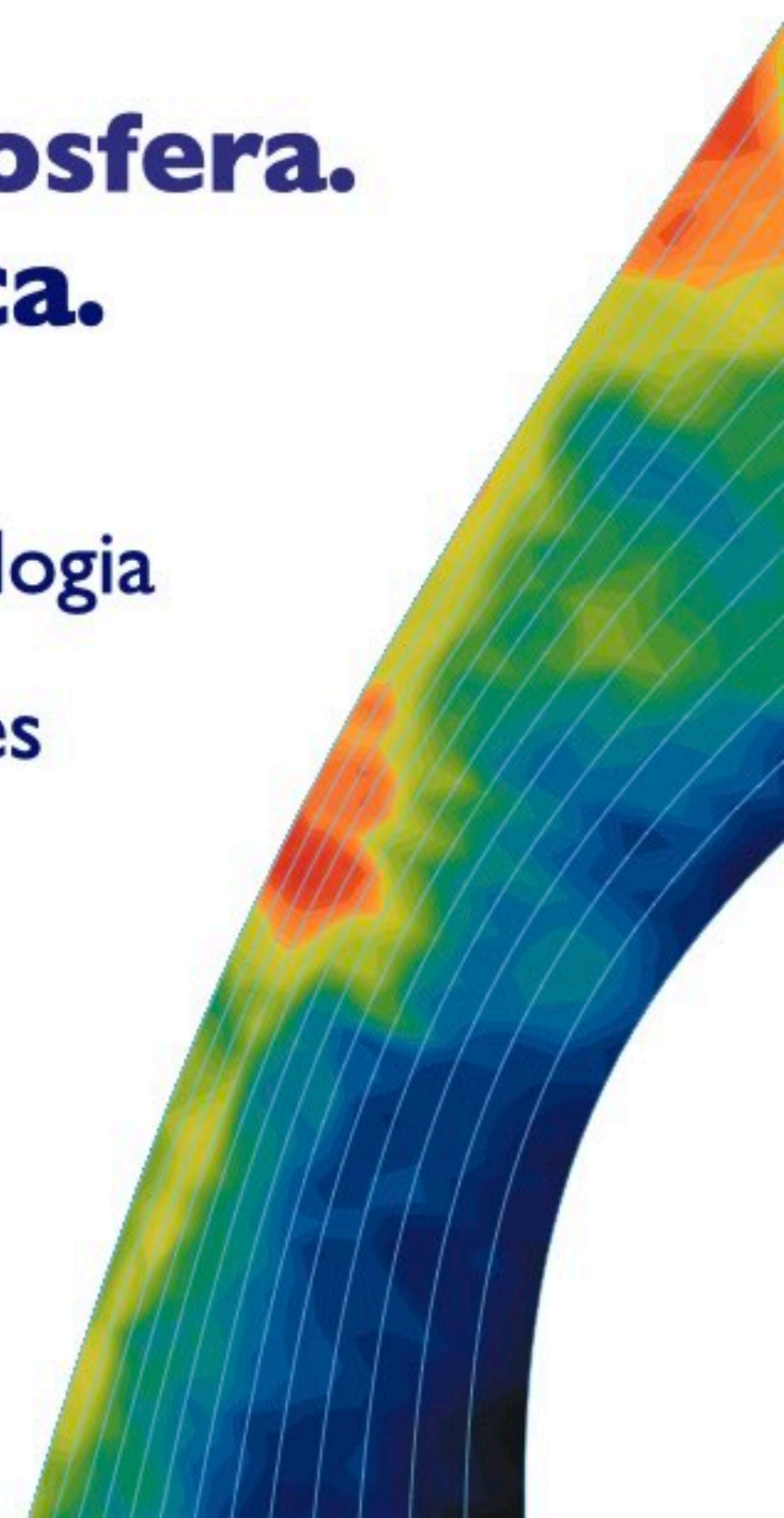


Classe 4: Aigua a l'atmosfera.

Humitat atmosfèrica.

Processos atmosfèrics i hidrologia

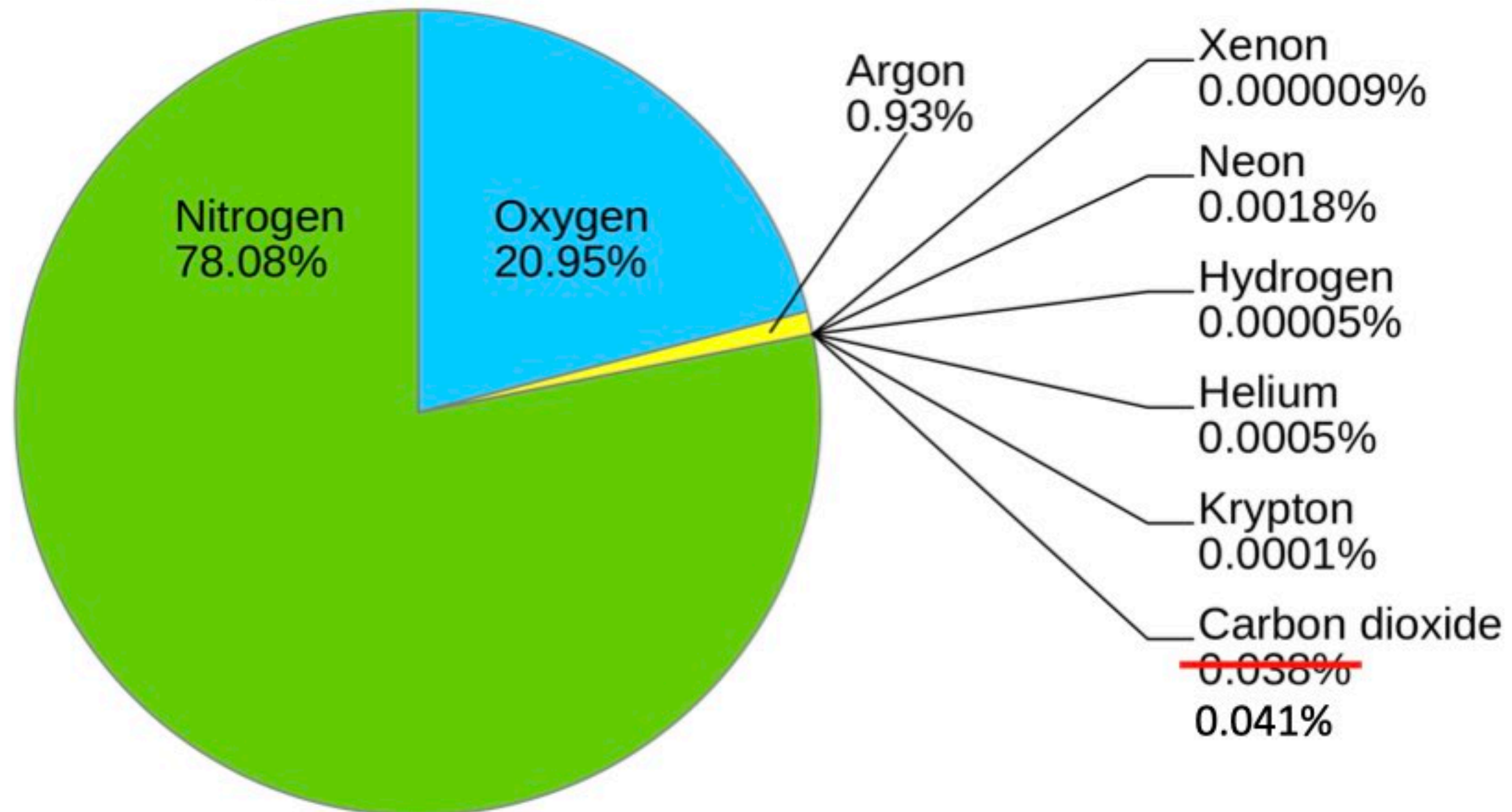
Prof. Daniel Sempere Torres
Prof. Shinju Park



Composició de l'aire sec (sense vapor d'aigua)

Composition of a DRY Atmosphere: Troposphere

Water Vapor Varies 0 – 5%



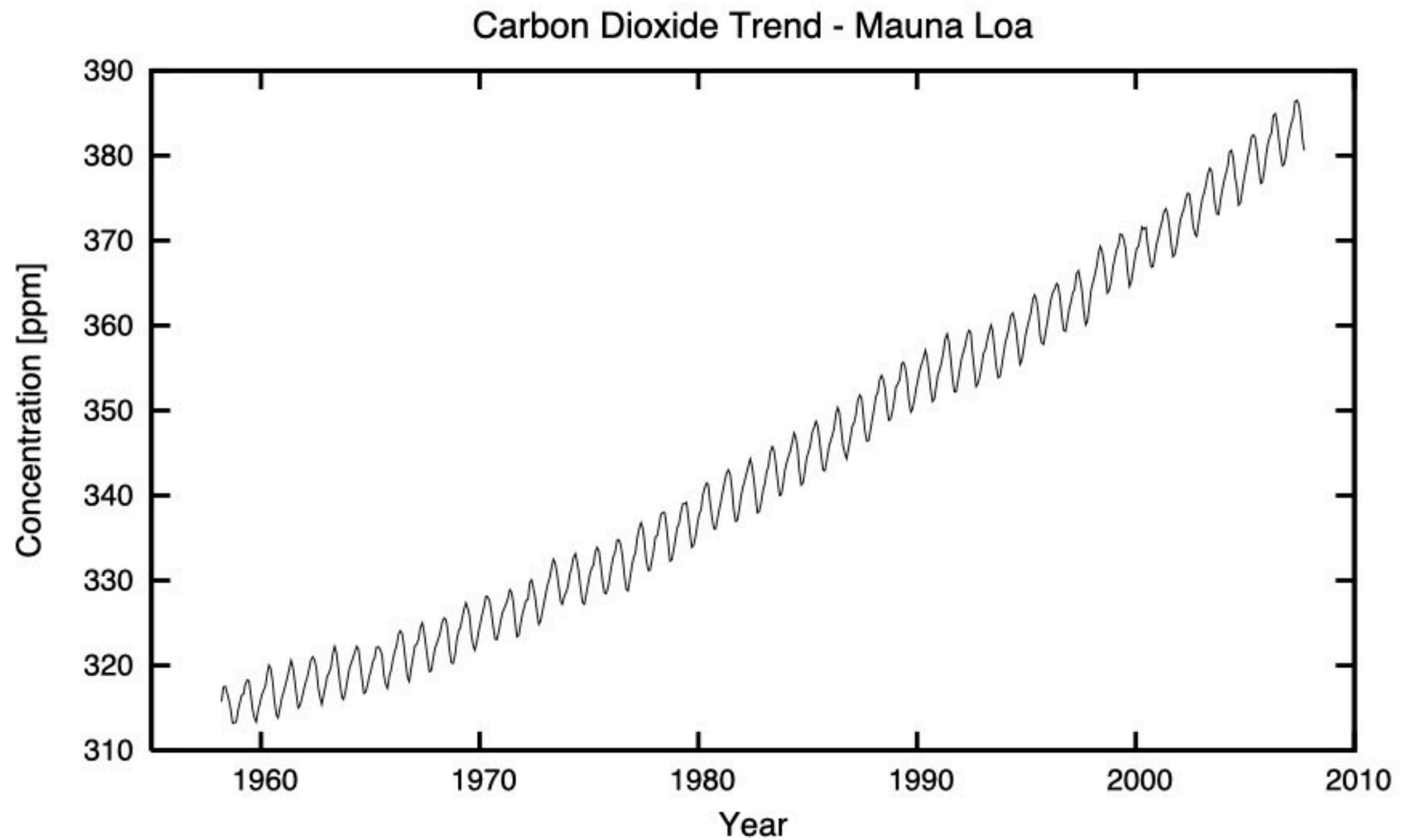


Fig. 1.4 Petty Textbook states: 383 ppm in 2007

409.44 ppm on April 9, 2016 at Mauna Loa

AIGUA A L'ATMOSFERA: humitat de l'aire

Malgrat que sigui un component que representa una petita fracció de l'aire atmosfèric (~2.5%), **l'aigua és el constituent més important de l'atmosfera des del punt de vista meteorològic.**

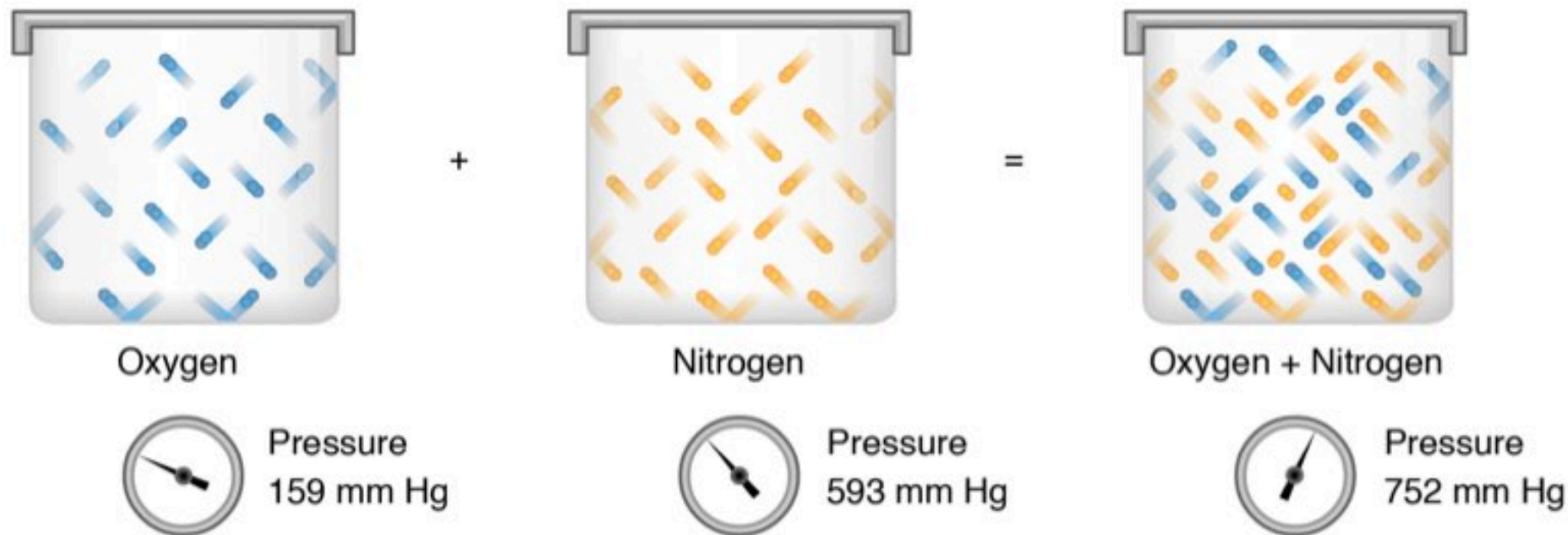
L'aigua (en forma de vapor d'aigua o d'aigua líquida) té un **paper central en l'equilibri termodinàmic i en el balanç d'energia de l'atmosfera.** I determina la formació dels núvols, de la pluja i de la neu.



Llei de Dalton o de les pressions parcials d'una barreja de gasos

La **pressió total** que exerceix una barreja de gasos és igual a la **suma de les pressions parcials** que exerceix individualment cadascun dels gasos que componen la barreja.

$$p = \sum_{i=1}^k p_i = \sum_{i=1}^k \rho_i R_i T$$



El mateix aplica quan barrejem aire sec (essencialment nitrogen i oxigen) amb vapor d'aigua per obtenir aire humit

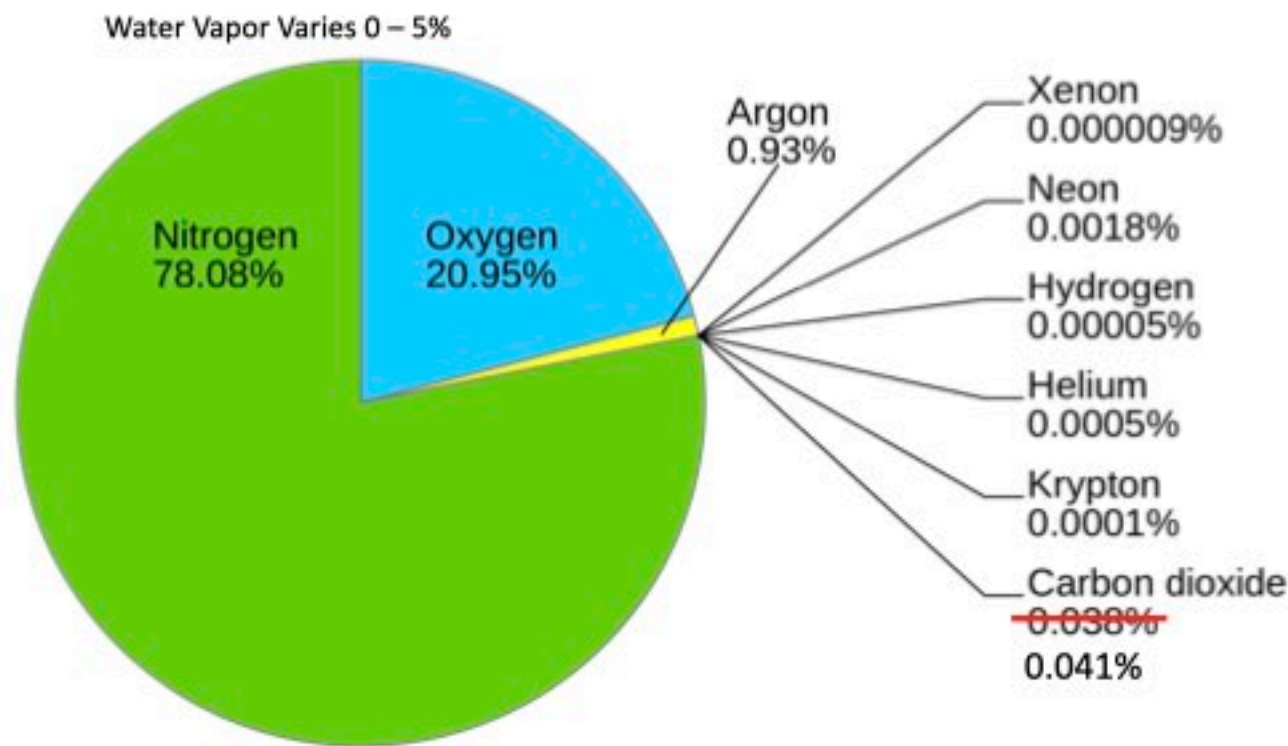
Aire atmosfèric = Aire Sec (DRY) + Vapor Aigua

Composició de l'aire humit (amb vapor d'aigua)

**AIRE SEC (Dry)
(sense vapor d'aigua)**

+ VAPOR D'AIGUA

Pressió de vapor d'aigua e :



$$e = \rho_v R_v T$$

$$R_v = \frac{R^*}{m_w}$$

$$R_v = 461.5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Llei de Dalton: la pressió total és la suma de pressions parcials

$$p = p_d + e$$

$$P = (\rho_d R_d + \rho_v R_v) T = (\rho_d + \rho_v) R_d T_v$$

TEMPERATURA VIRTUAL

$$P = (\rho_d R_d + \rho_v R_v) T = (\rho_d + \rho_v) R_d T_v$$

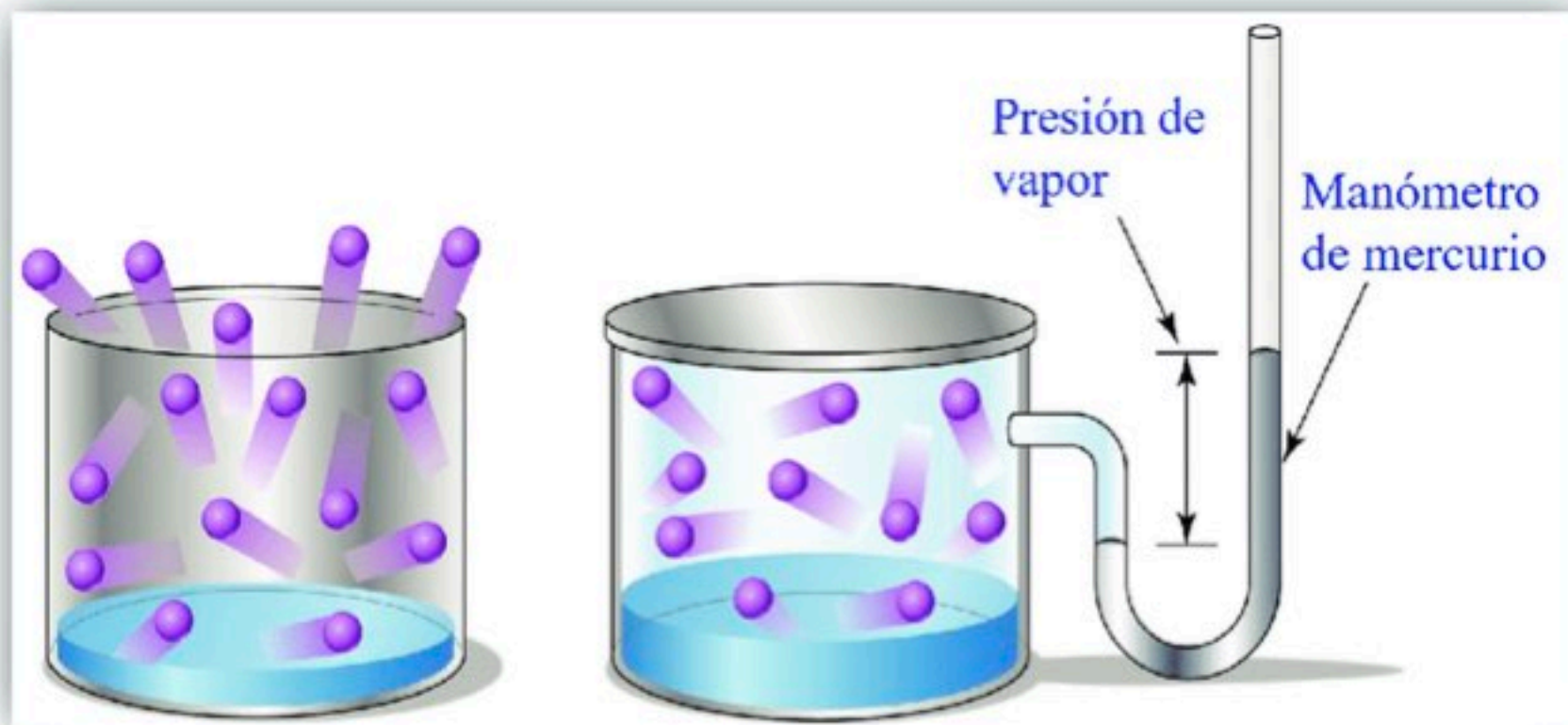
La **temperatura virtual** d'una bombolla d'aire humit és la temperatura a la qual una bombolla d'aire sec tindria una pressió i densitat total igual a la bombolla d'aire humit.

$$T_v \approx (1 + 0.61q)T$$

q és la humitat específica de la bombolla d'aire humit expressada com

$$q = \frac{M_v}{M_v + M_d} = \frac{\rho_v}{\rho_v + \rho_d}$$

L'utilització de la temperatura virtual fa que les equacions meteorològiques siguin MOLT menys complicades.



Sempre que hi tenim un líquid, immediatament part d'ell s'evapora i apareix una fracció en forma de gas.

Anomenem **VAPOR D'AIGUA** a l'aigua en forma gasosa i mesurarem la quantitat disponible a través de la **humitat de l'aire**

Anomenarem pressió de vapor a la **pressió parcial del vapor d'aigua a saturació o humitat de saturació (e_s)** que és la pressió exercida per un gas en **equilibri termodinàmic** amb les seves fases condensades (sòlida o líquida) a una temperatura concreta i en un sistema tancat.

$$e_s = e_s(T)$$

Mesures d'humitat (quantitat de vapor d'aigua en una bombolla d'aire)

Humitat absoluta:

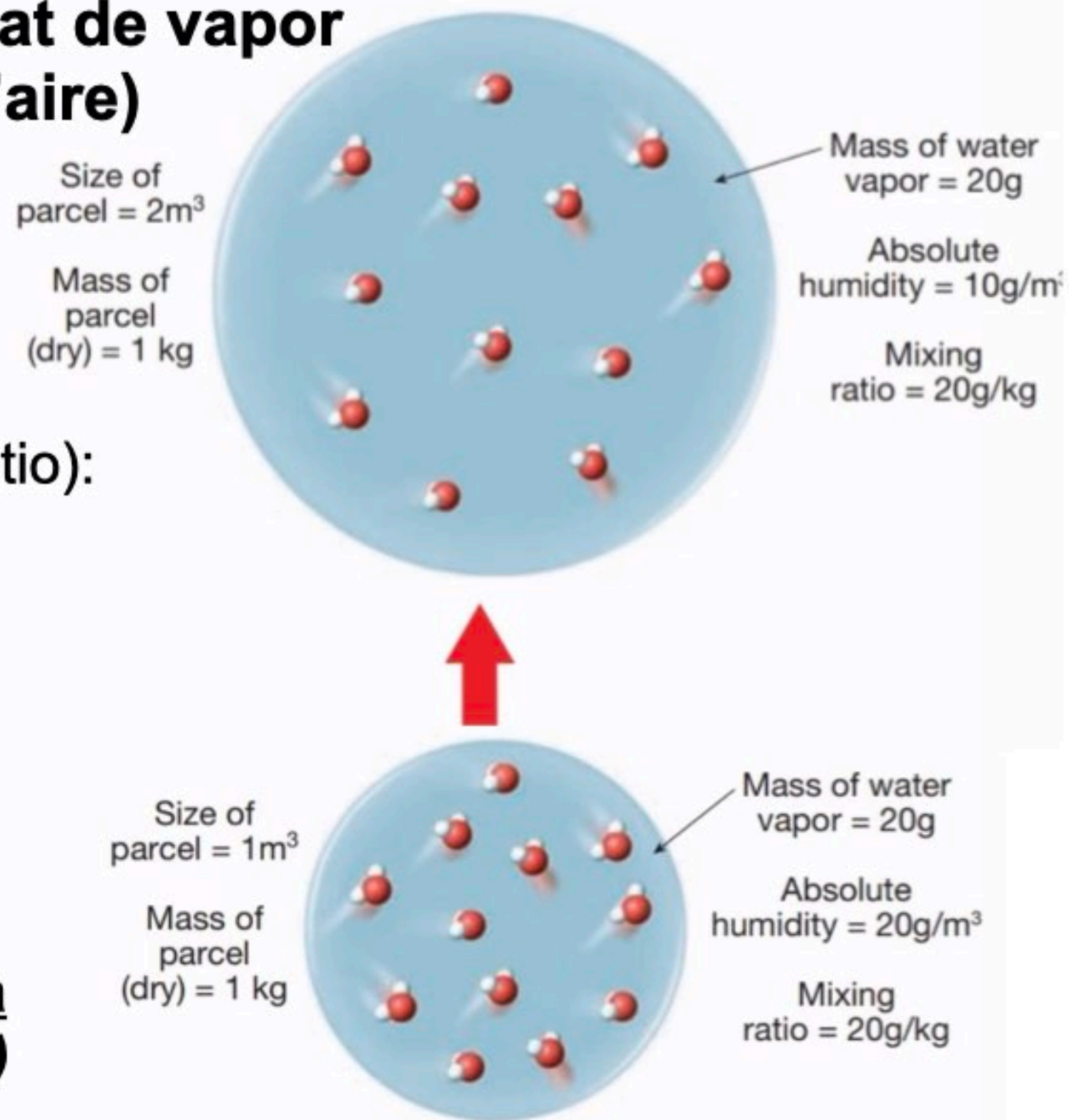
$$\frac{\text{Massa de vapor d'aigua (g)}}{\text{Volume d'aire (m}^3\text{)}}$$

Proporció de mescla (mixing ratio):

$$\frac{\text{Massa de vapor d'aigua (g)}}{\text{Massa d'aire sec (kg)}}$$

Humitat relativa (a una temperatura i pressió d'aire fixades):

$$\frac{\text{pressió parcial del vapor d'aigua}}{\text{pressió parcial de saturació } e_s(T)}$$



Comparació entre la mesura d'humitat absoluta i la proporció de mescla (mixing ratio) per una bombolla d'aire quan s'eleva en alçada. En expandir-se en volum (en disminuir la pressió de l'aire que l'envolta), la mesura d'humitat absoluta canvia, però **la proporció de mescla roman constant**.

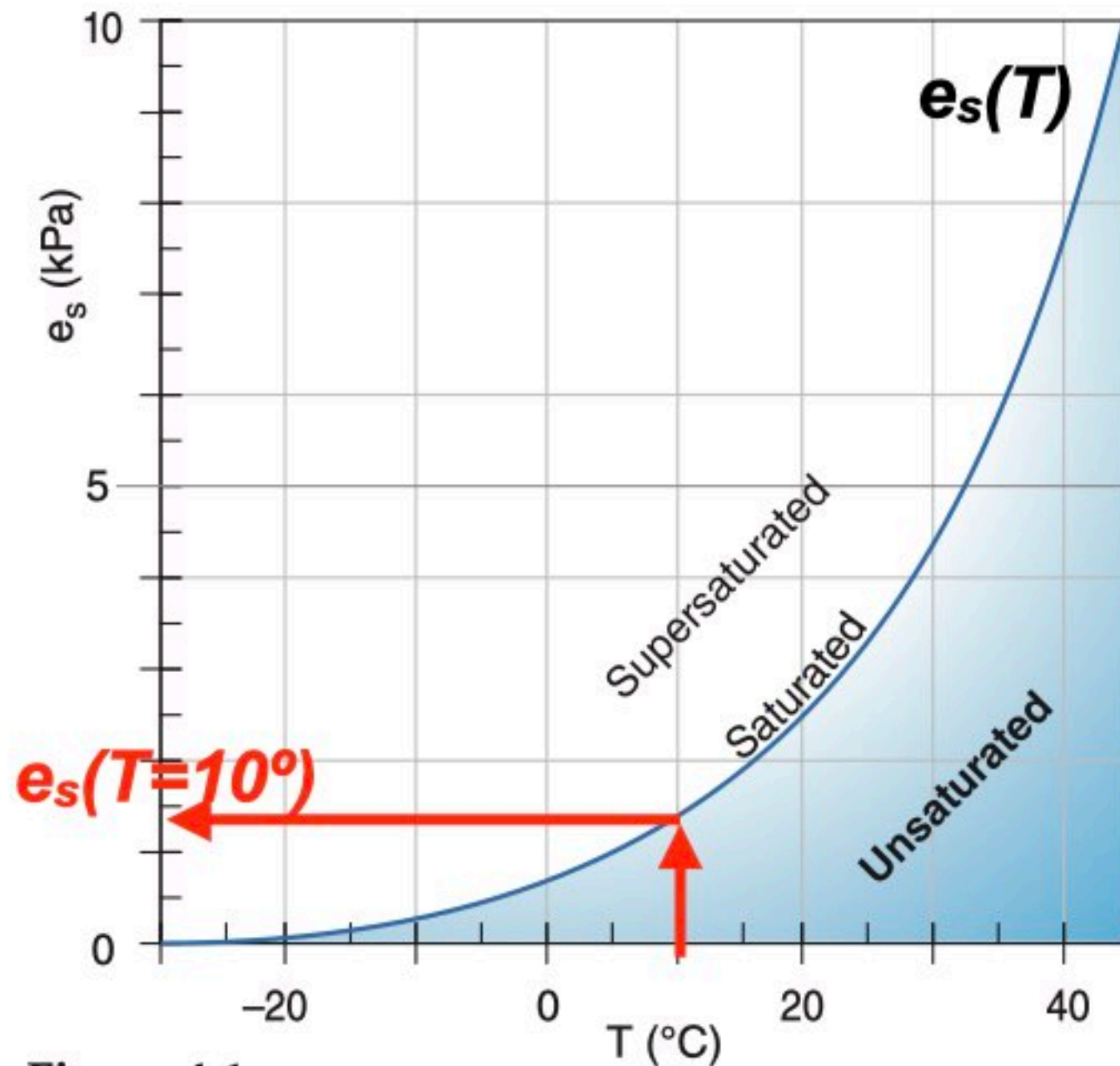


Figure 4.1

Pure-water saturation vapor pressure over a flat water surface.

La humitat de saturació (e_s) és la pressió de vapor d'aigua a partir de la qual es condensa més ràpidament del que s'evapora, reduint així la concentració de vapor d'aigua al valor de saturació o equilibri.

e_s varia amb la temperatura de forma exponencial

$$e_s \approx e_o \cdot \exp \left[\frac{L}{\mathfrak{R}_v} \cdot \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

where the water-vapor gas constant is $\mathfrak{R}_v = 461 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, $T_o = 273.15 \text{ K}$, $e_o = 0.6113 \text{ kPa}$, and L is a latent-heat parameter. Temperatures in this equation must have units of Kelvin.

This equation works for saturation over both liquid water and solid water (ice) surface if these surfaces are flat. For liquid water the latent heat of vaporization $L = L_v = 2.5 \times 10^6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, giving $L_v/\mathfrak{R}_v = 5423 \text{ K}$. For ice the latent heat of deposition $L = L_d = 2.83 \times 10^6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $L_d/\mathfrak{R}_v = 6139 \text{ K}$.

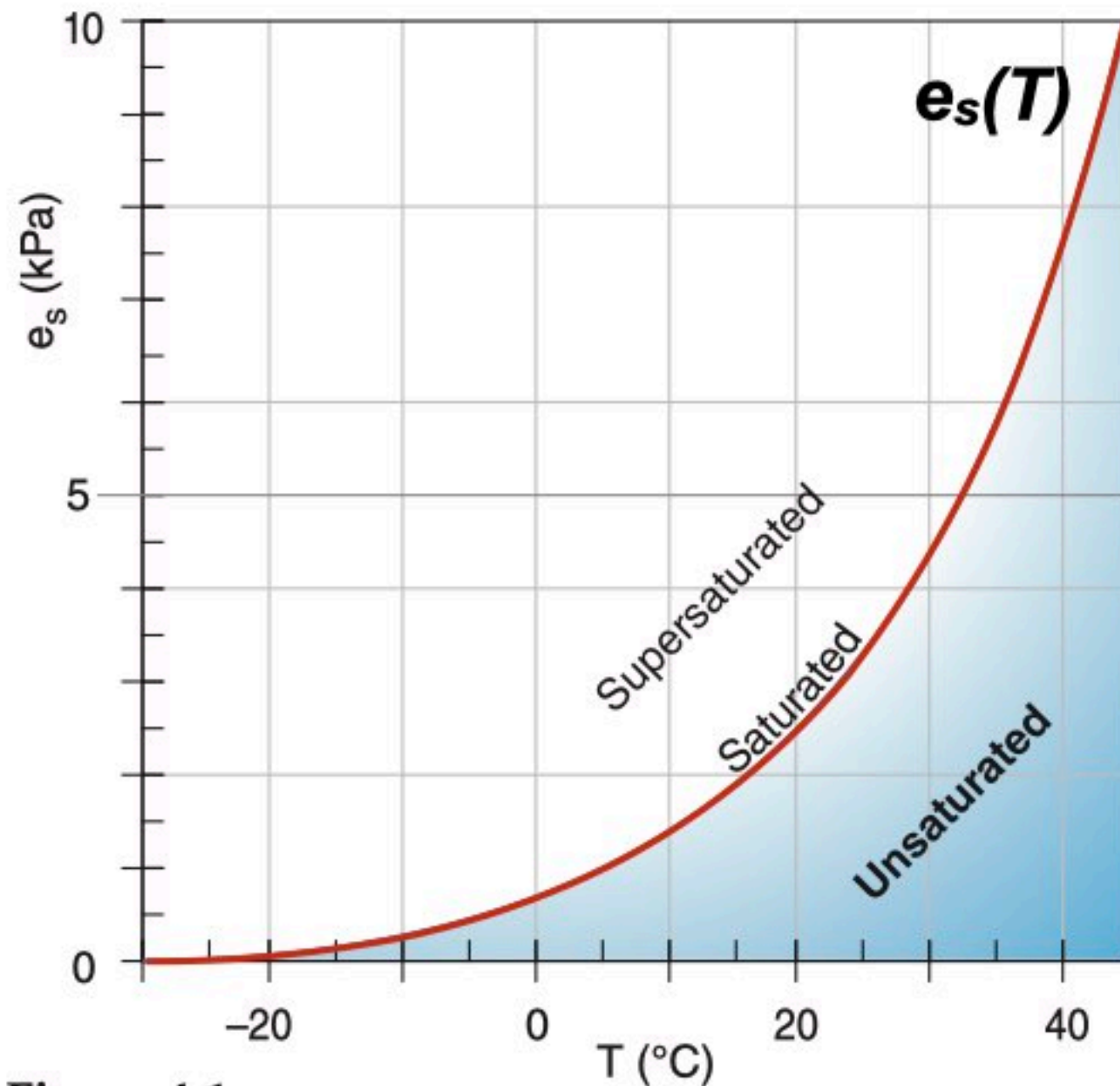


Figure 4.1

Pure-water saturation vapor pressure over a flat water surface.

Quan $e = e_s(T)$

es diu que **l'aire està saturat** i el vapor està en equilibri amb l'aigua líquida. La corba representa la pressió de vapor de saturació en equilibri sobre aigua pura amb una superfície plana.

La humitat relativa és llavors = 100%

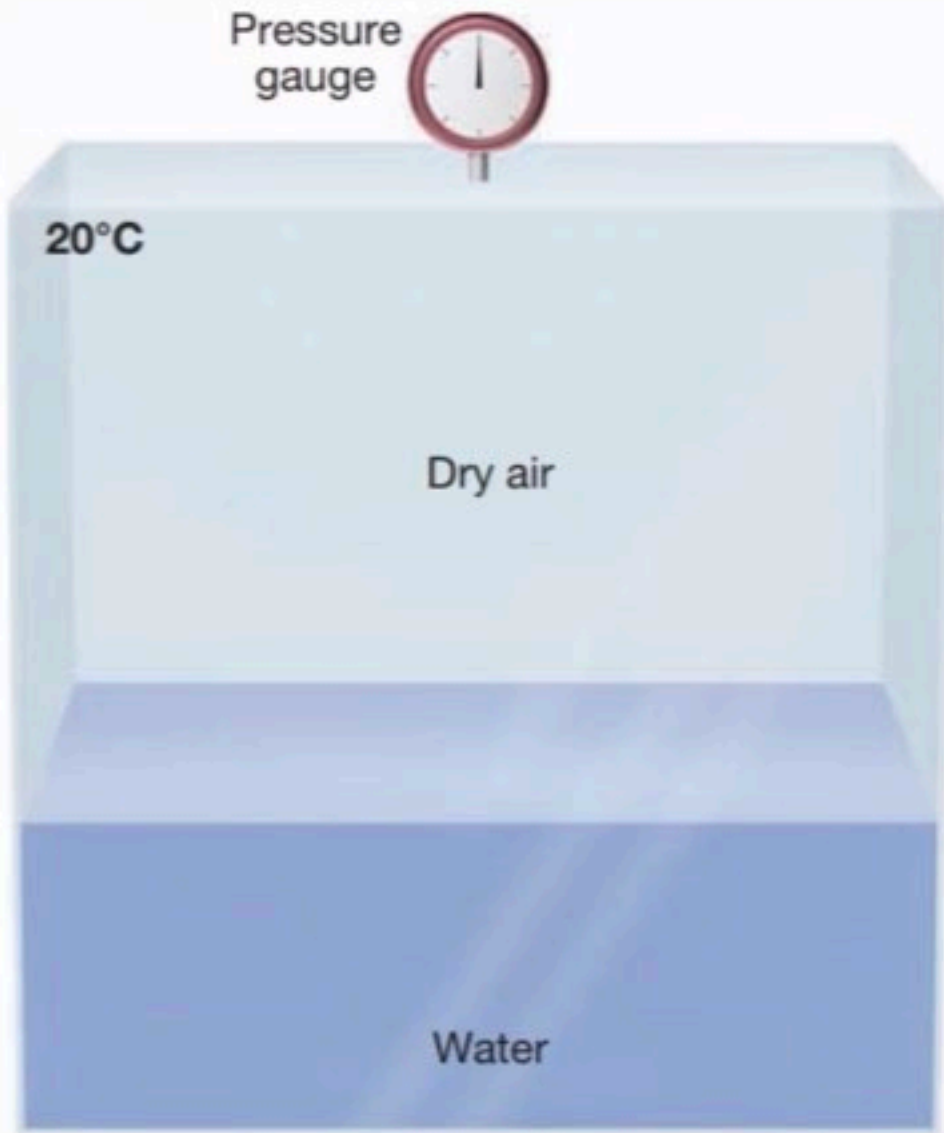
Sovint passa que la pressió de vapor es manté per sota de la saturació

$$e < e_s(T)$$

i es diu que **l'aire no està saturat**. Per a aquest cas.

En certes condicions especials l'aire pot contenir més vapor que el de saturació $e > e_s(T)$, i l'aire en aquestes condicions es troba **sobresaturat**.

L'aire sobresaturat es pot produir com a condició transitòria mentre l'excés de vapor d'aigua es condensa a les superfícies disponibles, com ara partícules de pols anomenades nuclis de condensació. Però és estrany que la pressió del vapor superi l'1% del valor de saturació.

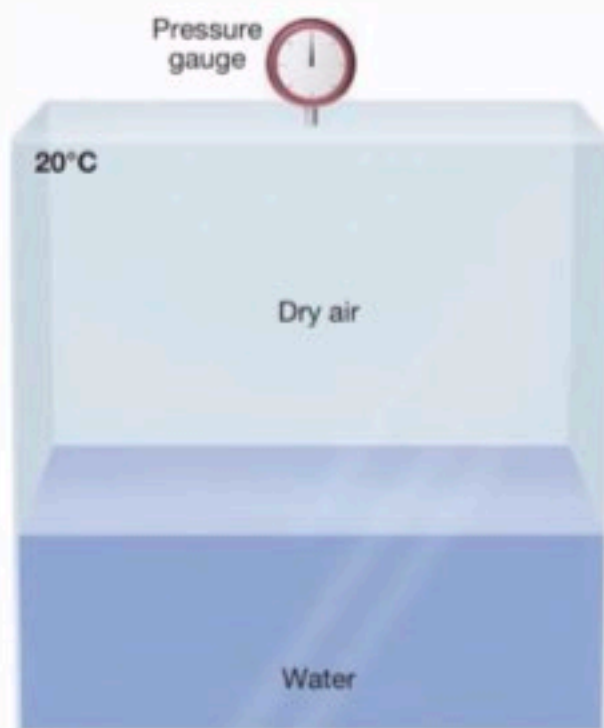


(a)

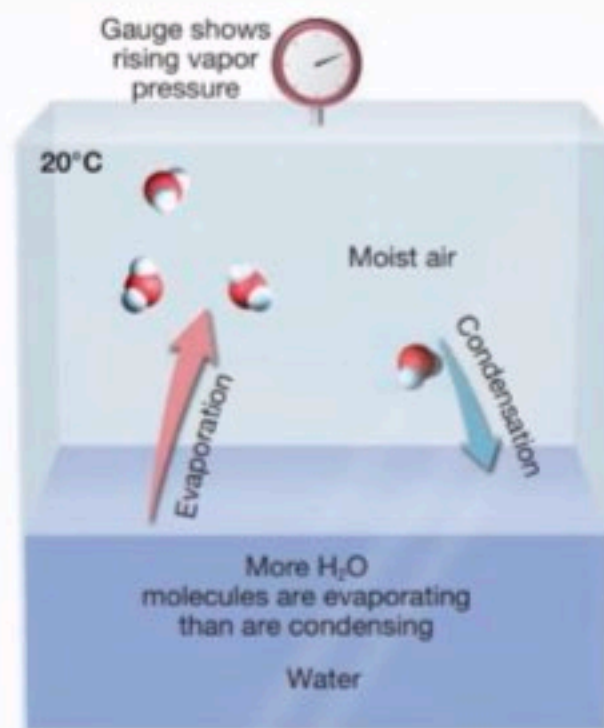
La relació entre la pressió de vapor i la saturació.

(a) Condicions inicials: aire sec a 20 ° C sense pressió de vapor observable.

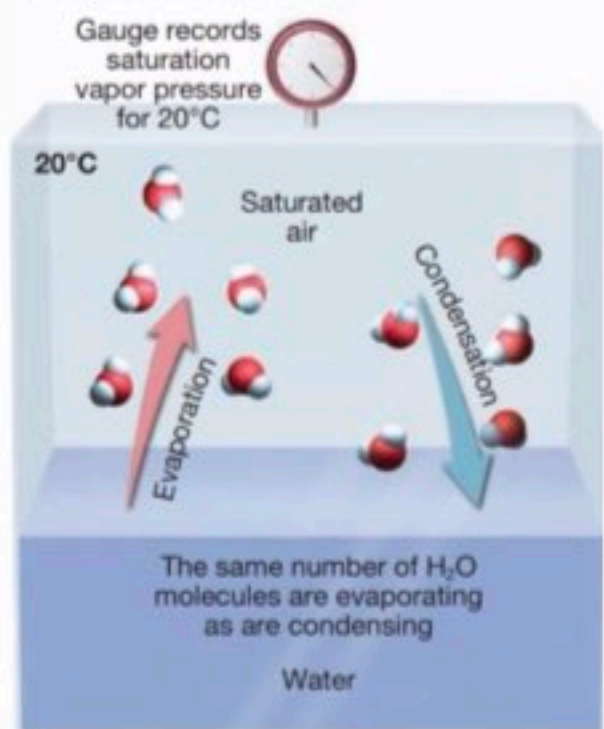
(b) L'evaporació genera una pressió de vapor mesurable.



(a)



(b)

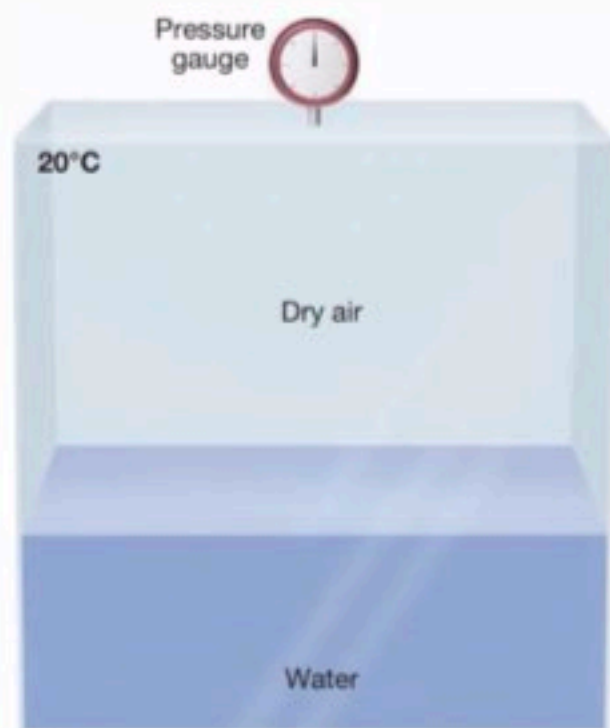


(c)

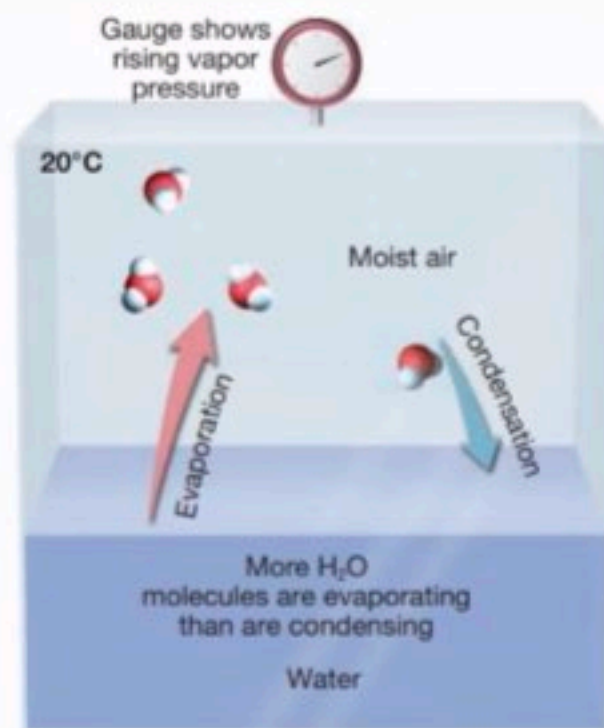
La relació entre la pressió de vapor i la saturació.

(c) A mesura que cada vegada hi ha més molècules que s'escapen de la superfície de l'aigua, la pressió de vapor augmenta constantment i fa que cada vegada més aquestes molècules tornin al líquid. Finalment, **el nombre de molècules de vapor d'aigua que tornen al líquid equilibra el nombre que surt.**

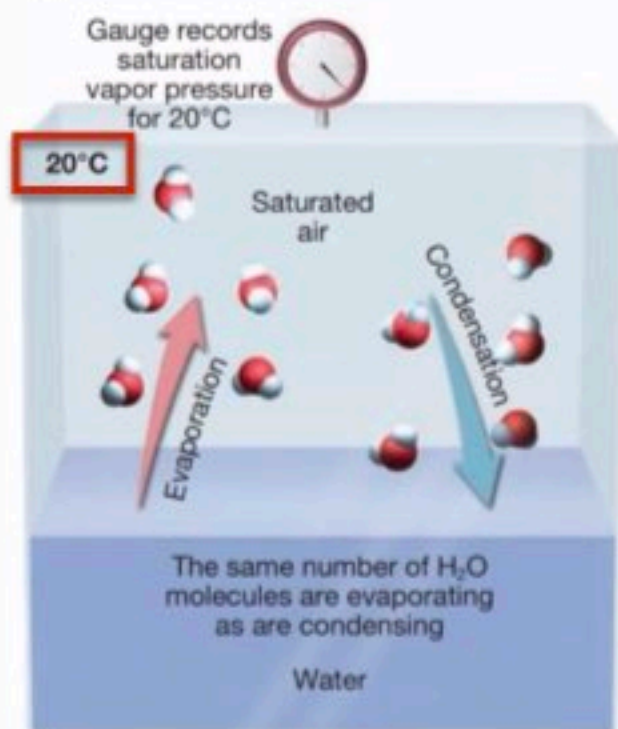
En aquest moment es diu que **l'aire està saturat.**



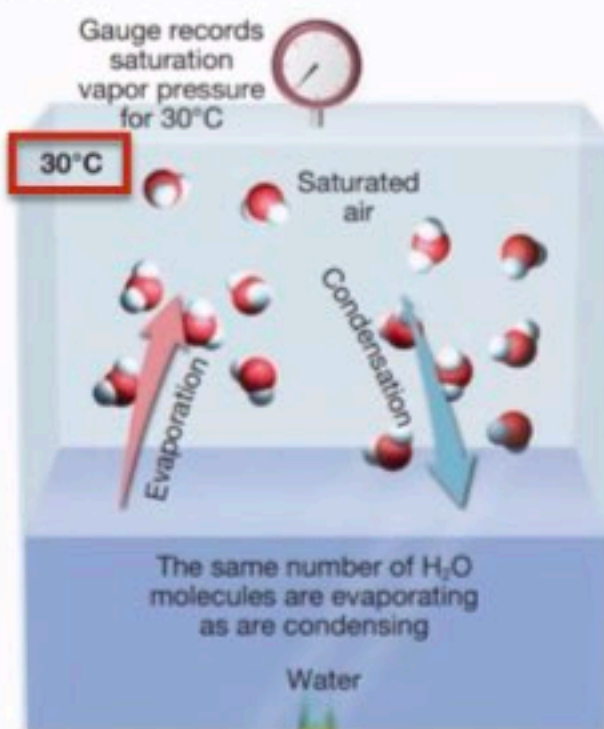
(a)



(b)



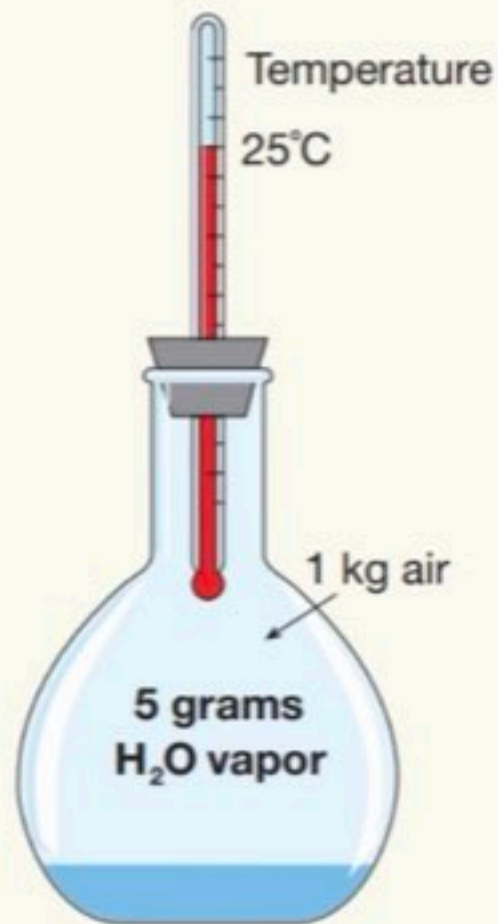
(c)



(d)

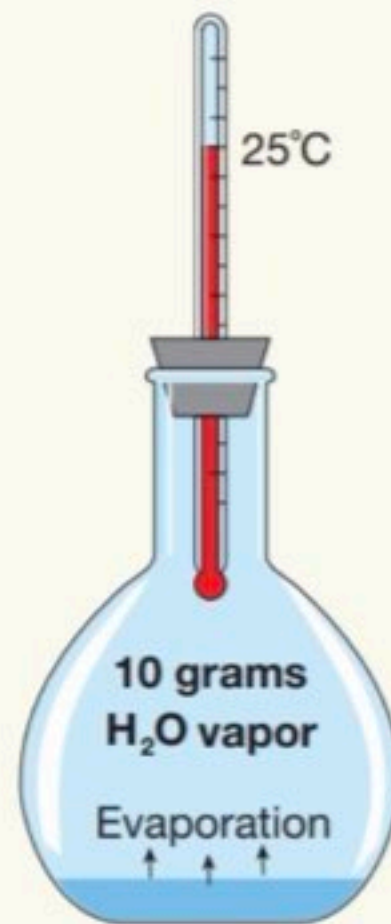
La relació entre la pressió de vapor i la saturació.

(d) Quan el recipient s'escalfa de 20 ° a 30 ° C, la velocitat d'evaporació augmenta, cosa que fa que augmenti la pressió de vapor fins que s'aconsegueixi un nou equilibri.



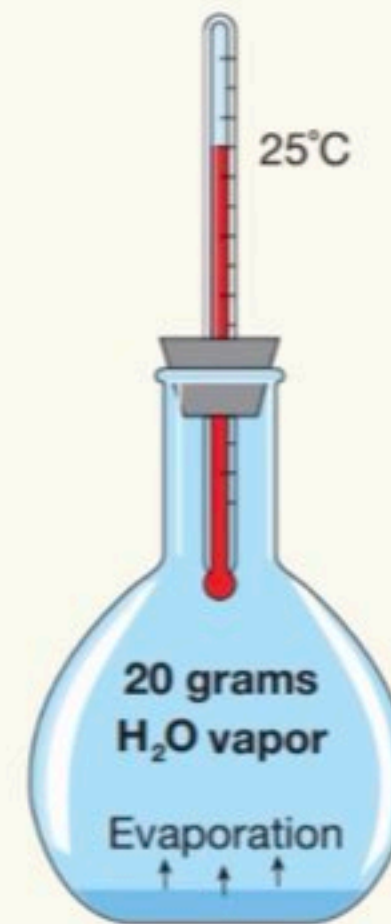
1. Saturation mixing ratio at 25° C = 20 grams
2. H₂O vapor content = 5 grams
3. Relative humidity = $\frac{5}{20} = 25\%$

(a) Initial condition: 5 grams of water vapor



1. Saturation mixing ratio at 25° C = 20 grams
2. H₂O vapor content = 10 grams
3. Relative humidity = $\frac{10}{20} = 50\%$

(b) Addition of 5 grams of water vapor = 10 grams

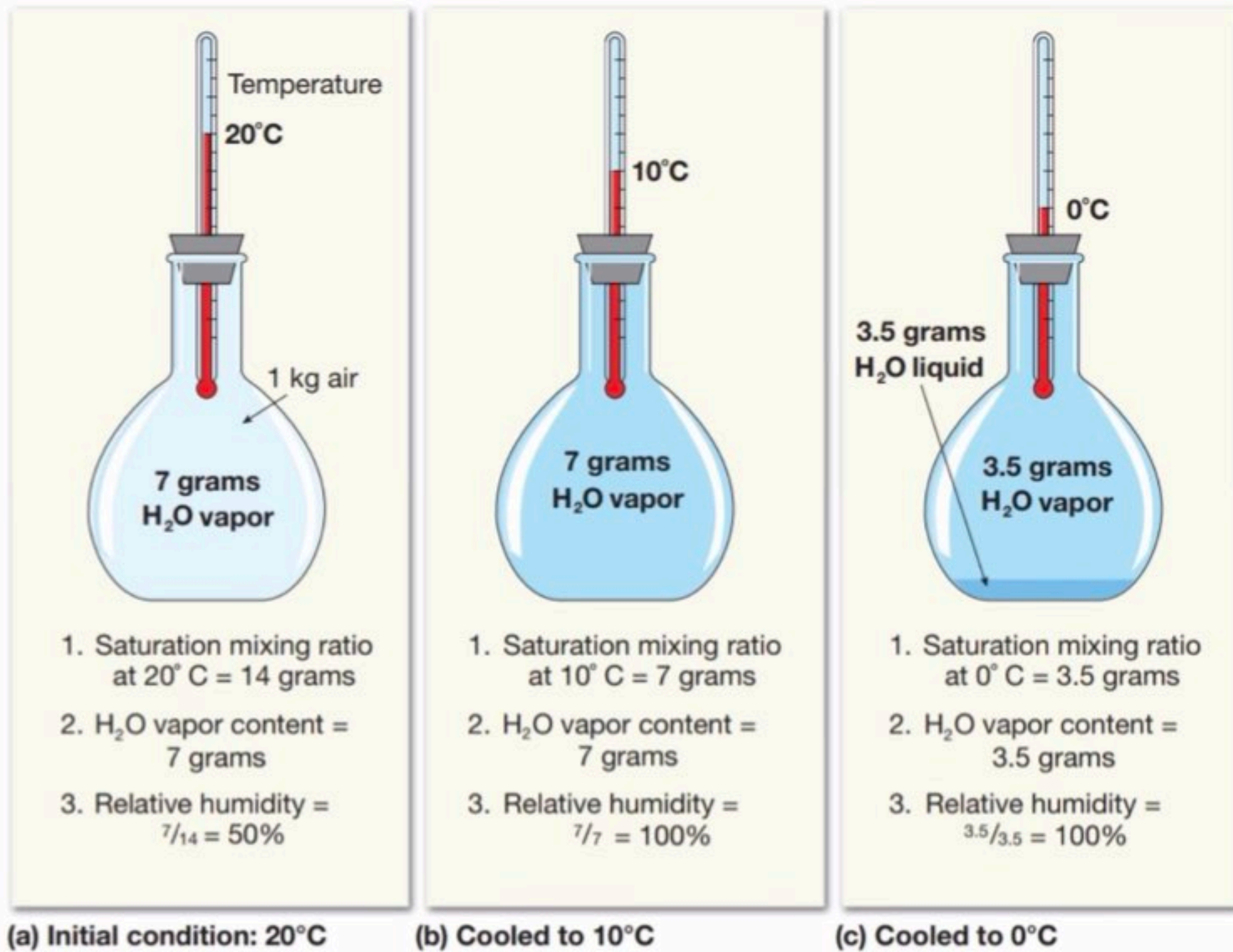


1. Saturation mixing ratio at 25° C = 20 grams
2. H₂O vapor content = 20 grams
3. Relative humidity = $\frac{20}{20} = 100\%$

(c) Addition of 10 grams of water vapor = 20 grams

Tanquem en un recipient 1 kg d'aire a 25° amb una mica d'aigua líquida. La humitat de saturació ($e_s(T)$) expressada com a proporció de mescla a saturació es de 20 g/kg.

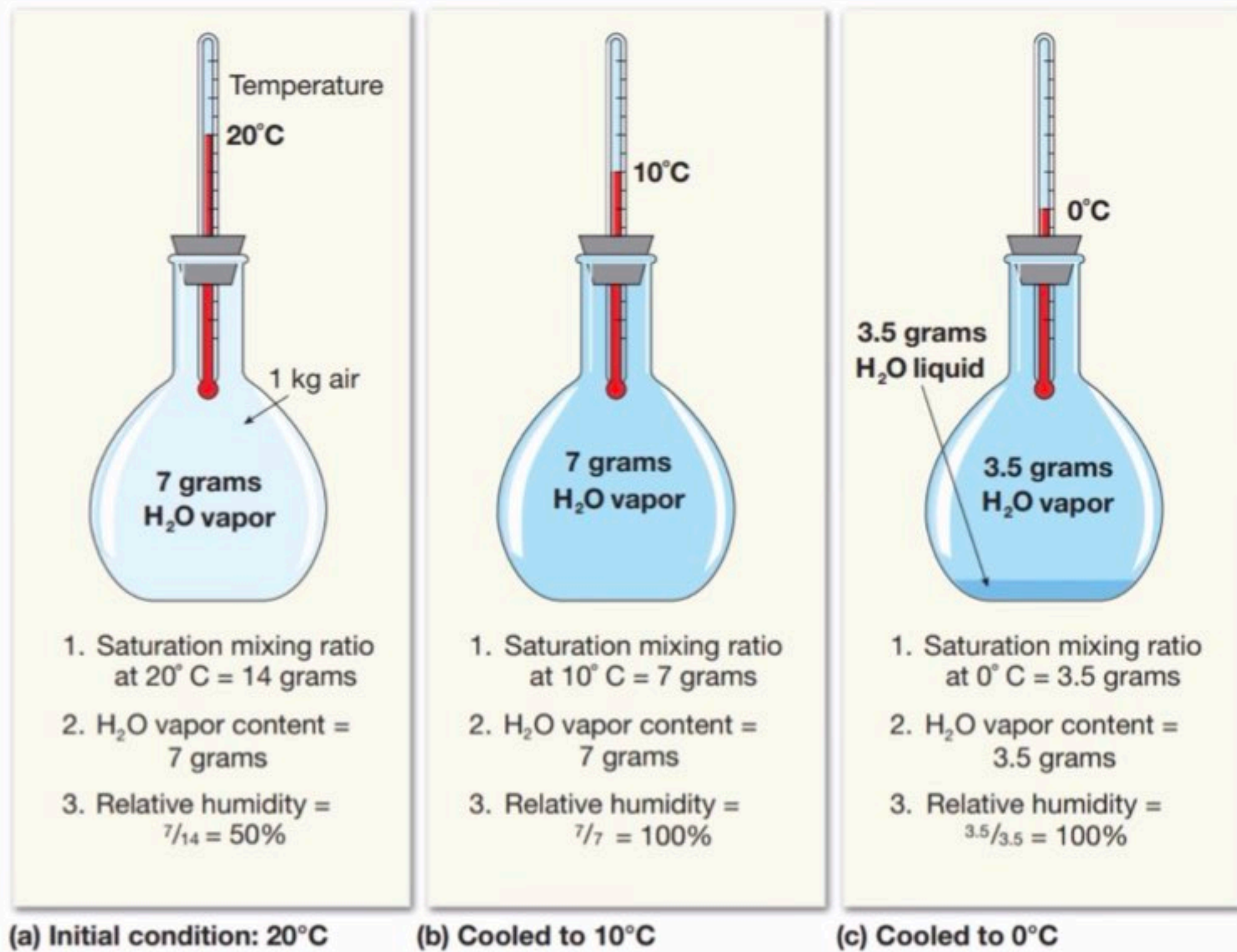
Que passa conforme el temps passa?



Tanquem en un recipient buit, 1 kg d'aire a 20° amb humitat de 7 g/kg. La humitat de saturació ($e_s(T)$) expressada com a proporció de mescla a saturació es de 14 g/kg.

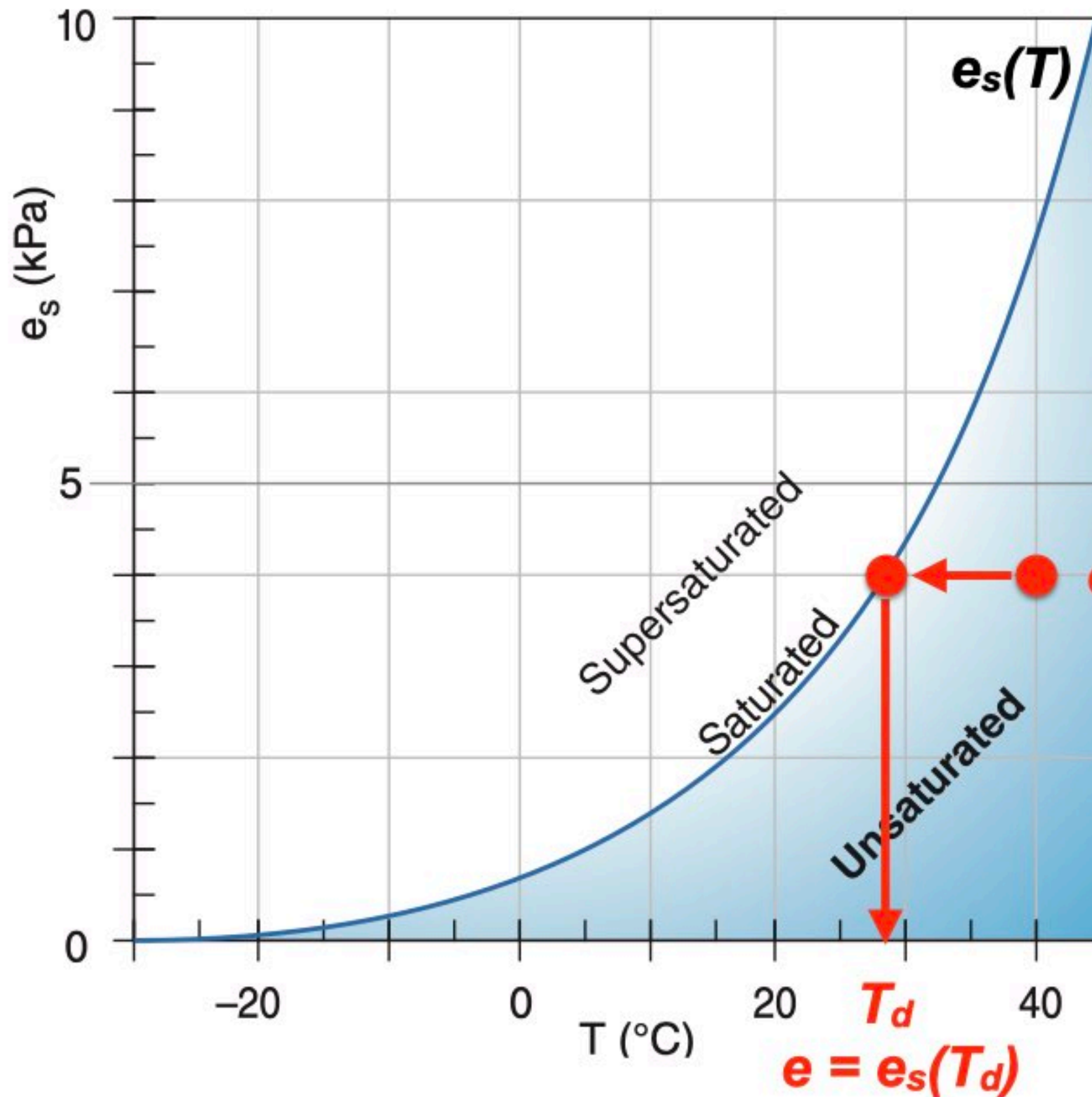
Que passa si el refredem a 10° ($e_s(T=10^\circ) = 7 \text{ g/kg}$)?

I si el refredem a 0° ($e_s(T=0^\circ) = 3,5 \text{ g/kg}$)?



La **Temperatura de rosada**: temperatura a la qual hem de refredar l'aire a pressió constant perquè el contingut de vapor d'aigua estigui a saturació (100% d'humitat relativa), és també una mesura d'humitat

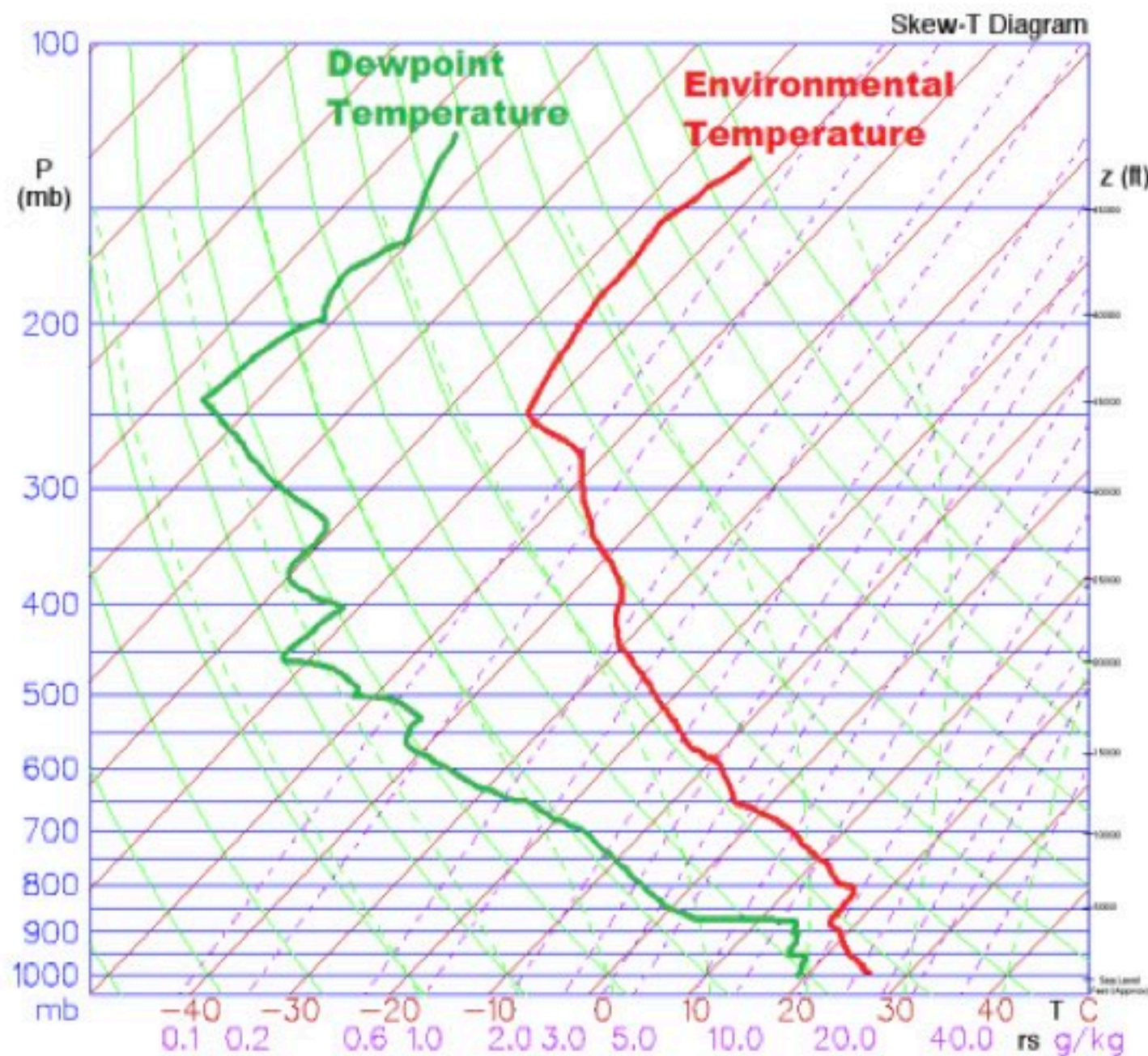
Temperatura de rosada com a mesura d'humitat (Td , Dew-point temperature)



Refredament a pressió constant

Punt d'ebullició:
quan la pressió externa
s'igualava amb $e_s(T)$
 $P = e_s(T)$

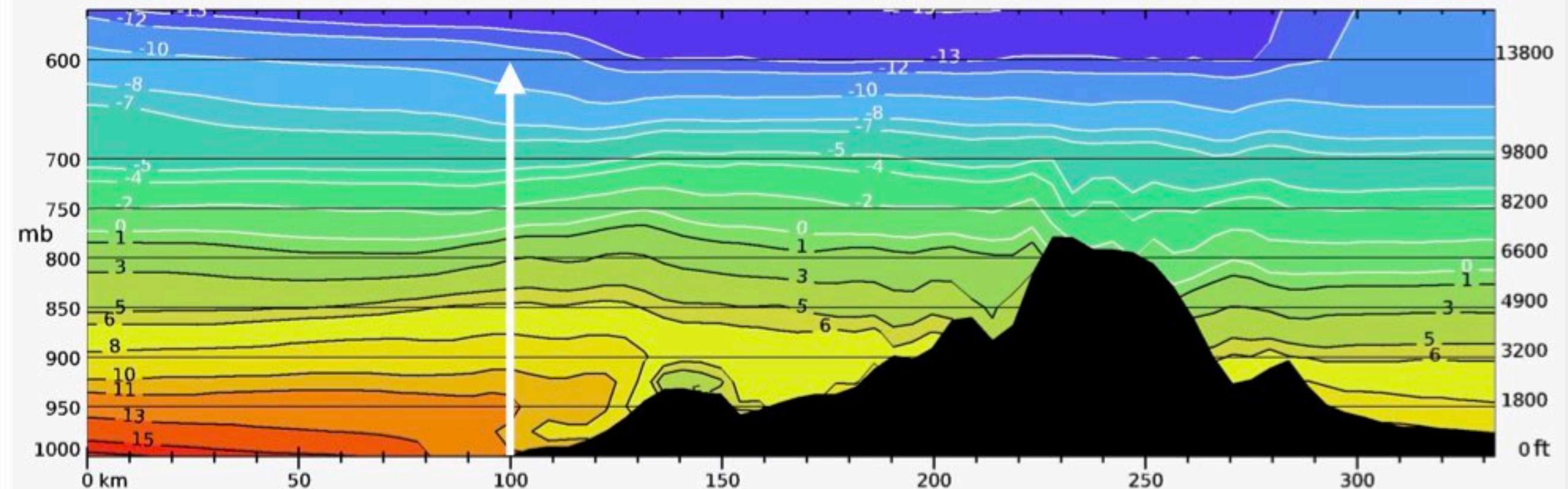
e.g. Thermodynamic Diagram = Skew-T log p chart



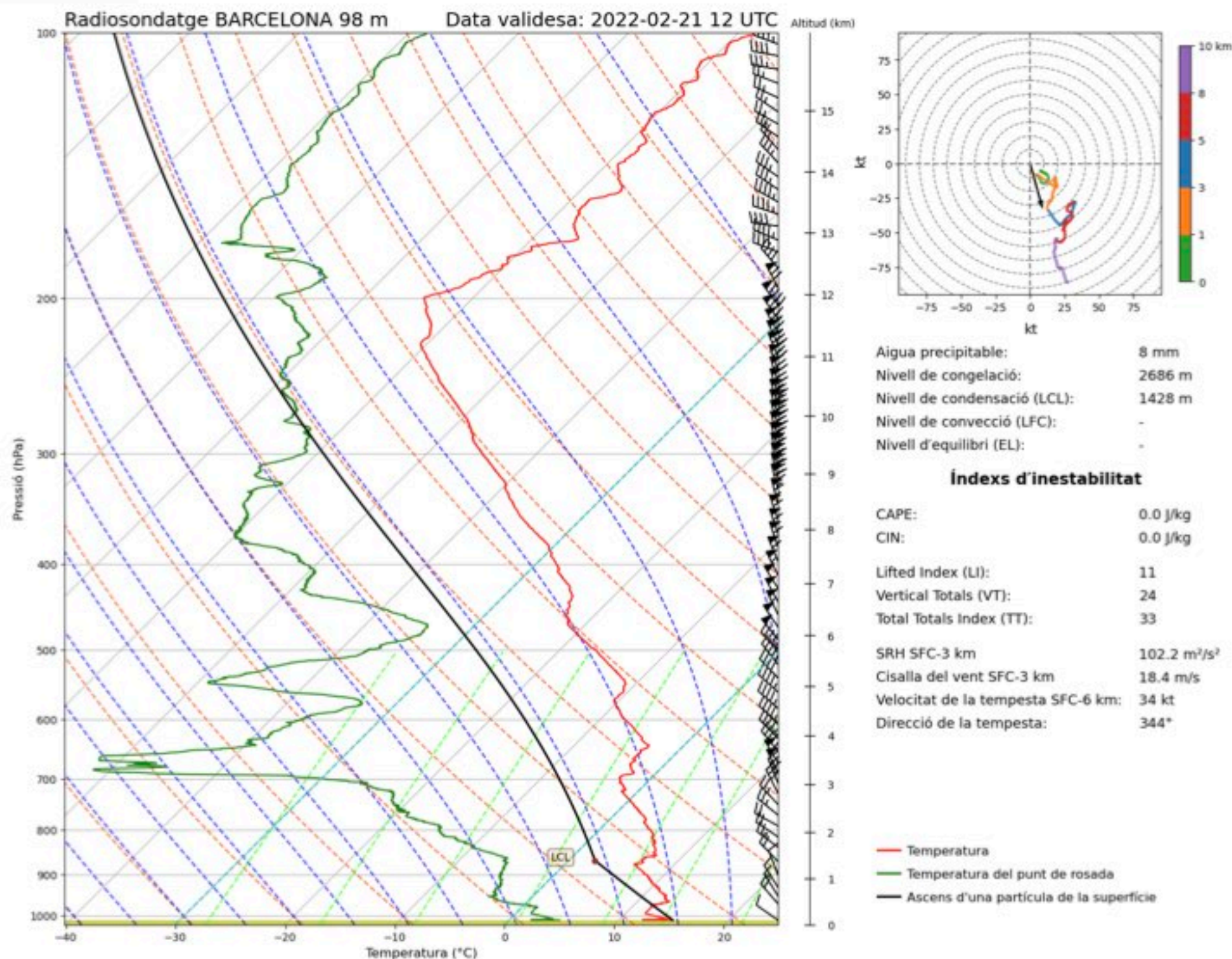
L'evolució en alçada de la temperatura de l'aire i de la temperatura de rosada (que és una mesura de la seva humitat) es pot mesurar mitjançant **radiosondatges atmosfèrics**

2020-10-05 07:00 UTC

Temperature (°C)



L'evolució en alçada de la temperatura de l'aire i de la temperatura de rosada (que és una mesura de la seva humitat) es pot mesurar mitjançant **radiosondatges atmosfèrics**



L'evolució en alçada de la temperatura de l'aire i de la temperatura de rosada (que és una mesura de la seva humitat) es pot mesurar mitjançant **radiosondatges atmosfèrics**



Observacions

Estacions automàtiques (XEMA) >

Estacions manuals (XOM) >

Radar (XRAD)

Pluja o neu

Llamps (XDDE)

Radiosondatge

Satèl·lit Meteosat

Campanya #meteocatpedra

Recerca i divulgació

Mapa d'avisos

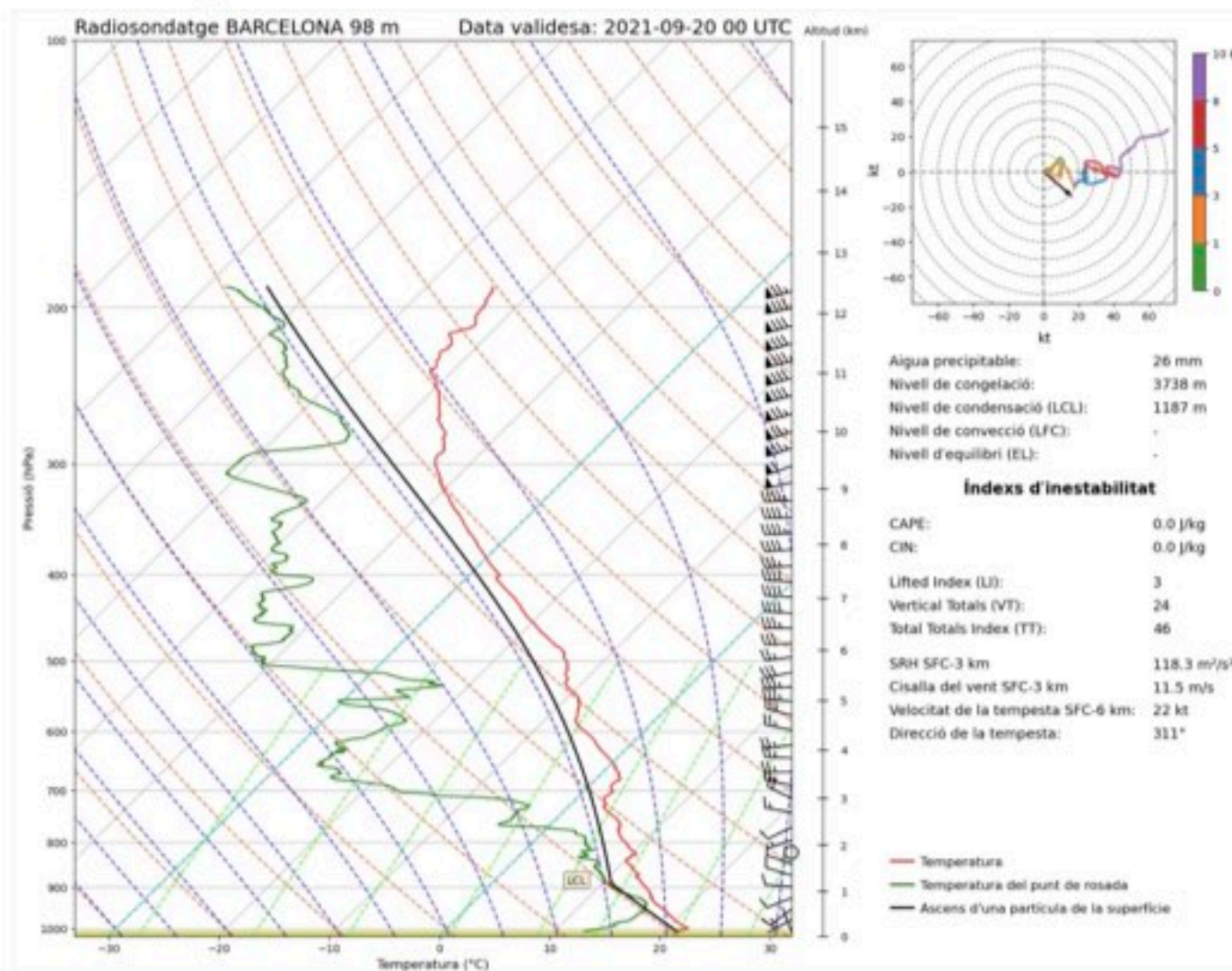
dl. 20 dt. 21 dc. 22



Avisos de perill

Inici > Observacions > Radiosondatge

Radiosondatge



Divulgació...

> Radiosondatge

Com interpretar la imatge

Diagrama oblic amb la representació de l'estat de l'atmosfera en la vertical de Barcelona, realitzat per una radiosonda. Trobareu l'explicació detallada sobre aquest gràfic i la seva interpretació al [Manual d'Interpretació del Radiosondatge](#) i a l'apartat de Divulgació, [Què és un radiosondatge?](#)

Imatge desenvolupada amb tecnologia METPY



Servei Meteorològic de Catalunya > Divulgació > Equipaments meteorològics > Radiosondatge > Manual d'interpretació del radiosondatge

Manual d'interpretació del radiosondatge

El diagrama oblic o Skew-T

El diagrama oblic o *Skew-T* és el gràfic termodinàmic estàndard i s'utilitza de manera molt generalitzada en el món de la meteorologia per a representar l'estat de l'atmosfera en la vertical d'un punt. Permet visualitzar el perfil vertical de diverses variables meteorològiques i, per tant, conèixer les condicions atmosfèriques en el moment de l'observació a diferents altituds. Alhora, facilita el càlcul de diferents paràmetres d'utilitat per a la diagnosi i la previsió meteorològica.

Tal com es pot veure a la figura 1, la temperatura de l'aire en la vertical d'un punt es representa amb una línia contínua vermella (coneguda com a "corba d'estat") i el punt de rosada amb una línia contínua verda. El vent es representa amb una fletxa, que n'indica la direcció, i les barbes al seu extrem n'indiquen la velocitat en nusos (kt). A més de la corba d'estat, el diagrama oblic conté un conjunt de línies necessàries per analitzar l'ambient, així com corbes que representen diferents evolucions teòriques d'una bombolla d'aire. Aquestes línies són:

- **Isòbares:** línies on la pressió (en hPa) es manté constant per diferents valors de temperatura.
- **Isotermes:** línies on la temperatura (en $^{\circ}\text{C}$) es manté constant per diferents valors de pressió.
- **Equisaturades:** línies on la proporció de mescla es manté constant per diferents valors de pressió i temperatura. Representa la massa de vapor d'aigua per unitat de massa d'aire sec. Es dona en grams de vapor d'aigua per quilogram d'aire sec (g/kg).
- **Adiabàtiques seques:** línies que representen l'evolució teòrica d'una bombolla d'aire sec per diferents valors de pressió i temperatura. En aquest procés, la bombolla d'aire no intercanvia calor amb el seu entorn i en el seu ascens es refreda $9,8^{\circ}\text{C}$ cada 1000 metres, d'acord amb l'evolució adiabàtica.
- **Pseudoadiabàtiques:** línies que representen l'evolució d'una bombolla d'aire saturat d'humitat per diferents valors de pressió i temperatura. També anomenades adiabàtiques saturades. En aquest procés, la bombolla d'aire intercanvia calor amb el seu entorn i, per tant, en el seu ascens es refreda entre 5 i 7°C cada 1000 metres, d'acord amb l'evolució pseudoadiabàtica.

Per representar l'evolució d'una bombolla d'aire (línia contínua negra), si no està saturada, es representa amb una corba adiabàtica seca que surt del punt inicial de la corba d'estat (a la superfície); posteriorment, quan arriba a la saturació, segueix una evolució pseudoadiabàtica (per més informació teniu la [Publicació del Radiosondatge](#)).

Els nivells característics que es representen sobre el diagrama oblic són:

- El **nivell de condensació (LCL)** es defineix com l'altura a la qual la humitat relativa d'una bombolla d'aire arribarà al 100 % quan es refredi mitjançant l'ascens adiabàtic sec. Si la bombolla d'aire s'eleva més enllà de FLCL, es formaran gotetes que faran desenvolupar núvols i la bombolla continuarà el seu ascens seguint l'evolució pseudoadiabàtica.
- El **nivell de convecció lliure (LFC)** es defineix com l'altura a la qual la temperatura de l'entorn comença a ser més baixa que la temperatura d'una bombolla que parteix des de FLCL seguint l'evolució de la pseudoadiabàtica. A partir d'aquest punt, la bombolla pujarà lliurement fins a trobar el nivell d'equilibri.
- El **nivell d'equilibri (EL)** es defineix com l'altura a la qual una bombolla d'aire ascendent es troba a la mateixa temperatura que el seu entorn. També anomenat com el límit de la convecció.

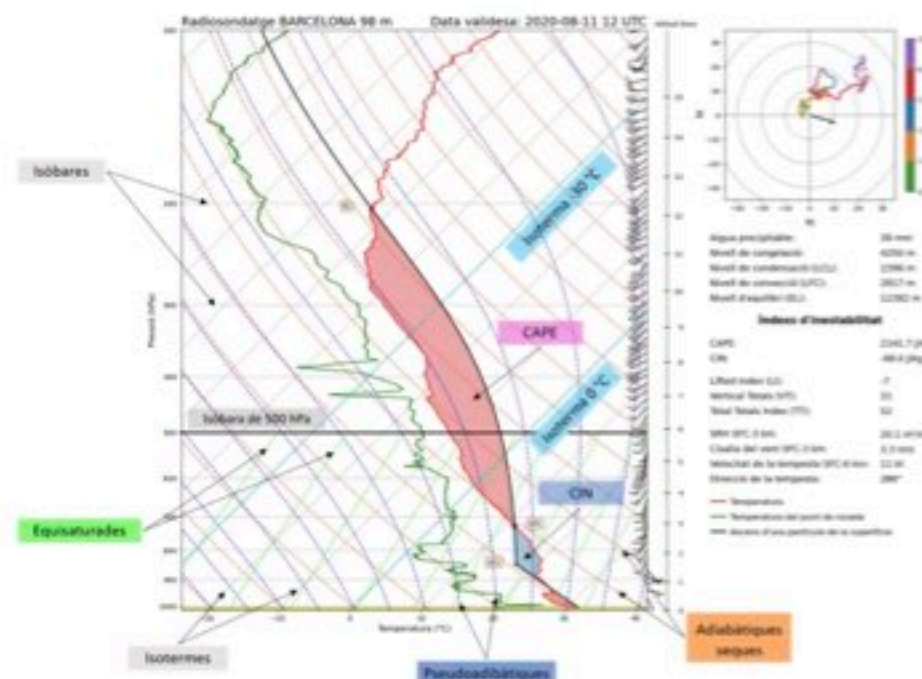
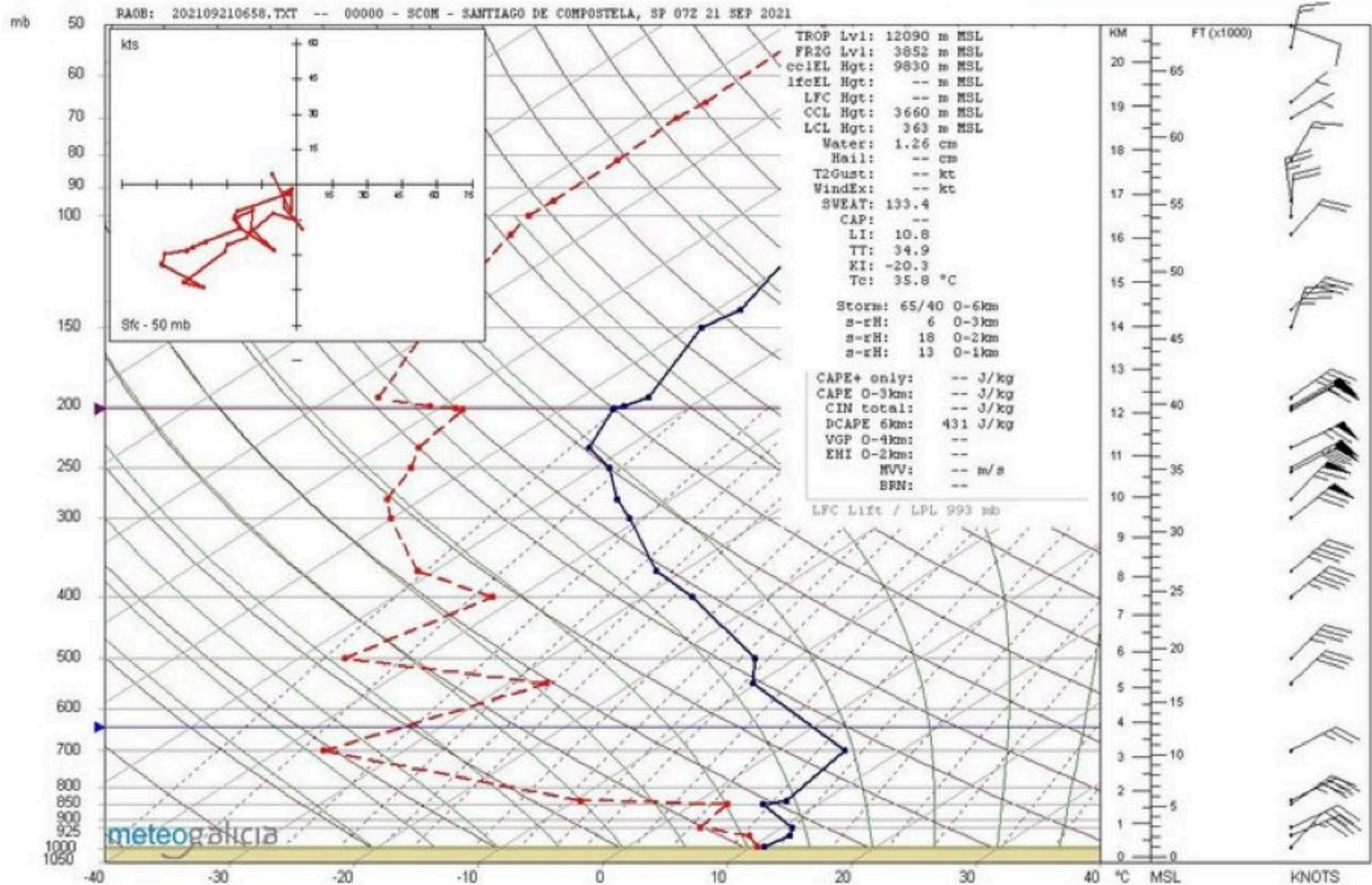
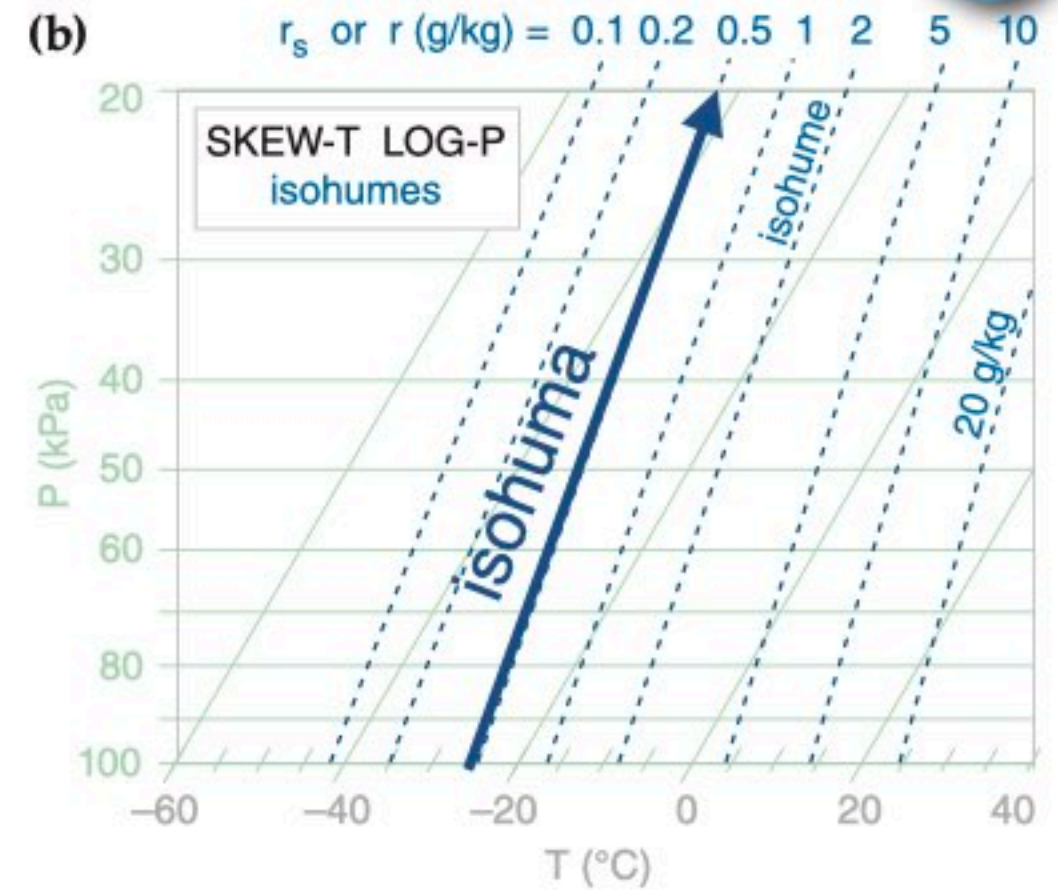
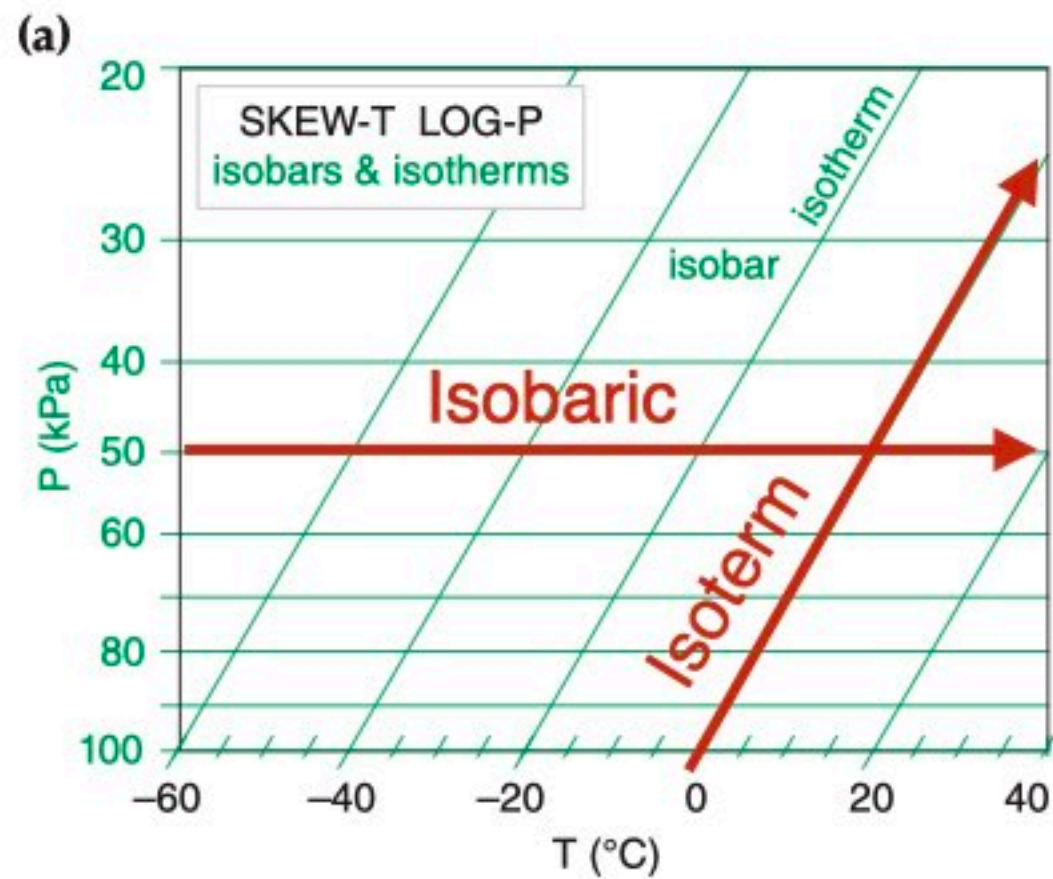


Figura 1 Diagrama oblic o Skew-T

<https://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/equipaments-meteorologics/radiosondatge/manual-dinterpretacio-del-radiosondatge/>





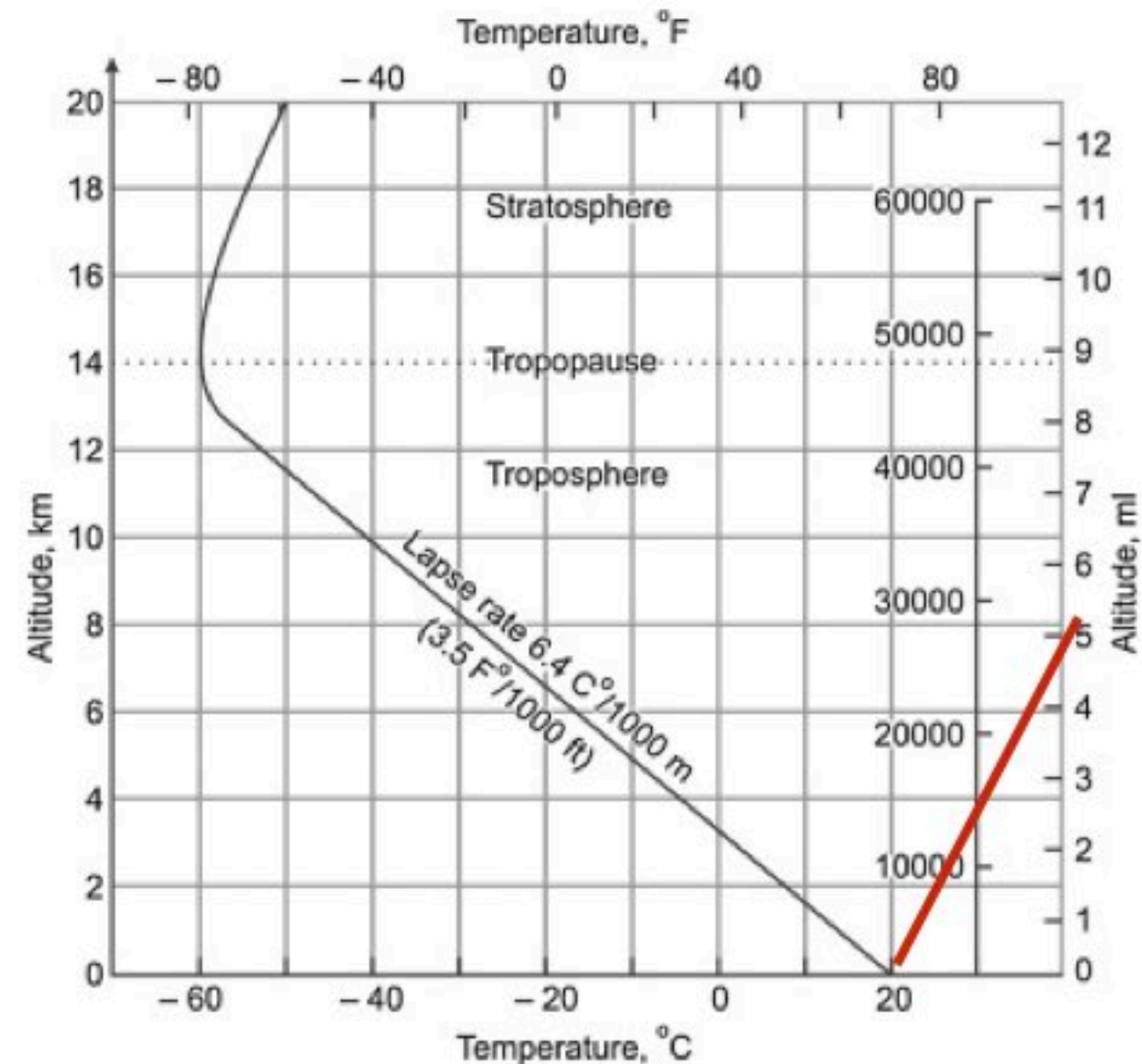
$$P = (\rho_d R_d + \rho_v R_v) T = (\rho_d + \rho_v) R_d T_v$$

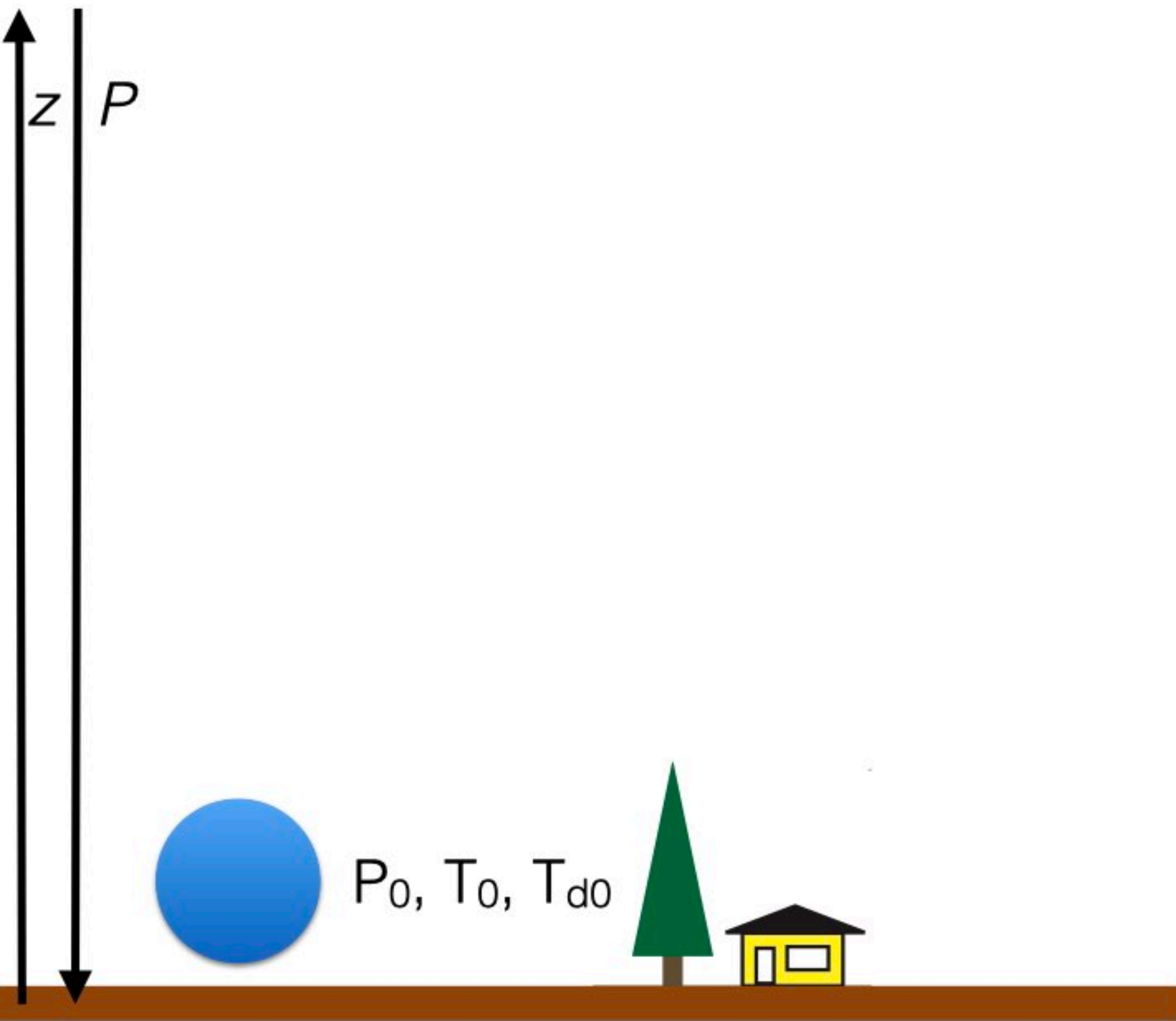
GRADIENT DE TEMPERATURA DE L'ATMOSFERA

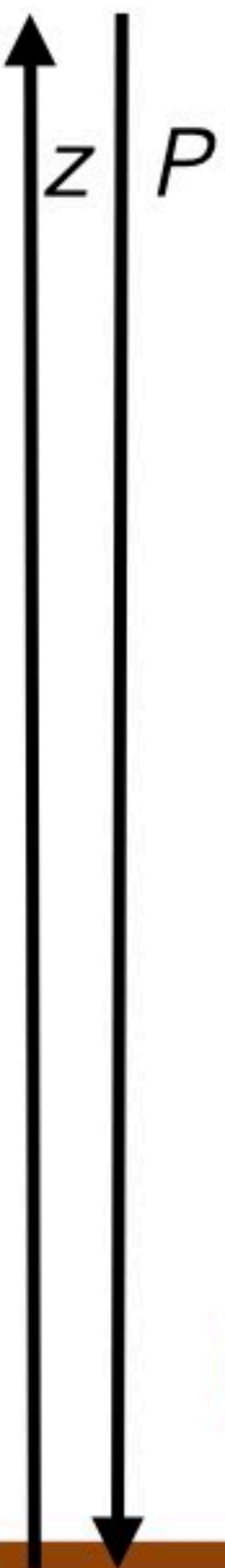
$$\frac{\Delta T}{\Delta z} \approx \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1}$$

Gradient en una atmosfera estandard: - 6.5 °/km

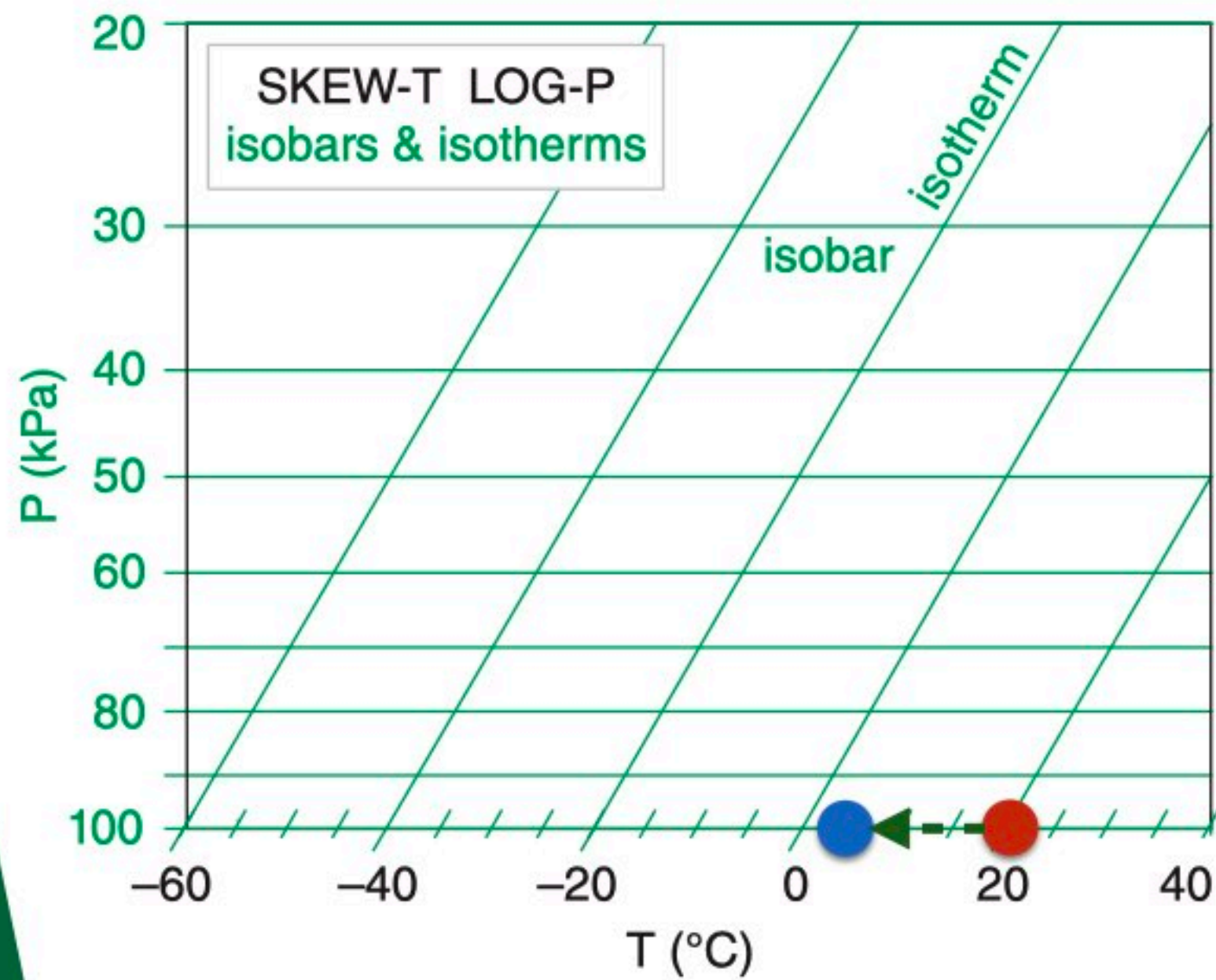
INVERSIÓ TÈRMICA: quan la temperatura augmenta amb l'alçada





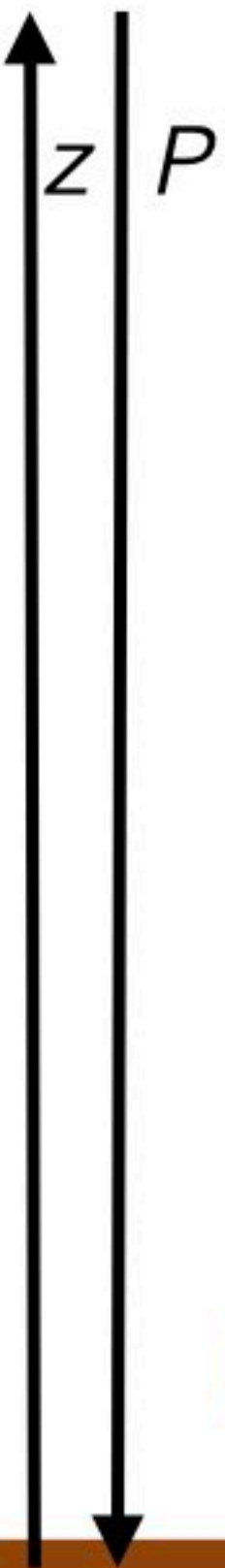


P_0, T_0, T_{d0}

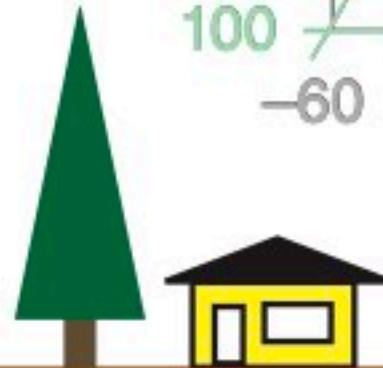


100 kPa, 20 $^{\circ}\text{C}$, 5 $^{\circ}\text{C}$

humitat de l'aire expressada en proporció de mescla r

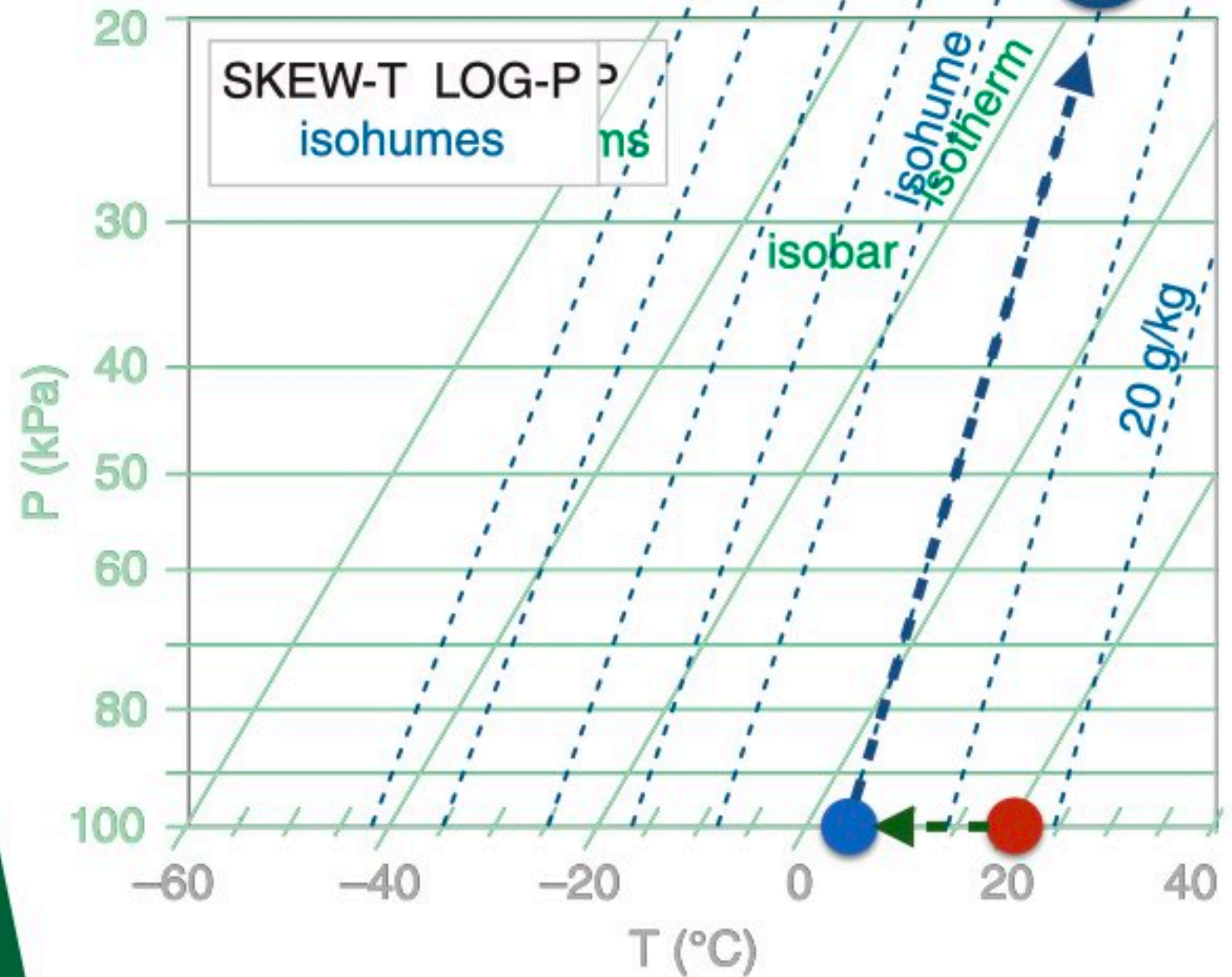


P_0, T_0, T_{d0}

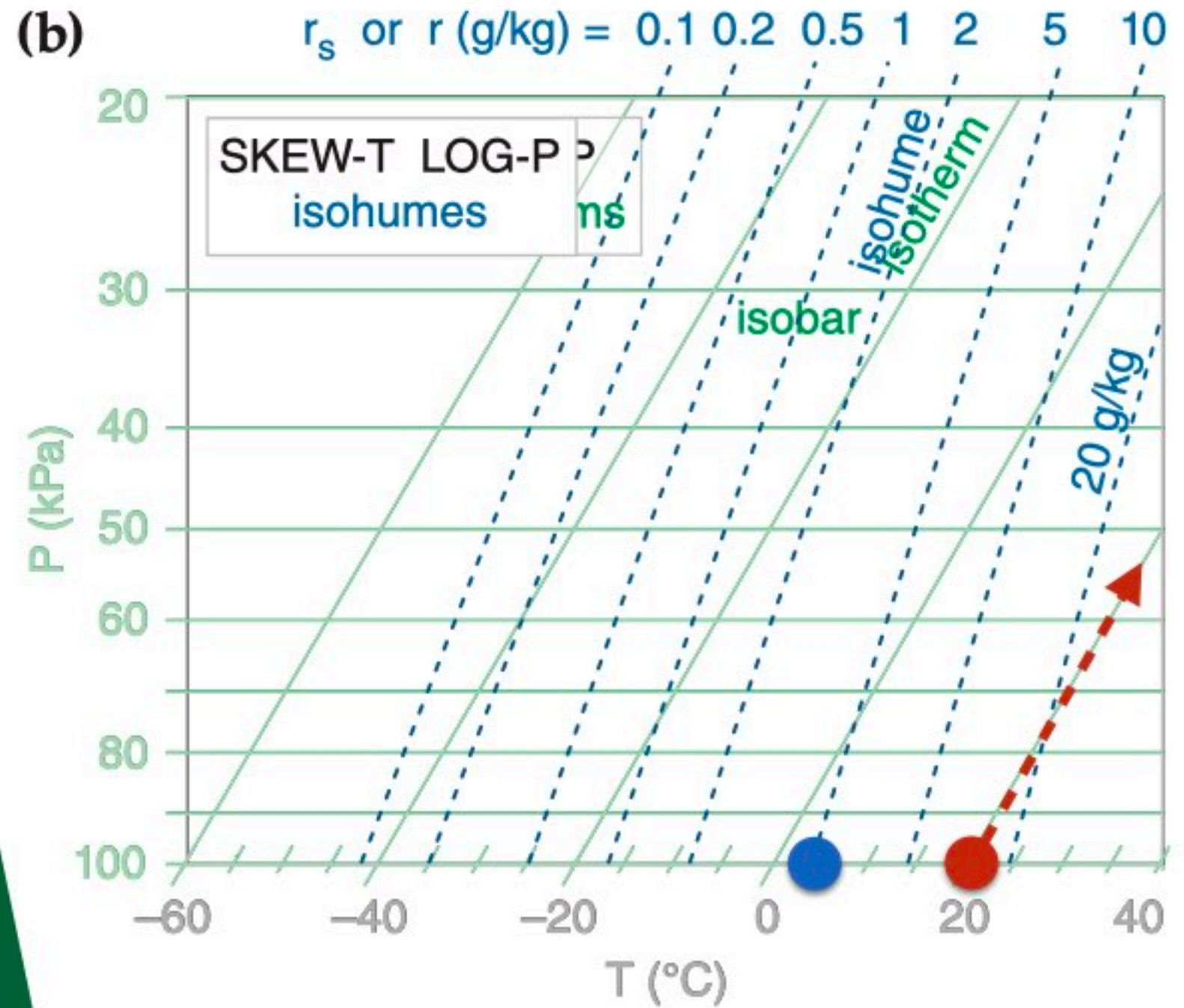
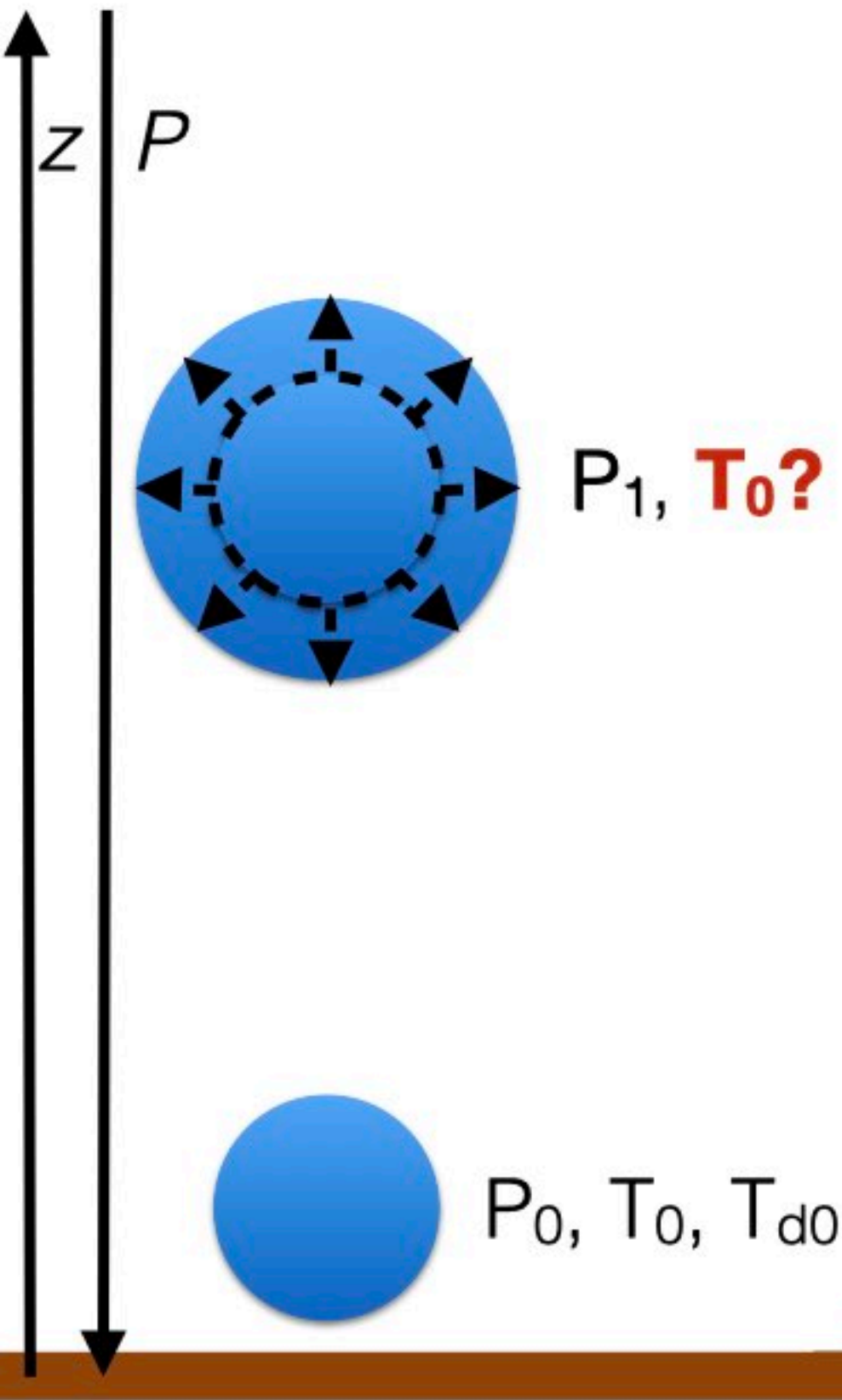


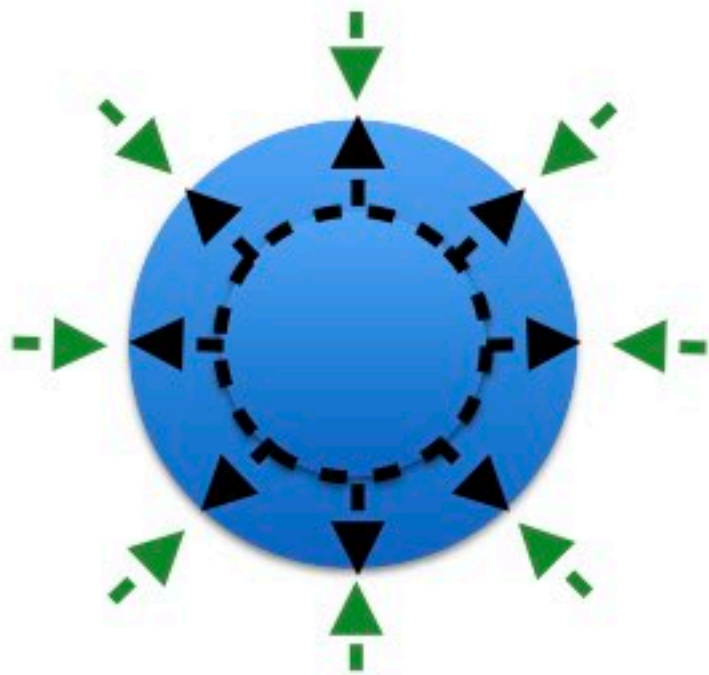
(b)

r_s or r (g/kg) = 0.1 0.2 0.5 1 2 **5** 10



humitat de l'aire expressada en proporció de mescla r





**Pressió externa
P1**

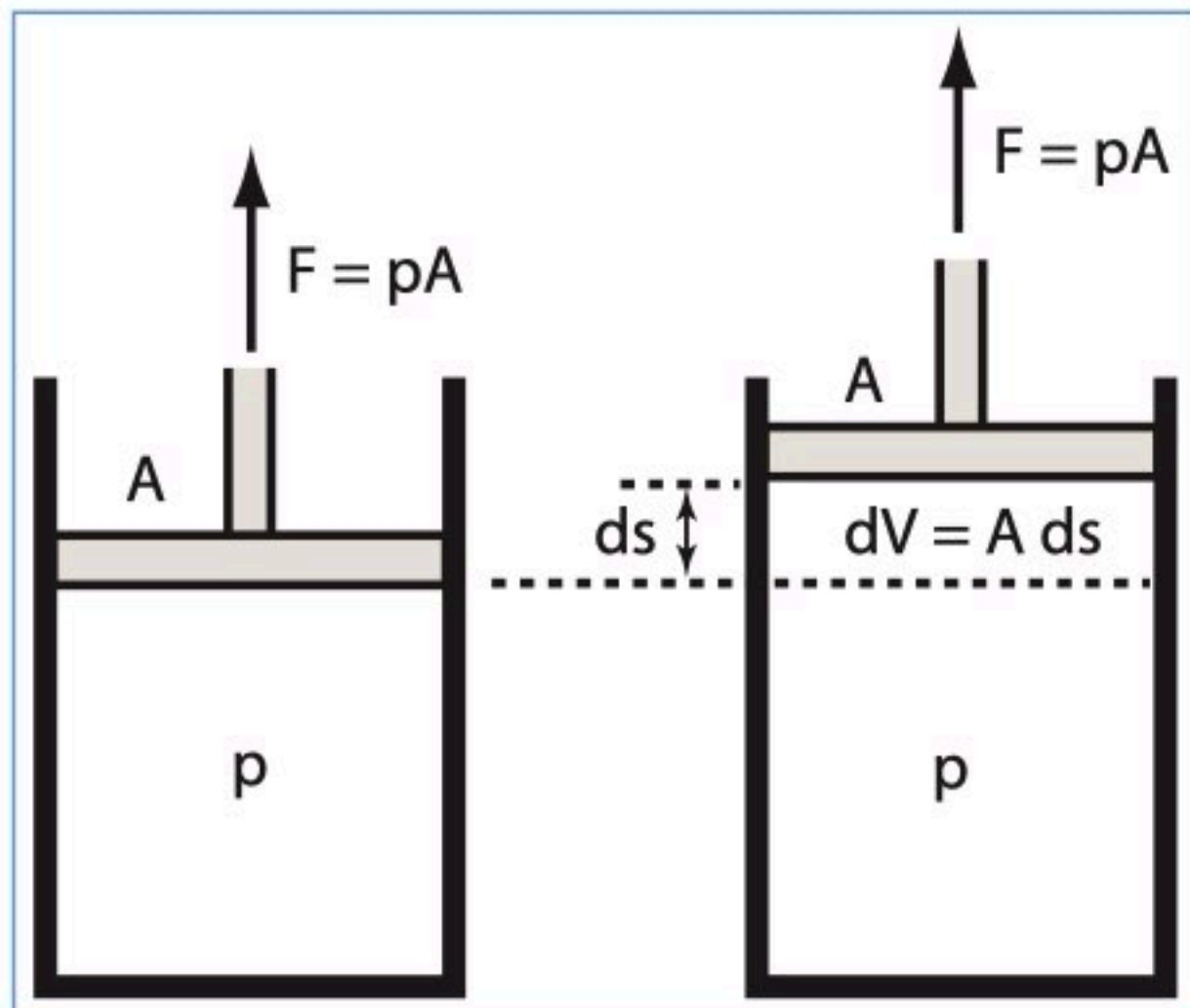
$$dW = \vec{F} d\vec{l} = F dl$$

$$dW = P A dl$$

$$dW = P dV$$

**D'on surt l'energia per
fer aquest treball?**

**De l'energia interna de
la bombolla**



$$\updownarrow dl = ds$$

Es manté la T constant?

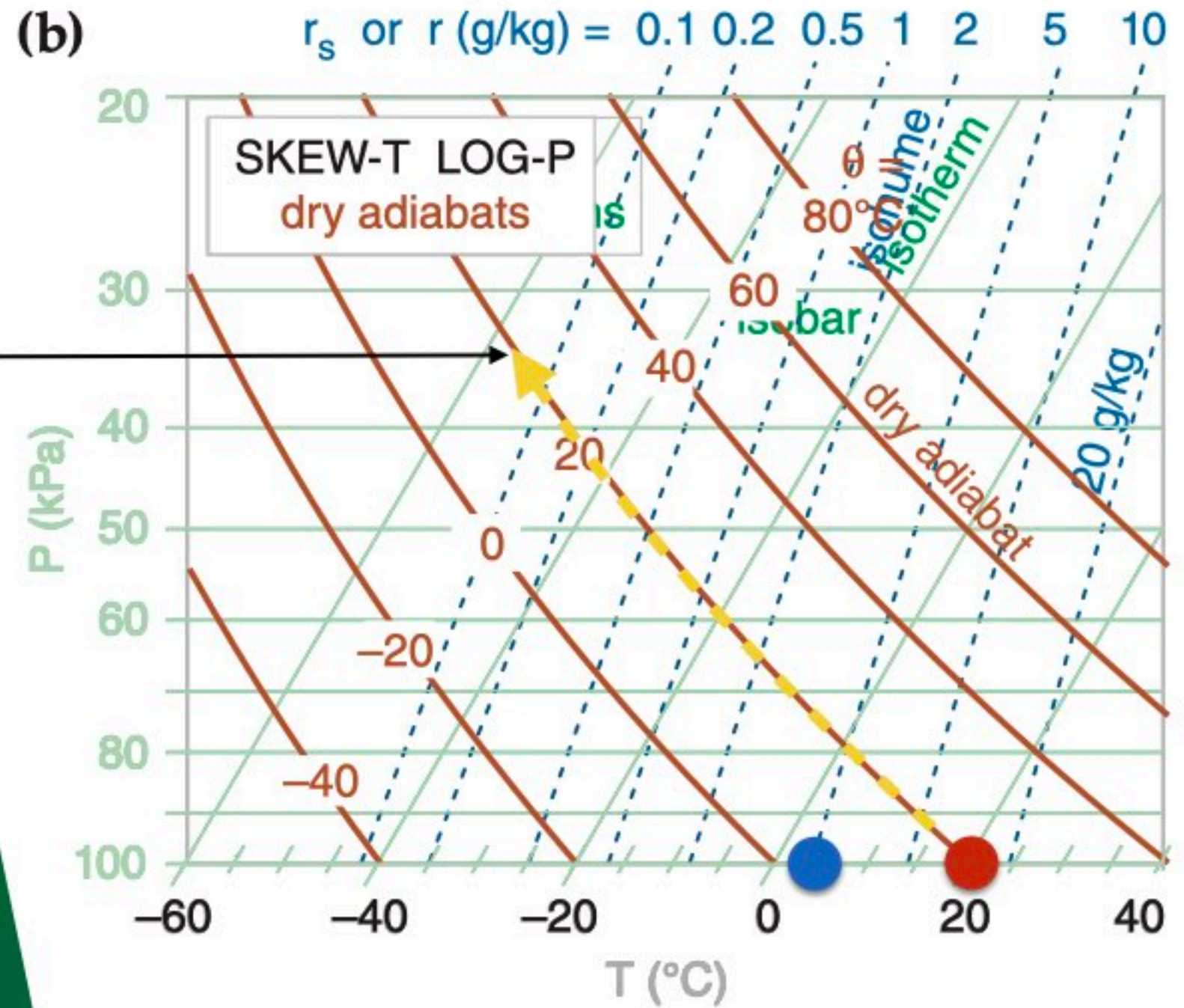
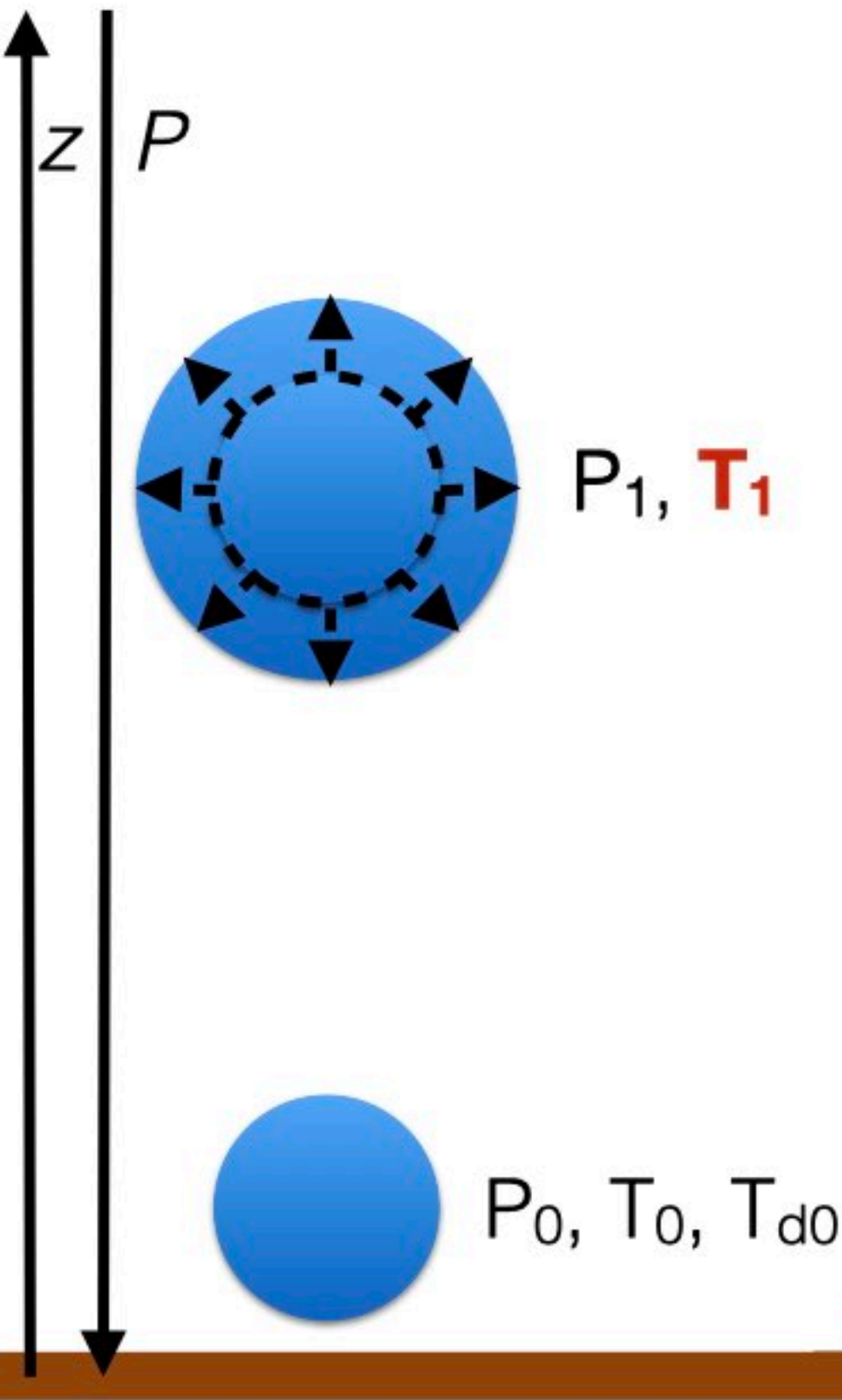
L'aire atmosfèric es comporta com un aïllant tèrmic, i evoluciona de manera que li costa intercanviar calor amb el seu ambient en períodes de temps curts (minuts).

Parlarem de mases d'aire atmosfèric que tenen tendència a conservar les seves característiques de temperatura i humitat, i només les canvien en temps llargs (varies hores o dies)

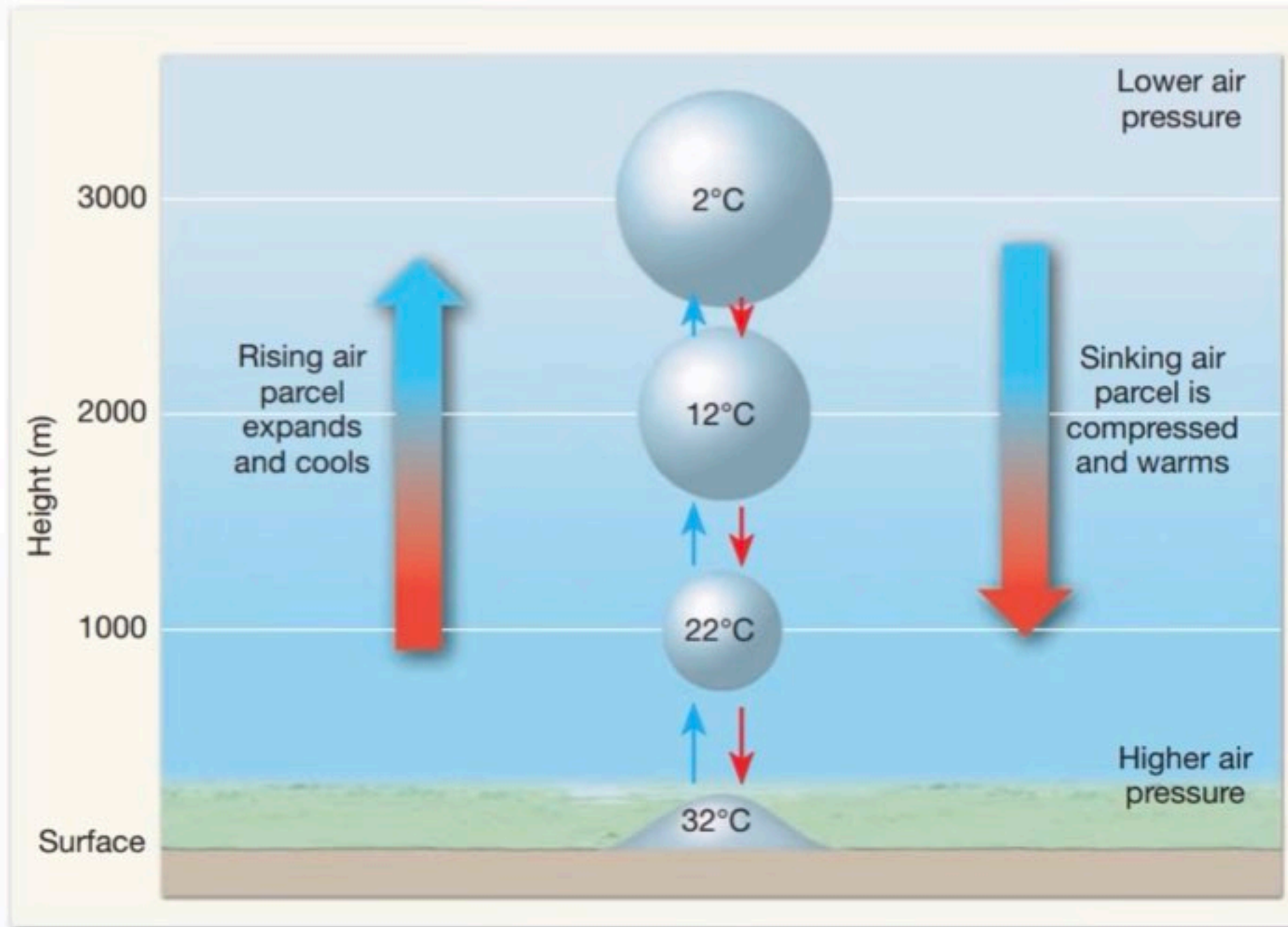
L'EVOLUCIÓ DE L'AIRE ATMOSFÈRIC SEGUEIX GENERALMENT **PROCESSOS ADIABÀTICS**

Procés en el qual la bombolla d'aire realitza una expansió/compressió,
realitzant un treball sense intercanviar calor amb el seu entorn

humitat de l'aire expressada en proporció de mescla r



1) PROCÉS ADIABÀTIC SEC: sense que hi hagi condensació

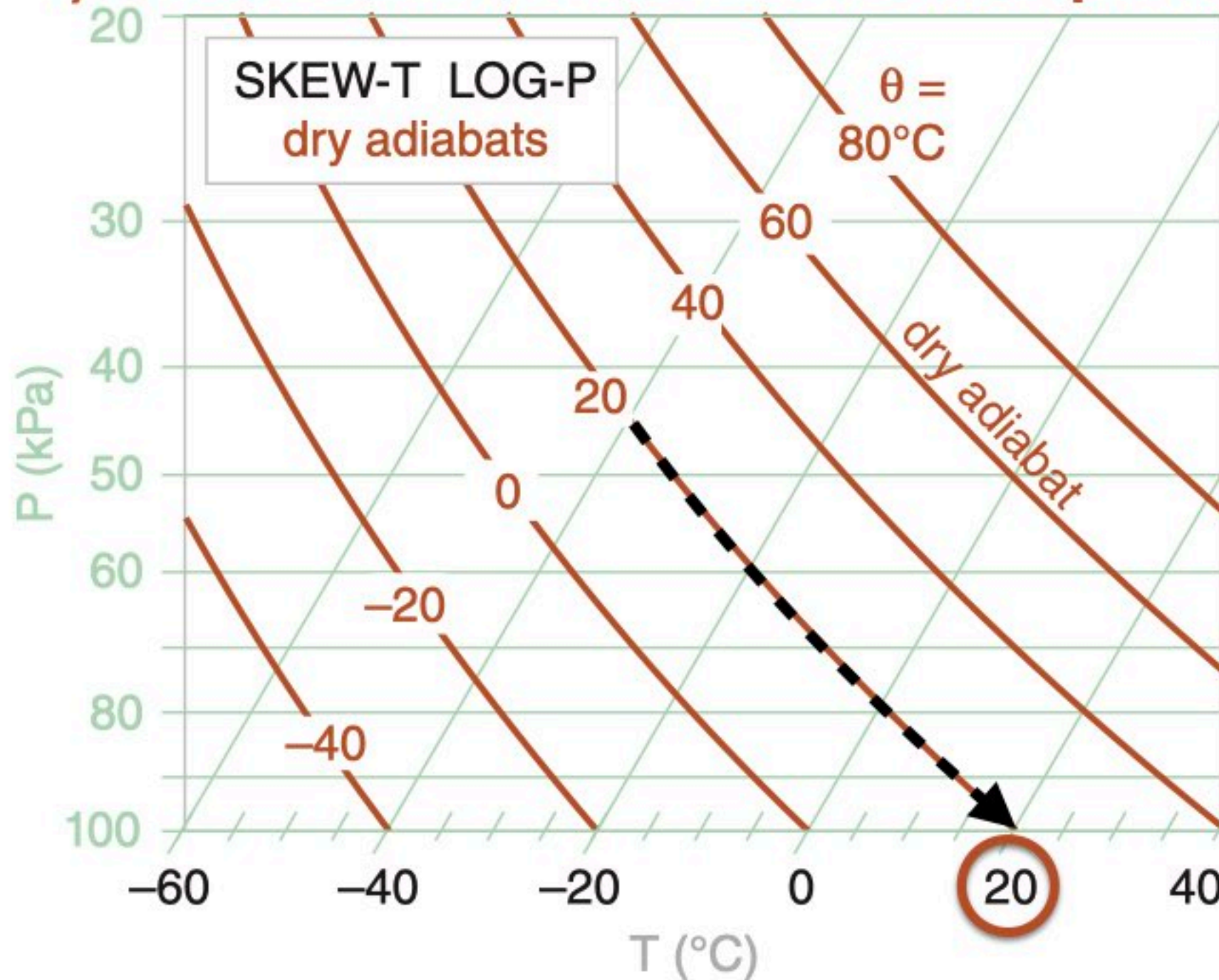


$$\frac{\Delta T}{\Delta z} \approx -9.8 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}$$

Quan una bombolla **d'aire NO saturat ascendeix o descendeix** a l'atmosfera, el **treball necessari per la seva expansió / compressió** es fa a càrrec de **disminuir /augmentar la seva energia interna**.

El canvi de temperatura que això produeix segueix el **gradient de temperatura d'un procés ADIABÀTIC SEC**

1) PROCÉS ADIABÀTIC SEC: sense que hi hagi condensació



Etiquetes en
**TEMPERATURA
POTENCIAL**

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} \approx -9.8 \text{ } ^\circ \text{C/km}$$

Quan una bombolla **d'aire NO saturat ascendeix o descendeix** a l'atmosfera, el **treball necessari per la seva expansió / compressió** es fa a càrrec de **disminuir / augmentar la seva energia interna**.

El canvi de temperatura que això produeix segueix el **gradient de temperatura d'un procés ADIABÀTIC SEC**

PENDENT DEL GRADIENT TERMIC DE L'ATMOSFERA (*lapse rate*)

$$\Gamma = -\frac{dT}{dz}$$

PENDENT DEL GRADIENT ADIABATIC SEC (corba adiabàtica seca)

$$\Gamma_d = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} = 9.8 \text{ } ^\circ\text{C/km}$$

c_p = calor específic de l'aire a pressió constant

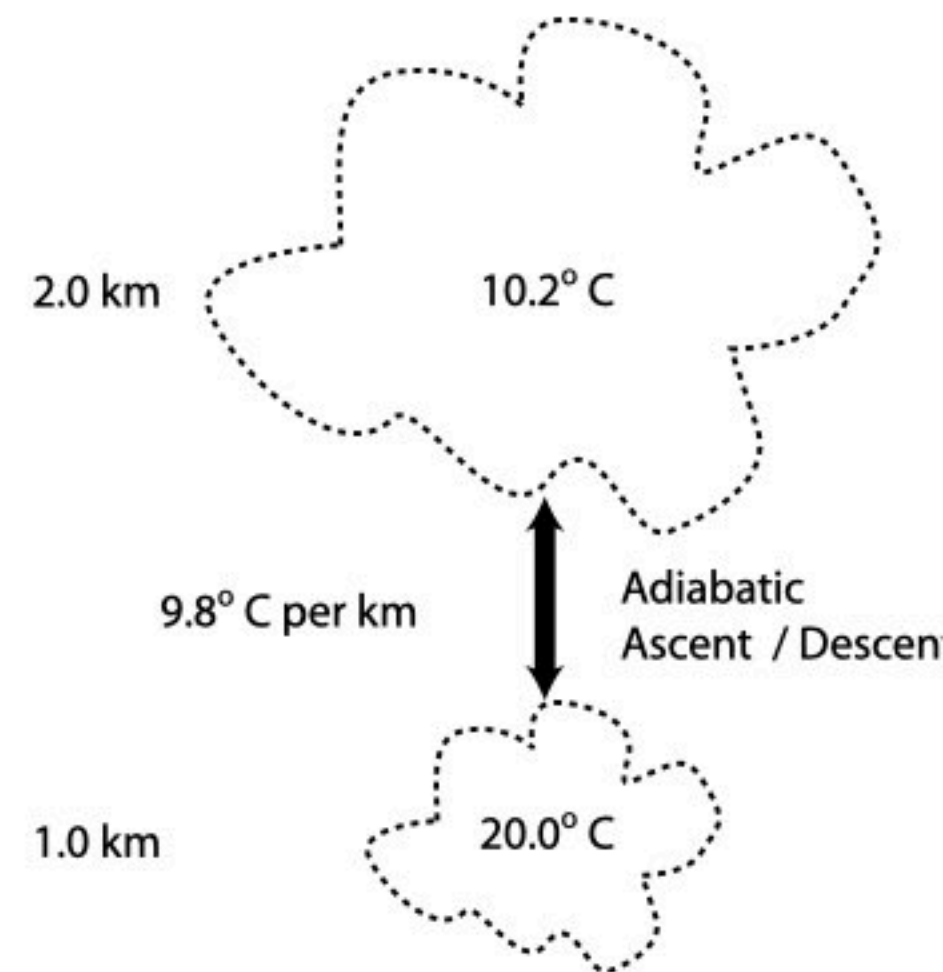
PROCÈS ADIABÀTIC SEC:

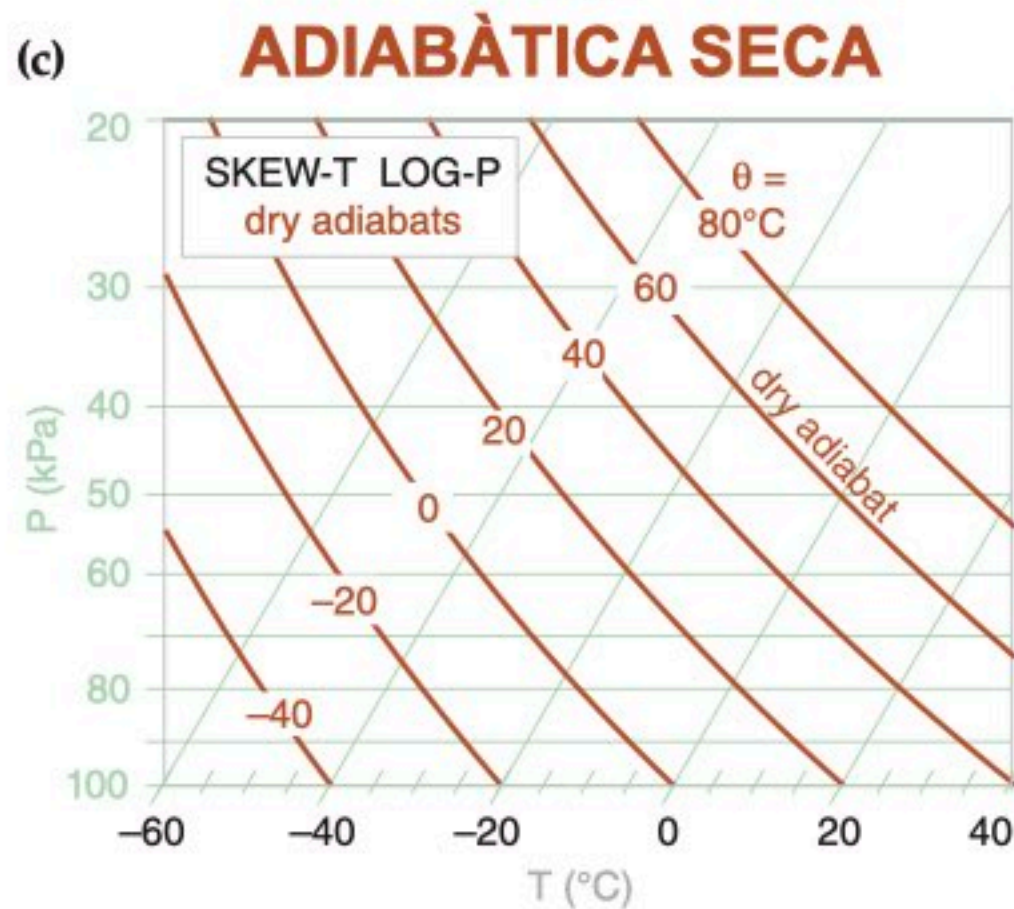
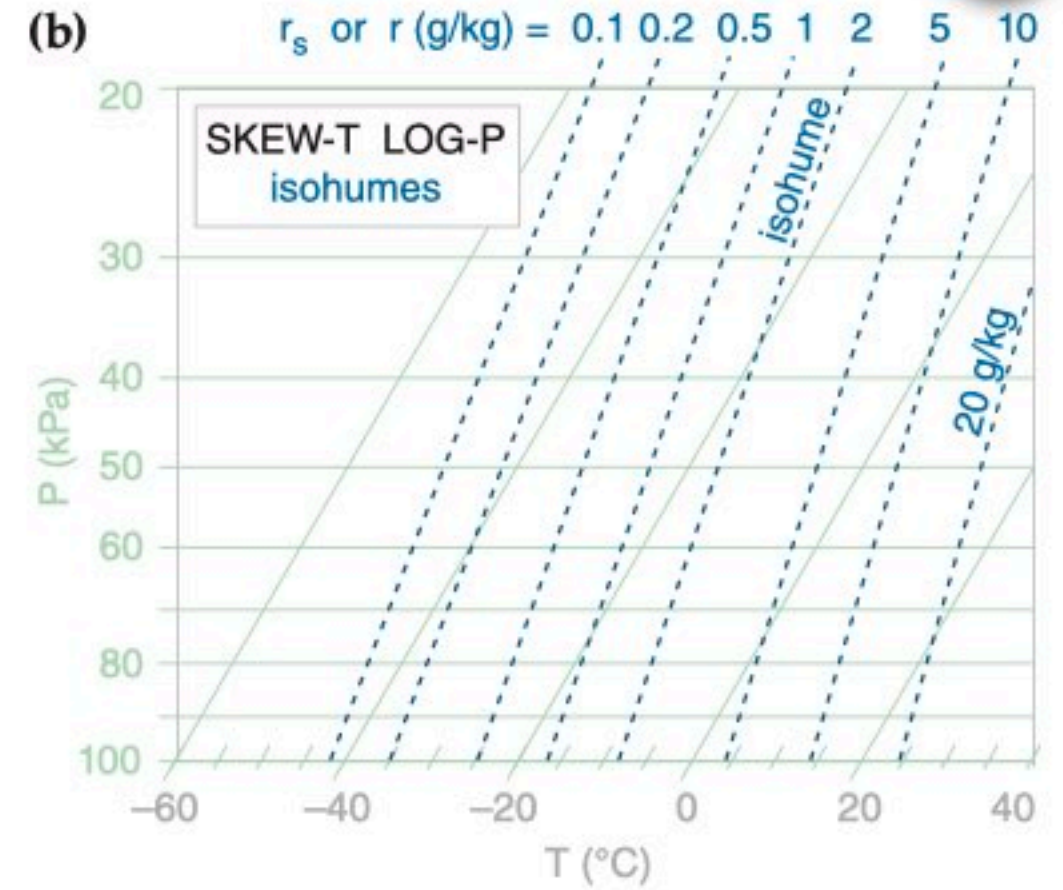
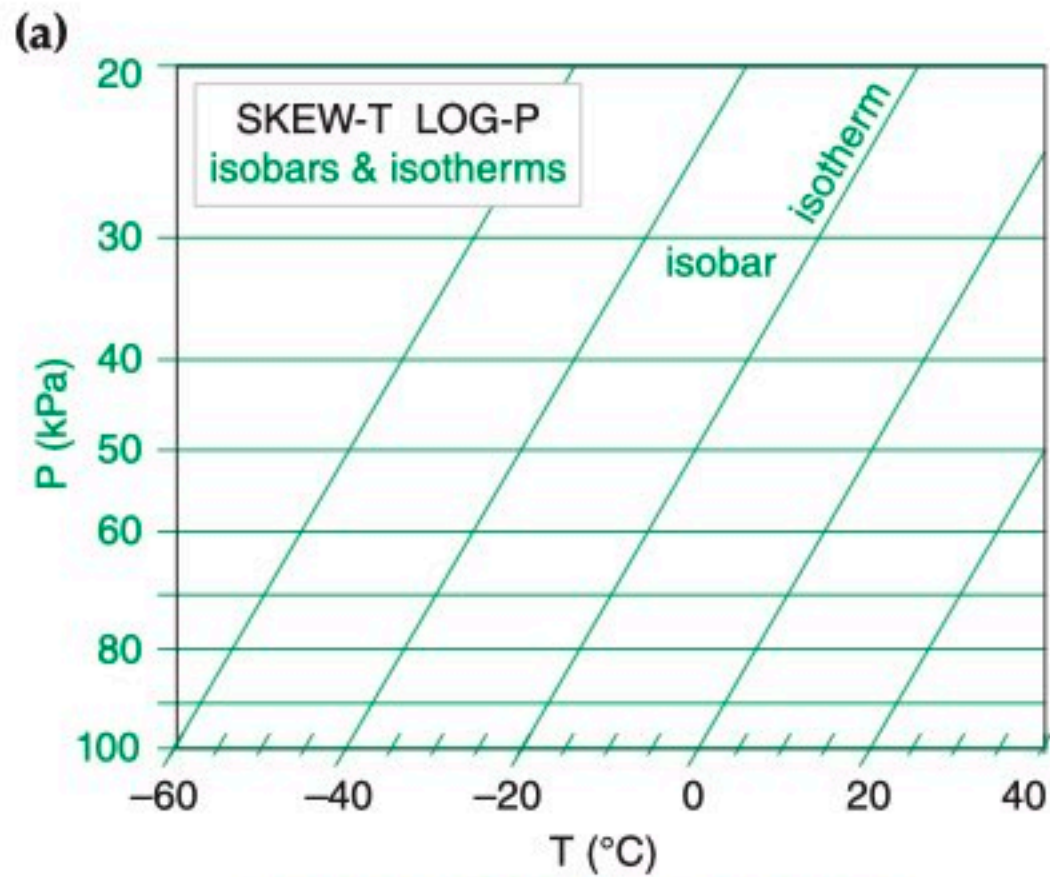
Procès en el qual la bombolla d'aire realitza una expansió/compressió, realitzant un treball sense intercanviar calor amb el seu entorn,
i SENSE CONDENSAR/EVAPORAR VAPOR D'AIGUA

Dry Adiabatic Lapse Rate

GRADIENT ADIABÀTIC SEC:

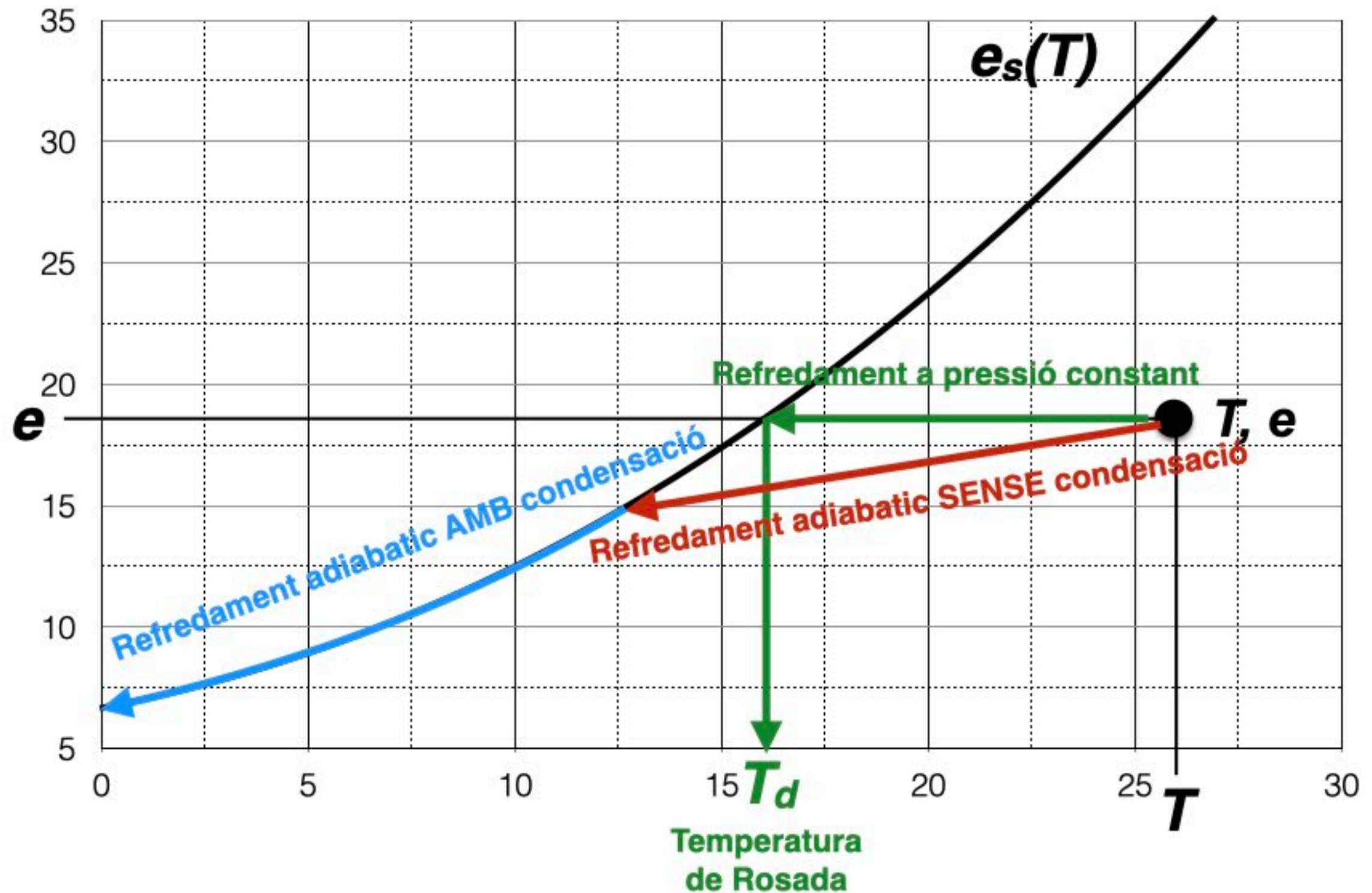
$$\Gamma_d = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} = 9.8^\circ \text{C/km}$$





Etiquetes en TEMPERATURA POTENCIAL

Diversos tipus de refredament



Com calculem la temperatura de rosada T_d ?

Com representem el refredament adiabatic "sec"?

Com representem el refredament adiabatic "humit"? l'aire es manté saturat?

PENDENT DEL GRADIENT TERMIC DE L'ATMOSFERA (*lapse rate*)

$$\Gamma = -\frac{dT}{dz}$$

PENDENT DEL GRADIENT ADIABATIC SEC (corba adiabàtica seca)

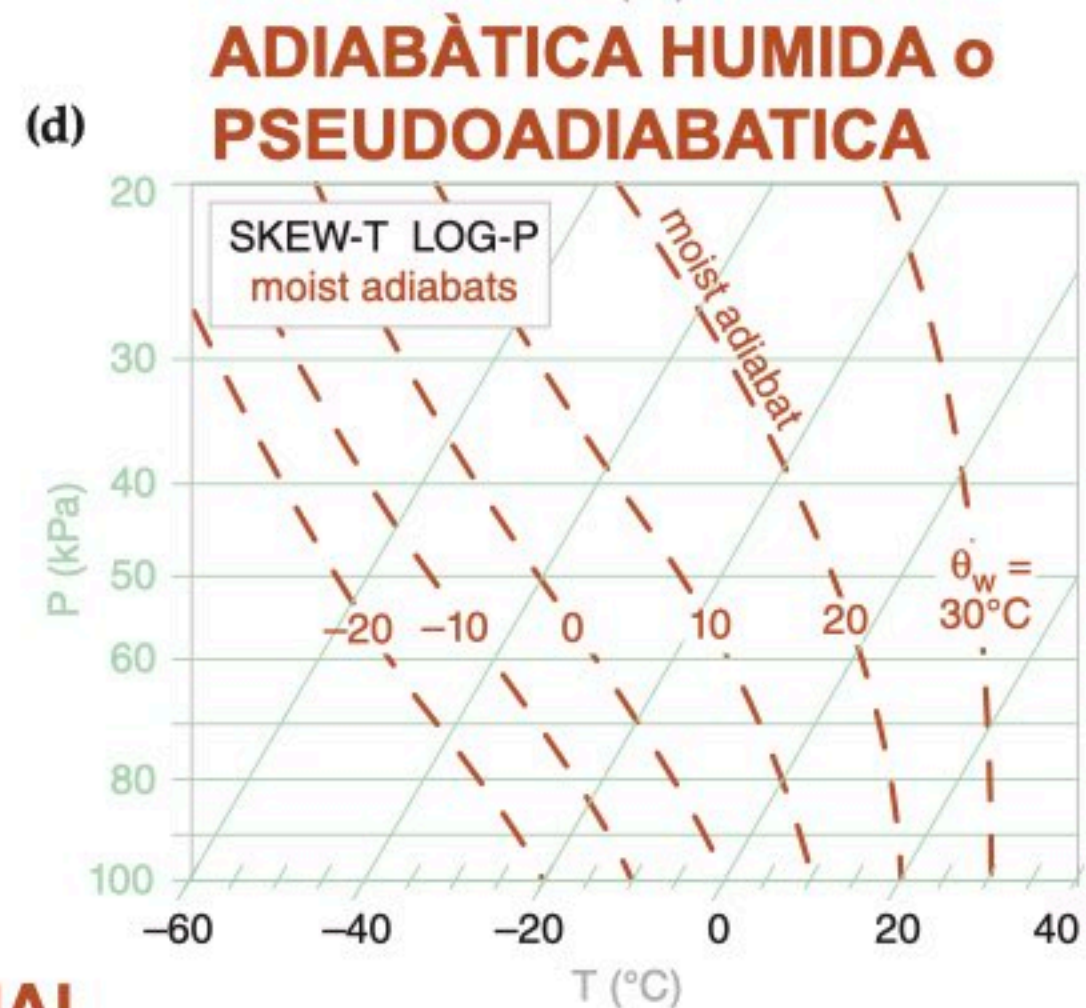
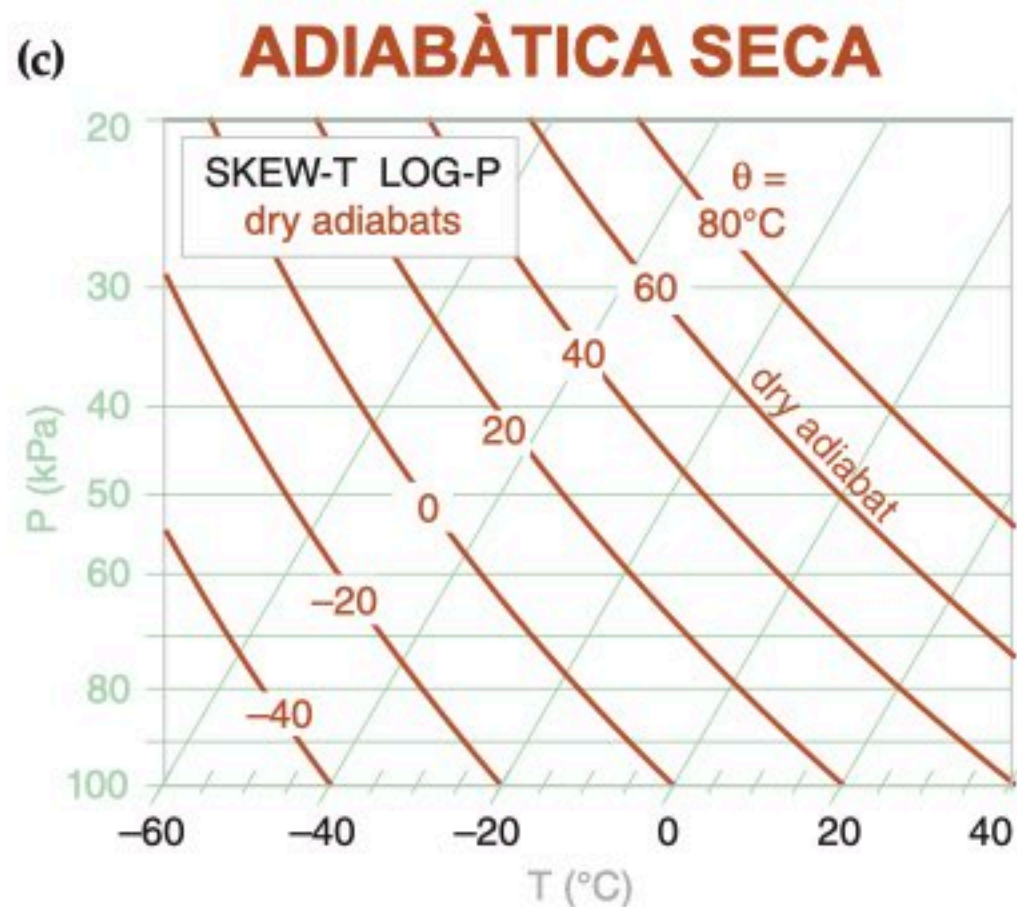
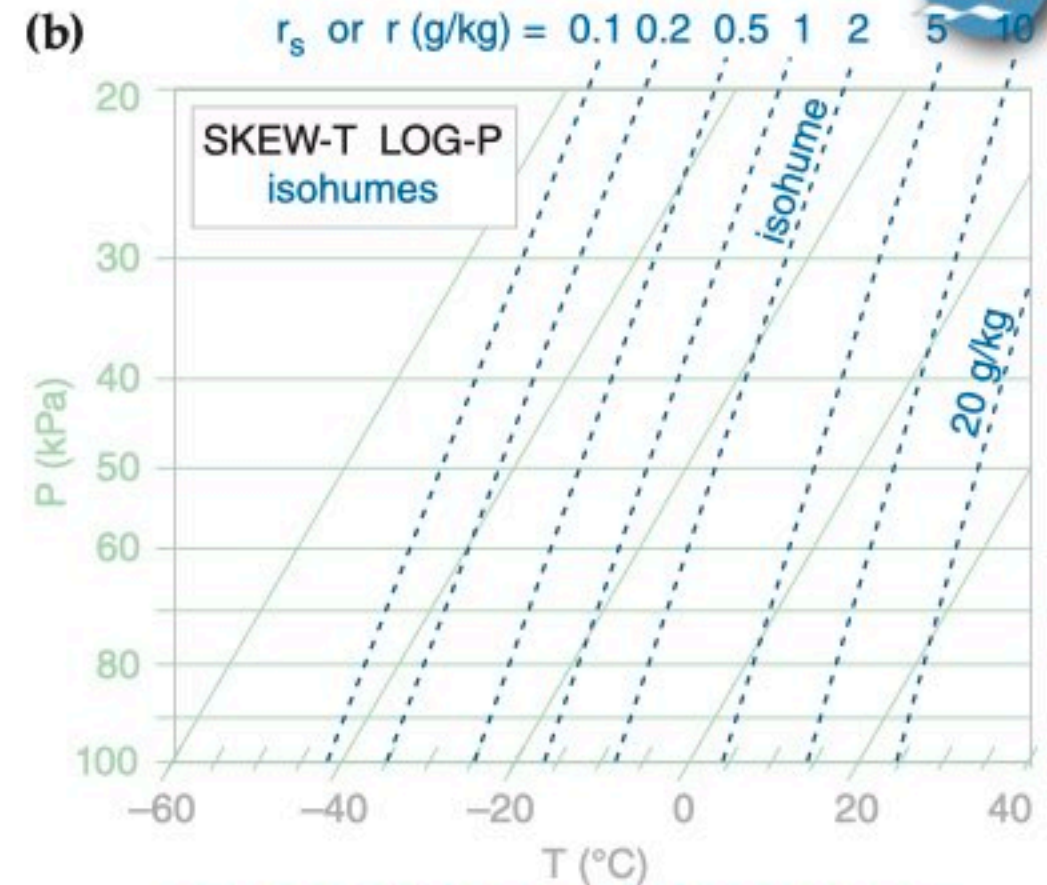
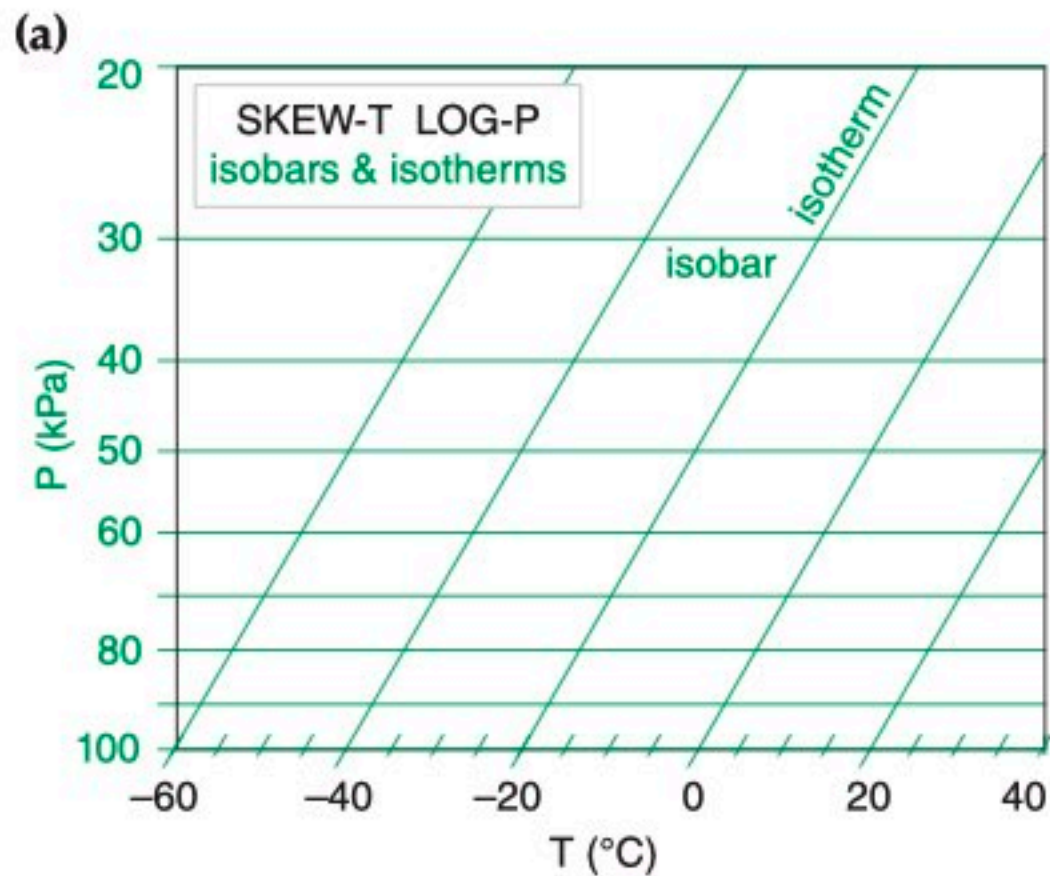
$$\Gamma_d = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} = 9.8 \text{ }^{\circ}\text{C/km}$$

c_p = calor específic de l'aire a pressió constant

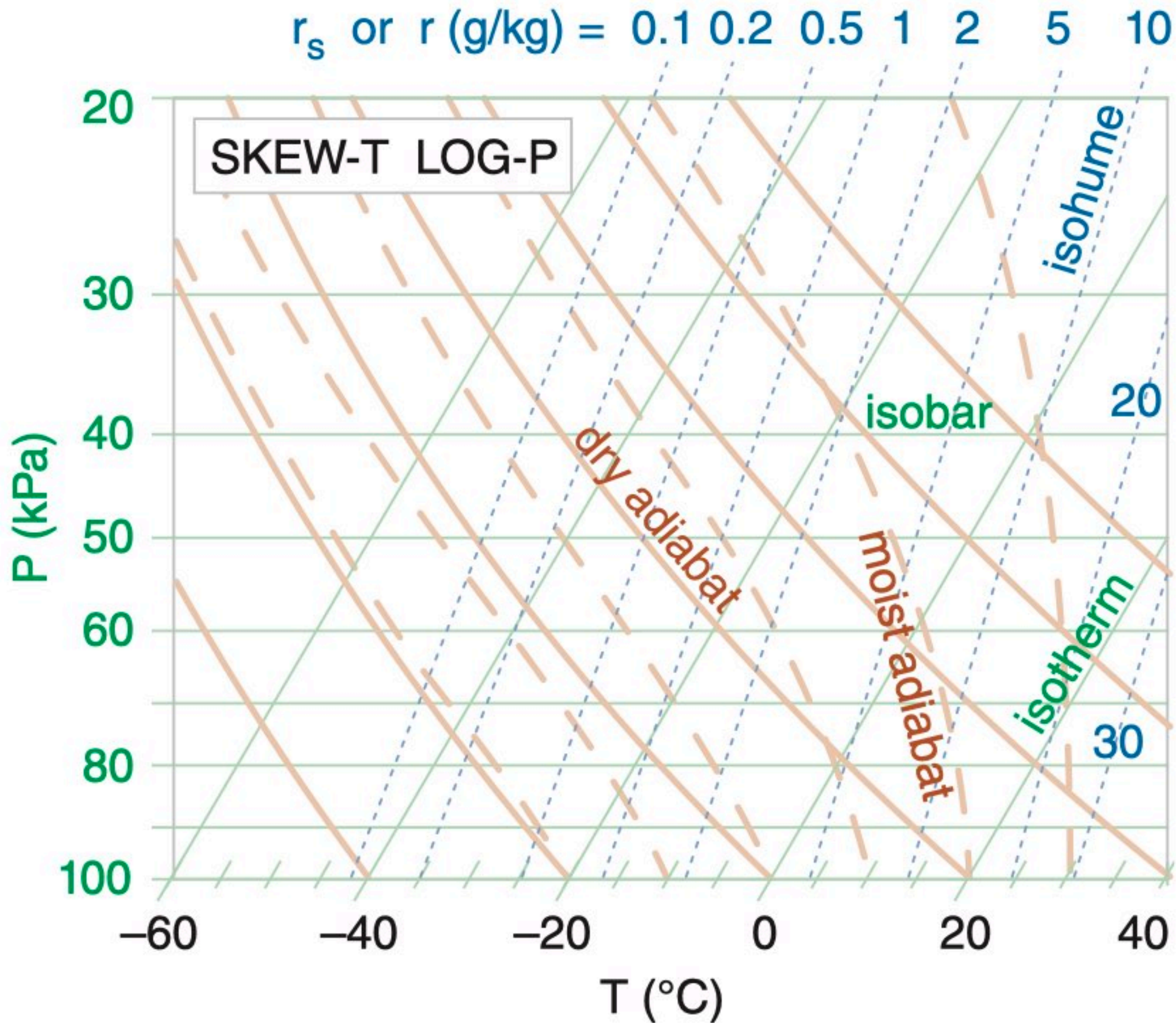
PENDENT DEL GRADIENT PSEUDOADIABATIC (corba pseudoadiabàtica)

$$\Gamma_s = g \frac{\left(1 + \frac{H_v r}{R_{sd} T}\right)}{\left(c_{pd} + \frac{H_v^2 r}{R_{sw} T^2}\right)}$$

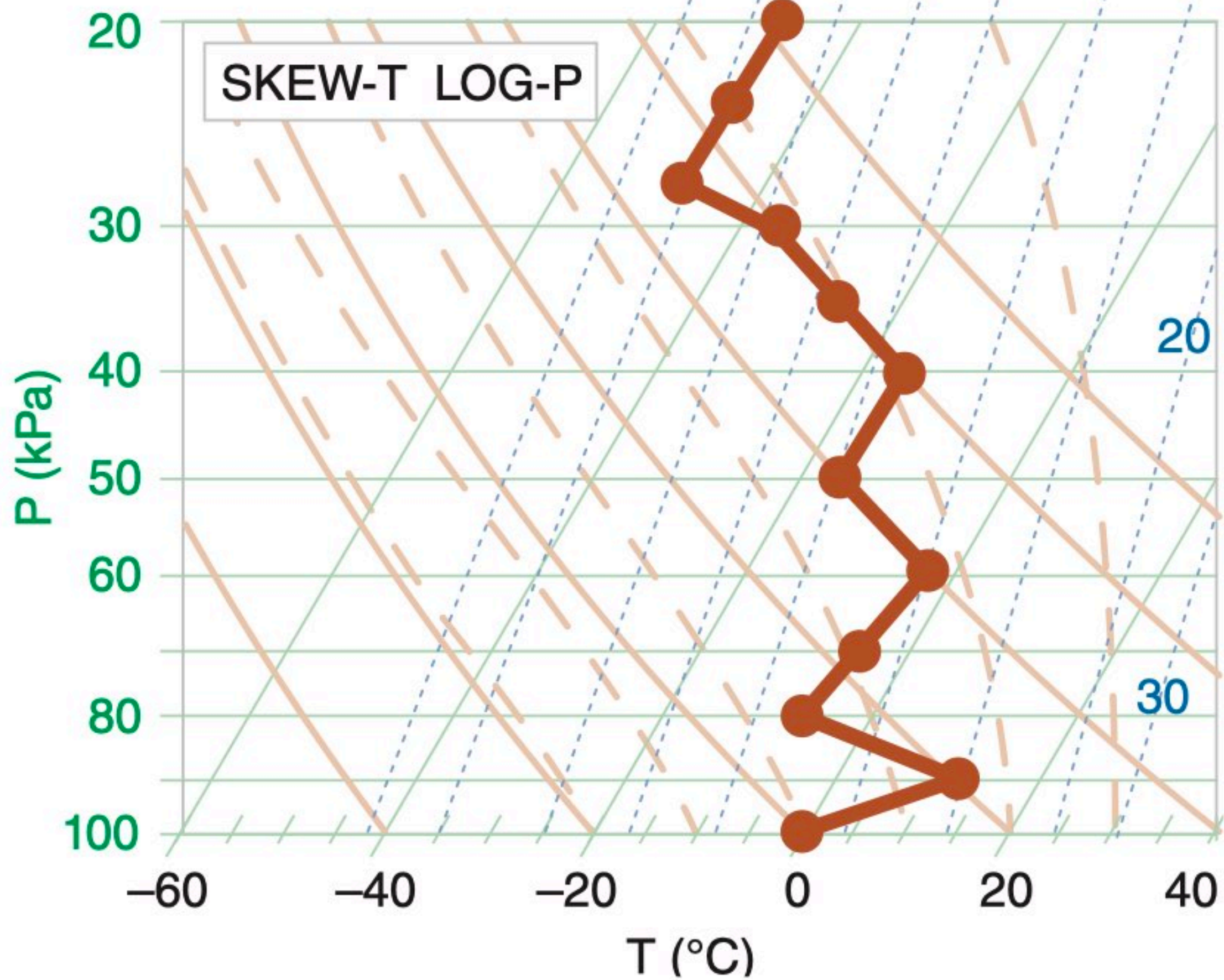
INVERSIÓ TÈRMICA: quan la temperatura augmenta amb l'alçada



Etiquetes en TEMPERATURA POTENCIAL



(a) r_s or r (g/kg) = 0.1 0.2 0.5 1 2 5 10

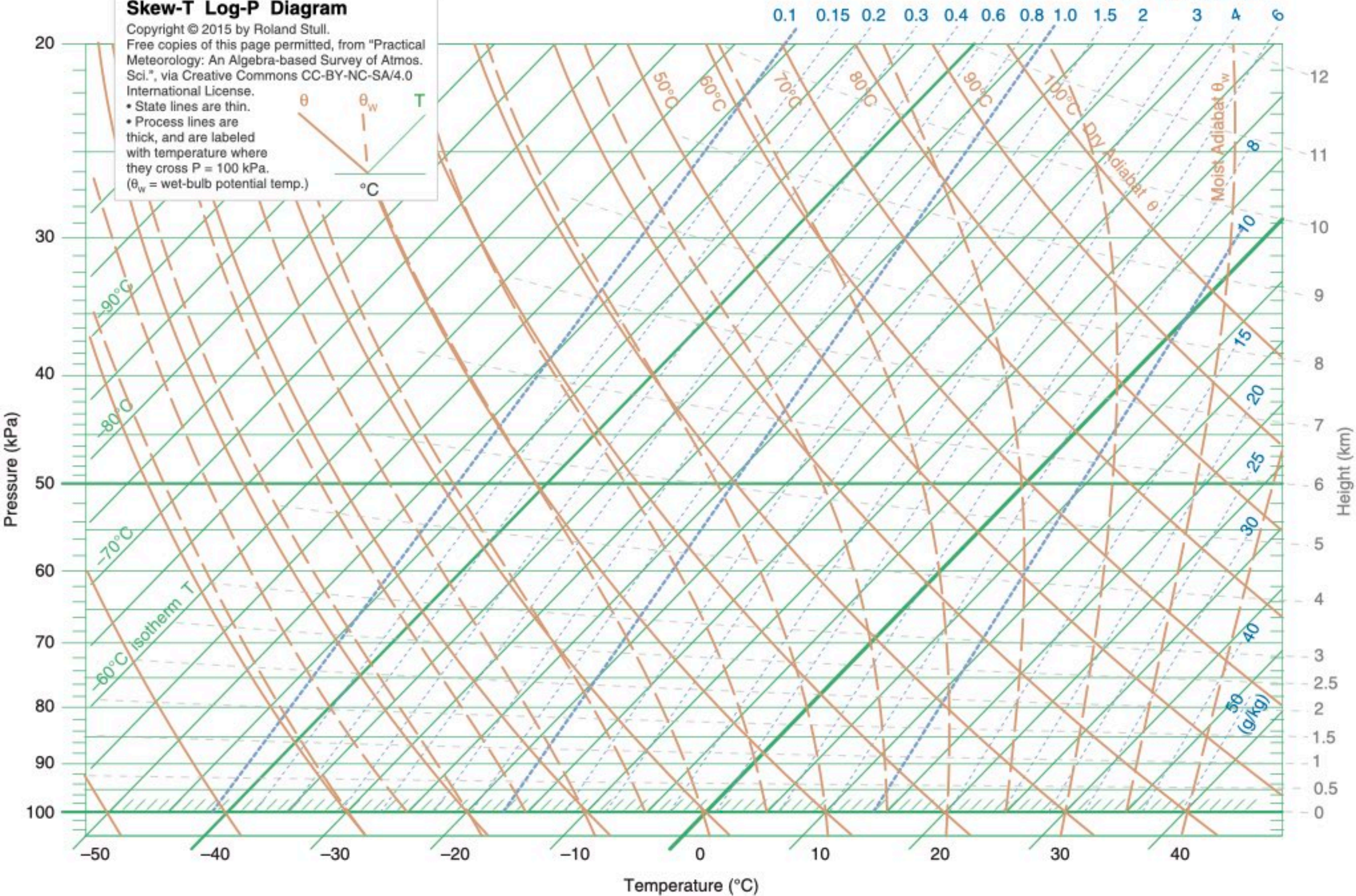
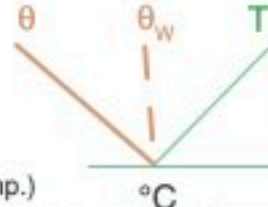


Mixing Ratio (g/kg)

Skew-T Log-P Diagram

Copyright © 2015 by Roland Stull.
Free copies of this page permitted, from "Practical
Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmos.
Sci.", via Creative Commons CC-BY-NC-SA/4.0
International License.

- State lines are thin.
- Process lines are thick, and are labeled with temperature where they cross $P = 100$ kPa. (θ_w = wet-bulb potential temp.)



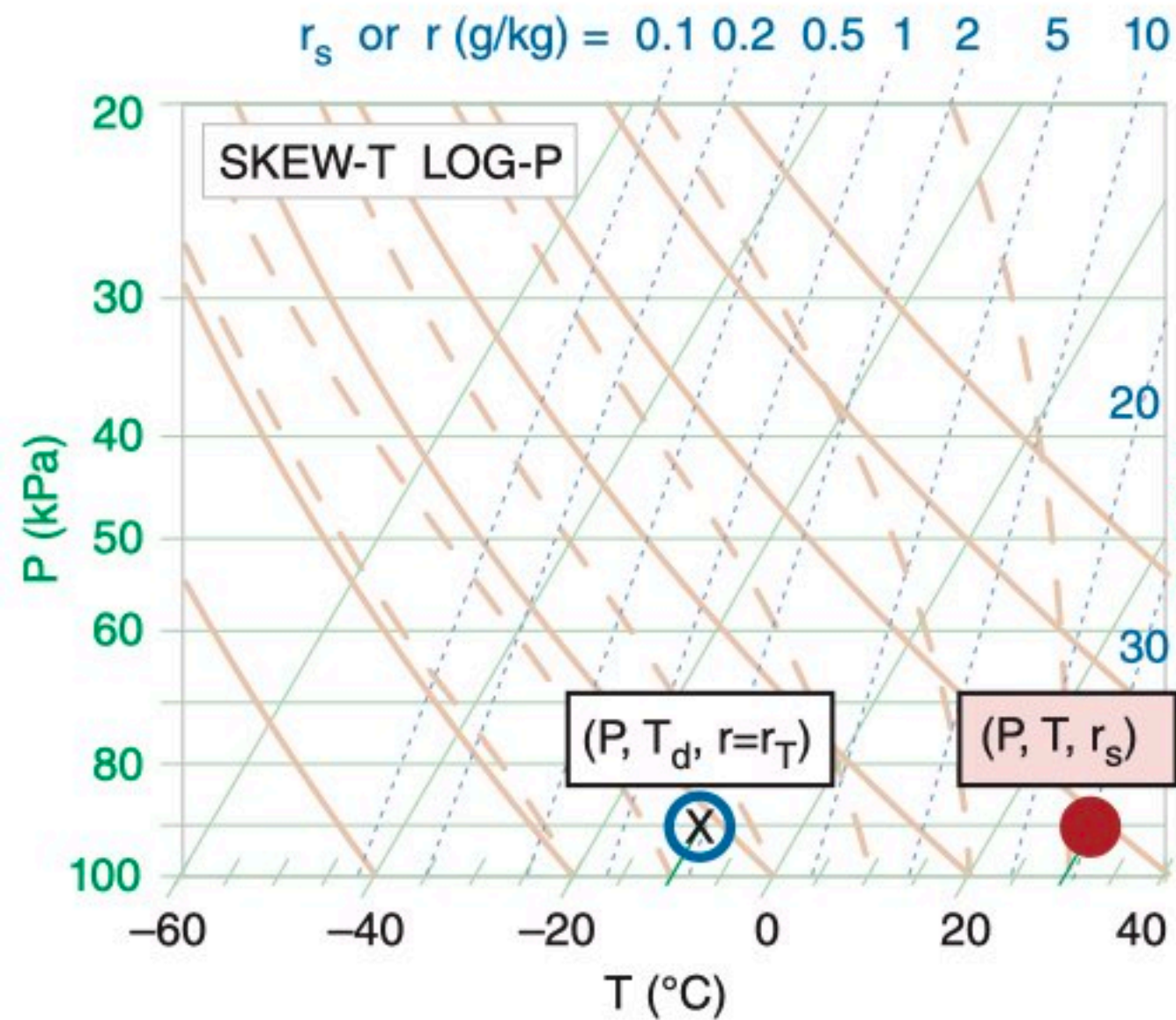
Exercici 3:

Dibuixeu en el diagrama termodinàmic (Skew-T - Log P) els valors de Temperatura i temperatura de rosada del radiosondatge donat per:

P (kPa)	T (°C)	T_d (°C)
20	-36	-80
30	-36	-60
40	-23	-23
50	-12	-12
70	0	-20
80	8	-10
90	10	10
100	10	10

Discussiu si els valors tenen sentit (pot ser $T_d = T$, i $T_d > T$?) i si creieu que es produeix boira. Entre quines alçades pot haver-hi un estrat de núvols?

(a) Unsaturated



(b) Saturated

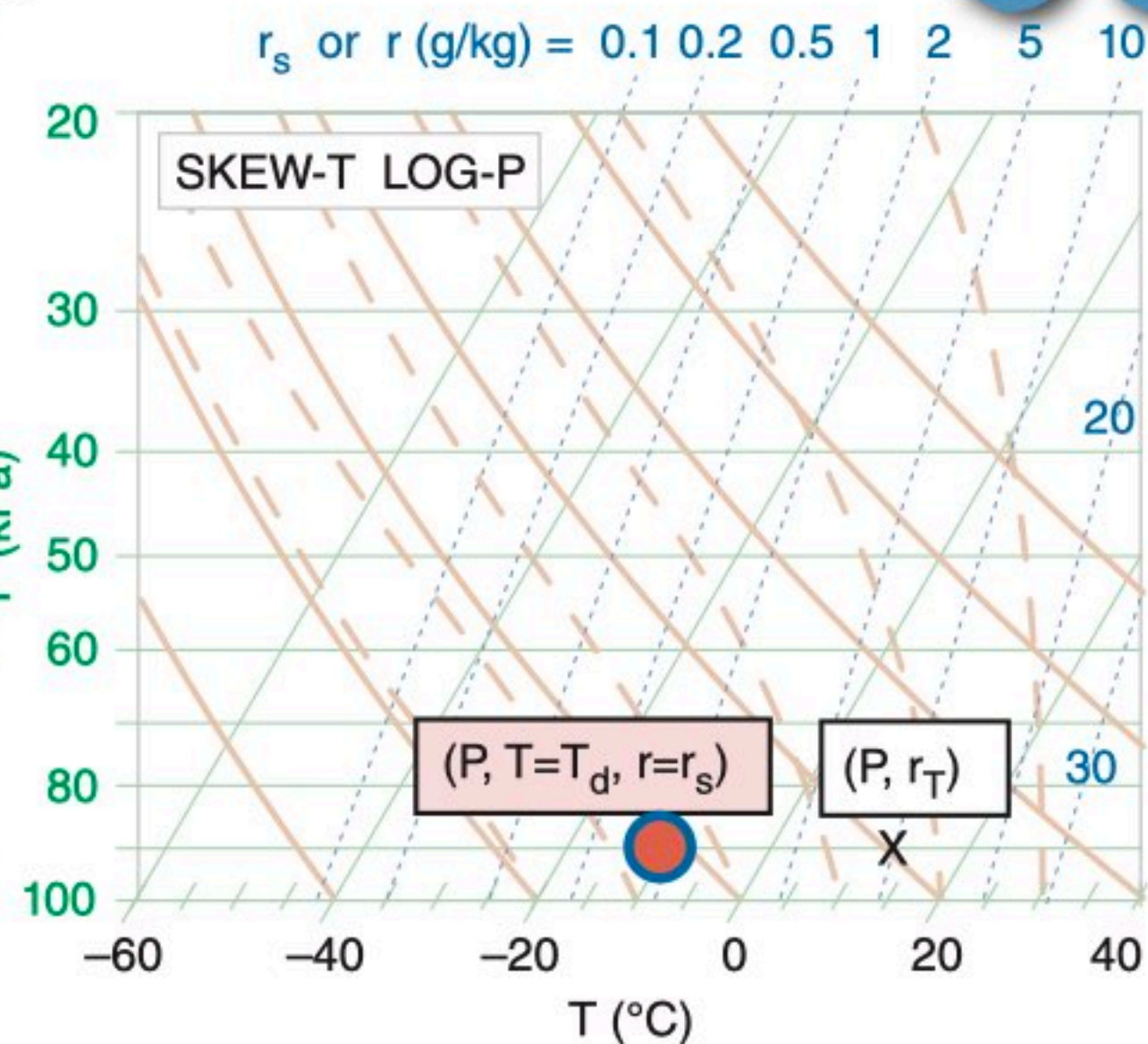


Figure 5.7

In general, three points are needed to indicate one air parcel on a thermo diagram. The red-dot (red-filled circle) indicates air temperature. The blue circle (with no fill) indicates dew-point temperature (as a measure of the amount of water vapor in the air). The X indicates total water content. (a) Example of an unsaturated air parcel plotted on a skew-T diagram. (b) A different air parcel — this one is saturated. (See the Sample Application for details.)