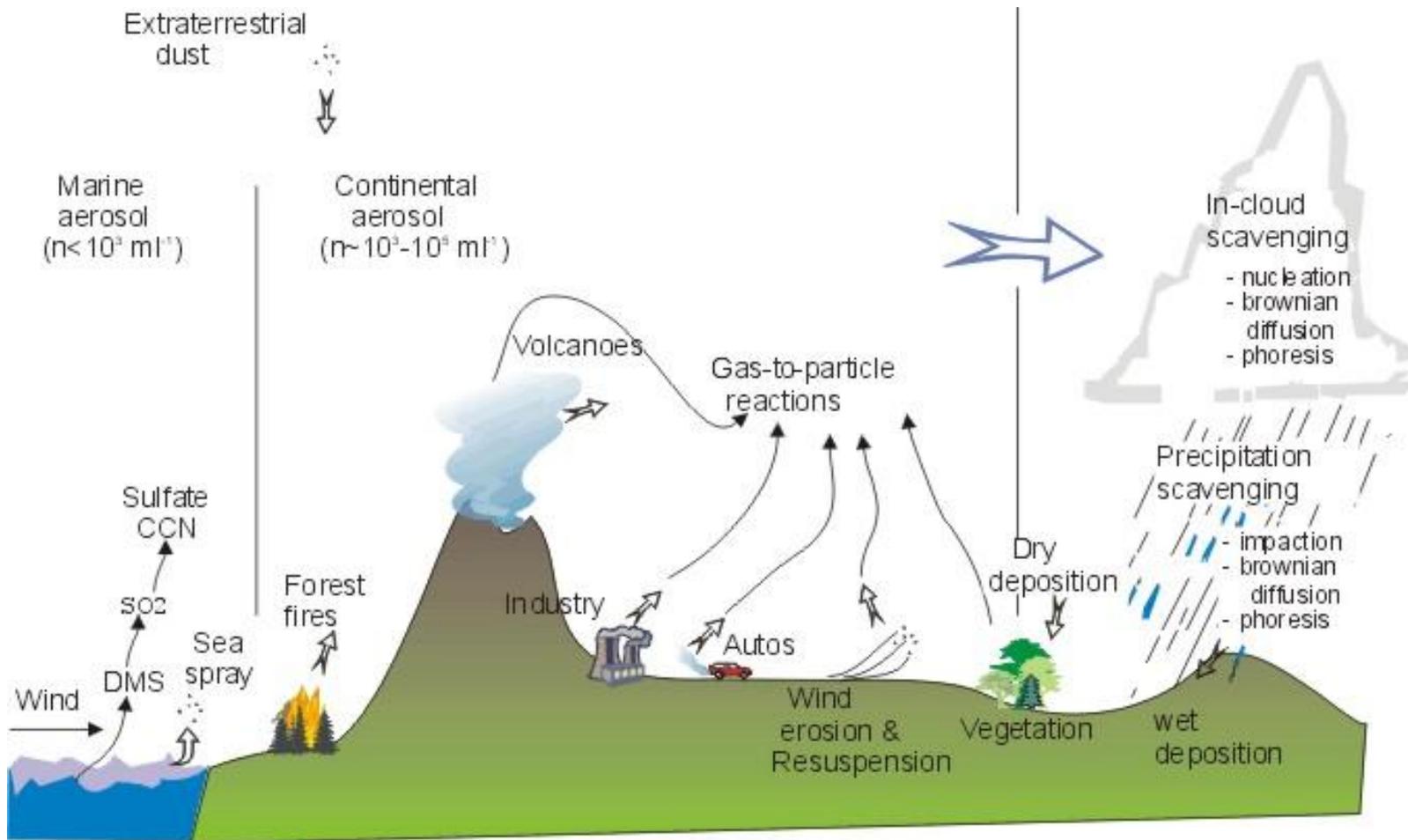


5. Procesos de evolución: Sumideros

- ***Depósito seco***: es un proceso de 3 pasos que involucra el transporte en la atmósfera, en la capa límite viscosa (de mm de espesor) e interacción con la superficie (posibilidad de rebote)
- ***Depósito húmedo***: proceso asociado a la presencia de precipitación, de naturaleza episódica y de interacciones con gotitas de nube y gotas de lluvia.
- ***Procesamiento por nubes***: reacciones en fase acuosa que resultan en cambios de composición y tamaño y posterior evaporación

Resumen de Aerosol Atmosférico:

Fuentes y Sumideros



Temario:

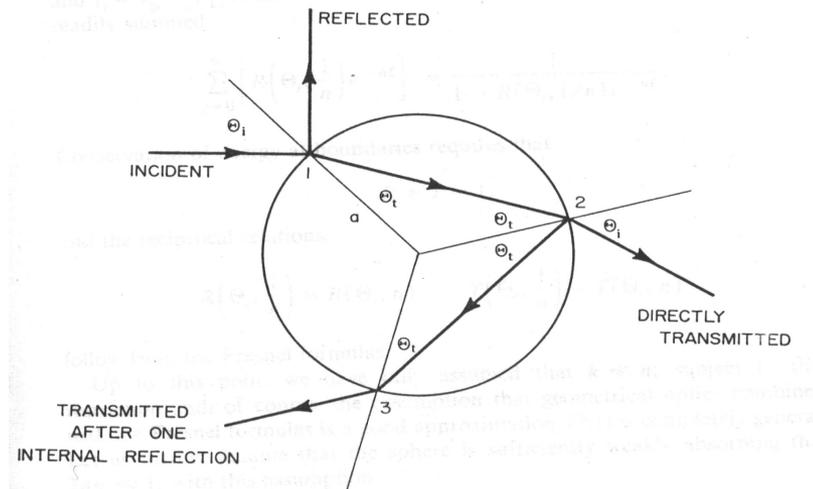
- ✓ Relevancia de partículas de aerosol atmosférico en el planeta.
- ✓ Conceptos generales de fuentes y de caracterización de partículas
- ✓ Conceptos generales de interacción de partículas con radiación solar: efecto directo
- ✓ Conceptos del rol en la formación de nubes y de interacción de nubes con radiación solar: efecto indirecto

Interacción con radiación

Partículas con tamaño comparable con la longitud de onda ($x \sim 1$)

- Teoría de Mie (1908): las expresiones para la intensidad dispersada y absorbida se obtienen resolviendo las ecuaciones de Maxwell de electromagnética, tanto para fuera como para dentro de la partícula

$$x = \pi \cdot d_p / \lambda \approx 1$$



Interacción con radiación: Solución de Mie

m : índice de refracción

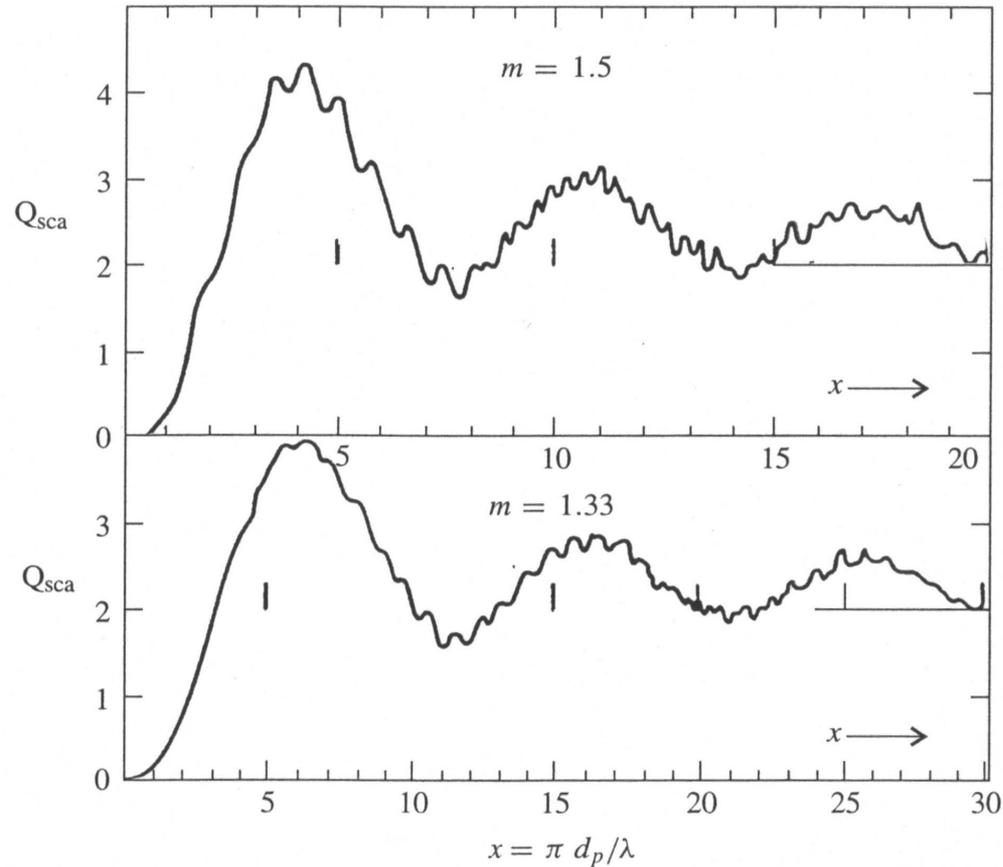


Figure 5.2 Extinction curves calculated from the theory of Mie for $m = 1.5$ and $m = 1.33$ (van de Hulst, 1957). The curves show a sequence of maxima and minima of diminishing amplitude, typical of nonabsorbing spheres with $1 < m < 2$. Indeed, by taking the abscissa of the curve for $m = 1.5$ to be $2x(m - 1)$, all extinction curves for the range $1 < m < 2$ are reduced to approximately the same curve.

Distribución angular de la radiación dispersada

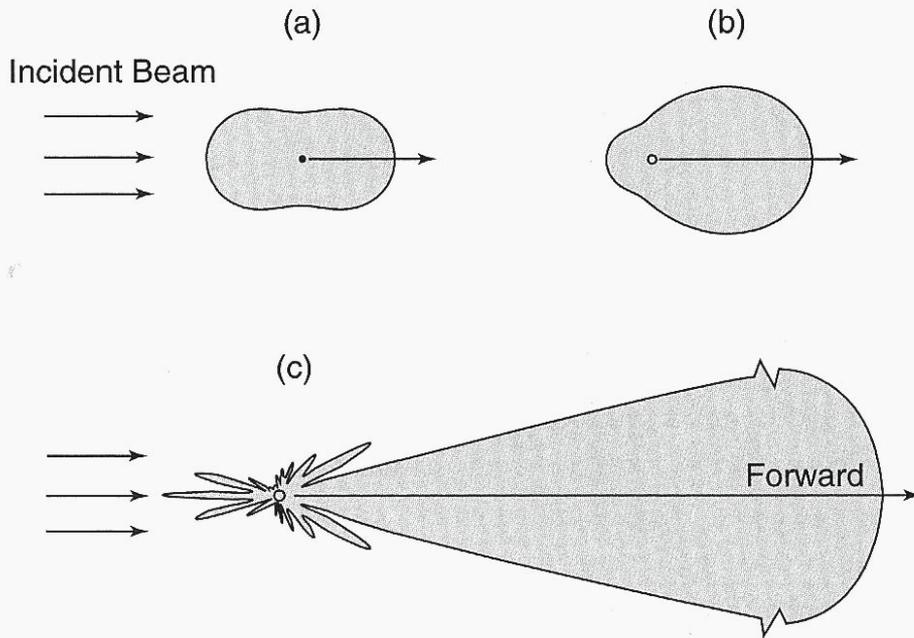
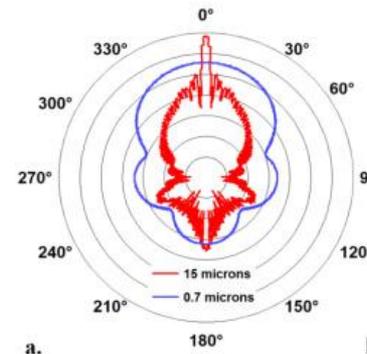
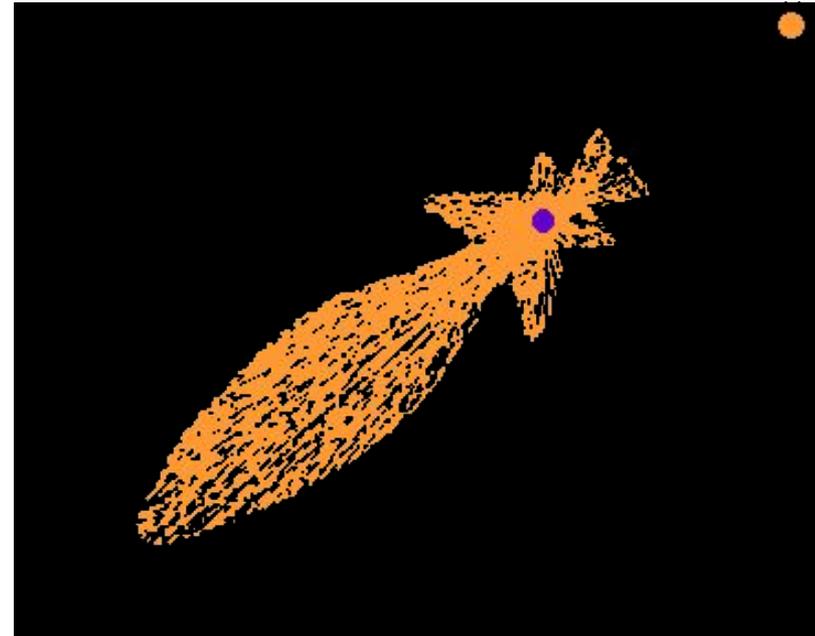


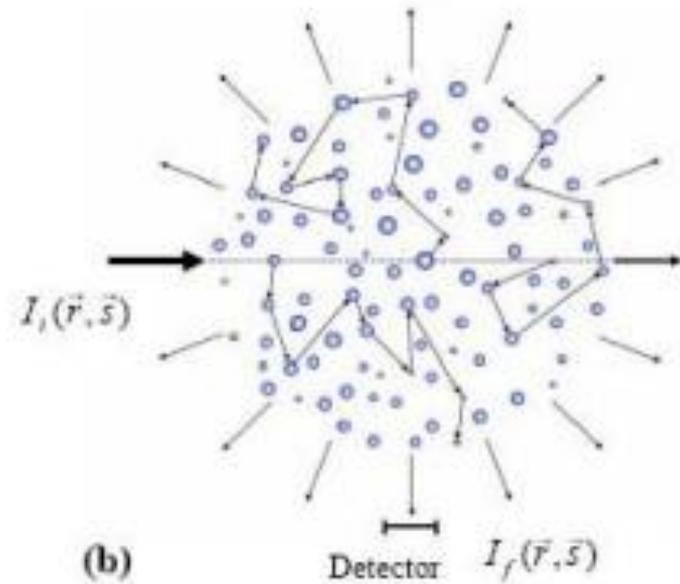
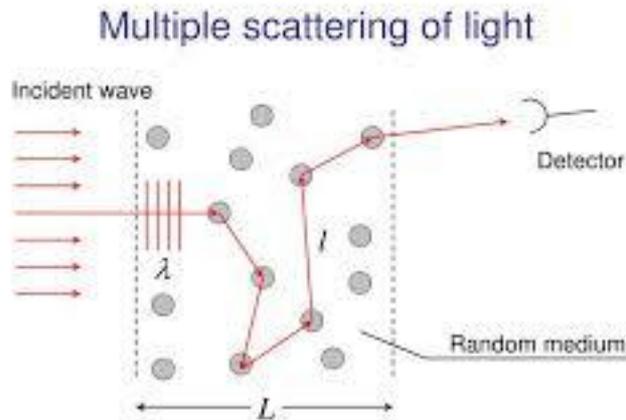
Fig. 4.12 Schematic showing the angular distribution of the radiation at visible ($0.5 \mu\text{m}$) wavelength scattered by spherical particles with radii of (a) $10^{-4} \mu\text{m}$, (b) $0.1 \mu\text{m}$, and (c) $1 \mu\text{m}$. The forward scattering for the $1\text{-}\mu\text{m}$ aerosol is extremely large and is scaled for presentation purposes. [Adapted from K. N. Liou, *An Introduction to Atmospheric Radiation*, Academic Press, p. 7, Copyright (2002), with permission from Elsevier.]



Particle size	$d = 0.7 \mu\text{m}$	$d = 15 \mu\text{m}$
Wavelength: λ [nm]	800	800
Refractive index particles: n_p	1.58+0.0i	1.58+0.0i
Refractive index medium: n_m	1.33+0.0i	1.33+0.0i
Anisotropy factor: g	0.845	0.920
Extinction cross-section: σ_e [mm^2]	$3.390 \cdot 10^{-7}$	$4.006 \cdot 10^{-4}$
Number density at OD 10: N [$\#/\text{mm}^3$]	$2.950 \cdot 10^6$	2496
Number density at OD 14: N [$\#/\text{mm}^3$]	$4.130 \cdot 10^6$	3494
Scattering parameter: $X = (\pi \cdot d / \lambda)$	2.75	58.9

Interacción con radiación: Dispersión múltiple

Es la dispersión resultante de la interacción con una “población” de partículas en suspensión.



Forzamiento del clima:

Conceptos generales

- El clima del planeta Tierra es el resultado de procesos radiativos, en la atmósfera, océanos, tierra sólida y biósfera.
- Un CAMBIO tanto en la radiación solar (UV y visible) como en la radiación térmica (IR) lleva al balance radiativo del planeta a encontrar un nuevo equilibrio.

Transmisión de radiación monocromática en la atmósfera

$$I_{\lambda}(z) = I_{\lambda}(tope) e^{-\tau_{\lambda} \sec \theta}$$

Espesor óptico:

$$\tau_{\lambda} = \int_0^{\infty} k_{\lambda} \rho r dz$$

ρ : densidad del aire

k_{λ} = eficiencia de extinción

r : razón de mezcla del gas que absorbe (masa gas/masa aire)

θ : ángulo cenital

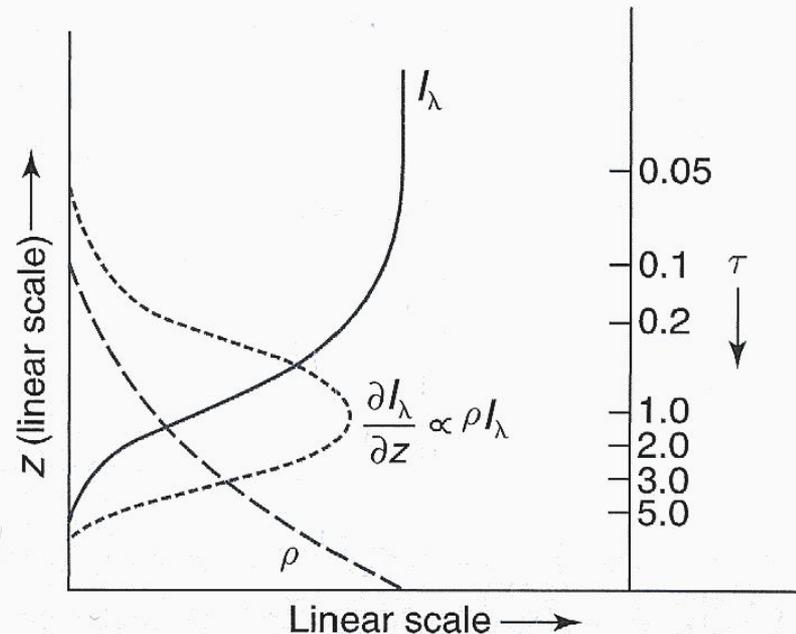


Fig. 4.23 Vertical profiles of the monochromatic intensity of incident radiation, the rate of absorption of incident radiation per unit height, air density and optical depth, for k_{λ} and r independent of height.

Balance Radiativo en el Tope de la Atmósfera

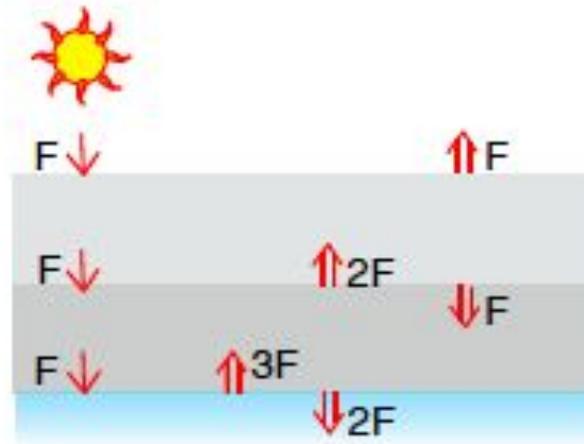


Fig. 4.9 Radiation balance for a planetary atmosphere that is transparent to solar radiation and consists of two isothermal layers that are opaque to planetary radiation. Thin downward arrows represent the flux of F units of shortwave solar radiation transmitted downward through the atmosphere. Thicker arrows represent the emission of longwave radiation from the surface of the planet and from each of the layers. For radiative equilibrium the net radiation passing through the Earth's surface and the top of each of the layers must be equal to zero.

Extinción de radiación solar por aerosol atmosférico



August 8, 1991

Fig. 4.36 In these views of the limb of the Earth from space, the upper atmosphere shows up blue, while the lower atmosphere exhibits an orange hue. The lower photo, taken 2 months after the eruption of Mt. Pinatubo, shows layers of sulfate aerosols in the lower stratosphere. [Photographs courtesy of NASA.]

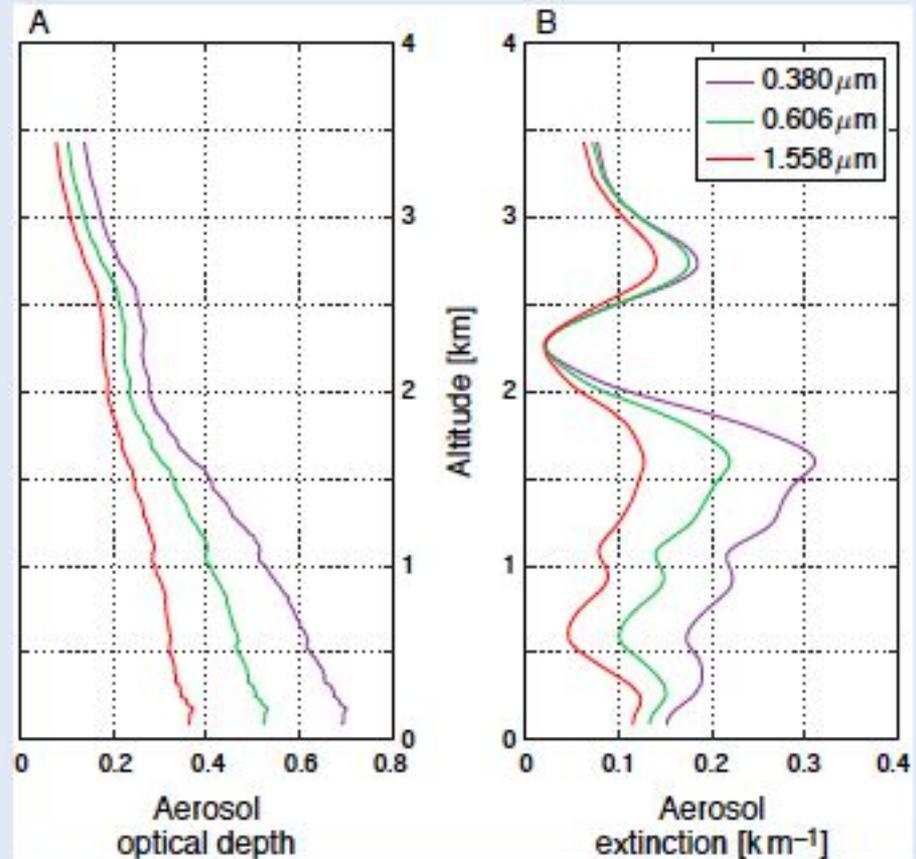


Fig. 4.25 Aerosol optical depth and aerosol extinction coefficient measured with an airborne sunphotometer south of Korea. The enhanced extinction coefficients between ~ 2.5 – 3 km were due to dust from Asia. [Courtesy of Gregory Schmidt, NASA-Ames Research Center.]

Interacción con radiación: Dispersión múltiple

- Coeficiente de dispersión (depende de la distribución de tamaño de partículas)
- Coeficiente de absorción (depende de la parte imaginaria del índice de refracción)
- Albedo de dispersión simple (“*single scattering albedo*”): $C_{\text{scat}} / (C_{\text{scat}} + C_{\text{abs}})$
- Factor de asimetría

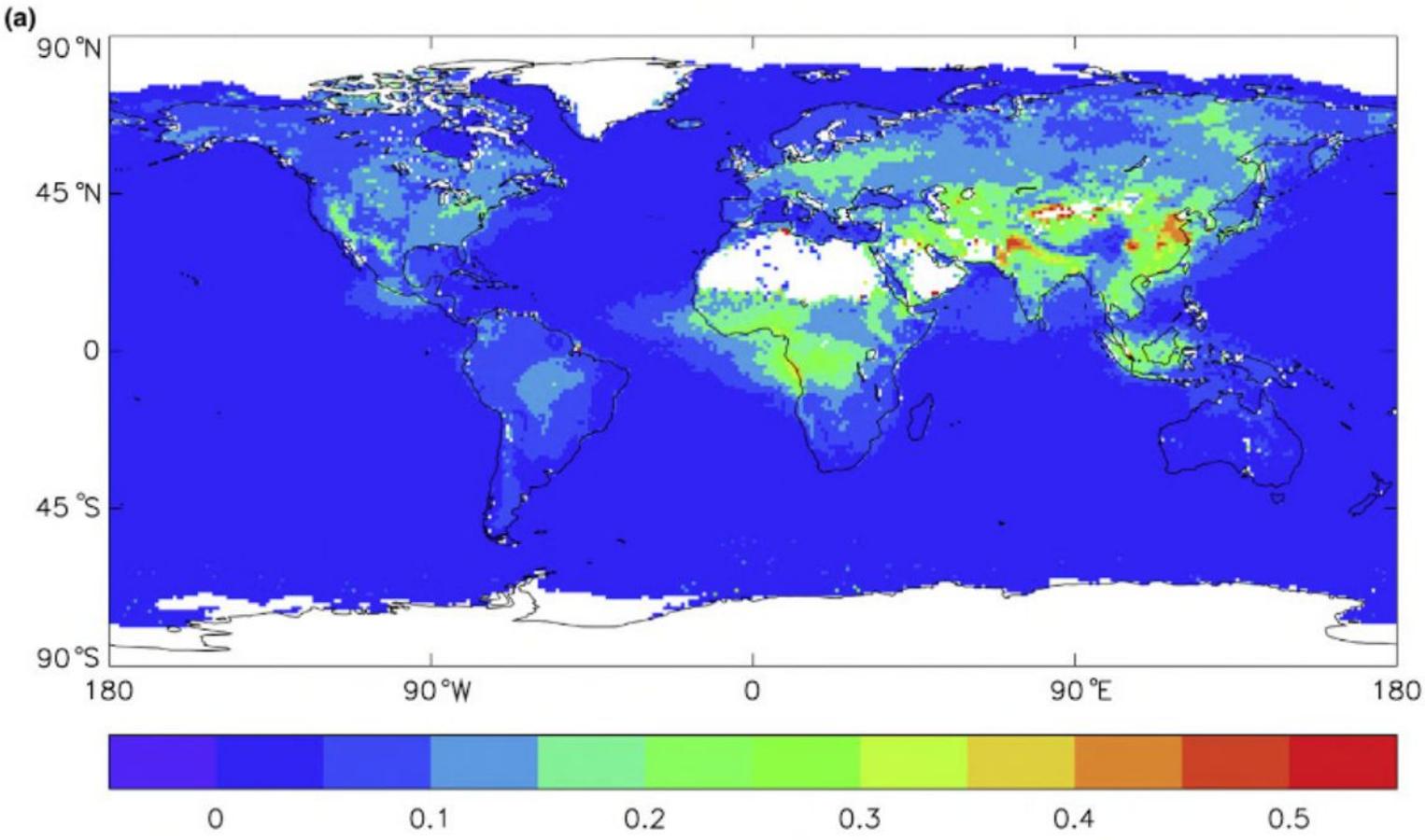
Se estiman:



el espesor óptico

la transferencia radiativa.

Aerosol optical depth (0.55 μ m) (column measurement)



Shortwave direct radiative forcing

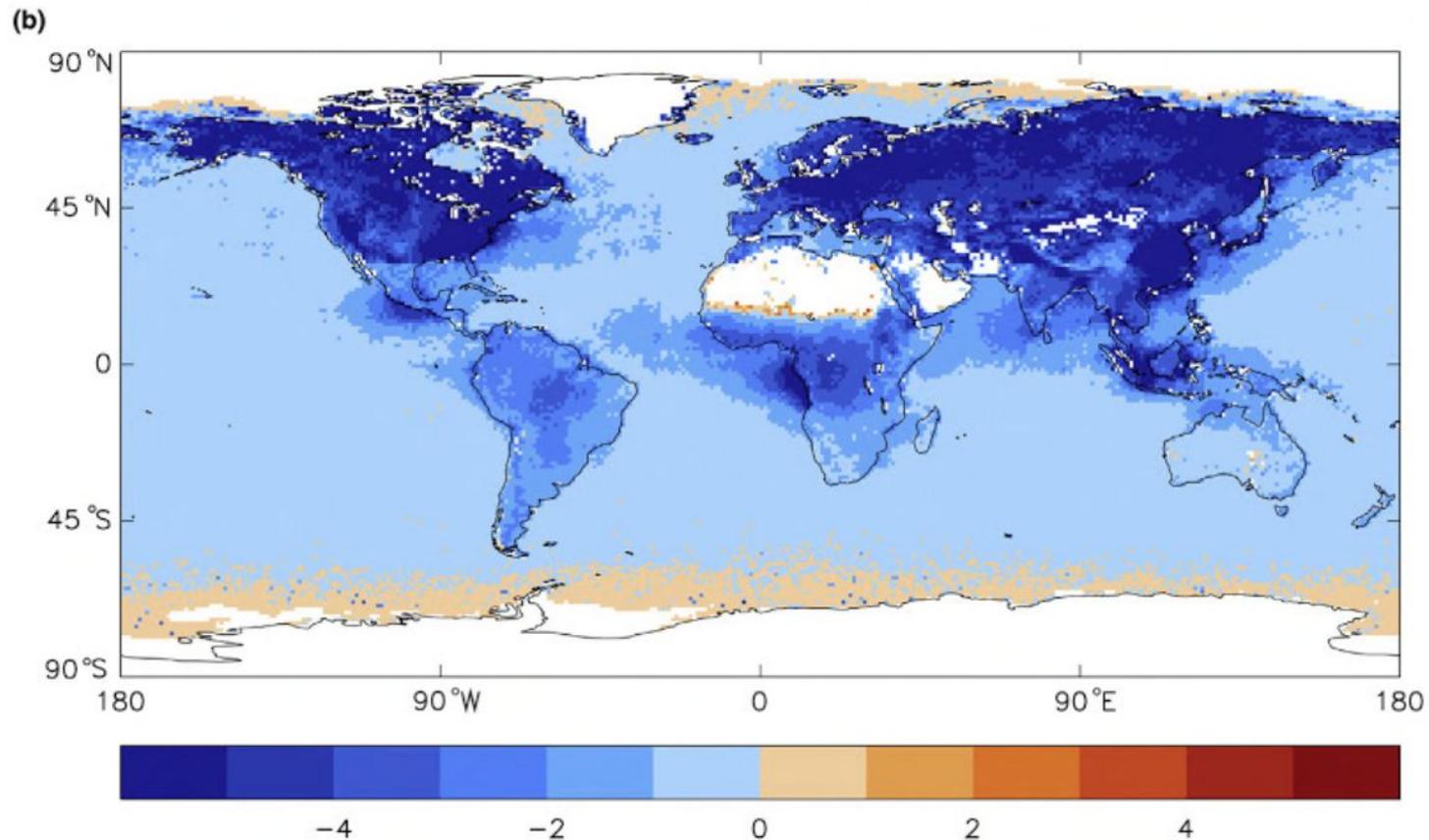
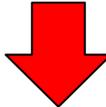


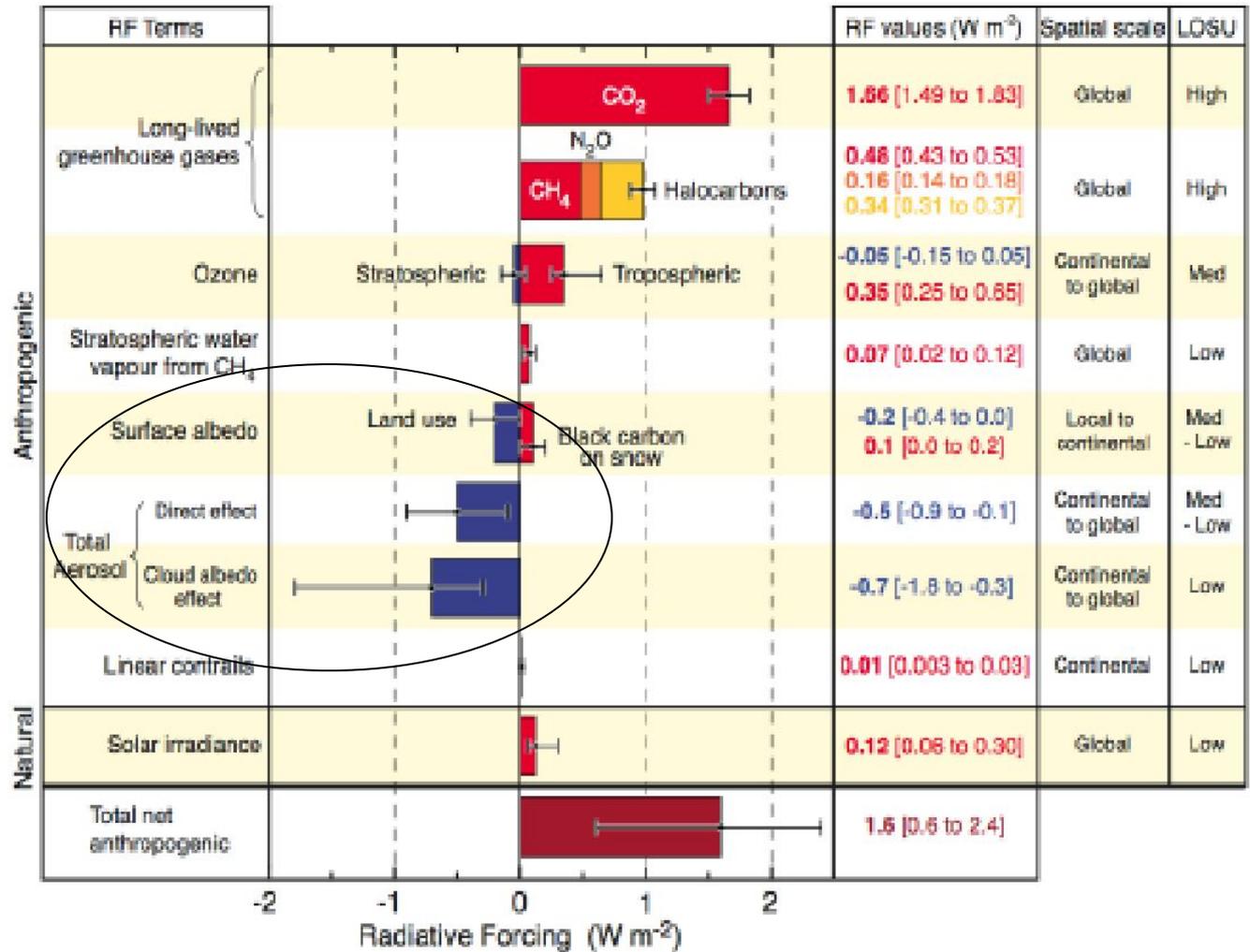
Figure 4 Distributions of (a) aerosol optical depth at $0.55 \mu\text{m}$ and (b) shortwave direct radiative forcing (DRF) from a portion of fine-mode aerosols. Distributions are derived from MODIS collection 5 and represent annual means for 2002. White indicates areas without data. Reprinted from Bellouin, N., Jones, A., Haywood, J., Christopher, S., 2008. Updated estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite observations and comparison against the Hadley Centre climate model. *Journal of Geophysical Research* 113. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD009385>.

Forzamiento radiativo: Gases, Partículas y superficie

Positivo

 Calentamiento

Negativo

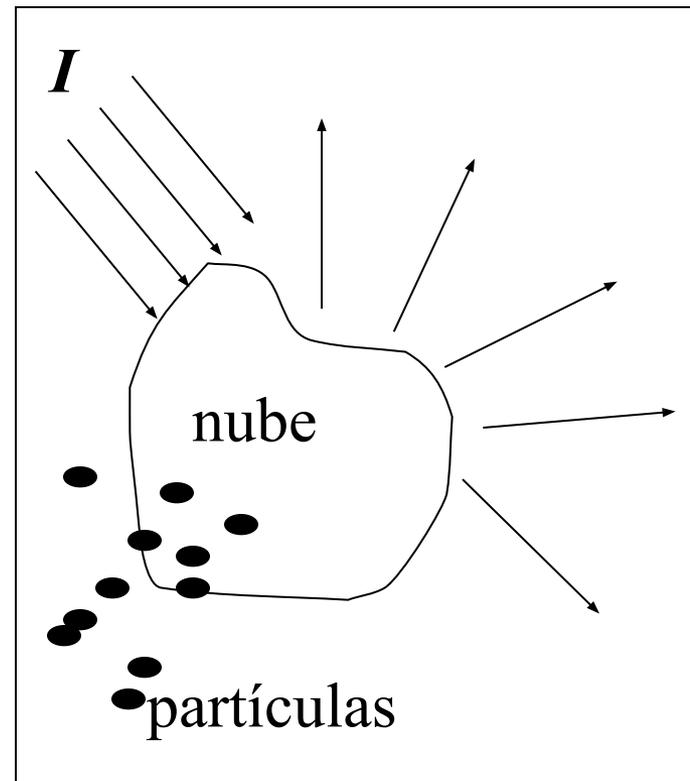
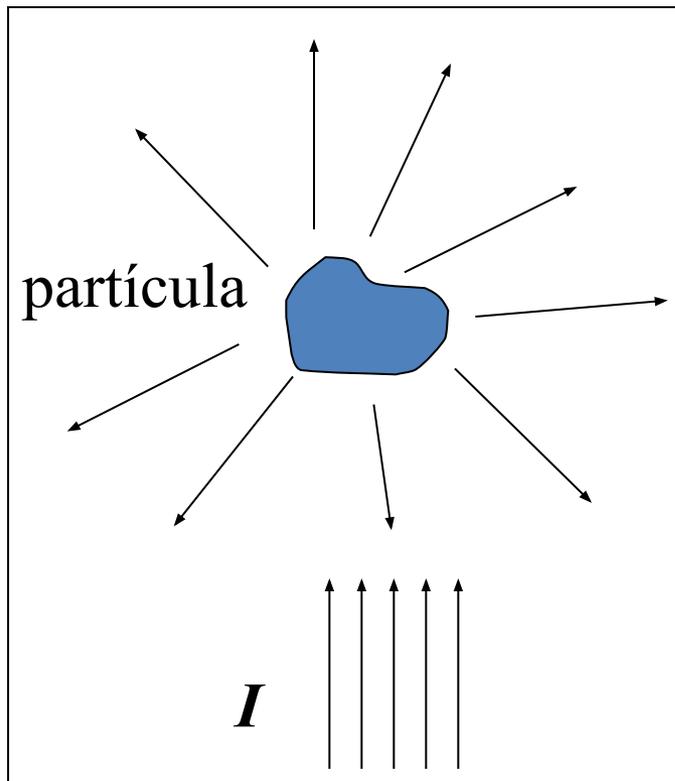
 Enfriamiento



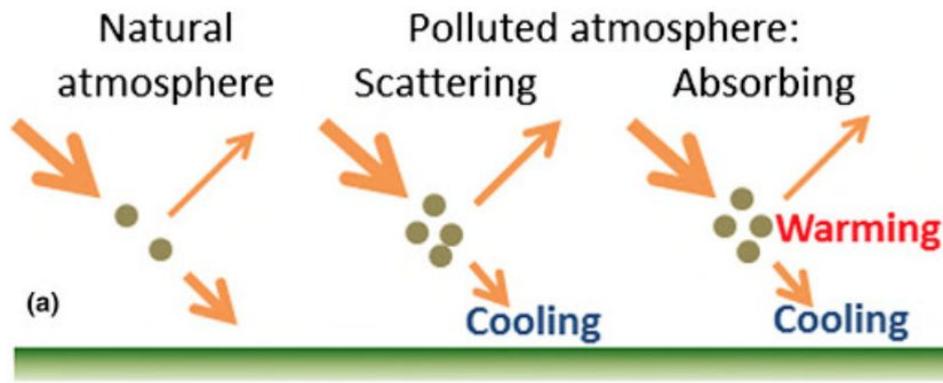
©IPCC 2007: WG1-AR4

Forzamiento del clima

- Las partículas de aerosol atmosférico pueden ejercer un forzamiento **directo** y un forzamiento **indirecto** sobre el clima



Direct effect



Indirect effect

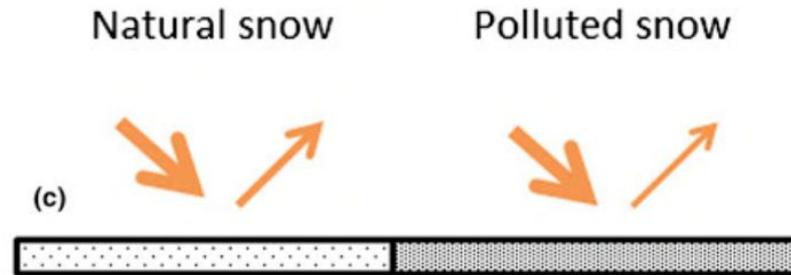
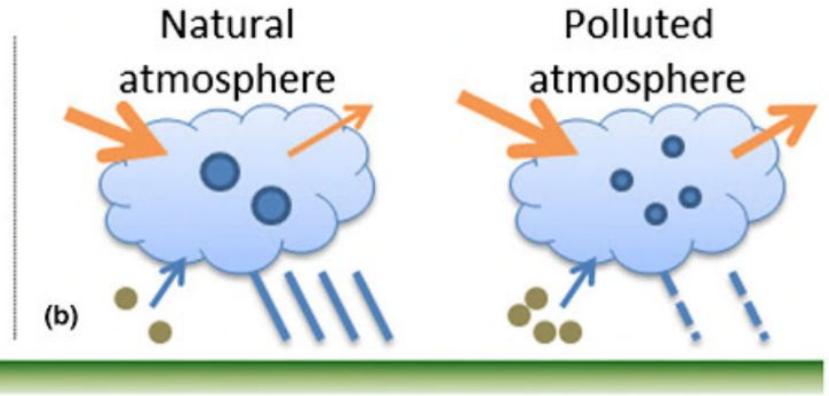


Figure 3 Mechanisms of aerosol RF and fast adjustments. (a) Compared to a natural atmosphere, anthropogenic aerosols (brown circles) scatter and absorb additional solar radiation (orange arrows), reflecting energy back to space or absorbing it in this atmosphere, cooling the surface locally, and warming the aerosol layer for absorption aerosols. The new vertical temperature gradient then affects atmospheric stability and cloud formation. (b) Compared to a natural atmosphere, anthropogenic aerosols provide additional cloud condensation nuclei, leading to the formation of more, smaller cloud droplets. More droplets reflect more solar radiation back to space. Smaller droplets may not easily form large raindrops, potentially decreasing precipitation and increasing cloud lifetime. (c) Deposition of anthropogenic aerosols onto ice and snow surfaces decreases their albedo.

Albedo reduction due to BC deposited on snow

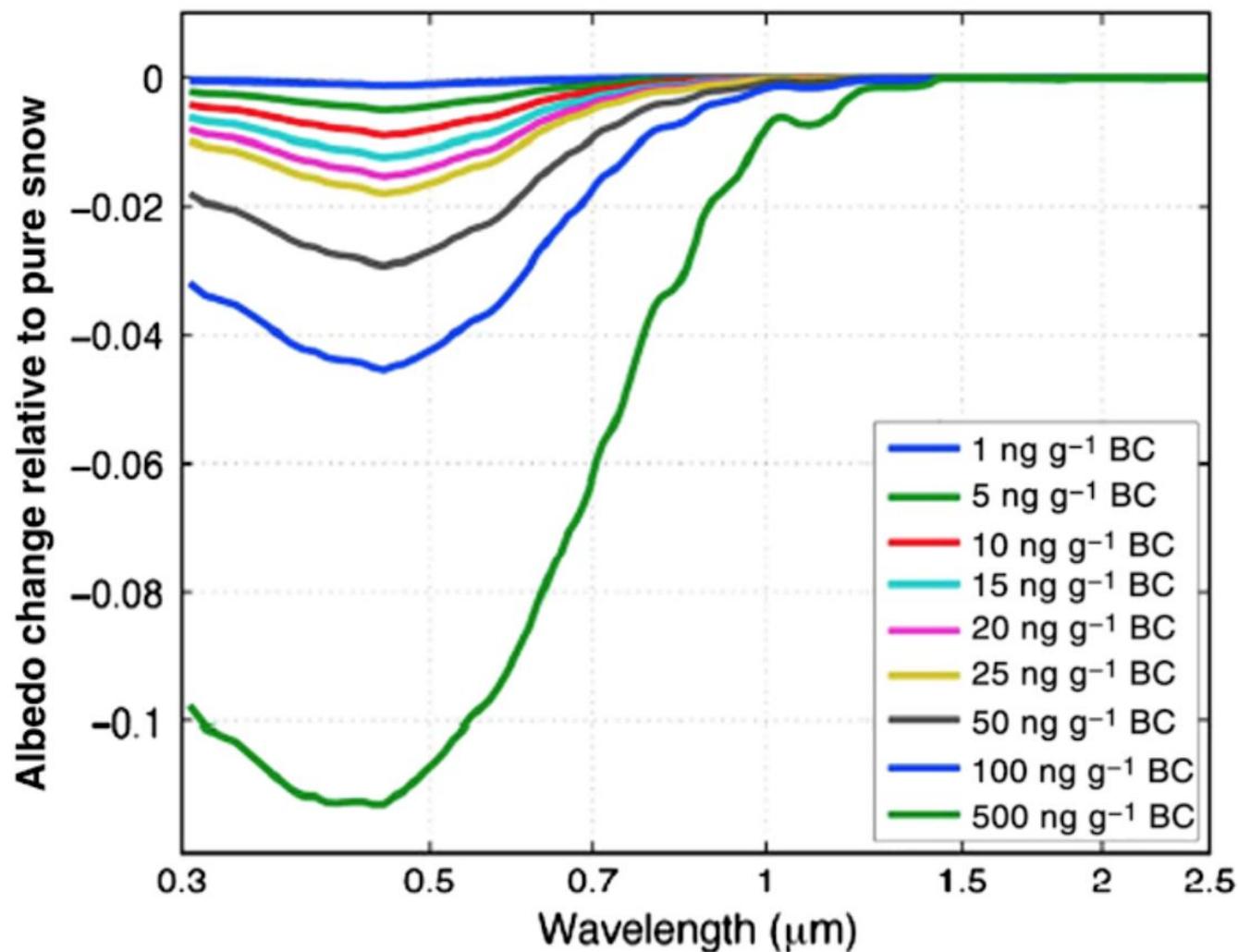
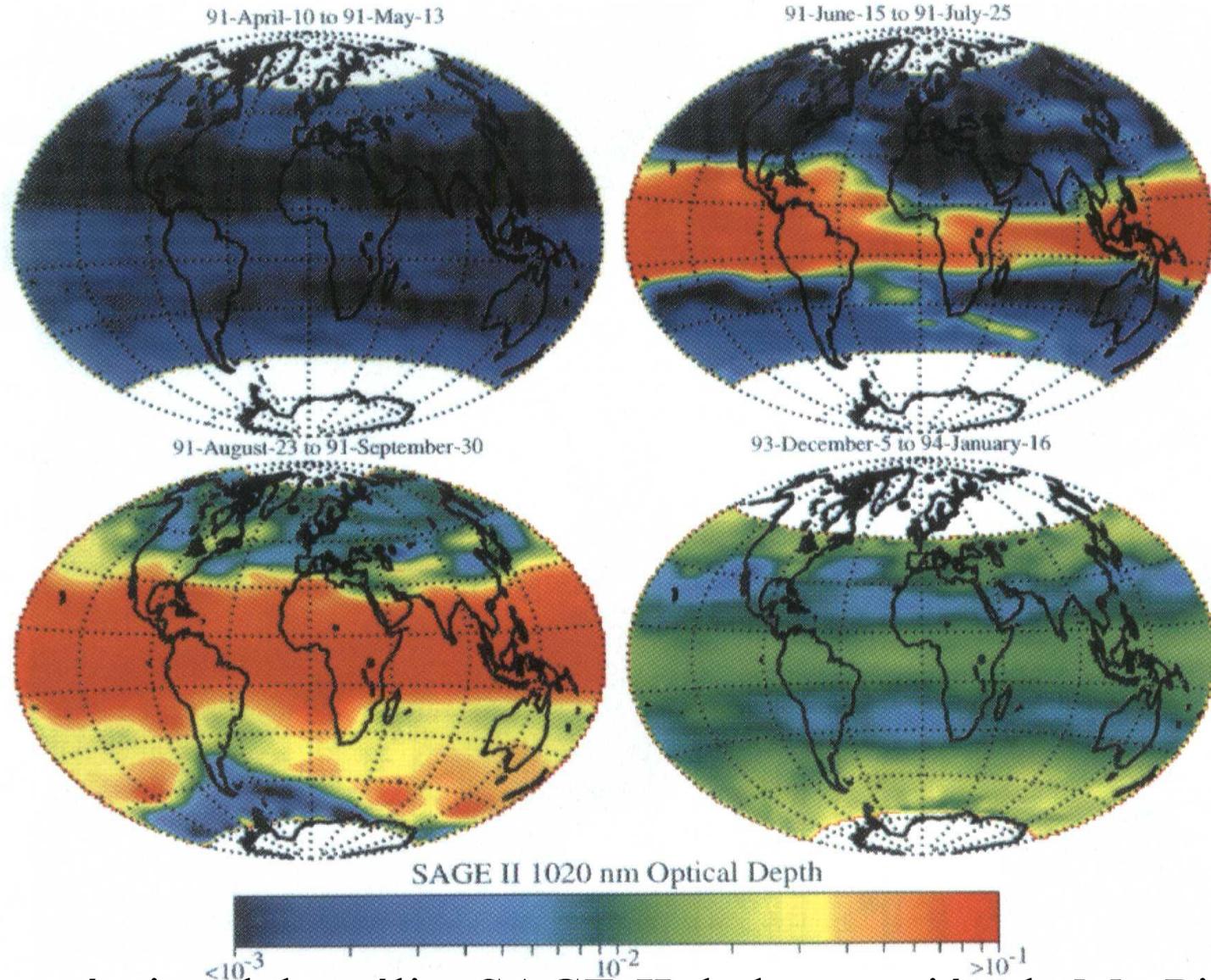


Figure 6 The reduction in wavelength-dependent snow albedo caused by increasing concentrations of black carbon aerosols in snow, for a snowpack with effective grain size of 200 μm. Figure 27, Bond, T.C., Doherty S.J., Fahey D.W. et al., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. *Journal of Geophysical Research* 118, 5380–5552. doi:10.1002/jgrd.50171.

Forzamiento: Pluma del volcan Pinatubo



Espesor óptico del satélite SAGE-II de la erupción de Mt. Pinatubo

Forzamiento: Efecto directo

- Las partículas de aerosol atmosférico relevantes para el forzamiento climático tienen tamaños de alrededor de **$1 \mu m$** y tienen poca absorción en longitud de onda visible.
- Por lo tanto, el efecto esperado es el de un enfriamiento del sistema tierra-atmósfera, debido a la retrodispersión de radiación solar de vuelta al espacio (es decir, un incremento ***neto*** del albedo planetario)

Forzamiento: Efecto directo

- Partículas que absorben radiación visible (tales como el hollín y las partículas minerales e.g. polvo del desierto) pueden resultar en un calentamiento.
- Asimismo, para realizar una estimación adecuada del efecto directo, es necesario considerar absorción y emisión en longitudes de onda infrarrojas, que tienen una contribución menor al efecto invernadero pero que no puede ser despreciada.

¿Qué se requiere para poder estimar el efecto directo?

- Las constantes ópticas (albedo de dispersión simple y factor de asimetría) en función de la longitud de onda
- La composición química (índice de refracción compleja), morfología, y distribución de tamaños y distribución espacial
- Un modelo adecuado (e.g. Mie) para estimar los parámetros radiativos en función de la longitud de onda.
- Un modelo transferencia radiativa detallada, en un de circulación general de la atmósfera y con océanos acoplados.

Forzamiento: Efecto directo

Parámetros radiativos dependen de longitud de

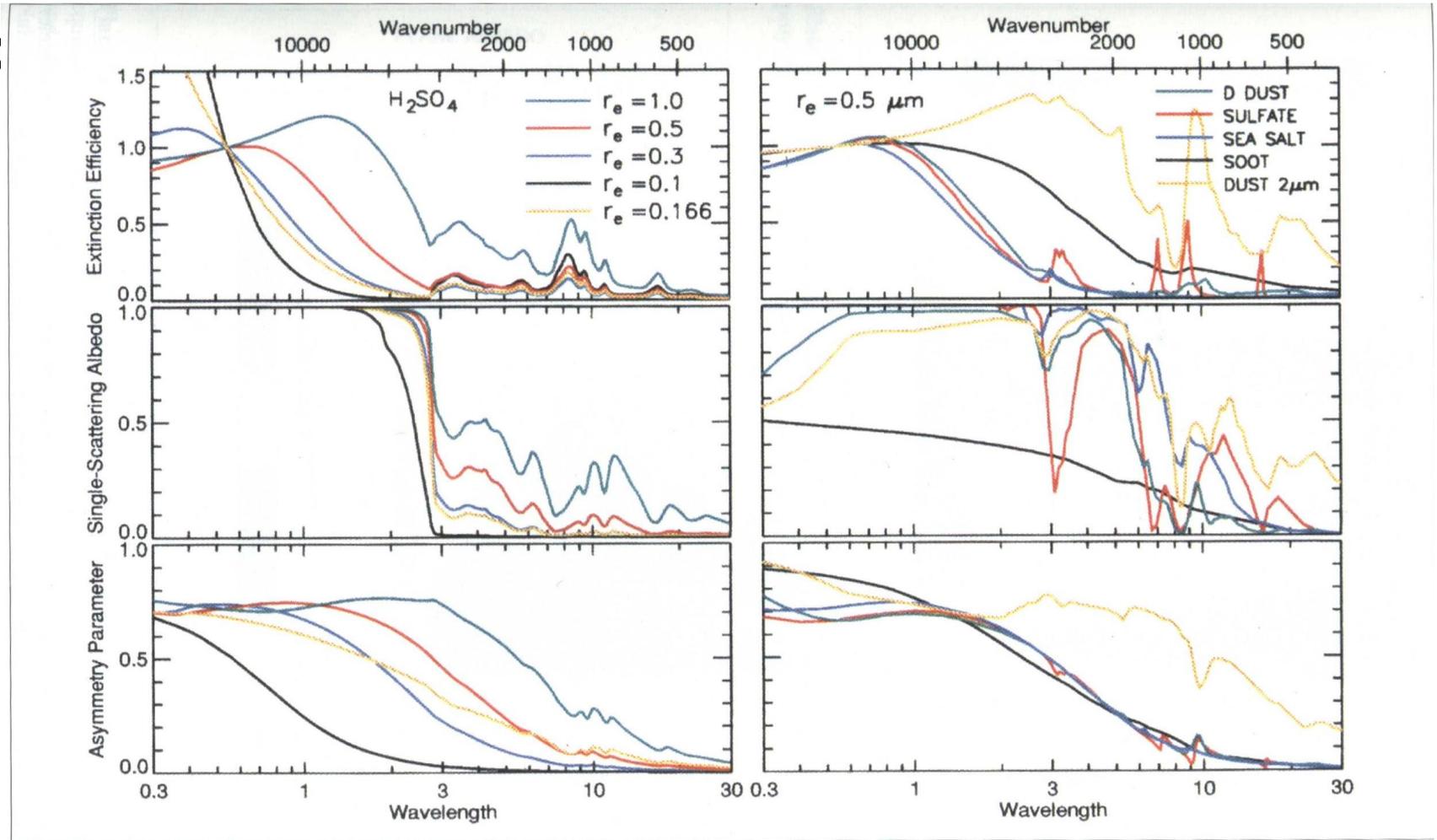


Plate 2.1 Mie-scattering calculated radiative parameters for H_2SO_4 (left) and representative tropospheric aerosols (right).

Forzamiento: Efecto directo

Ejemplo de coeficiente de extinción para
550nm



r_{eff}	Q_{ext}
1.0	2.522
0.5	3.014
0.3	2.716
0.166	1.162
0.1	0.409

$r_{\text{eff}} = 0.5\mu\text{m}$	Q_{ext}
Polvo desierto	2.931
Sulfato	2.969
Sal marina	3.016
Hollín	2.523
Polvo 2 μm	2.280

r_{eff} : radio efectivo

Forzamiento: Cuantificación

- El objetivo es encontrar una medida simple del cambio de flujo radiativo en respuesta a una perturbación climática que pueda vincularse con un eventual cambio en la temperatura global en superficie
- Se define como ***forzamiento instantáneo*** al cambio de flujo neto a nivel de la tropopausa en respuesta a una perturbación, calculado en base a una estructura atmosférica fija

Forzamiento: Cuantificación

- El objetivo es encontrar una medida simple del cambio de flujo radiativo en respuesta a una perturbación climática que pueda vincularse con un eventual cambio en la temperatura global en superficie
- Se define como ***forzamiento instantáneo*** al cambio de flujo neto a nivel de la tropopausa en respuesta a una perturbación, calculado en base a una estructura atmosférica fija

Forzamiento: Cuantificación

- Se define como ***forzamiento ajustado*** al cambio de flujo neto a nivel de la tropopausa en respuesta a una perturbación, una vez que se permite que la temperatura estratosférica alcance un nuevo equilibrio. Esta es una definición mejor, pero aún así no contempla efectos de retroalimentación en el sistema (tales como el derretimiento de hielo o un incremento en el contenido de vapor de agua)

Forzamiento: Cuantificación

Estimaciones para $\Delta\tau = 0.1$ en aerosol

H_2SO_4	ΔF_{sol}	ΔF_{IR}	$\Delta F^{\circ}_{\text{IR}}$
$R_{\text{eff}} = 1.0 \mu\text{m}$	-5.60	2.19	1.76
$R_{\text{eff}} = 0.5 \mu\text{m}$	-4.21	0.91	0.69
$R_{\text{eff}} = 0.3 \mu\text{m}$	-3.32	0.62	0.45
$R_{\text{eff}} = 0.1 \mu\text{m}$	-4.08	1.20	0.96

ΔF_{sol} y ΔF_{IR} corresponden al **forzamiento ajustado** global
 $\Delta F^{\circ}_{\text{IR}}$ corresponde al **forzamiento instáneo**
(flujos en Wm^{-2})

Forzamiento: Cuantificación

Estimaciones para $\Delta\tau = 0.1$ en aerosol

$R_{\text{eff}} = 0.5\mu\text{m}$	ΔF_{sol}	ΔF_{IR}	$\Delta F^{\circ}_{\text{IR}}$
Polvo del desierto	-2.61	0.05	0.08
Sulfato	-3.59	0.06	0.10
Sal marina	-3.05	-0.03	0.01
Hollín	6.62	0.28	0.19

ΔF_{sol} y ΔF_{IR} corresponden al **forzamiento ajustado** global
 $\Delta F^{\circ}_{\text{IR}}$ corresponde al **forzamiento instáneo**
(flujos en Wm^{-2})

Forzamiento: Cuantificación

Estimaciones para $\Delta\tau = 0.1$ en aerosol

	ΔF_{sol}	ΔF_{IR}	$\Delta F^{\circ}_{\text{IR}}$
Polvo del desierto ($R_{\text{eff}} = 2\mu\text{m}$, 0-3km)	-0.22	0.47	0.47
($R_{\text{eff}} = 2\mu\text{m}$, 0-6km)	0.68	1.33	1.35
H₂SO₄ ($R_{\text{eff}} = 0.166\mu\text{m}$, 0-1km)	-2.70	-0.33	0.02

ΔF_{sol} y ΔF_{IR} corresponden al **forzamiento ajustado** global
 $\Delta F^{\circ}_{\text{IR}}$ corresponde al **forzamiento instáneo**
(flujos en Wm^{-2})

Resumen Efecto directo

- Las propiedades radiativas del aerosol atmosférico varían con la distribución de tamaño, la composición y el espesor óptico, así como con la longitud de onda.
- Esto lleva a incertidumbres en la estimación del efecto directo en el clima, que han ido disminuyendo con el tiempo debido a mejores mediciones y mayor resolución en los modelos, mejores inventarios, tasas de emisión y de transformación en la atmosfera.

Efecto indirecto de aerosol atmosférico

Partículas y nubes

**Qué hace falta
para que se forme
una nube?**



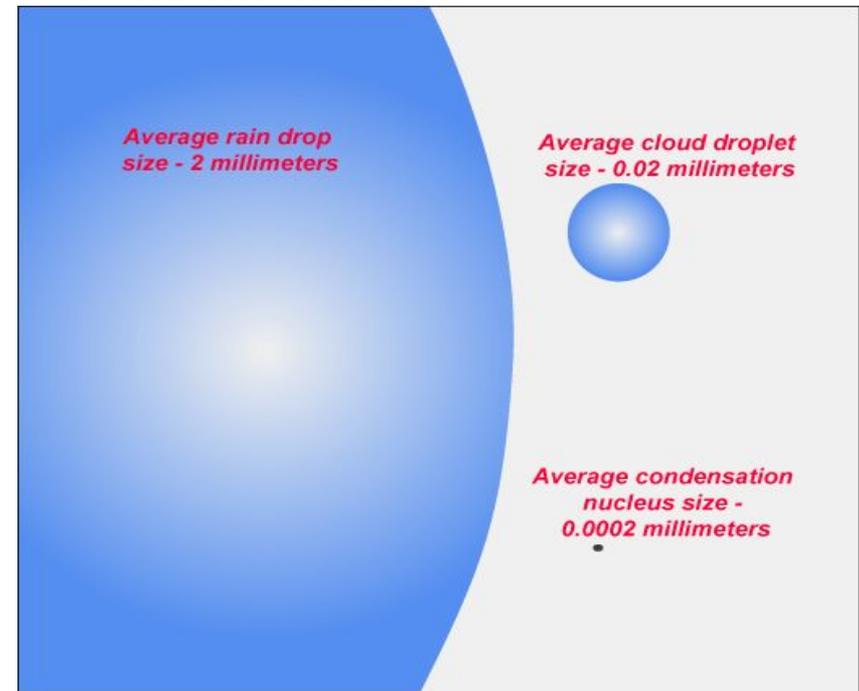
- Movimiento ascendente (diferentes mecanismos de ascenso)
- Núcleos de condensación de nube
- Vapor de agua para alcanzar el estado de saturación y superarlo

Núcleos de condensación de nube (CCN)

Partículas de aerosol atmosférico que proporcionan una superficie para la formación de las gotitas de nube. Sus diámetros varían entre $0.0001 \mu\text{m}$ (núcleos de Aitken) y $10 \mu\text{m}$ (aerosoles gigantes). Sus concentraciones llegan hasta 10 millones de partículas por cm^3 .

Están compuestos de sustancias higroscópicas como nitratos, sulfatos, cloruros, compuestos orgánicos, minerales y otros.

Las fuentes de los núcleos de condensación son muy diversas, desde partículas de sal generadas por el rompimiento de las olas en los océanos o polvo levantado por el viento hasta procesos de combustión (menor tamaño)

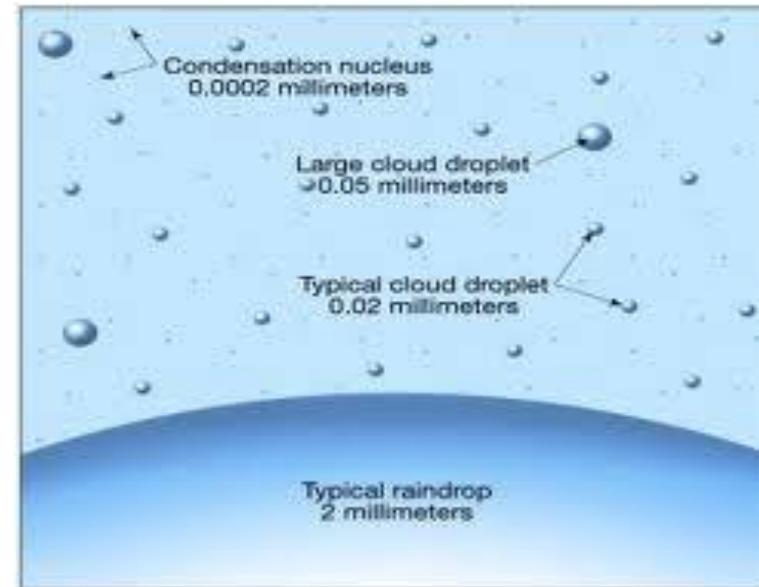


Los CCN son las semillas de las gotitas de nubes

Es decir que las nubes y la lluvia en la Tierra existen gracias a las partículas de aerosol que actúan como núcleos de condensación

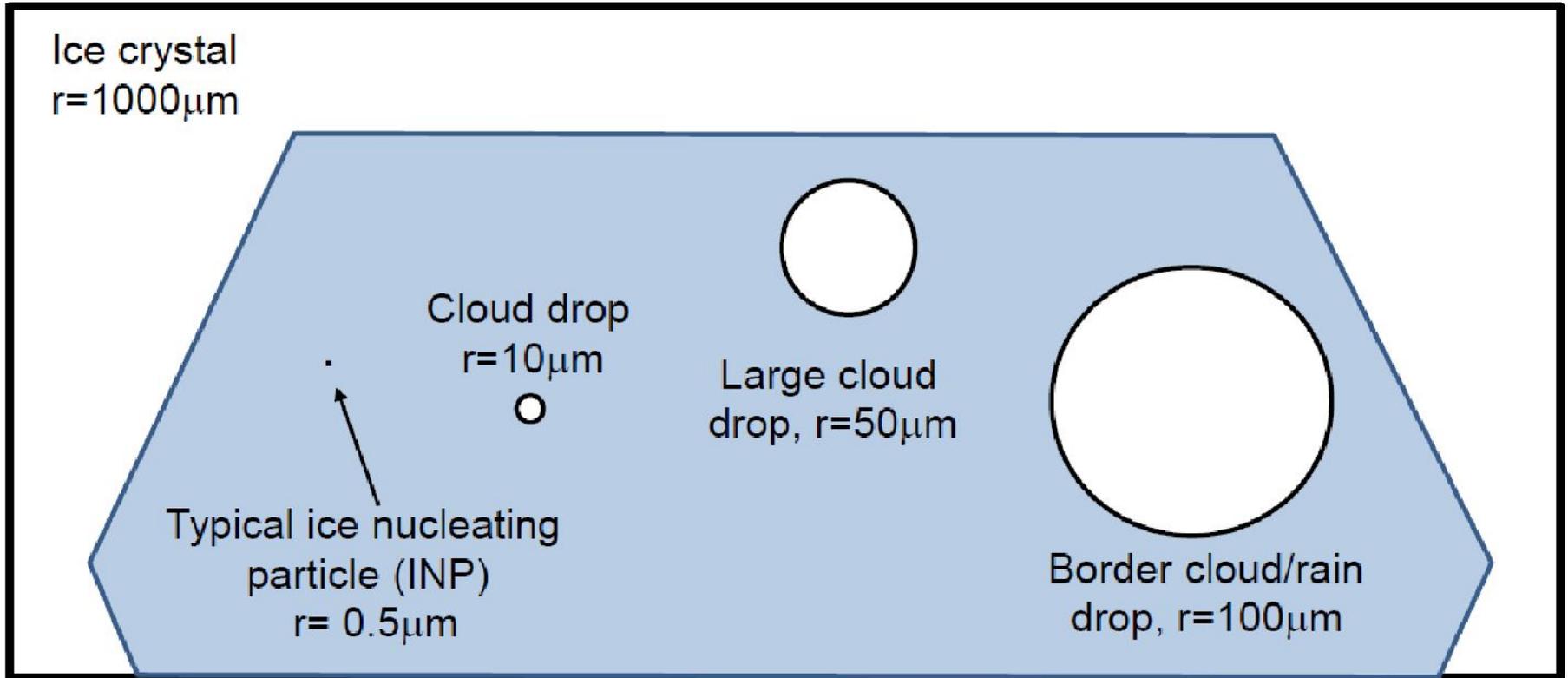
Nucleación heterogénea:

Es el proceso de formación de gotas sobre los núcleos de condensación en condiciones de sobre-saturación (más del 100% de humedad relativa)



Las partículas solubles (higroscópicas) facilitan la condensación ya que la presencia de un soluto disminuye la humedad necesaria para alcanzar sobre-saturación ($HR > 100\%$).

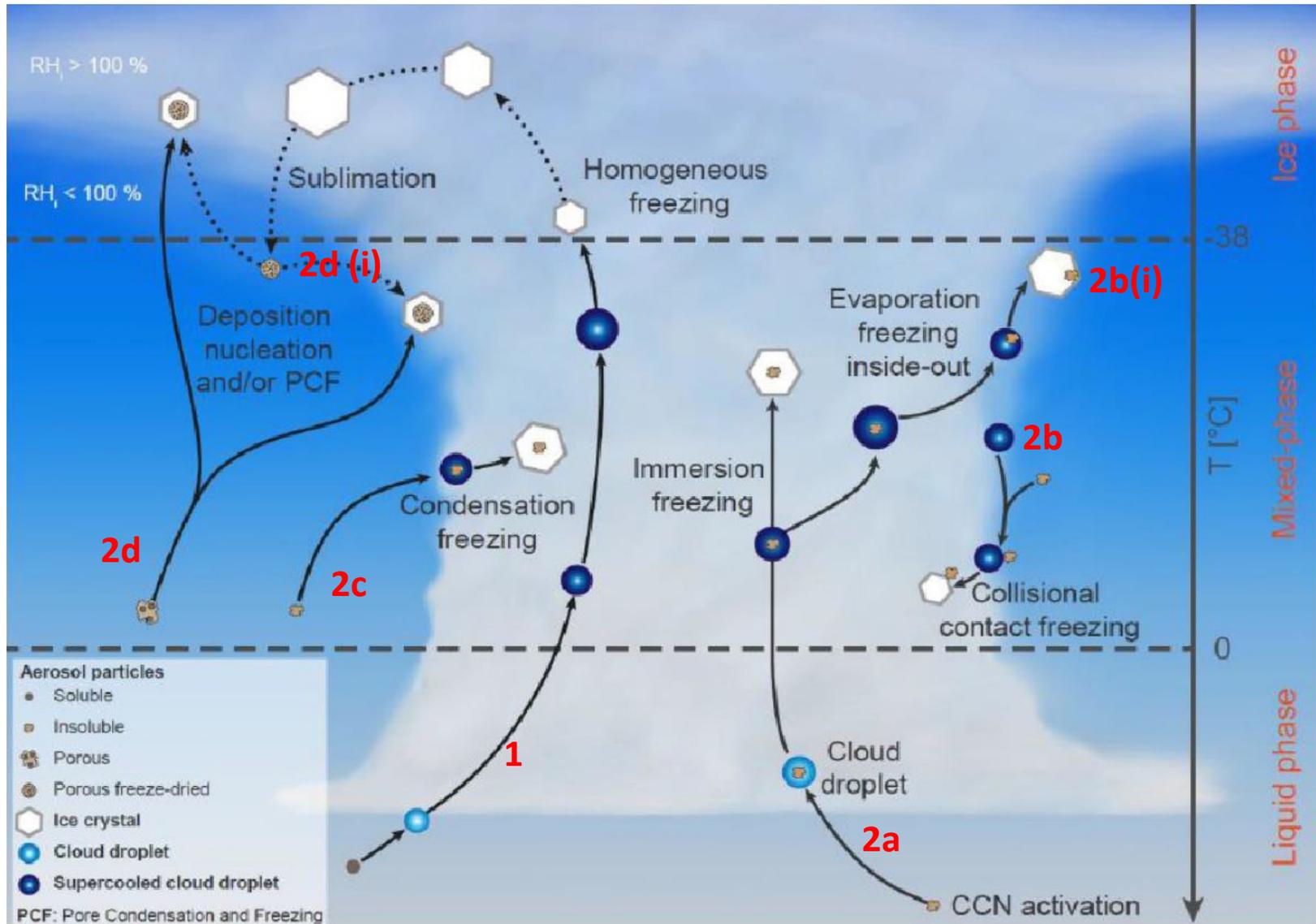
Núcleos de glaciación



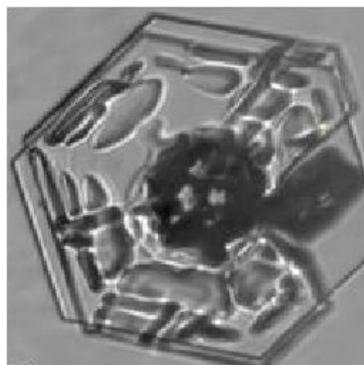
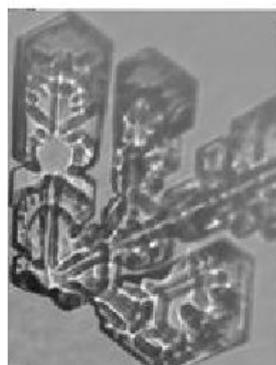
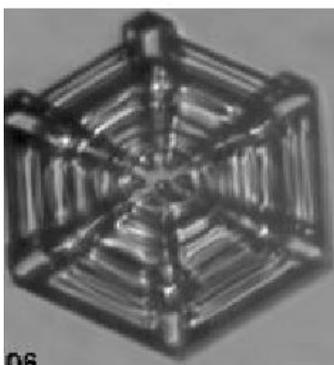
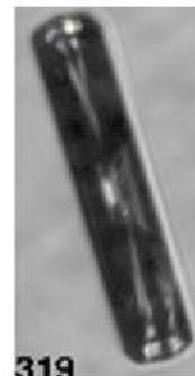
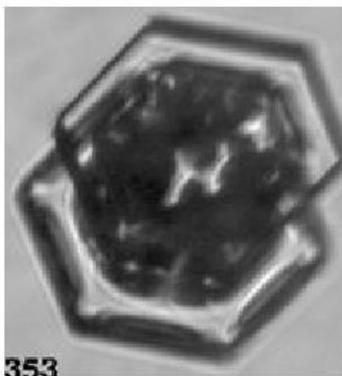
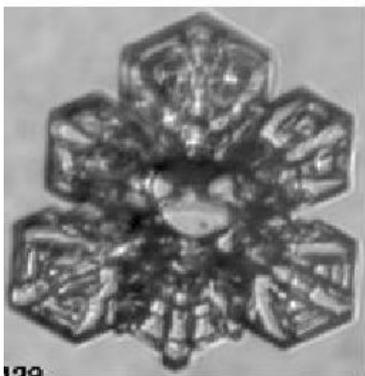
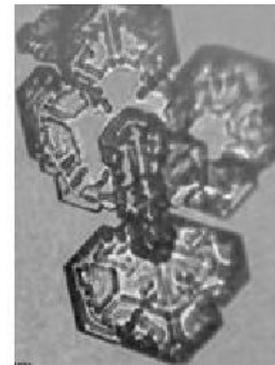
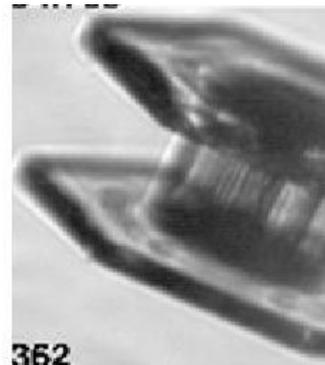
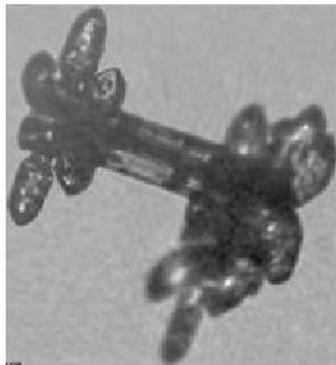
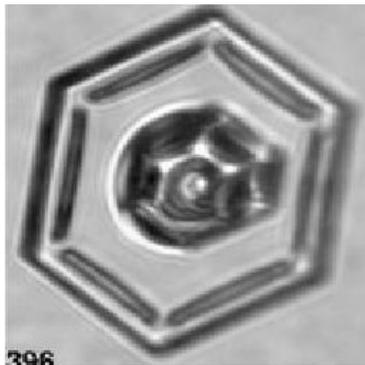
Aerosol: Partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire
Típicamente solo **1 partícula en un millón** actúa como INP

Buen INP: composición, tamaño, estado físico, etc.

Nucleación de Hielo



Cristales de Hielo



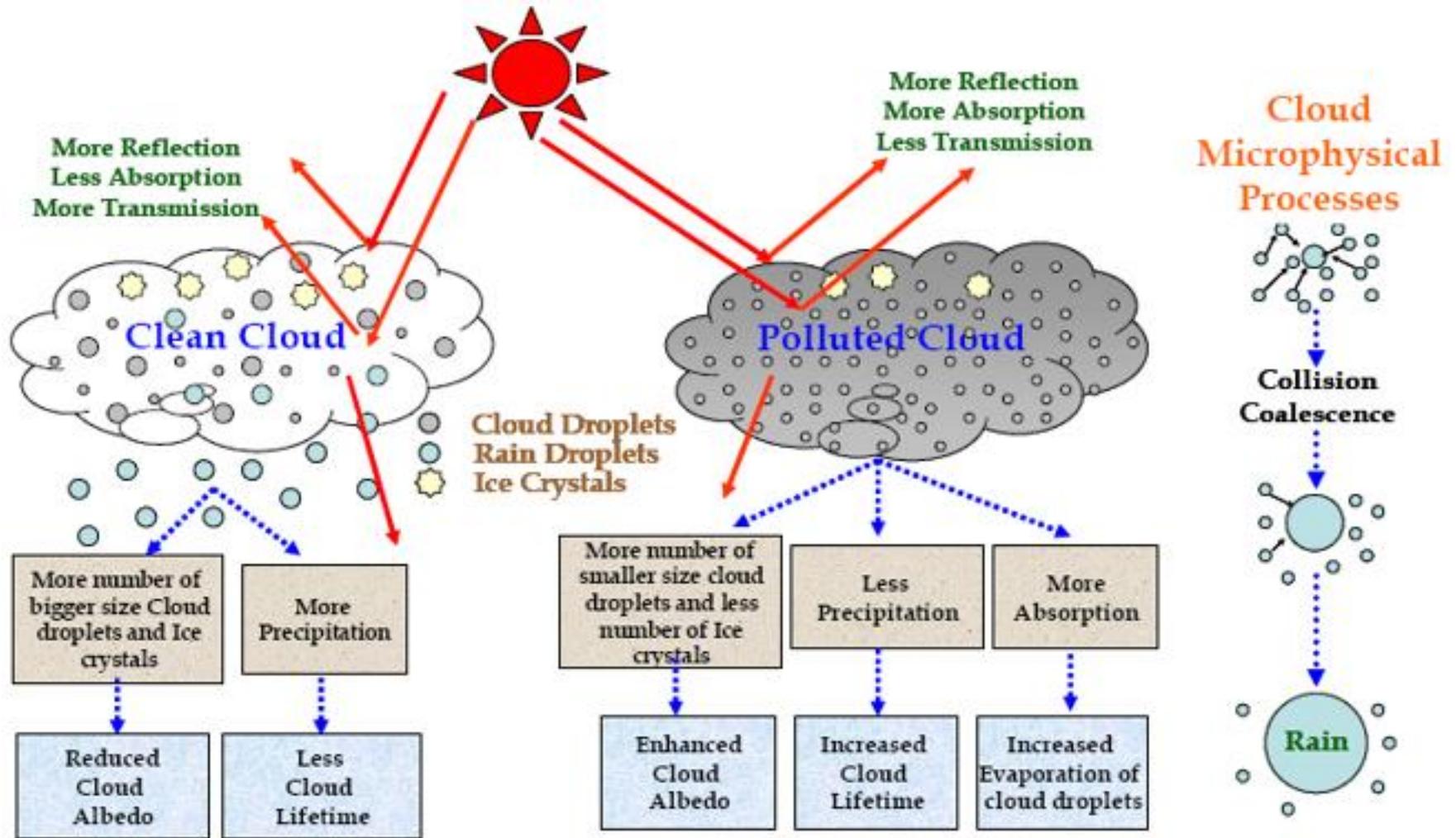
Efecto indirecto de aerosol atmosférico

- La concentración de gotas en nubes estratiformes depende directamente de los CCN presentes y de la sobresaturación (menor que 1%) que es función de la velocidad vertical.
- Tanto partículas naturales como aquellas producidas por el hombre, afectan la formación y evolución de la microfísica y también de las propiedades radiativas de las nubes.

Efecto indirecto de aerosol

- Un aumento en las fuentes antropogénicas de CCN puede llevar a un incremento en el albedo de las nubes, dado que aumenta la concentración de gotas pero se reduce el tamaño promedio de las mismas
- Este efecto se denomina el ***efecto indirecto*** de aerosoles y fue Twomey quien primero lo trajo a discusión (en 1974)

¿Qué pasa en las nubes que se forman en zonas con mayor concentración de partículas?



Efecto indirecto de aerosoles

Evidencia del
efecto indirecto:

Traectorias de buques
sobre el océano en
presencia de nubes
estratocumulus

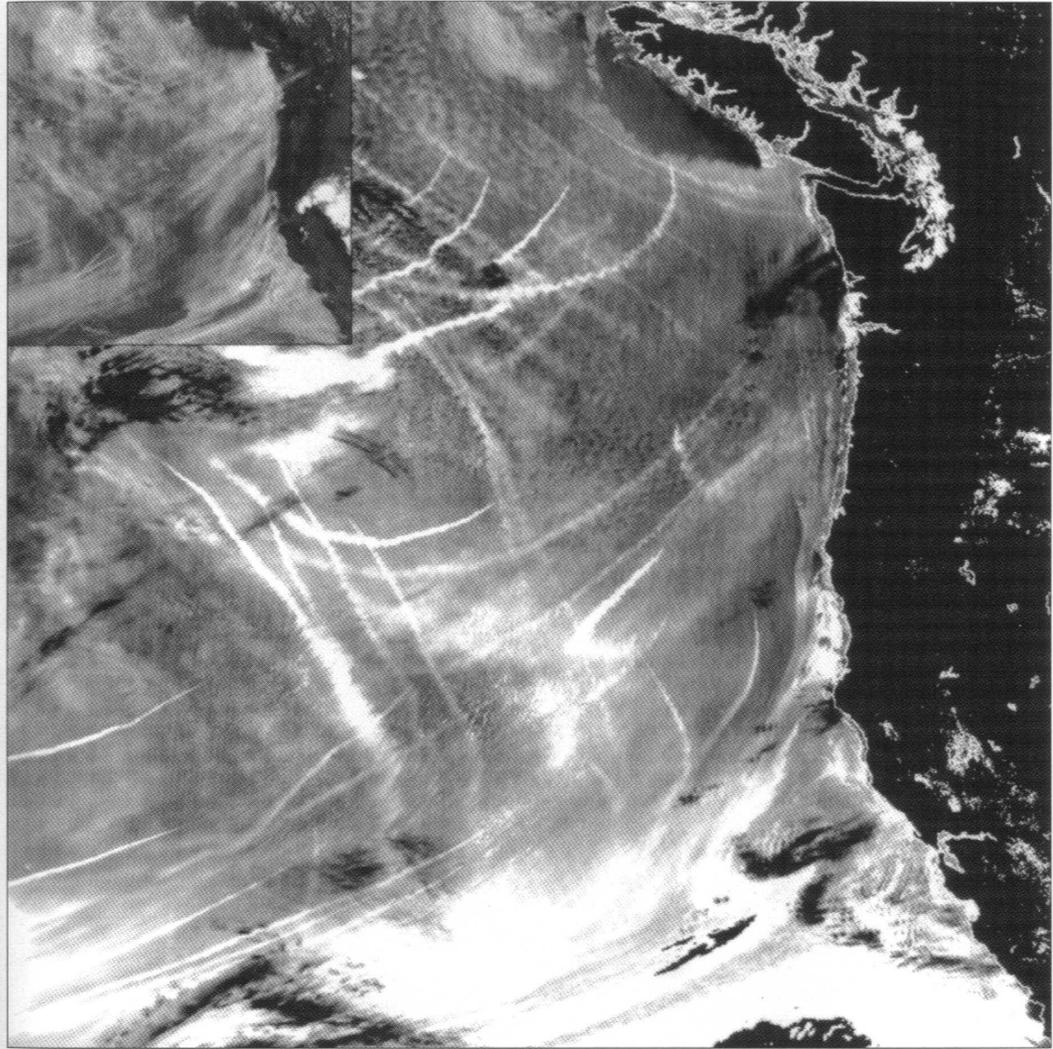


Plate 13.1 Satellite images showing an extensive stratocumulus cloud system off the West Coast of the U.S. The large image was constructed from NOAA-9 AVHRR data on June 27, 1987, at a shortwave infrared ($3.7 \mu\text{m}$) wavelength, whereas the inset was constructed from reflected solar radiation measurements at a visible ($0.63 \mu\text{m}$) wavelength. The streaks revealed at $3.7 \mu\text{m}$ are due to a reduced droplet size in clouds contaminated by the exhausts of ships.

Efecto indirecto de aerosoles

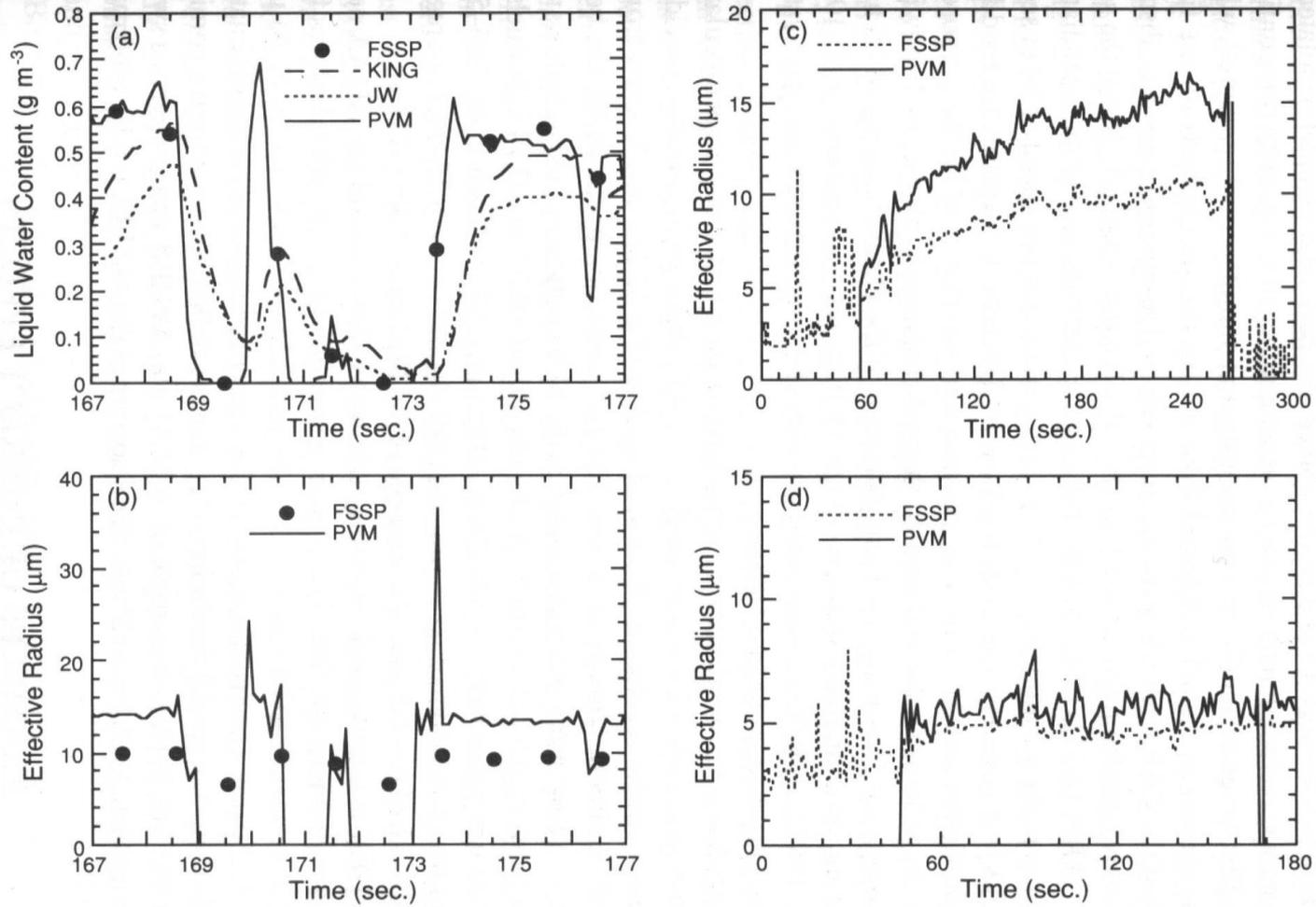
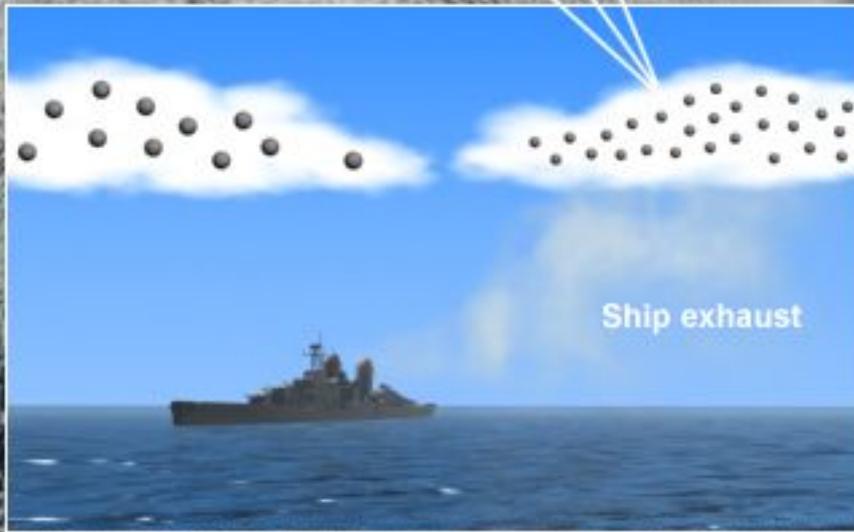


Figure 13.2 Intercomparison between the PVM-100A, FSSP-100, Johnson-Williams hot wire, and King hot wire probes for (a) liquid water content and (b) effective radius as a function of time over a broken cloud field, and (c) measurements near cloud top for 5 min of data and (d) near cloud base for 3 min of data.

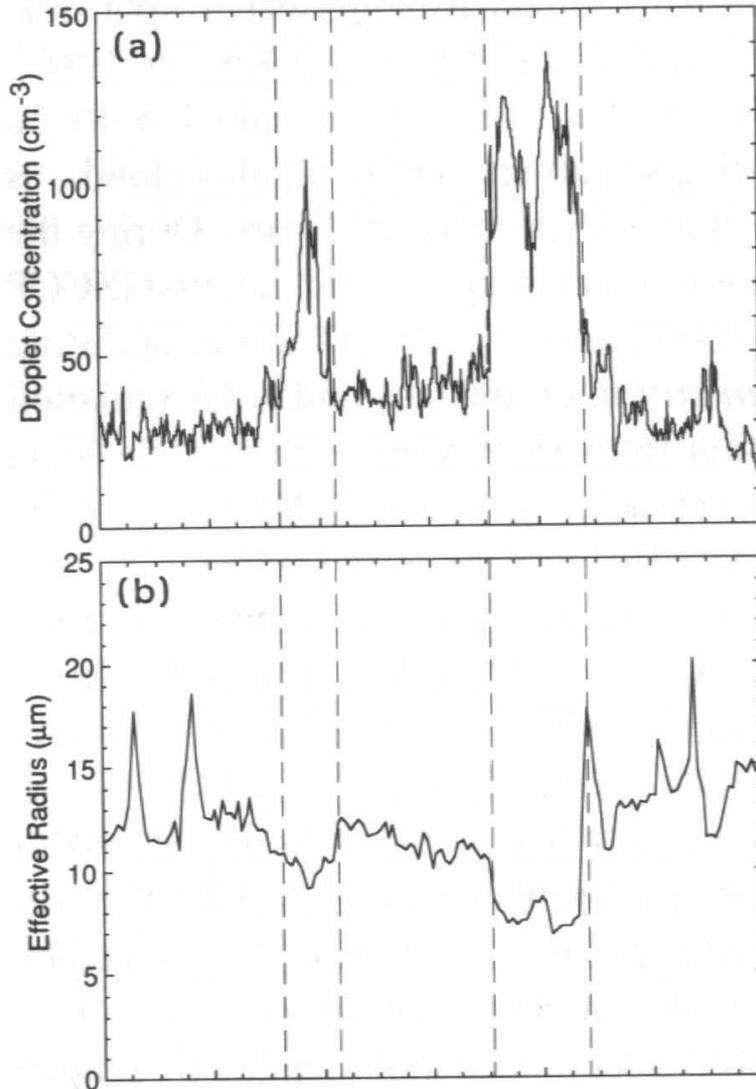
Effect of Ship Exhaust Aerosols on Clouds

Ship tracks

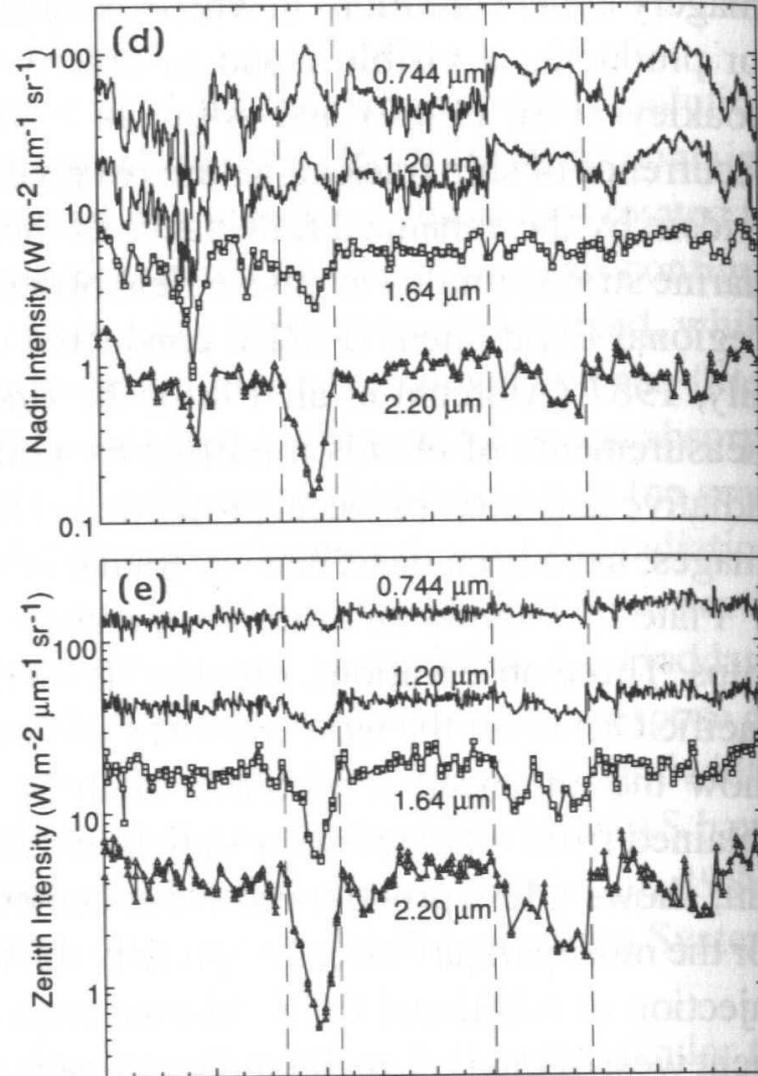


Efecto indirecto: Evidencia 1

Microphysics



Radiation



Efecto indirecto: Evidencia 1

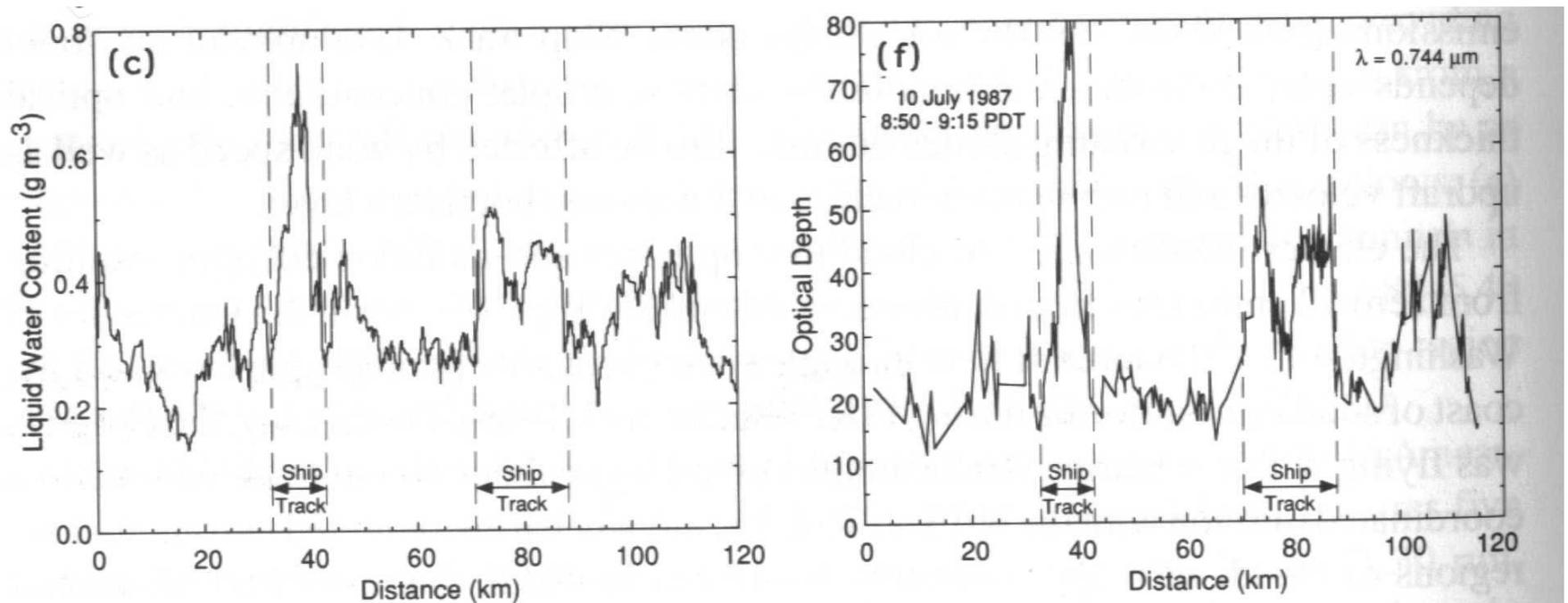


Figure 13.3 Aircraft transects of the two ship tracks on July 10, 1987, showing changes in (a) the total concentration of droplets, (b) the effective radius, (c) the cloud liquid water content, (d) the nadir (upwelling) intensities at selected wavelengths between $0.744 \mu\text{m}$ and $2.20 \mu\text{m}$, (e) the zenith (downwelling) intensities, and (f) the total optical thickness of the cloud at $0.744 \mu\text{m}$.

Efecto indirecto: Evidencia 2

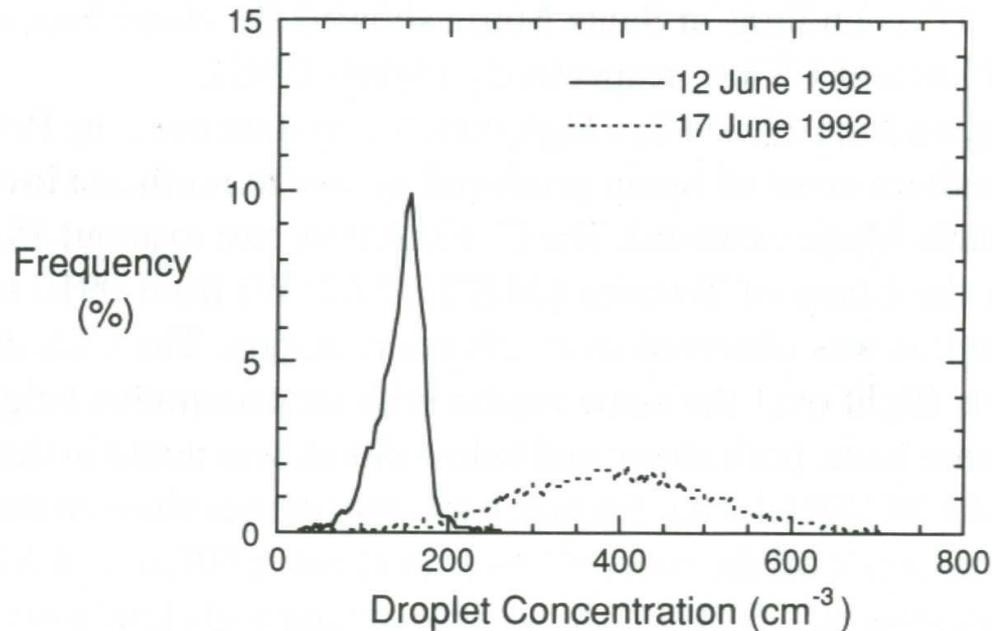


Figure 13.5 Probability distribution of cloud droplet concentration on June 12, 1992, (maritime airmass) and June 17, 1992, (continentally influenced airmass) for marine stratocumulus clouds near the Azores, Portugal, obtained from the University of Washington C-131A during ASTEX.

Efecto indirecto: Evidencia 2

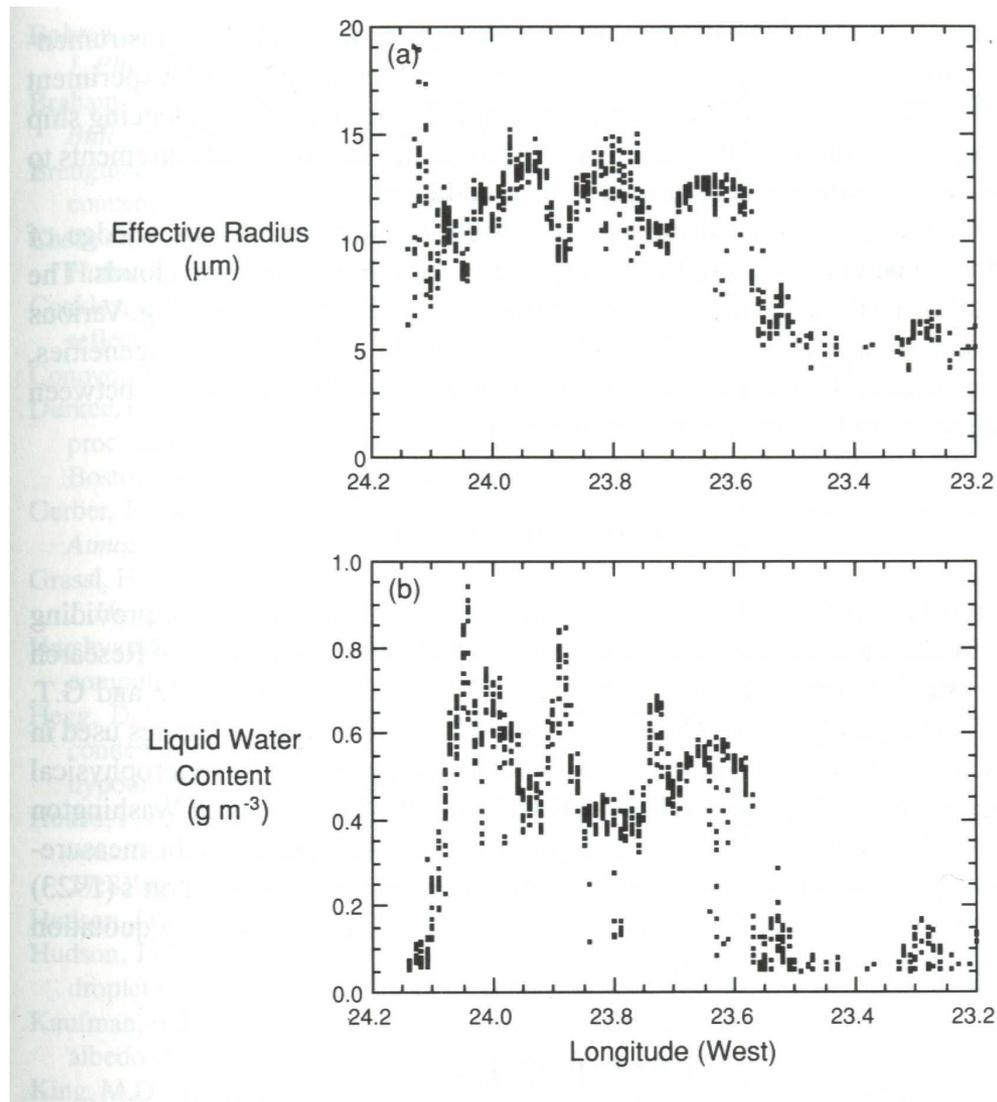


Figure 13.6 Aircraft transects in a marine stratocumulus cloud layer on June 17, 1992, showing changes in (a) effective radius and (b) liquid water content across the transition. The effective radius was derived from PVM-corrected FSSP and OAP-200X measurements, and the liquid water content from PVM-100A and OAP-200X measurements.

Efecto indirecto: Evidencia 2

		“limpio”	“sucio”
Concentración (cm^{-3})	media	144	395
	mediana	148	393
	Desv. std	39	119
R_{eff} (μm)	media	12.7	9.9
	mediana	13.3	10.1
	Desv. std	2.3	2.1
Contenido de agua (g m^{-3})	media	0.34	0.40
	mediana	0.34	0.30
	Desv. std	0.17	0.28
CN (cm^{-3})	Encima nube	300	600-1200
	Debajo nube	200	900-1200

Resumen de la clase:

- ✓ Relevancia de partículas de aerosol atmosférico en el planeta.
- ✓ Conceptos generales de fuentes y de caracterización de partículas
- ✓ Conceptos generales de interacción de partículas con radiación solar: efecto directo
- ✓ Conceptos del rol en la formación de nubes y de interacción de nubes con radiación solar: efecto indirecto

Graciela B. Raga

Micro- and Mesoscale Interactions Group

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México

raga.graciela@gmail.com

<https://www.atmosfera.unam.mx/ciencias-atmosfericas/interaccion-micro-y-mesoescala/>

Email me if you want info on UNAM's :

- Earth Sciences Graduate Program (Ms and PhD)
- Posdoctoral Program

Scholarships are available to foreigners!

Micro- and Mesoscale Interactions Group
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México

Group members:

1. Graciela B. Raga: urban and regional pollution (biomass burning), convection and clouds (microphysics, dynamics and electrification), aerosol-cloud-precipitation interactions, pollution-climate interactions, regional meteorology and precipitation, tropical cyclones.
2. Luis Ladino: Aerosol – cloud interactions, ice nuclei measurements (field and lab studies)
3. Diego Alfaro: Mesoscale meteorology: idealized numerical modelling, theoretical considerations, observational studies (satellite)
4. Christian Dominguez : tropical cyclones, impacts on precipitation (season variability). She will join group on 1 January 2019.