

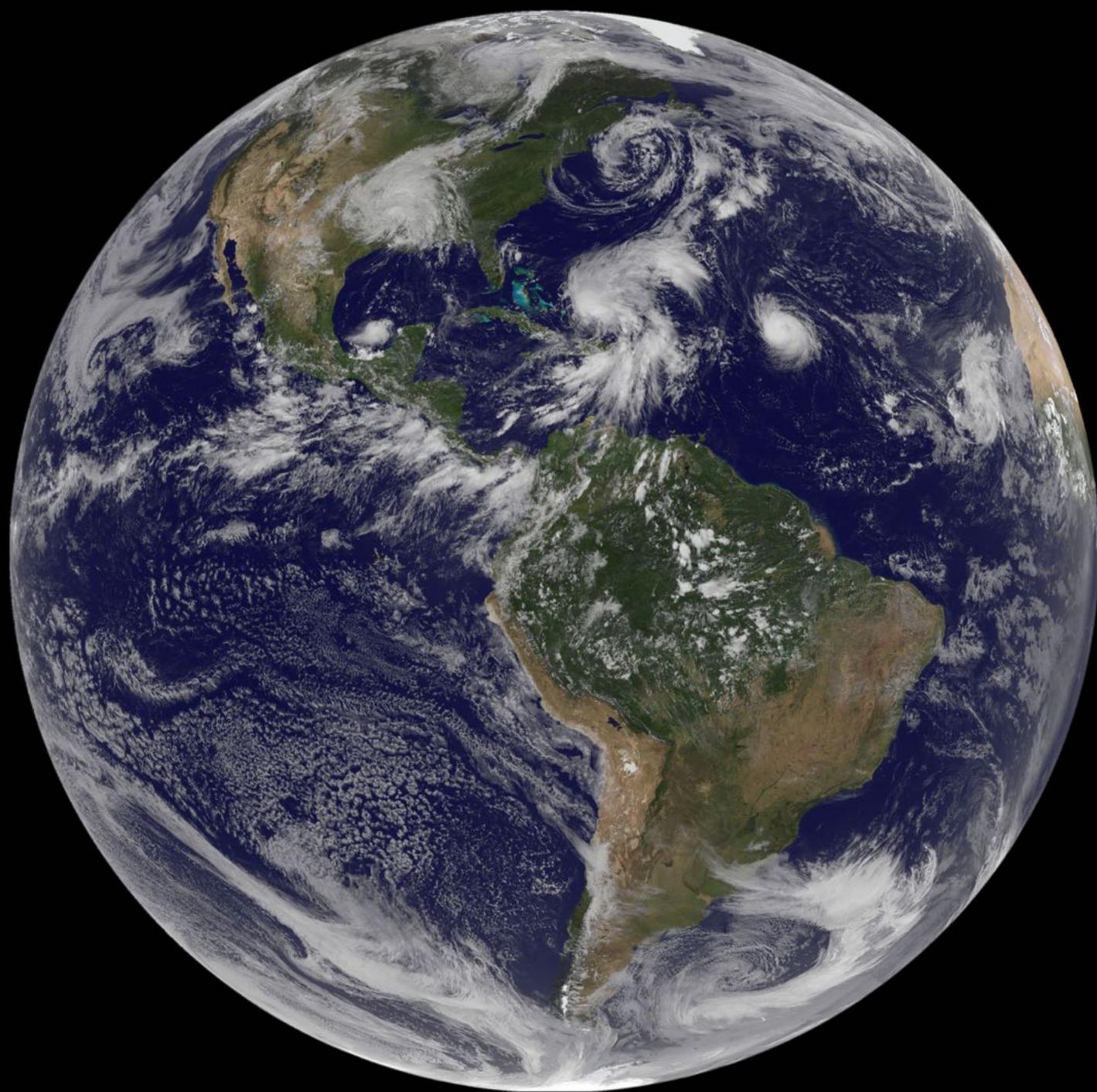
Nuvens: formação e principais características

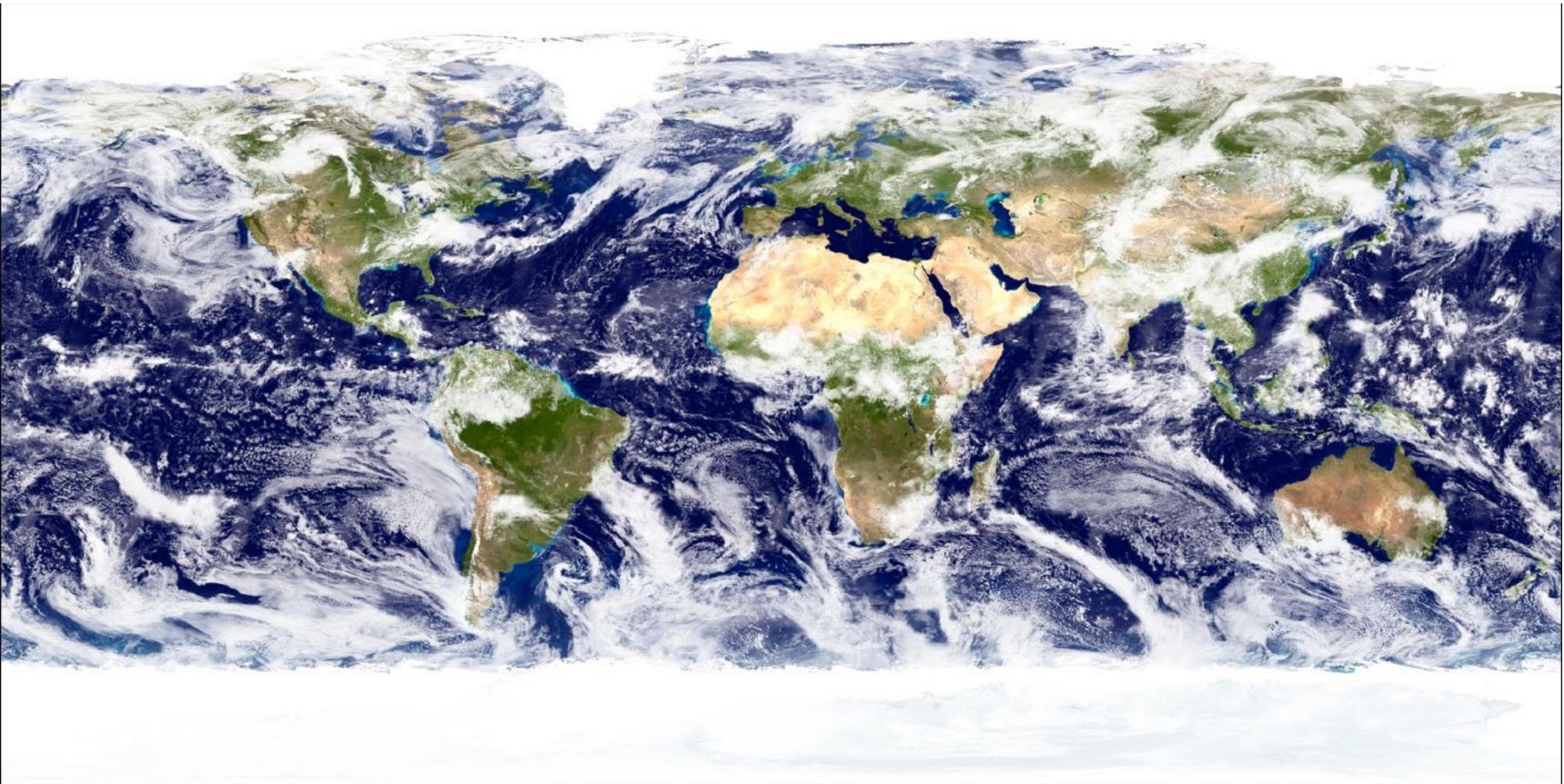
Micael Amore Cecchini

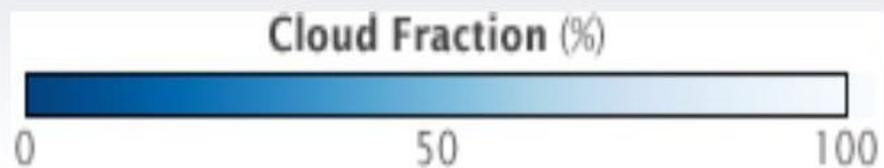
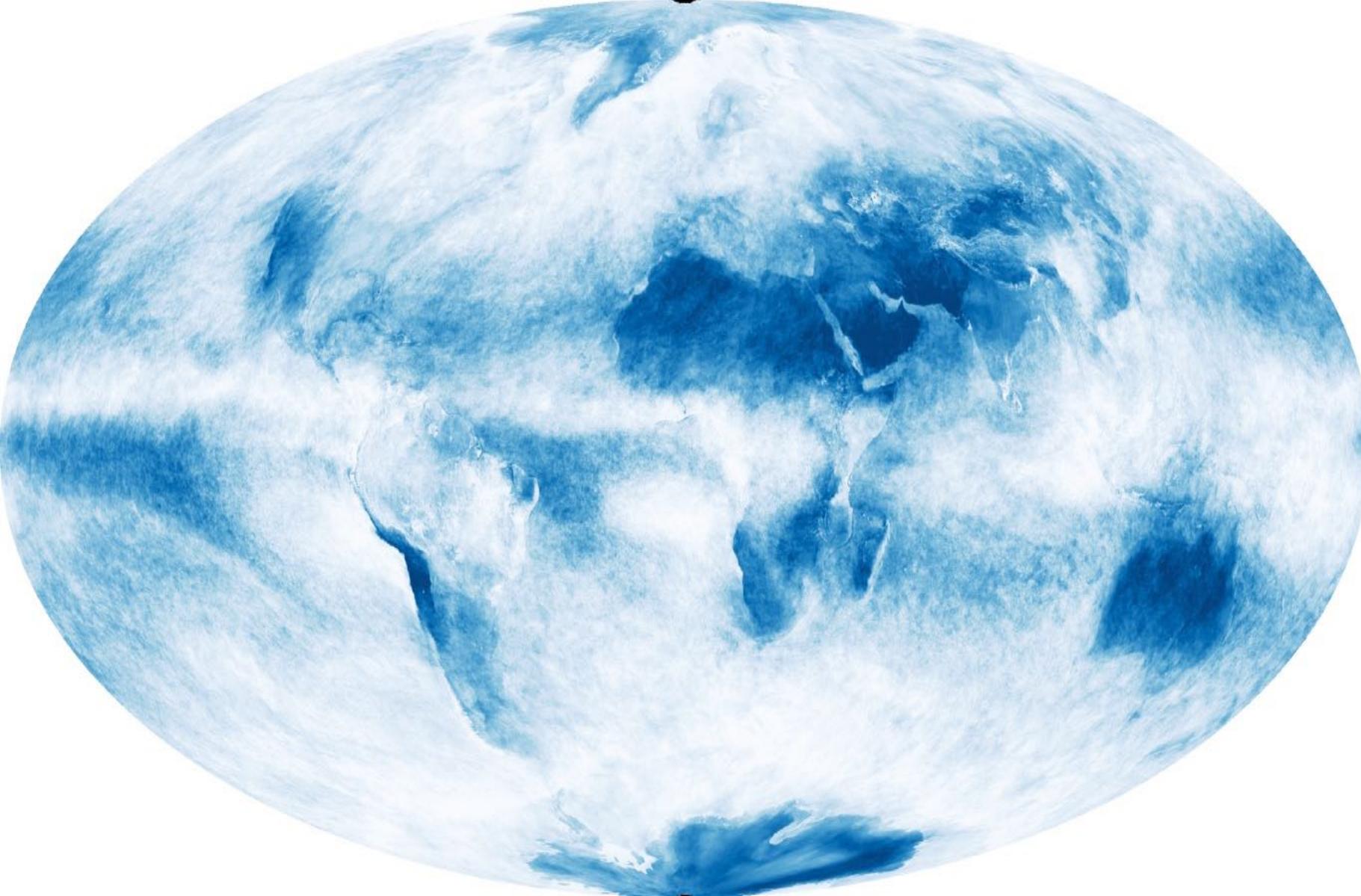
micael.cecchini@usp.br

Aula de hoje

- Formação de nuvens
- Principais características físicas
- Classificação de nuvens



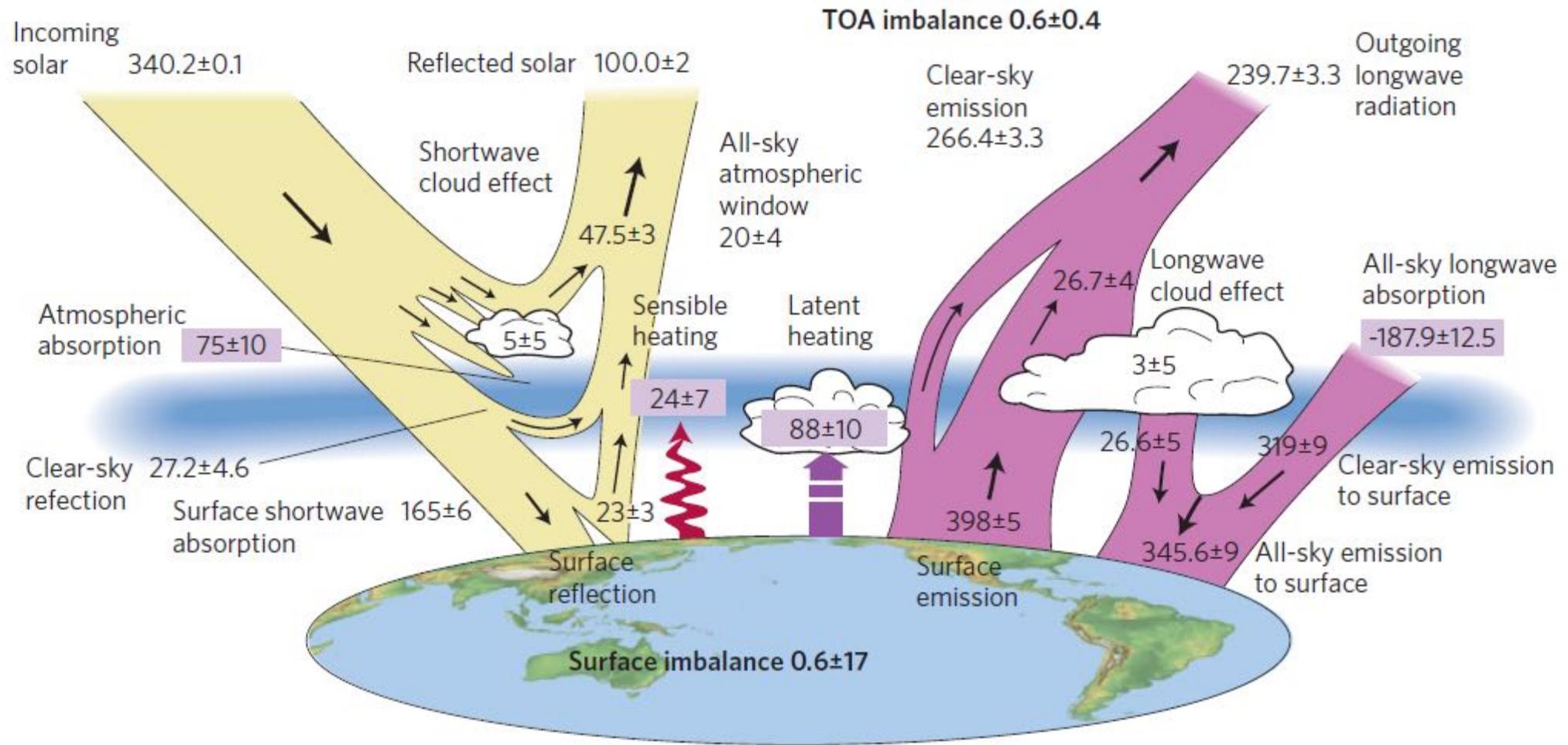


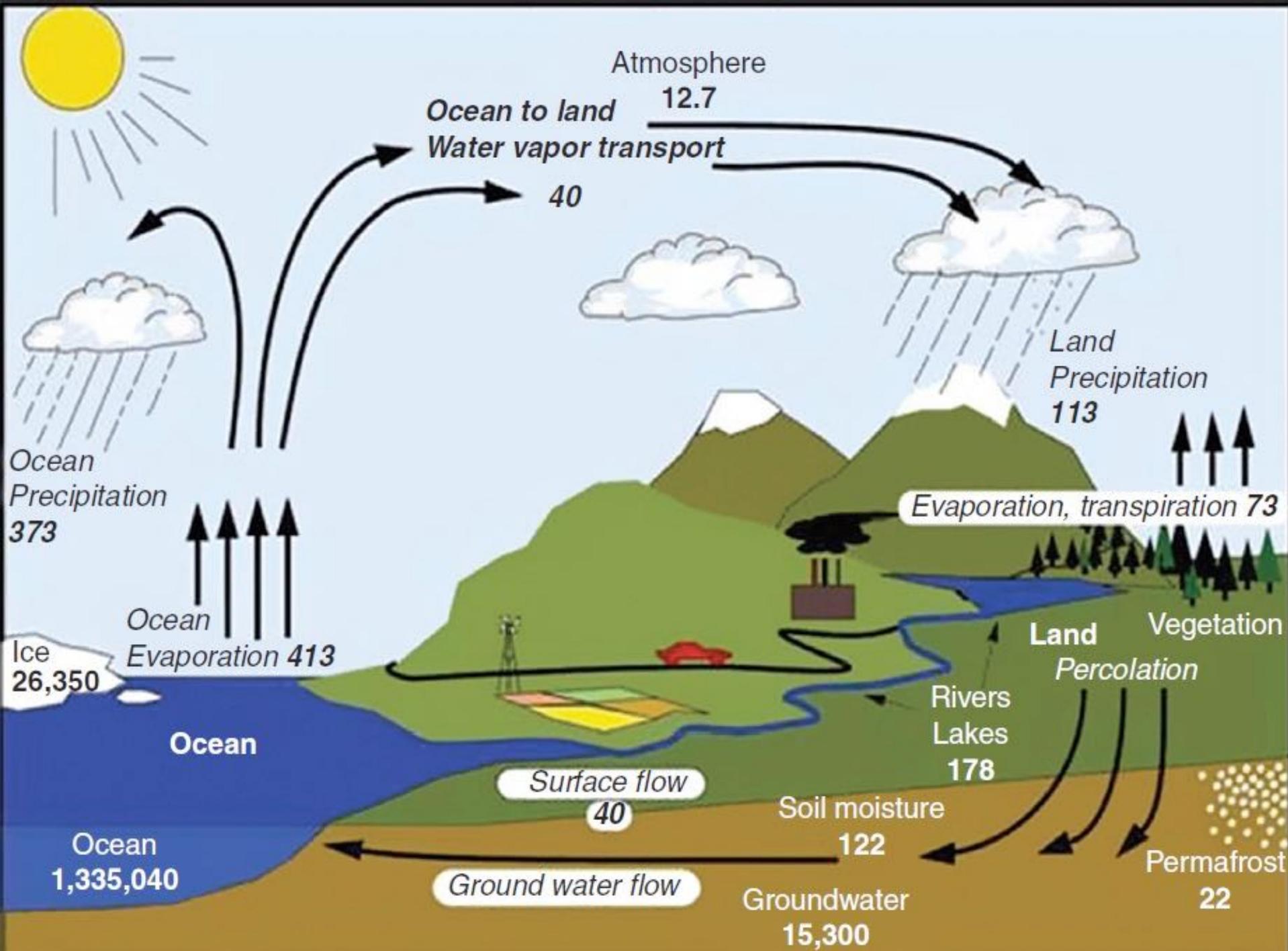


- Porque estudar nuvens?
- Elas cobrem uma parte significativa do globo
- Afetam a forma como a Terra interage com a radiação solar/terrestre

- $\sim 1/2$ do albedo planetário
- $\sim 1\%$ de erro na cobertura de nuvens \rightarrow mesma ordem de grandeza do efeito estufa antropogênico
- Nuvens controlam o clima!

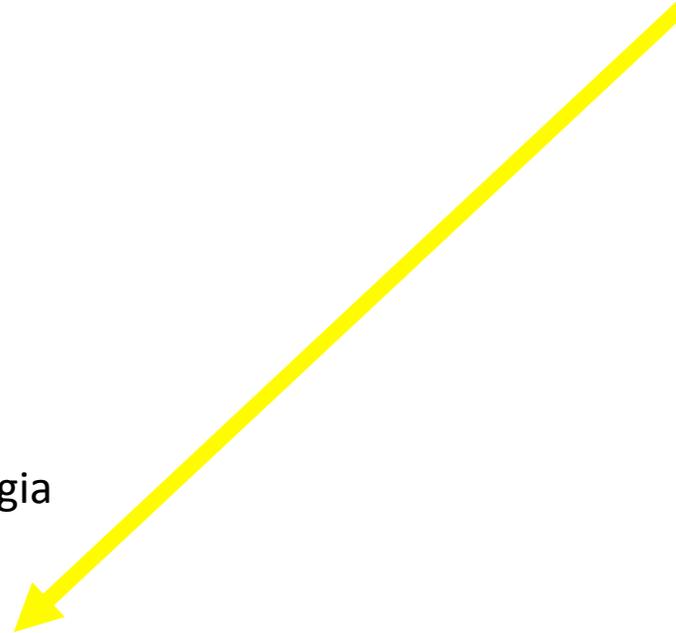
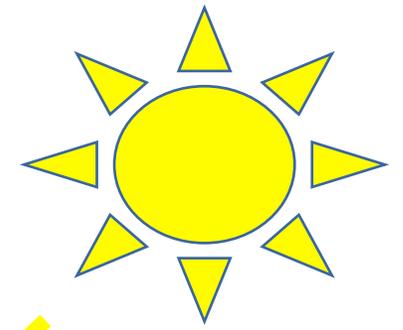
Balço de energia/radiação (W m^{-2} ou $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$)



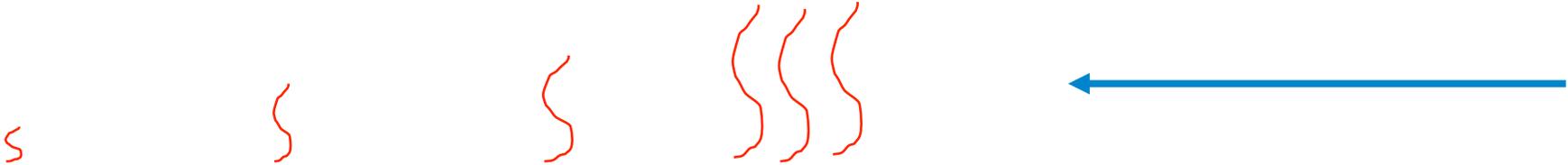


- O principal “culpado” pelas nuvens é o Sol
- Sistemas naturais geralmente buscam estado de energia baixo
 - Logo, o acúmulo de energia (calor) é um problema!

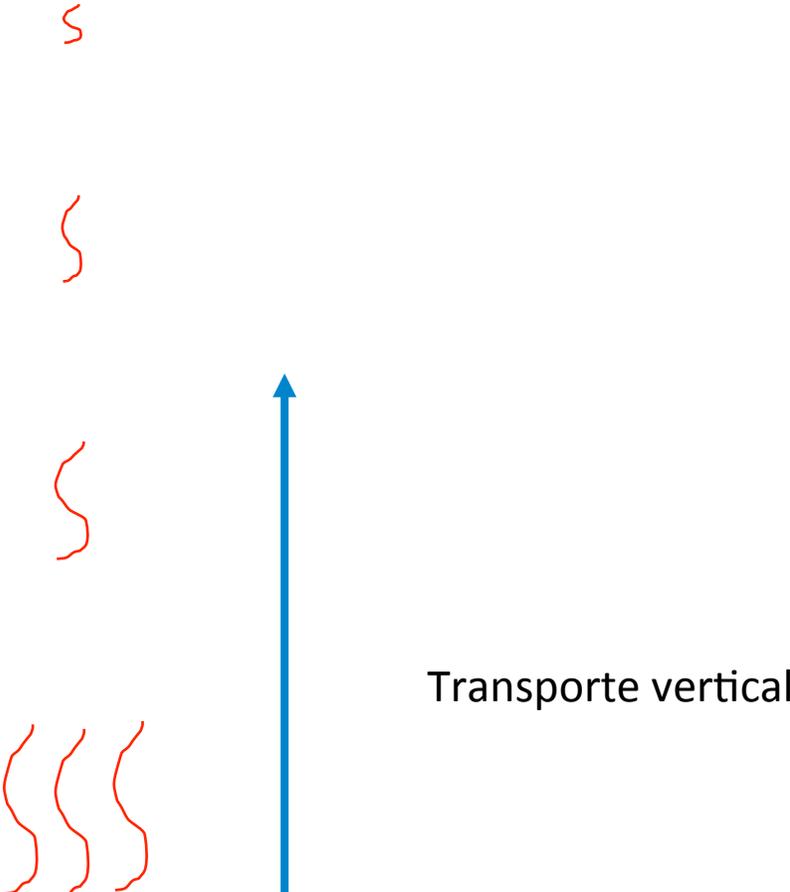
Acúmulo de energia



- Como resolver?



- Como resolver?



- Como resolver?

Aquecimento superfície



- Como resolver?

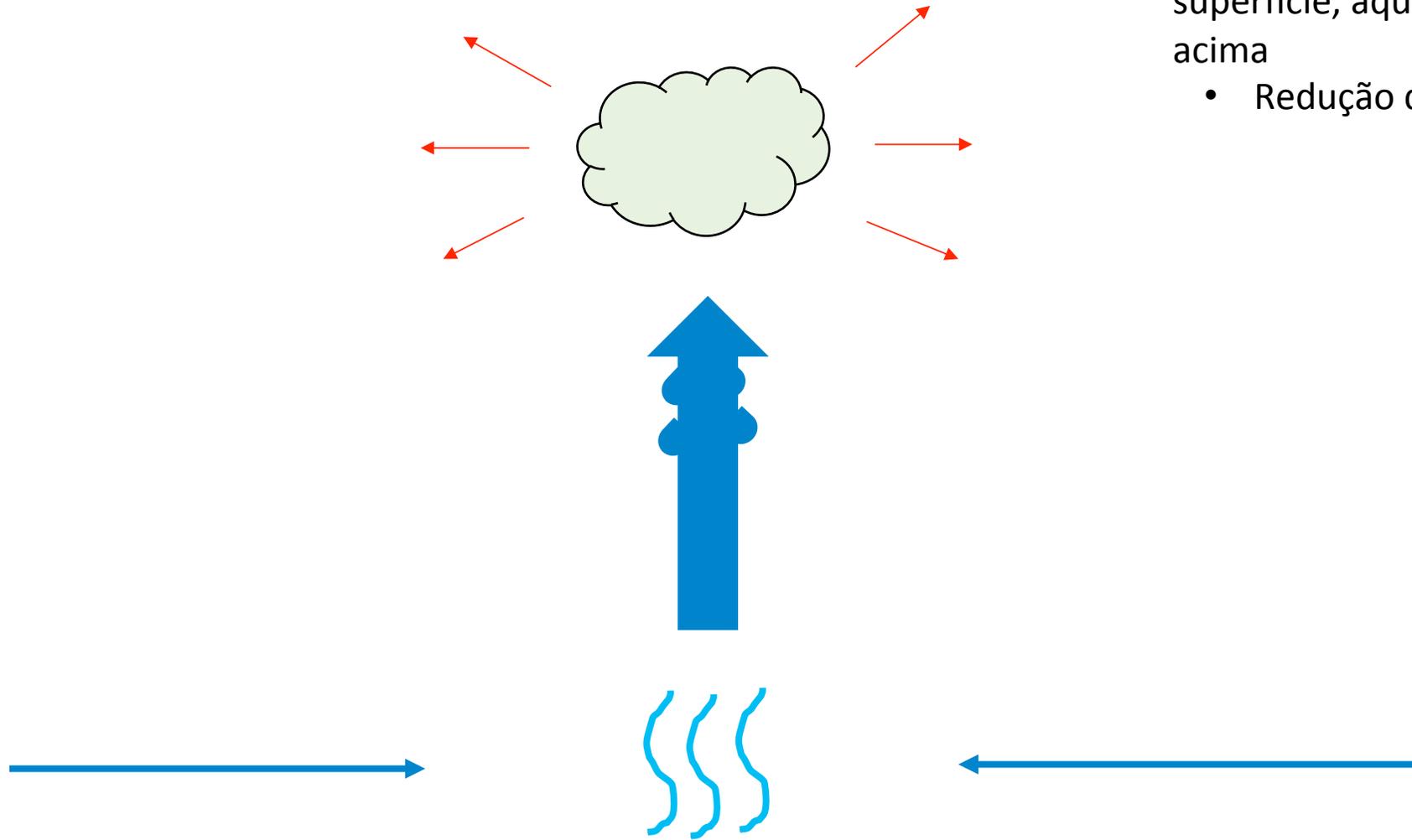


Transformações
Ex. evaporação



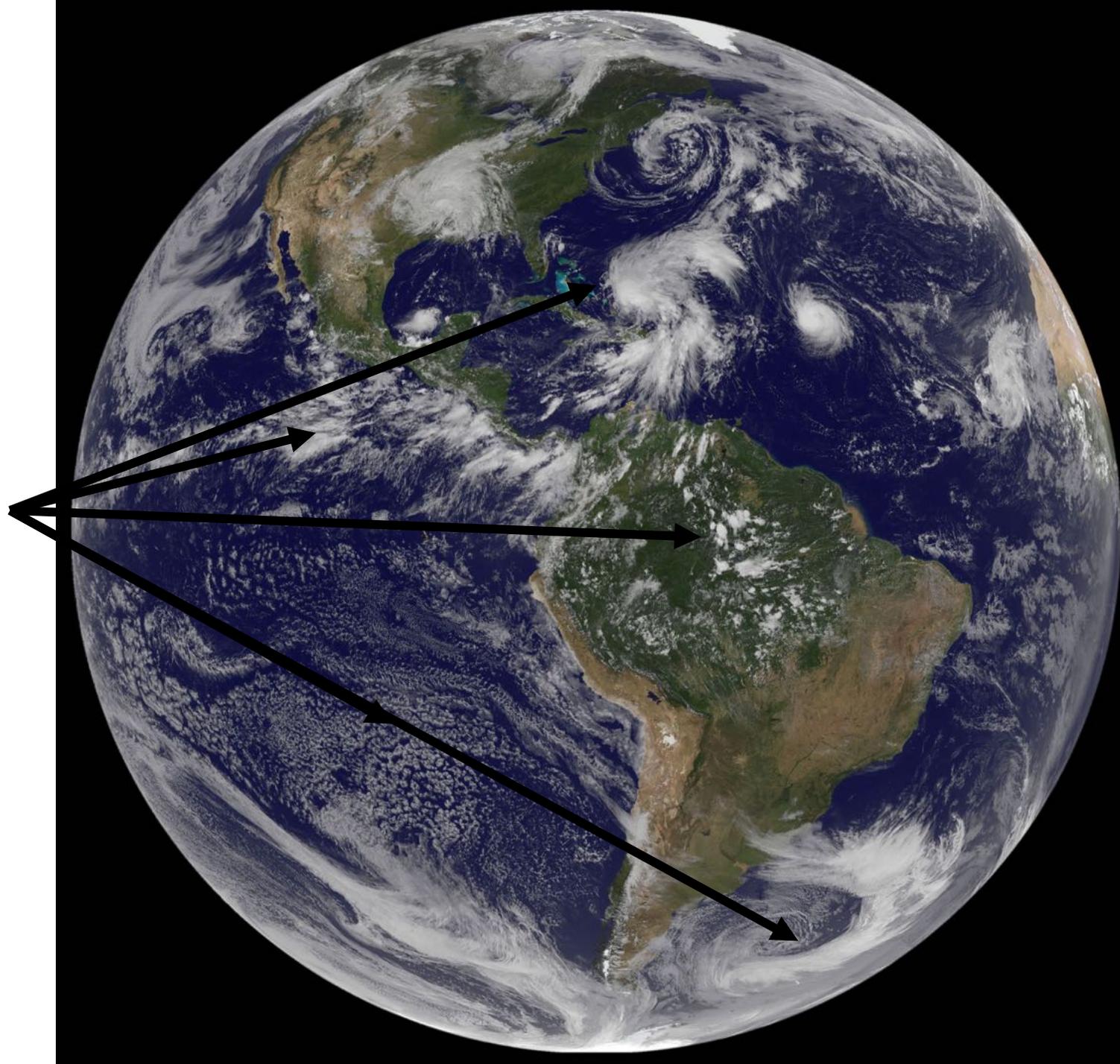
- Qual o papel das nuvens?
 - Contribuir para a diminuição dos níveis de energia
 - Podem ser entendidas como resposta às instabilidades

- Como?

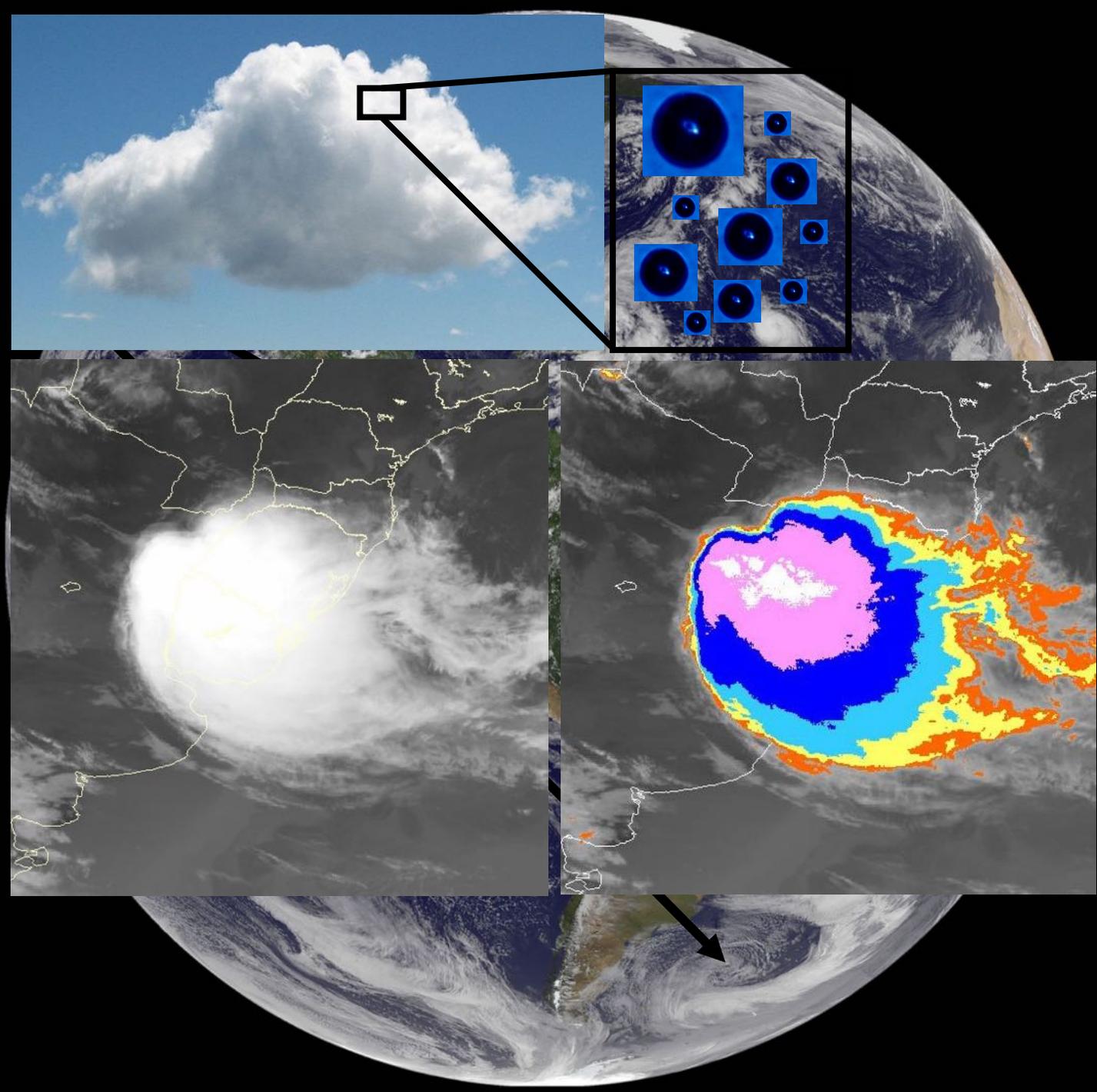


- Efeito líquido: resfriamento superfície, aquecimento do ar acima
 - Redução da instabilidade

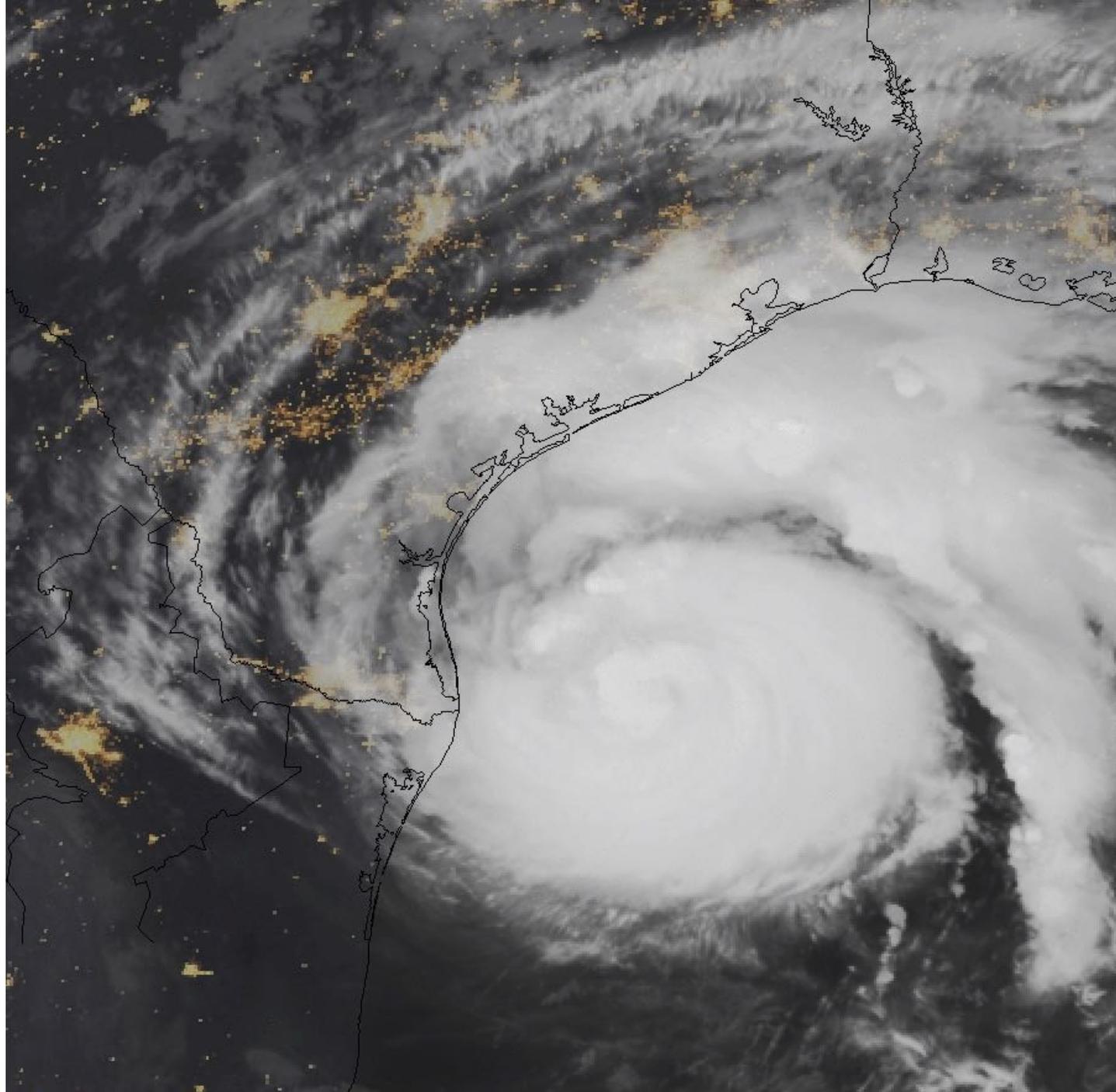
Diferentes sistemas meteorológicos compensam a instabilidade em diferentes escalas



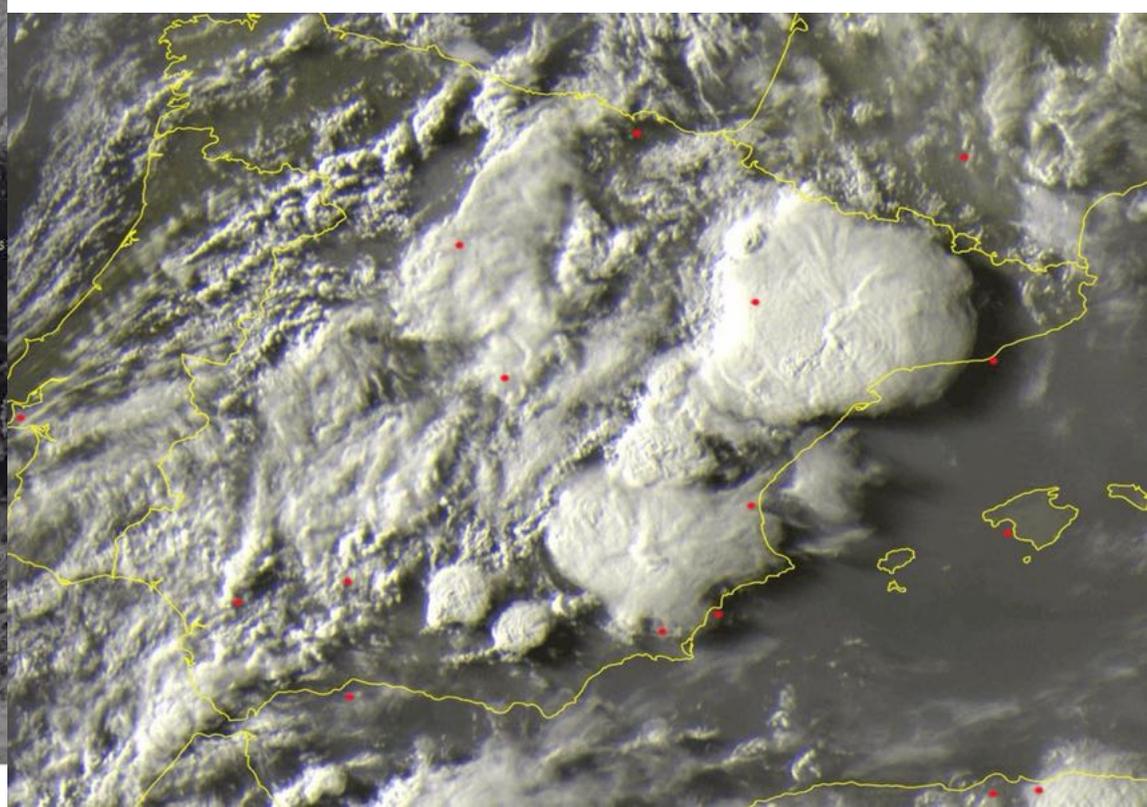
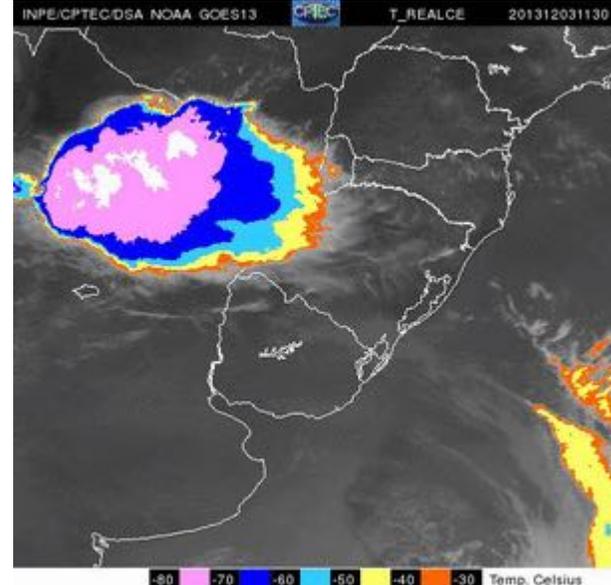
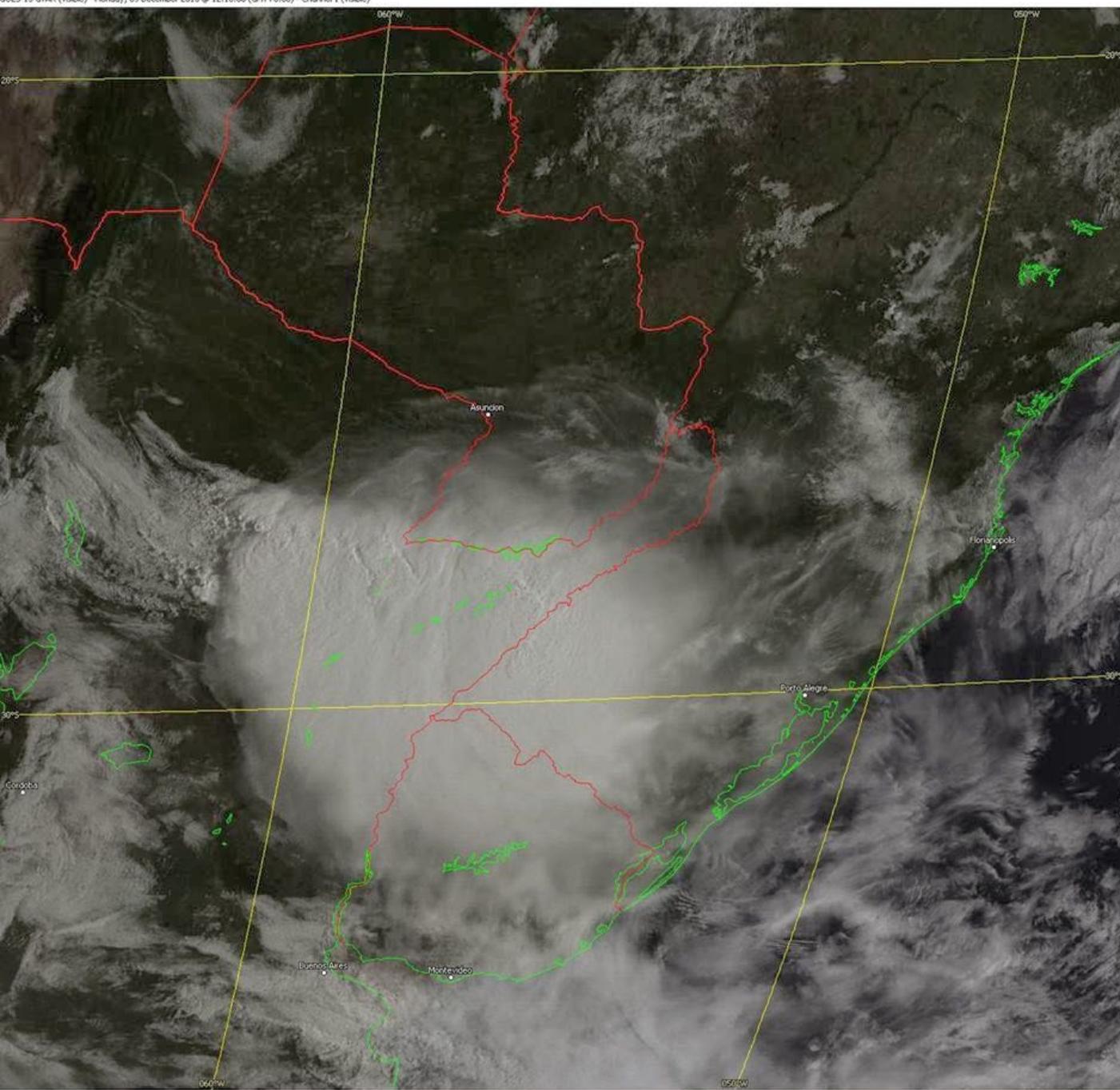
- Características observacionais das nuvens
- Macroescala ou escala sinótica: trata dos maiores sistemas meteorológicos observados – centenas/milhares de km (ex. furacões e sistemas frontais)
- Microescala: 1 km ou menos – inclui pequenas nuvens individuais, padrões em partes das nuvens (ex. rugosidade) e os processos microfísicos (ex. formação e crescimento de gotas)
- No “meio” das duas escalas (1 km a centenas de km): Mesoescala – inclui uma variedade de tipos de nuvens, tanto isoladas quanto organizadas em sistemas
 - Previsão de tempo do dia-a-dia se baseia em padrões na mesoescala







18 0018 DERIVED DATA 25 AUG 17237 094717 02464 03137 02.00









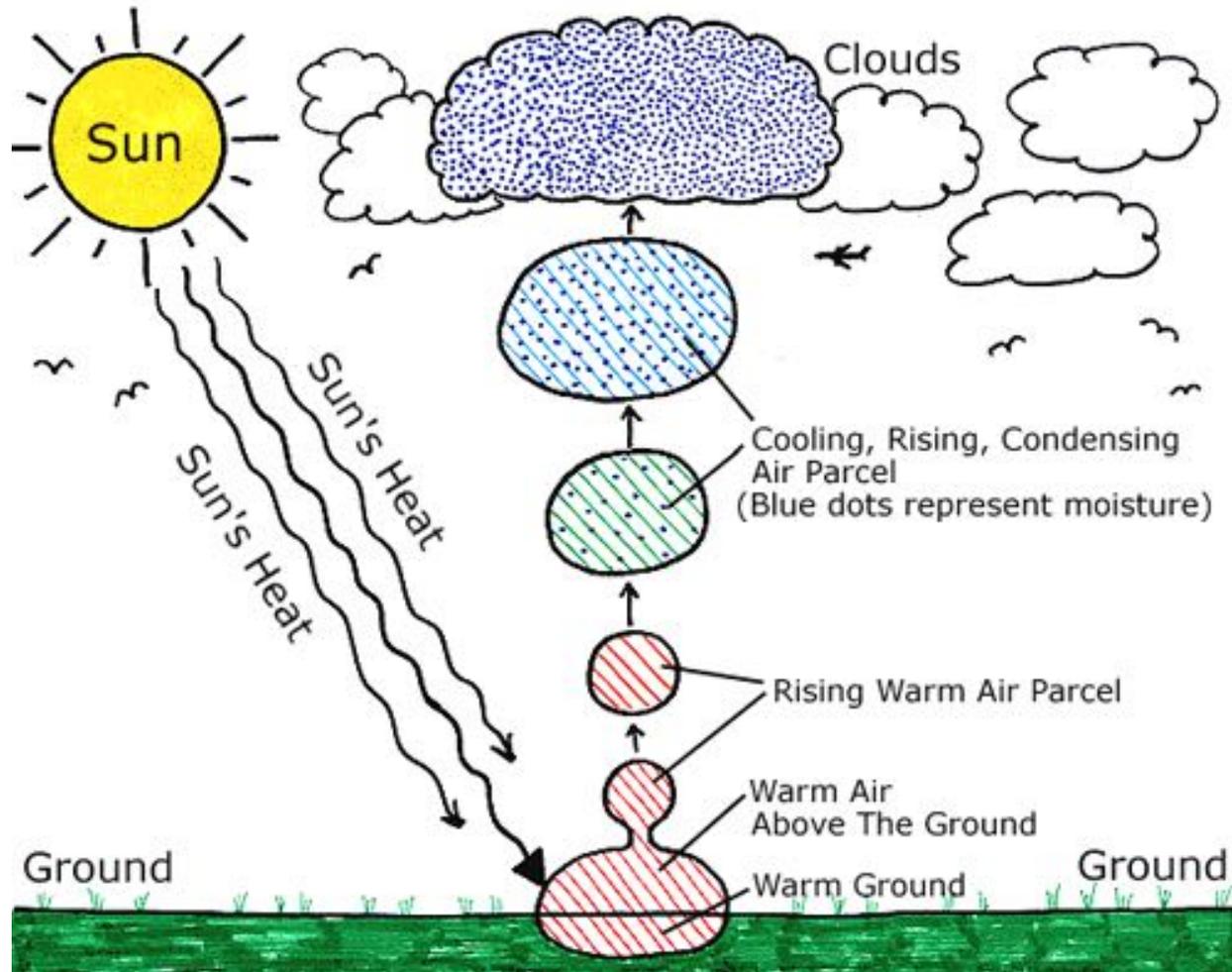
Microescala também trata do que há no interior das nuvens

Como as nuvens se formam?

1. Aquecimento diferencial da superfície
2. Levantamento por orografia
3. Convergência ou levantamento por frentes frias/quentes
4. Resfriamento radiativo

Como as nuvens se formam?

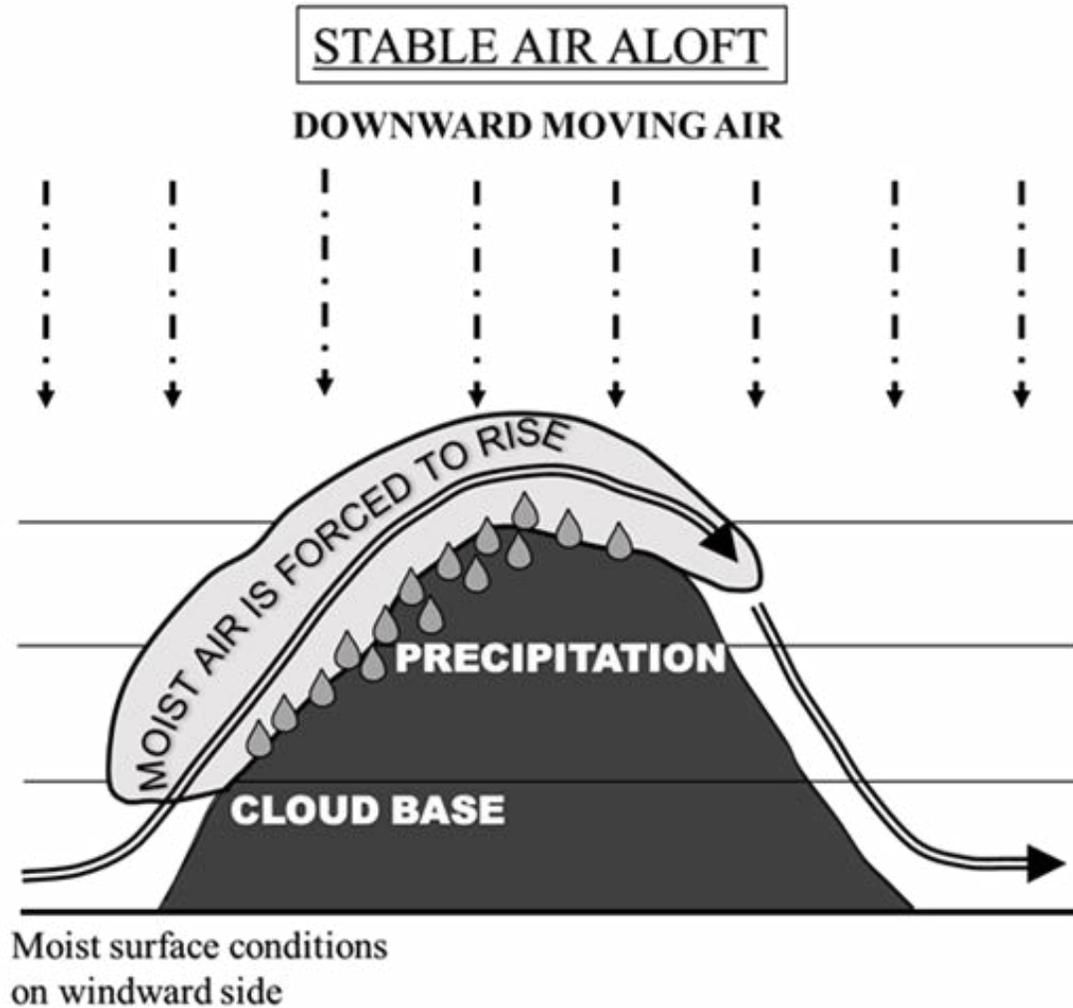
1. Aquecimento diferencial da superfície



- Sol aquece a superfície
- Parcelas de ar
 - Ascensão adiabática
- Resfriamento -> saturação -> nuvens

Como as nuvens se formam?

2. Levantamento por orografia



- Montanhas forçam o ar a subir
- Formação de nuvens mesmo sem condições termodinâmicas favoráveis

Como as nuvens se formam?

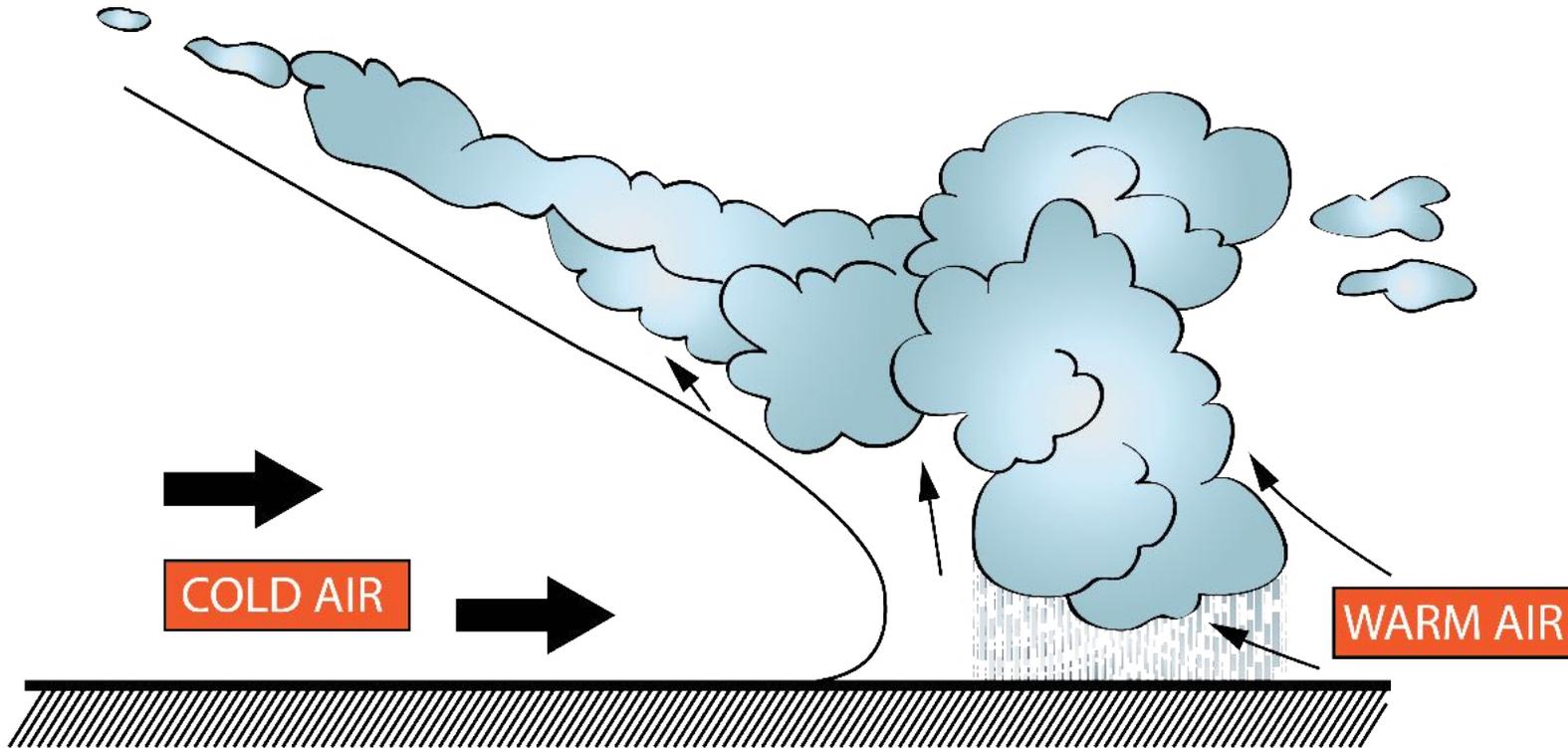
2. Levantamento por orografia



- Montanhas forçam o ar a subir
- Formação de nuvens mesmo sem condições termodinâmicas favoráveis

Como as nuvens se formam?

3. Convergência ou levantamento por frentes frias/quentes



- Convergência de massas de ar com diferentes características
- Air frio -> maior densidade
 - Levantamento do ar quente
- Convergência horizontal centralizada
 - Levantamento do ar por continuidade de massa

Como as nuvens se formam?

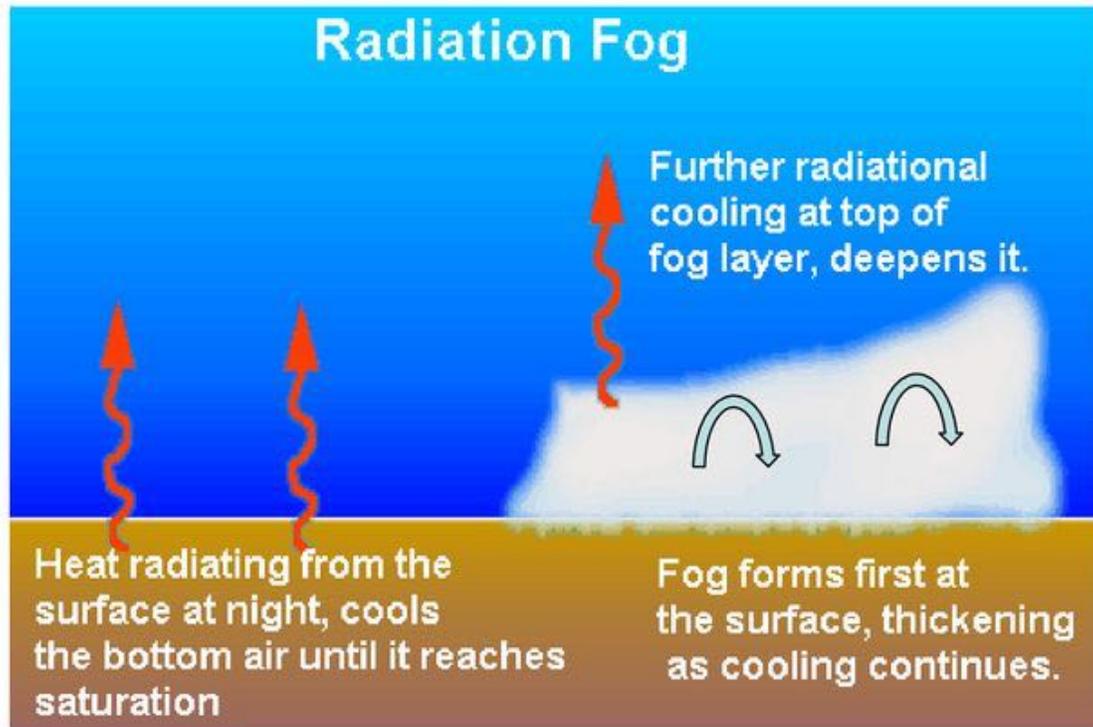
3. Convergência ou levantamento por frentes frias/quentes



- Convergência de massas de ar com diferentes características
- Air frio -> maior densidade
 - Levantamento do ar quente
- Convergência horizontal centralizada
 - Levantamento do ar por continuidade de massa

Como as nuvens se formam?

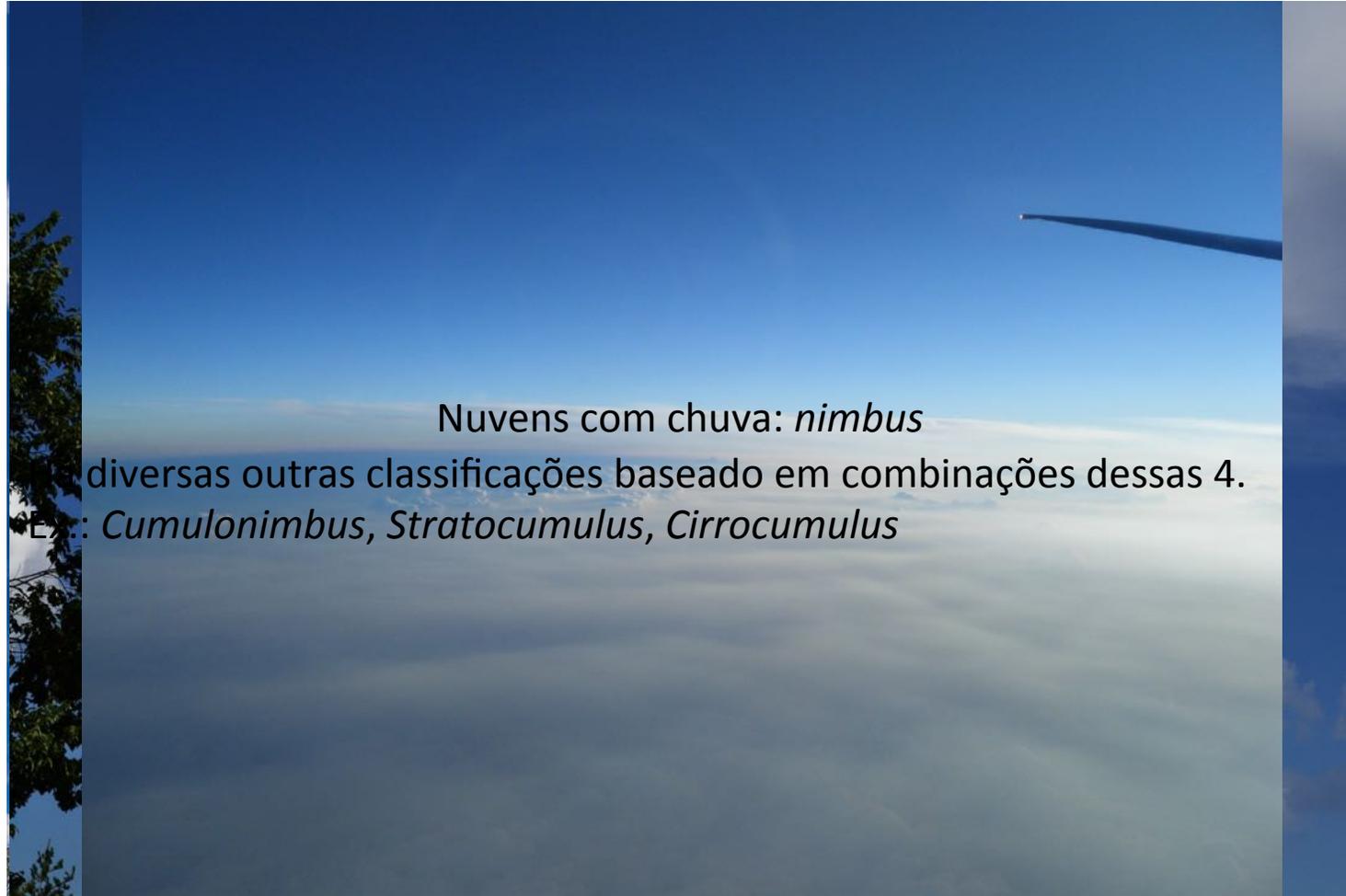
4. Resfriamento radiativo



- Resfriamento durante a noite
 - Reduz T mesmo sem necessitar de ascensão
- Forma neblina
 - Noite sem nuvens -> manhã nublada

- Classificação de Nuvens: formas

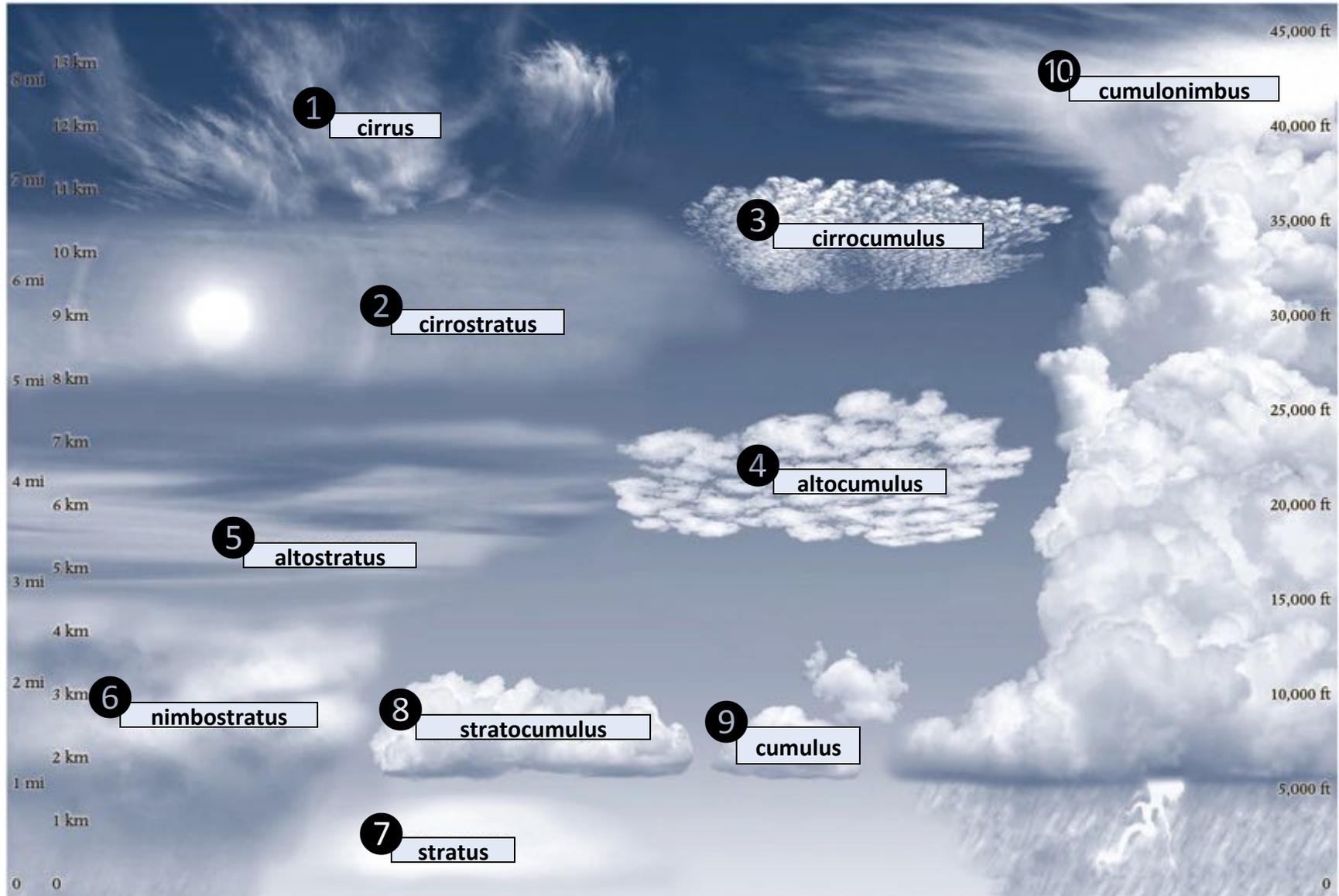
Cirrus



Nuvens com chuva: *nimbus*

diversas outras classificações baseado em combinações dessas 4.
Ex.: *Cumulonimbus, Stratocumulus, Cirrocumulus*

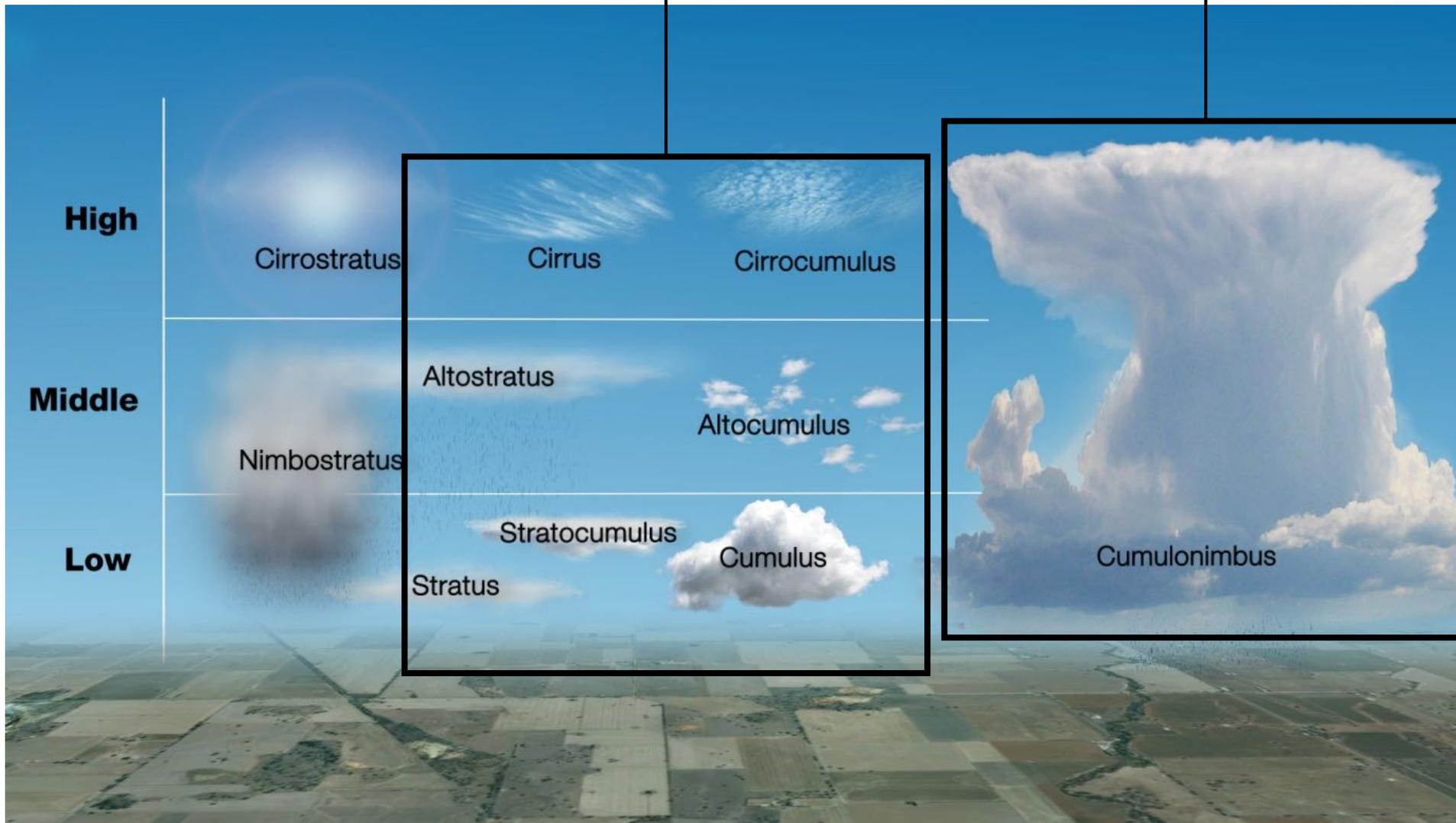
TIPOS DE NUVENS



- Além da forma, podemos classificar por...?

Em termos de altitude

Desenvolvimento vertical



Sistemas de meso e grande escala incluem uma variedade de tipos de nuvens

- *Cumulonimbus* são de grande interesse, visto que produzem tempestades e raios
 - “Chuva de verão”

Cumulus humilis



Cumulus mediocris



Cumulus congestus

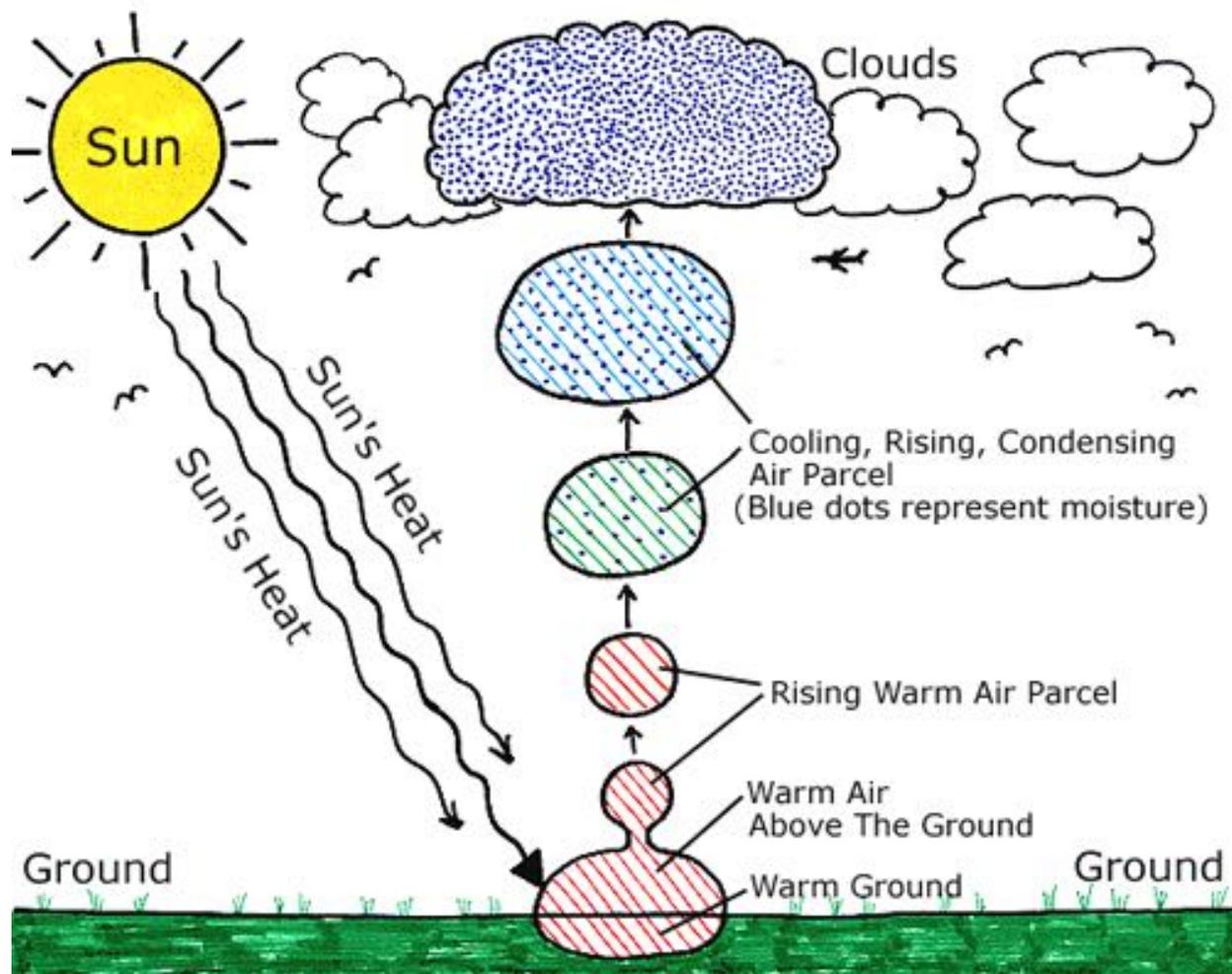


- *Cumulonimbus* são de grande interesse, visto que produzem tempestades e raios
 - Se persistirem por ~1 hora ou mais, podem cobrir áreas da ordem de 100 km

Cumulonimbus

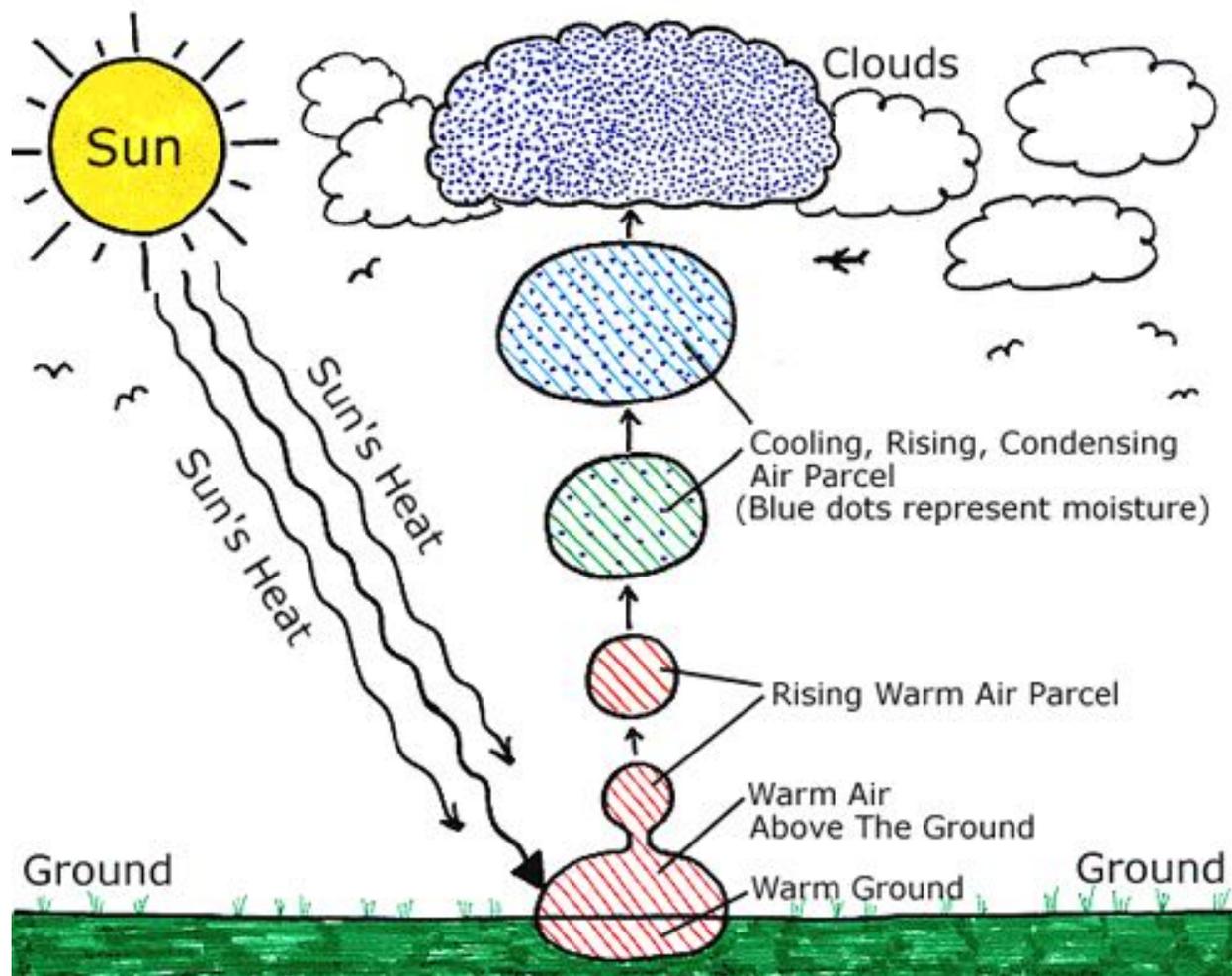


Teoria da Parcela



- Teoria aplicável principalmente a convecção local (muito comum em regiões tropicais)
- Descrição matemática da ascensão de parcelas de ar
- A parcela é considerada isolada
 - Sem troca de calor com o ambiente
 - Aproximação razoável desde que a ascensão seja mais rápida do que possíveis trocas de calor

Teoria da Parcela



- A termodinâmica do ar é separada em dois: ar seco + vapor de água

- Ambos são considerados gases ideais:

$$p\alpha = R' T \quad (1)$$

- P = pressão, α = volume específico ($1/\rho$), T = temperatura, R' = constante individual dos gases

- Ar seco: $R' = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

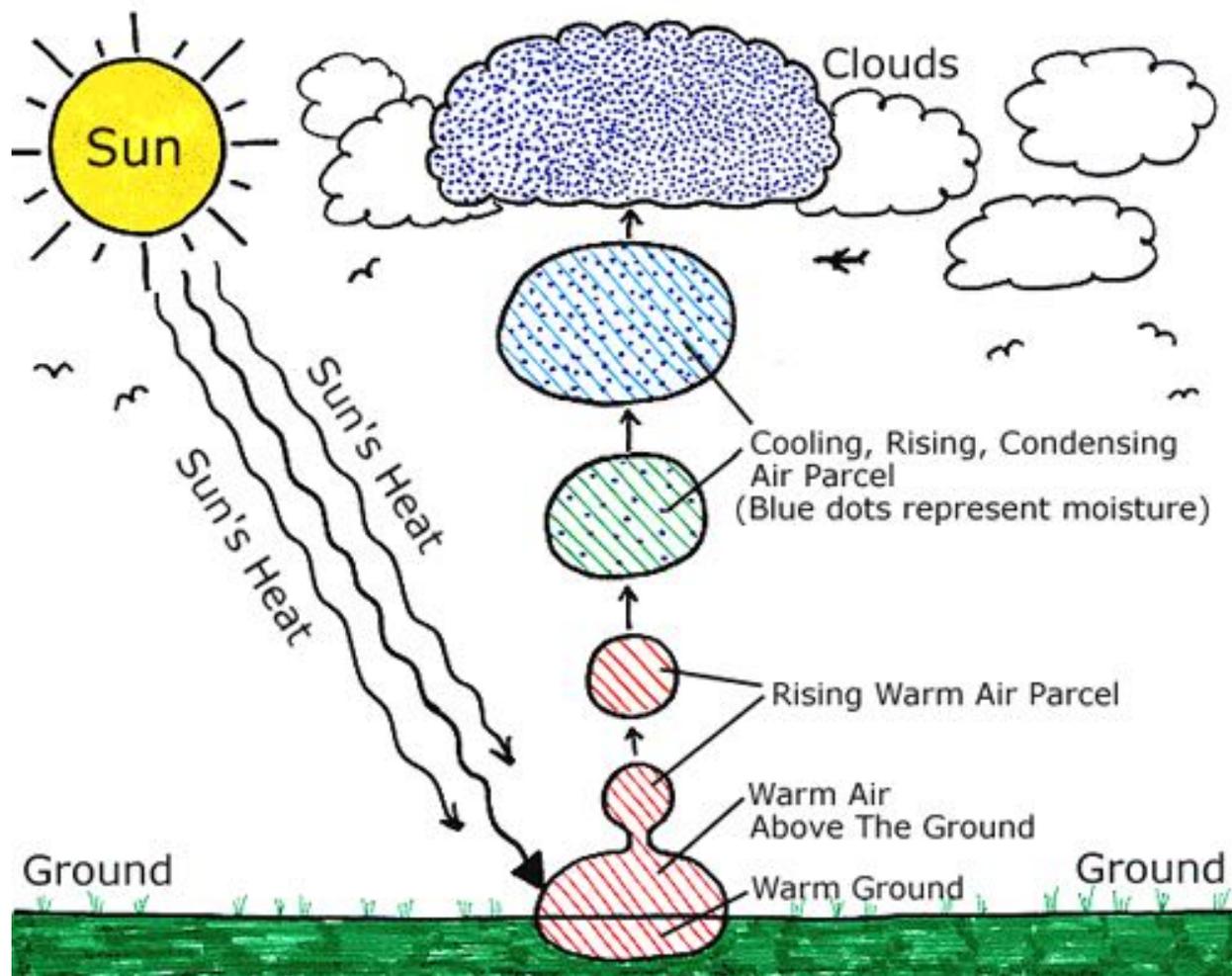
- Vapor: $R' = 461 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

- Pela conservação de energia (1ª Lei da Termodinâmica), temos que:

$$dq = du + dw \quad (2)$$

- q = calor, u = energia interna, w = trabalho, tudo por unidade de massa de ar seco

Teoria da Parcela



- O trabalho específico dw representa a energia de expansão/compressão da parcela:

$$dw = p d\alpha$$

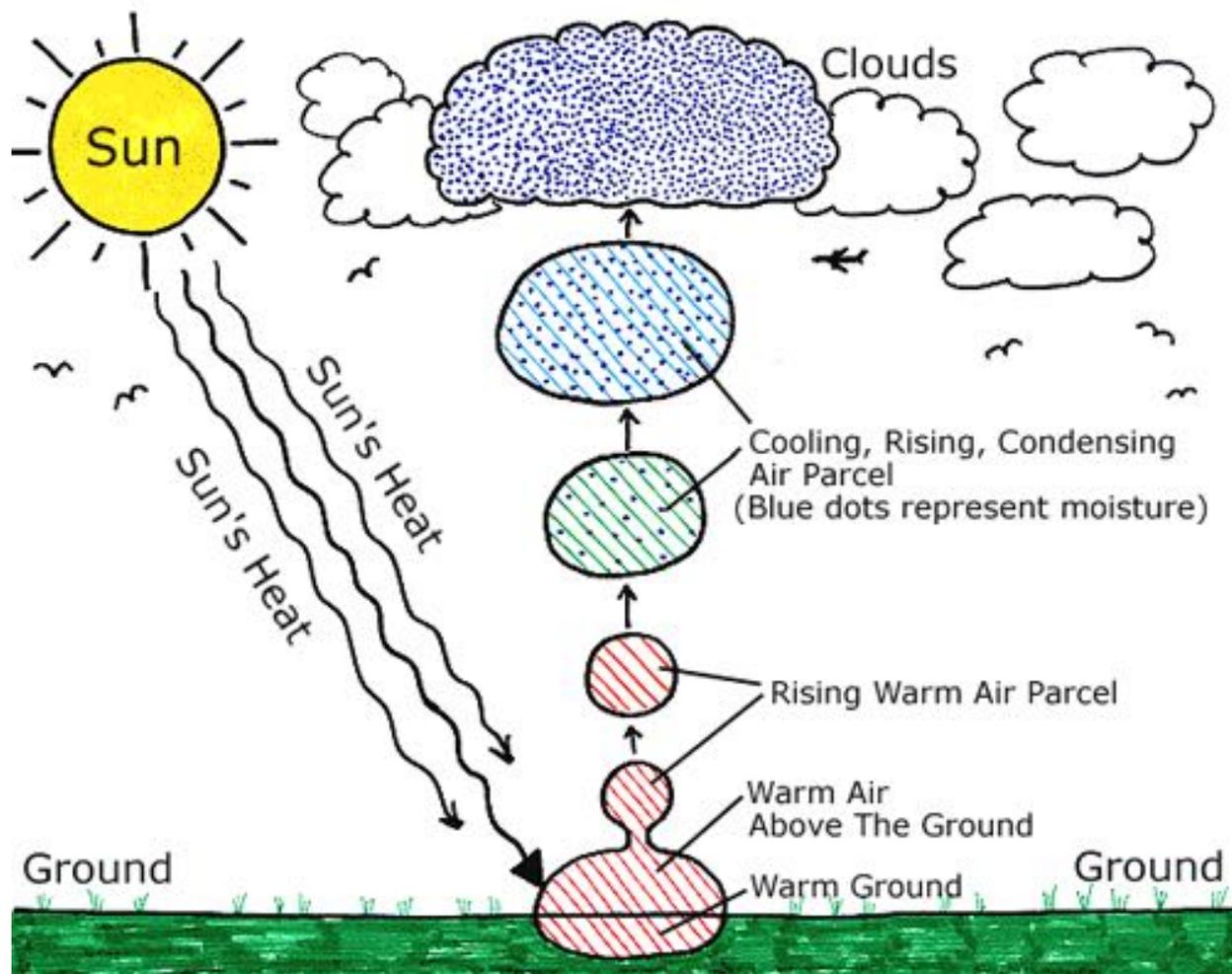
- A energia interna específica representa o aquecimento/resfriamento da parcela:

$$du = c_v dT$$

- c_v = calor específico a volume constante ($718 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- Portanto, a conservação de energia fica:

$$dq = c_v dT + p d\alpha \quad (3)$$

Teoria da Parcela



- De modo geral, é mais adequado trabalhar com variações de pressão (dp) do que com variações de volume ($d\alpha$) na atmosfera
- Diferenciando (1), temos que

$$p d\alpha + \alpha dp = R' dT$$

- Logo

$$p d\alpha = R' dT - \alpha dp \quad (4)$$

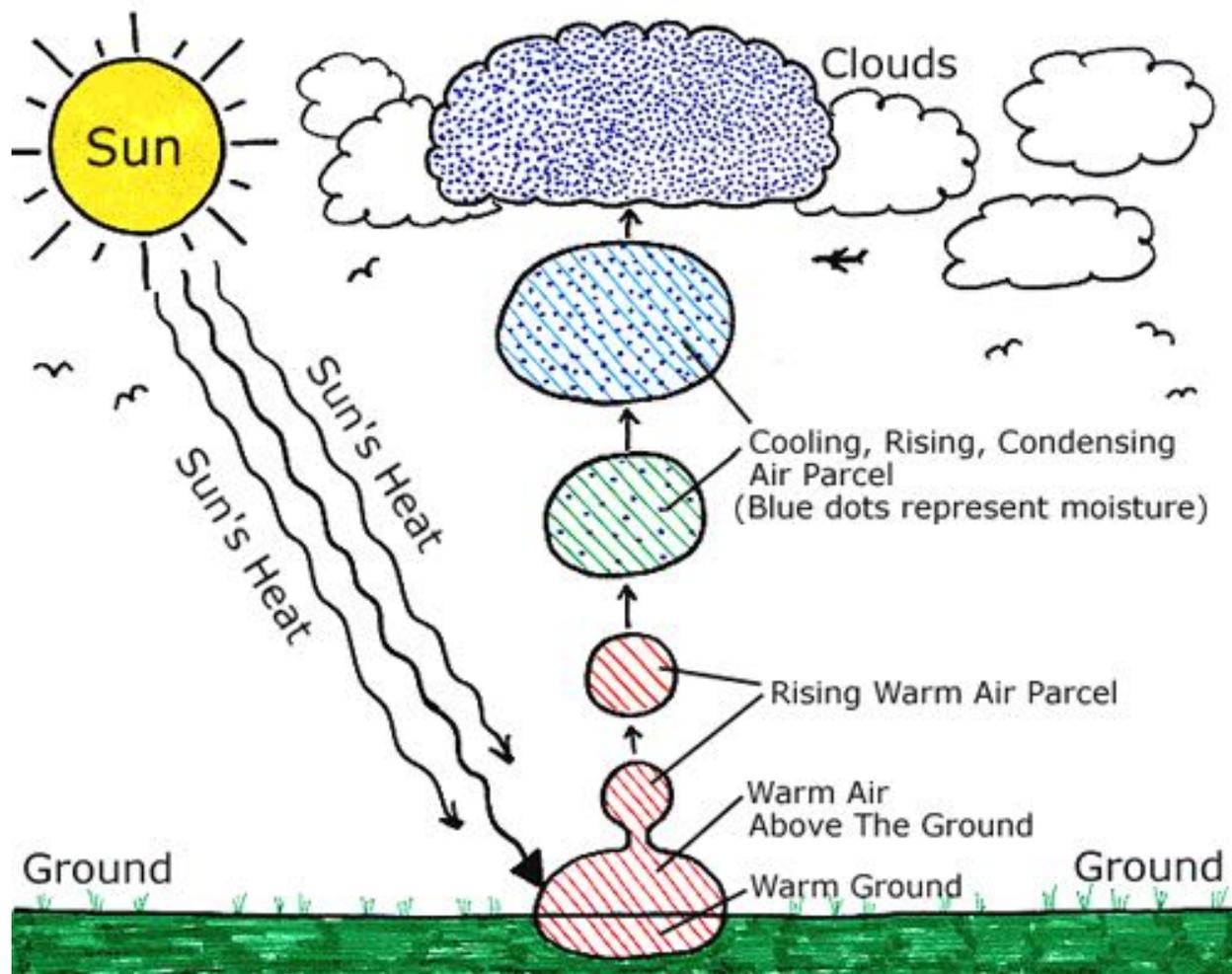
- (4) em (3)

$$dq = (c_{\downarrow v} + R') dT - \alpha dp$$

- Mas

$$c_{\downarrow p} \left(\frac{dq}{dT} \right)_{\downarrow p} = c_{\downarrow v} + R'$$

Teoria da Parcela



- Assim

$$dq = c_p dp \frac{dT}{p} - \alpha dp \quad (5)$$

- $c_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (calor específico a pressão constante)
- Se não há troca de calor (processo adiabático) $dq=0$

$$c_p dp \frac{dT}{p} = \alpha dp$$

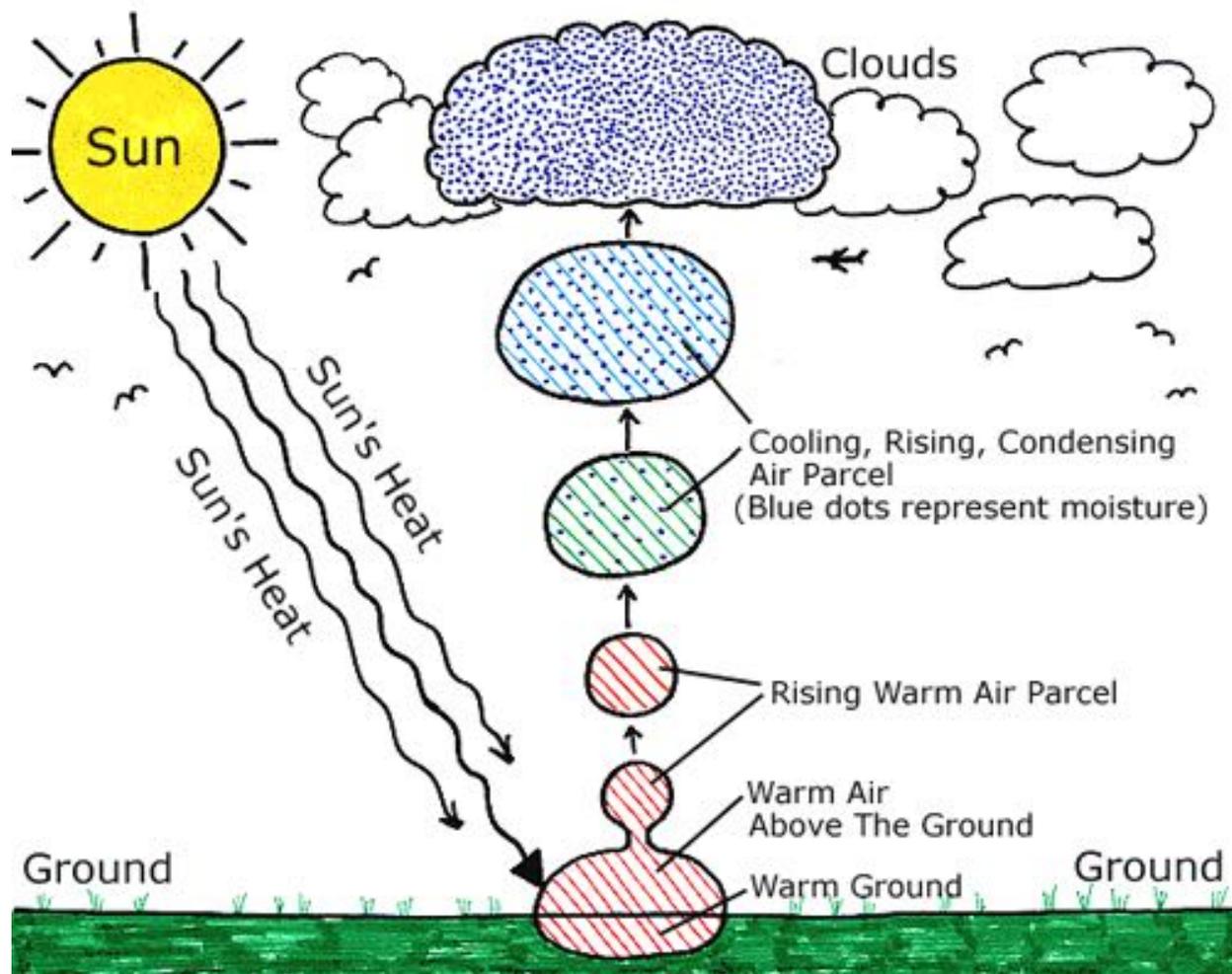
- Lei dos gases

$$c_p dp \frac{dT}{p} = R' \frac{T}{p} dp$$

- Variando com a altitude z

$$\frac{dT}{dz} = R' / c_p \frac{T}{p} \frac{dp}{dz}$$

Teoria da Parcela



- Vamos considerar que a parcela se ajusta imediatamente à pressão ambiente
- Considerando o balanço hidrostático (gradiente de pressão = gravidade):

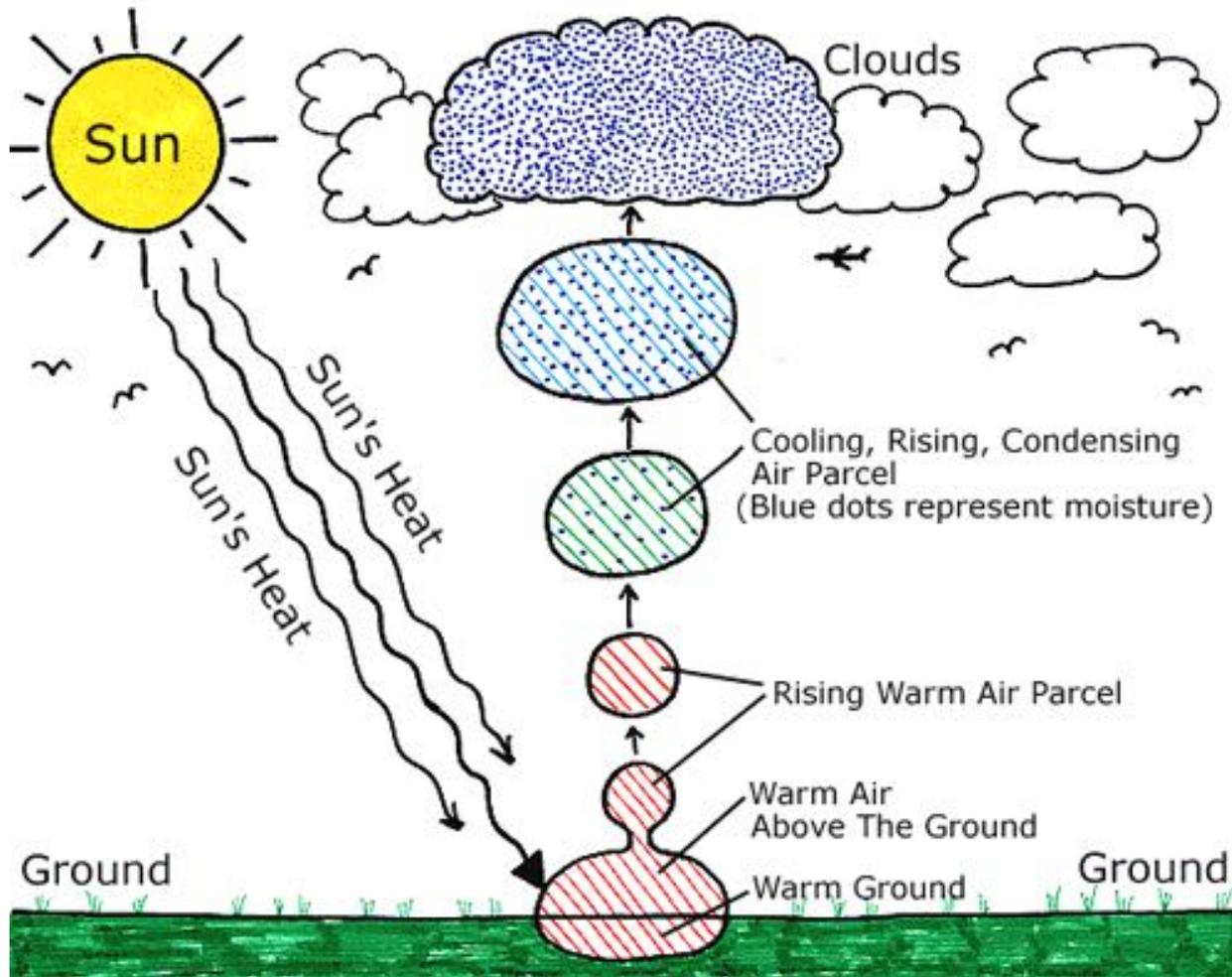
$$dp/dz = -\rho \uparrow \quad g = -pg/R \uparrow \quad T \uparrow$$

- Onde ρ' e T' se referem ao ambiente
- Assim, temos que

$$dT/dz = -g/c \downarrow p \quad T/T'$$

- Vamos considerar que $T \approx T'$ (parcela não muito mais quente/fria que ambiente)

Teoria da Parcela

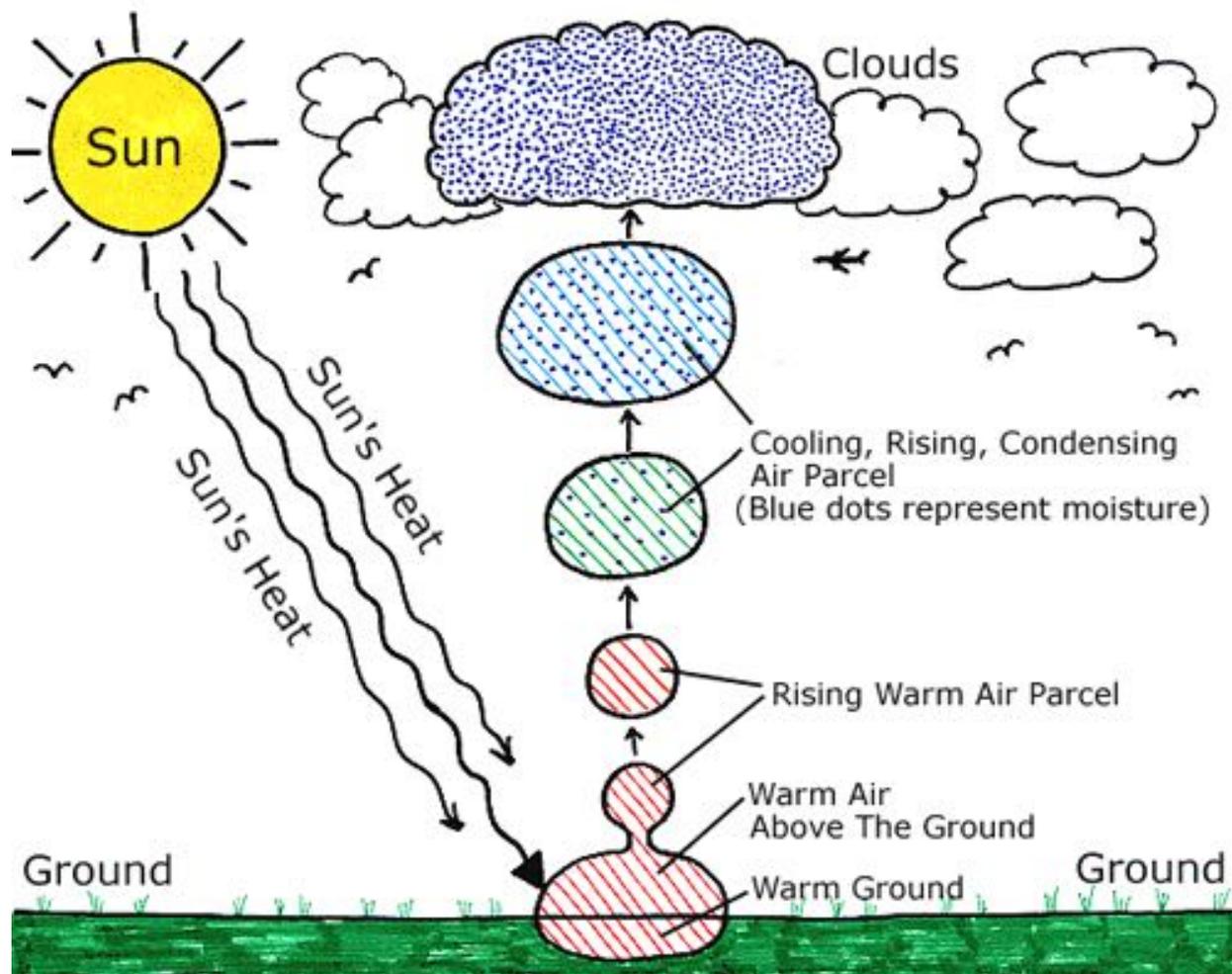


- Assim:

$$dT/dz = -g/c_p = -\Gamma_d \quad (6)$$

- Γ_d é conhecido como *dry adiabatic lapse rate* e equivale a $\sim 10^\circ\text{C}/\text{km}$
- Essa é a taxa de resfriamento que uma parcela sofre quando ascende e expande

Teoria da Parcela

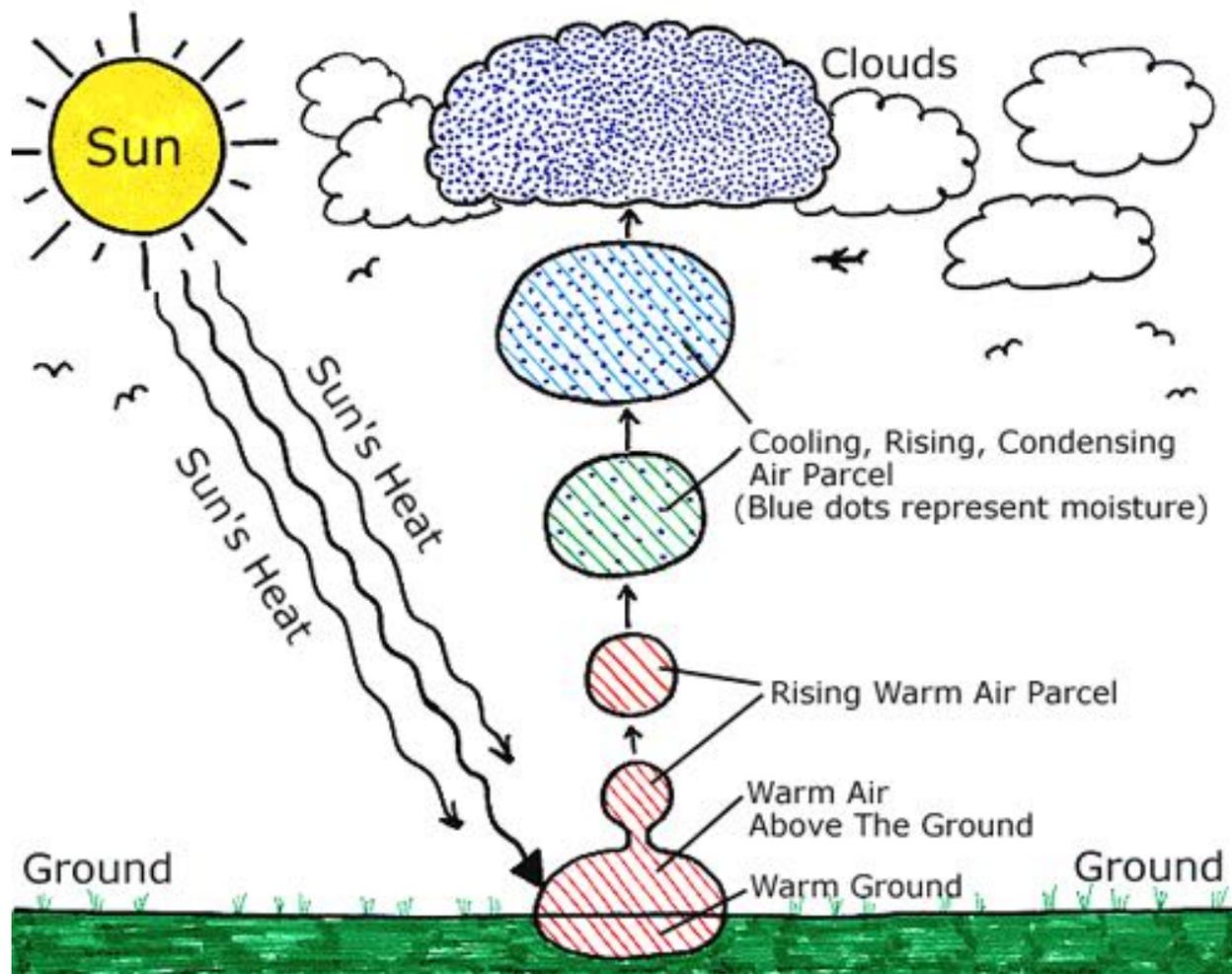


- Pode-se estudar a termodinâmica do vapor de modo similar ao ar seco
 - $p \rightarrow e$
- A quantidade de umidade em uma parcela q é dada em kg de água por kg de ar
 - Se mantém constante na parcela desde que não haja condensação (formação de nuvem)
 - $q \approx 7 \text{ kg kg}^{-1}$ em altas latitudes
 - $q \approx 15 \text{ kg kg}^{-1}$ nos trópicos
- O ar não suporta uma quantidade infinita de umidade
 - Ar saturado: $e = e_s$ e $q = q_s$
- A umidade relativa (ou razão de saturação) é a razão entre a quantidade de vapor e o limite suportado pela atmosfera

$$UR = e/e_s \times 100$$

- UR é usualmente dada em %

Teoria da Parcela



- Ambos e_s e q_s crescem com T
 - Ar quente suporta mais umidade

$$e_s = 6,112 \exp(17,67T / (T + 243,5))$$

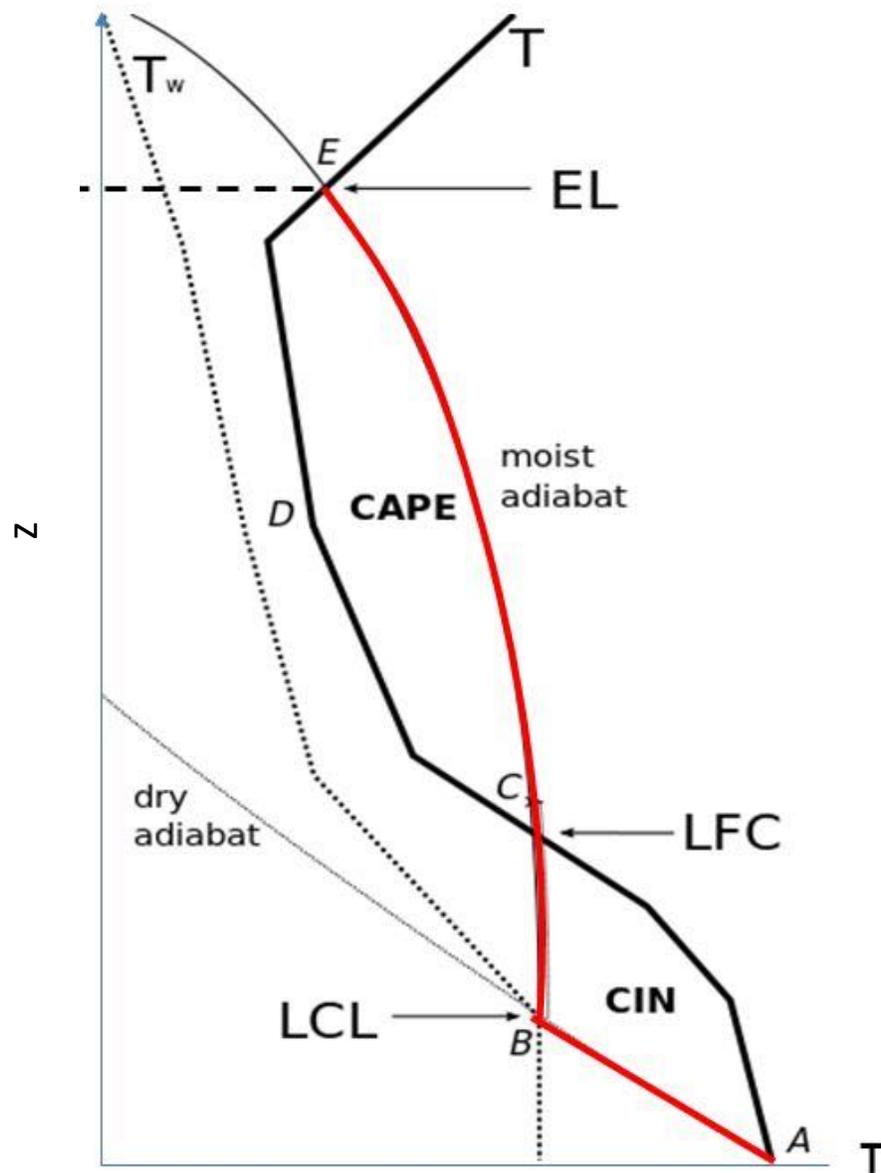
- e_s em hPa e T em $^{\circ}\text{C}$
- Conforme a parcela ascende, sua T decresce enquanto q permanece constante
 - Chega um momento que o ar na parcela satura!
 - Mesmo sem adição de umidade, apenas pela diminuição de T

Teoria da Parcela



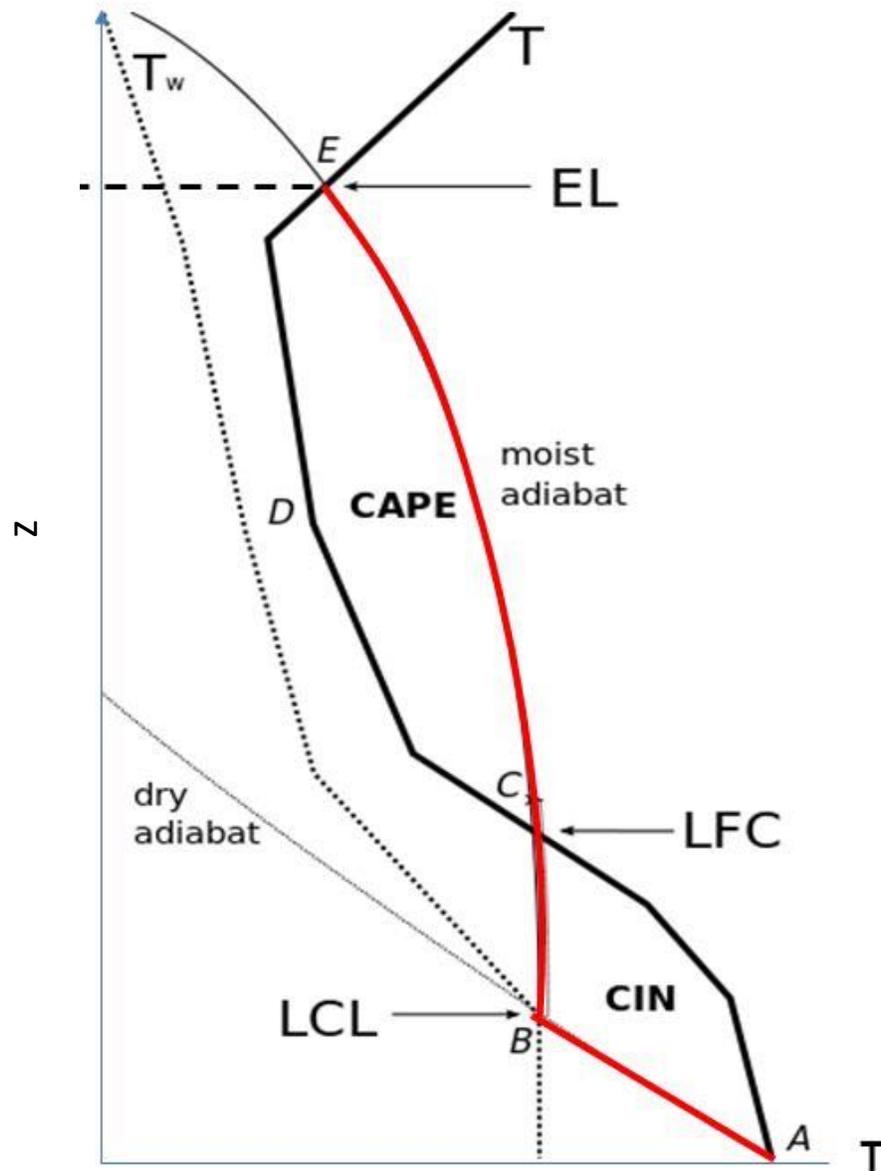
- O nível onde UR = 100% é chamado de Nível de Condensação por Levantamento (NCL)
 - Boa aproximação da altura da base das nuvens convectivas
- Nesse nível, $T = T_d$ (temperatura do ponto de orvalho)

Comparando a Parcela com o Ambiente – diagramas termodinâmicos



- Com uma radiossonda, podemos medir T e T_d do ambiente (linha preta)
- Calculamos a evolução de T considerando uma parcela inicialmente na superfície (linha vermelha)
- Evolução constante até NCL (ou LCL em inglês)
 - *Lapse rate* adiabático seco
- A partir do NCL há liberação de calor latente
 - T decai mais devagar com z

Comparando a Parcela com o Ambiente – diagramas termodinâmicos

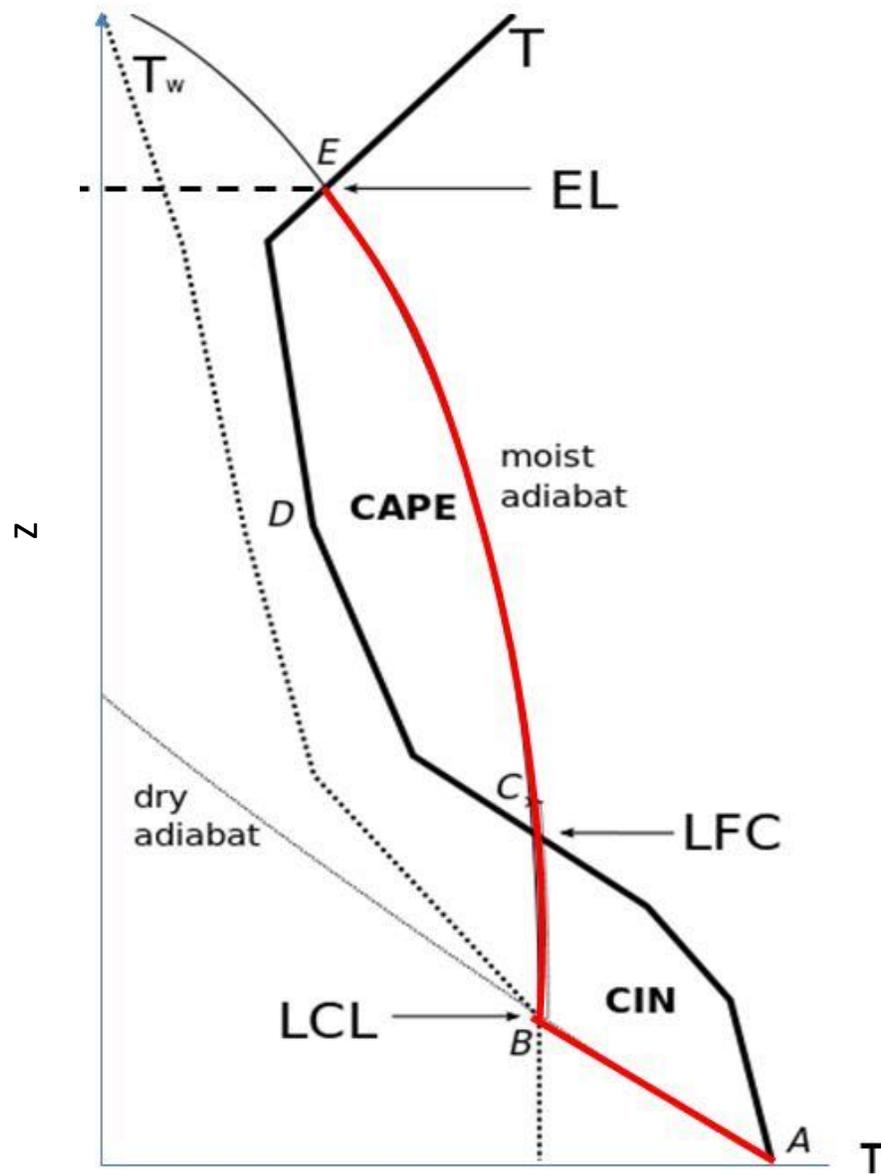


- Força de empuxo:

$$d\left(\frac{z}{dt}\right) = F_B = g(\rho' - \rho/\rho) = g(T - T'/T')$$

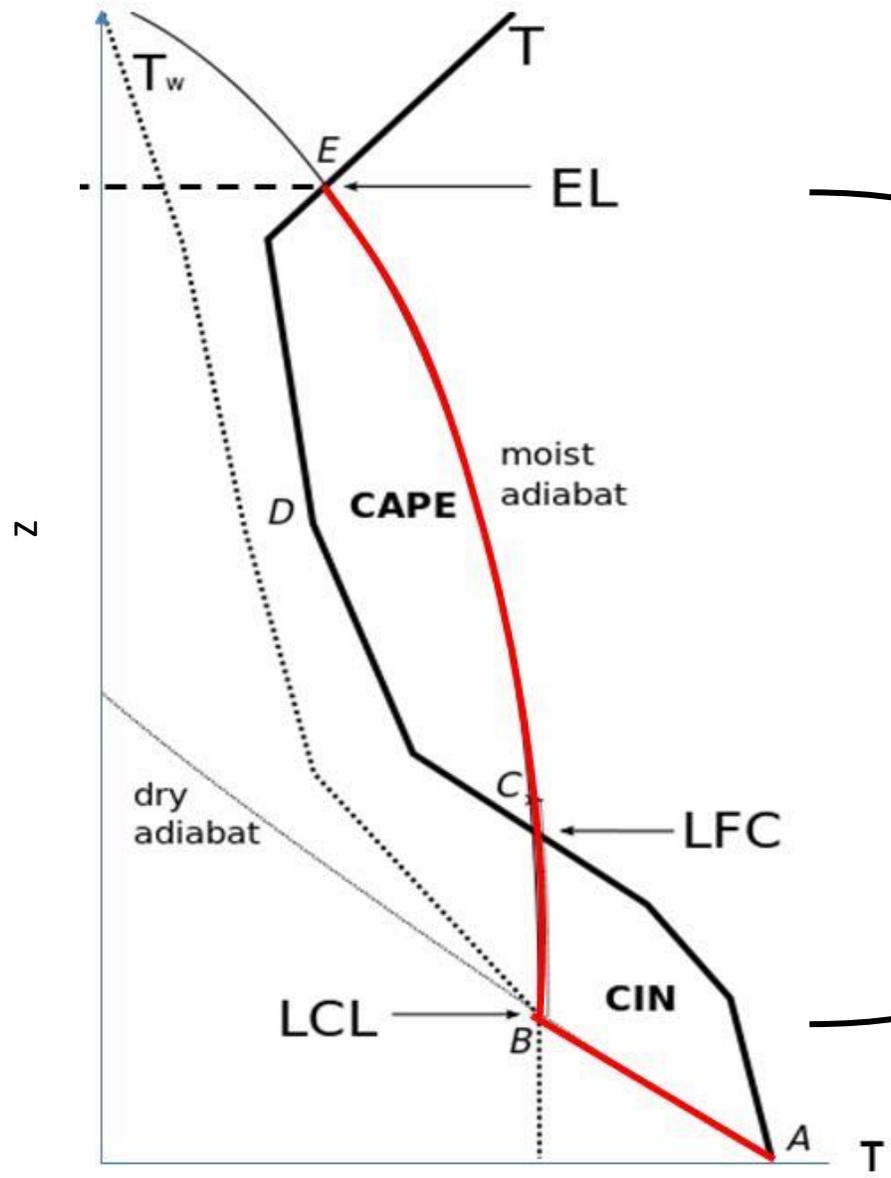
- Se $T > T' \rightarrow F_B$ é positiva e a parcela tende a ascender
- Se $T < T' \rightarrow F_B$ é negativa e a parcela tende a descender
- Se $T = T' \rightarrow$ a força é nula e a parcela segue a inércia

Comparando a Parcela com o Ambiente – diagramas termodinâmicos



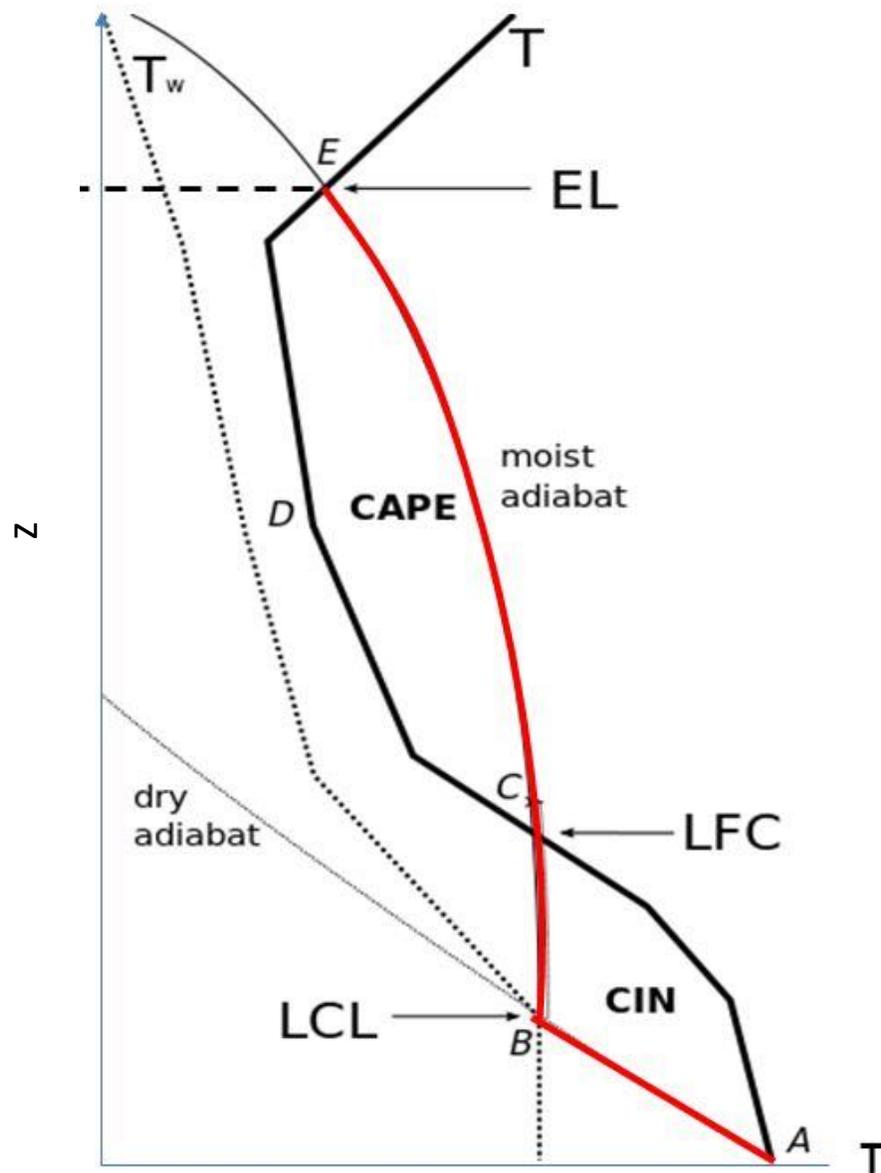
- Quanto as linhas de T e T' se cruzam pela primeira vez
 - Nível de convecção livre (LFC em inglês)
- Na segunda vez
 - Nível de equilíbrio (EL em inglês)

Comparando a Parcela com o Ambiente – diagramas termodinâmicos



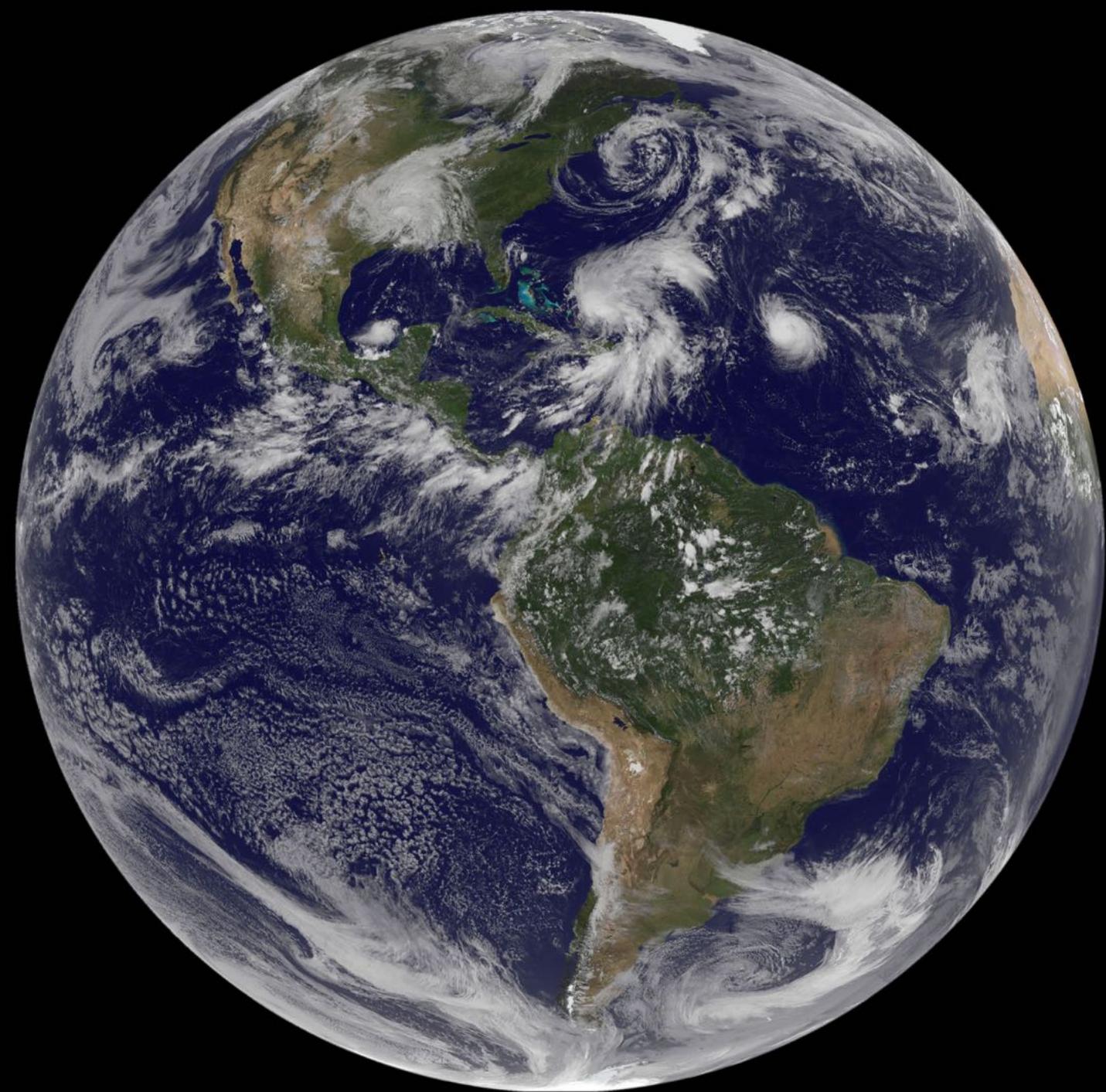
Uma medida da extensão vertical da nuvem

Comparando a Parcela com o Ambiente – diagramas termodinâmicos



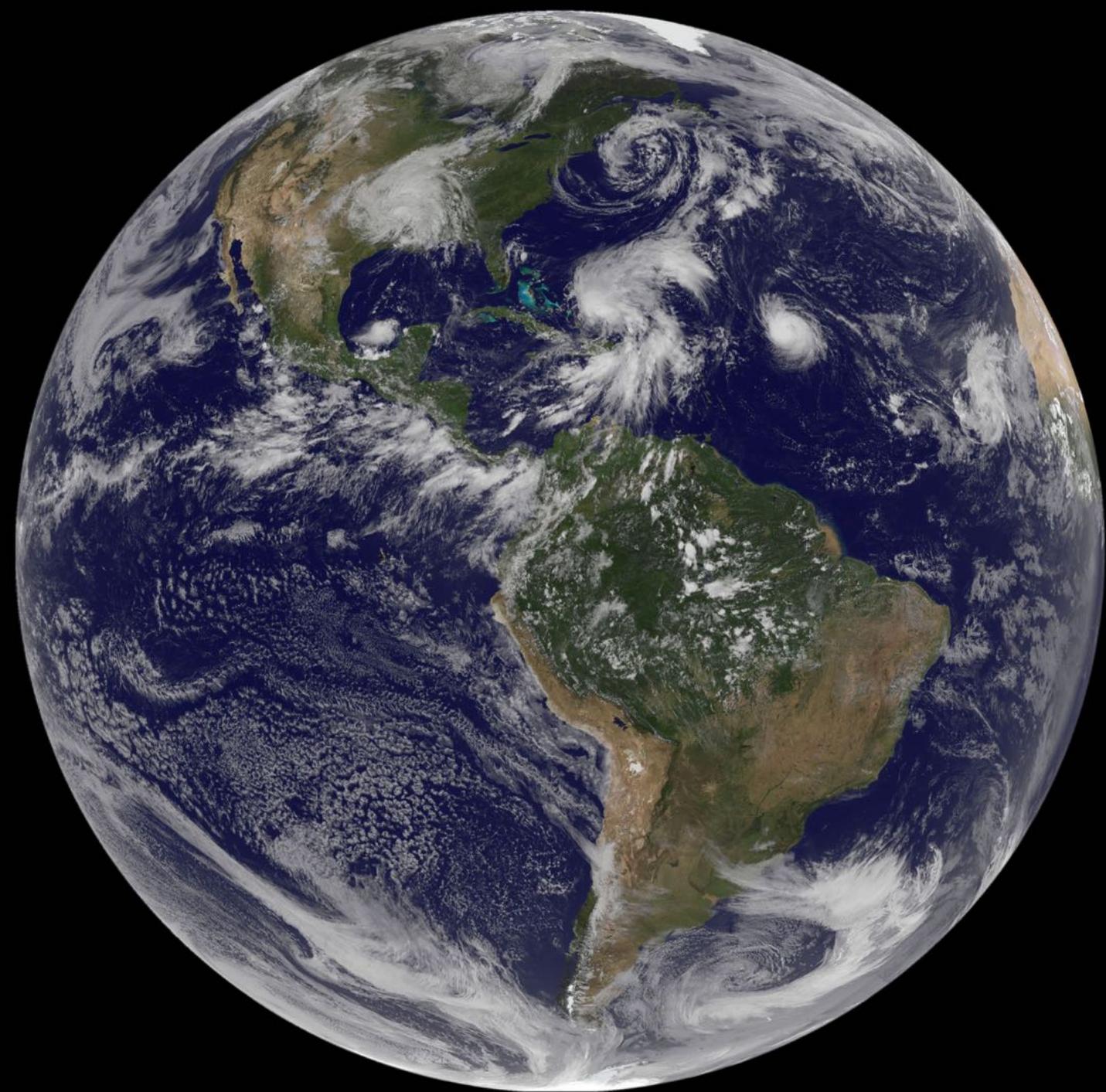
- Área entre as curvas de T e T' -> integral espacial de F_B , ou seja, energia.
- $T < T'$ -> energia que inibe convecção (CIN)
- $T > T'$ -> energia que favorece convecção (CAPE)

- Muitas vezes é necessário quebrar a barreira energética CIN para alcançar o LCL
 - Efeito orográfico/frentes



CONCLUINDO

- Nuvens são formadas devido a instabilidades dinâmicas e termodinâmicas
 - Várias escalas/formatos
- São cruciais para o balanço climático do planeta
- Podem ser formadas por diferentes processos
 - Aquecimento diferencial
 - Orografia
 - Convergência/frentes
 - Resfriamento radiativo
- Para convecção local, estudamos a formação de nuvens de acordo com a teoria da parcela
 - Depende do balanço entre T e T'



CONCLUINDO

- Espero que essa figura tenha outro sentido agora...