



# Meteorología y Climatología

2º Ciencias Ambientales  
Departamento de Física Aplicada  
Universidad de Granada



# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

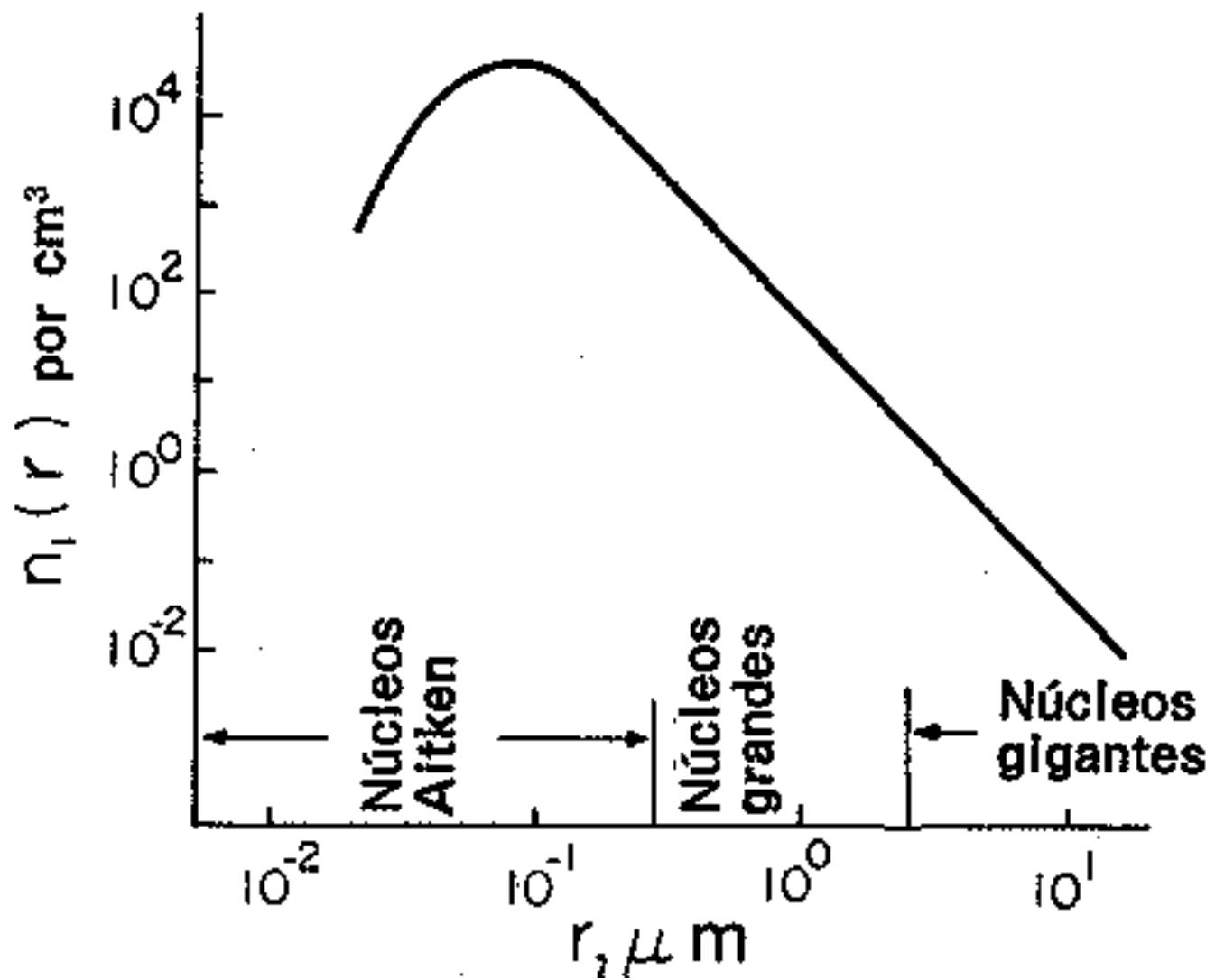
- Introducción.
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- Medida de la precipitación.

# AEROSOLES ATMOSFÉRICOS

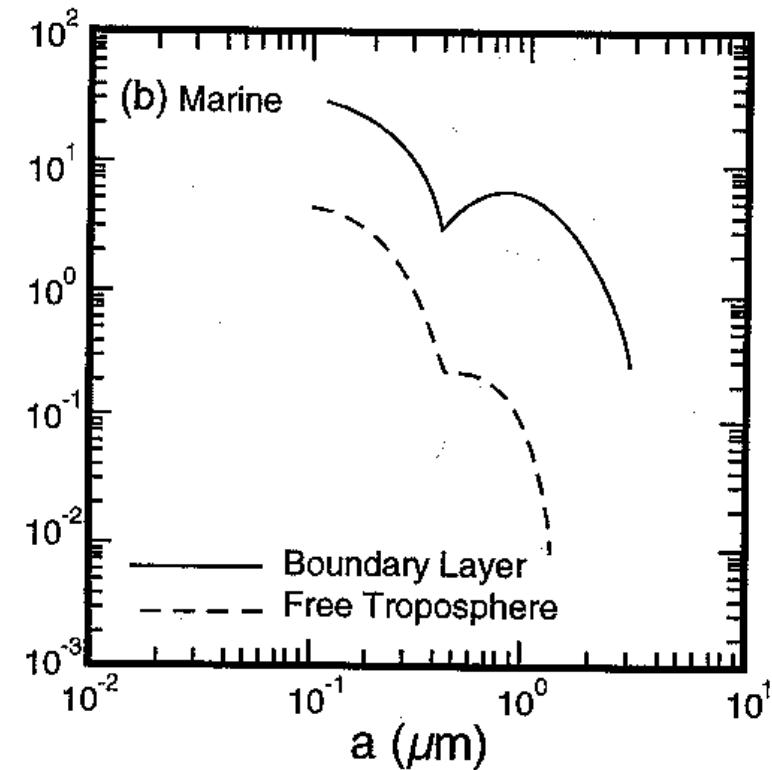
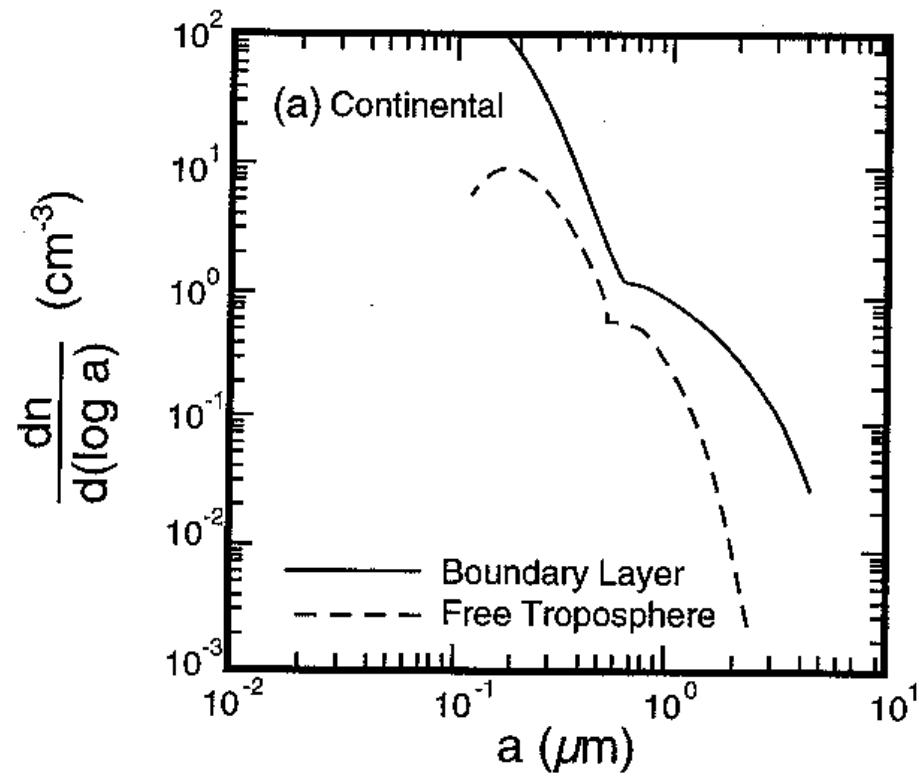
## PARTÍCULAS DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO

| Partícula | Radio<br>( $\mu\text{m}$ ) | Nº de partículas<br>(por $\text{cm}^3$ ) |        | Origen  | Vida Media                   |
|-----------|----------------------------|--|--------|---|------------------------------|
|           |                            | Rango                                    | Típico |   |                              |
| Aitken    | <0.1                       | $10^3\text{-}10^5$                       | 1-1000 | Combustión.<br>Conversión<br>gas-partícula                    | Días                         |
| Grandes   | 0.1 a<br>1.0               | 1-1000                                   | 100    | Coagulación<br>núcleos Aitken<br>Evaporación<br>de gotas      | Días                         |
| Gigantes  | >1.0                       | 1-10                                     | 1      | Polvo<br>Emisiones<br>industriales<br>Evaporación<br>de gotas | Horas-días.<br>Minutos-horas |

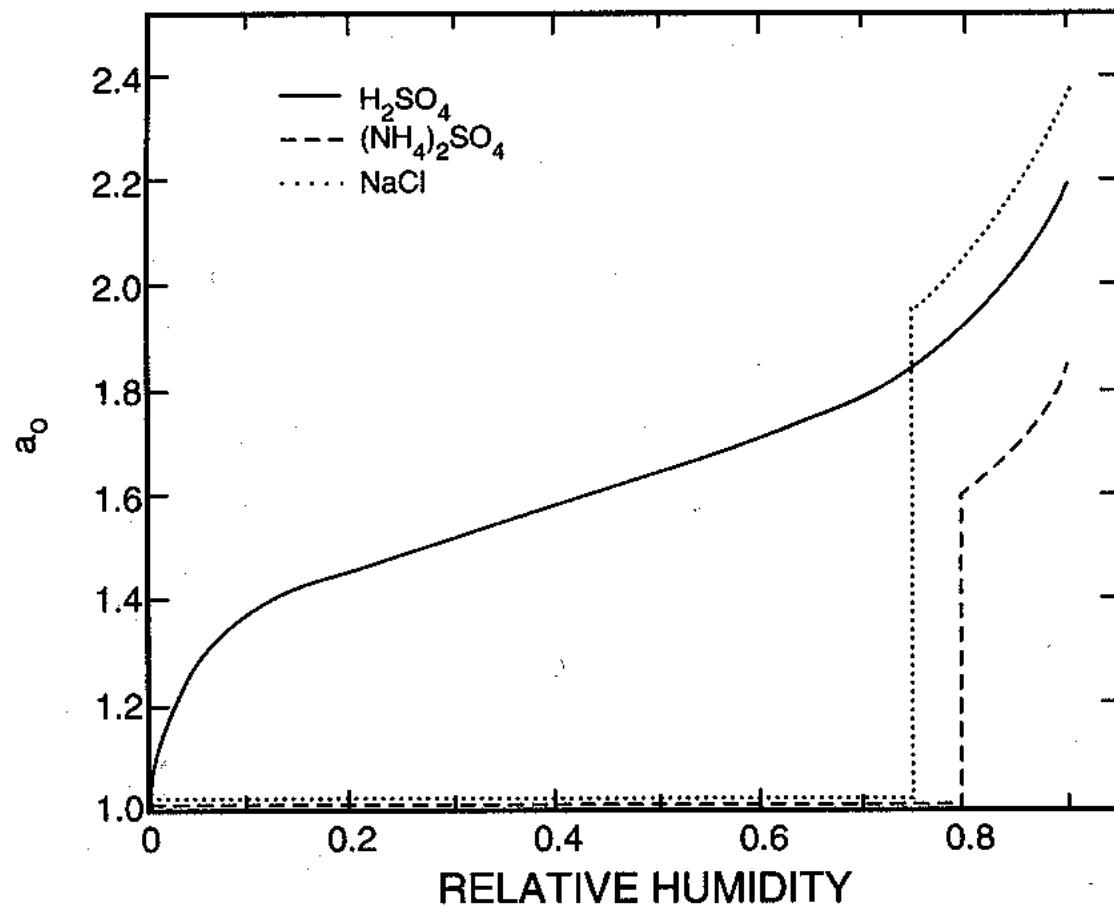
# PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS



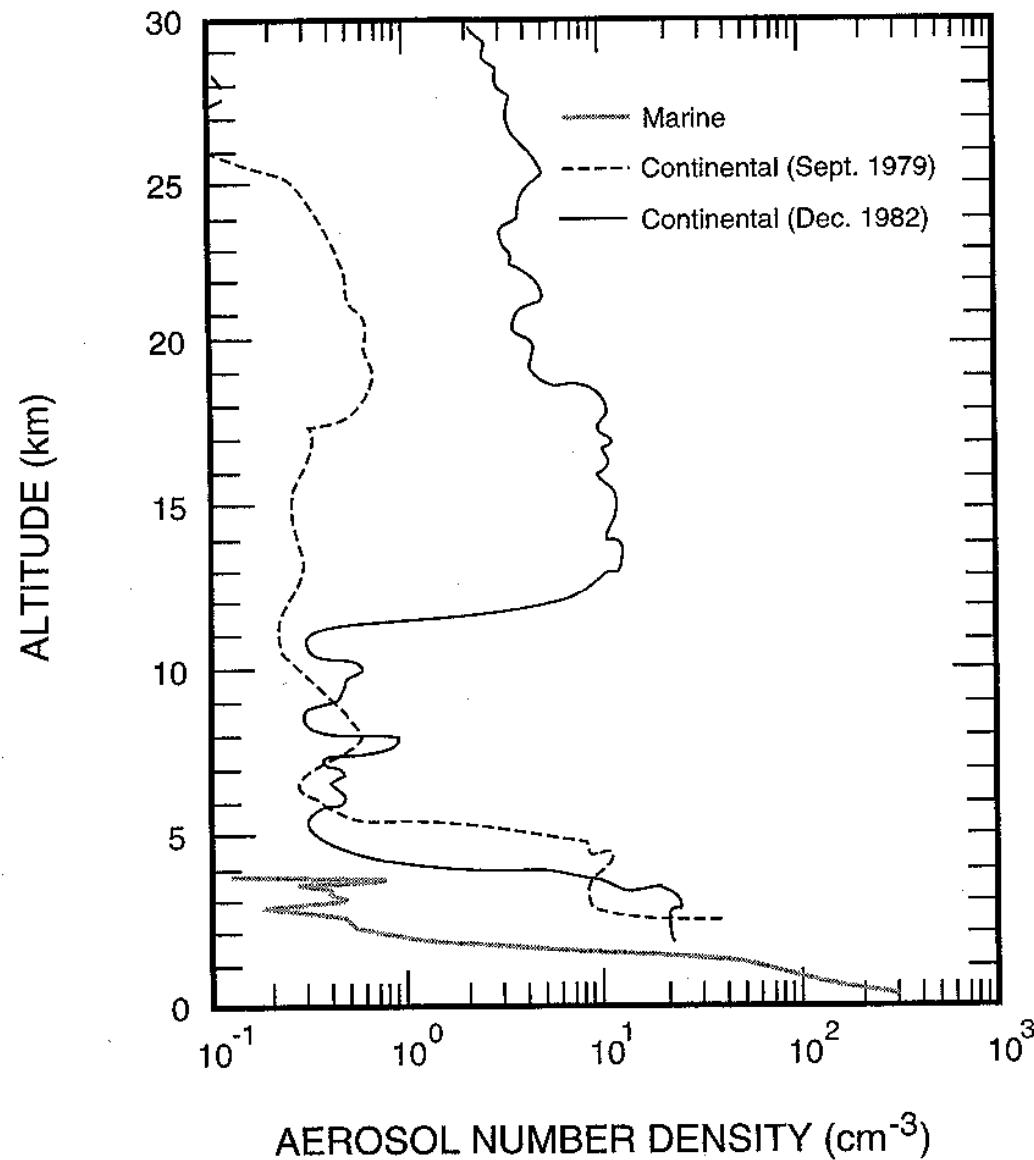
# DISTRIBUCIONES DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS



# PÁRTICULAS. CRECIMIENTO HIGROSCÓPICO



# DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS



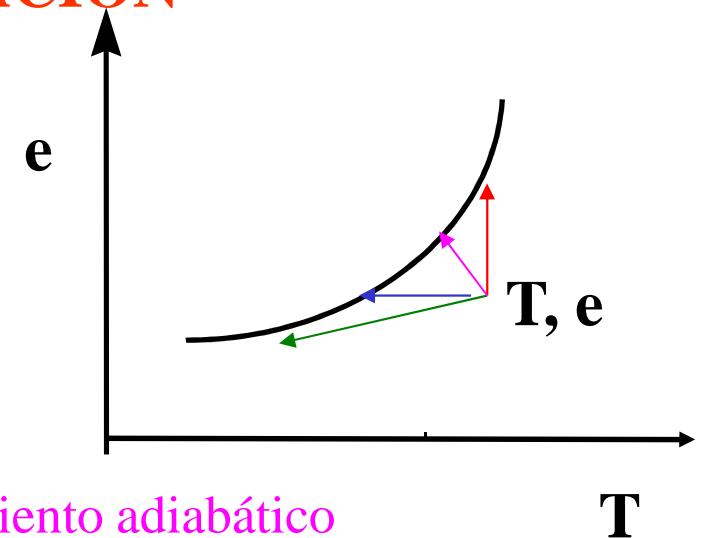
# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- Introducción.
- **Mecanismos de condensación.**
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- Medida de la precipitación.

# CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA

## MODOS DE CONDENSACIÓN

- A)  $T \downarrow$  {
- A1) Enfriamiento isóbaro con  $r=cte$  y  $r_s \downarrow$   
Rocío y escarcha  
Brumas  
Nieblas de radiación y advección
  - A2) Saturación y condensación por enfriamiento adiabático
  - A3) Mezcla con una masa más fría: nieblas de mezcla



- B)  $r \uparrow$   
 $T=cte$  {
- Aire  $T_{aire}, e, r, p$
  - Agua  $T_{agua}$
  - Evaporación  
 $e < e_s(T_{agua})$
- $T_{aire} < T_{agua} \Rightarrow e < e_s(T_{aire}) < e_s(T_{agua})$   
 Cuando  $e = e_s(T_{aire}) < e_s(T_{agua})$   
 el aire se satura pero continúa la evaporación  
 Condensación  $\Rightarrow$  Nieblas de evaporación

# ROCIO Y ESCARCHA



# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- Introducción.
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- Medida de la precipitación.

# TAMAÑOS DE GOTAS

Key:

$r$  = radius in micrometers  
 $n$  = number per liter  
 $V$  = terminal velocity in centimeters per second

• Typical condensation nucleus  
 $r = 0.1$   
 $n = 10^6$   
 $V = 0.0001$

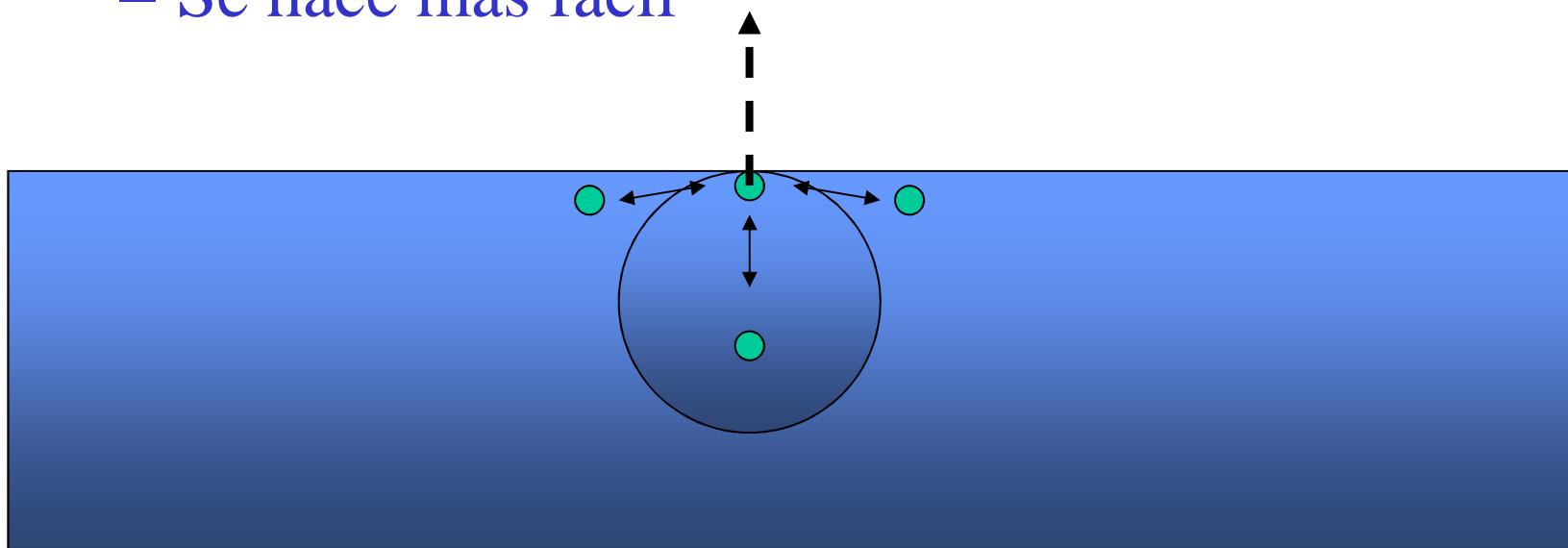
Typical cloud droplet  
 $r = 10$   
 $n = 10^6$   
 $V = 1$

Large cloud droplet  
 $r = 50$   
 $n = 10^3$   
 $V = 27$

Typical raindrop  $r = 1000$ ,  $n = 1$ ,  $V = 650$

# Evaporarse: Hay que superar atracciones

- Curvatura –
  - Menos atracciones
  - Se hace más fácil



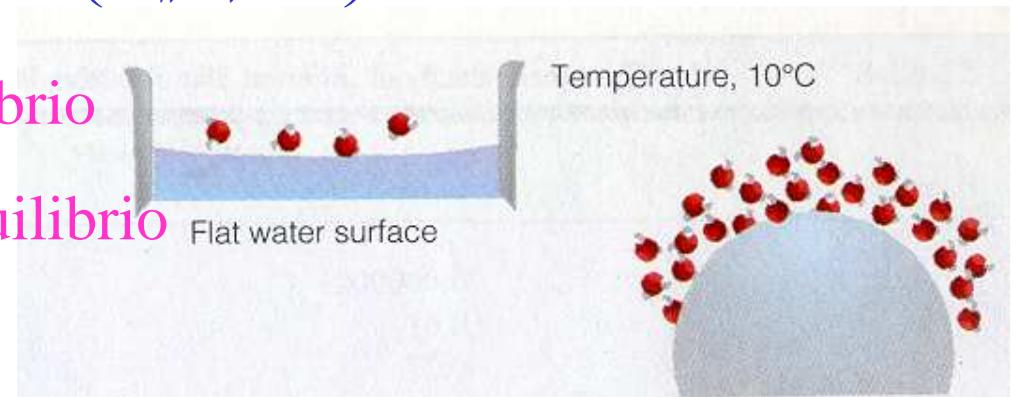
# NUCLEACIÓN HOMOGENEA

Ley de Kelvin

$$e'(r) = e_s(\infty) \exp\left(\frac{2\sigma}{\rho_w R_v T} \frac{1}{r}\right) = e_s(\infty) \exp\left(\frac{a}{r}\right)$$

$e'$  presión de vapor en el equilibrio

$e_s(\infty)$  presión de vapor en el equilibrio  
sobre superficie plana de agua

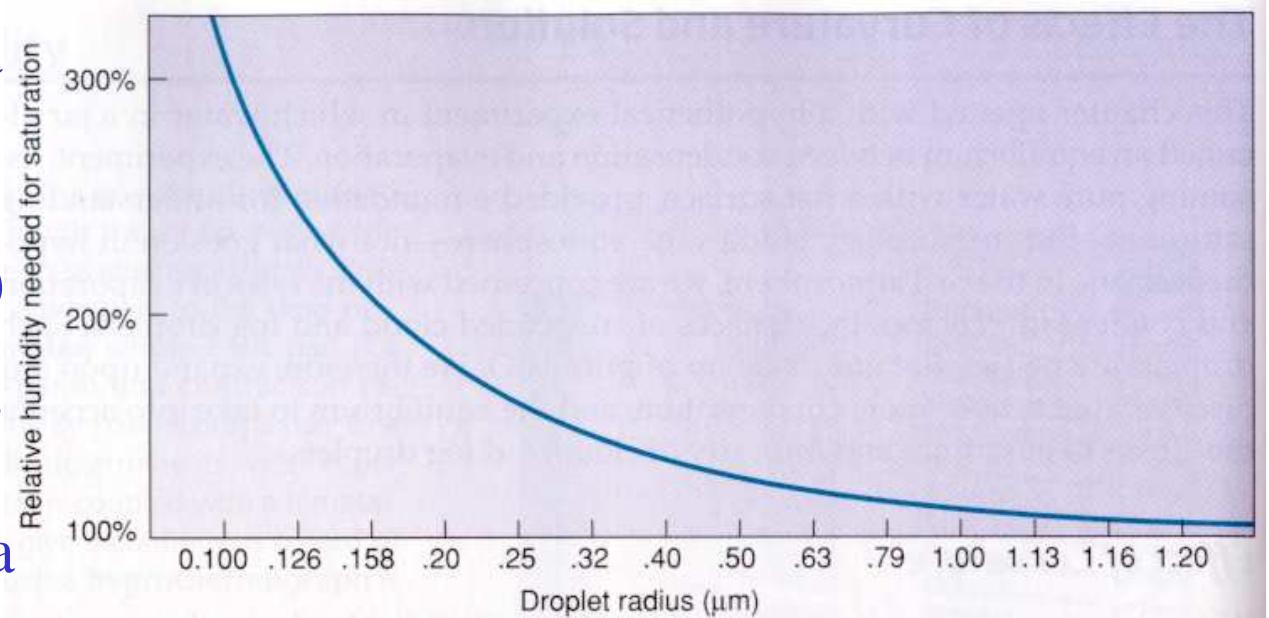


Efecto de la curvatura

$$r \uparrow e'(r) \downarrow$$

$$\text{Si } r \rightarrow \infty, e'(r) \rightarrow e_s(\infty)$$

Las sobresaturaciones  
requeridas impiden la  
nucleación homogénea



# NUCLEACIÓN HETEROGÉNEA NUCLEOS DE CONDENSACIÓN

El vapor de agua necesita una superficie sobre la que condensar:

Nucleación homogénea: sobre agua líquida.  $\Leftarrow$  Sobresaturaciones muy altas

Nucleación heterogénea: sobre otras partículas.  $\Leftarrow$  Común en la atmósfera

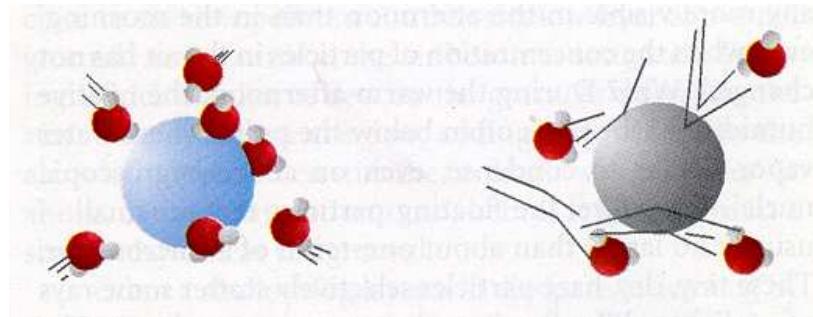
## NÚCLEOS DE CONDENSACIÓN

### AEROSOLES

| Partícula | Radio<br>( $\mu\text{m}$ ) | Nº de partículas<br>(por $\text{cm}^3$ ) |        | Eficacia |
|-----------|----------------------------|--|--------|----------|
|           |                            | Rango                                    | Típico |          |
| Aitken    | <0.2                       | $10^3\text{-}10^5$                       | 1000   | Baja     |
| Grandes   | 0.2 a 2.0                  | 1-1000                                   | 100    | Alta     |
| Gigantes  | >2.0                       | 1-10                                     | 1      | Muy alta |

# EFECTOS DE LA DISOLUCIÓN

Partícula hidrófila



Partícula hidrófoba

Efecto de la disolución  $n_s \uparrow e' \downarrow$

$$\frac{e'}{e_s} = \frac{n_w}{n_w + n_s}$$

Disoluciones  
diluidas

$$\frac{e'}{e_s} = 1 - \frac{n_s}{n_w}$$

$$n_s = i N_A M_s / m_s$$

$$n_w = N_A M_w / m_w$$

$e'$  presión de vapor en el equilibrio  
 $e_s$  presión de vapor en el equilibrio  
sobre superficie plana de agua

$n_w$  moléculas de agua

$n_s$  moléculas de soluto

$i$  factor de disociación iónica

$M_w$  masa de agua

$M_s$  masa de soluto

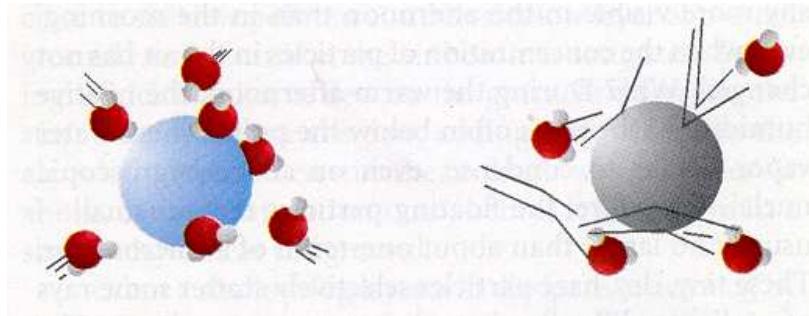
$N_A$  Número de Avogadro

$m_w$  masa molar de agua

$m_s$  masa molar de soluto

# EFECTOS DE LA DISOLUCIÓN

Partícula hidrófila



Partícula hidrófoba

$$\frac{e'}{e_s} = 1 - \frac{n_s}{n_w} = 1 - \frac{iN_A M_s m_w}{N_A M_w m_s} = 1 - \frac{iM_s m_w}{M_w m_s}$$

$$M_w = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_l$$

$$\frac{e'}{e_s} = 1 - \frac{3im_w M_s}{4\pi \rho_l m_s} \frac{1}{r^3} = 1 - \frac{b}{r^3}$$

cte = f(prop quím)

radio gota

# EFECTOS DE CURVATURA Y DISOLUCIÓN

Dos efectos en competición según el tamaño de la gotita:

Curvatura: cuando más se evapore, más curvatura, y favorece la evaporación

Soluto: cuando más se evapore, más concentración, y dificulta la evaporación

## Las bases de la microfísica de las nubes

Curvas de Köhler

$$\frac{e'}{e_s} \approx 1 + \frac{a}{r} - \frac{b}{r^3}$$

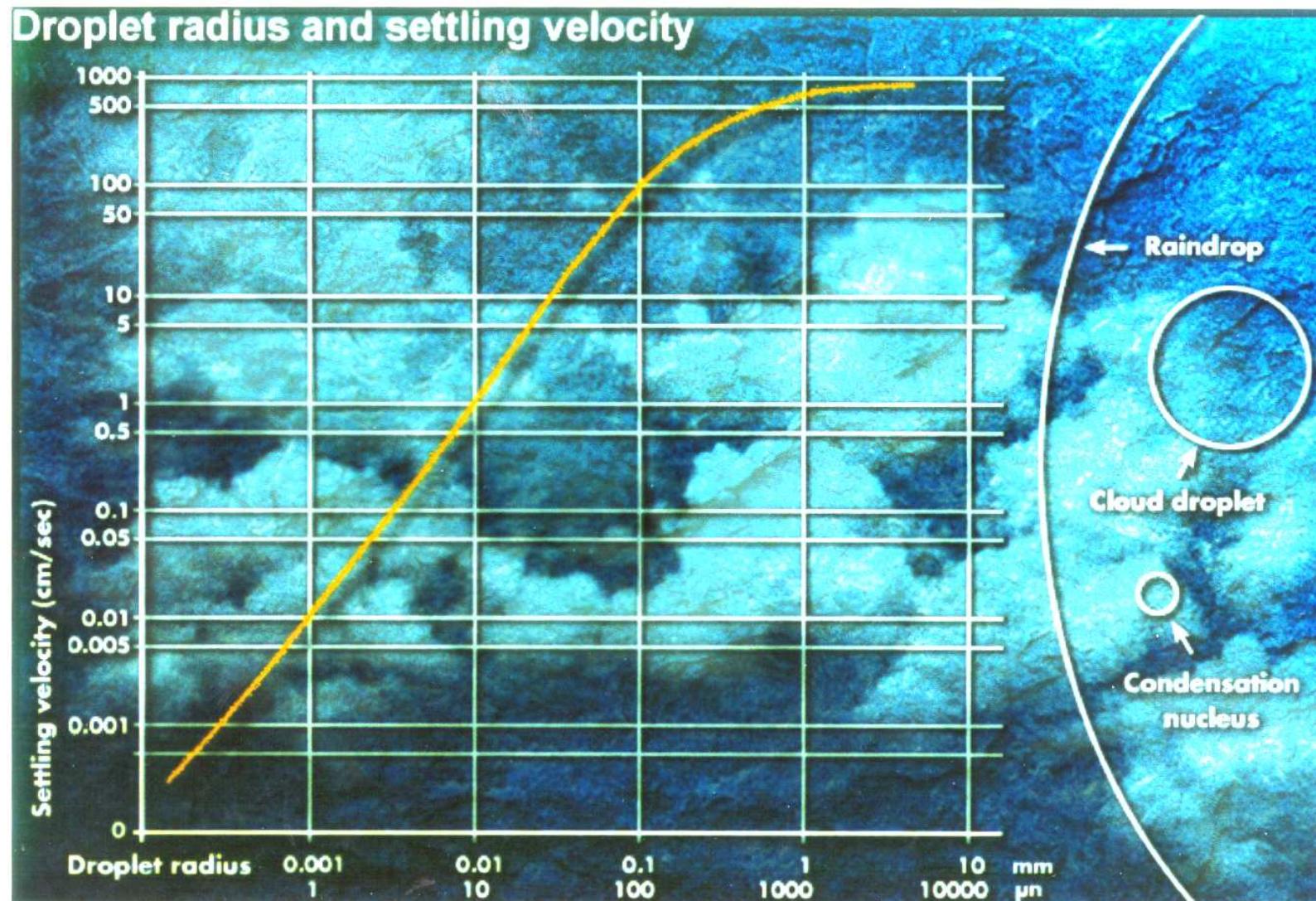
Valores críticos de saturación y de radio

Para estudios avanzados en la física de la atmósfera

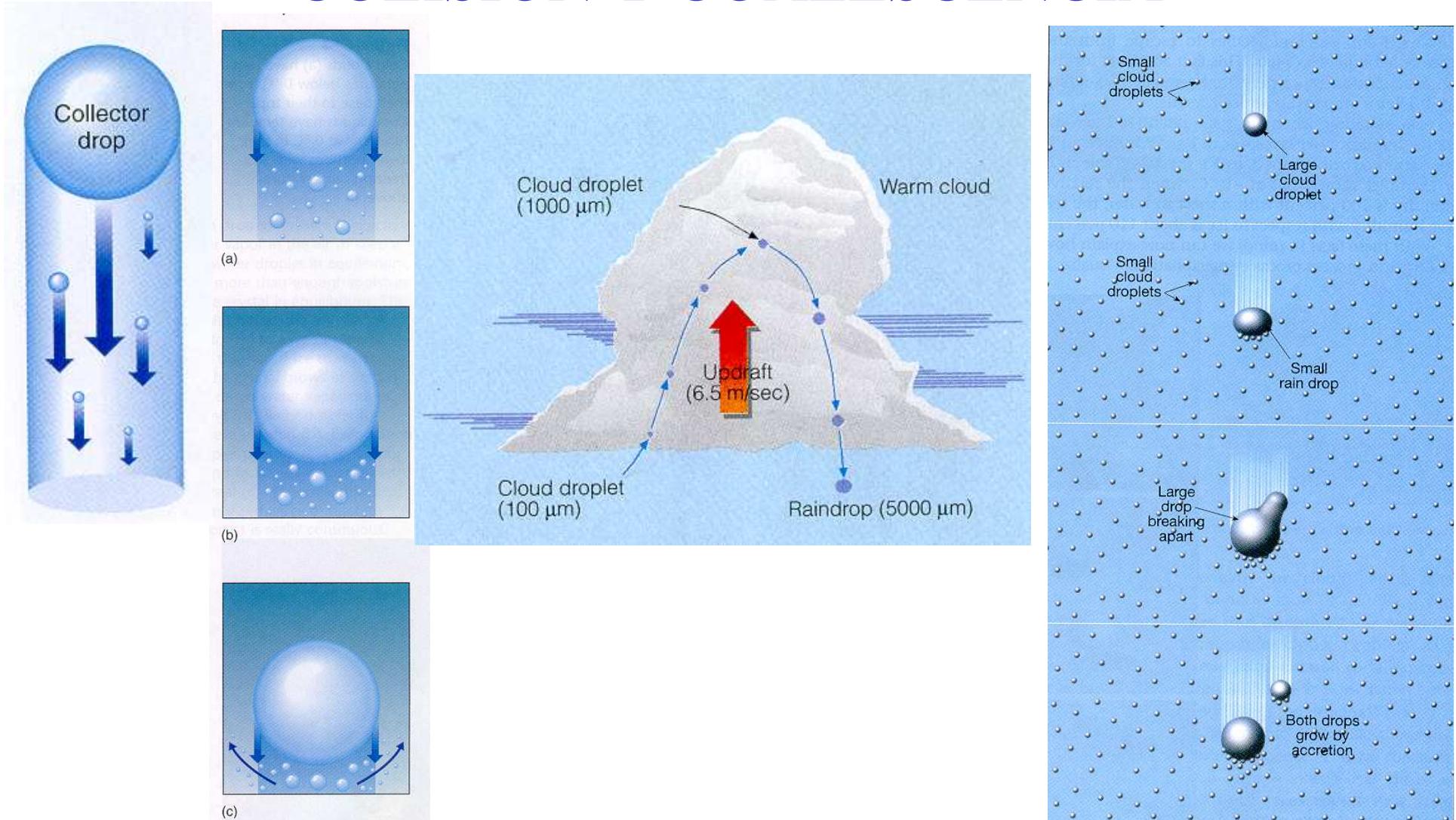
# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- Introducción.
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- Medida de la precipitación.

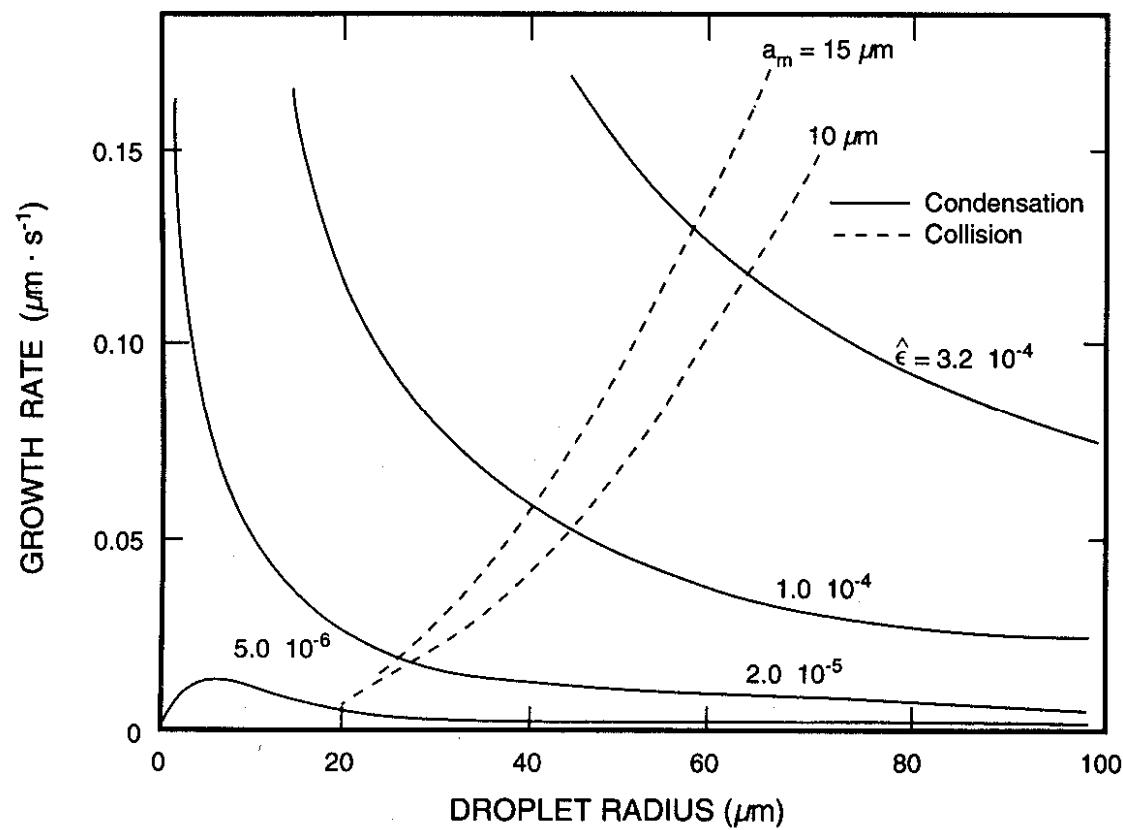
# PRECIPITACIÓN VELOCIDAD TERMINAL



# PRECIPITACIÓN DESDE NUBES DE GOTAS DE AGUA COLISIÓN Y COALESCENCIA



# PRECIPITACIÓN DESDE NUBES DE GOTAS DE AGUA COLISIÓN Y COALESCENCIA



# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- Introducción.
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- Medida de la precipitación.

# NUCLEOS GLACIÓGENOS

Congelación homogénea  $T < -40^{\circ}\text{C}$

Núcleos de hielo permiten congelación a partir de  $-10^{\circ}\text{C}$

No son muy abundantes en la naturaleza

## Ejemplos:

Minerales de arcillas

Partículas resultado de descomposición de biomasa

Cristales de hielo

## Tipos:

Núcleos de deposición difusiva (Sublimación)

Núcleos de congelación (Congelación de gotas subfundidas)

Núcleos de contacto (Congelación por contacto con gota subfundida)

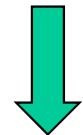
# PRECIPITACIÓN DESDE NUBES MIXTAS

Nubes mixtas

Gotas de agua subfundida y cristales de hielo

Para  $T < 273$  k

$e_i(T) < e_w(T)$



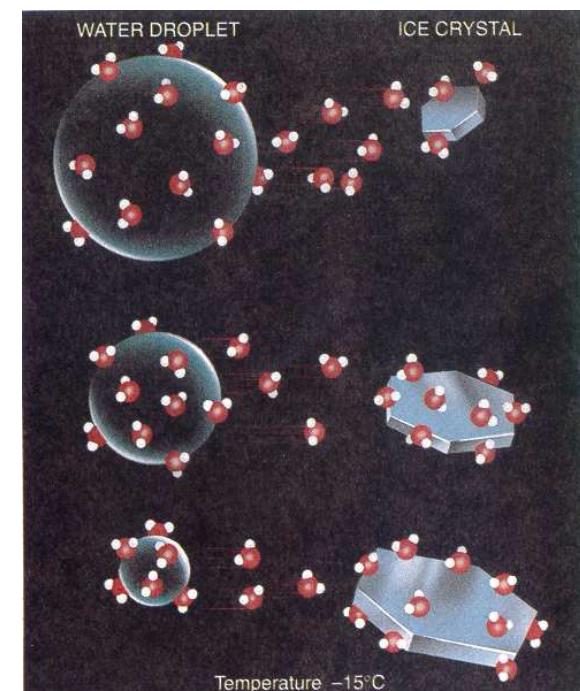
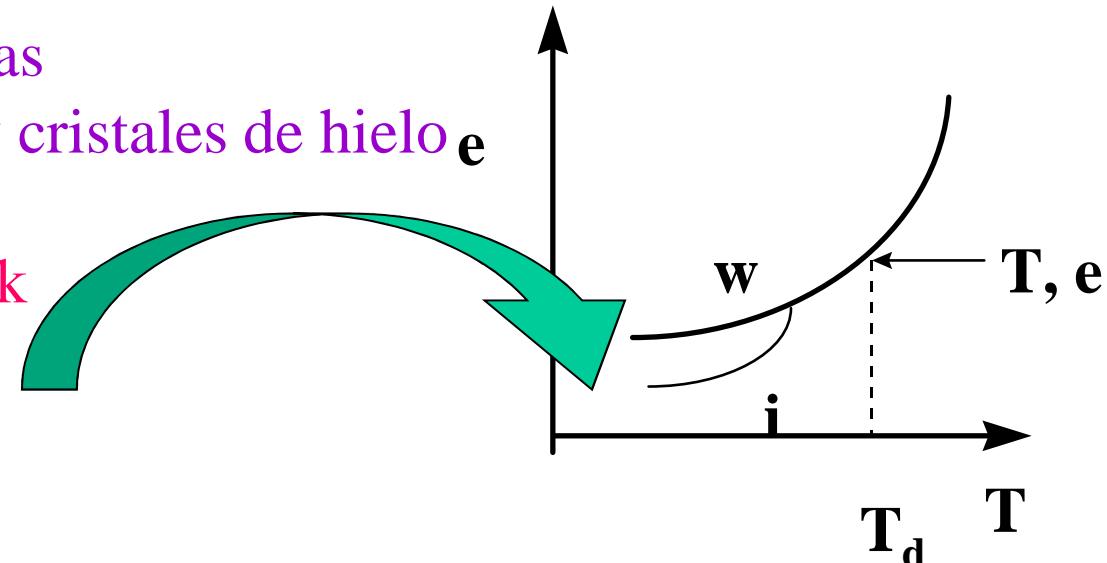
El vapor está saturado sobre el hielo  
pero no sobre agua



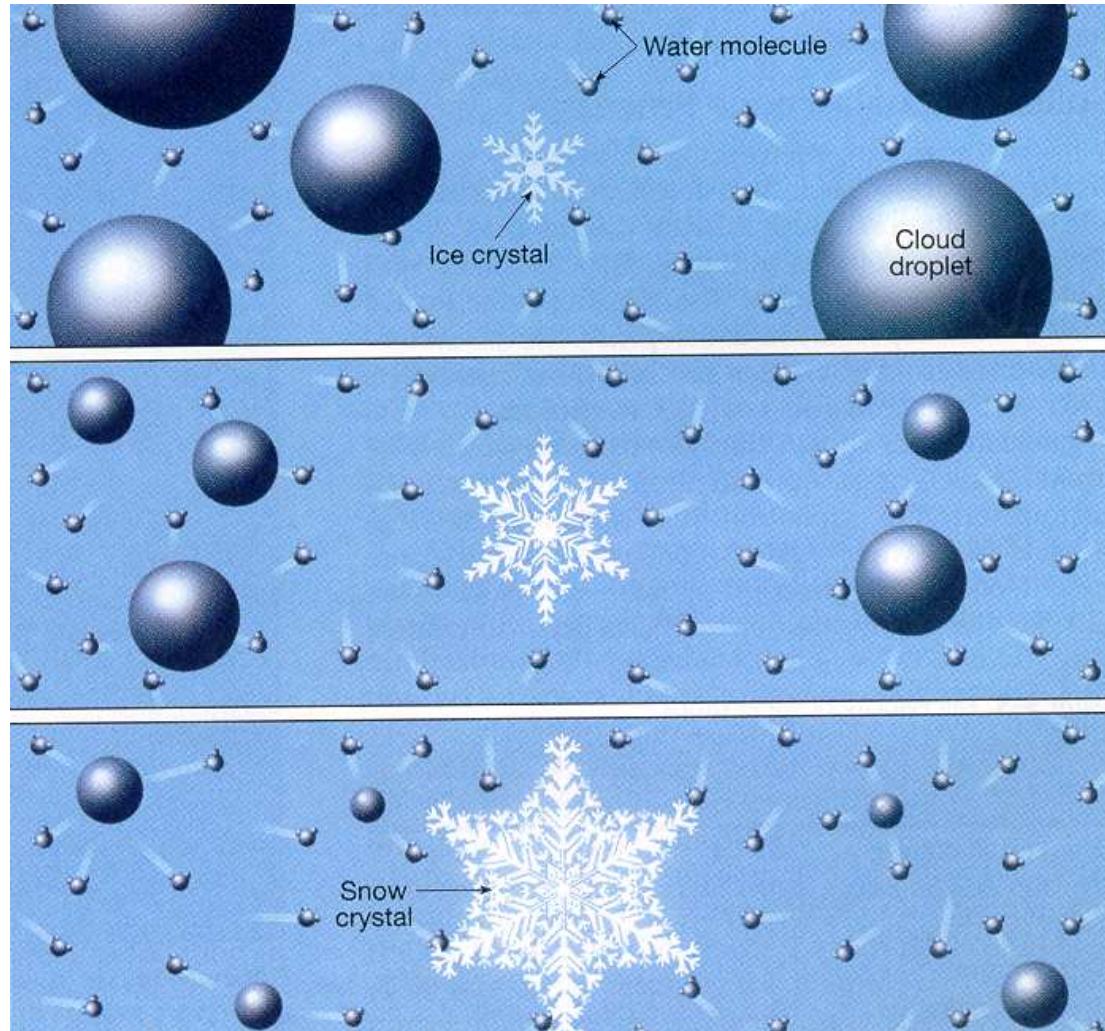
Luego la gota evapora y se produce  
sublimación sobre el hielo.



Hielo crece a costa del agua subfundida



# PRECIPITACIÓN DESDE NUBES MIXTAS TEORÍA DE BERGERON-FINDEISEN



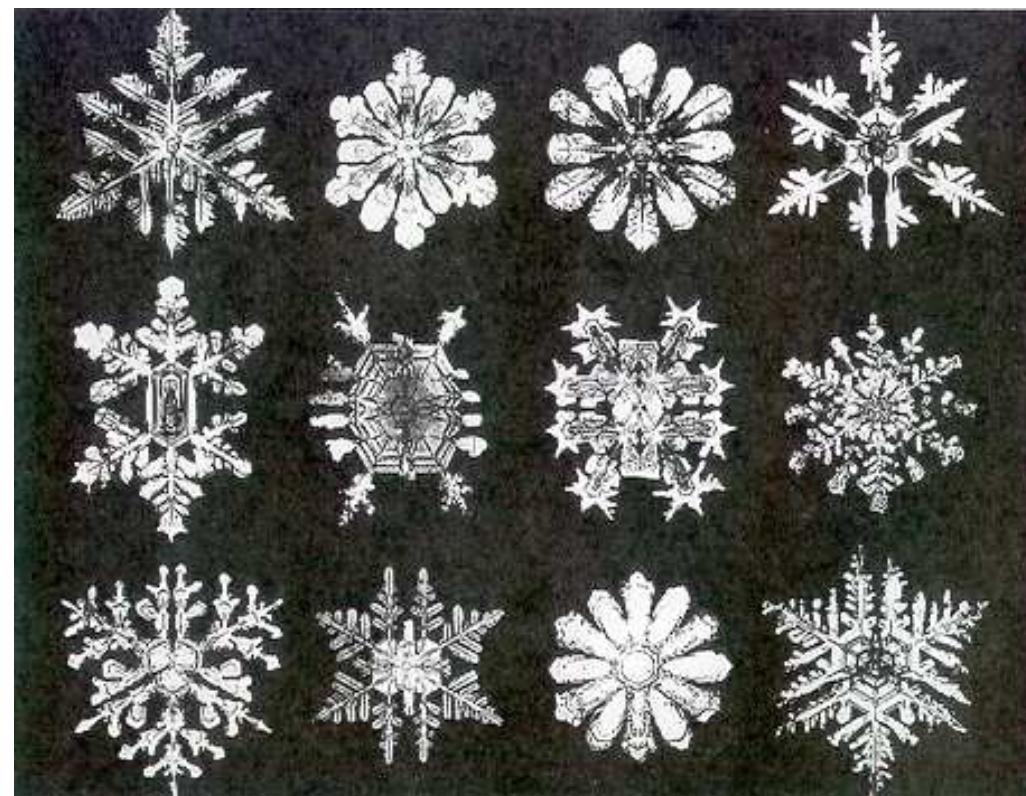
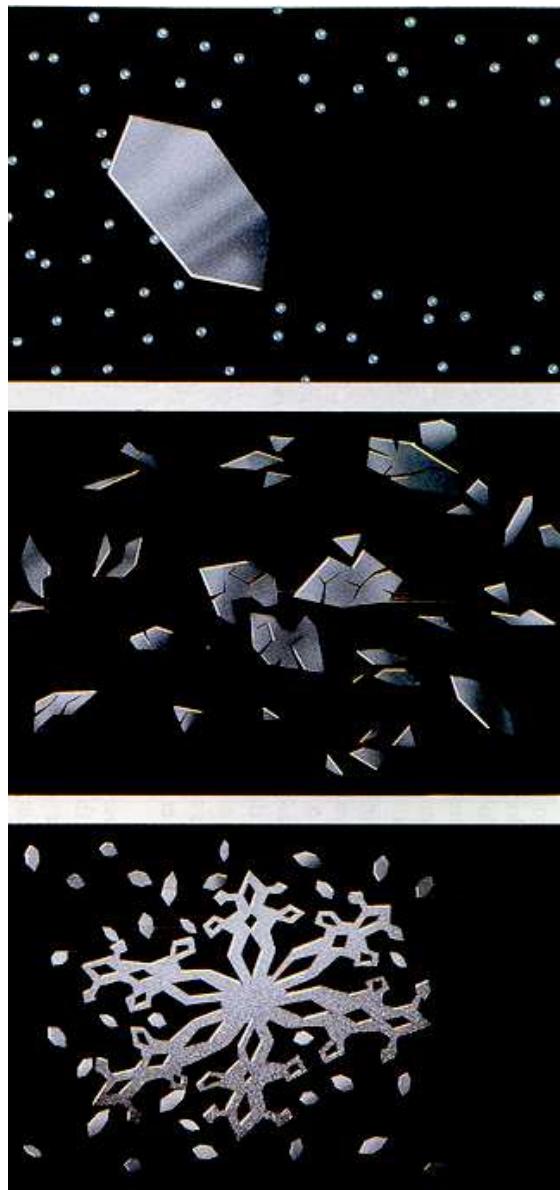
Condensación sobre hielo  
Evaporación agua subfundida  
↓  
Crecimiento de cristales hielo

Agregación  
Colisiones de cristales de  
hielo

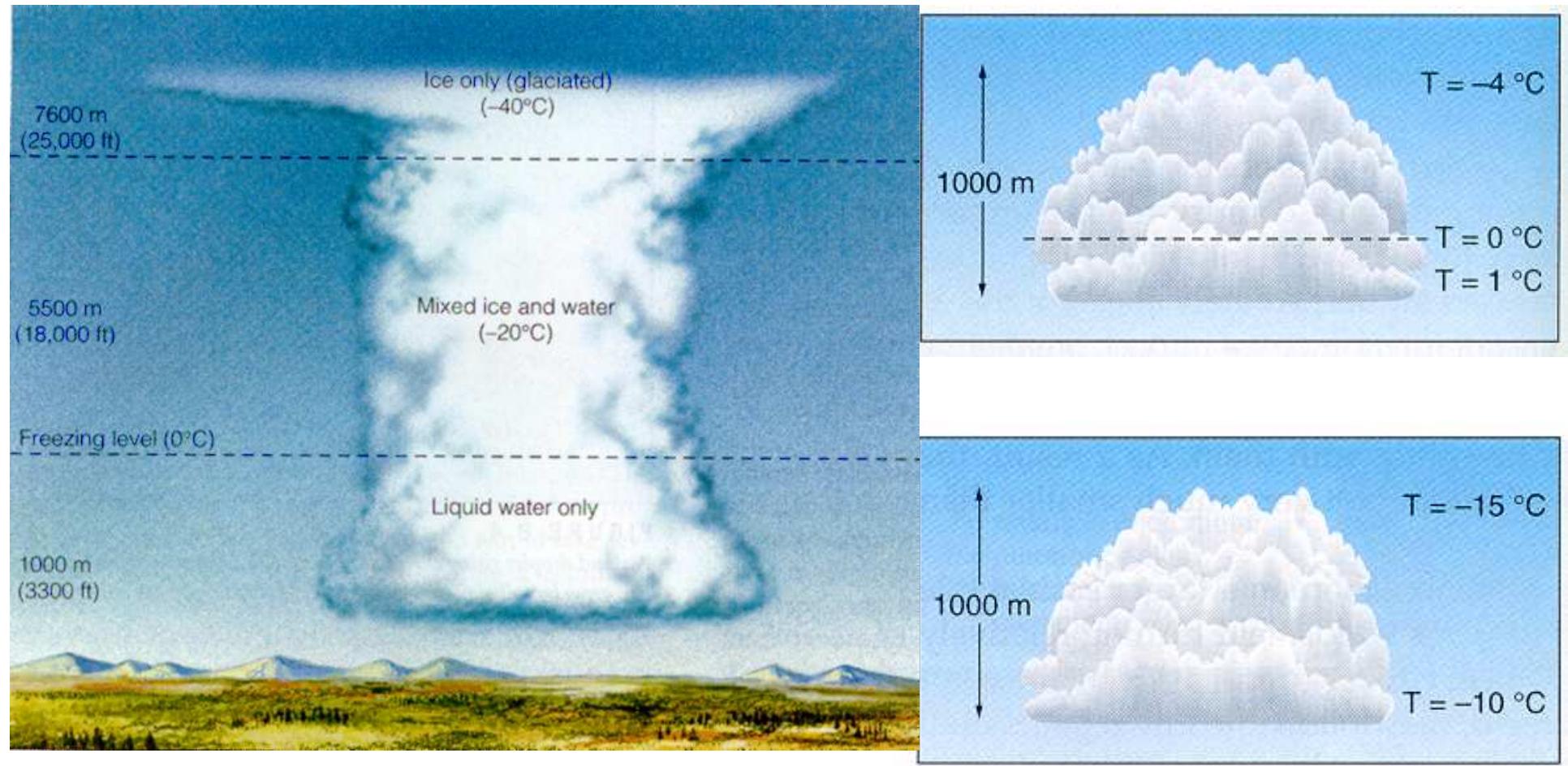
↓  
Copos de nieve  
Acreción

Colisiones de cristales  
de hielo con gotitas de  
agua subfundida

# AGREGACIÓN



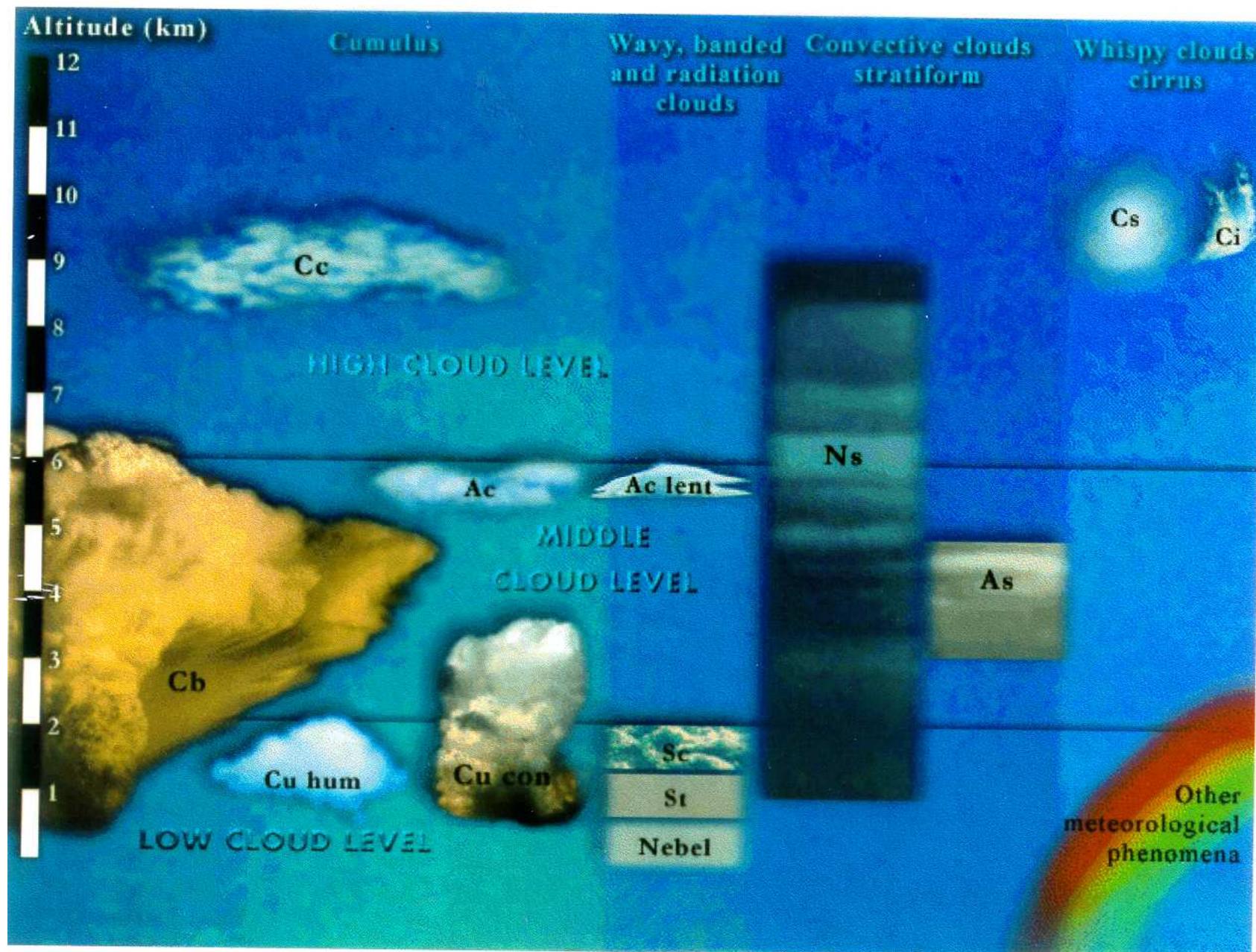
# NUBES DE AGUA. NUBES MIXTAS



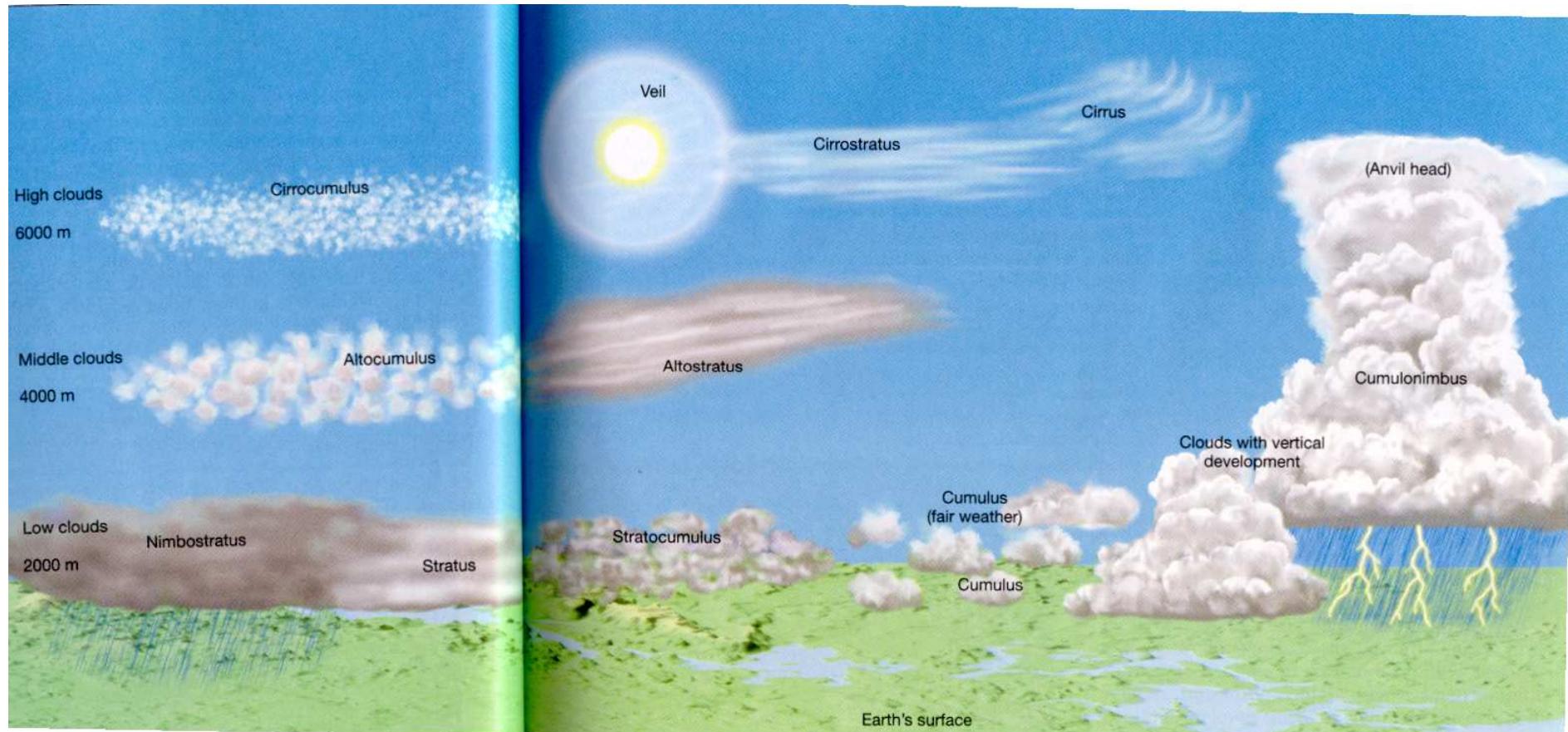
# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- Introducción.
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- **Nubes.**
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- Medida de la precipitación.

# CLASIFICACIÓN DE NUBES



# CLASIFICACIÓN DE NUBES



# CUMULUS DE BUEN TIEMPO



# CUMULUS CONGESTUS



# CUMULONIMBUS



# STRATUS



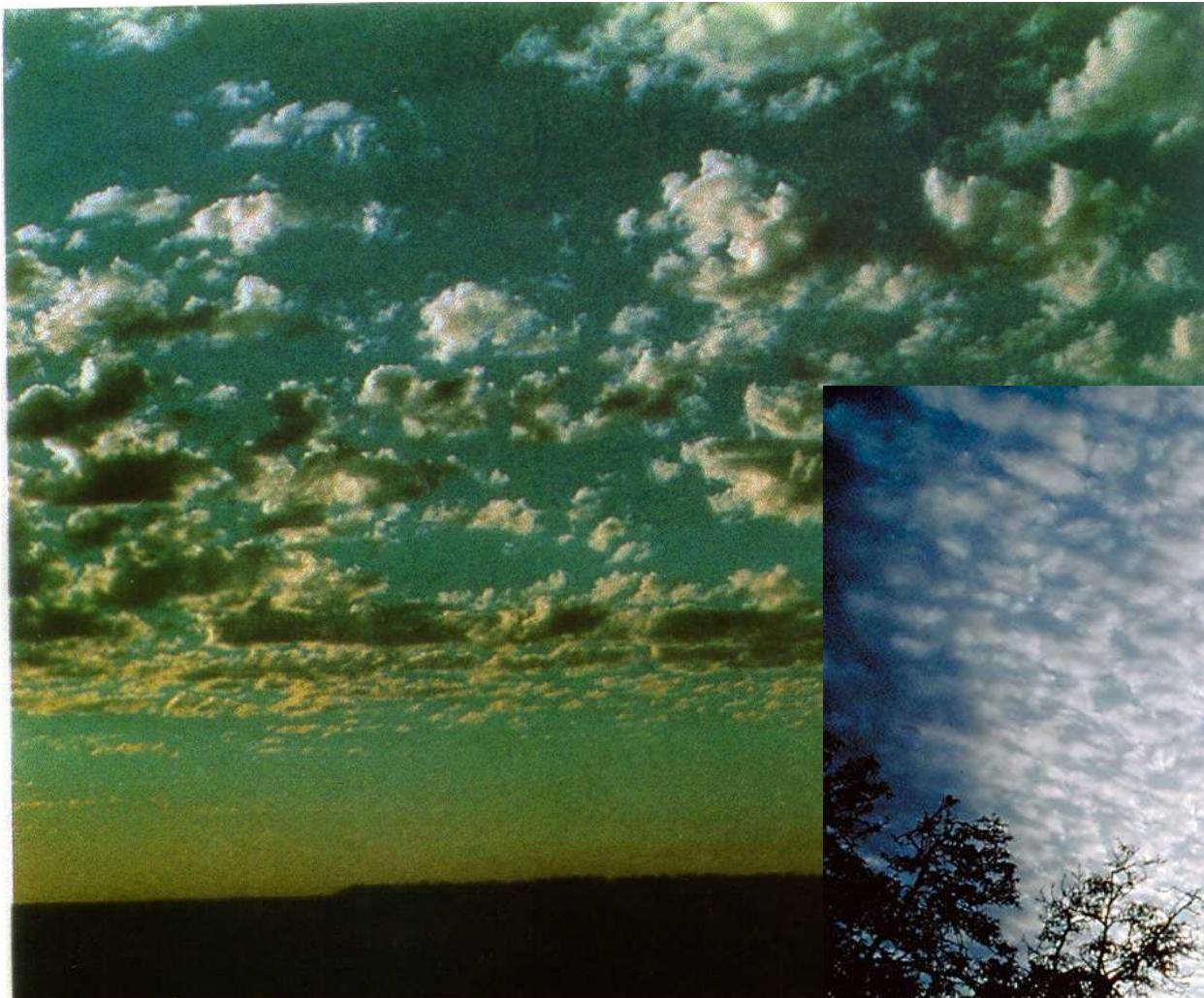
# ESTRATOCUMULUS



# ALTOCUMULUS



# ALTOCUMULUS



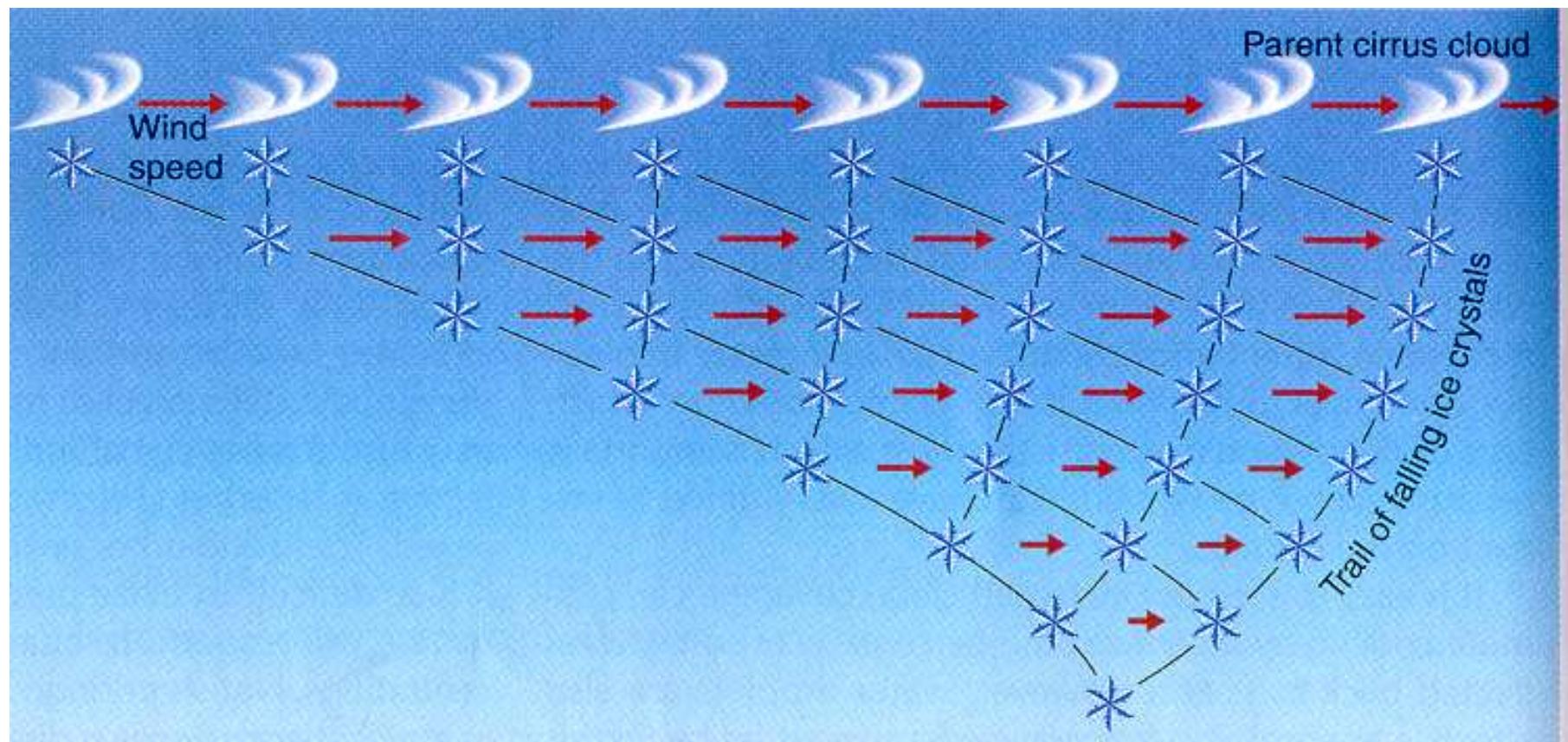
# ALTOSTRATUS



# CIRRUS



# CIRRUS



# CIRROCUMULUS



# CIRROSTRATUS

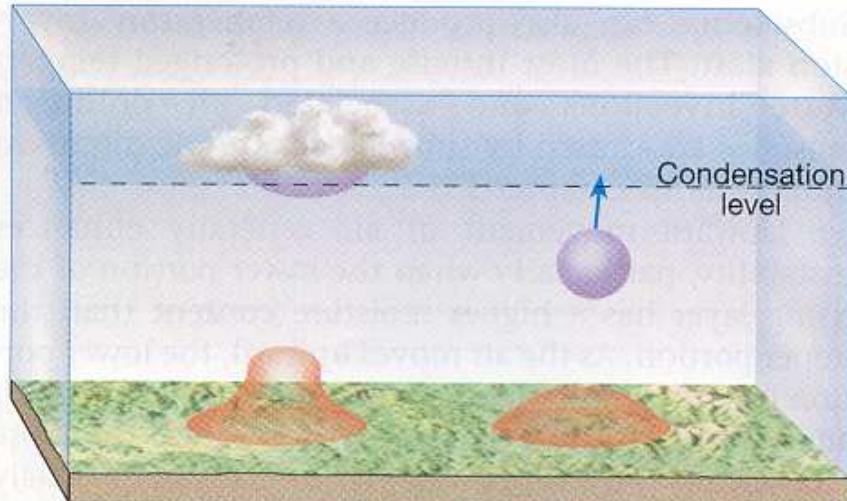


# MECANISMOS DE FORMACIÓN. PROCESOS DE ELEVACIÓN

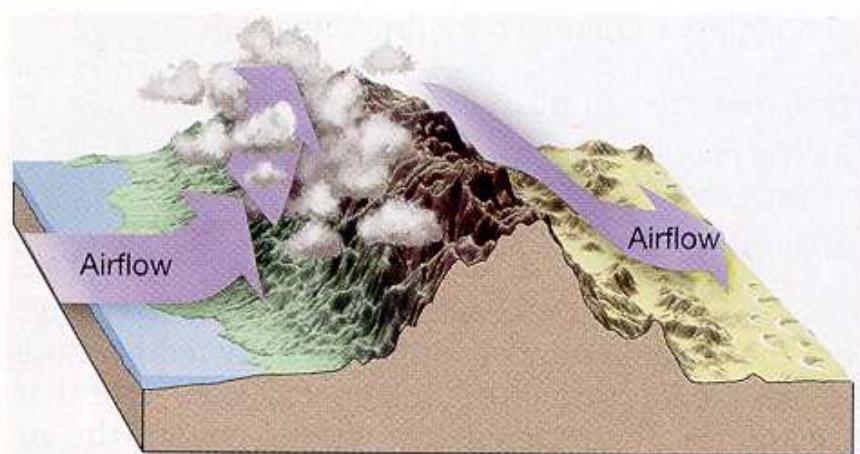
Papel fundamental de la velocidad vertical en la termodinámica atmosférica (ver tema 3)

**¿Cuáles son las causas del movimiento vertical atmosférico?**

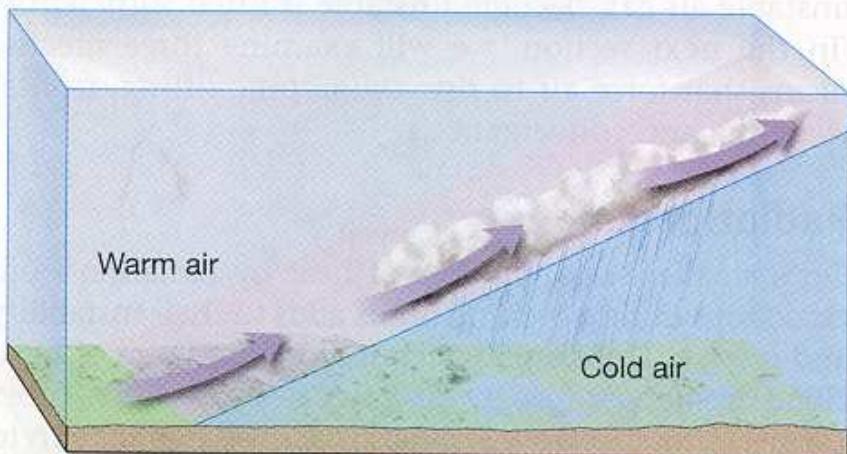
# MECANISMOS DE FORMACIÓN. PROCESOS DE ELEVACIÓN



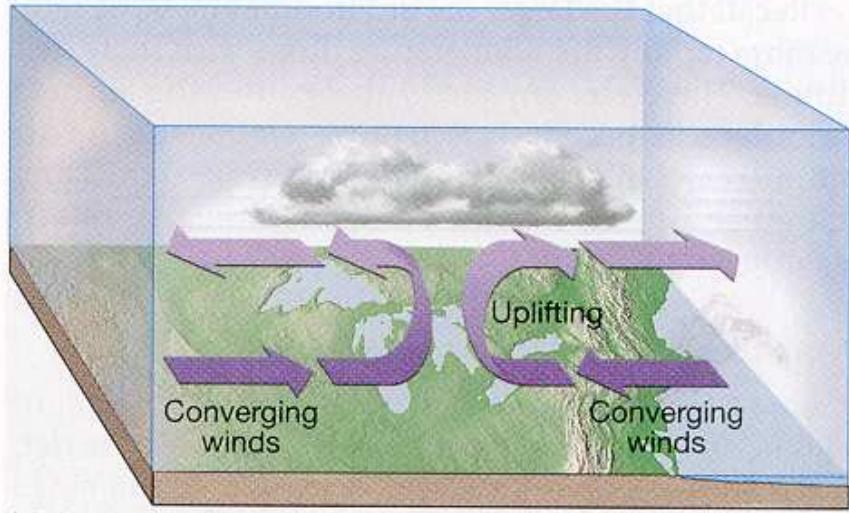
(a) Convective lifting



(b) Orographic lifting

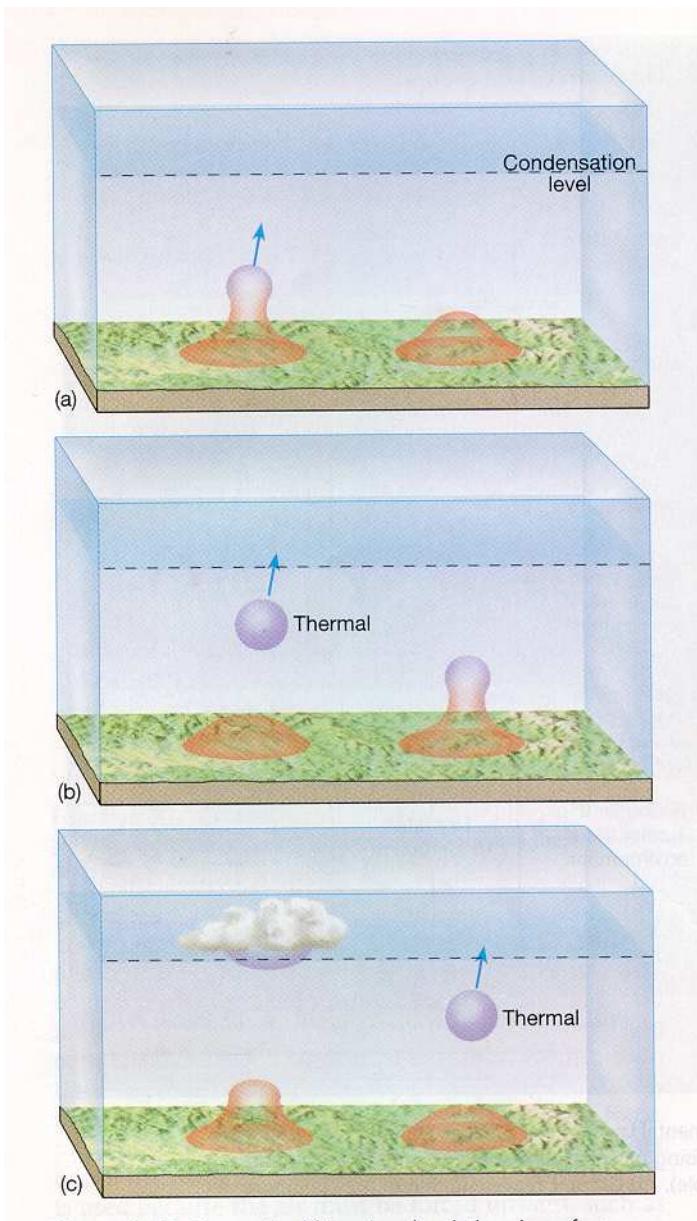


(c) Frontal wedging

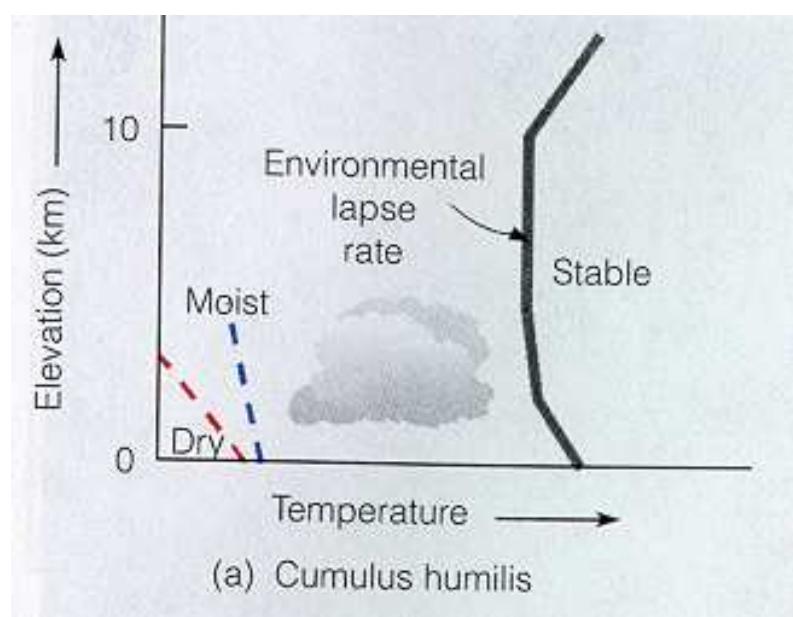


(d) Convergence

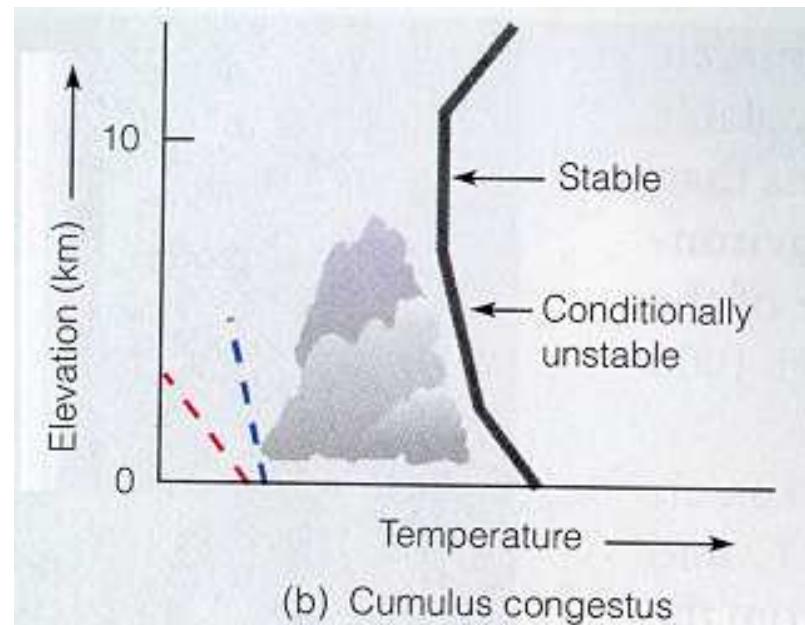
# NUBES CONVECTIVAS



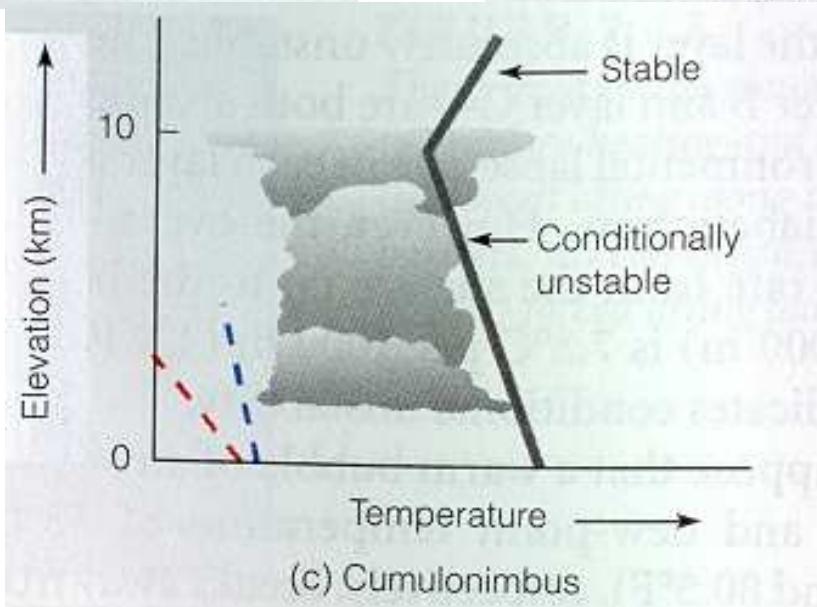
# DESARROLLO CONVECTIVO



(a) Cumulus humilis

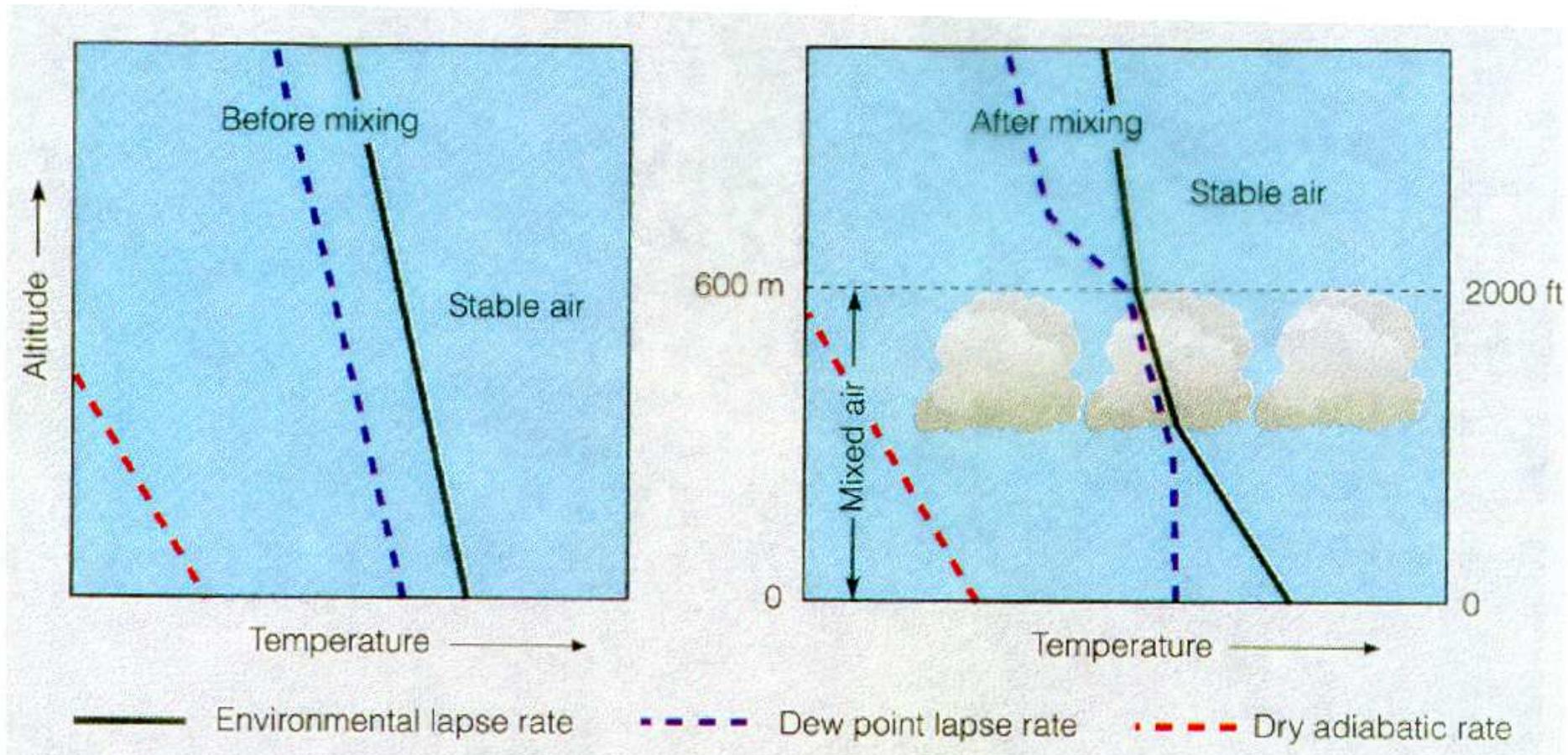


(b) Cumulus congestus

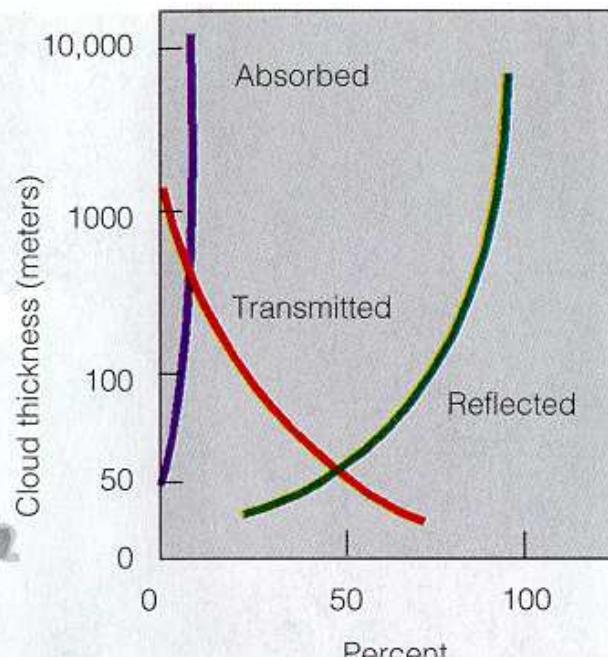
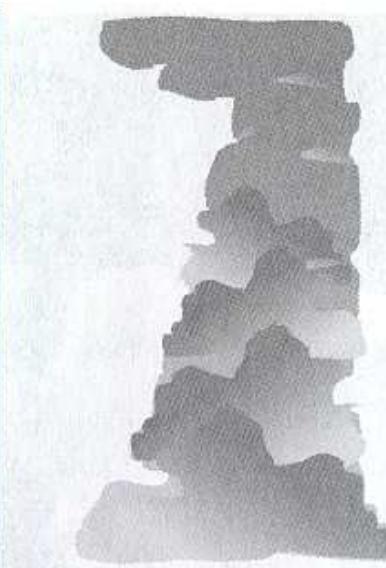
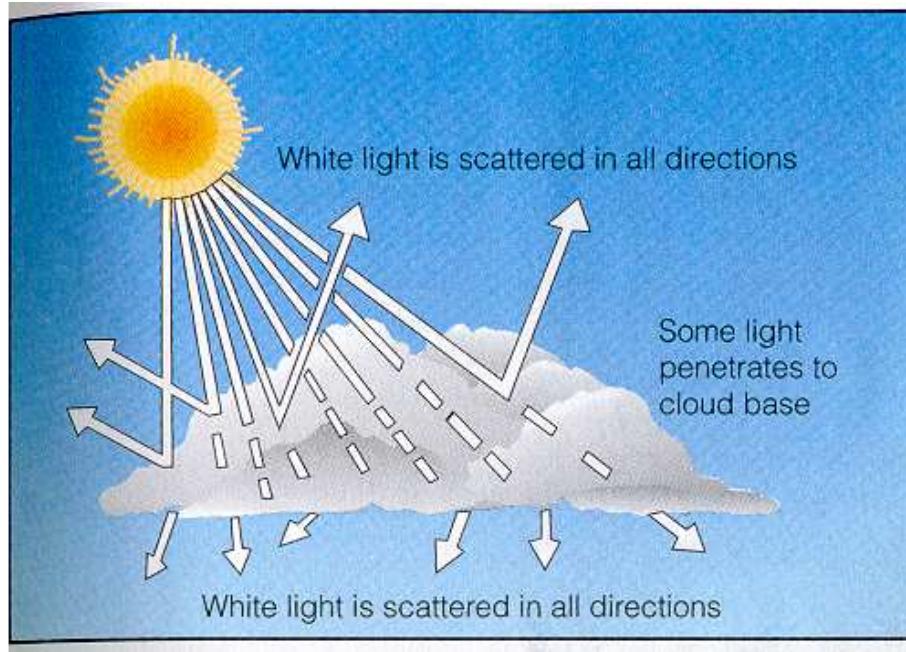


(c) Cumulonimbus

# FORMACIÓN DE ESTRATOCUMULOS



# NUBES-RADIACIÓN SOLAR



# TELEDETECCIÓN DE NUBES

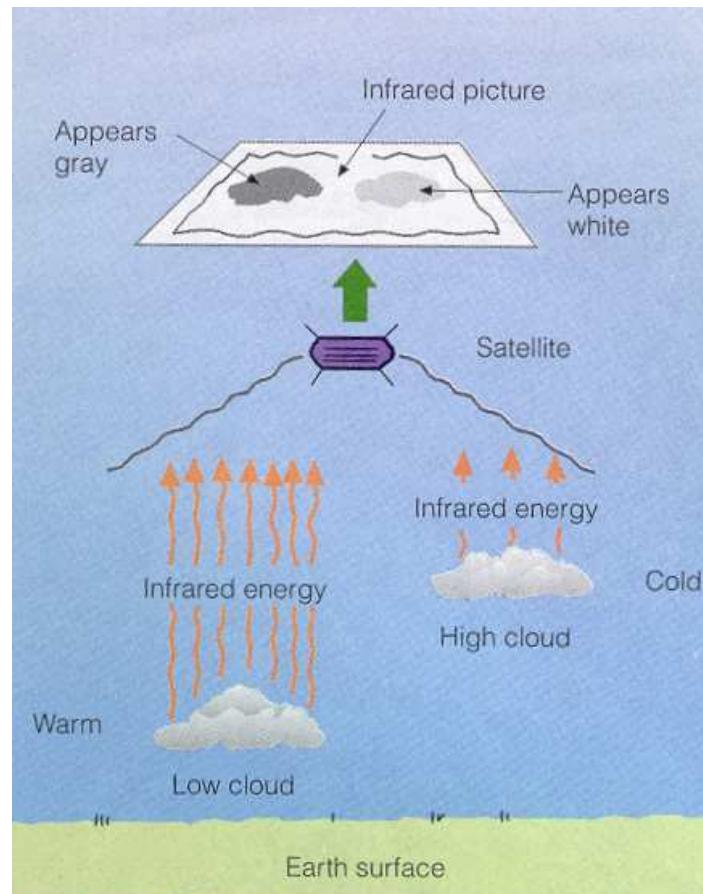


Imagen VISIBLE

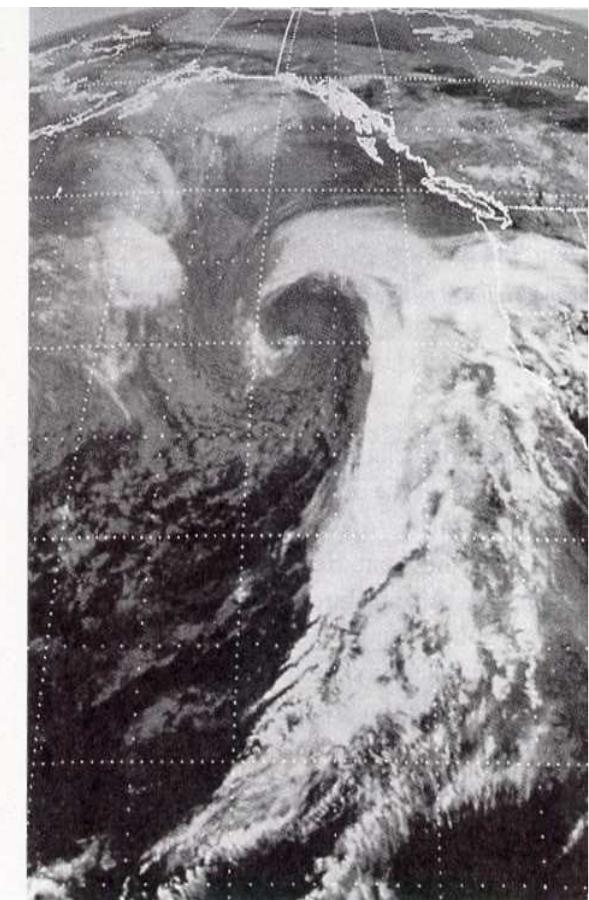
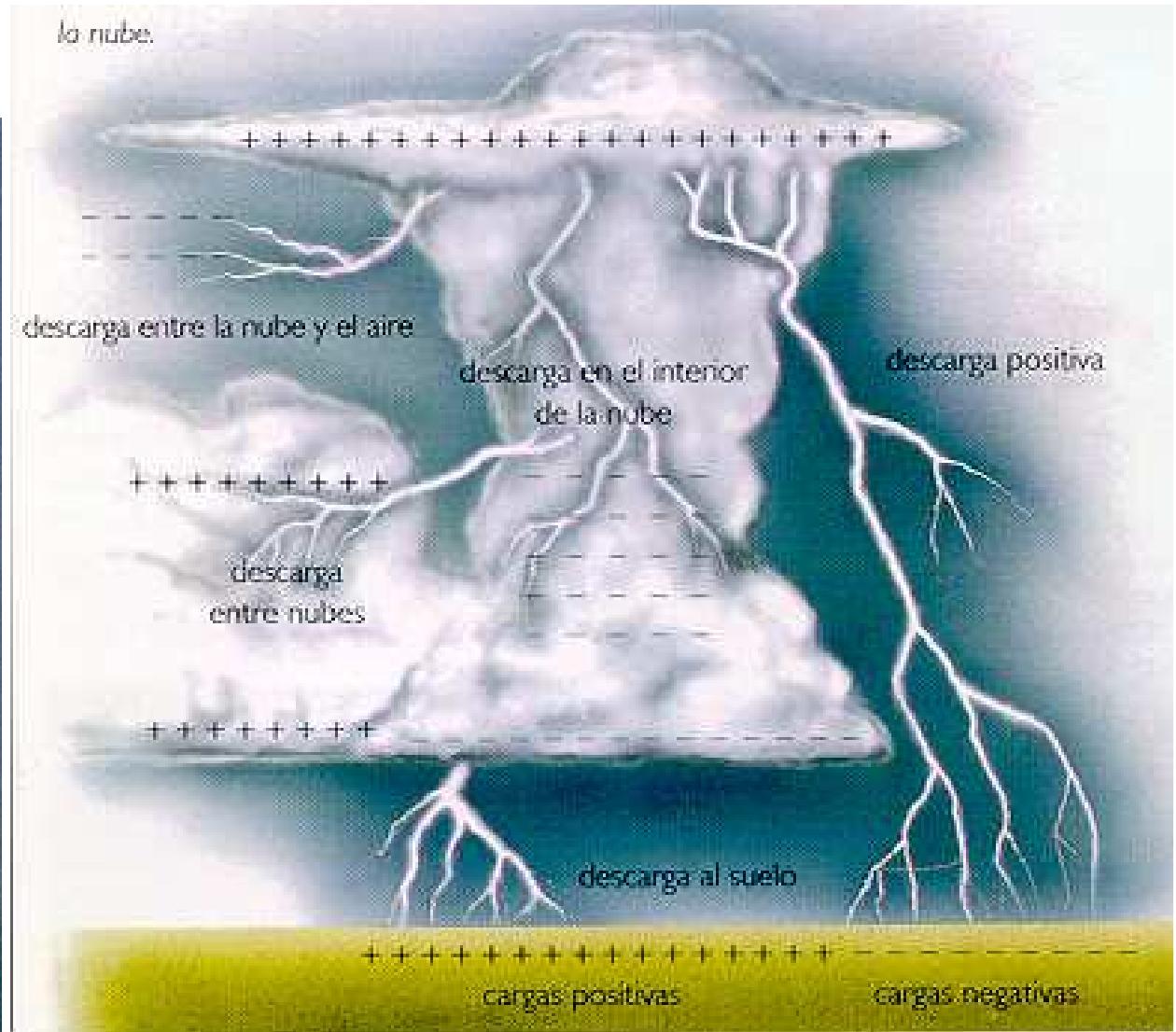
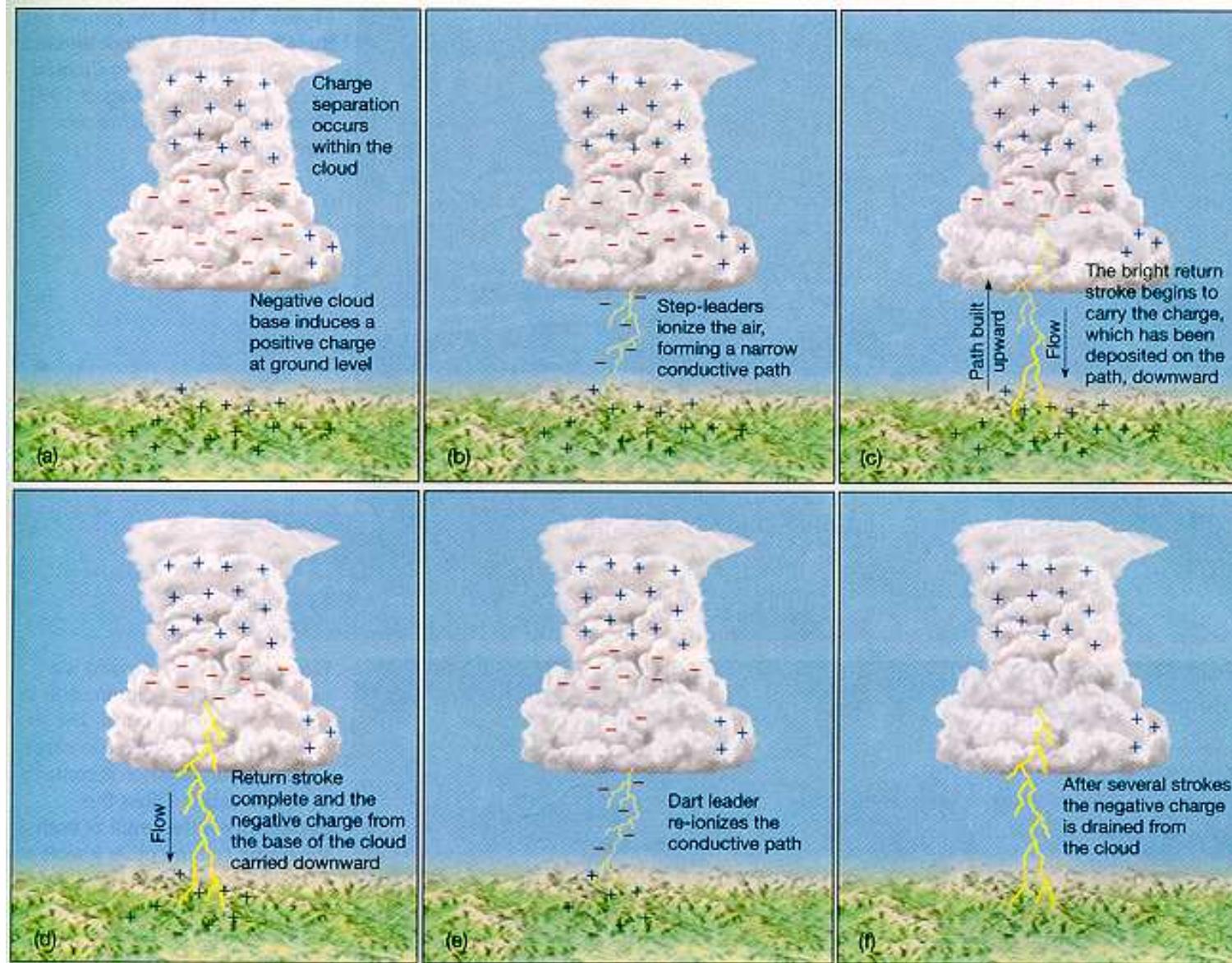


Imagen INFRARROJA

# DESCARGAS ELÉCTRICAS



# ELECTRICIFICACIÓN ATMOSFÉRICA



# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- Introducción.
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- Medida de la precipitación.

# NIEBLAS DE RADIACIÓN



# NIEBLA MARINA DE ADVECCIÓN



# NIEBLA DE EVAPORACIÓN

## SATURACION POR APORTE DE VAPOR DE AGUA

Aire  $T_{aire}, e, r, p$

Hay evaporación mientras  $e < e_s(T_{agua})$

Aqua  $T_{agua}$



$T_{aire} > T_{agua} \Rightarrow e < e_s(T_{agua}) < e_s(T_{aire})$

Cuando  $e = e_s(T_{agua}) < e_s(T_{aire})$   
cesa la evaporación



No saturación

$T_{aire} < T_{agua} \Rightarrow e < e_s(T_{aire}) < e_s(T_{agua})$

Cuando  $e = e_s(T_{aire}) < e_s(T_{agua})$  aire  
saturado y continúa evaporación



Condensación

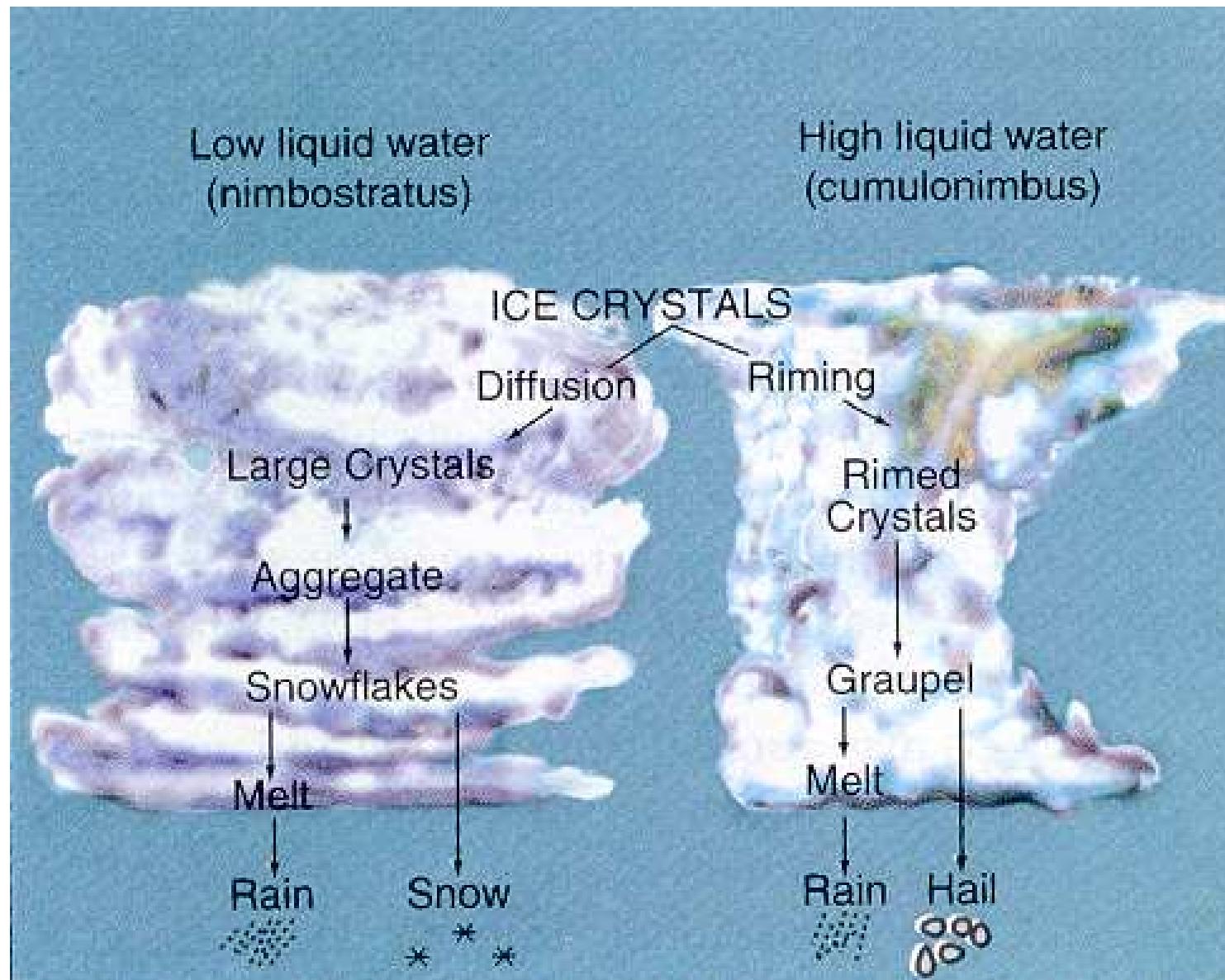


Nieblas de evaporación

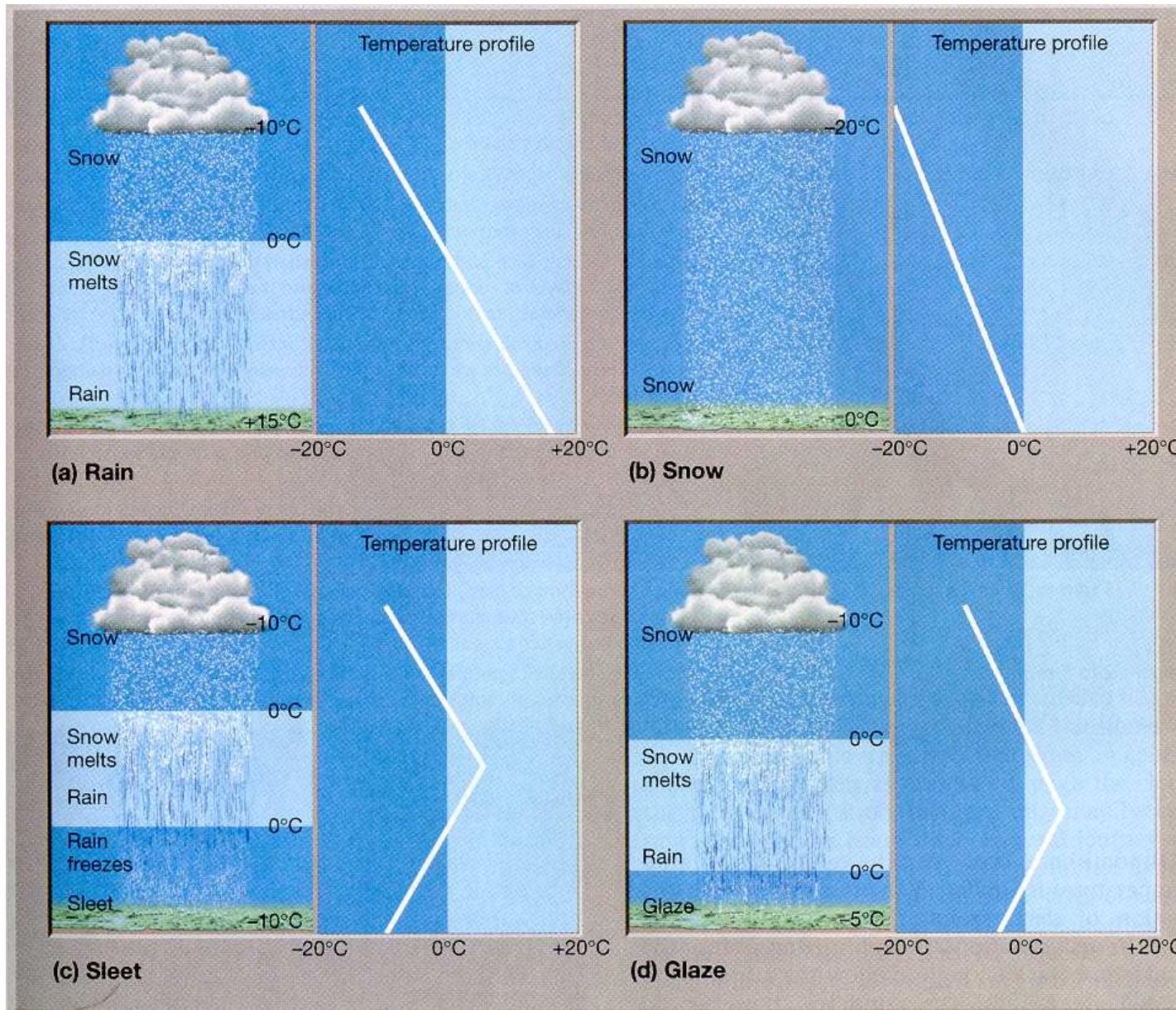
# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- Introducción.
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- Medida de la precipitación.

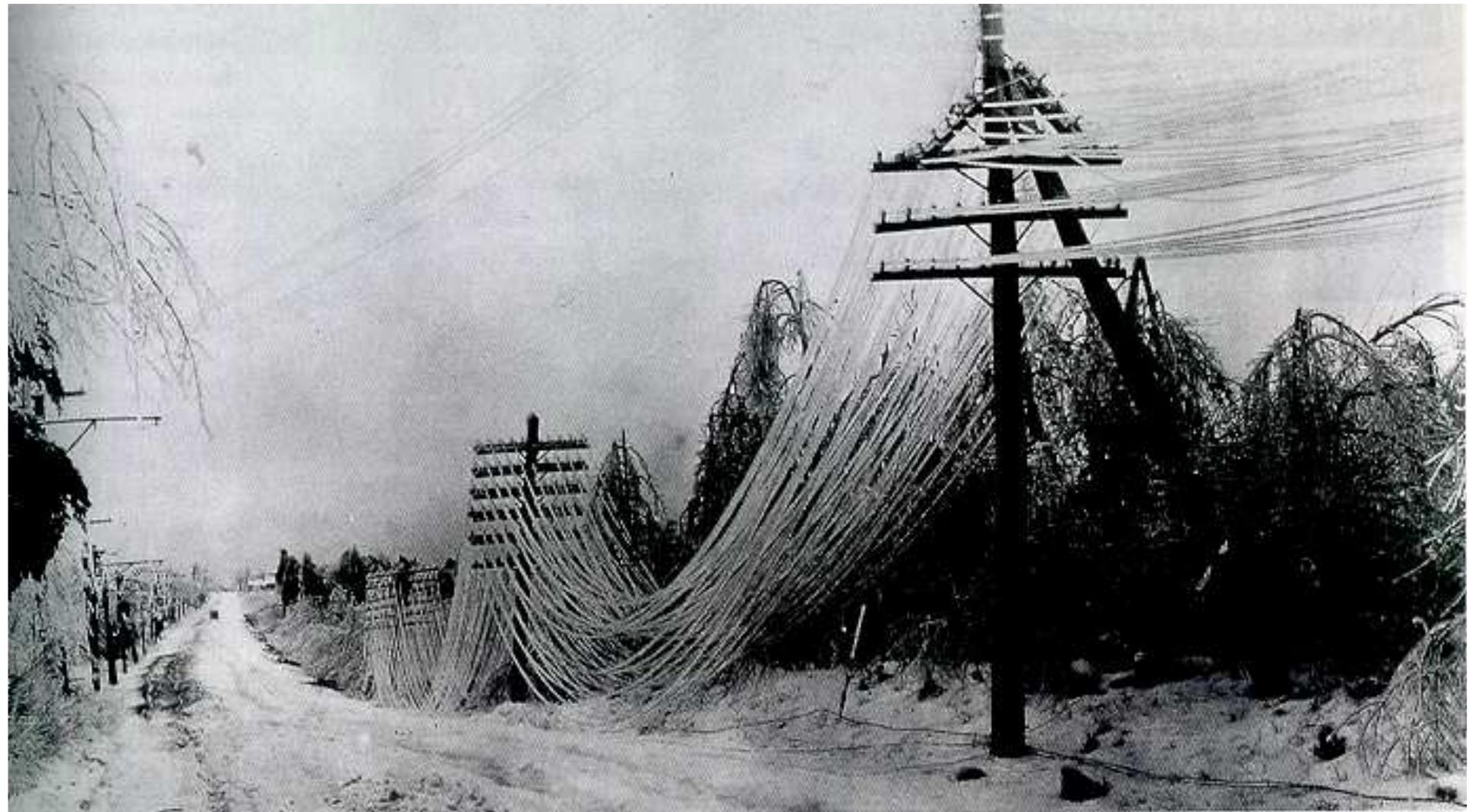
# PRECIPITACIÓN



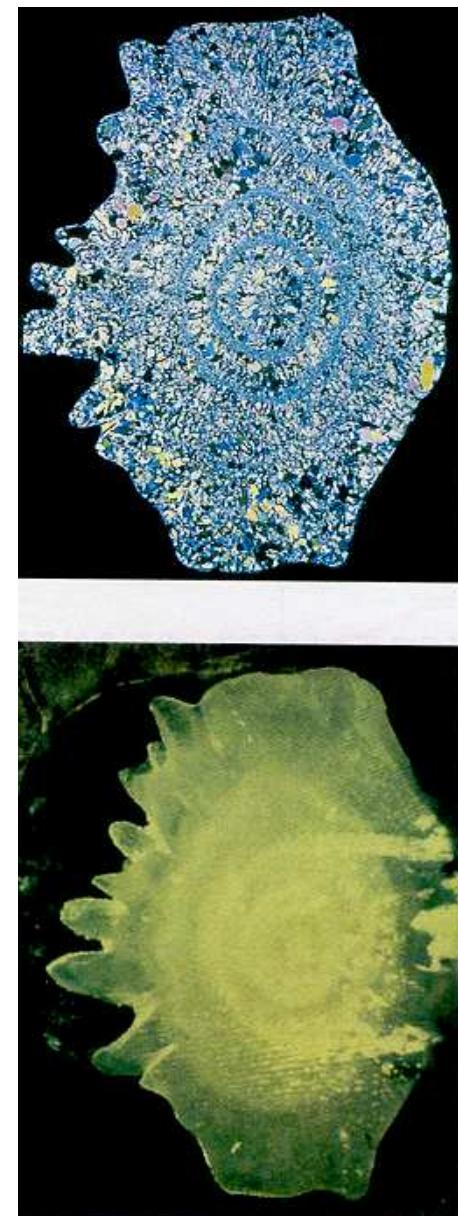
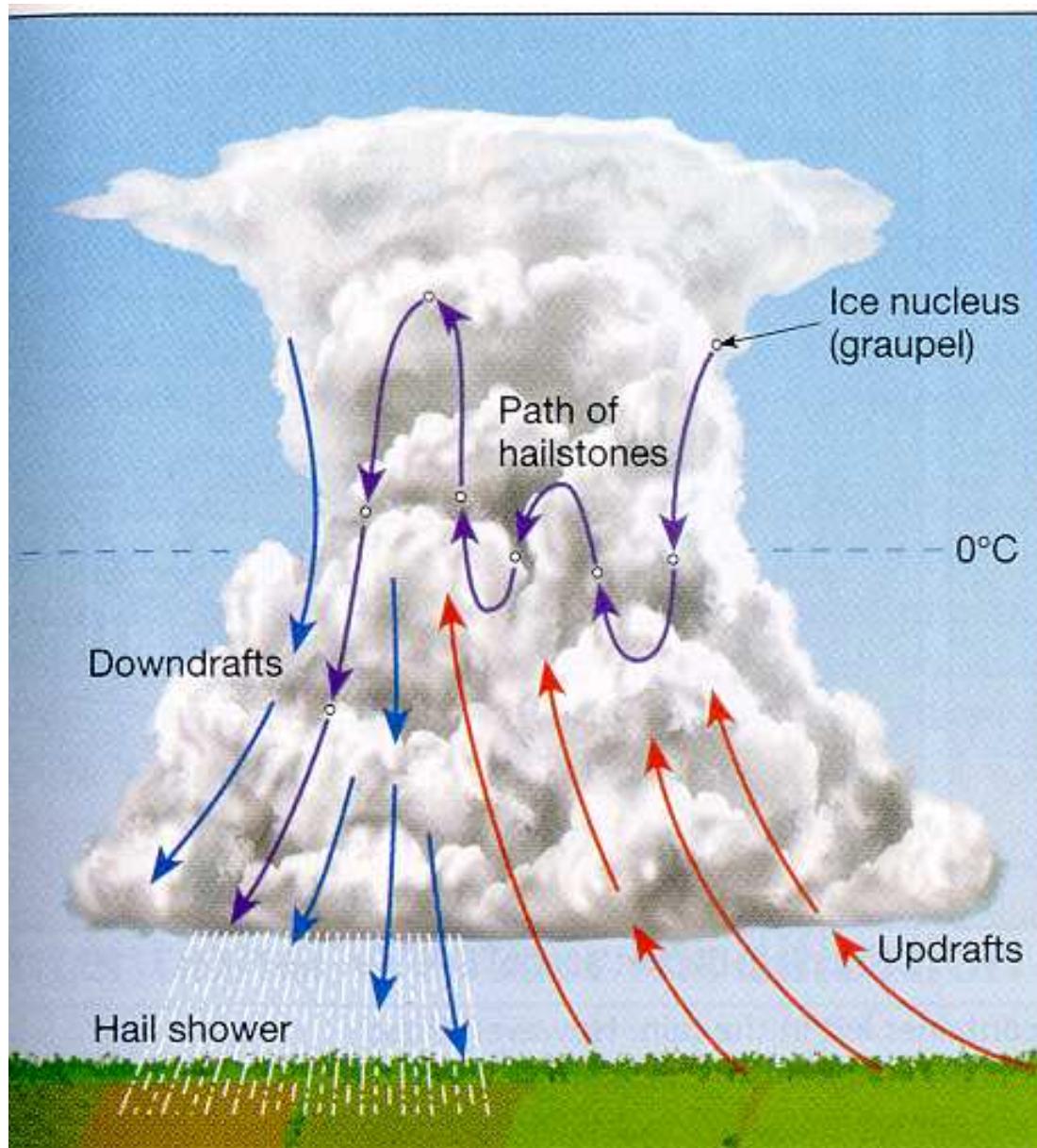
# FORMAS DE PRECIPITACIÓN



# LLUVIA ENGELANTE



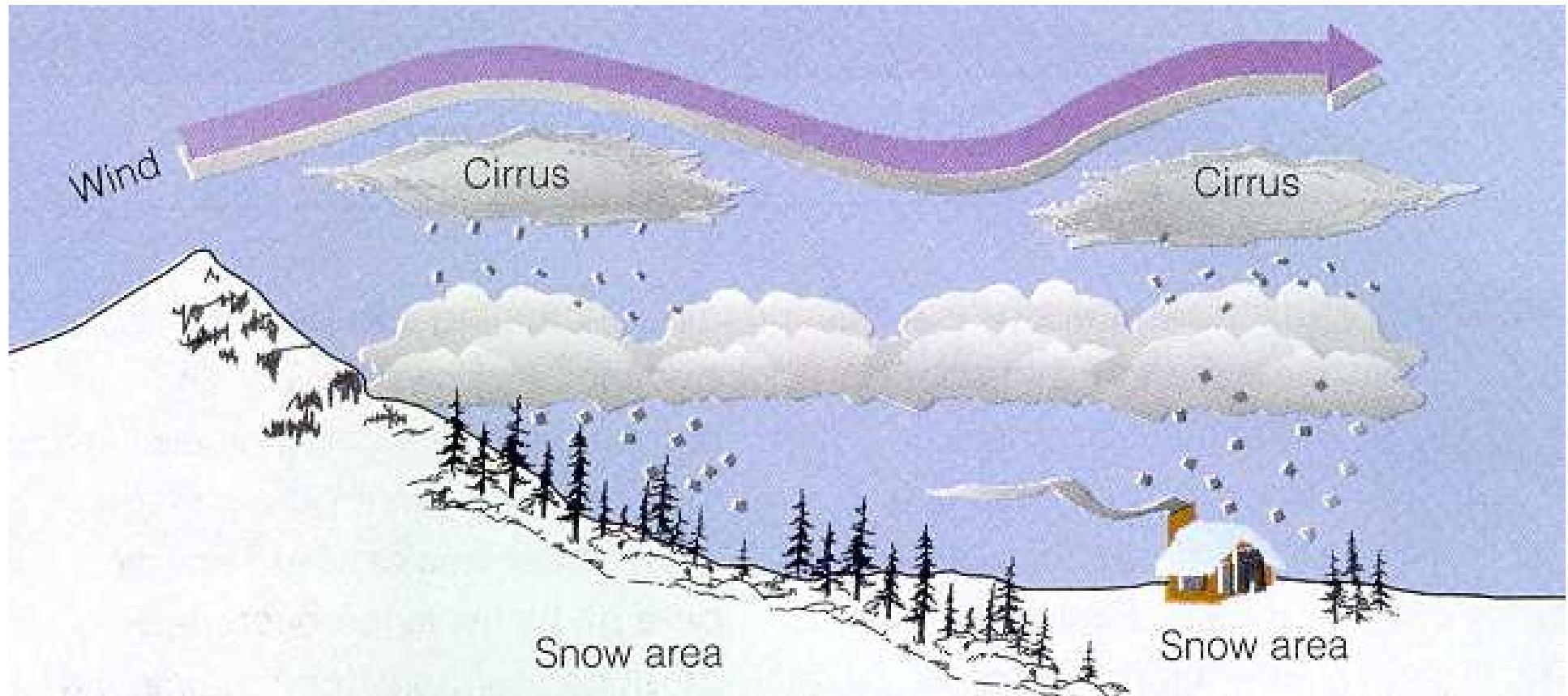
# GRANIZO



# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- Introducción.
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- Medida de la precipitación.

# LLUVIA ARTIFICIAL



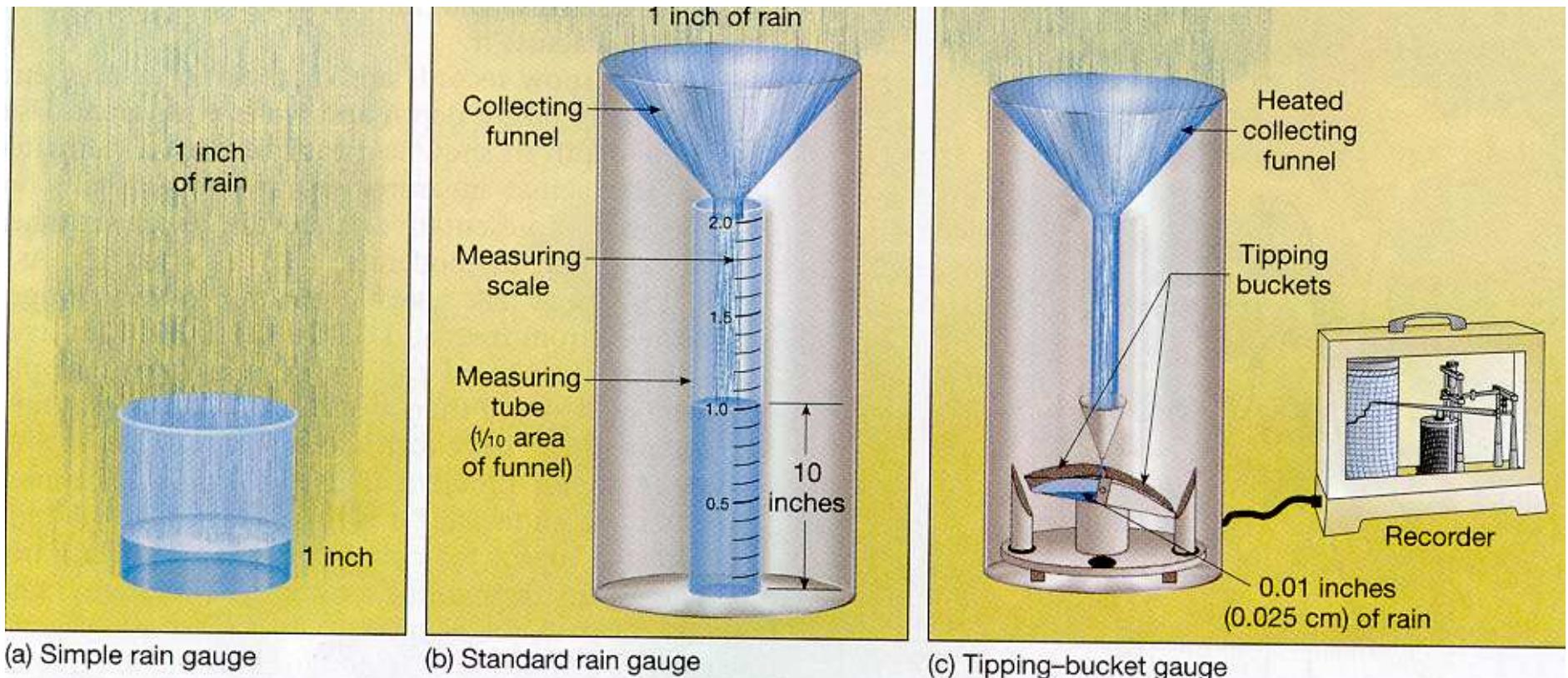
Hielo seco ( $\text{CO}_2$ ) Produce enfriamiento ( $-78^\circ\text{C}$ )

AgI (Núcleo de congelación activo a  $-4^\circ\text{C}$ )

# TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- Introducción.
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
  - Clasificación.
  - Efectos radiativos.
- Nieblas. Clasificación. Mecanismos de formación.
- Formas de precipitación.
- Modificación artificial de las nubes y la precipitación.
- **Medida de la precipitación.**

# PLUVIÓMETROS



(a) Simple rain gauge

(b) Standard rain gauge

(c) Tipping-bucket gauge

