



Meteorología y Climatología

2º Ciencias Ambientales
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Granada



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

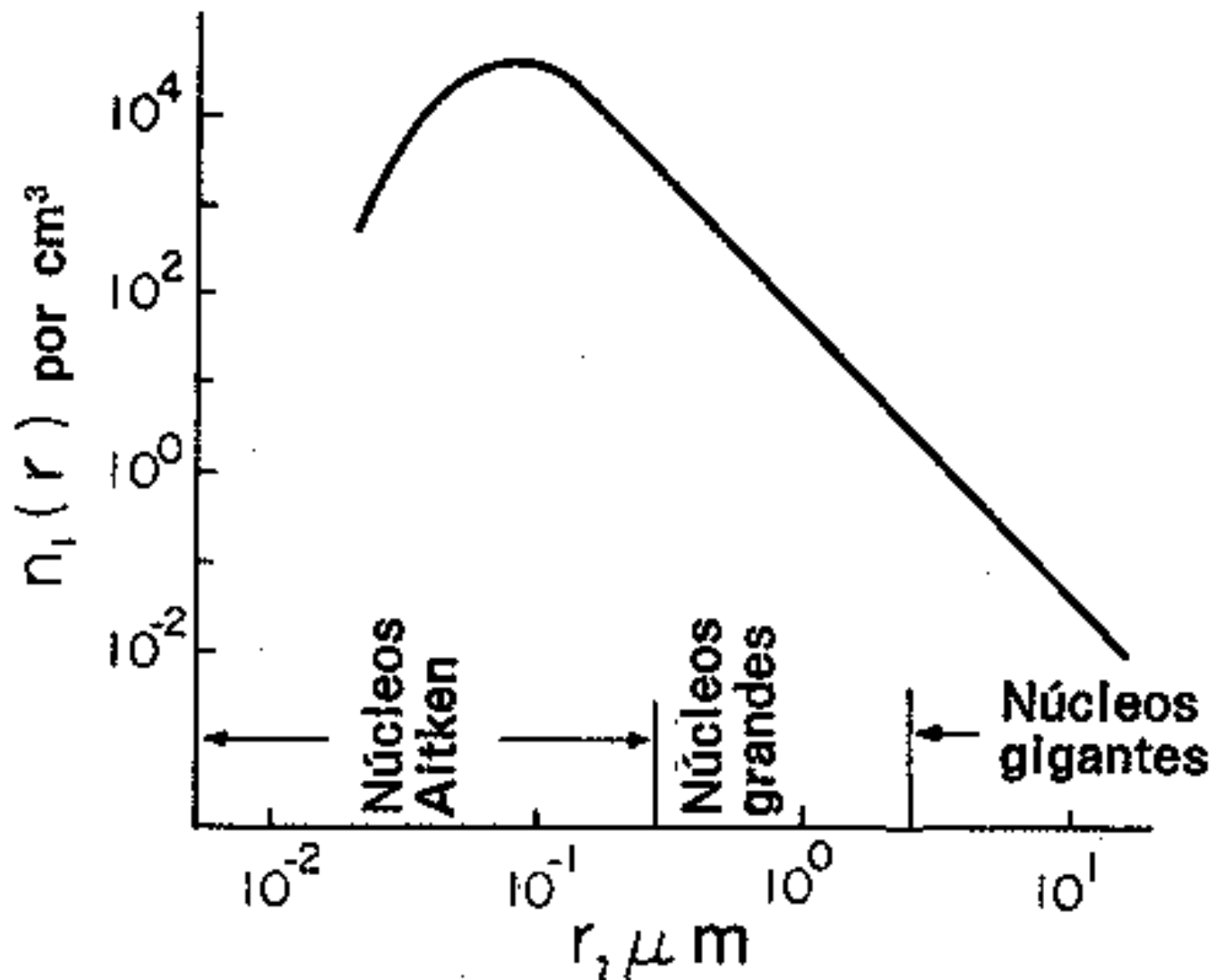
- **Introducción.**
- Mecanismos de condensación.
- Nucleación homogénea y heterogénea. Núcleos de condensación.
- Microfísica de nubes cálidas. Procesos de crecimiento de gotas.
- Microfísica de nubes frías. Núcleos de hielo. Crecimiento de cristales de hielo.
- Nubes.
 - Clasificación.
 - Efectos radiativos.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

AEROSOL ES ATMOSFÉRICOS

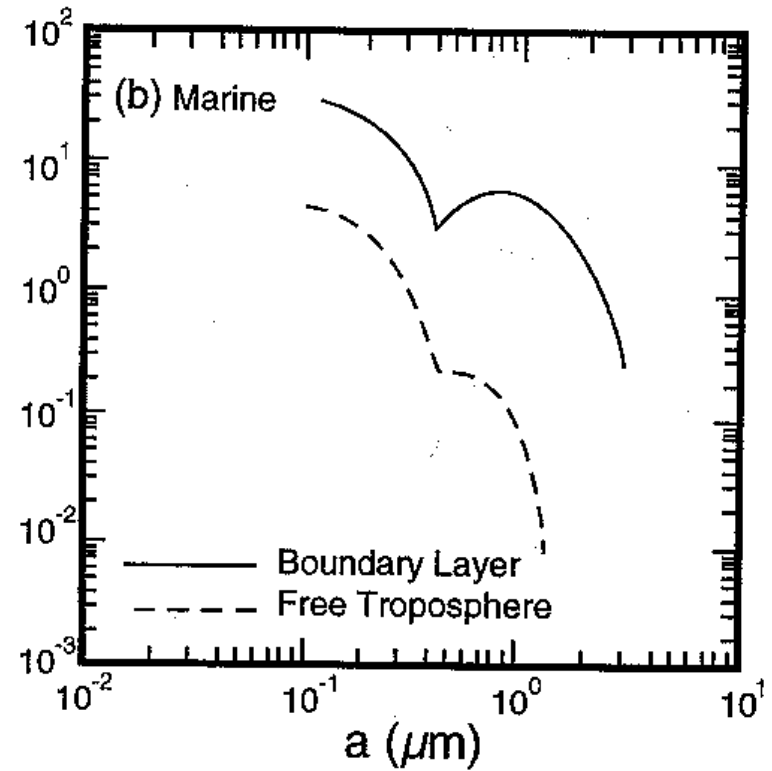
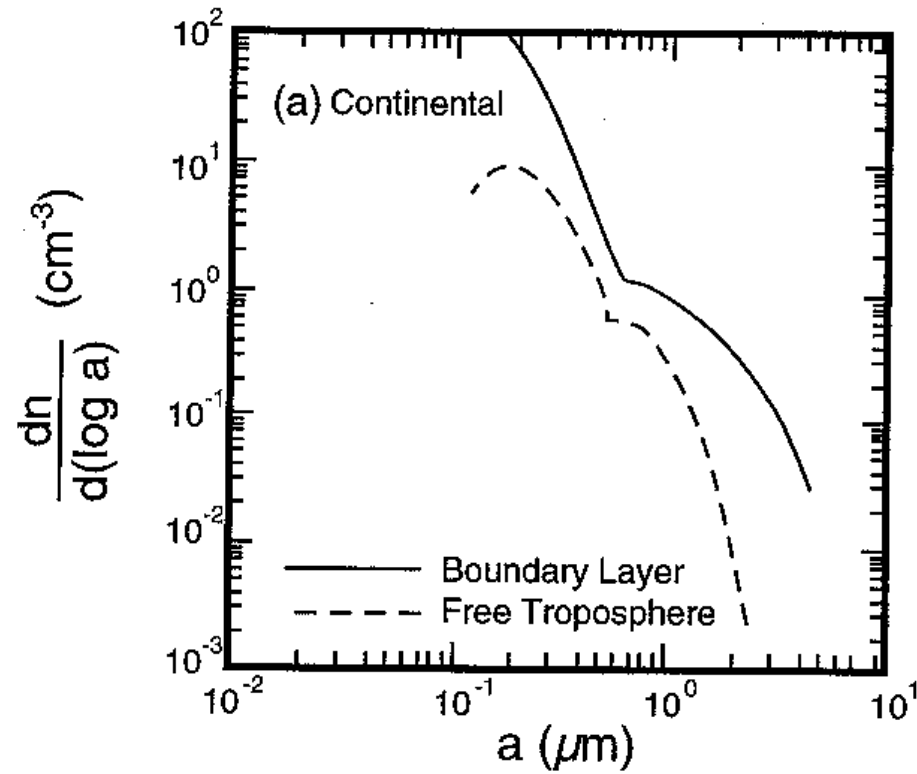
PARTÍCULAS DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO

Partícula	Radio (μm)	N° de partículas (por cm ³)		Origen	Vida Media
		Rango	Típico		
Aitken	<0.1	10³-10⁵	1-1000	Combustión. Conversión gas-partícula	Días
Grandes	0.1 a 1.0	1-1000	100	Coagulación núcleos Aitken Evaporación de gotas	Días
Gigantes	>1.0	1-10	1	Polvo Emisiones industriales Evaporación de gotas	Horas-días. Minutos-horas

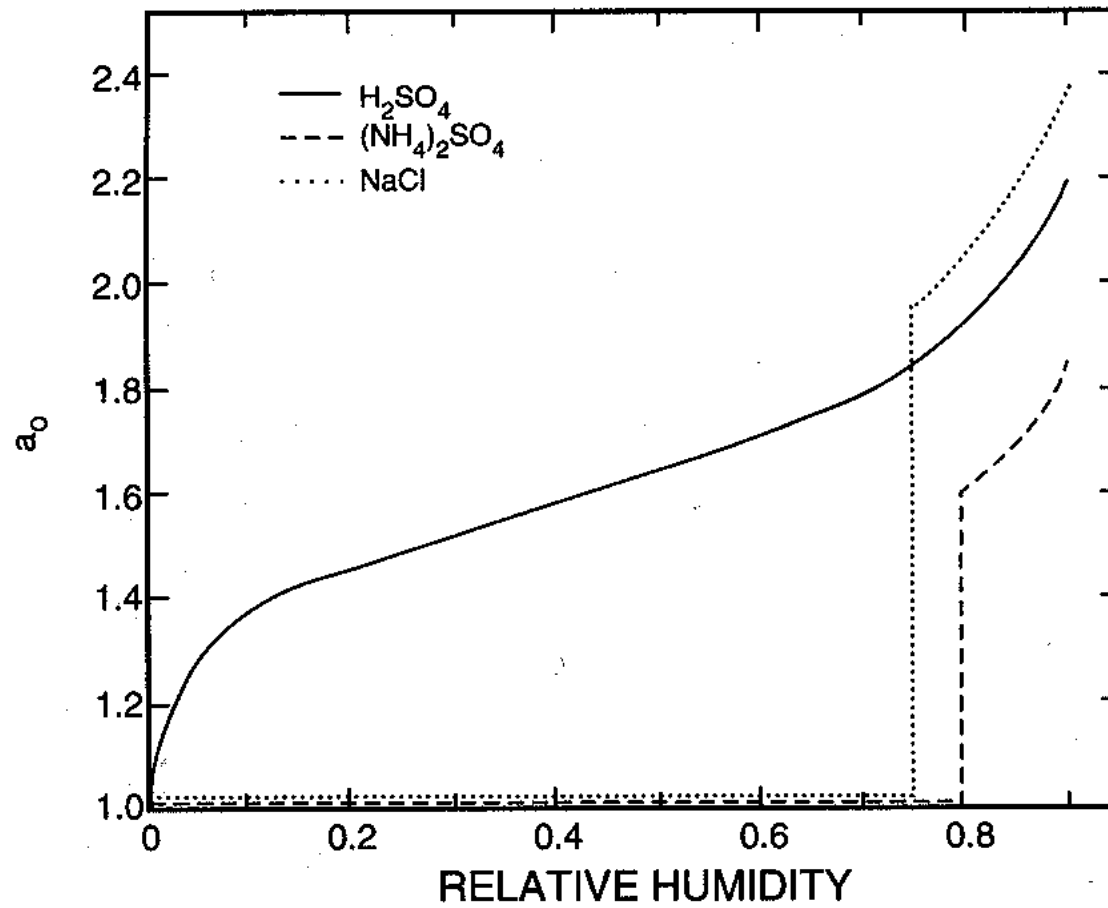
PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS



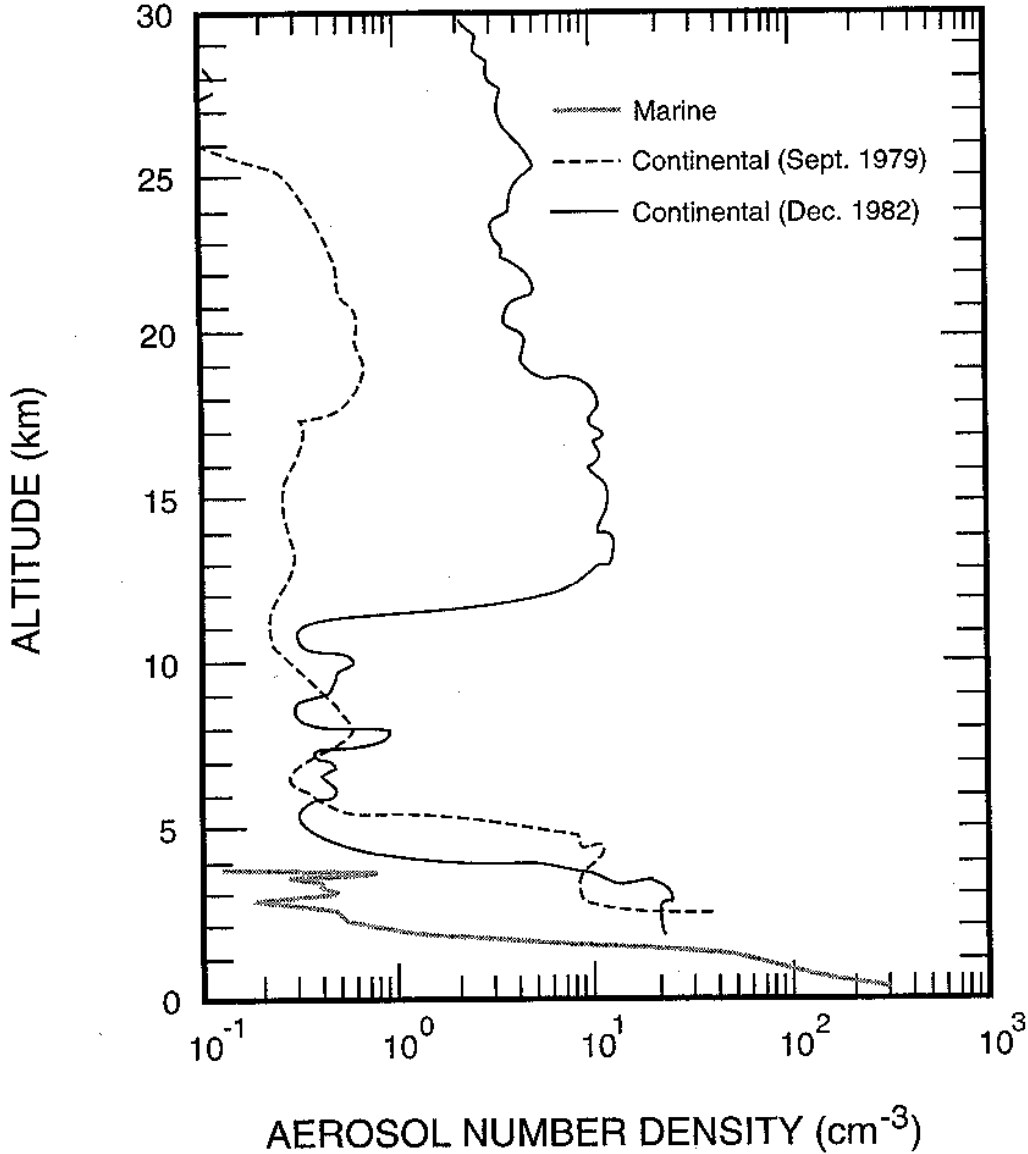
DISTRIBUCIONES DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS



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

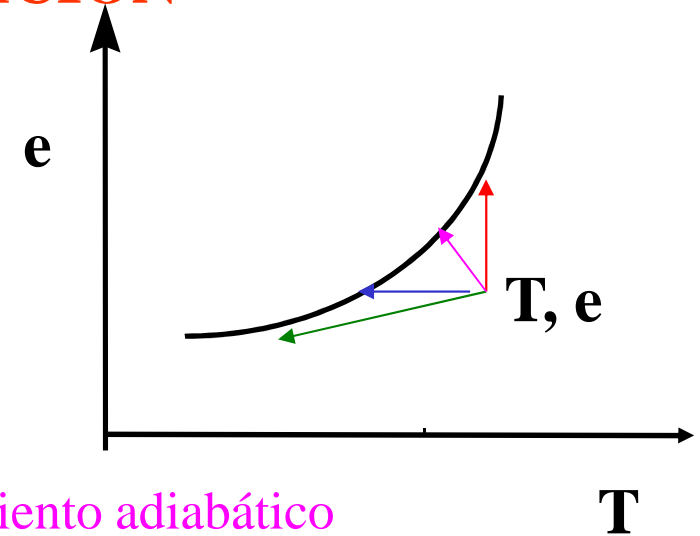
MODOS DE CONDENSACIÓN

A) $T \downarrow$

- A1) Enfriamiento isóbaro con $r = \text{cte}$ 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) $r \uparrow$
 $T = \text{cte}$

Aire T_{aire}, e, r, p
Agua T_{agua}

Evaporación
 $e < e_s(T_{\text{agua}})$

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

$$\text{Cuando } e = e_s(T_{\text{aire}}) < e_s(T_{\text{agua}})$$

el aire se satura pero continúa la evaporación

Condensación \Rightarrow Nieblas de evaporación

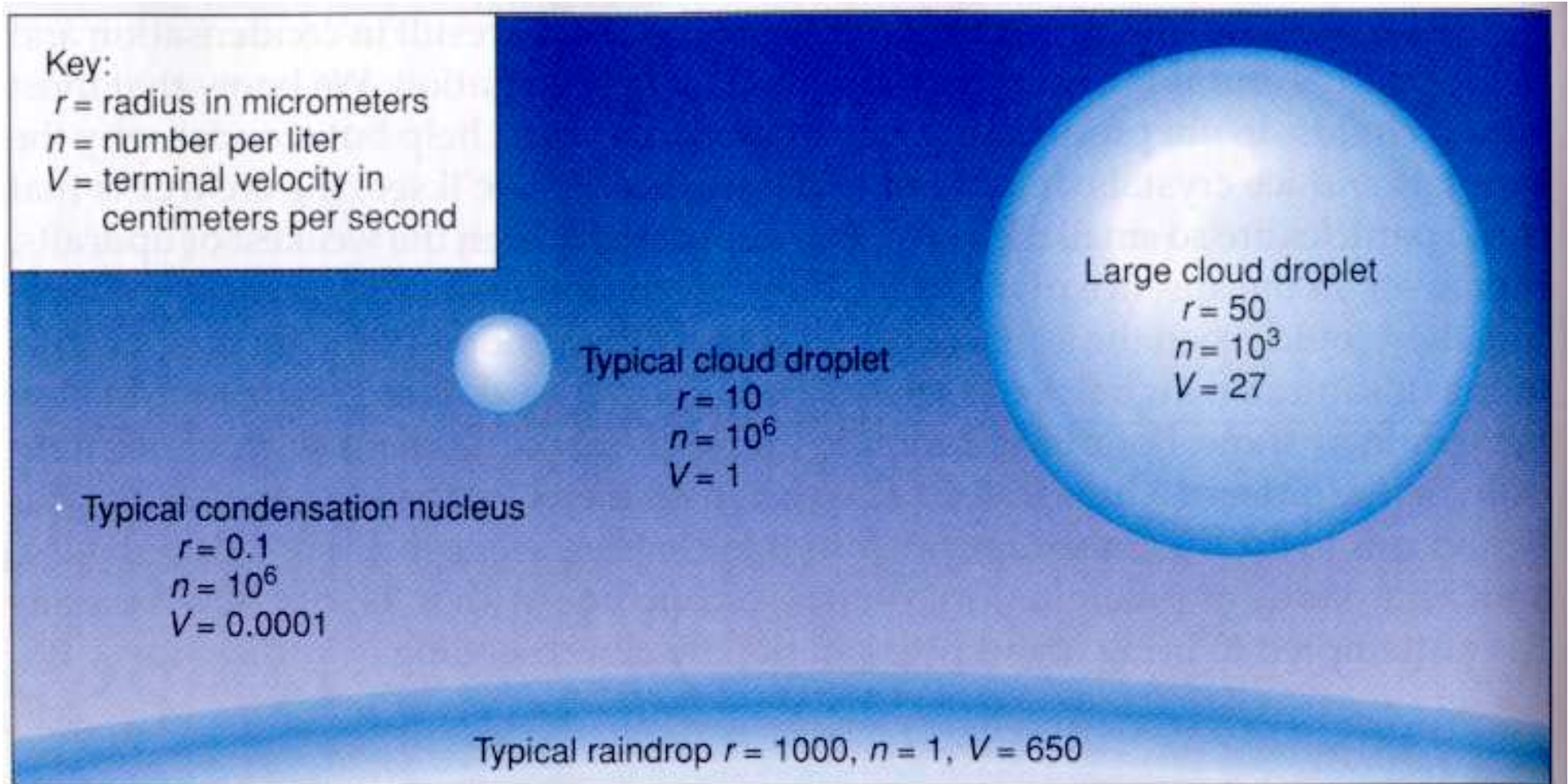
ROCIO Y ESCARCHA



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.

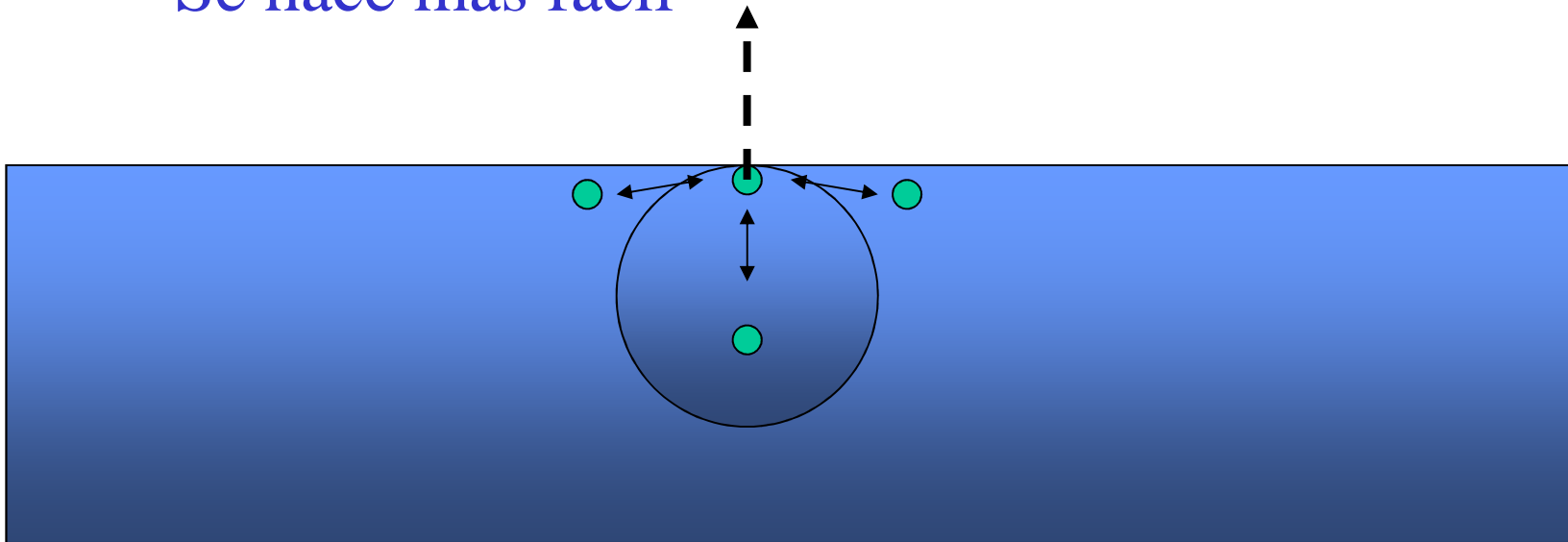
TAMAÑOS DE GOTAS



Evaporarse:

Hay que superar atracciones

- Curvatura –
 - Menos atracciones
 - Se hace más fácil

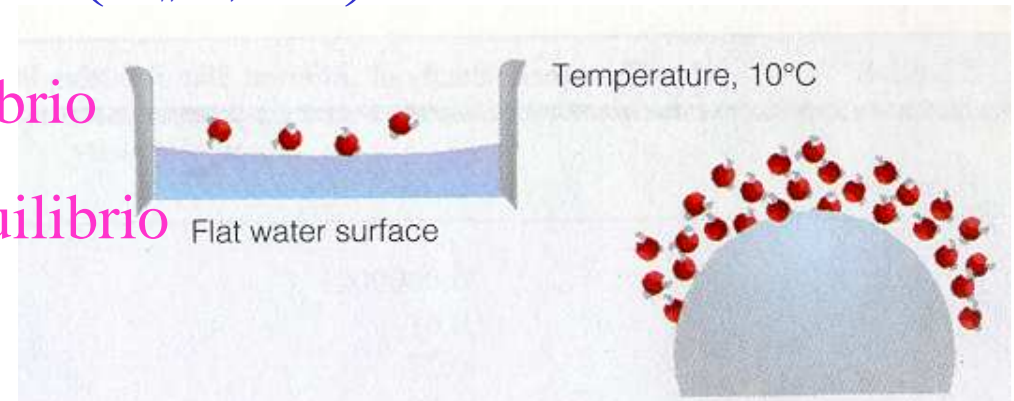


NUCLEACIÓN HOMOGÉNEA

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

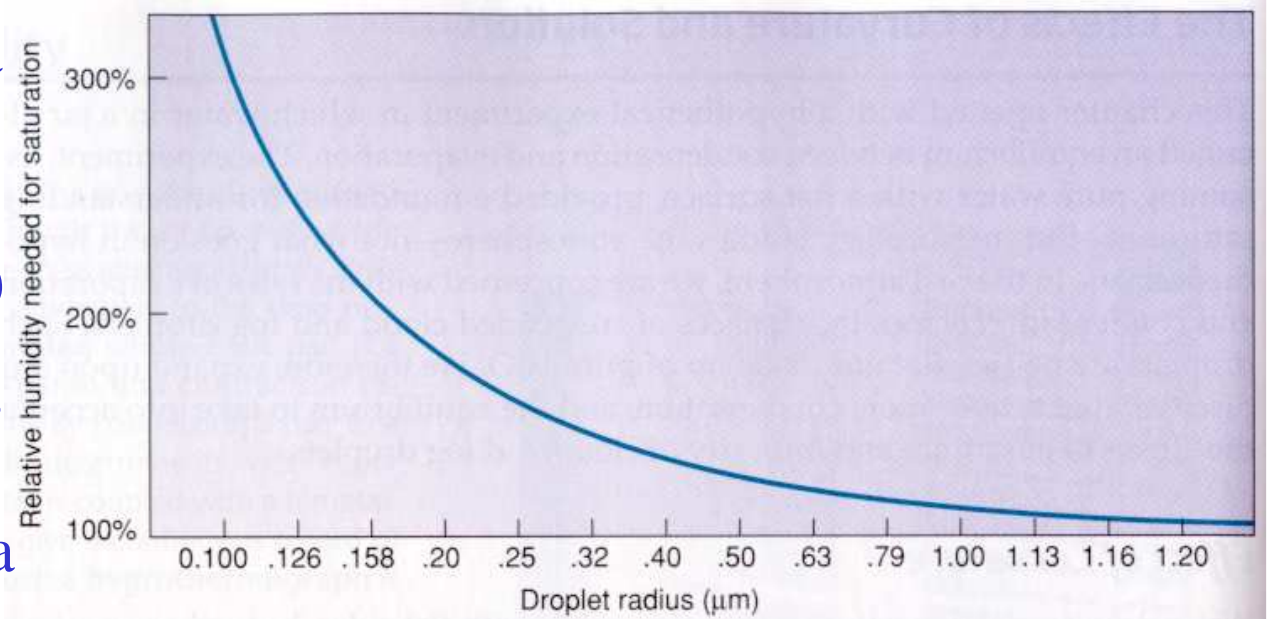


Efecto de la curvatura

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

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

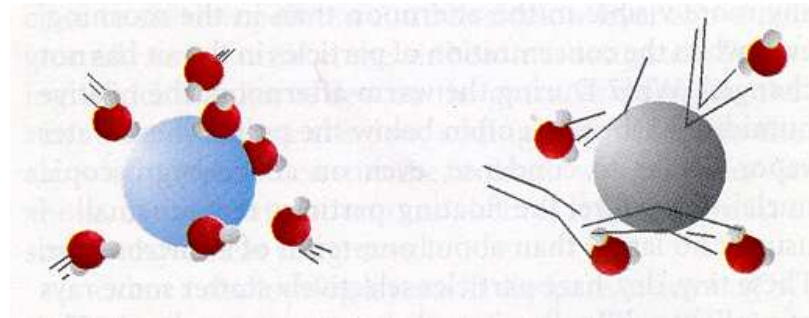
NÚCLEOS DE CONDENSACIÓN

AEROSOLES

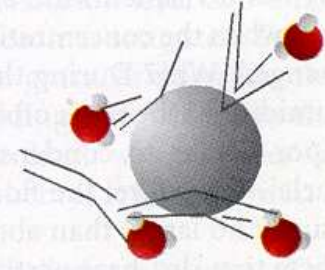
Partícula	Radio (μm)	Nº de partículas (por cm^3)		Eficacia
		Rango	Típico	
Aitken	<0.2	10^3-10^5	1000	Baja
Grandes	0.2 a 2.0	1-1000	100	Alta
Gigantes	>2.0	1-10	1	Muy alta

EFECTOS DE LA DISOLUCIÓN

Partícula hidrófila



Partícula hidrófoba



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

Ley de Raoult

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

Disoluciones
diluidas

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

$$n_s = iN_A M_s / m_s$$

$$n_w = N_A M_w / m_w$$

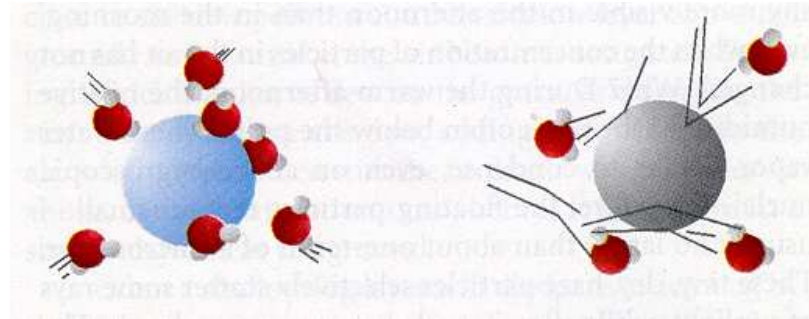
e' presión de vapor en el equilibrio
 e_s presión de vapor en el equilibrio
sobre superficie plana de agua

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

EFEKTOS 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

Valores críticos de saturación y de radio

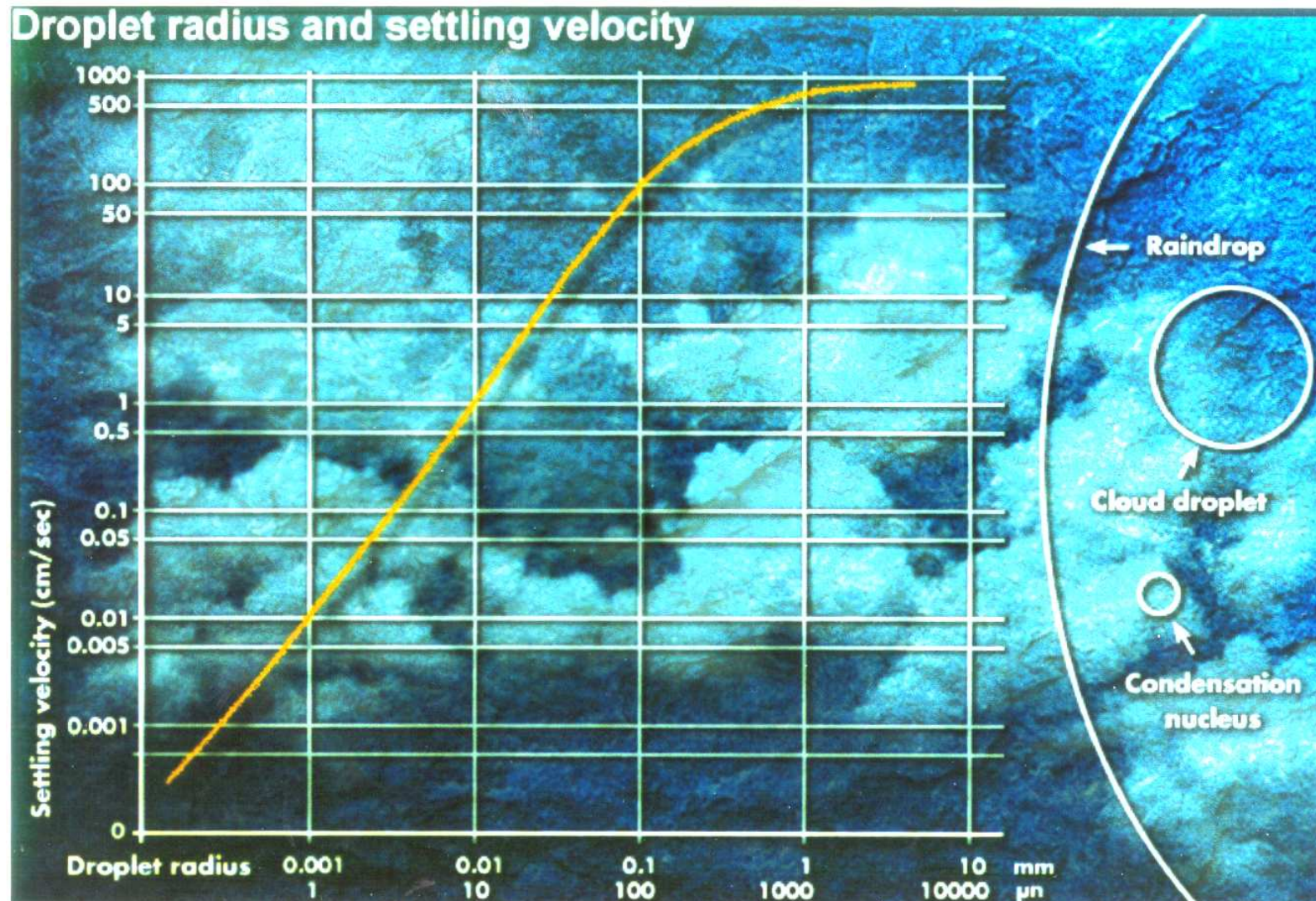
$$\frac{e'}{e_s} \approx 1 + \frac{a}{r} - \frac{b}{r^3}$$

Para estudios avanzados en la física de la atmósfera

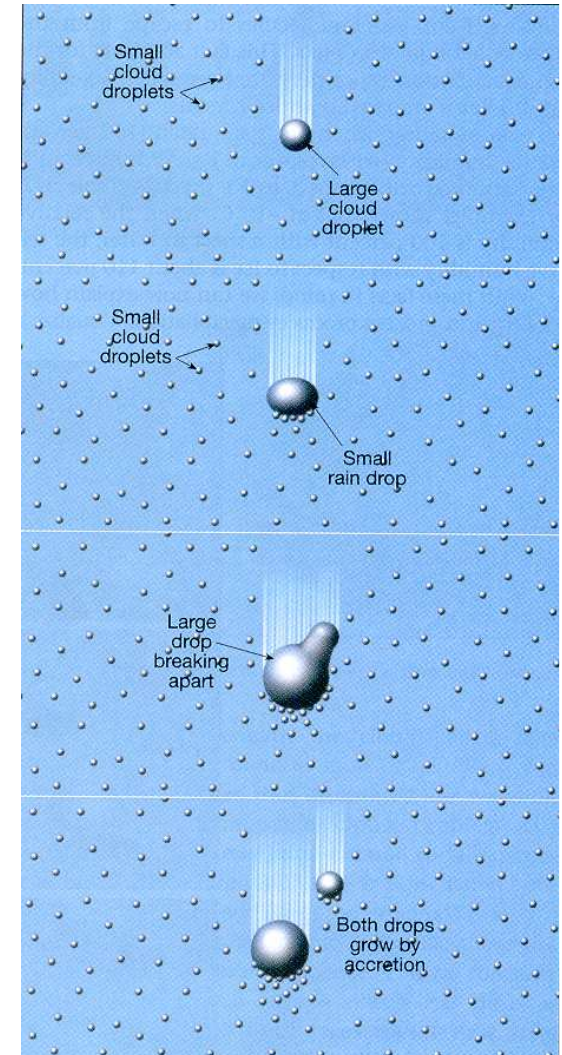
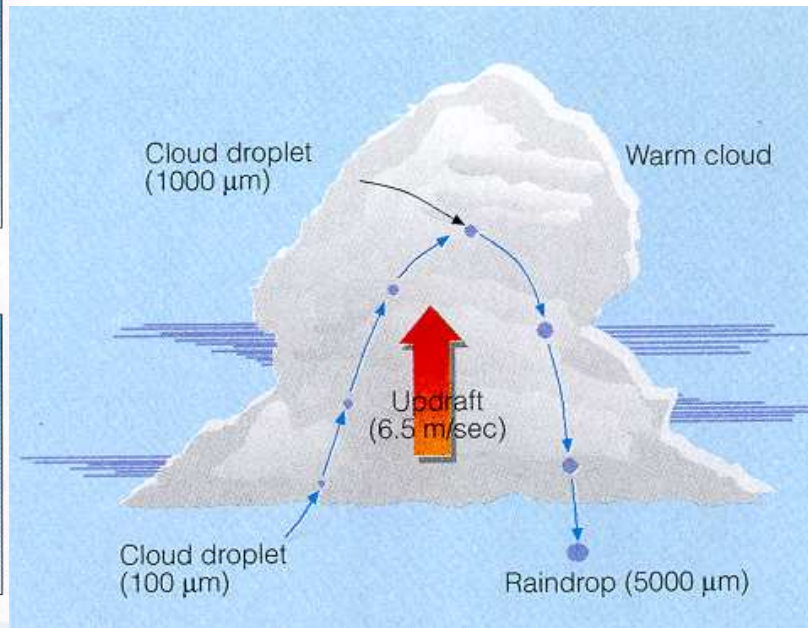
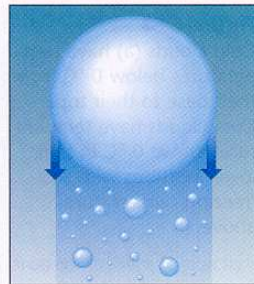
TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- 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.

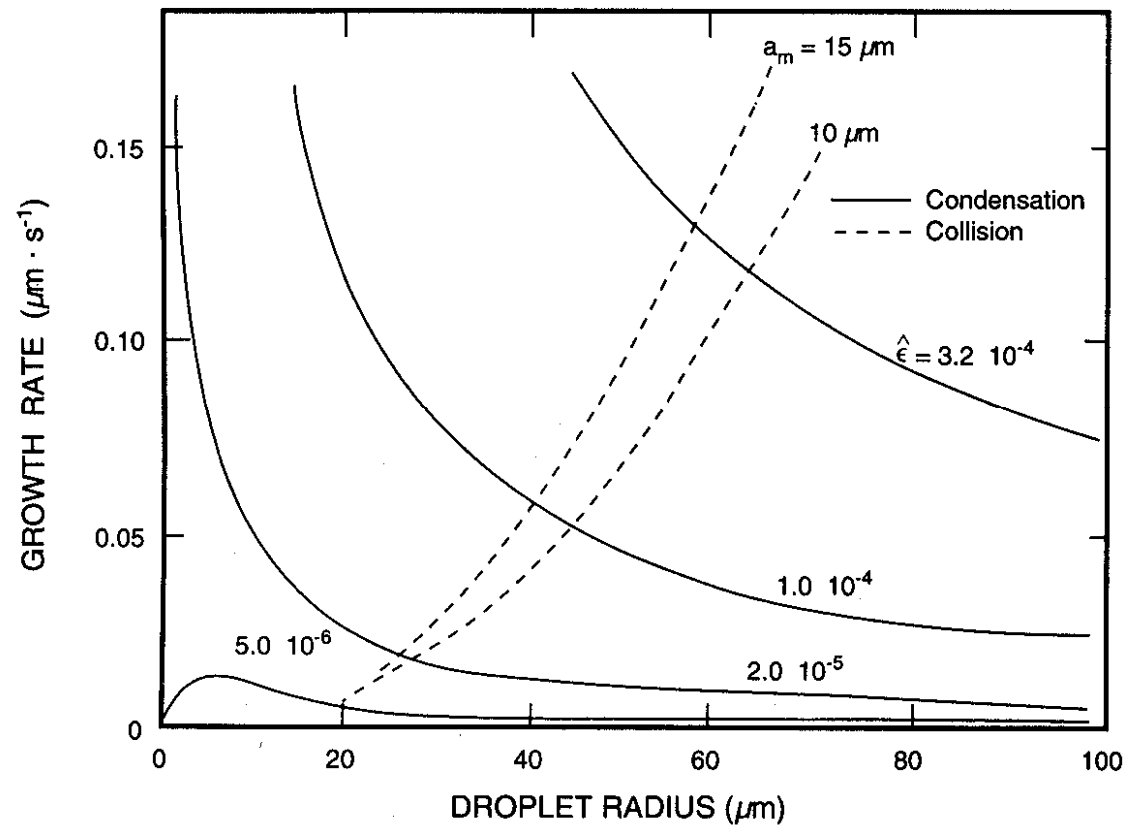
PRECIPITACIÓN VELOCIDAD TERMINAL



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°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)

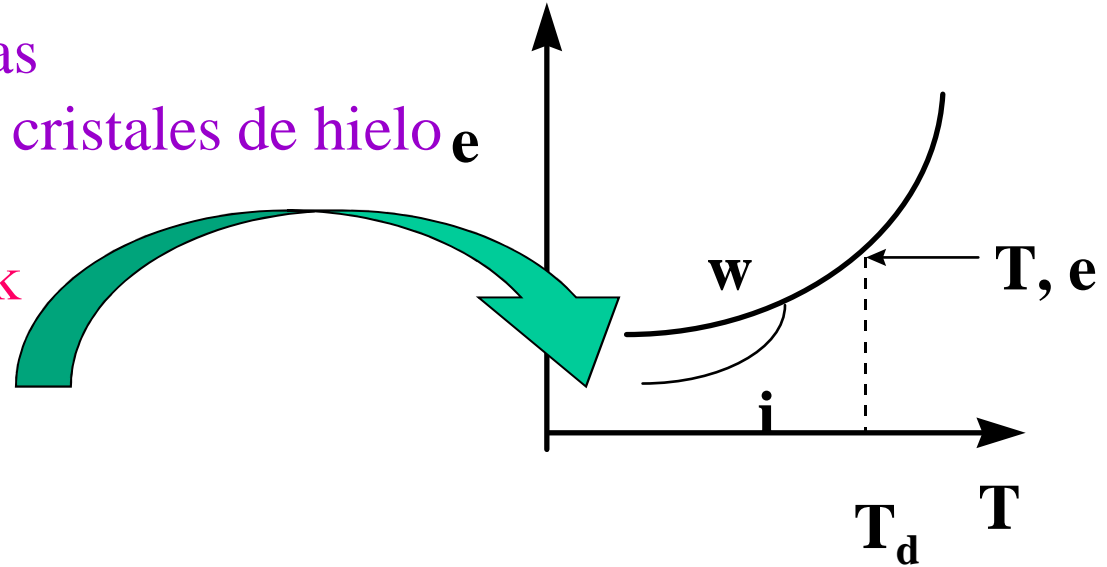
PRECIPITACIÓN DESDE NUBES MIXTAS

Nubes mixtas

Gotas de agua subfundida y cristales de hielo e

Para $T < 273 \text{ K}$

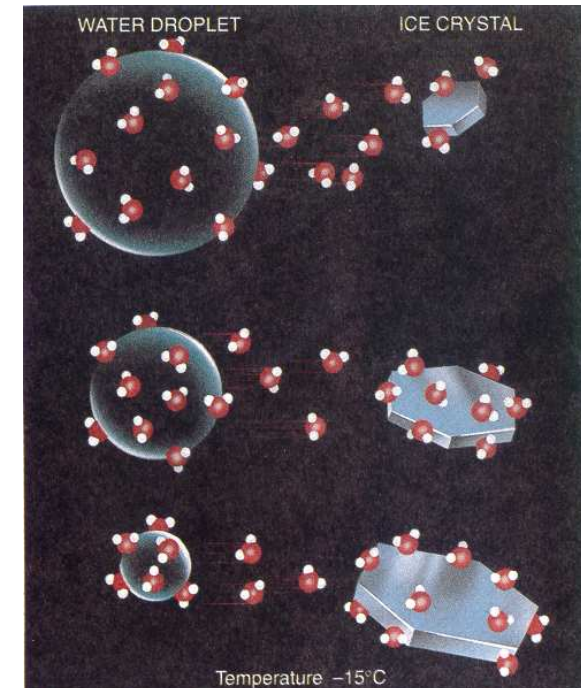
$$e_i(T) < e_w(T)$$



El vapor está saturado sobre el hielo
pero no sobre agua

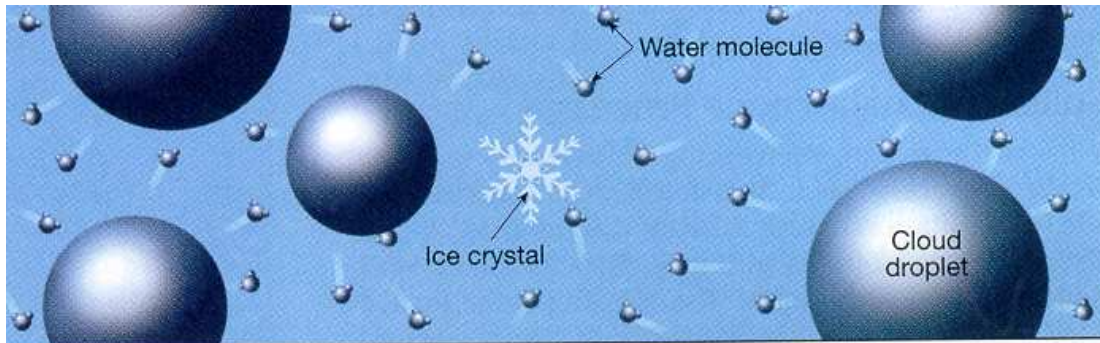
Luego la gota evapora y se produce
sublimación sobre el hielo.

Hielo crece a costa del agua subfundida



PRECIPITACIÓN DESDE NUBES MIXTAS

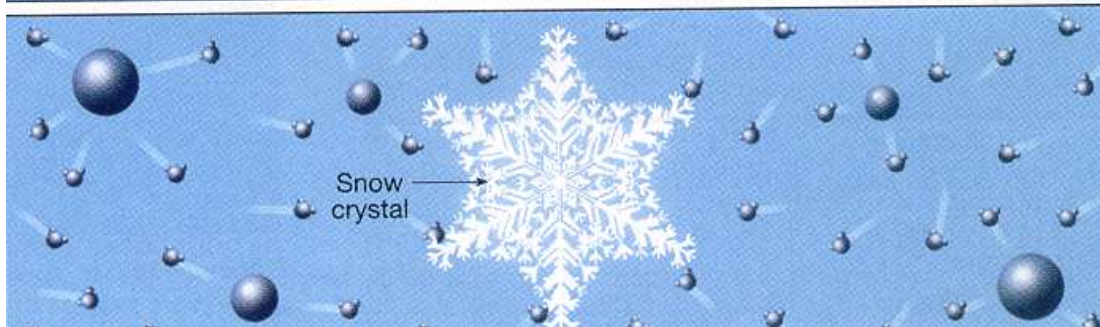
TEORÍA DE BERGERON-FINDEISEN



Condensación sobre hielo
Evaporación agua subfundida
↓
Crecimiento de cristales hielo



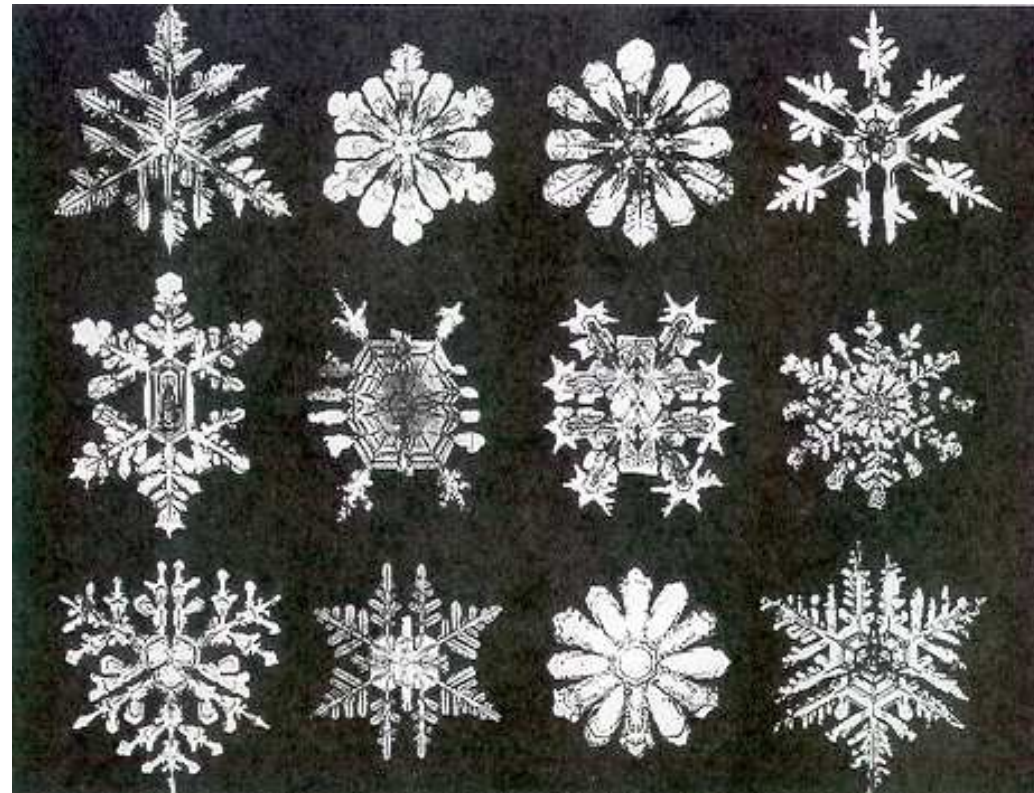
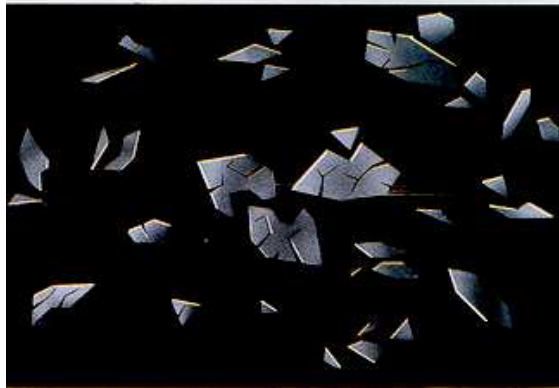
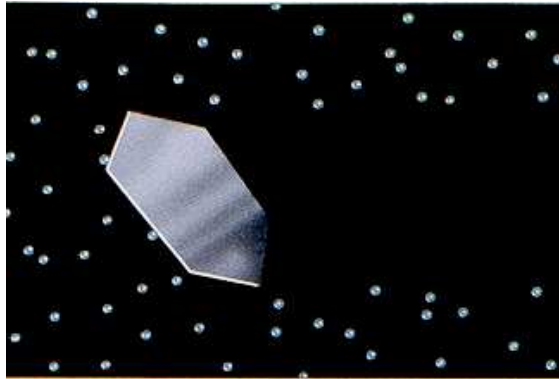
Agregación
Colisiones de cristales de
hielo



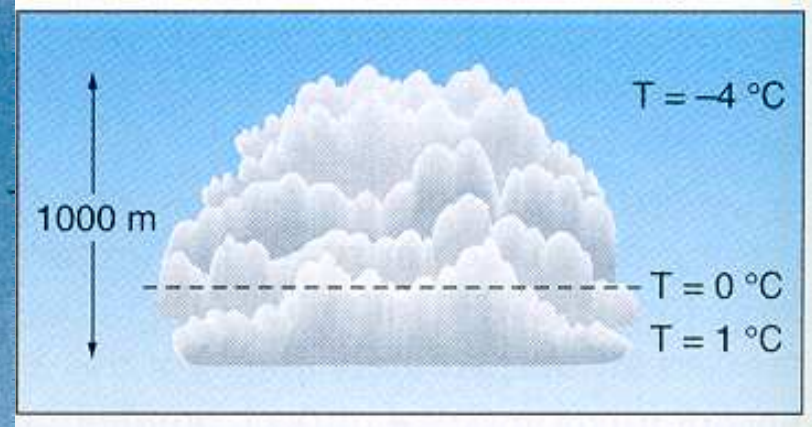
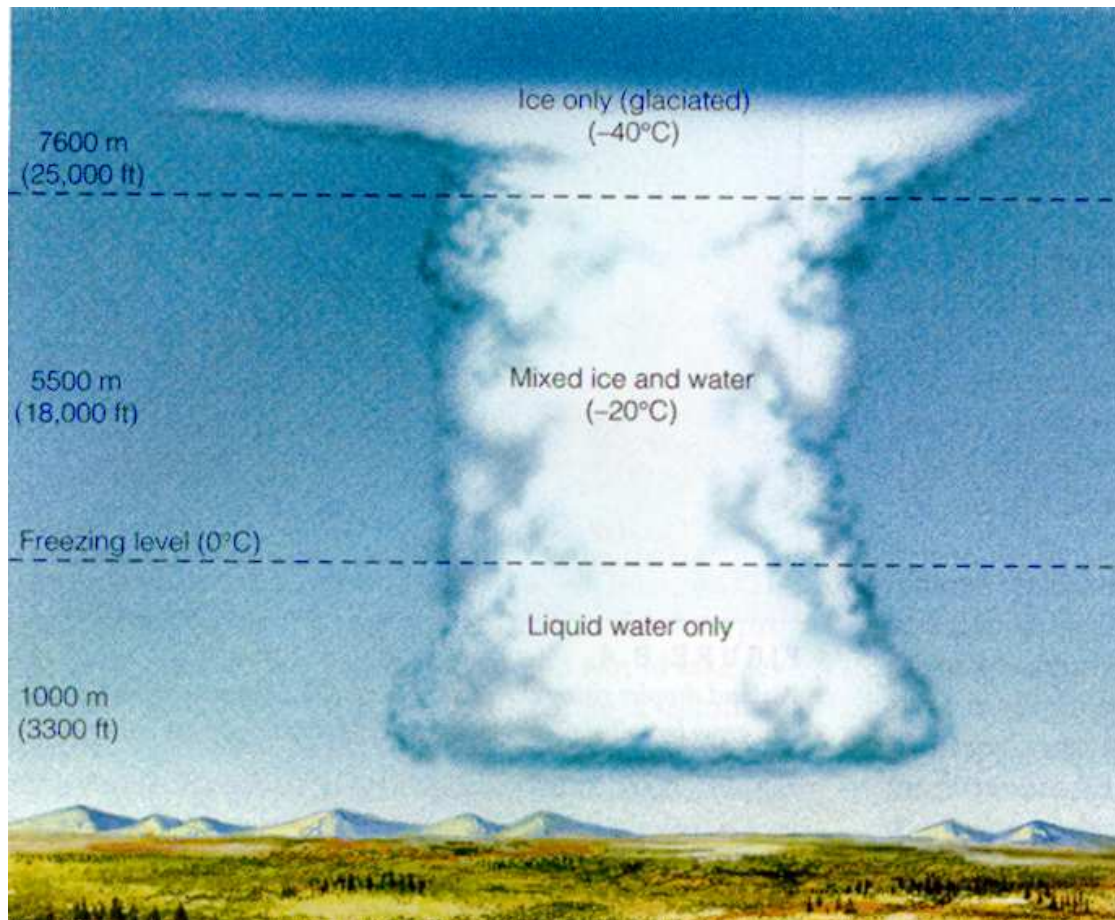
Copos de nieve

Acreción
Colisiones de cristales
de hielo con gotitas de
agua subfundida

AGREGACIÓN



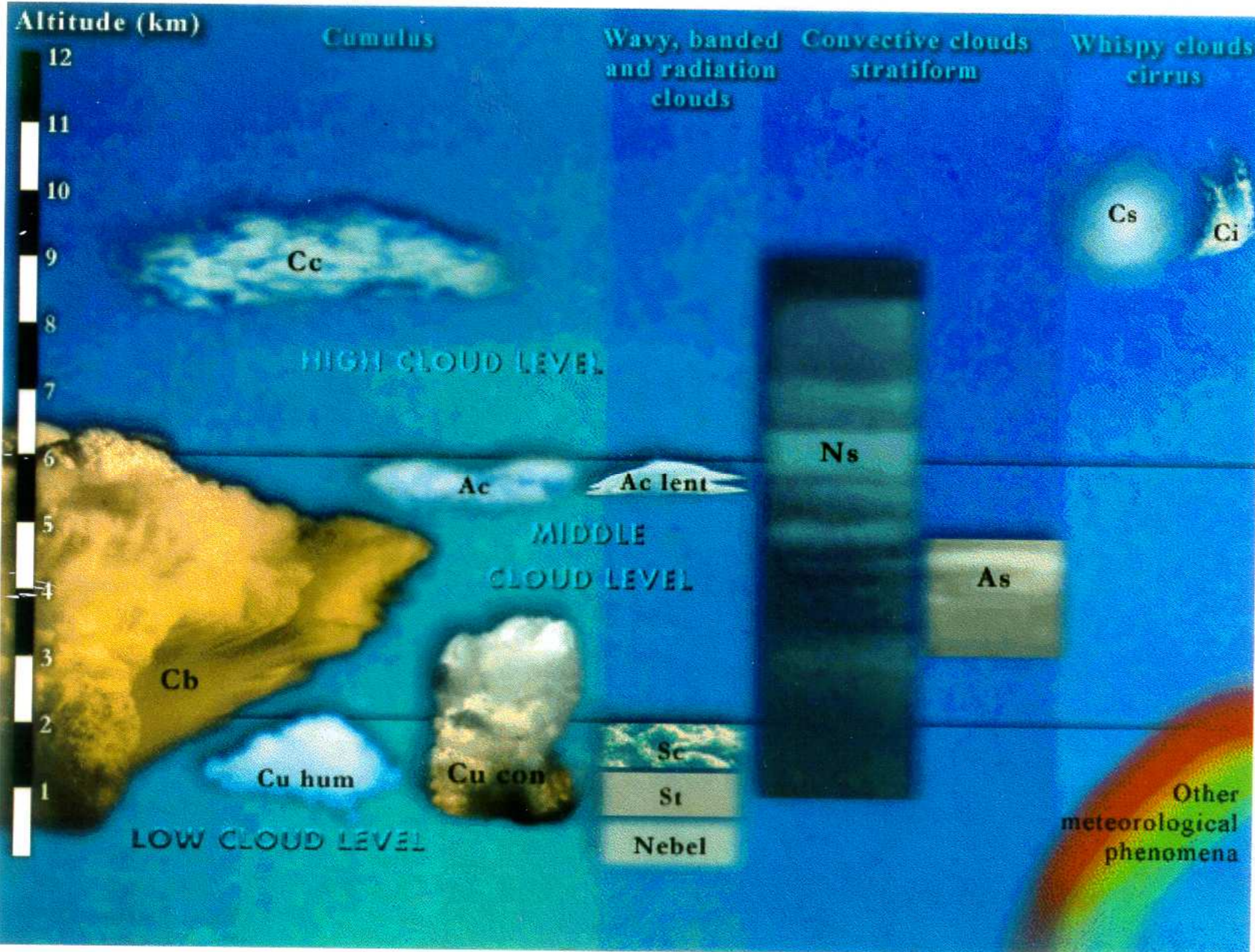
NUBES DE AGUA. NUBES MIXTAS



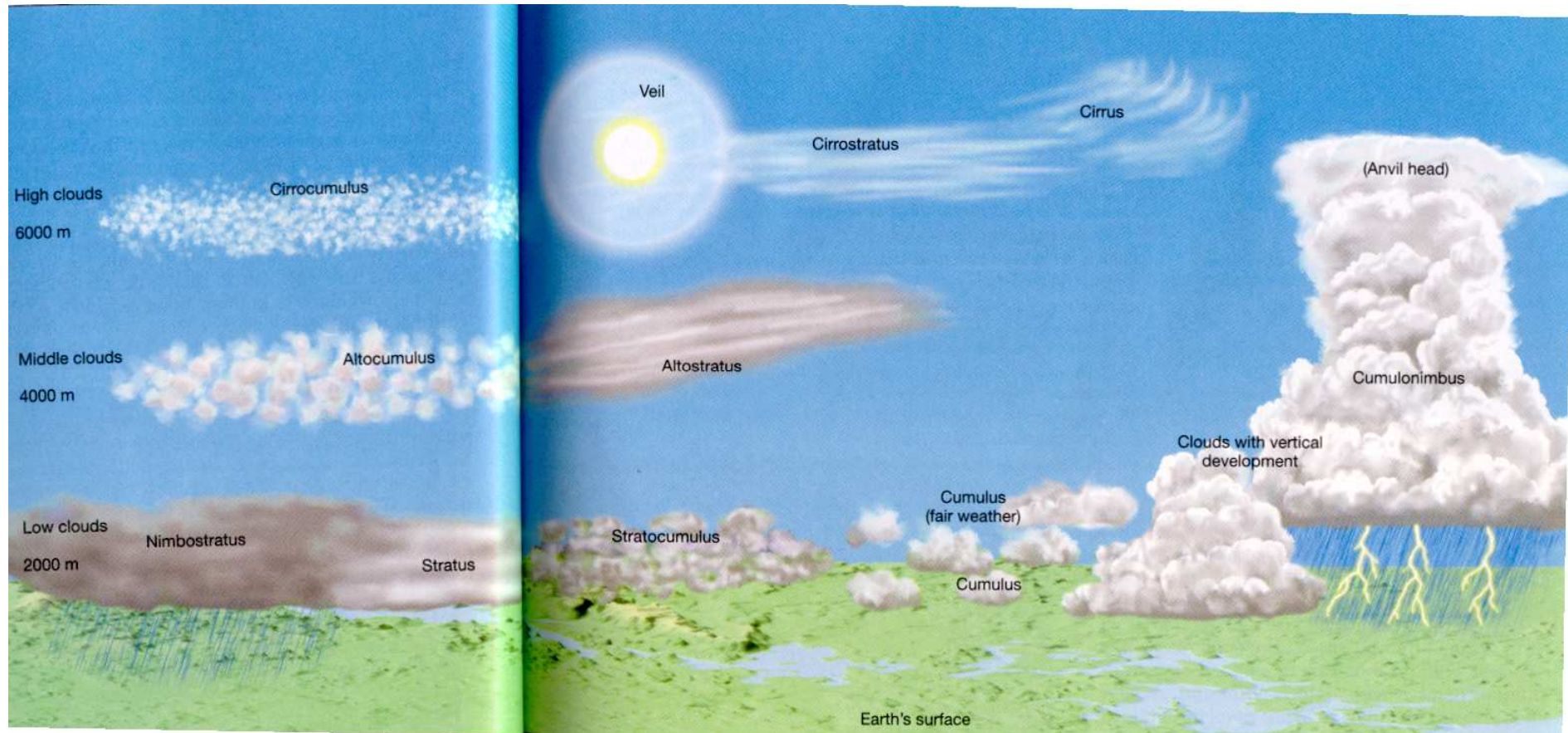
TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- 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



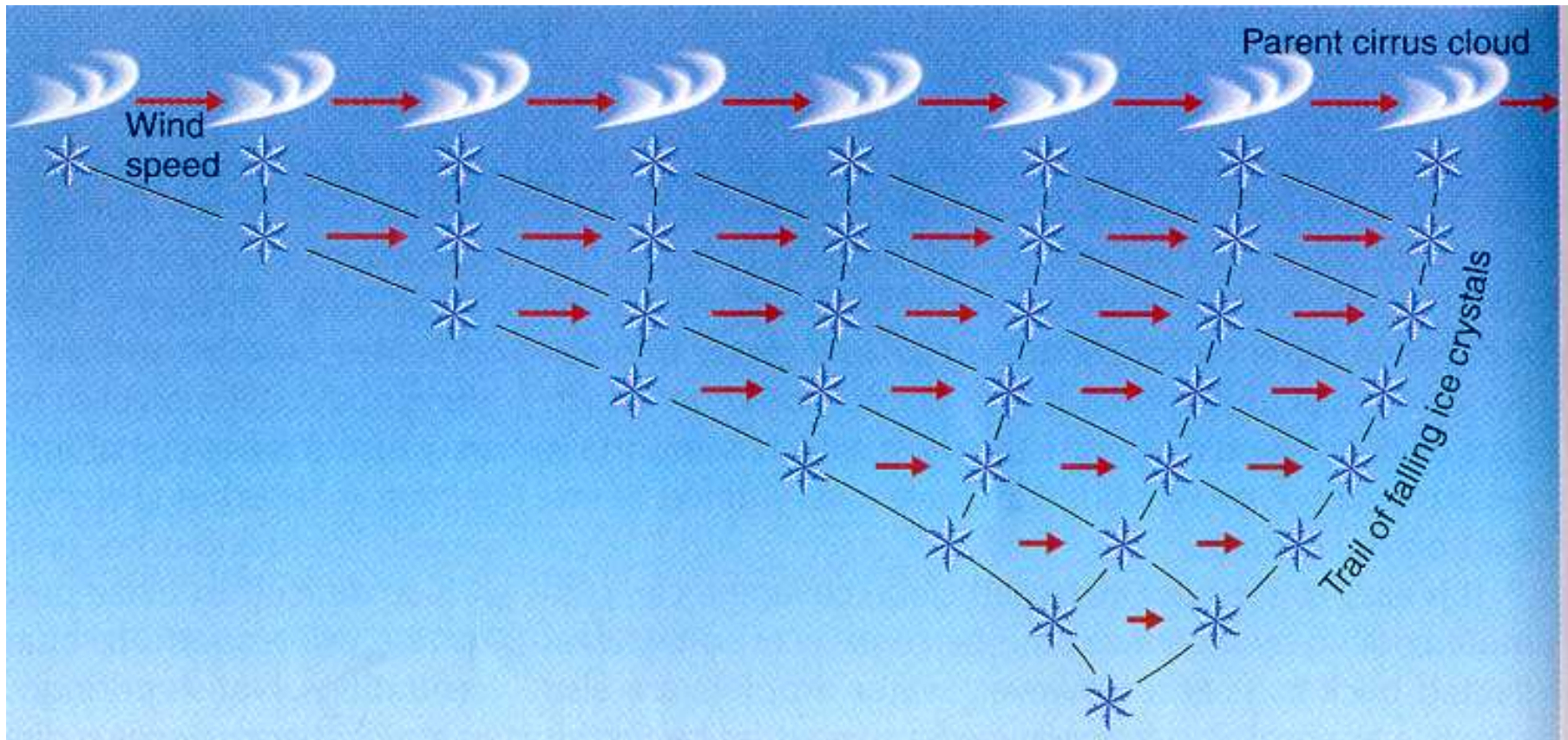
ALTOSTRATUS



CIRRUS



CIRRUS



CIRROCUMULUS



CIRROSTRATUS

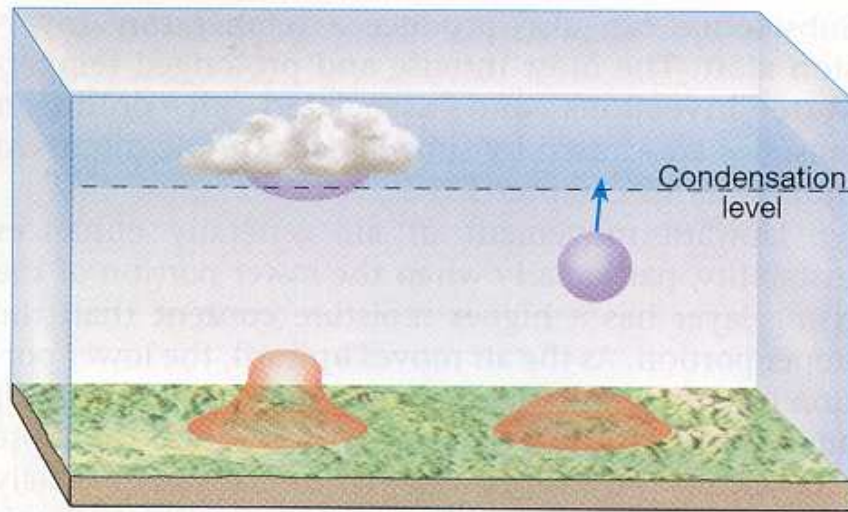


MECANISMOS DE FORMACIÓN. PROCESOS DE ELEVACIÓN

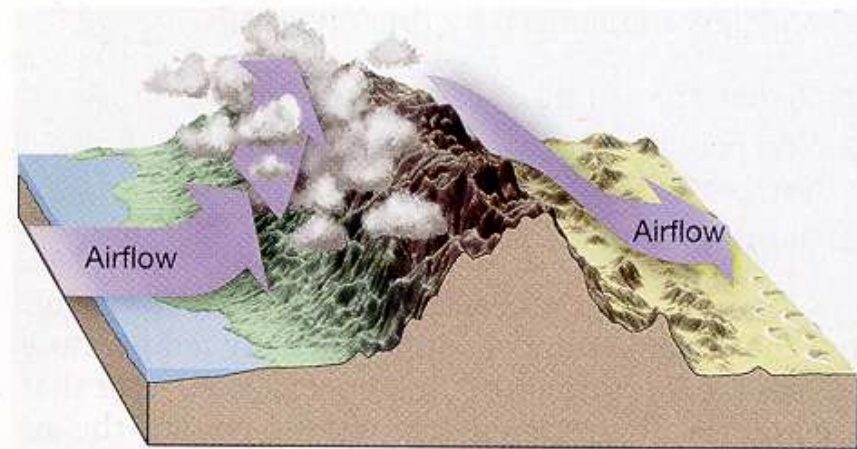
Papel fundamental de la velocidad vertical en la termodinámica atmosférica (ver tema 3)

¿Cuáles son las causas del movimiento vertical atmosférico?

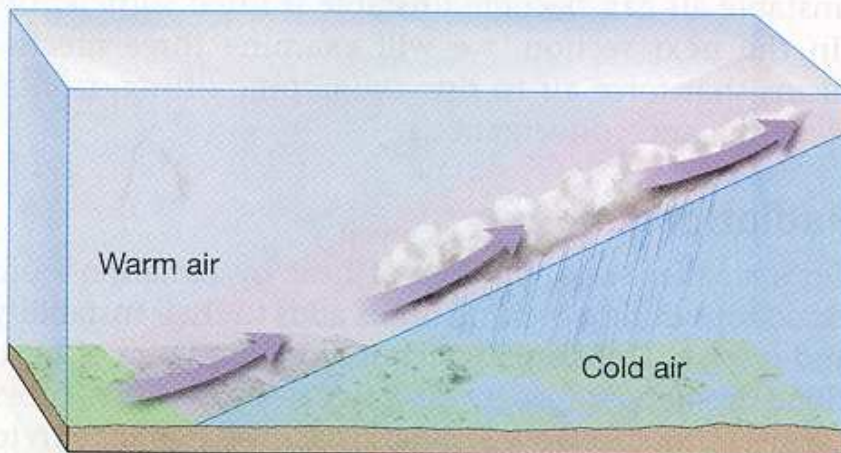
MECANISMOS DE FORMACIÓN. PROCESOS DE ELEVACIÓN



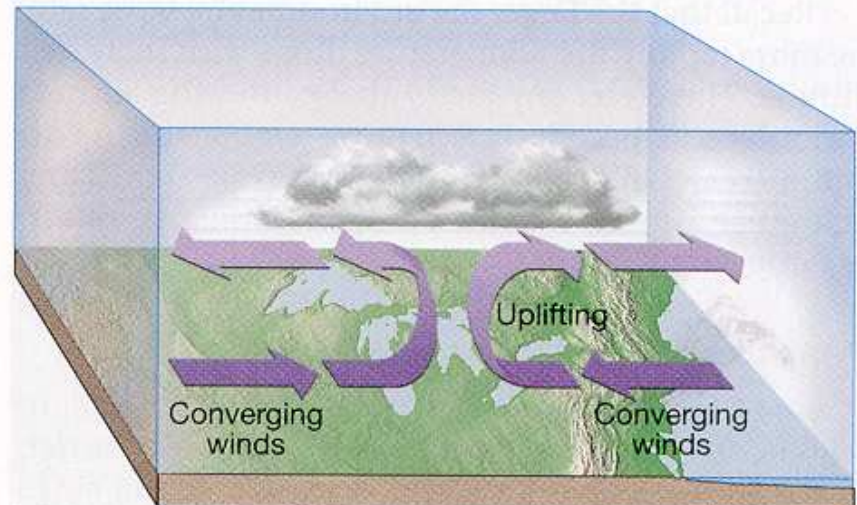
(a) Convective lifting



(b) Orographic lifting

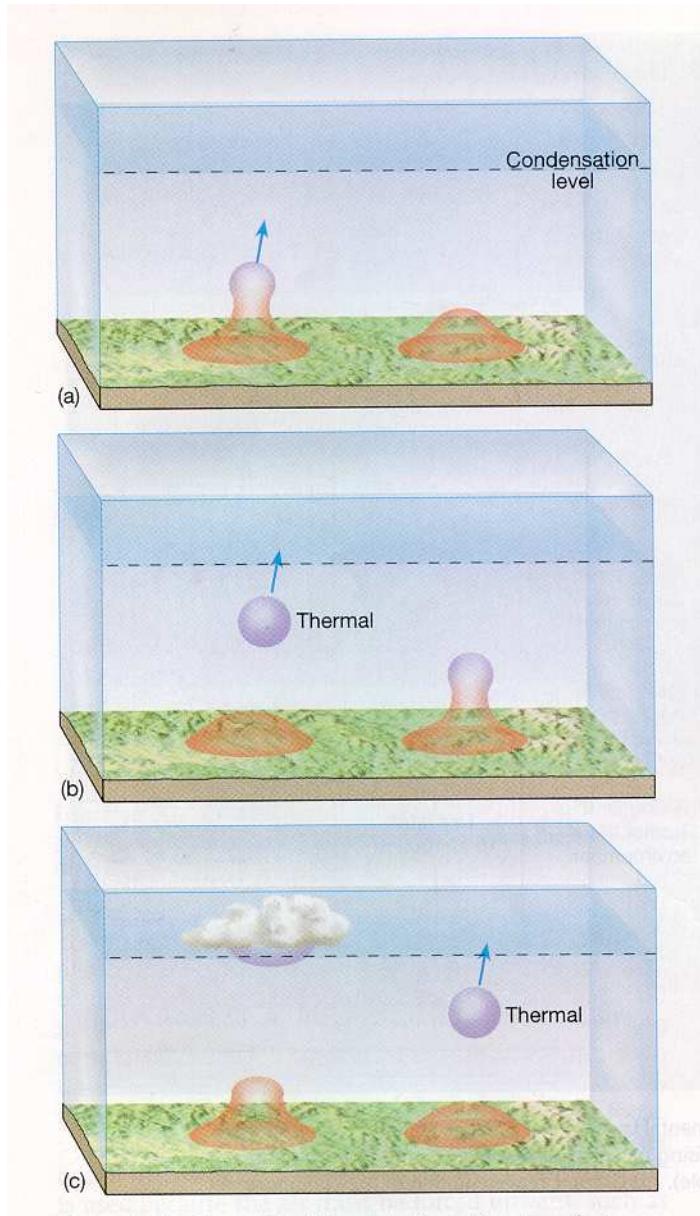


(c) Frontal wedging

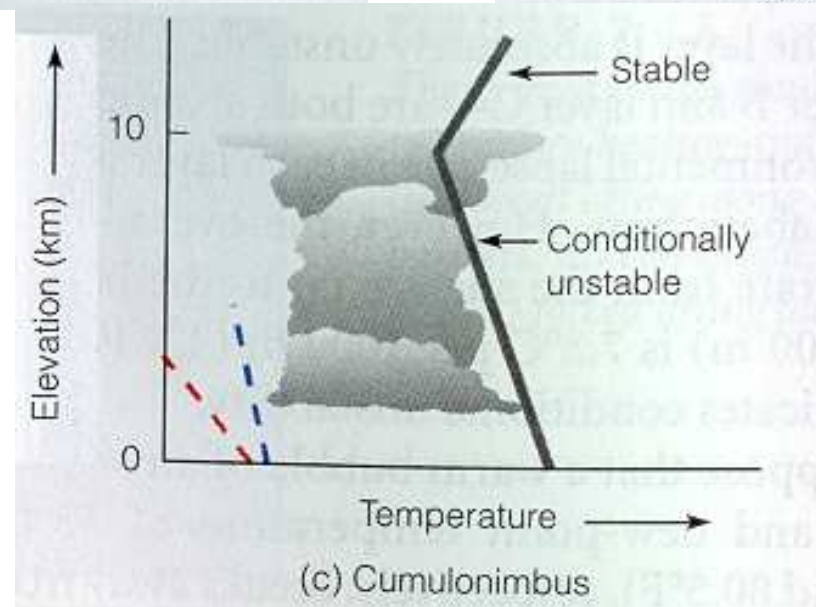
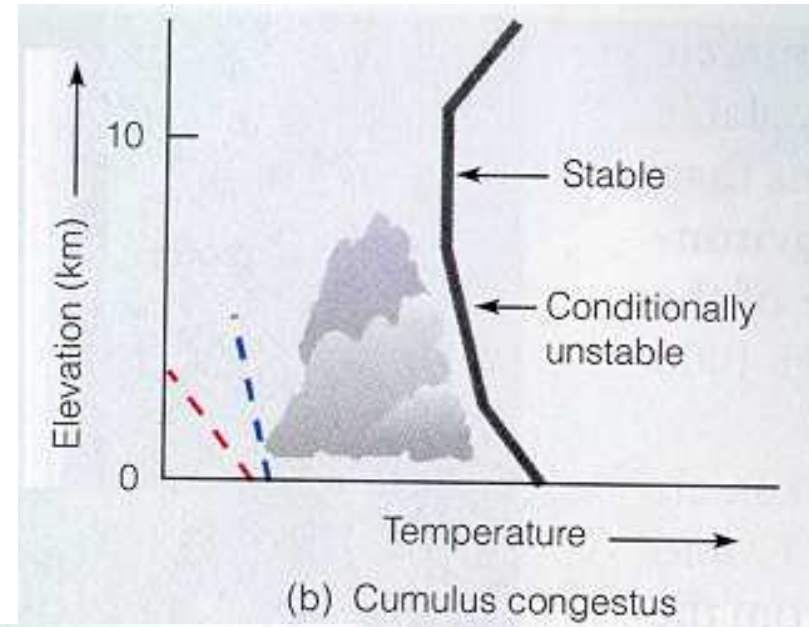
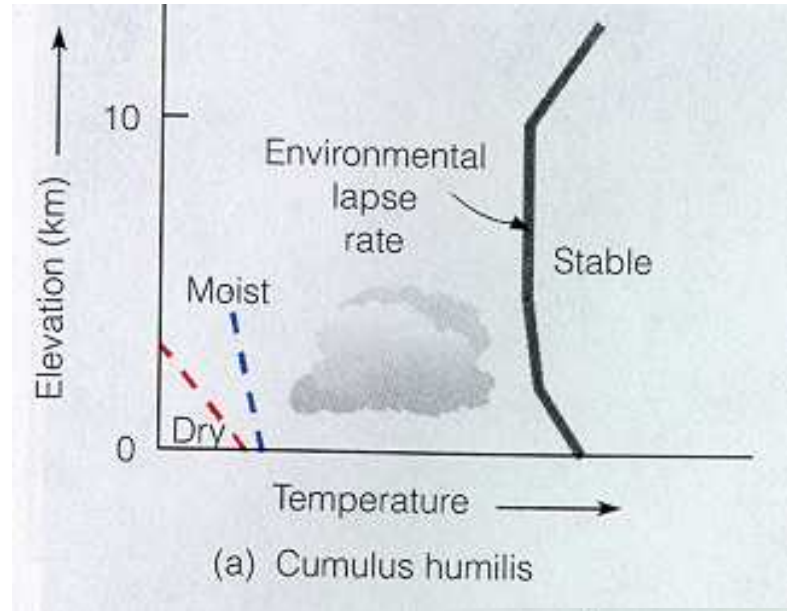


(d) Convergence

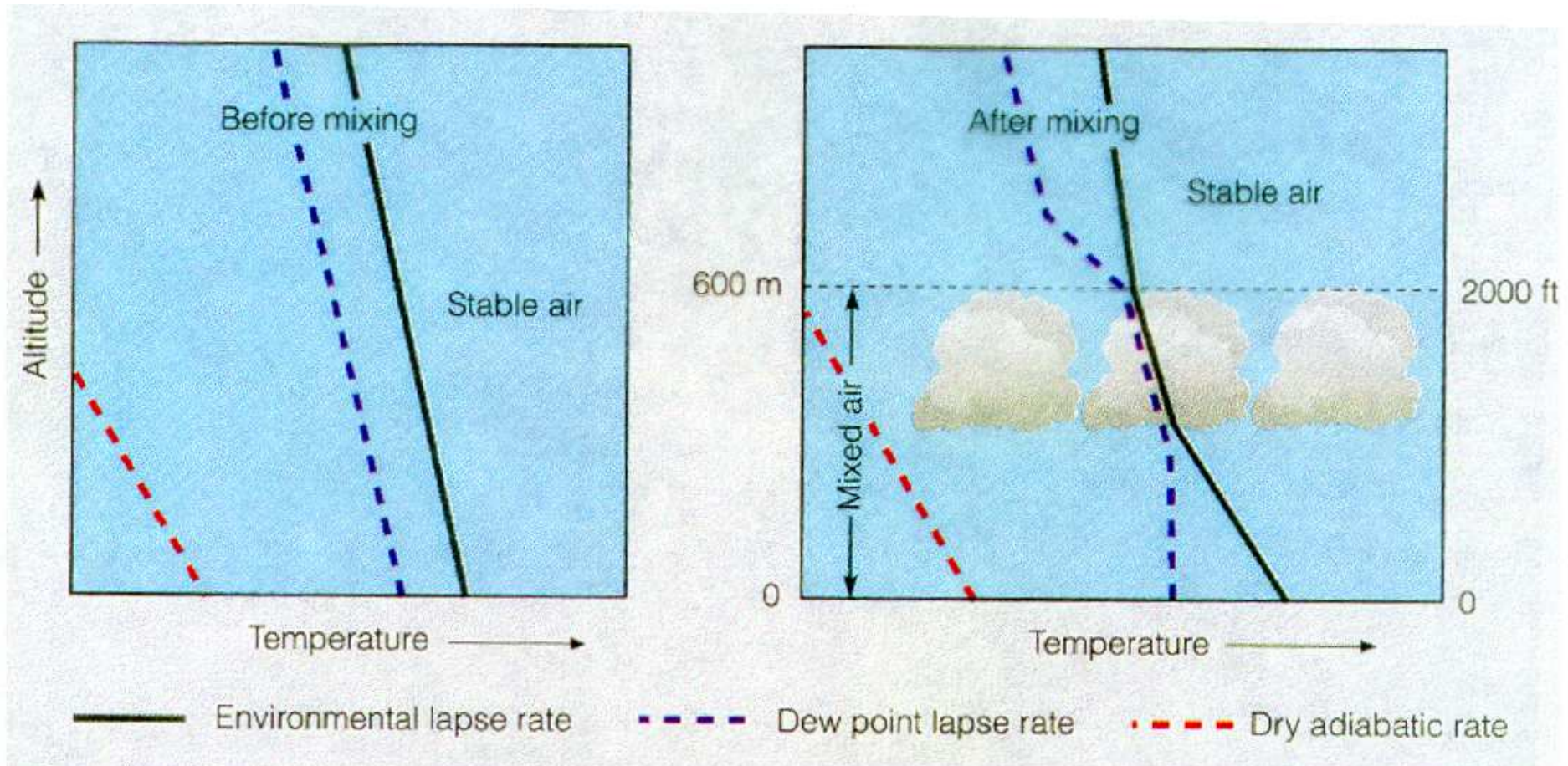
NUBES CONVECTIVAS



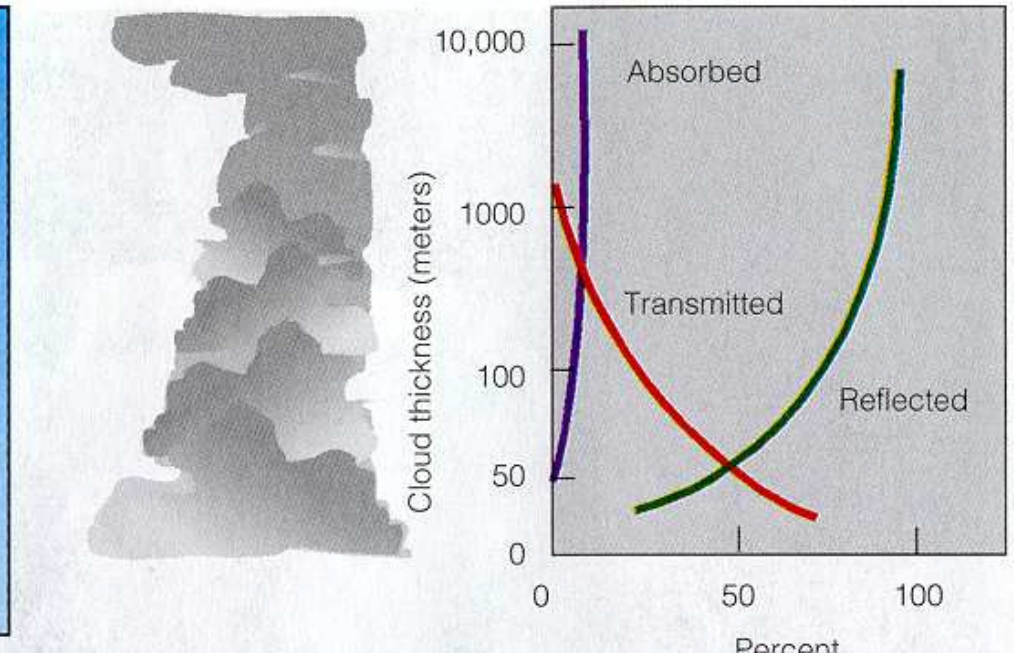
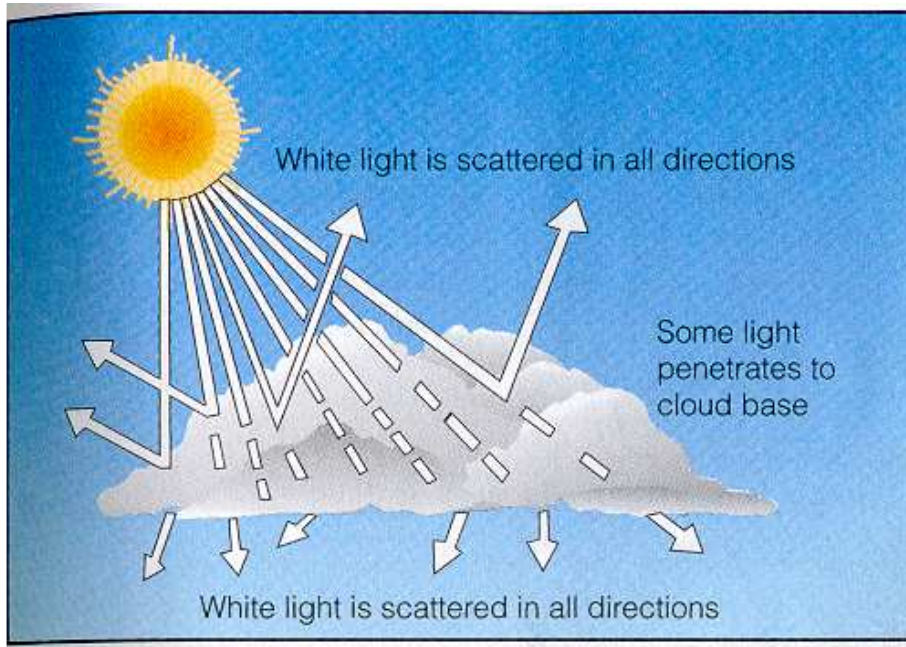
DESARROLLO CONVECTIVO



FORMACIÓN DE ESTRATOCUMULOS



NUBES-RADIACIÓN SOLAR



TELEDETECCIÓN DE NUBES

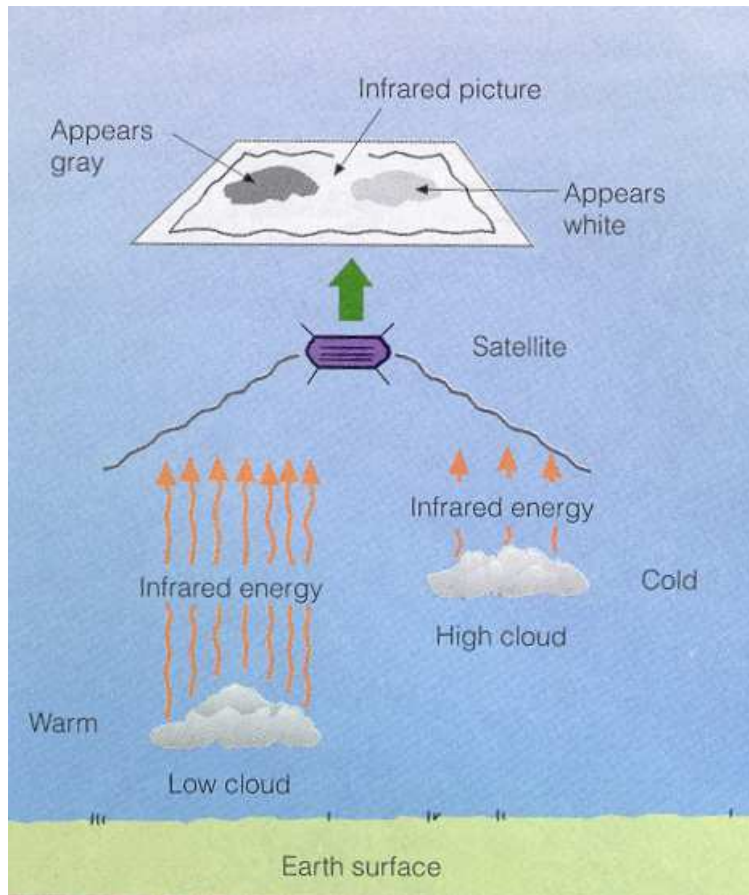


Imagen VISIBLE

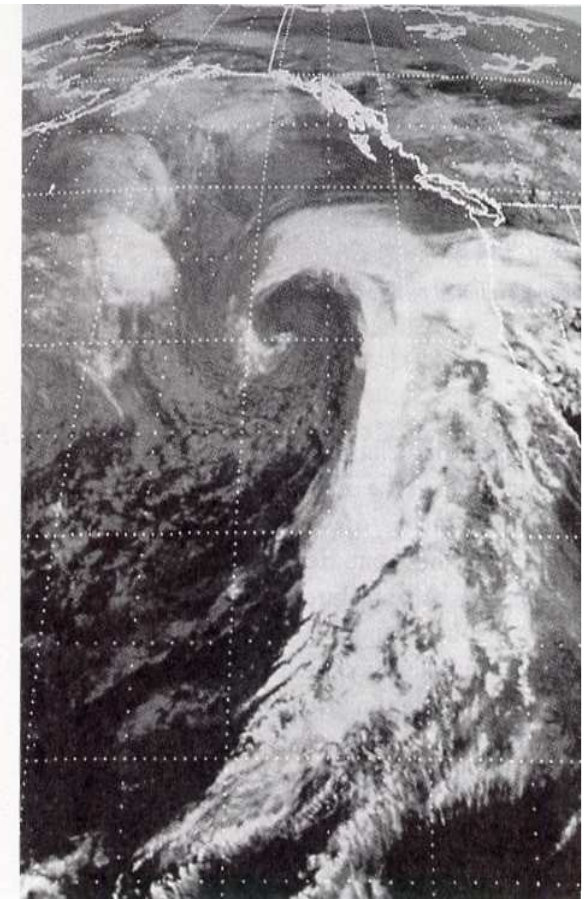
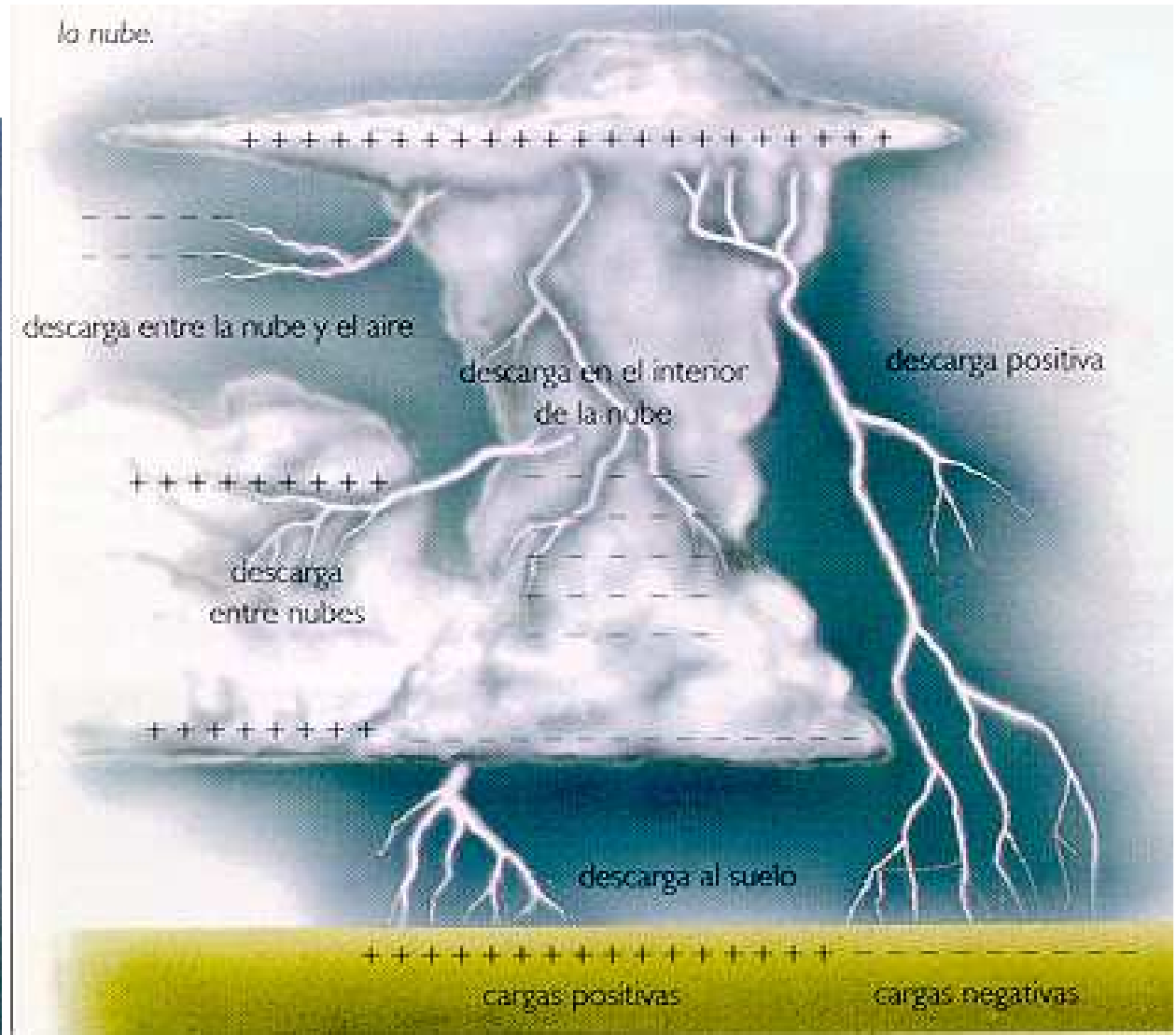
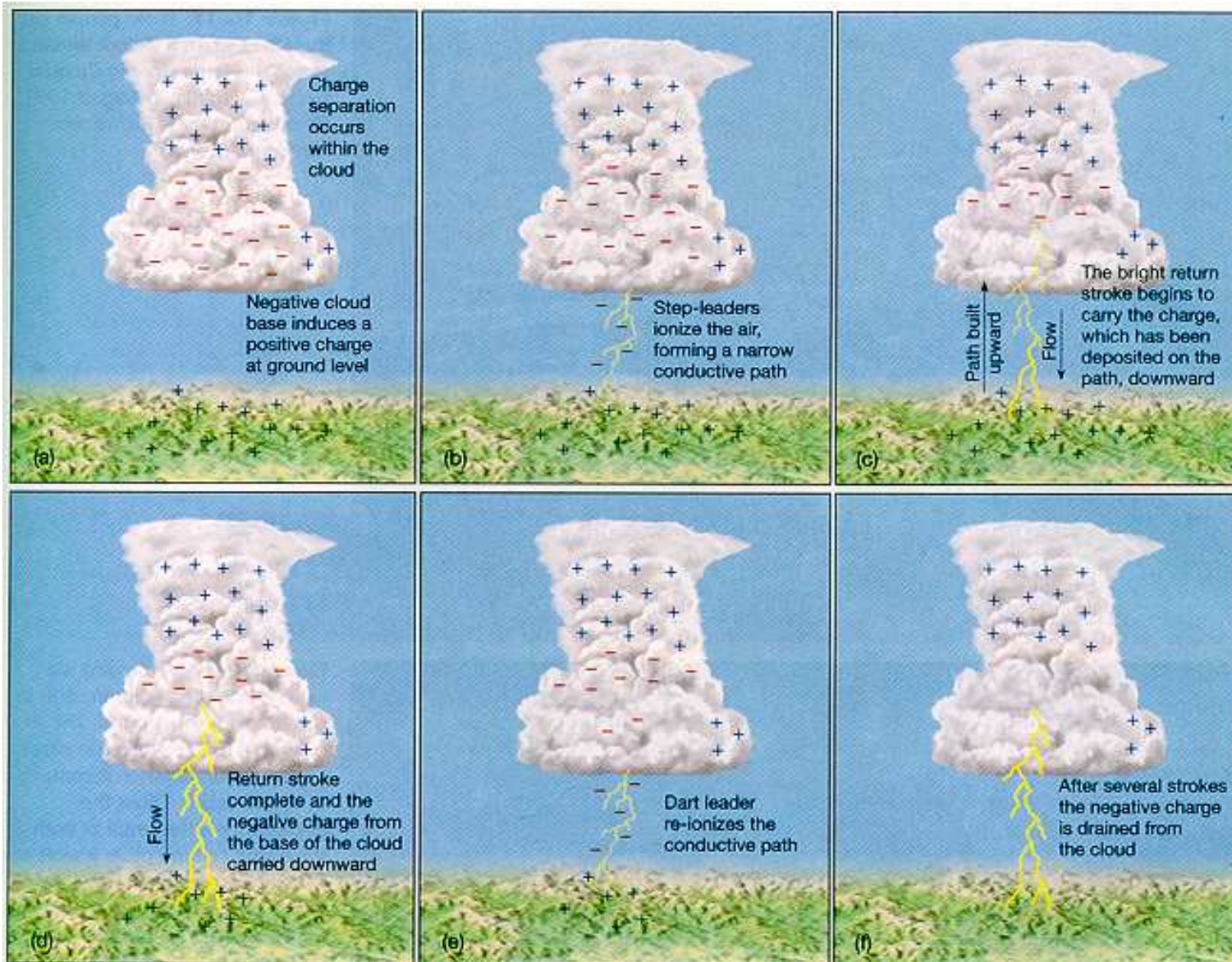


Imagen INFRARROJA

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

Agua T_{agua}

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



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

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



No saturación

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

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



Condensación

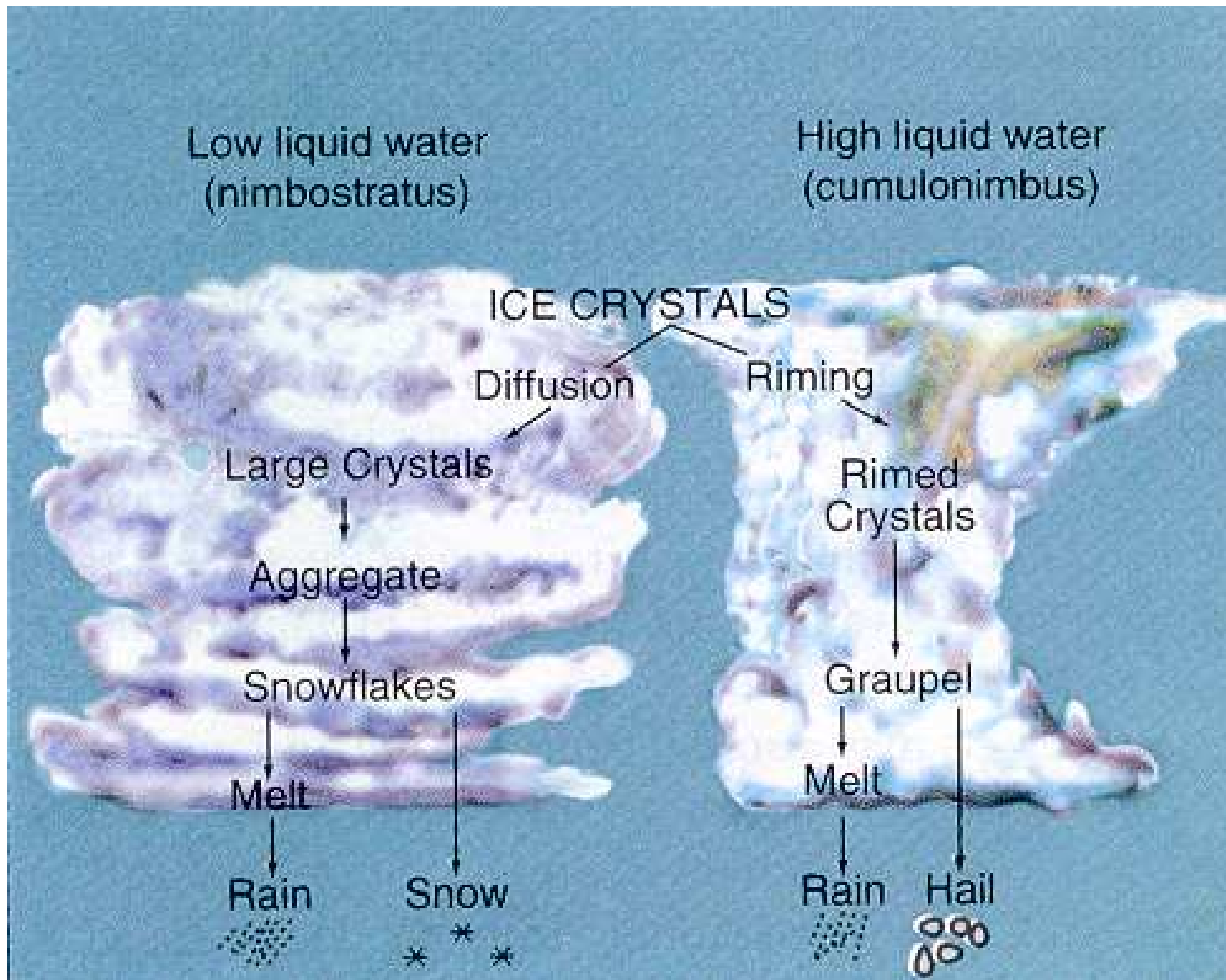


Nieblas de evaporación

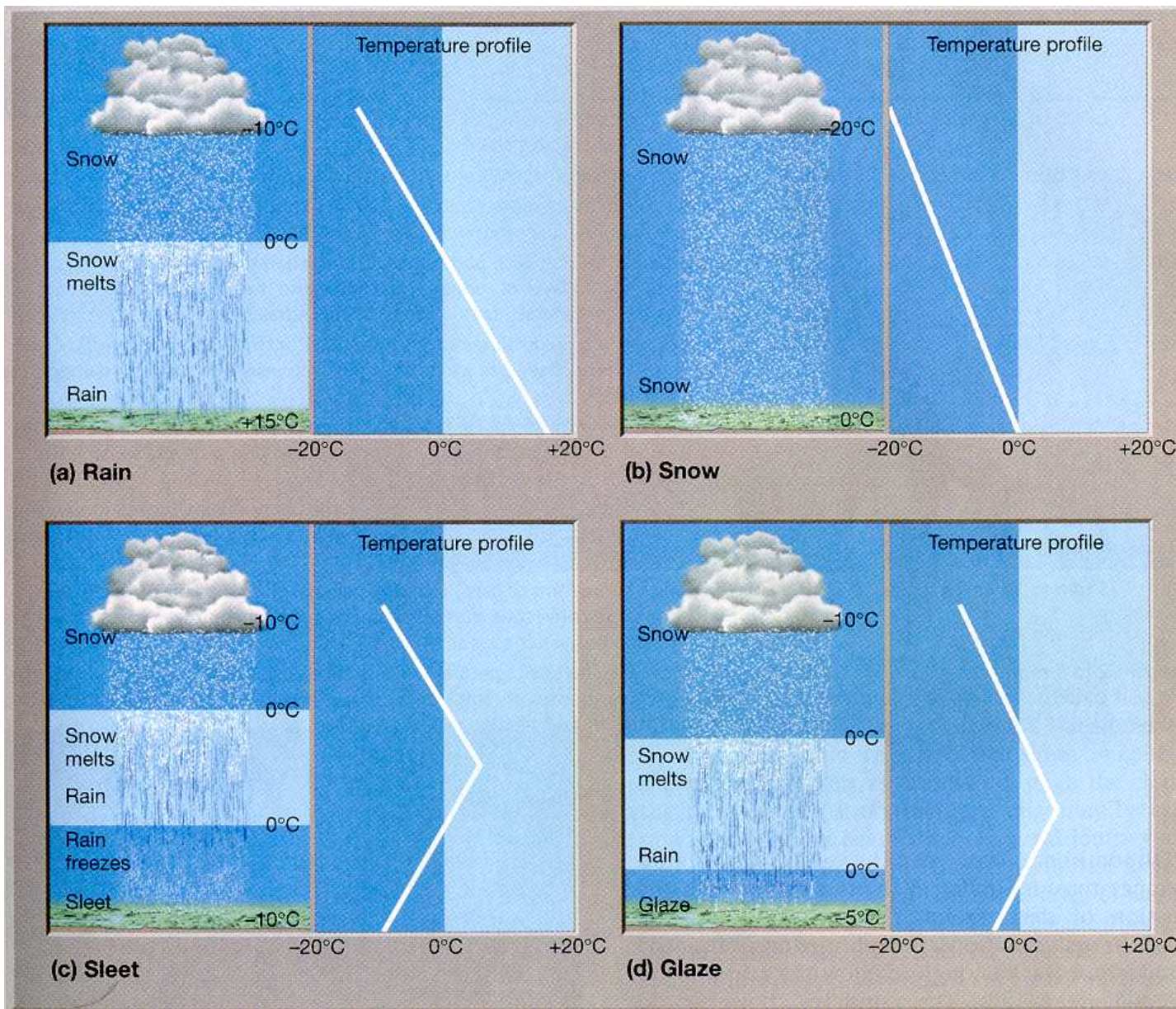
TEMA 5. CONDENSACIÓN EN LA ATMÓSFERA. NUBES. PRECIPITACIÓN.

- 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.

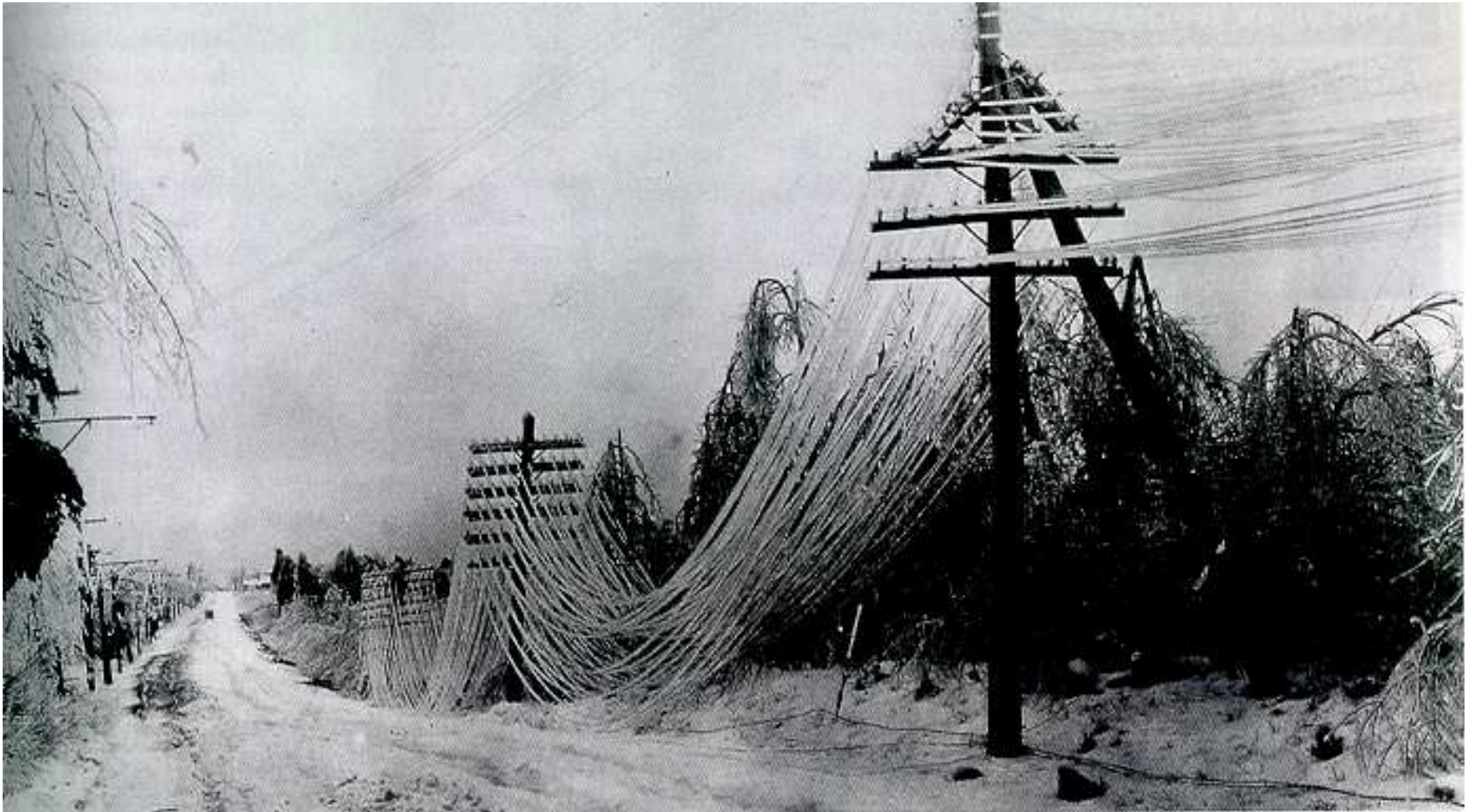
PRECIPITACIÓN



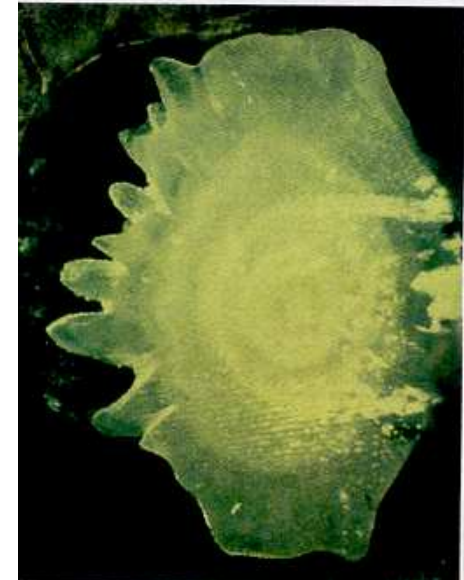
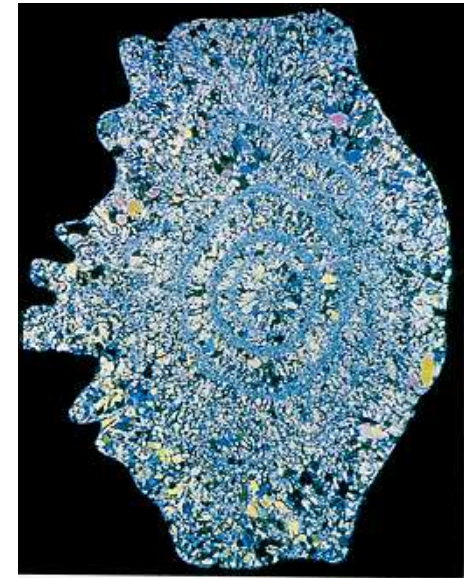
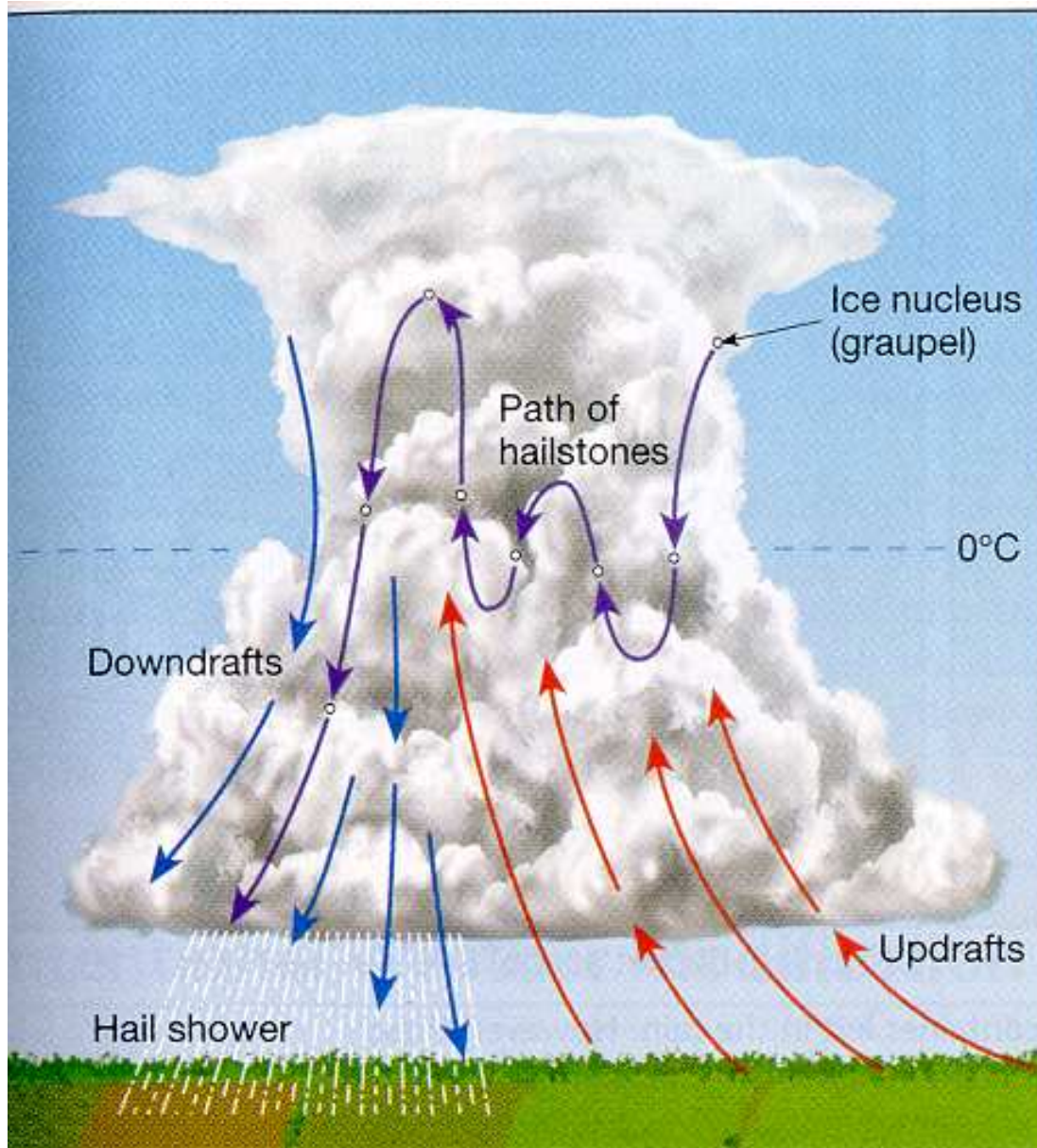
FORMAS DE PRECIPITACIÓN



LLUVIA ENGELANTE



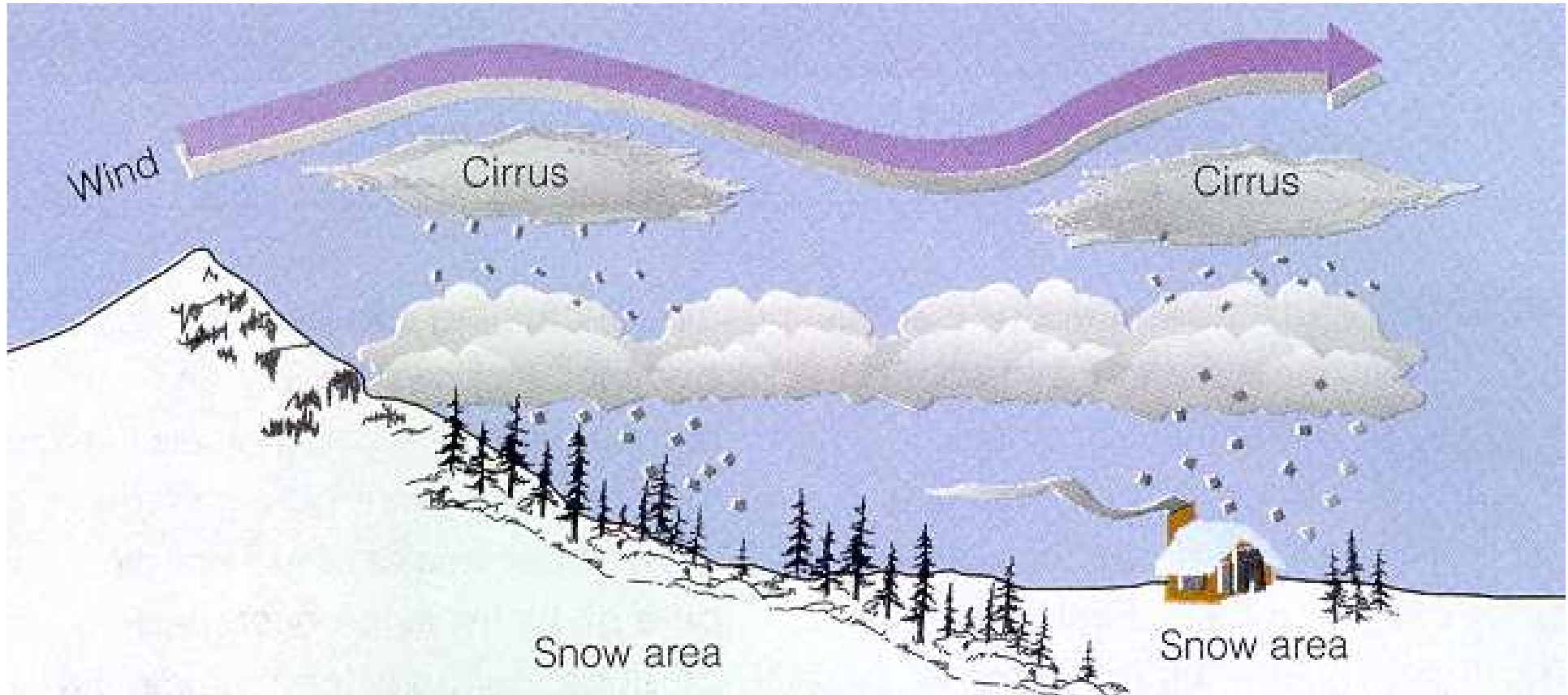
GRANIZO



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 (CO_2) Produce enfriamiento (-78°C)

AgI (Núcleo de congelación activo a -4°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

