

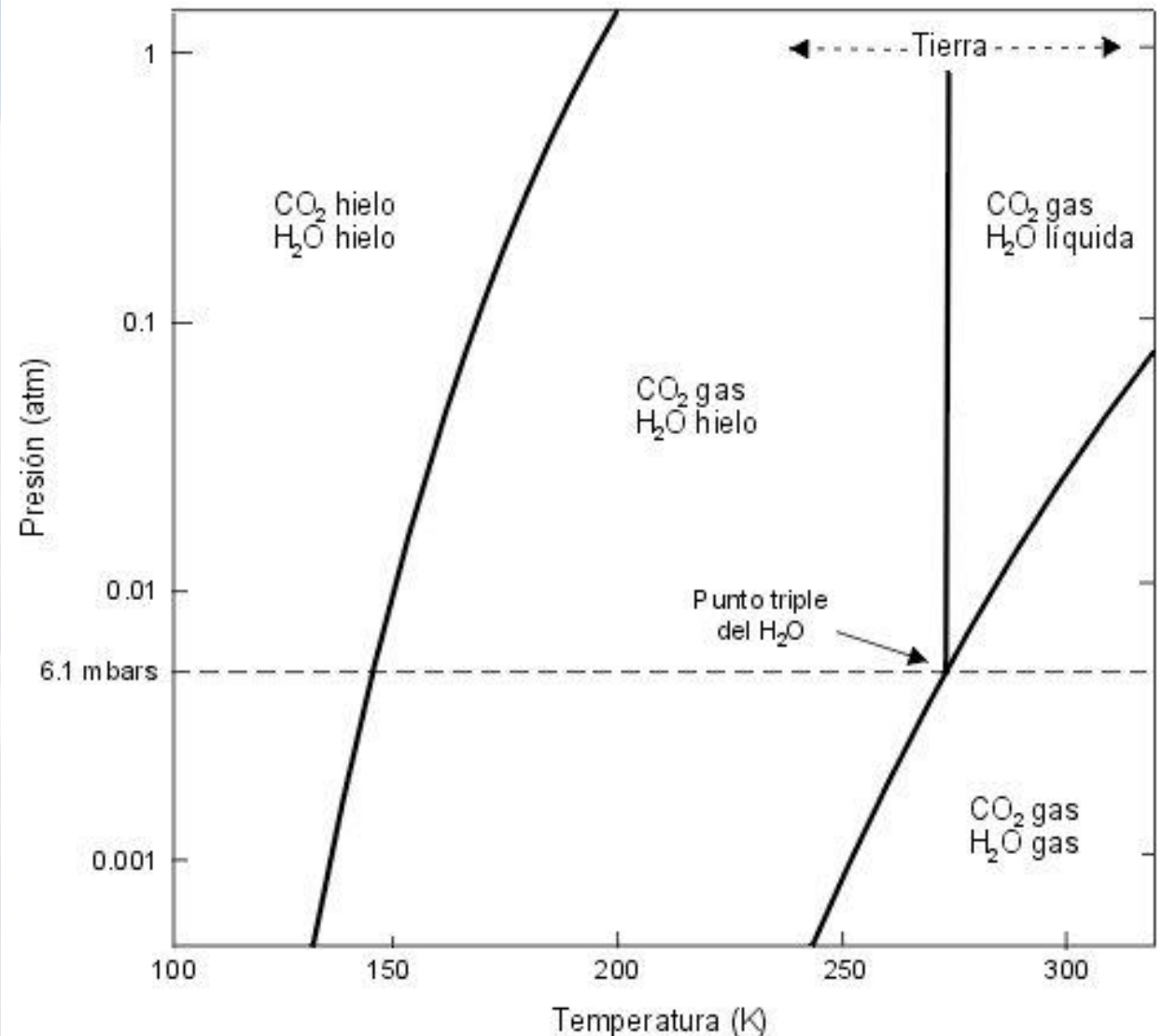
Clase 4

Agua en la Atmósfera

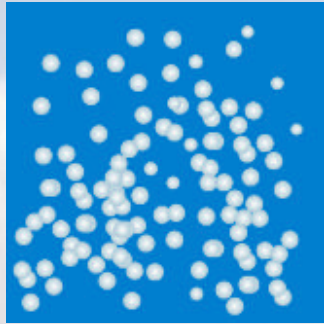
Preguntas claves

1. ¿Cuanta agua hay en la aire?
2. ¿Cómo se satura el aire?
3. ¿Cómo se forman las gotas del lluvia?

**Condiciones
en la
atmósfera
terrestre
permiten la
existencia de
agua en sus
tres estados**

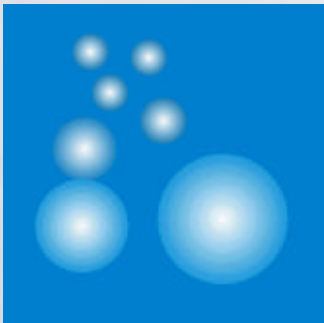


El agua en la atmósfera se encuentra en tres formas:



Vapor de agua (Fase gaseosa)

Invisible debido a su tamaño muy pequeño



Gotas de nube o lluvia (Fase líquida)

Diferentes tamaños 0.001 mm - 1 cm



Cristales de hielo o nieve (Fase sólida)

Estructura ordenada o desordenada



Humedad Atmosférica

Consideremos en primer lugar como cuantificar el contenido de vapor de agua en el aire:

- **Razón de mezcla = Masa de vapor de agua / Masa de aire seco**

$[q] = \text{gr vapor} / \text{kg de aire seco}$

En esta sala, probablemente $q = 5 \text{ gr/Kg}$

- **Humedad específica = Masa vapor de agua / Masa de aire**

$[H] = \text{gr vapor} / \text{kg de aire}$

Notar que $H < q$, pero $H \sim q$

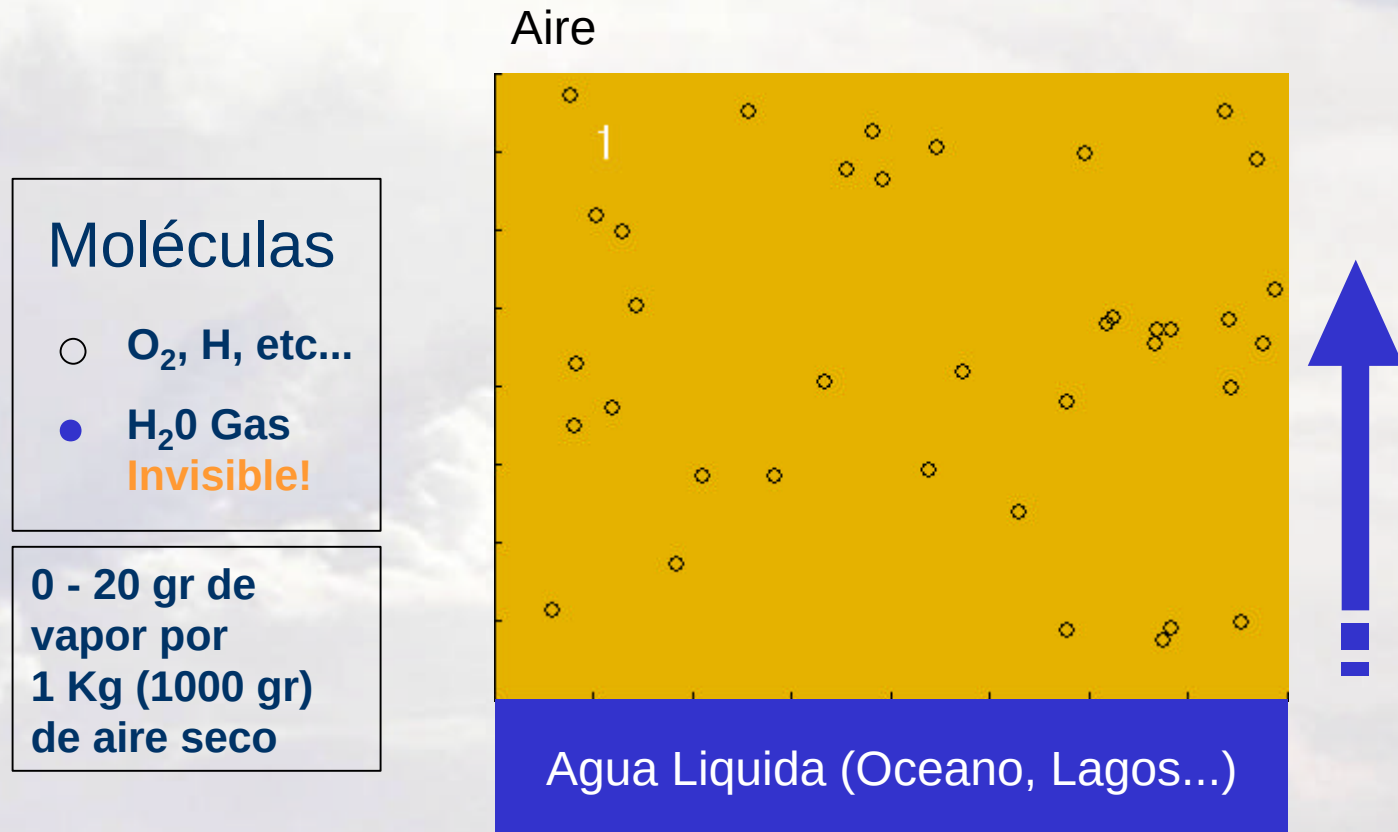
- **Humedad absoluta = densidad del vapor (Masa/Volumen)**

Como $\rho(\text{aire}) \sim 1 \text{ kg/m}^3$, si $q=5 \text{ gr/Kg}$ entonces $\rho(\text{vapor}) \sim 5 \text{ g/m}^3$

Naturalmente, todos los parámetros anteriores son difíciles de medir directamente...(necesitamos contar moléculas de vapor)

Las moléculas de vapor de agua pasan desde la superficie de cuerpos de agua hacia la atmósfera.

Este proceso se denomina **evaporación**.

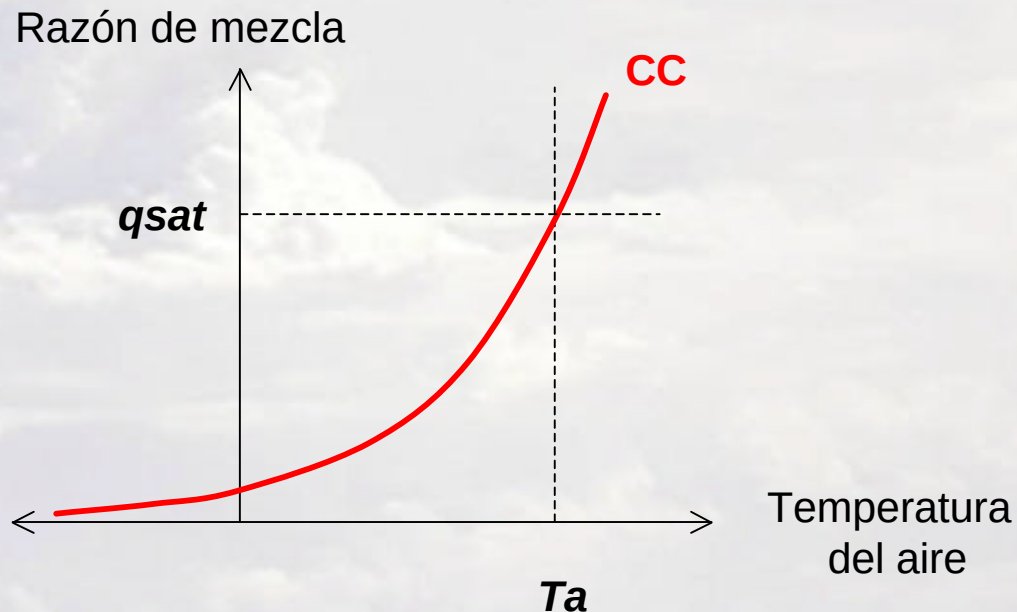


La evaporación es rápida cuando el aire es seco, la temperatura es alta y el viento es fuerte.

Si la evaporación continua, la razón de mezcla aumenta y llegara un momento en que el aire no puede contener mas vapor de agua y comienza la formación de gotas.

Esa condición se denomina estado de **saturación**. El valor de q en ese estado se denomina como razón de mezcla de saturación (q_{sat}).

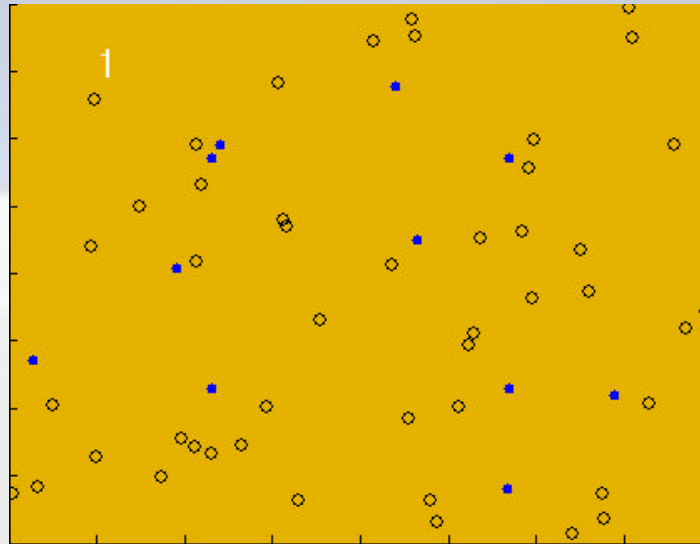
Se puede demostrar que a presión constante, q_{sat} solo depende de la temperatura, a través de la ley de Clausius-Clapeyron:



Interpretación
simple de la ley
de Clausius-
Clapeyron

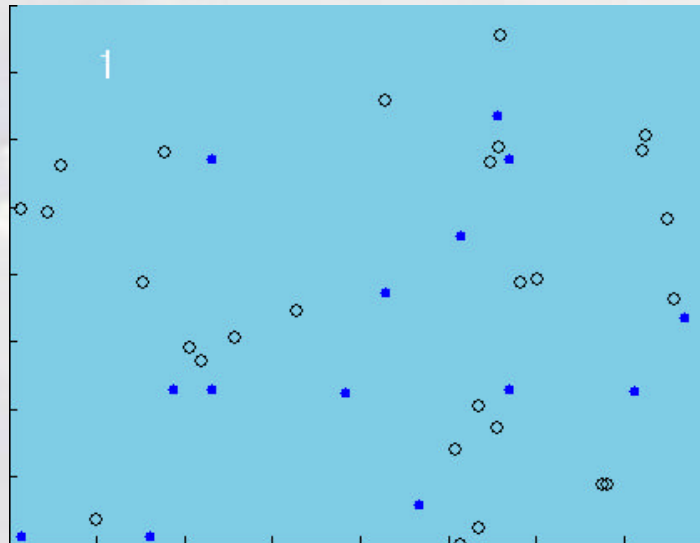
Moléculas

- O₂, H, etc...
- H₂O Vapor
- H₂O Líquido



**Temperatura
del aire: 22°C**

Moléculas se mueven
rápido y choques de
H₂O vapor no logran
formar una gota



**Temperatura
del aire: 5°C**

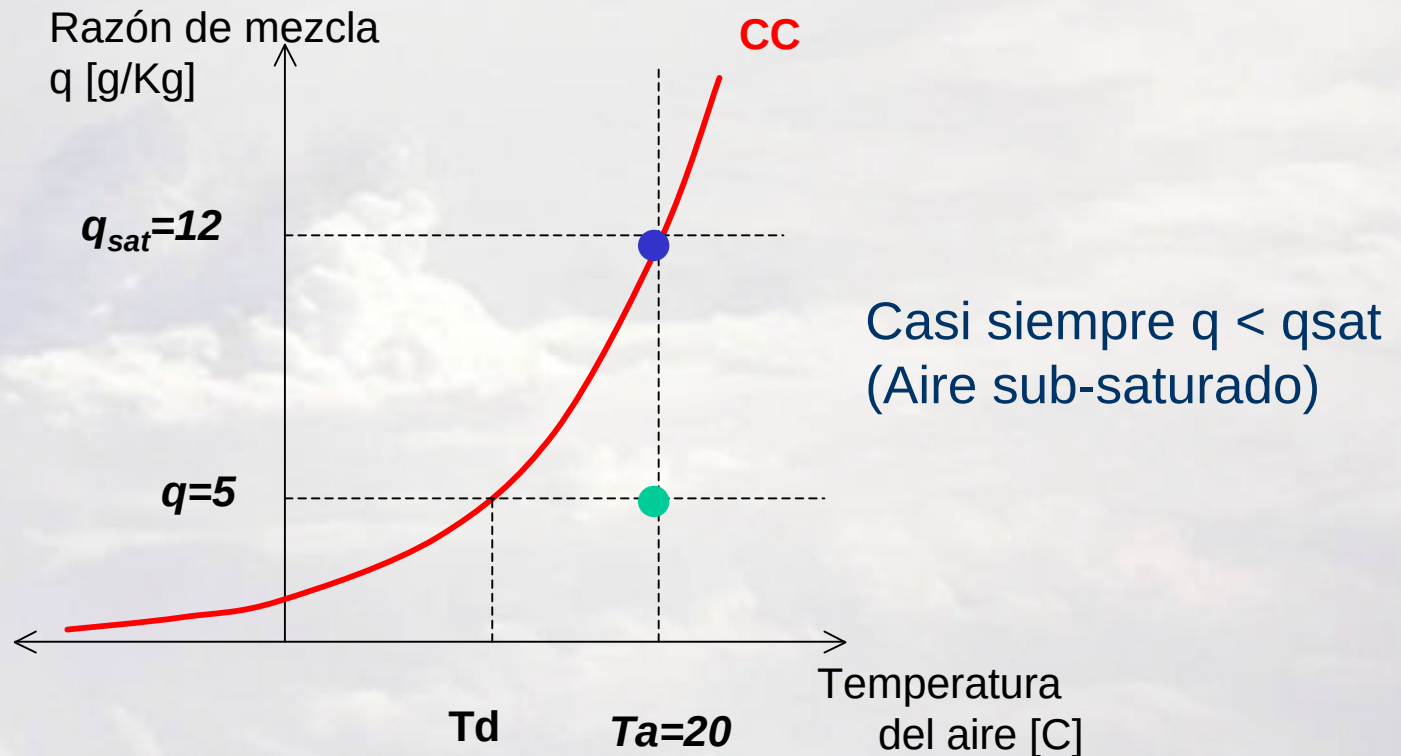
Moléculas se mueven
lento y choques de H₂O
vapor si logran formar
una gota:

Condensación

Tenemos entonces dos valores de razón de mezcla.

Uno corresponde al “medido” (q) e indica cuanto vapor hay en la sala. El otro corresponde al de saturación (q_{sat}), solo depende de la temperatura (y presión) y nos dice cuanto vapor se requiere para saturar esta sala.

Ambos valores pueden ser dibujados en el grafico T - q :



Calculo de razón de mezcla de saturación:

Primero se calcula la presión parcial de vapor de saturación usando la ley de Clausius-Clapeyron

$$e_{\text{sat}} = 6.11 \cdot 10^{[7.5 \cdot T / (T + 237.3)]} \quad (T \text{ del aire en } ^\circ\text{C y } e_{\text{sat}} \text{ en hPa})$$

La razón de mezcla se calcula entonces como:

$$q_{\text{sat}} = 622 \cdot e_{\text{sat}} / [p - e_{\text{sat}}] \quad (q_{\text{sat}} \text{ en g/Kg})$$

Donde p es la presión atmosférica expresada en hPa.

Ejemplo: esta sala.... $T=20^\circ\text{C}$, $p=950$ hPa.

$$e_{\text{sat}} = 23.4 \text{ hPa}$$

$$q_{\text{sat}} = 15.7 \text{ g/Kg}$$

Humedad relativa

Se define la humedad relativa como: **$HR = 100 * q / q_{sat}$**

Es decir, la humedad relativa nos indica cuan cerca o lejos estamos de la condición de saturación. 0% indica aire completamente seco. 100% indica aire saturado. 101% indica sobresaturación....

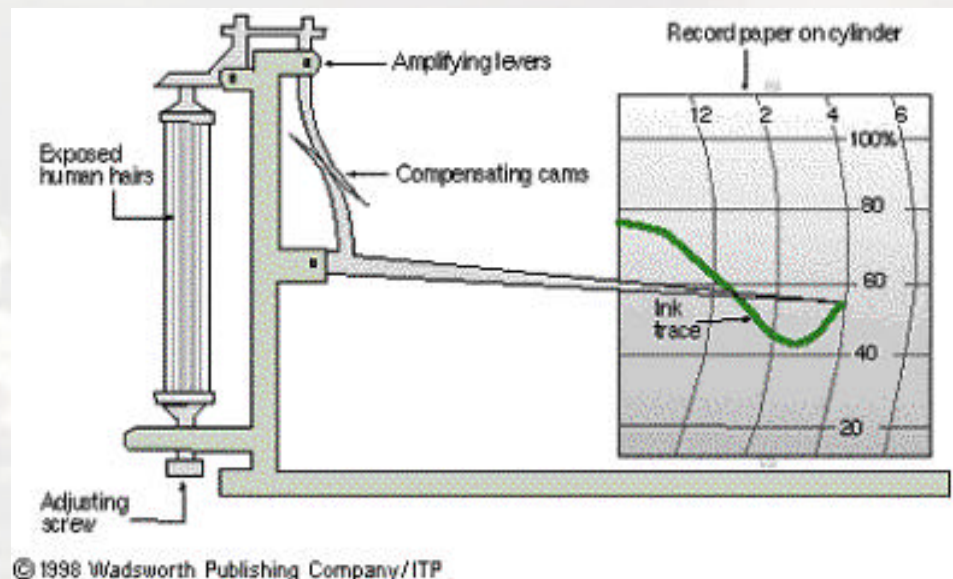
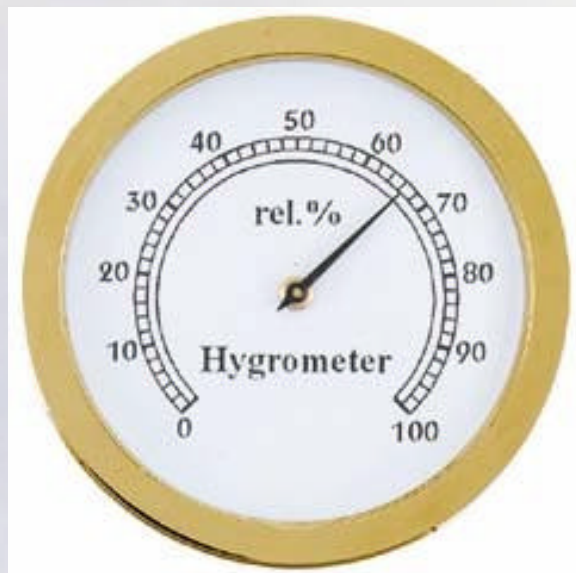
Notar que HR es función de q (contenido de vapor) Y de la temperatura, por lo cual HR no es un buen indicador de la cantidad de vapor de agua en el aire:

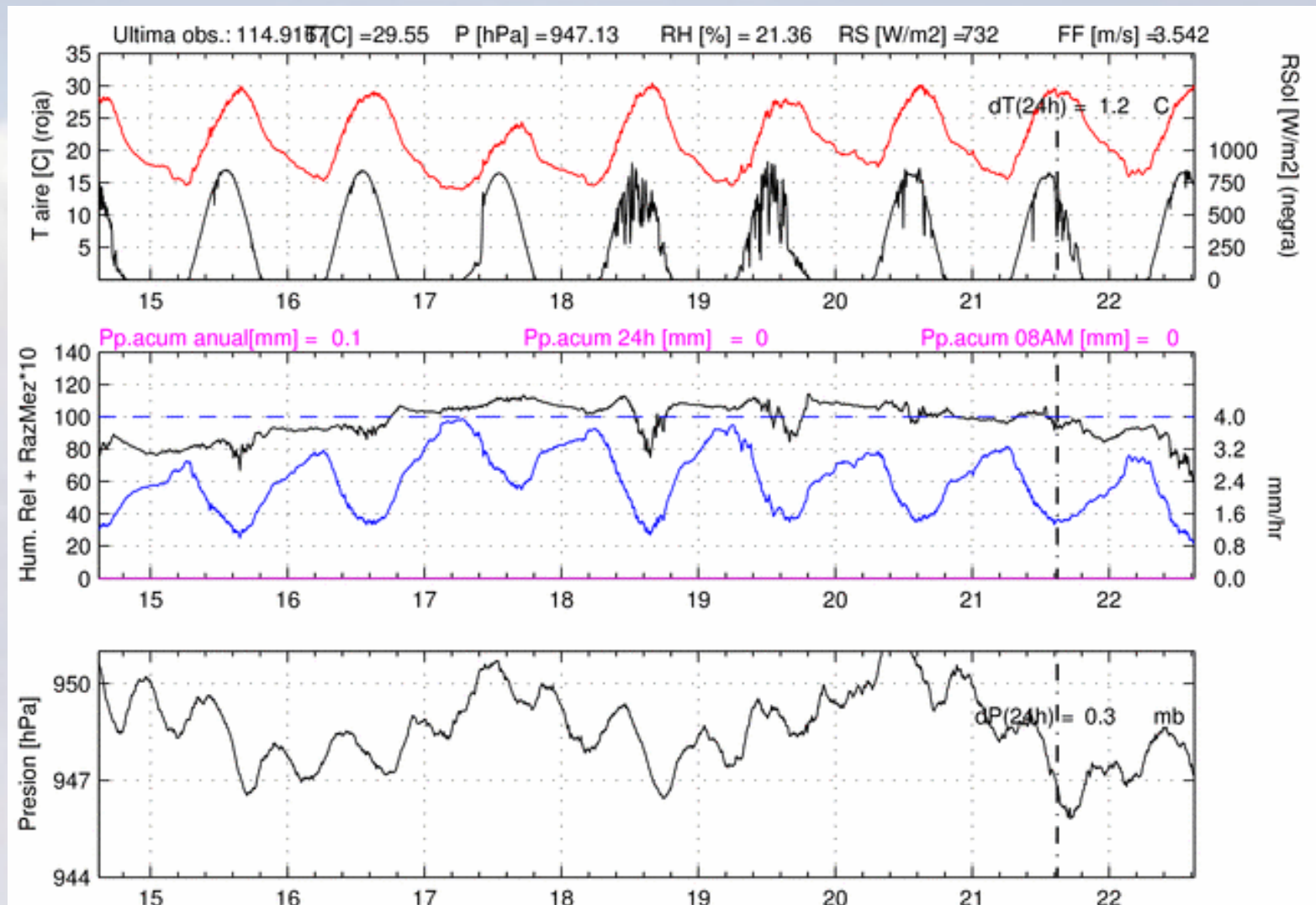
HR=70%, T=20°C, p=950 hPa → $q = 11.0 \text{ g/Kg}$

HR=70%, T= 2°C, p=950 hPa → $q = 3.2 \text{ g/Kg}$ ($q_{sat} = 4.7 \text{ g/Kg}$)

Humedad Relativa

Sin embargo, la humedad relativa es una cantidad fácilmente medible a través de higrometros, en los cuales un material (e.g., cabello humano) responde a cambios de humedad relativa.





¿Que sucede cuando $q > q_{\text{sat}}$?

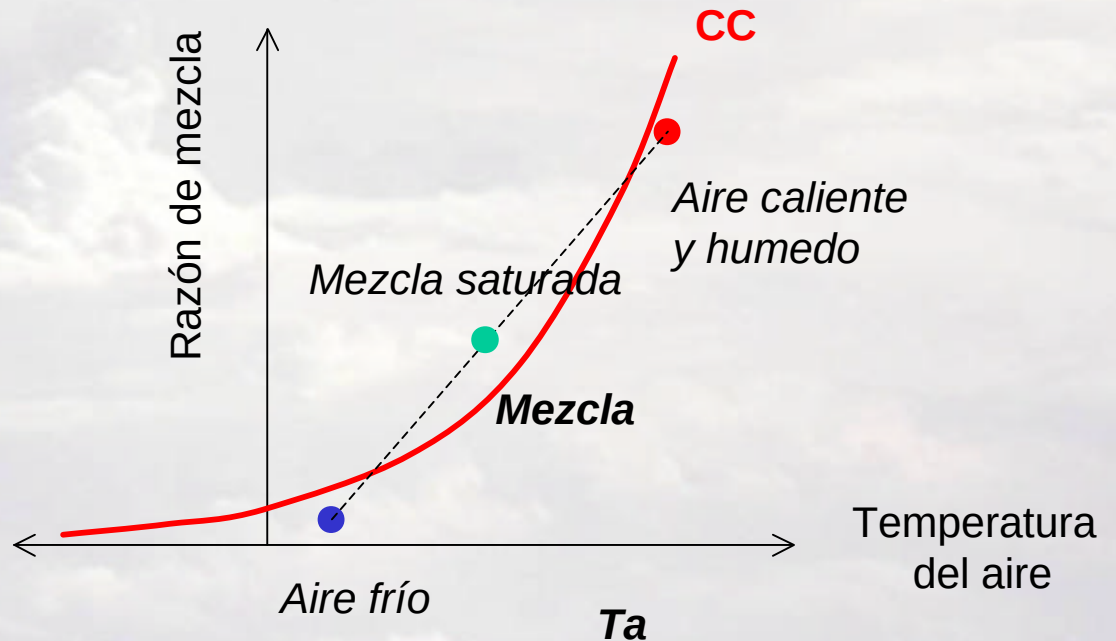
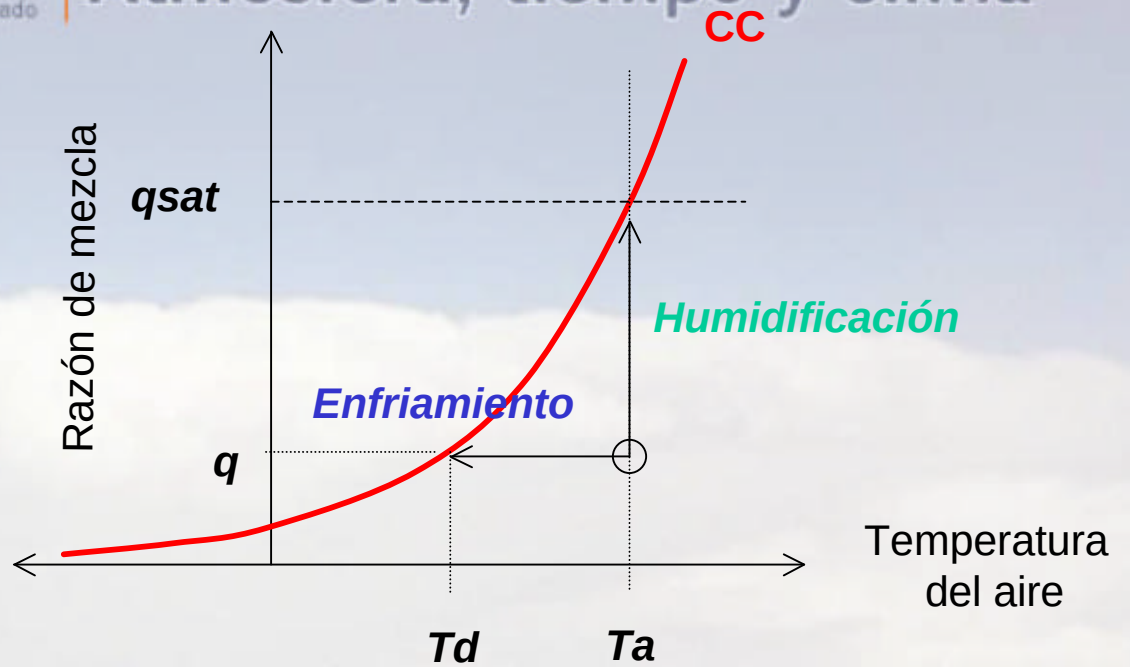
En esa condición el aire no puede mantener mas vapor de agua y comienzan a formarse gotas (agua liquida), en un proceso denominado **condensación**.

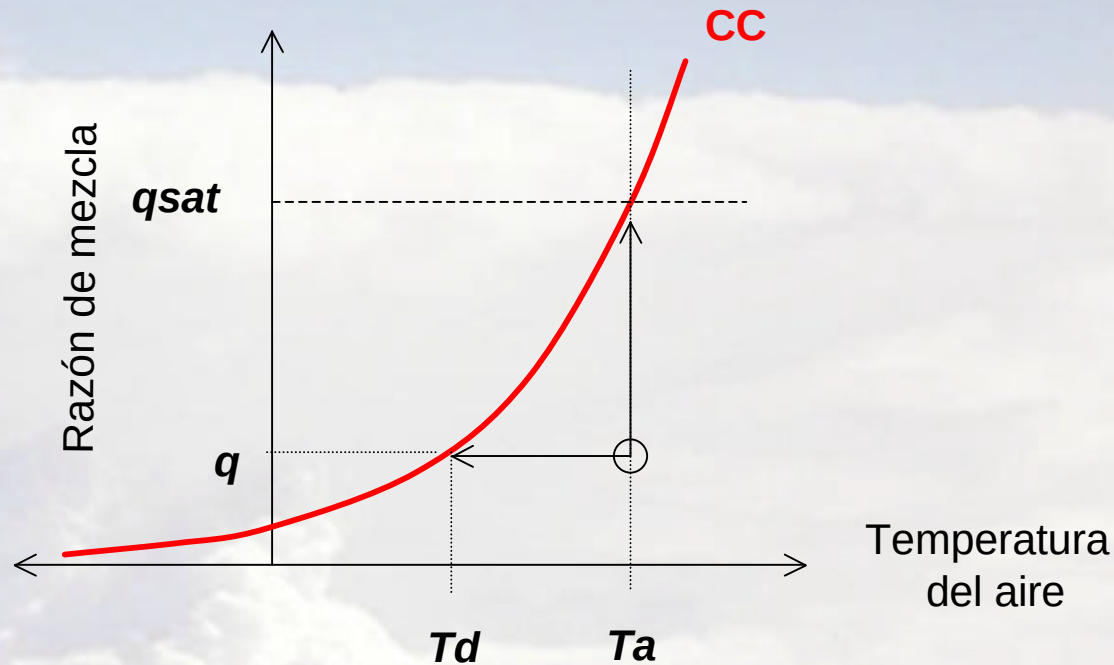
Rara vez la $HR > 101\%$, lo cual indica que la condensación opera rápida y efectivamente.

La saturación de aire puede alcanzarse en la atmósfera a través de tres mecanismos:

1. Humidificación (aumentar q por medio de evaporación)
2. Enfriamiento (disminuye q_{sat})
3. Mezcla de dos masas de aire subaturadas, pero cercanas a la saturación

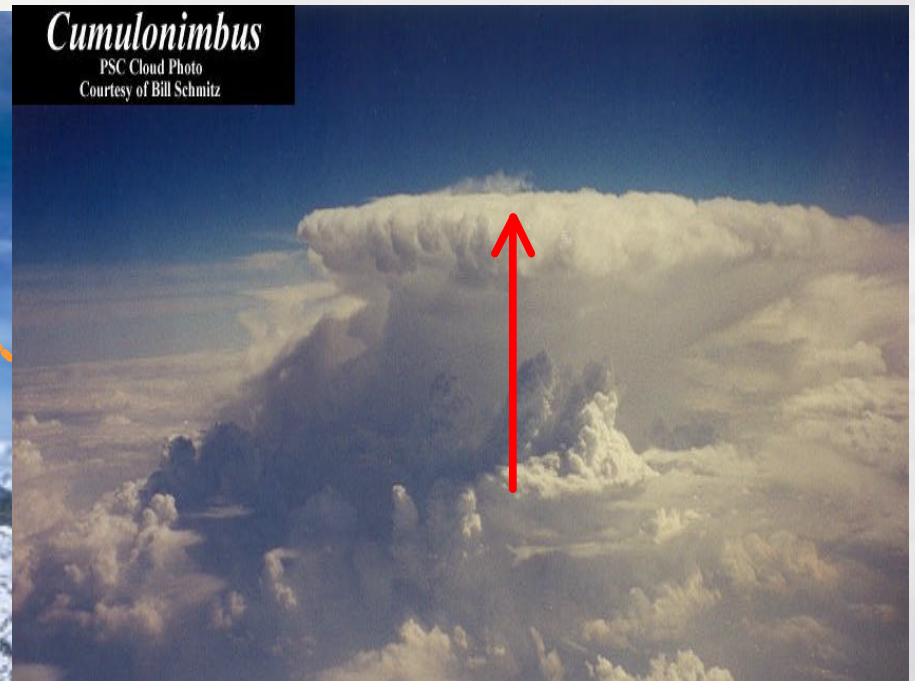
Atmósfera, tiempo y clima



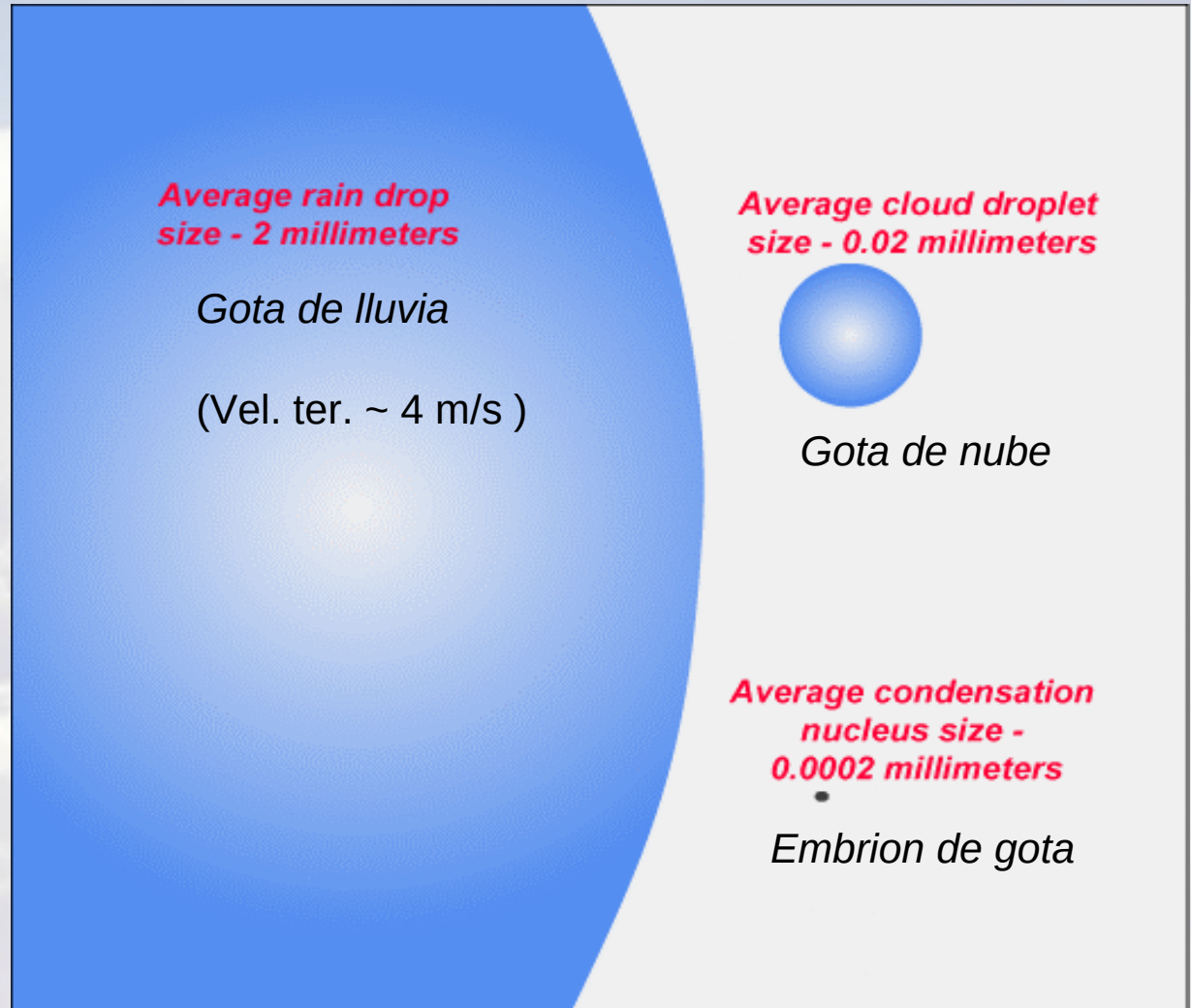


Otra parametro que indica el grado de humedad del aire es la **temperatura del punto de rocío** (T_d): valor al cual hay que enfriar el aire para que sature.

Veremos mas adelante que, con excepción del caso de las nieblas y neblinas, casi todas las nubes que observamos se debe al enfriamiento de masas de aire producto del ascenso de esta últimas...



Una vez
alcanzada la
saturación
comienzan a
formarse
“embriones” de
gotas sobre los
**Núcleos de
Condensación**
(aerosoles
higroscopicos)..
..



**Fuentes de
Aerosoles
(solo una
facción de
ellos actúan
como NC)**



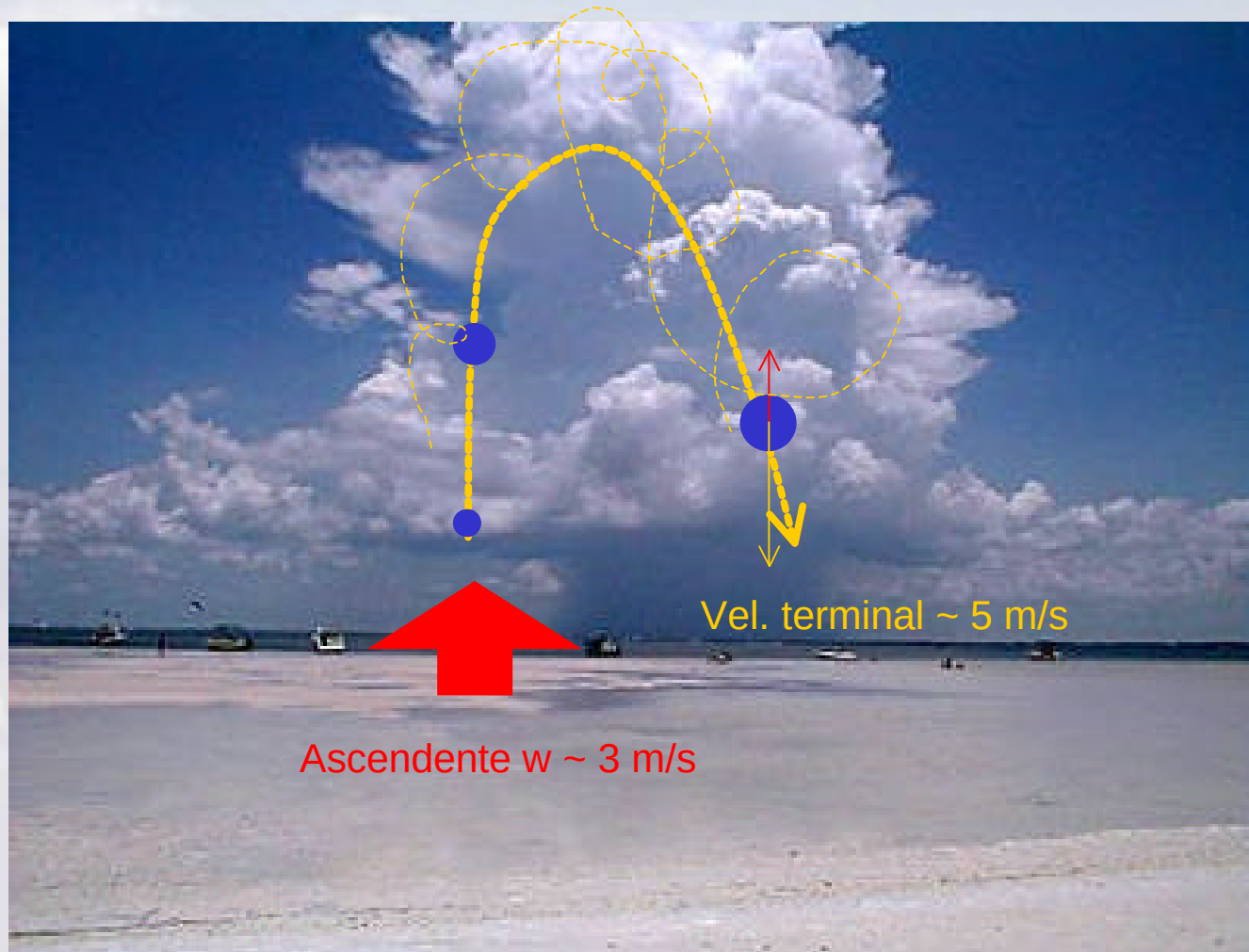
En una tormenta, los embriones crecen miles de veces hasta convertirse en gotas de nube/lluvia en menos de una hora...como es posible esto?

En una primera etapa las gotas crecen por difusión de vapor de agua. Este proceso esta controlado por la cantidad de vapor disponible, el tamaño de la gota y su contenido químico; su eficiencia decrece con el tamaño de la gota.

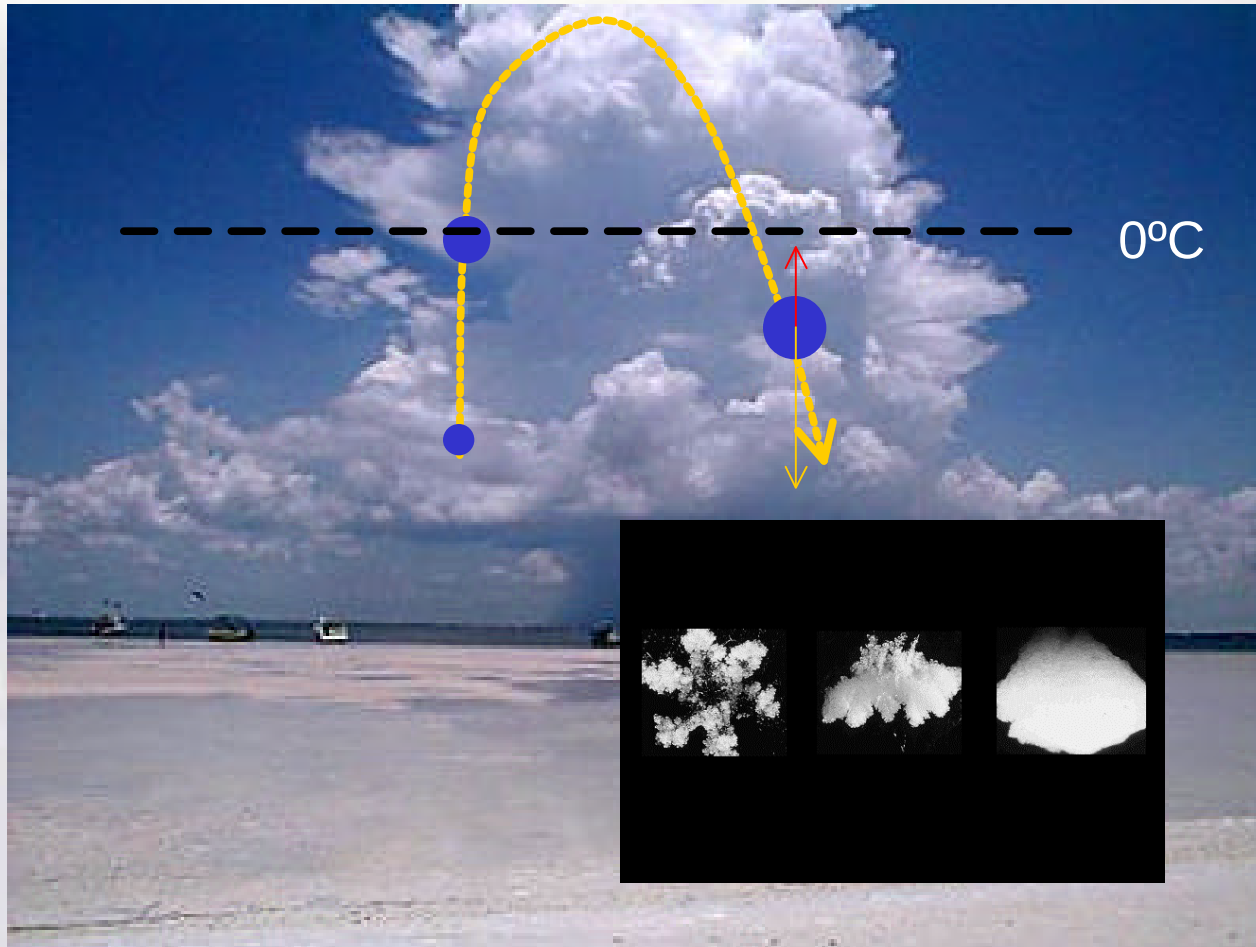
En una segunda etapa, las gotas crecen por colisión-coalescencia (choque entre gotas). La eficiencia de este mecanismo aumenta con el tamaño de la gota (mayor área colectora, mayor vel. terminal)



Por supuesto, la trayectoria de una gota puede complicada, en especial en una tormenta convectiva...



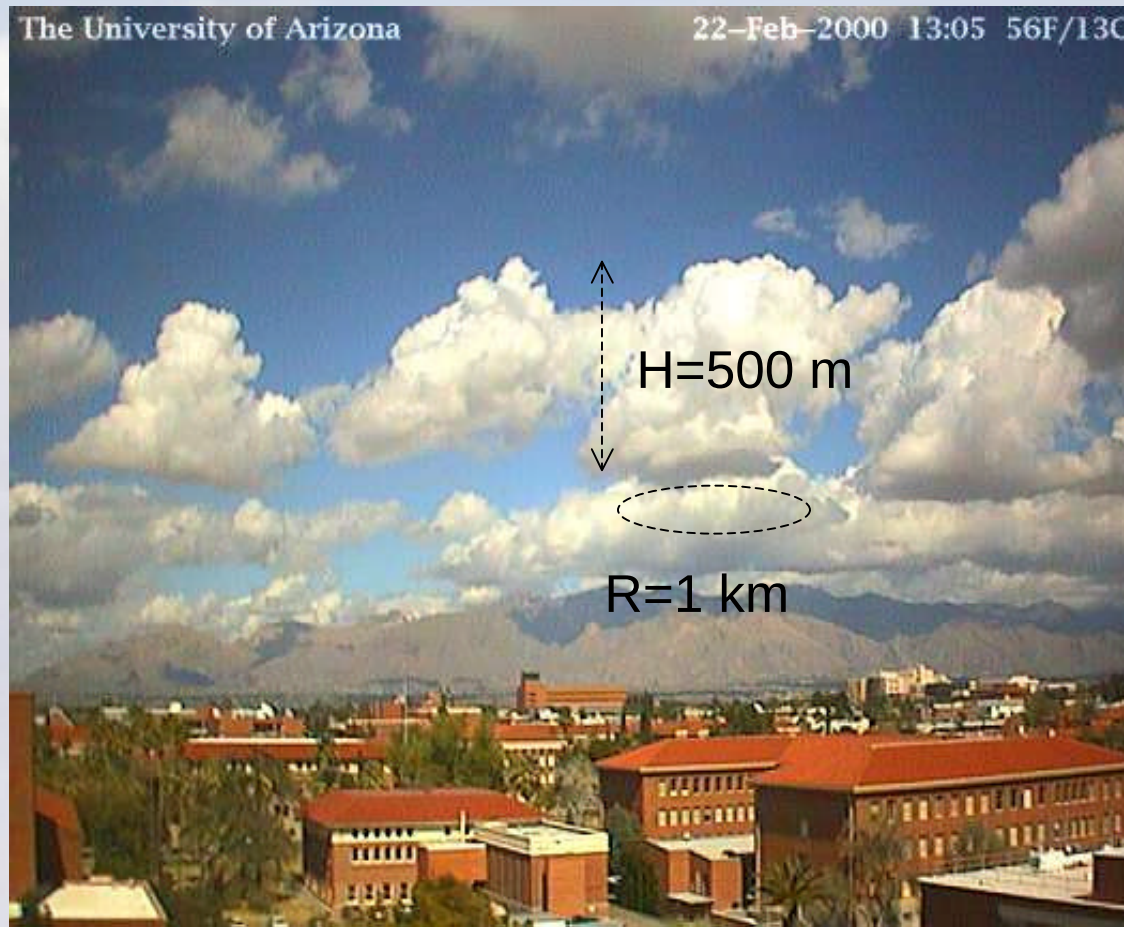
Las cosas también se complican en una nube fría (parte de su volumen esta sobre isoterma de 0°C). En este caso el agua se congela rápidamente y sigue creciendo como granizo..



Una situación distinta ocurre en una tormenta de nieve. En este caso toda (o casi toda) la nube esta bajo 0°C , y la difusión de vapor ocurre en torno a núcleos de condensación de hielo (típicamente en forma prismática), dando origen a la nieve.



¿Cuanto pesa una nube?



Conc. de gotas: 100
gotas/cm³

Tamaño de una gota:
0.01 mm = 1e-5 m

Densidad del aire:
1 kg/m³

Densidad del agua:
1000 kg/m³

Volumen de una gota = $\frac{4}{3}\pi r^3 = 4e-15 \text{ m}^3$

Masa de una gota = densidad * Volumen = $4e-12 \text{ kg}$

Masa de todas las gotas en $1 \text{ cm}^3 = 100 * M = 4e-10 \text{ kg}$

Masa de todas las gotas en $1 \text{ m}^3 = 4e-10 \text{ kg} * 1e6 \text{ m}^3 = 4e-4 \text{ kg/m}^3$

Masa de todas las gotas en $1 \text{ m}^3 = 0.4 \text{ g/m}^3$

Volumen de la nube = $A * H = (\pi * R^2) * H = 1.6 e+9 \text{ m}^3$

Masa de agua en la nube = $M_t * V_n = 4e-4 \text{ kg/m}^3 * 1.6e+9 \text{ m}^3 = 6e5 \text{ kg}$

600 toneladas!

Volumen de agua contenido en la nube = $6e5 \text{ kg} / (1000 \text{ kg/m}^3) = 600 \text{ m}^3$

Si distribuimos toda esa agua en el area basal de la nube,
la lamina de agua resulta = $600 \text{ m}^3 / (\pi * R^2) = 0.2 \text{ mm}$