

Universidad de Chile
Departamento de Geofísica

Introducción a la Meteorología

Diagramas Termodinámicos y Estabilidad Atmosférica

Prof. René Garreaud
www.dgf.uchile.cl/rene

Estabilidad de la atmósfera a desplazamientos verticales es importante para varias “aplicaciones”:

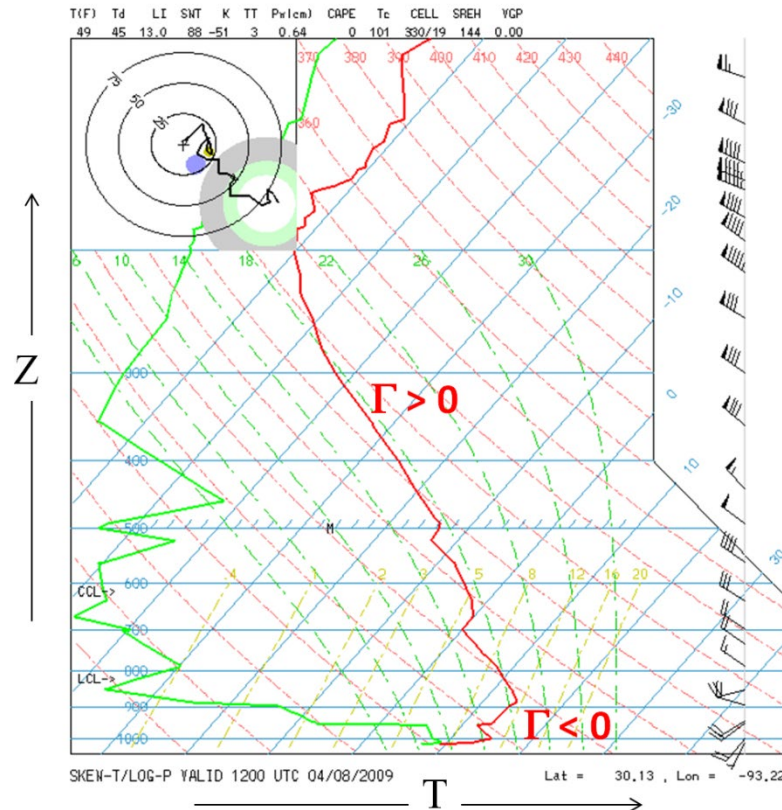
- Contaminación del aire
- Tormentas (en especial las de tipo convectivo)
- Turbulencia de aire claro



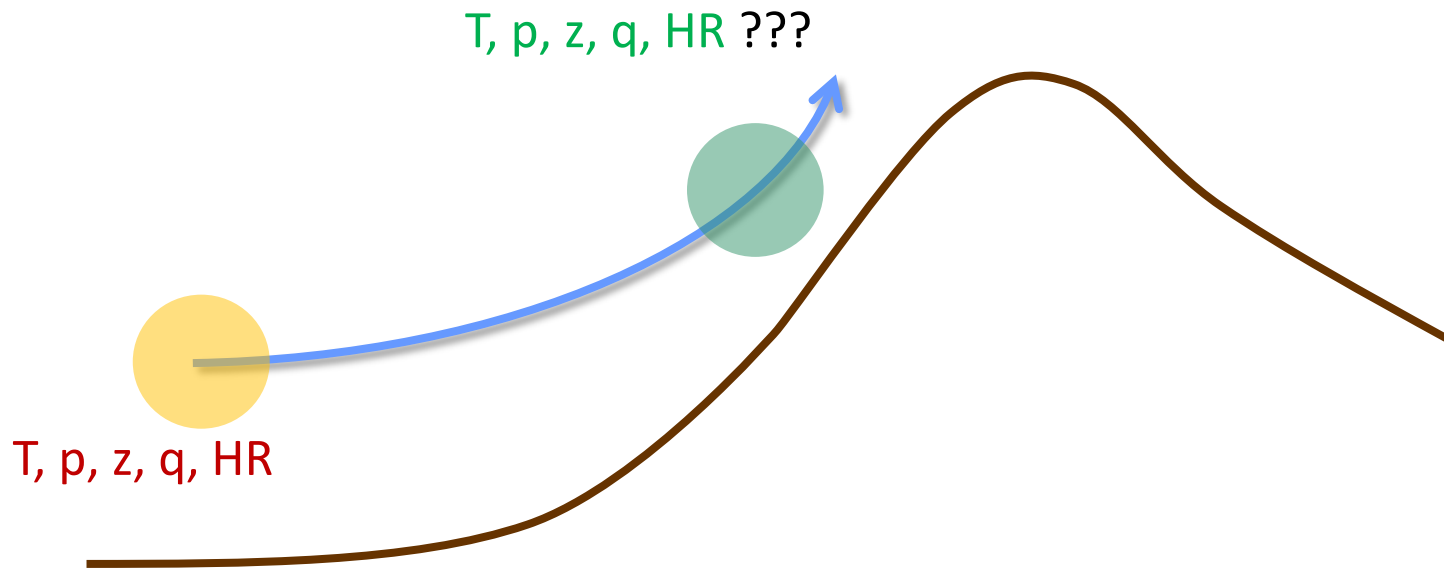
Gradiente (vertical) observado de temperatura

$$\Gamma_{\text{obs}} \equiv -dT/dz \approx -\Delta T/\Delta z$$

La ultima expresión se calcula empleando observaciones en dos niveles (e.g., mediciones con Radiosonda). Como la temperatura “normalmente” decrece con la altura $\Gamma_{\text{obs}} > 0$. En ciertos casos la temperatura aumenta con la altura, a lo que se refiere como **inversión térmica** ($\Gamma_{\text{obs}} < 0$) o permanece constante (**isotermal**, $\Gamma_{\text{obs}} = 0$)



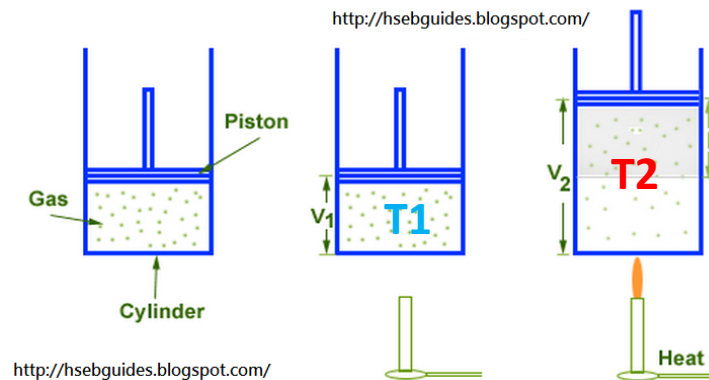
¿Que le ocurre a una “parcela” de aire (globo sin globo) cuando es desplazada verticalmente?



Primera ley de la termodinámica (Conservación de Energía)

$$dQ = dU + dW$$

$$dW = F \cdot dx = p \cdot A \cdot dx = p \cdot dV = p \cdot d\alpha \quad (\text{para una masa unitaria})$$



Adición de calor a volumen constante

$$dQ = dU = c_v \cdot dT$$

Donde $c_v = 717 \text{ J/Kg}$ es el calor específico del aire a volumen constante, : medible en el laboratorio

Cambio de
variable

Combinando ambos términos:

$$dQ = c_v \cdot dT + p \cdot d\alpha = c_v \cdot dT + d(p\alpha) - \alpha dp$$

$$dQ = c_v \cdot dT + RdT - \alpha dp = c_p \cdot dT - \alpha dp$$

Donde $c_v = 717 \text{ J/Kg}$ y $c_p = R + c_v = 1004 \text{ J/kg}$ son los calores específicos del aire a volumen y presión constante, respectivamente

Ec. de estado:
 $p\alpha = RT$

$$dU + dW = dQ$$

Si el proceso es **adiabático**: $dQ = 0$ con lo cual

$$c_p dT - \alpha dp = 0$$

$$c_p dT + g dz = 0$$

Ec. Hidrostática
 $\alpha dp = -g dz$

$$\frac{dT}{dz} \big|_{adiab} = -\frac{g}{c_p} \approx -10^\circ C / km$$

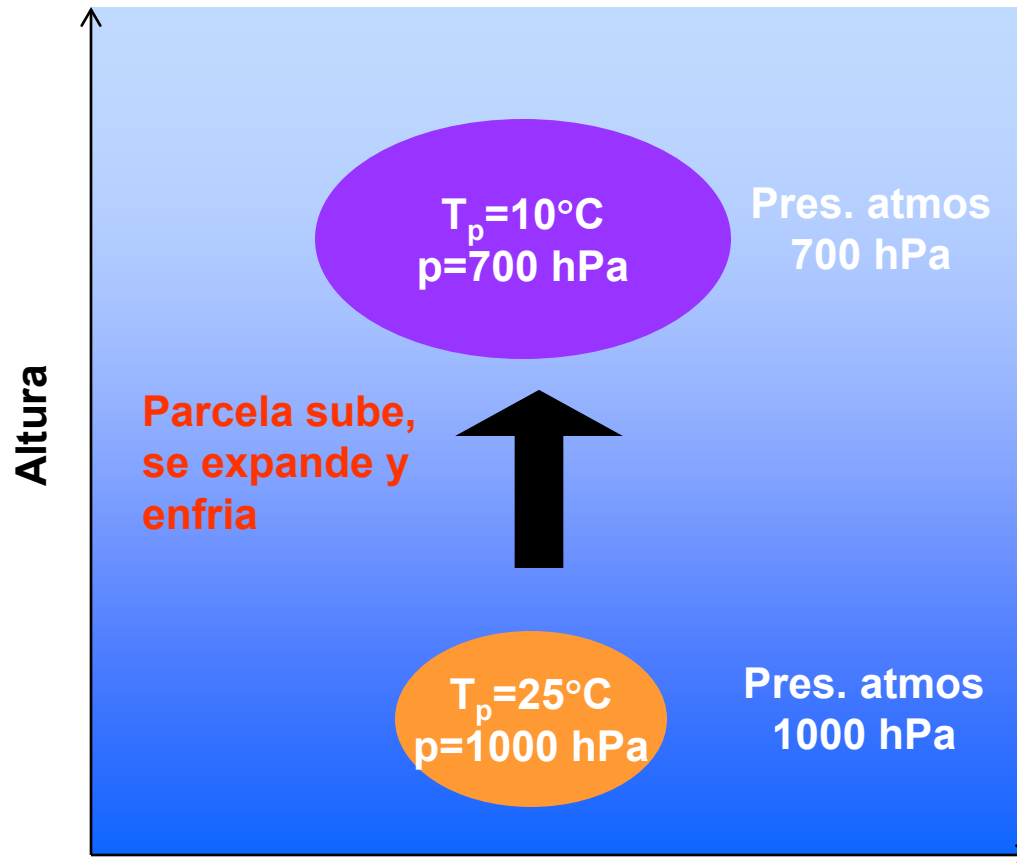
Esto es, por cada kilómetro de ascenso (descenso) la temperatura de la parcela disminuye (aumenta) $10^\circ C$, **si el proceso es adiabático**.

Nota: Si el ascenso/descenso toma menos de un día la aproximación adiabática es muy buena (intercambio de calor con el medio es pequeña).

Gradiente adiabático (seco)

$$\Gamma \big|_{adiab} = -\frac{dT}{dz} \big|_{adiab} = +\frac{g}{c_p} \approx 10^\circ C / km$$

Enfriamiento Adiabático

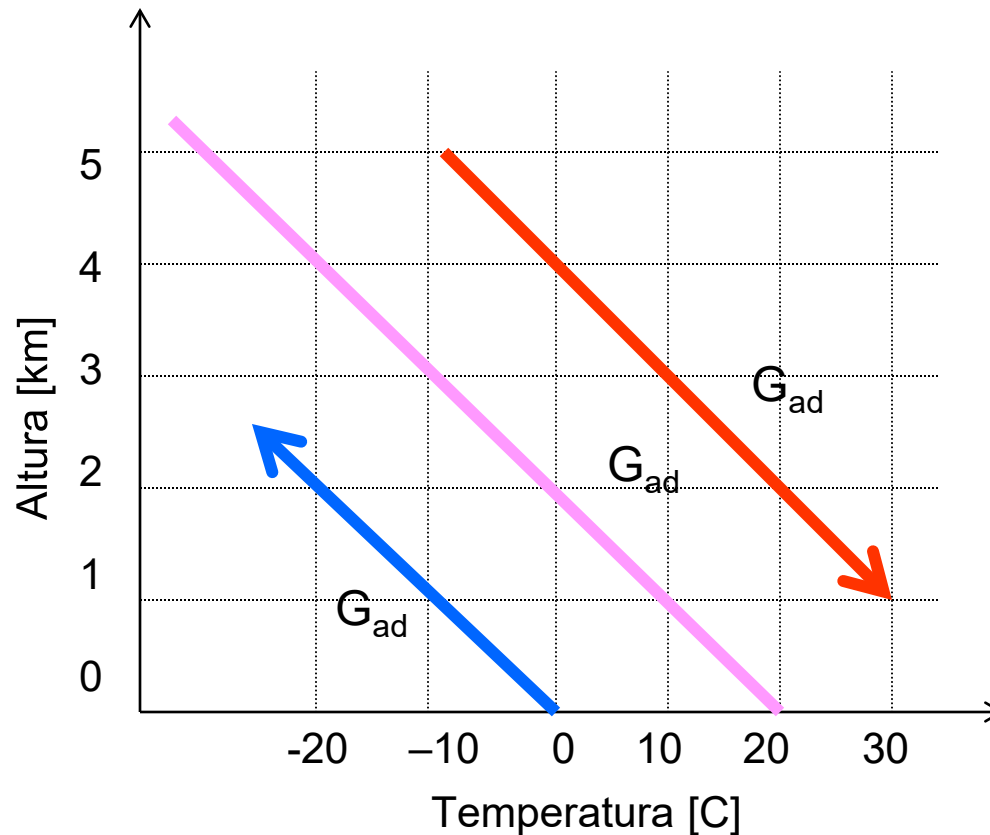


Nota: el proceso también actúa a la inversa; si una parcela desciende se comprime y calienta adiabáticamente

Introducción a la Meteorología – Estabilidad Atmosférica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

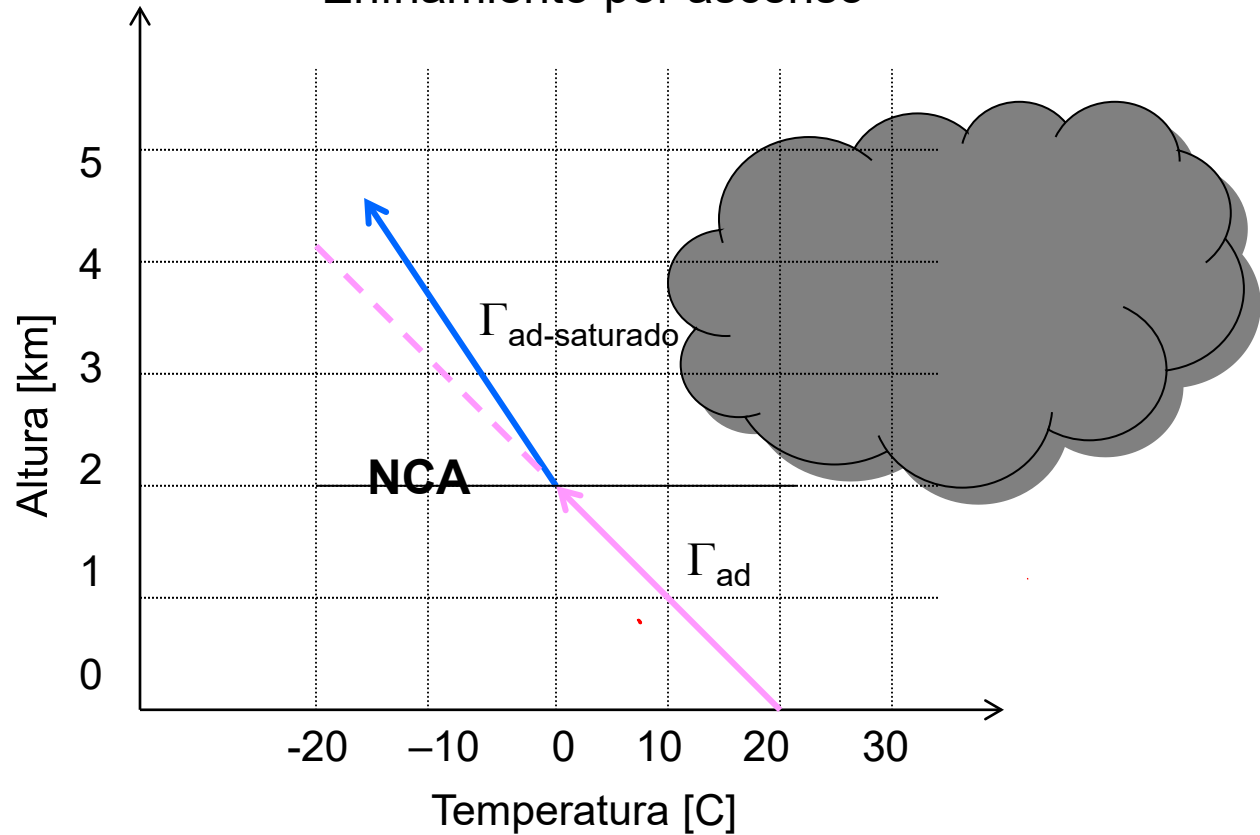
Ejemplo del cambio de temperatura de tres parcelas de aire al desplazarse verticalmente siguiendo un gradiente adiabático seco ($10^{\circ}\text{C}/\text{km}$)



$$dq = 0 = du + dw = c_p dT - p^{-1} dp \rightarrow dT/dz = -\Gamma_{adiab} = -g/c_p \approx -10^{\circ}\text{C}/\text{Km}$$

Formación de Nubes

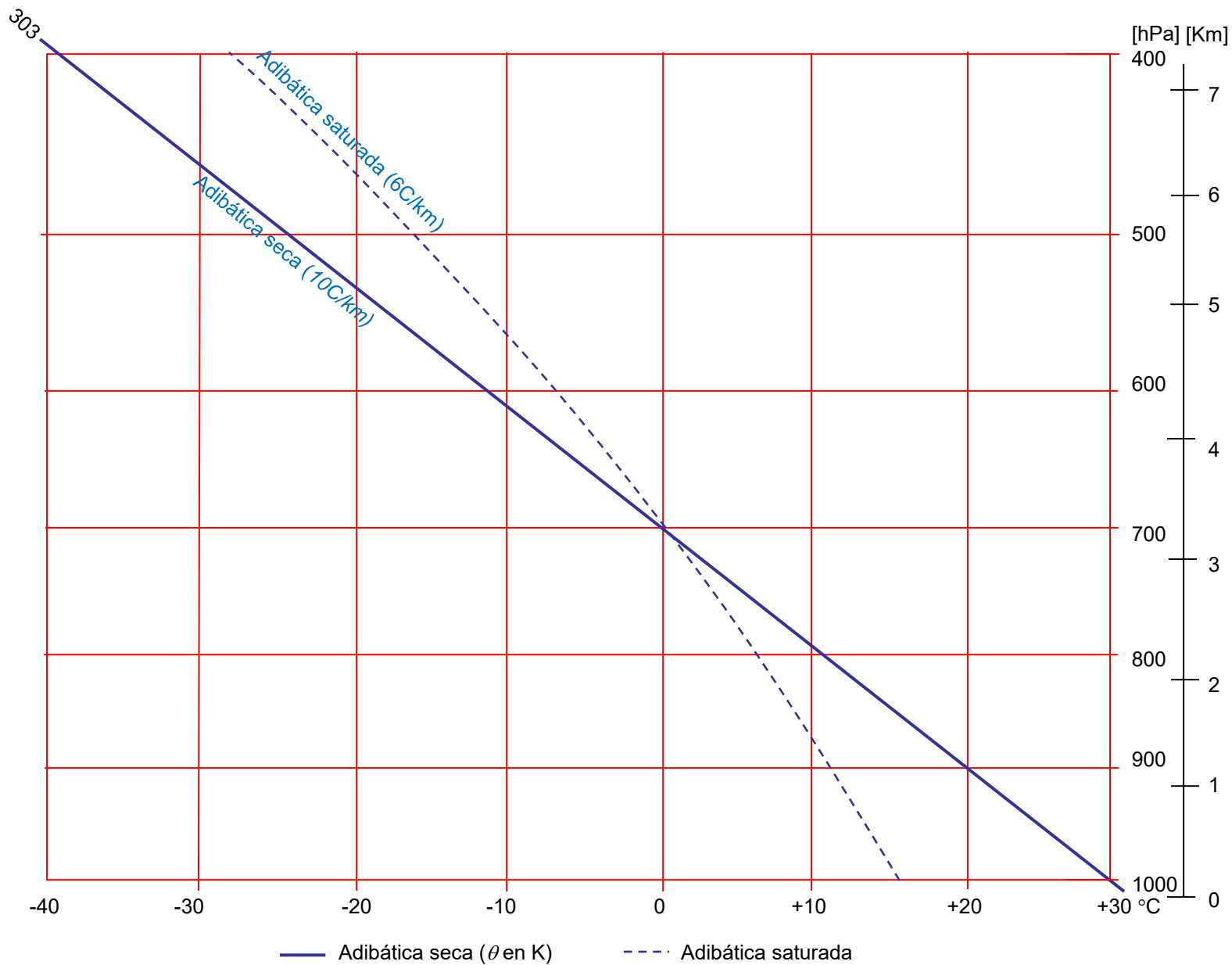
Saturación por enfriamiento
Enfriamiento por ascenso



$$dq = 0 = du + dw + Ldq_s \rightarrow dT/dz = -\Gamma_{adiab\ sat}$$

$$\Gamma_{adiab\ sat} = \Gamma_{adiab} / [1 + (L/c_p)(dq_s/dT)] \approx -4 \text{ a } -10^\circ\text{C/Km}$$

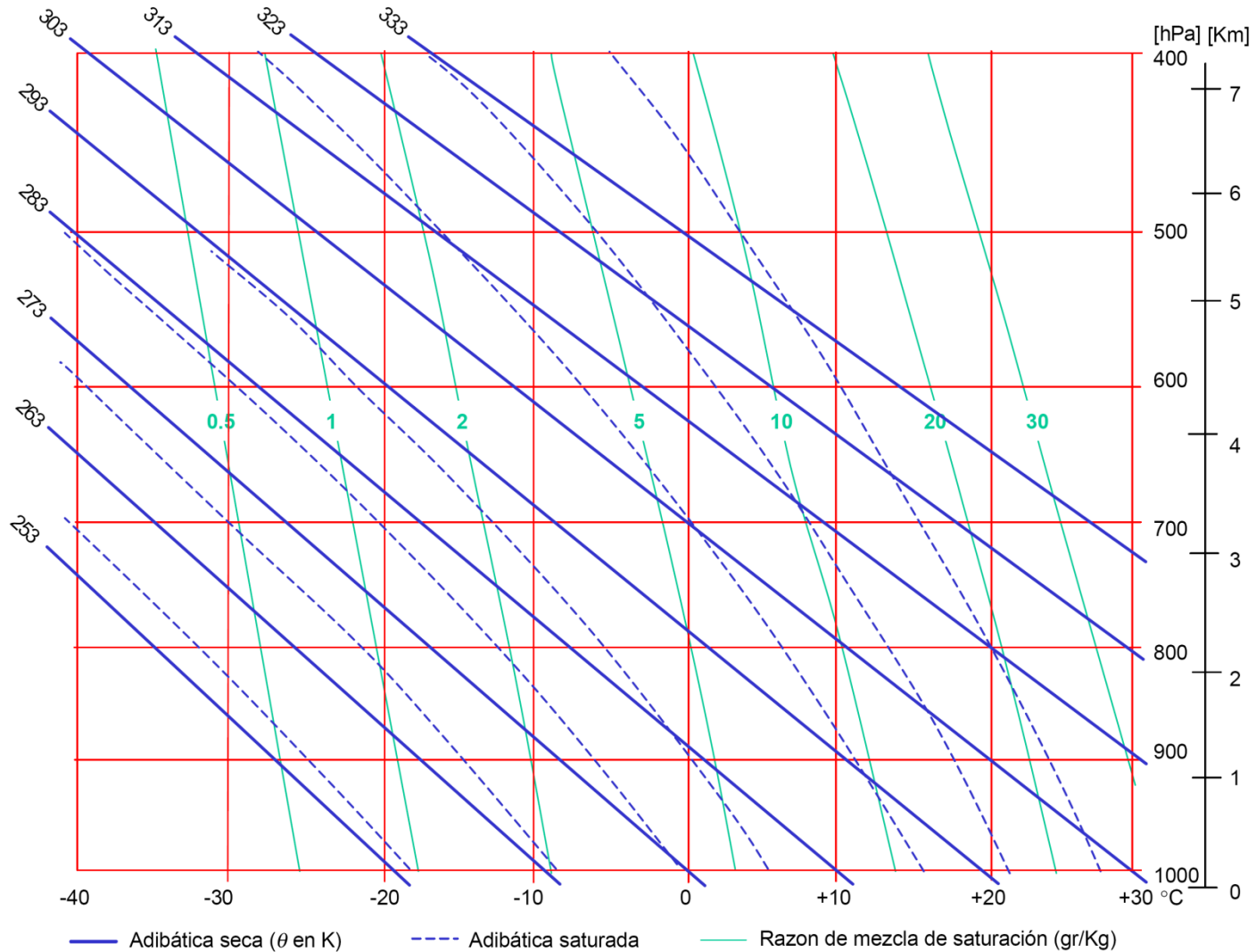
Diagrama Termodinámico (emagrama)



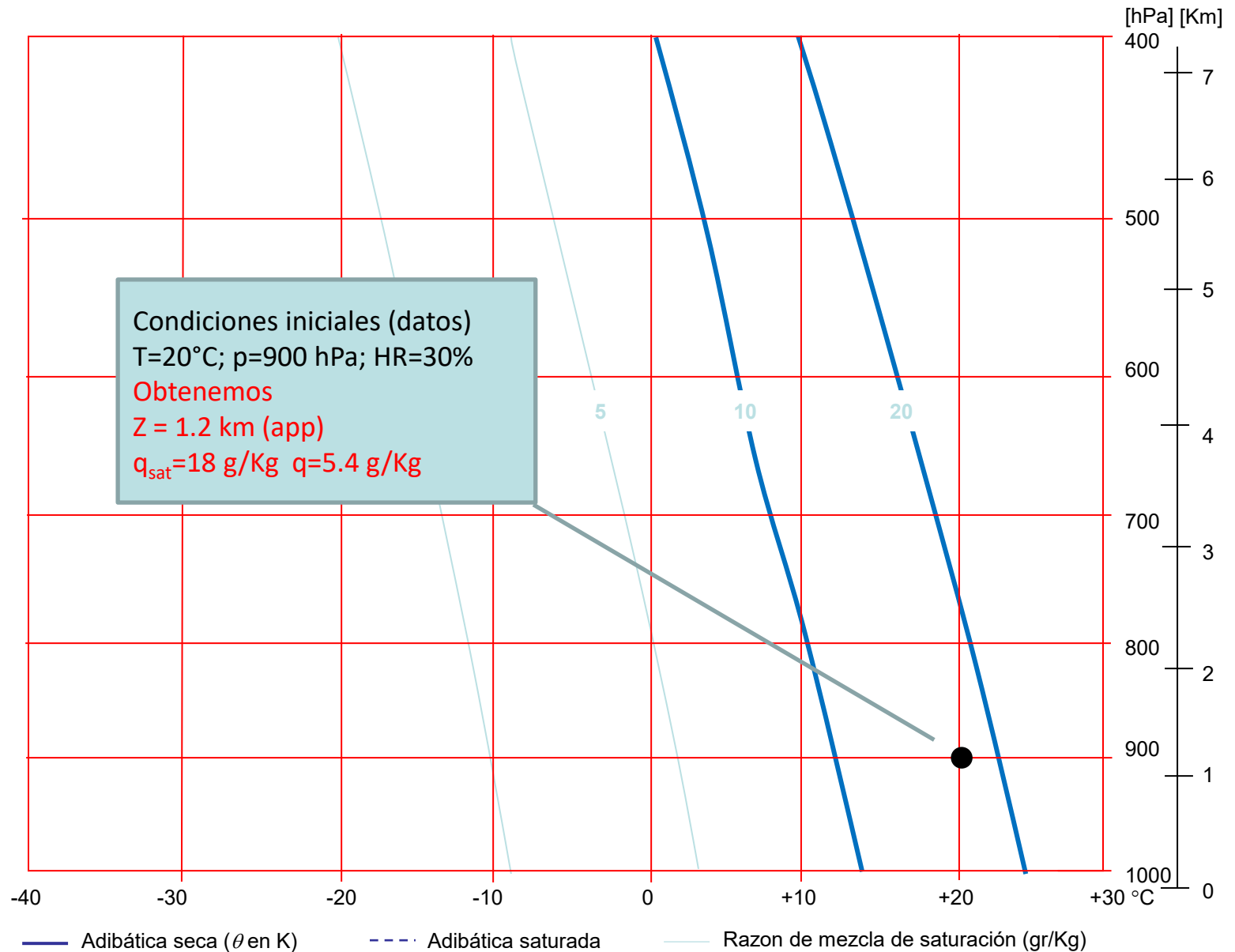
Introducción a la Meteorología – Estabilidad Atmosférica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

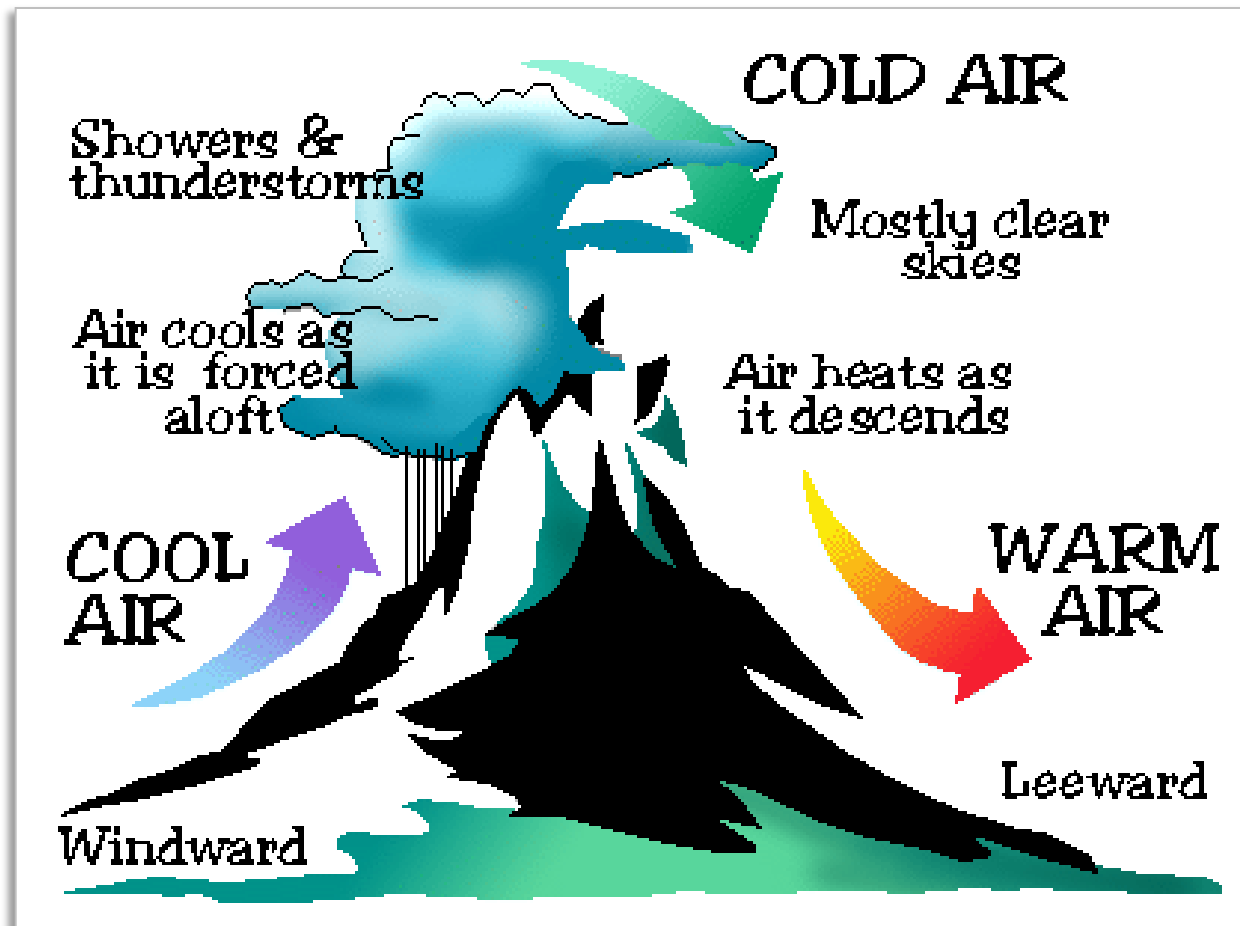
Diagrama Termodinámico (emagrama)



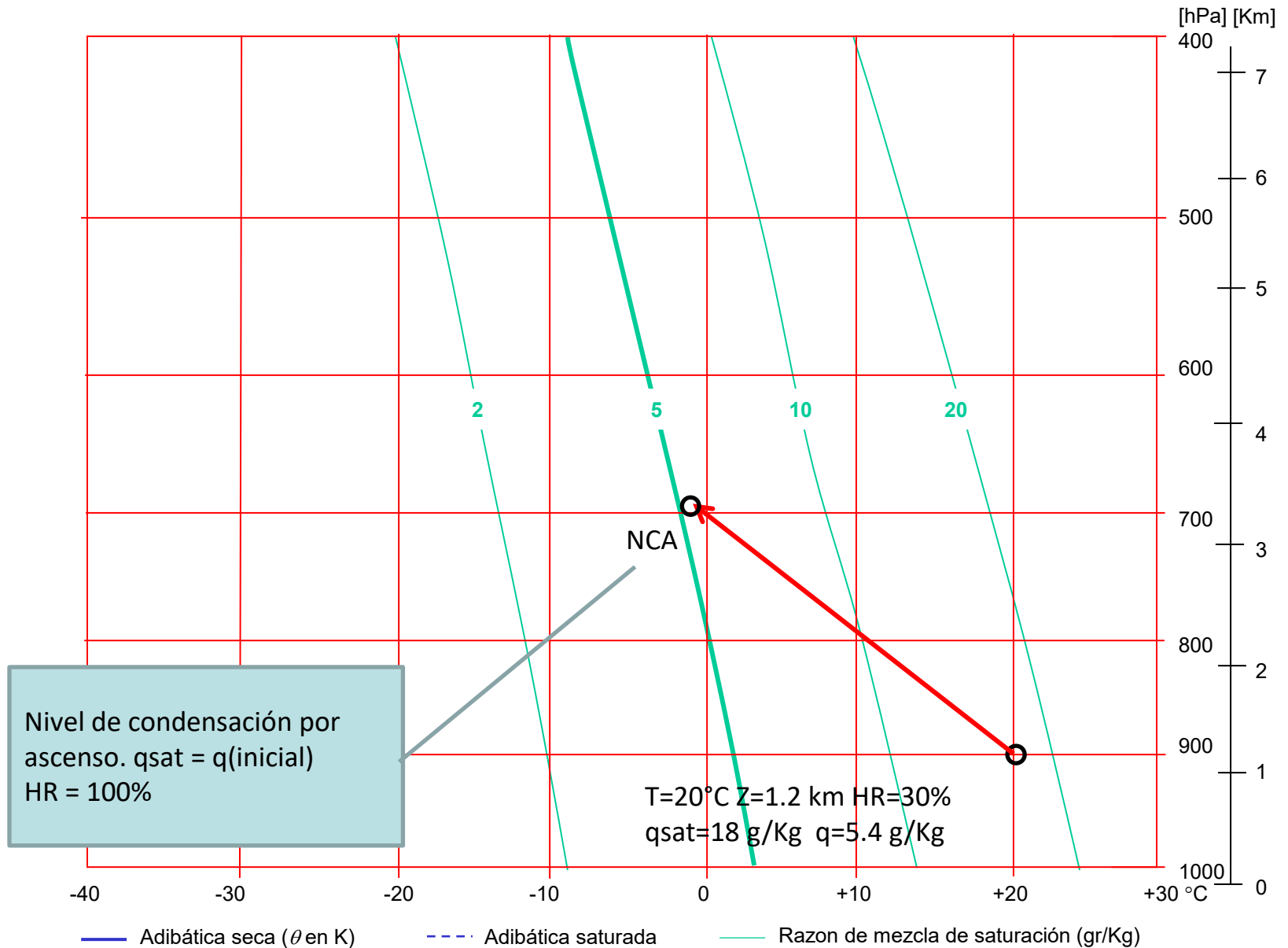
Uso del Diagrama Termodinámico



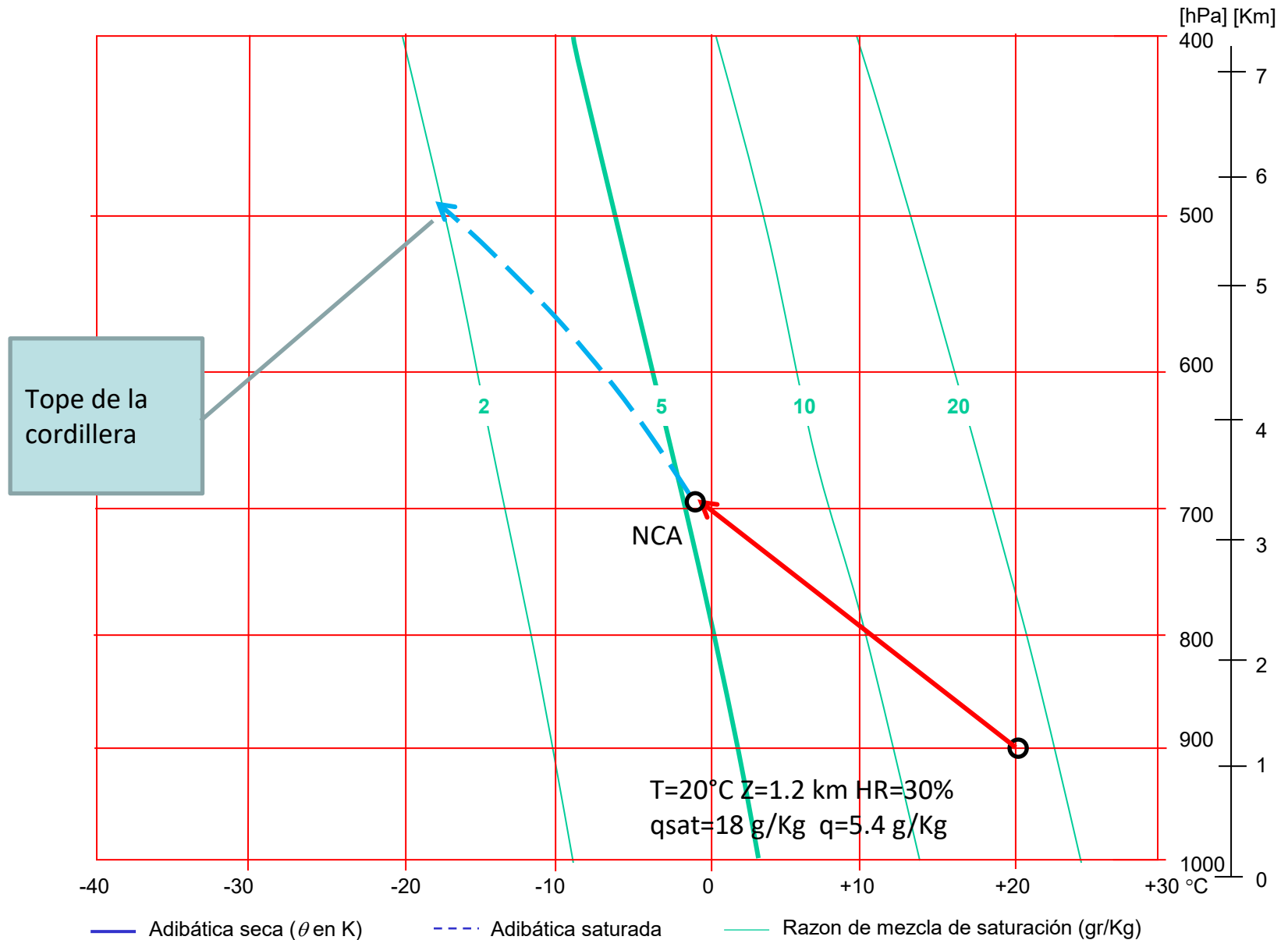
Aplicación al viento Zonda (Fohen, Chinook)



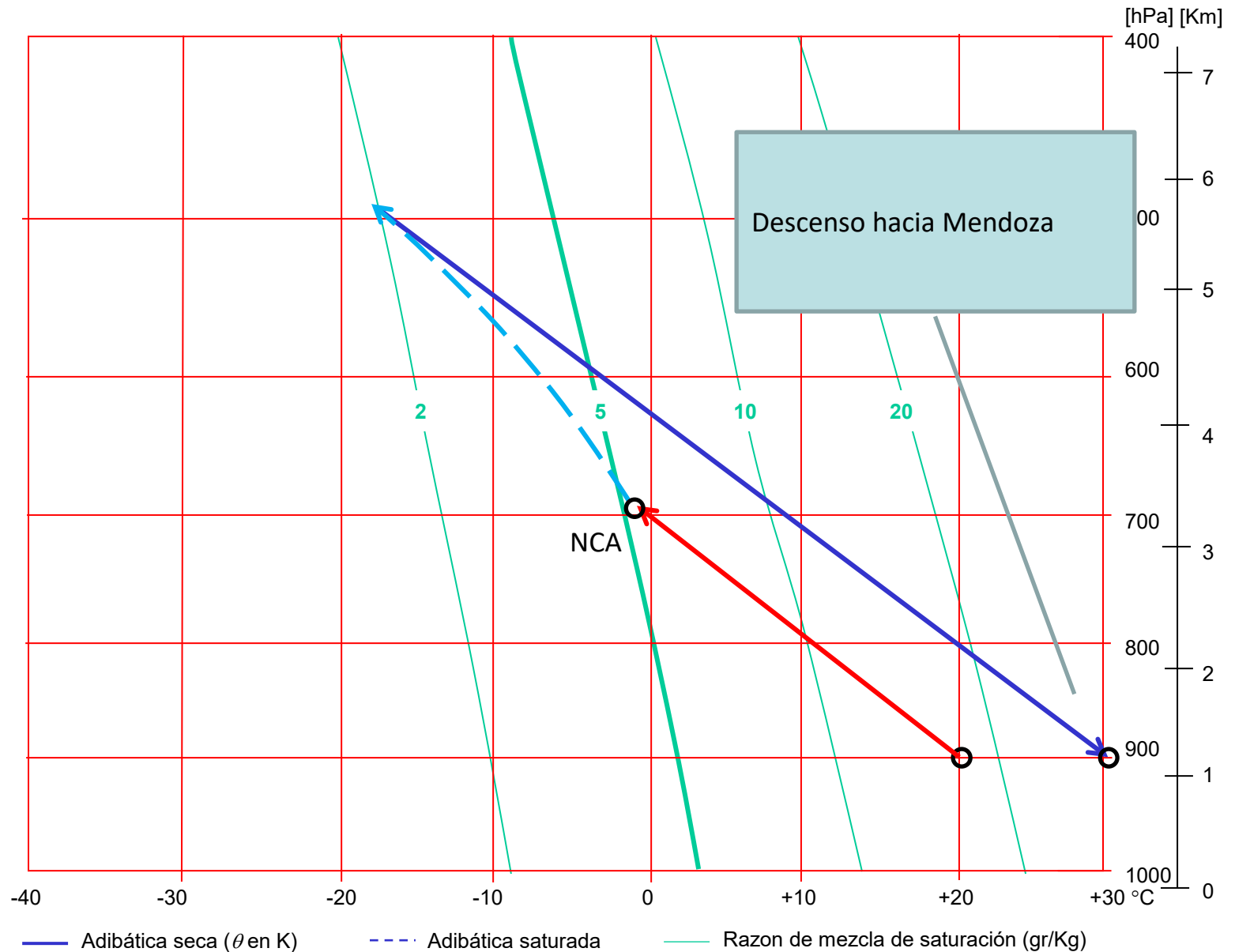
Aplicación al viento Zonda (Fohen, Chinook)



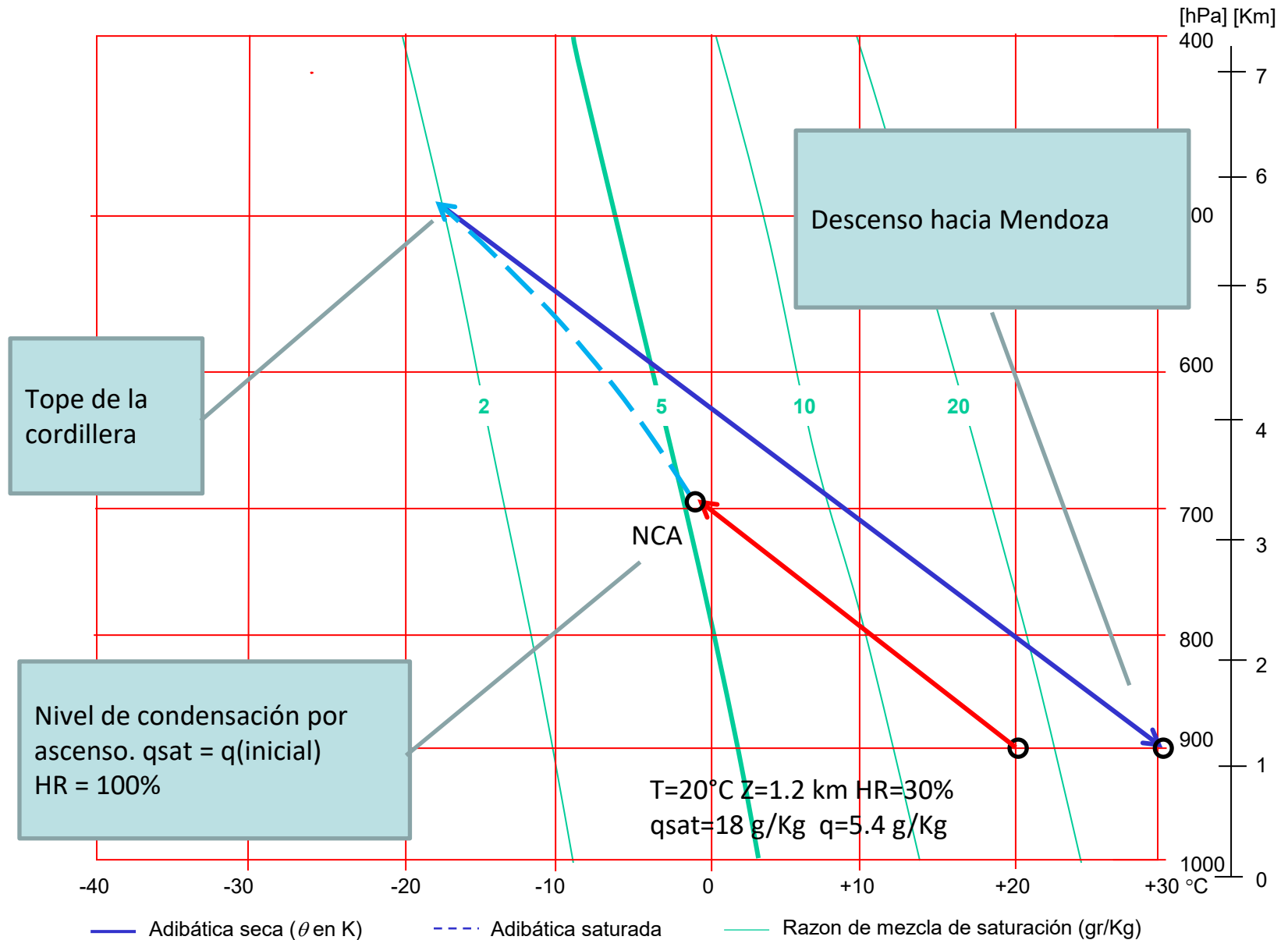
Aplicación al viento Zonda (Fohen, Chinook)



Aplicación al viento Zonda (Fohen, Chinook)



Aplicación al viento Zonda (Fohen, Chinook)



Estabilidad a desplazamiento vertical

En forma cualitativa...

- Principio de Arquímedes: Cuerpos mas densos que el medio se hunden / Cuerpos menos densos (más livianos) que el medio ascienden
- En un gas ideal, a presión constante, la densidad es inversamente proporcional a la temperatura: aire frío es mas denso / aire cálido es más liviano.

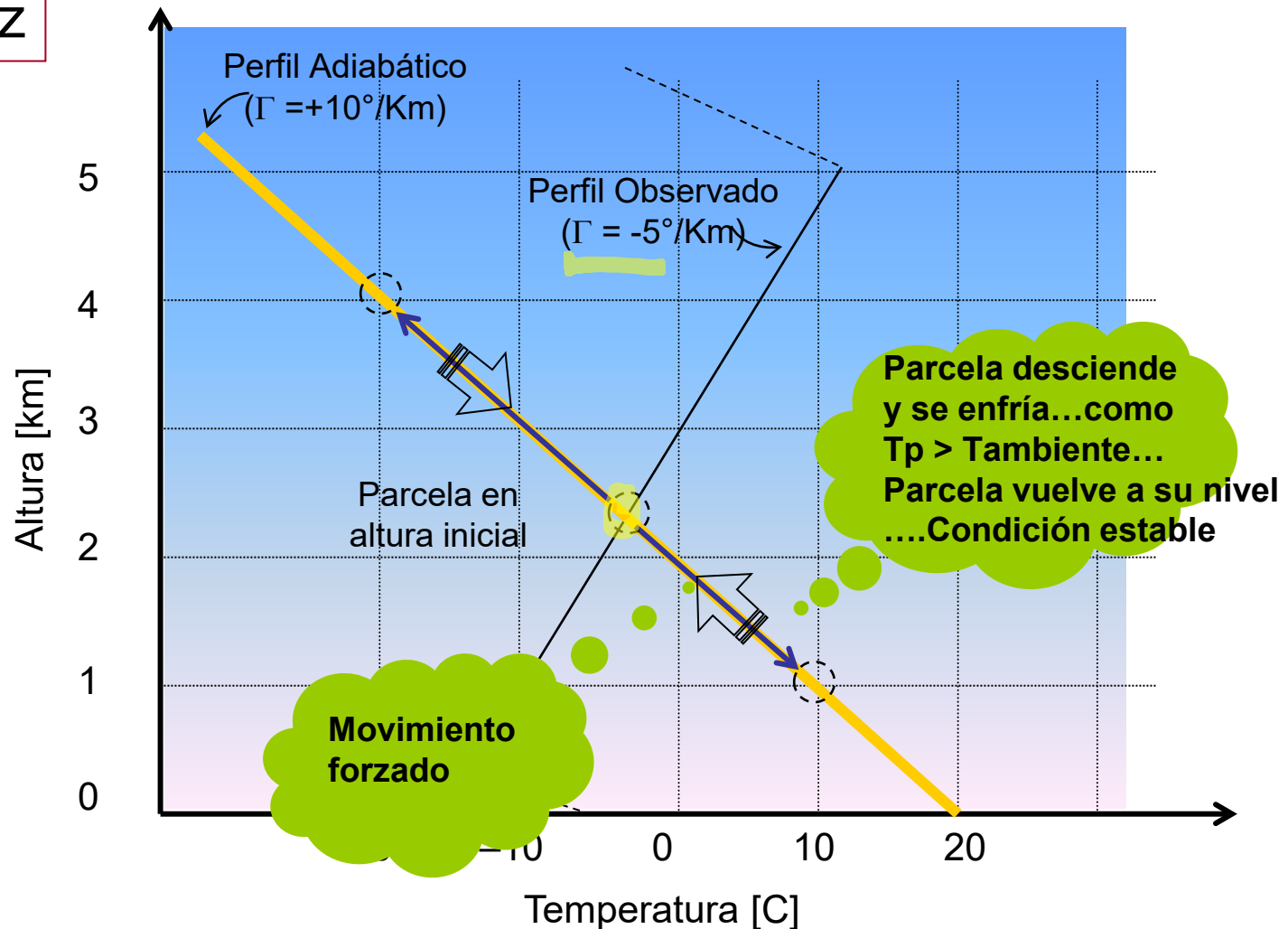
Si $T(\text{parcela}) > T(\text{ambiente}) \rightarrow$ parcela tiende a subir

Si $T(\text{parcela}) = T(\text{ambiente}) \rightarrow$ parcela se mantiene nivelada

Si $T(\text{parcela}) < T(\text{ambiente}) \rightarrow$ parcela tiende a bajar

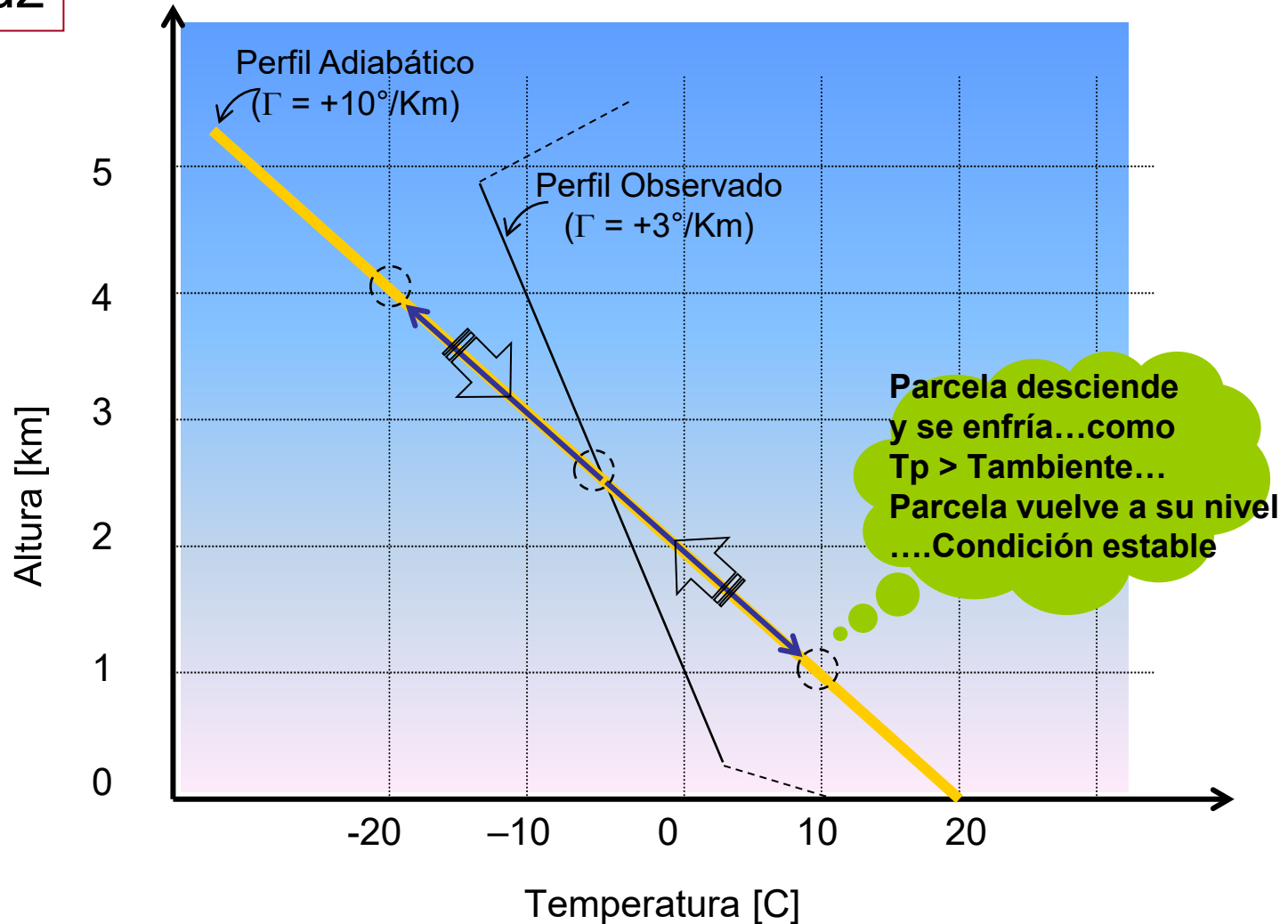
Análisis de estabilidad I (Inv. Térmica)

$$\Gamma = -dT/dz$$



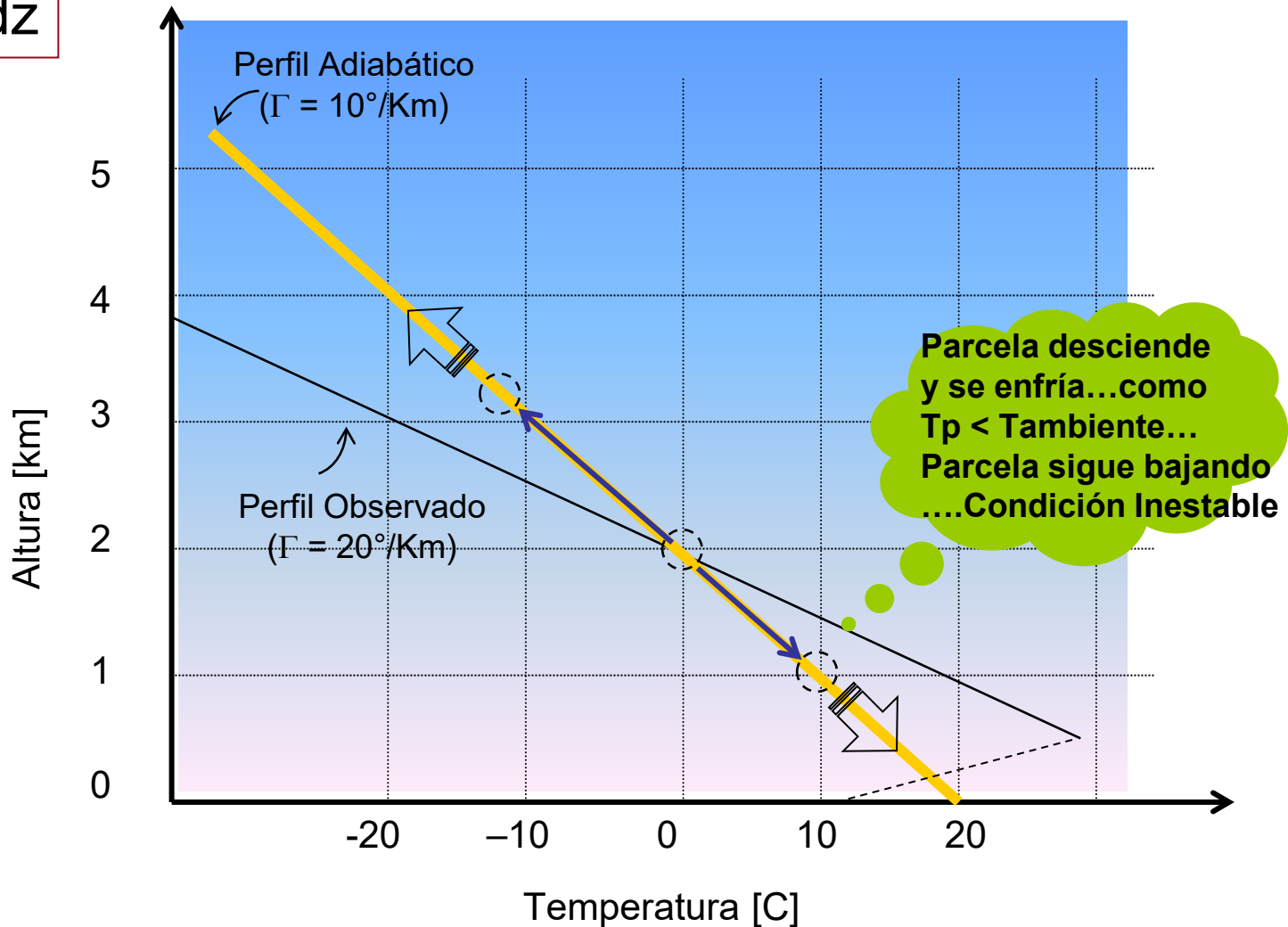
Análisis de estabilidad II

$$\Gamma = -dT/dz$$



Análisis de estabilidad III

$$\Gamma = -dT/dz$$



Estabilidad a desplazamiento vertical

p, T, ρ

p, T', ρ'

$$m \cdot dw/dt = E - P$$

$$\rho' \cdot V \cdot a_v = g \square V - g \square' \cdot V$$

$$a_v = g (\rho - \rho') / \rho' \dots$$

usando ley de gases ideales y asumiendo $p \approx p'$

$$a_v = g (T' - T) / T$$



$$T = T_0 - \Gamma_{\text{OBS}} \square z \quad \text{y} \quad T' = T_0 - \Gamma_{\text{adiab}} \square z$$

$$a_v = (g/T) \cdot (\Gamma_{\text{obs}} - \Gamma_{\text{adiab}}) \square z$$

$$a_v = d^2 z / dt^2 = d^2 \delta z / dt^2$$

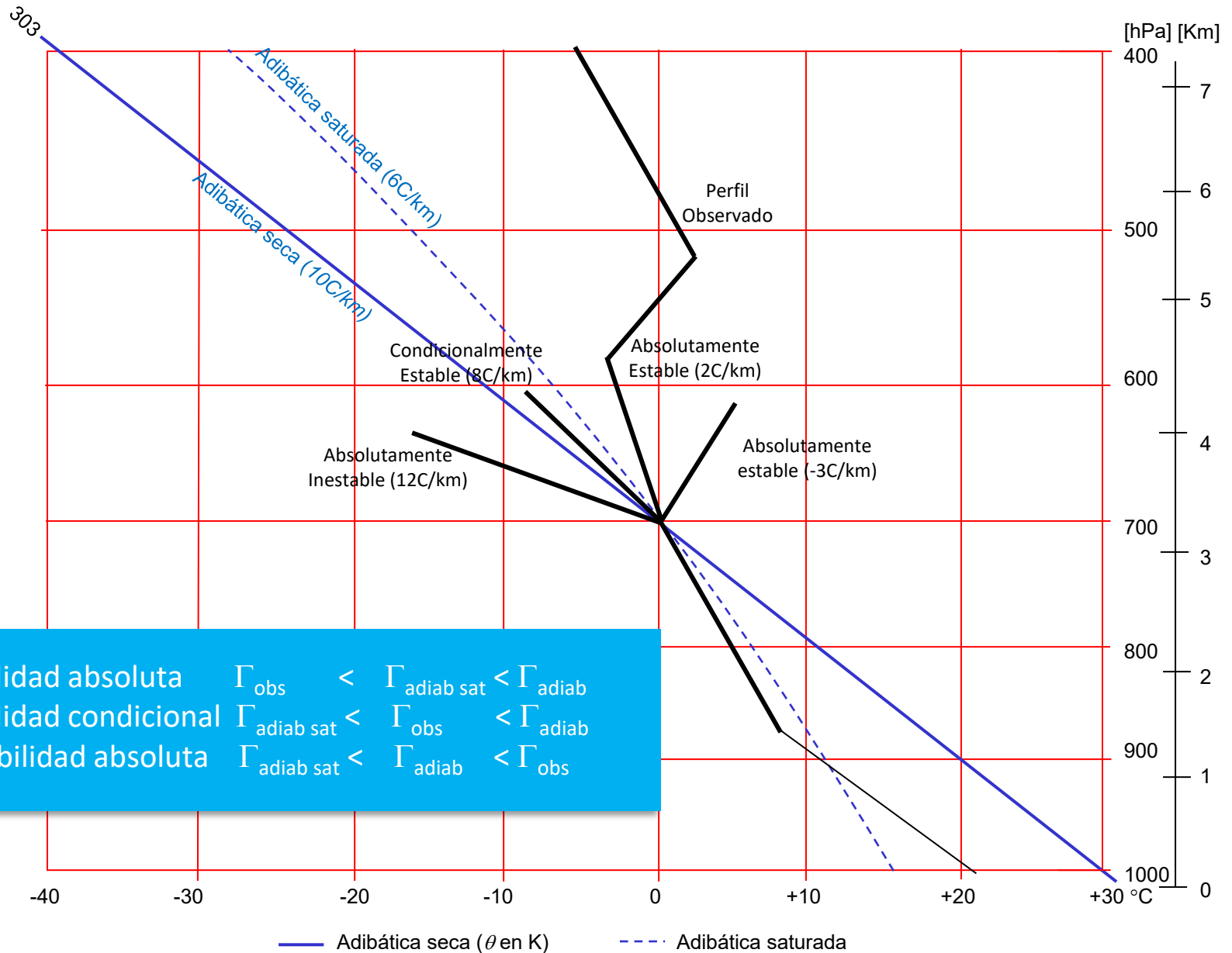
$$d^2 \delta z / dt^2 = -(g/T) \cdot (\Gamma_{\text{adiab}} - \Gamma_{\text{obs}}) \square z$$

Condición estable: $(\Gamma_{\text{adiab}} - \Gamma_{\text{obs}}) > 0$

$$\Gamma_{\text{obs}} < \Gamma_{\text{adiab}}$$



Diagrama Termodinámico (emagrama)



Estabilidad absoluta $\Gamma_{obs} < \Gamma_{adiab\ sat} < \Gamma_{adiab}$
 Estabilidad condicional $\Gamma_{adiab\ sat} < \Gamma_{obs} < \Gamma_{adiab}$
 Inestabilidad absoluta $\Gamma_{adiab\ sat} < \Gamma_{adiab} < \Gamma_{obs}$

Material Adicional

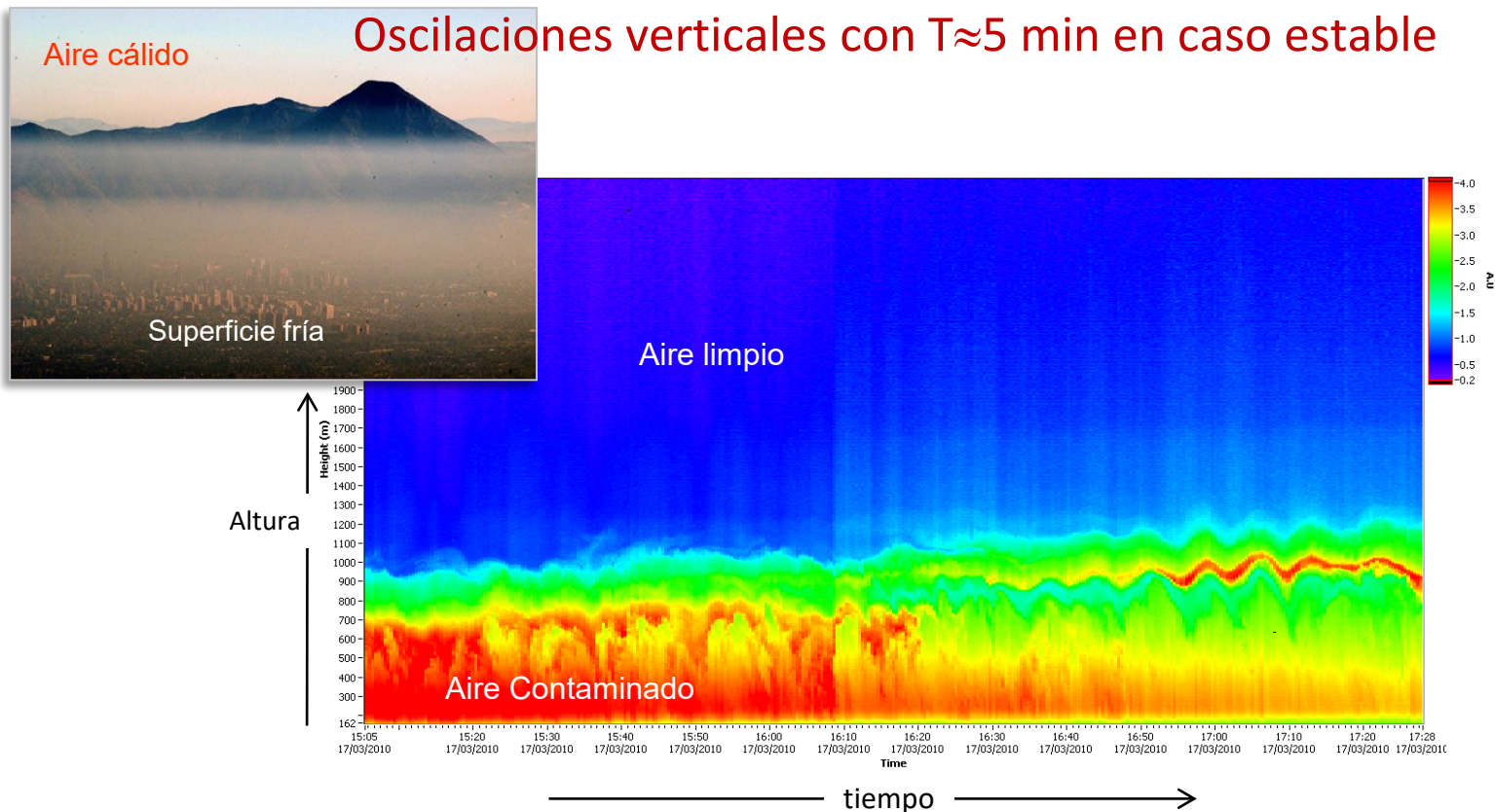
$$d^2\delta z/dt^2 = -(g/T) \cdot (\Gamma_{\text{adiab}} - \Gamma_{\text{obs}}) \square z = -N^2 \delta z,$$

donde $N^2 = (g/T) \cdot (\Gamma_{\text{adiab}} - \Gamma_{\text{obs}})$ (Frecuencia de Brunt-Vaisala)

Ejemplo Santiago

$T=15^\circ\text{C}=288\text{K}$, $\Gamma_{\text{adiab}} \approx +10^\circ/\text{km}$ y $\Gamma_{\text{obs}} \approx -3^\circ/\text{km}$ (inversión) $\rightarrow N^2 \sim 4.5\text{s}^{-2}$

Oscilaciones verticales con $T \approx 5$ min en caso estable



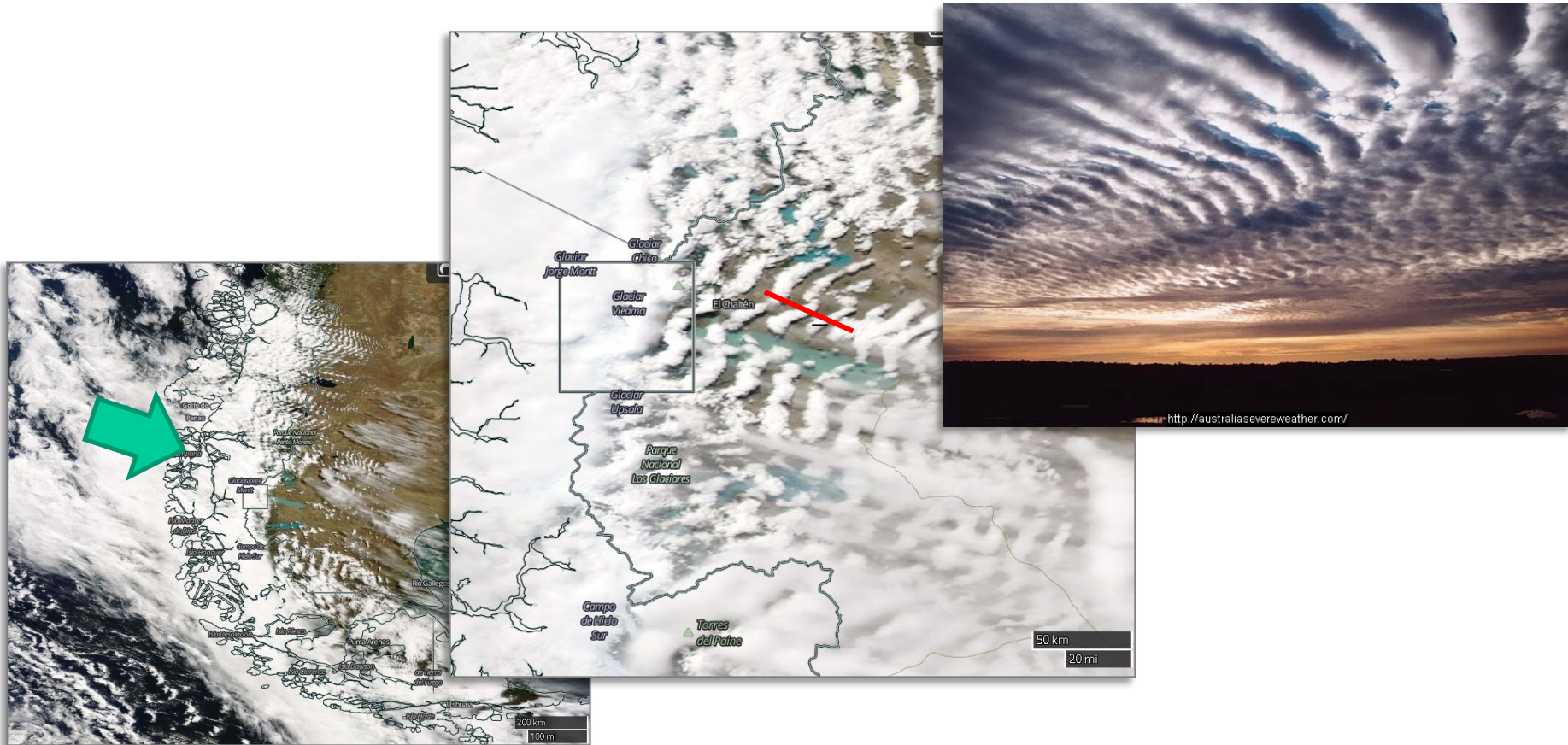
Ejemplo Patagonia

$T = -10^{\circ}\text{C} = 263\text{K}$, $\Gamma_{\text{adiab}} \approx +10^{\circ}/\text{km}$ y $\Gamma_{\text{obs}} \approx 7^{\circ}/\text{km}$ (estable) $\rightarrow N^2 \sim 1 \times 10^{-2} \text{s}^{-2}$

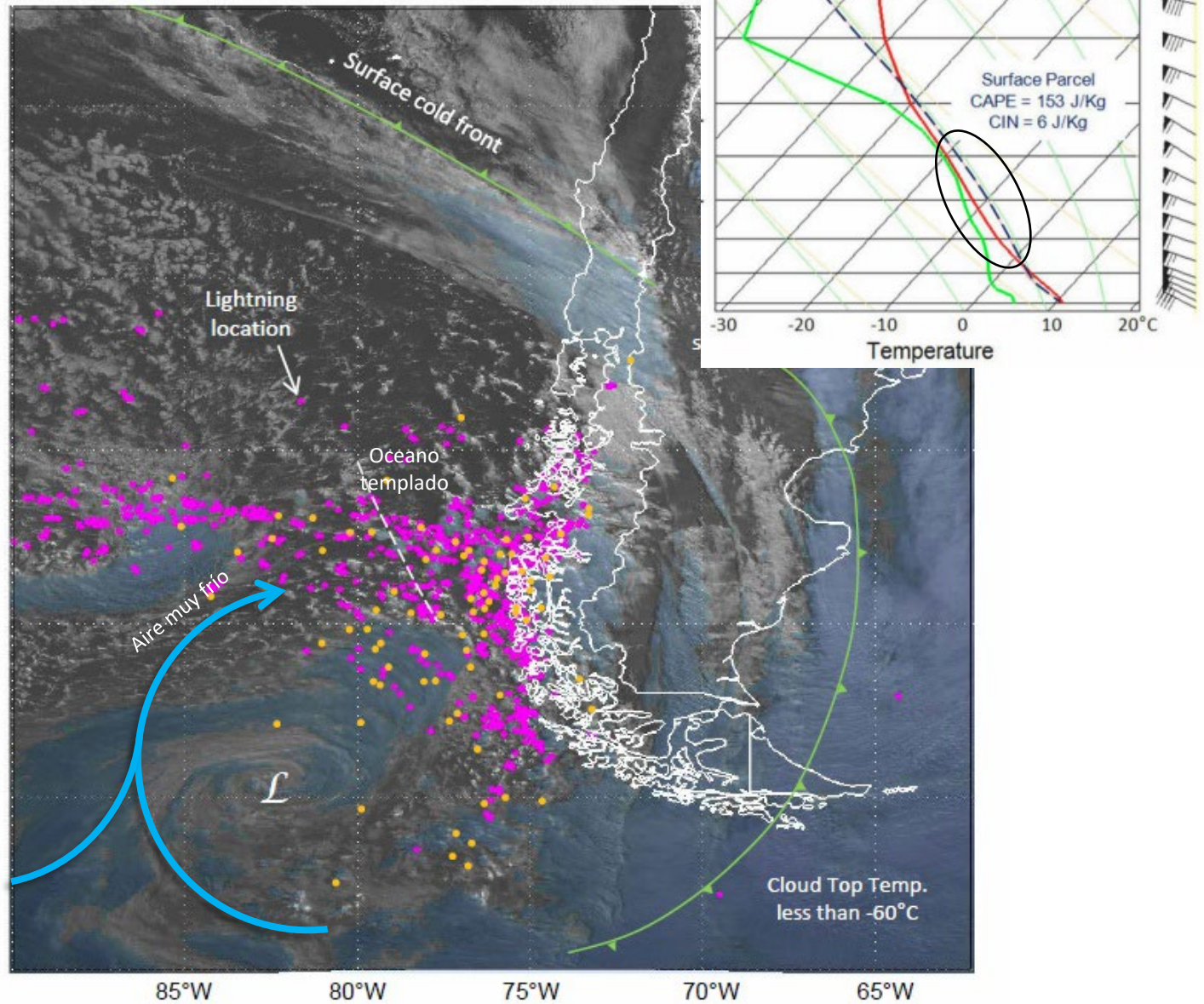
Oscilaciones verticales con $T \approx 10 \text{ min}$

Viento Horizontal de 20 m/s

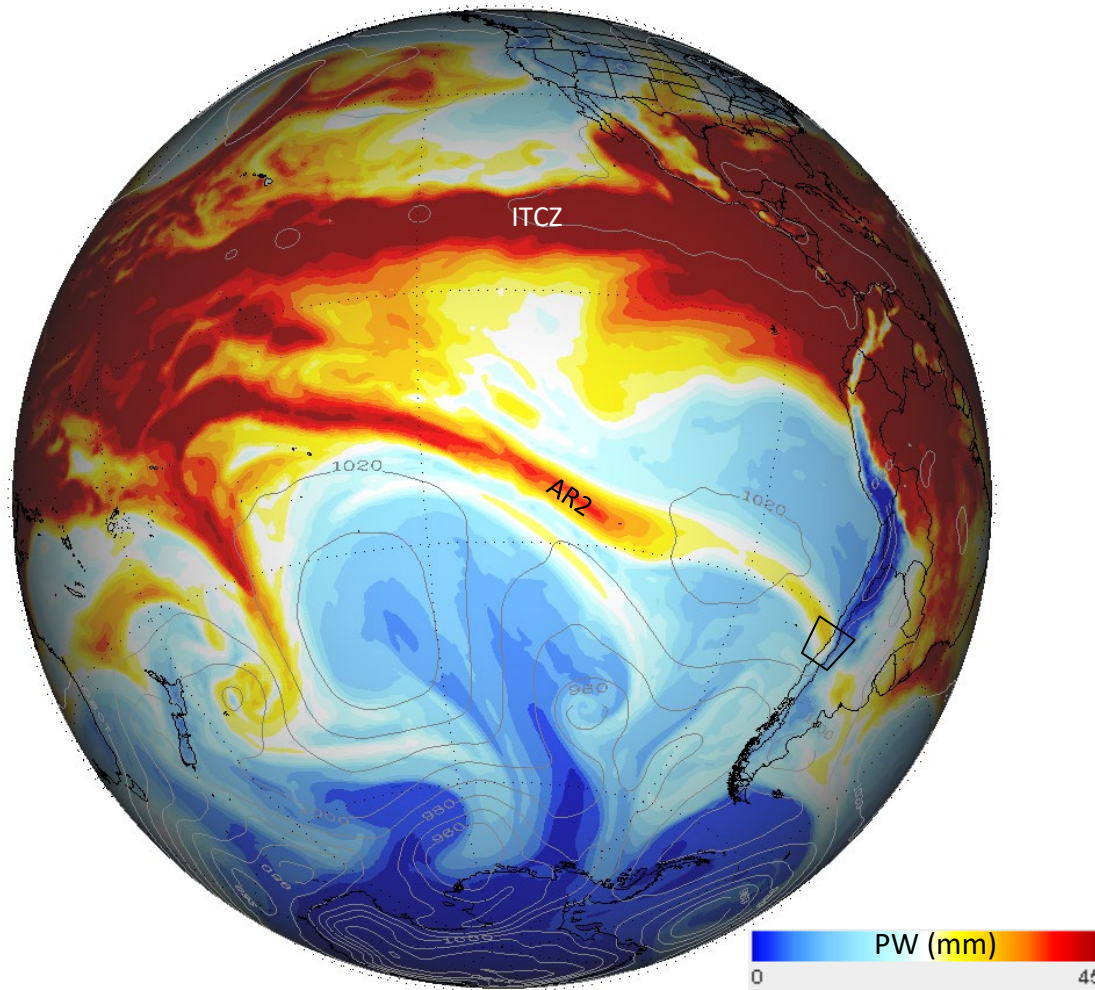
Longitud de onda $\approx 10 \text{ km}$



Ejemplo de condición inestable



GFS0.5°, t0: 00Z 28-Sep-2017
Valid: 09:00 AM 30-Sep-2017



30 Sep 2017, 12Z

85586 SCSN Santo Domingo

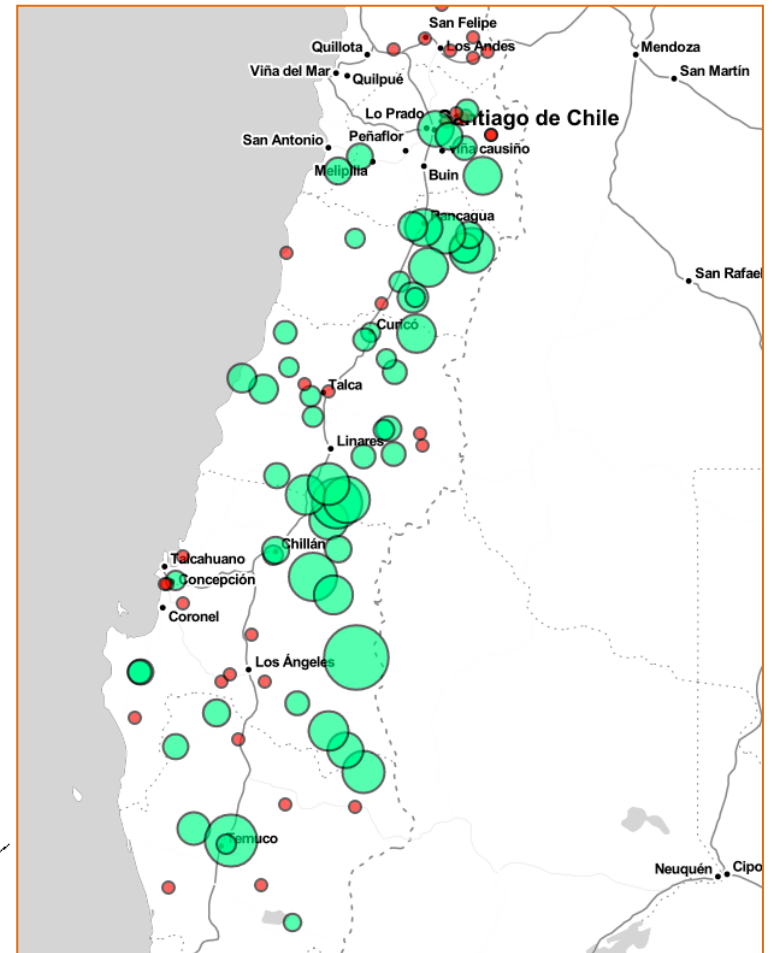
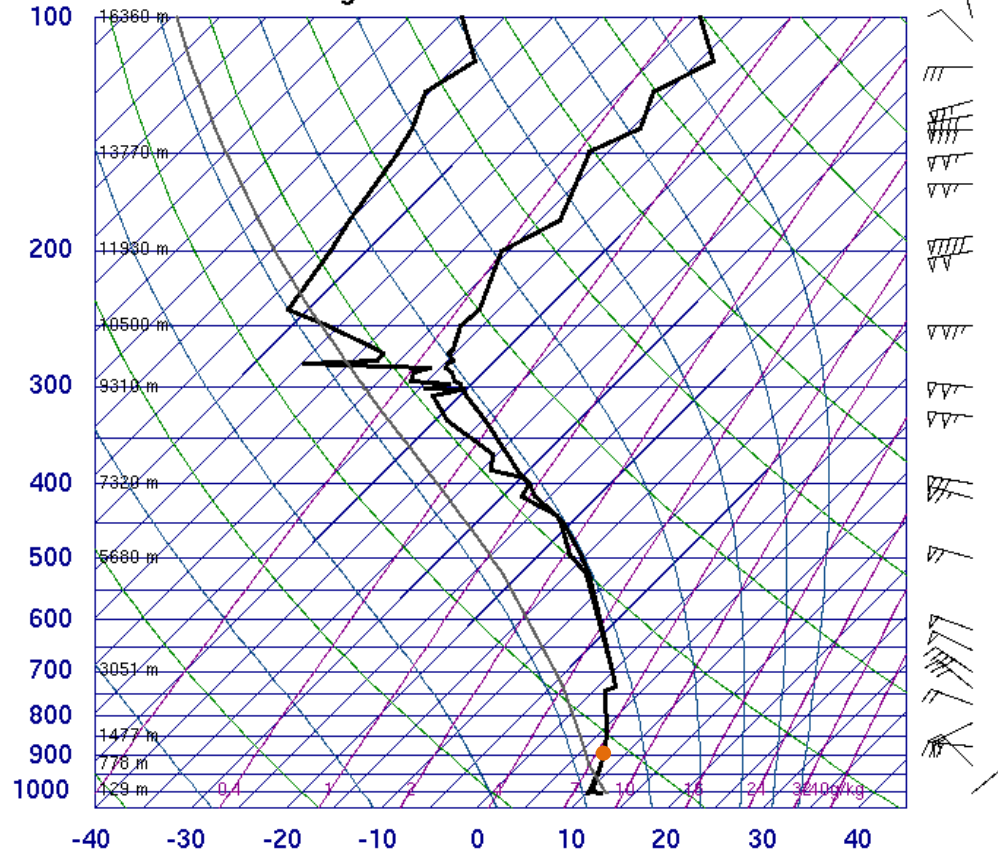
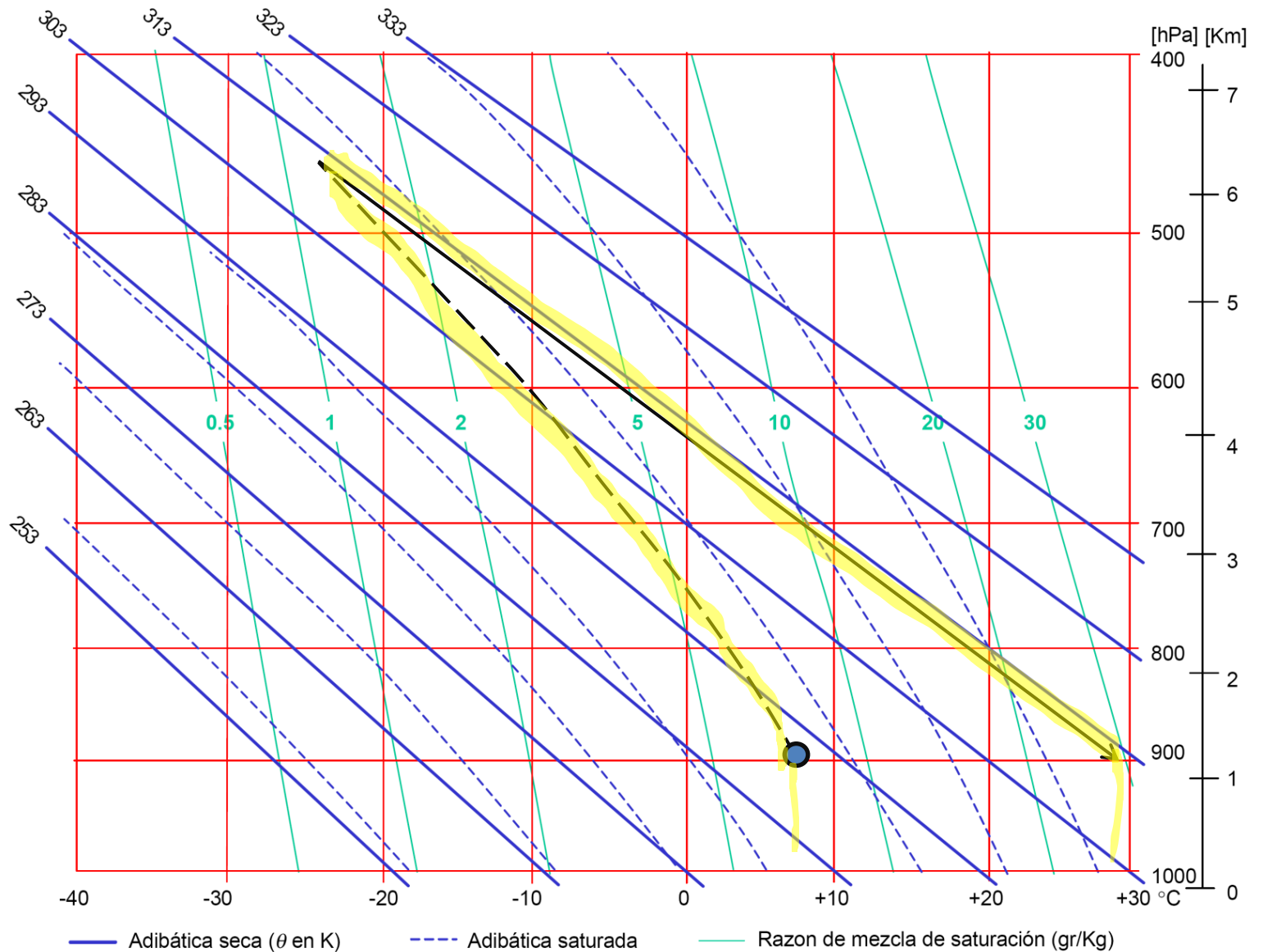
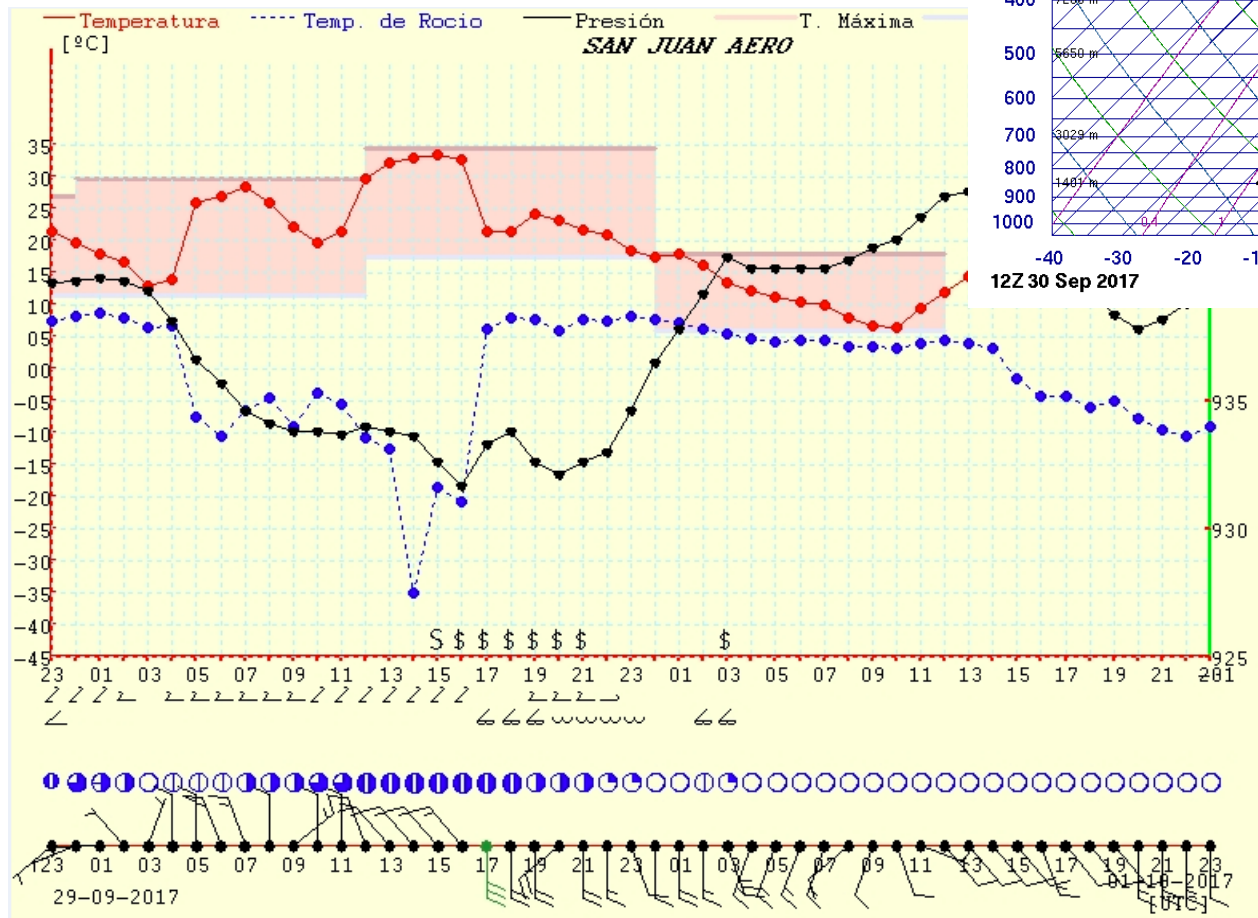
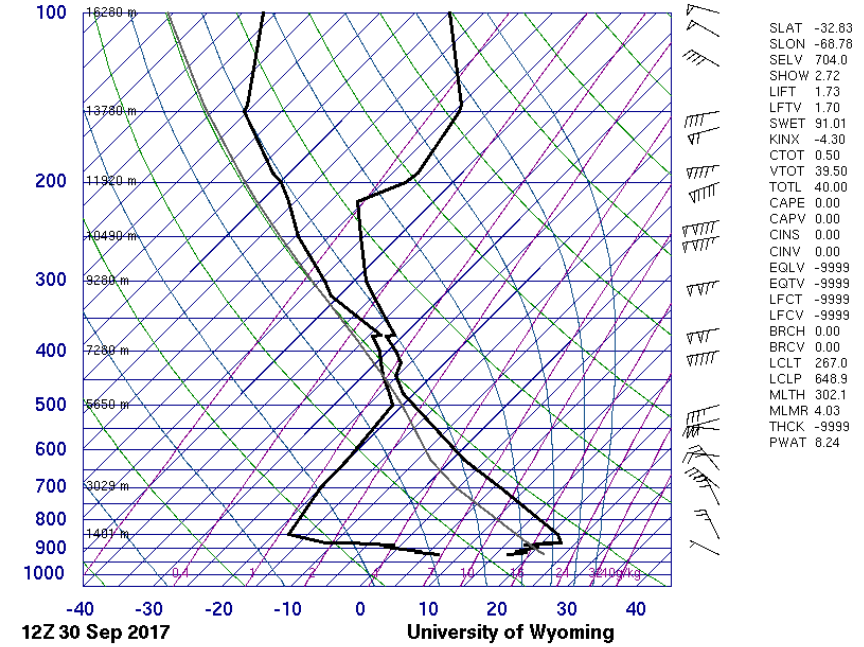


Diagrama Termodinámico (emagrama)





87418 SAME Mendoza Aero



Temperatura Potencial

$$dq = 0 = du + dw = c_p dT - p^{-1} dp$$

$$c_p dT = (RT/p) dp$$

$$c_p d\ln(T) = R d\ln(p)$$

Integrando entre (T, p) y $(\theta, 1000 \text{ hPa})$

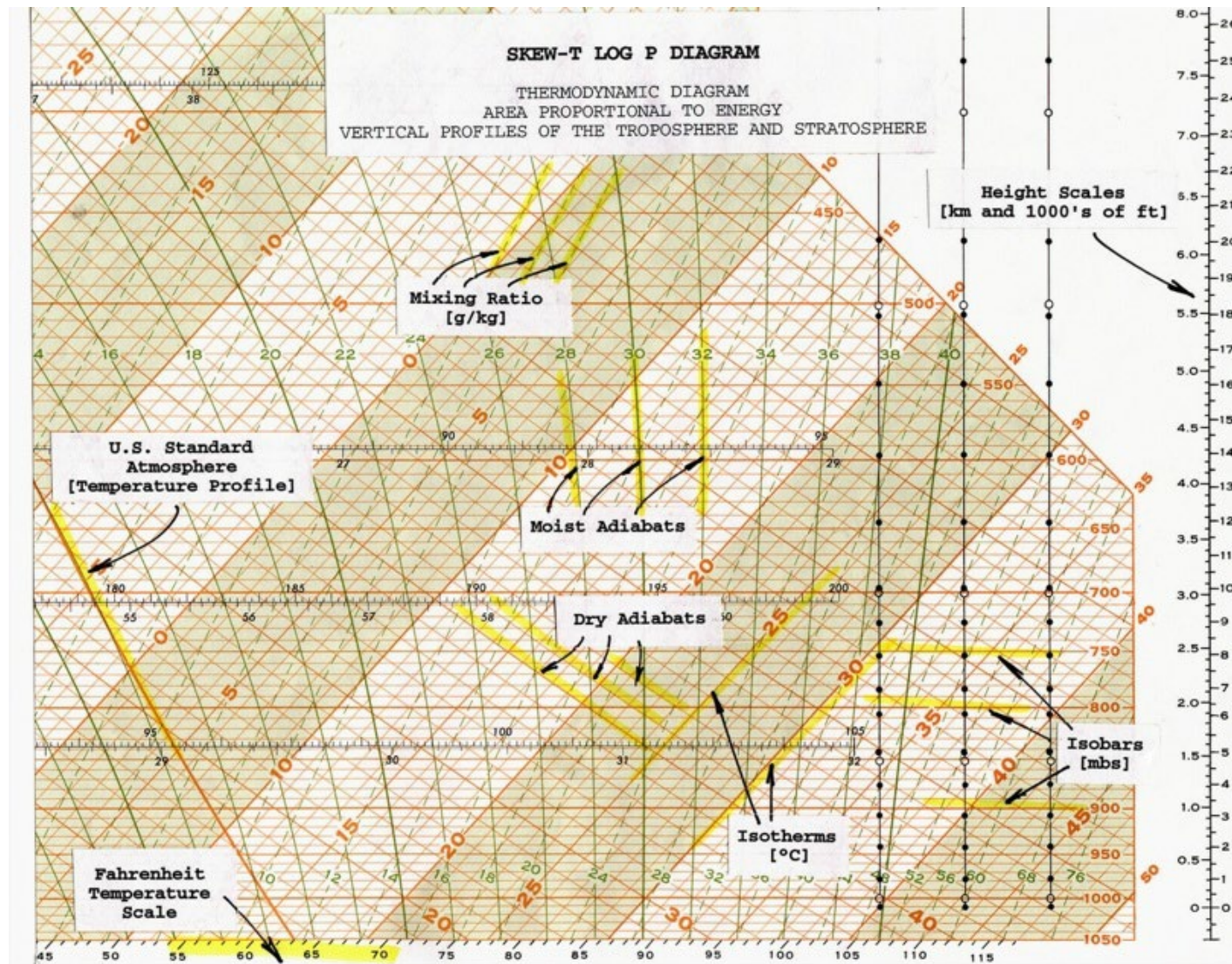
$$T/\theta = (p/1000)^{(Rc_p^{-1})}$$

$$\theta = T(1000/p)^{(Rc_p^{-1})}$$

Es la temperatura (en K) que tendría una parcela de aire desplazada adiabáticamente desde su nivel original a 1000 hPa. Permite comparar masas de aire a distinta altura

Introducción a la Meteorología – Estabilidad Atmosférica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud



Introducción a la Meteorología – Estabilidad Atmosférica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

