

Modelagem Numérica da Atmosfera – Parte 1

<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>

Henrique M. J. Barbosa
Instituto de Física – USP
hbarbosa@if.usp.br



Quem sou eu?

- Sou professor e pesquisador do IF-USP.
- Antes da USP, trabalhei como pesquisador do CPTEC-INPE entre 2004 e 2008.
- Minha formação foi na UNICAMP: bacharelado (1998), o mestrado (2000) e o doutorado em Física (2004).
- Trabalho com física da atmosfera:
 - Modelagem numérica do sistema terrestre
 - radiação, convecção e aerossóis.
 - Sensoriamento remoto com laser
 - Monção/Vapor de água na América do Sul

http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa
hbarbosa@if.usp.br

Notas de aula

Henrique Barbosa

Home | View | Print

Pesquisa

Linhas de Pesquisa

Lista de Publicações

Projetos de Pesquisa

Oportunidades

Ensino

Disciplinas

Tutoriais

Outros

Ubuntu

Contato

Pessoal

Secretaria

Visitor locations

ClustrMaps™

Click to see

Visitantes: 007439

Desde 29 Out 2008

Modelagem Numérica da Atmosfera

Filed in: Site.Modclim2011a · Modified on : Mon, 28 Mar 11

Nesta curso iremos abordar a ciência que rege o sistema climático global com foco em como ela é descrita nos modelos numéricos. Trata-se de um mini-curso de pós-graduação oferecido em conjunto com o Projeto CHUVA e a FUNCEME.

Notas de aula

- [Parte 1 - Visão geral sobre modelagem climática](#)
Leitura: Peter Lynch, BAMS 2008: The Eniac Forecasts
- [Parte 2 - Equações da atmosfera](#)
Leitura: Jacobson, cap.2; Wallace & Hobbs, cap.3
Complementar: Halliday & Resnick capítulos 19 a 21; Feynman caps. 39, 42.1, 43.1 a 5, 44.1, 44.2 e 45; Jacob, cap.1 até item 1.3.1
- [Parte3 - Métodos numéricos](#)
Leitura: Jacobson, cap.3 do item 3.3 até o fim e cap.6 até item 6.4.4.3
Complementar: Jacob, cap.2 item 2.3 e 2.3.1
- [Parte4 - Métodos numéricos e convecção](#) ^Δ
[Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model geophysical fluid problem. Rev.](#)

Aulas de modelagem

- Aula 1

- Visão geral sobre meteorologia, climatologia e modelos numérico, de climáticos até CRM

- Equações básicas da atmosfera. Diferenças finitas. Teorema de Nyquist. Média de Reynolds. Convergência e estabilidade de soluções numéricas. Etc....

- Aula 2

- A parametrização de convecção. Equações de fluxo de massa. Entrainment/Detrainment. Tipos de fechamentos. Hipóteses para modelar convecção. Métodos numéricos para solução da equação de fluxo de massa.

História da Meteorologia

Previsões começaram baseadas na observação de padrões repetitivos:

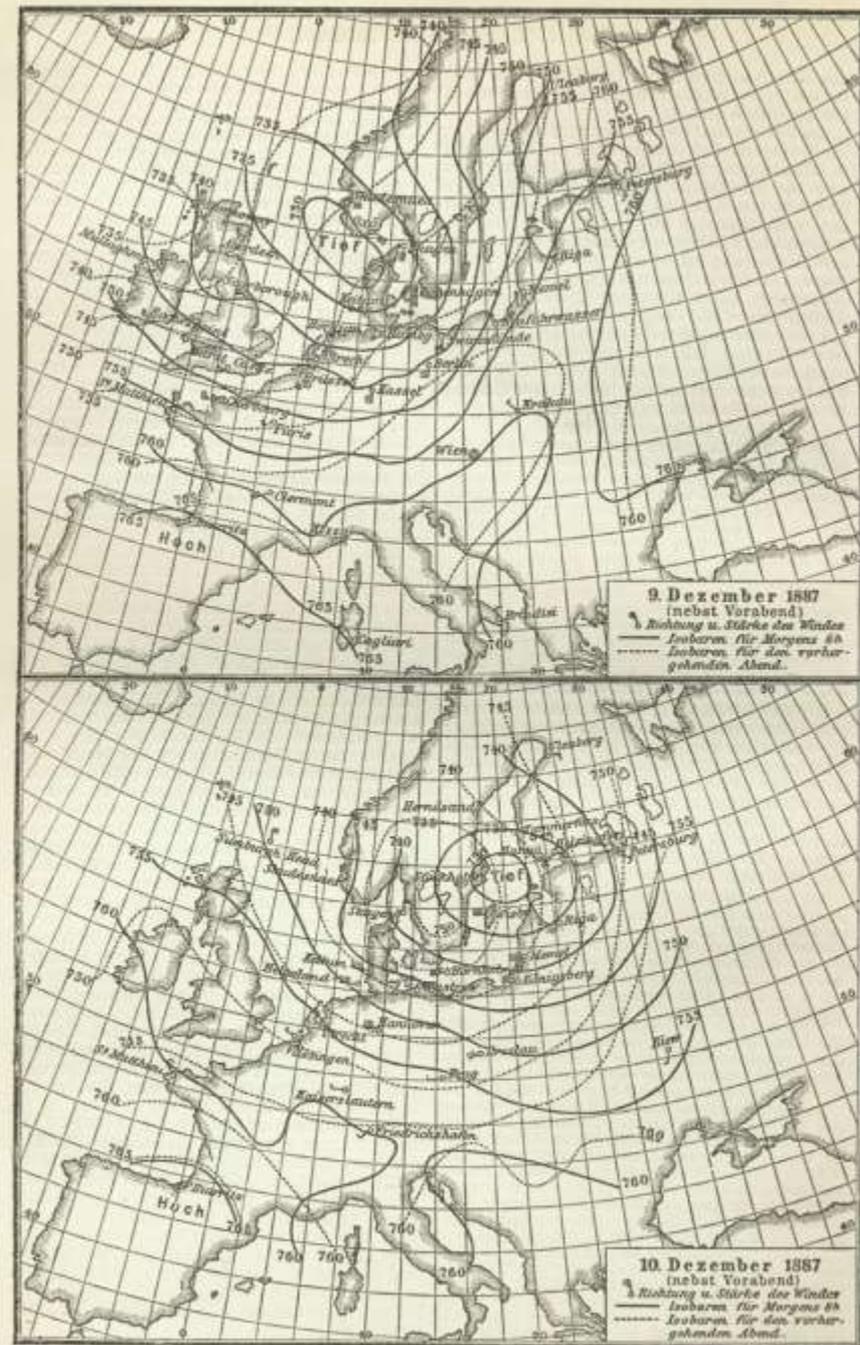
- Em 650 AC os babilônios previam o tempo a partir do padrão de nuvens e da posição dos astros
- Em 340 AC, Aristóteles descreveu uma série de situações meteorológicas no livro Meteorológica
- Desde pelo menos 300 AC que os chineses faziam algum tipo de previsão de tempo

Let us now explain lightning and thunder, and then whirlwinds, firewinds and thunderbolts; for the cause of all of them must be assumed to be the same. As we have said, there are two kinds of exhalation, moist and dry; and their combination (air) contains both potentially. It condenses into cloud, as we have explained before, and the condensation of clouds is thicker toward their farther limit. Heat when radiated disperses into the upper region. But any of the dry exhalation that gets trapped when the air is in process of cooling is forcibly ejected as the clouds condense and in its course strikes the surrounding clouds, and the noise caused by the impact is what we call thunder. – **Aristoteles Meteorologica**

História da Meteorologia

- 1400's
 - Hygrometer - Cryfts (1450)
 - Anemometer - Alberti (1450)
- 1500's
 - Thermoscope - Galileo
- 1600's
 - Barometer - Torricelli (1643)
 - Les Meteores - Descarte (1637)
- 1700's
 - Trade winds - Hadley (1730)
- 1800's
 - Three-cell model - Ferrel (1855)
 - Weather maps of surface pressure
- 1900's
 - Weather prediction from maps - Bjerknes (1903)
 - Polar front theory - Bjerknes (1921)
 - Numerical weather prediction - Richardson (1922)
 - First computer forecast - Charney / von Neumann (1948)
 - Daily balloon observations (1940's)
 - Weather satellites (Tiros I, 1960)

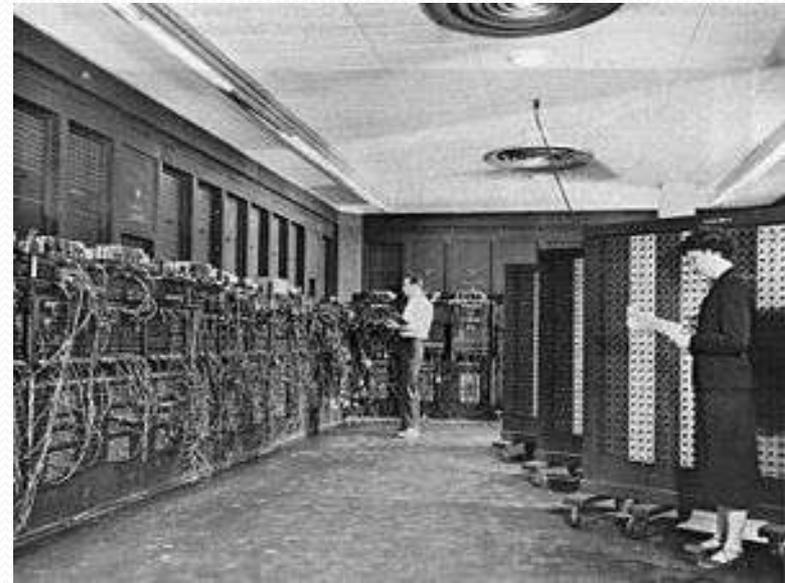
Previsão para a Europa 9 e 10 de dezembro de 1887



Wetterkarten vom 9 und 10. Dez. 1887 (Zust. Ge. Schmidt)

Previsão Numérica de Tempo

- Durante a 2ª guerra, os EUA financiaram a construção do primeiro computador (em segredo)
- Em 1946 o ENIAC foi apresentado ao mundo
- Em 1950, Charney, von Neumann e outros cientistas usaram o ENIAC para fazer a 1ª previsão numérica de tempo
- A partir de 1955 as previsões de tempo tornaram-se sistemáticas



- Mas o que é um modelo numérico?
- Quais equações este modelo resolve?
- Como a atmosfera funciona??



O Sol é a nossa fonte de energia



Sem o Sol, a temperatura na
Terra seria 2.7K ou -270°C

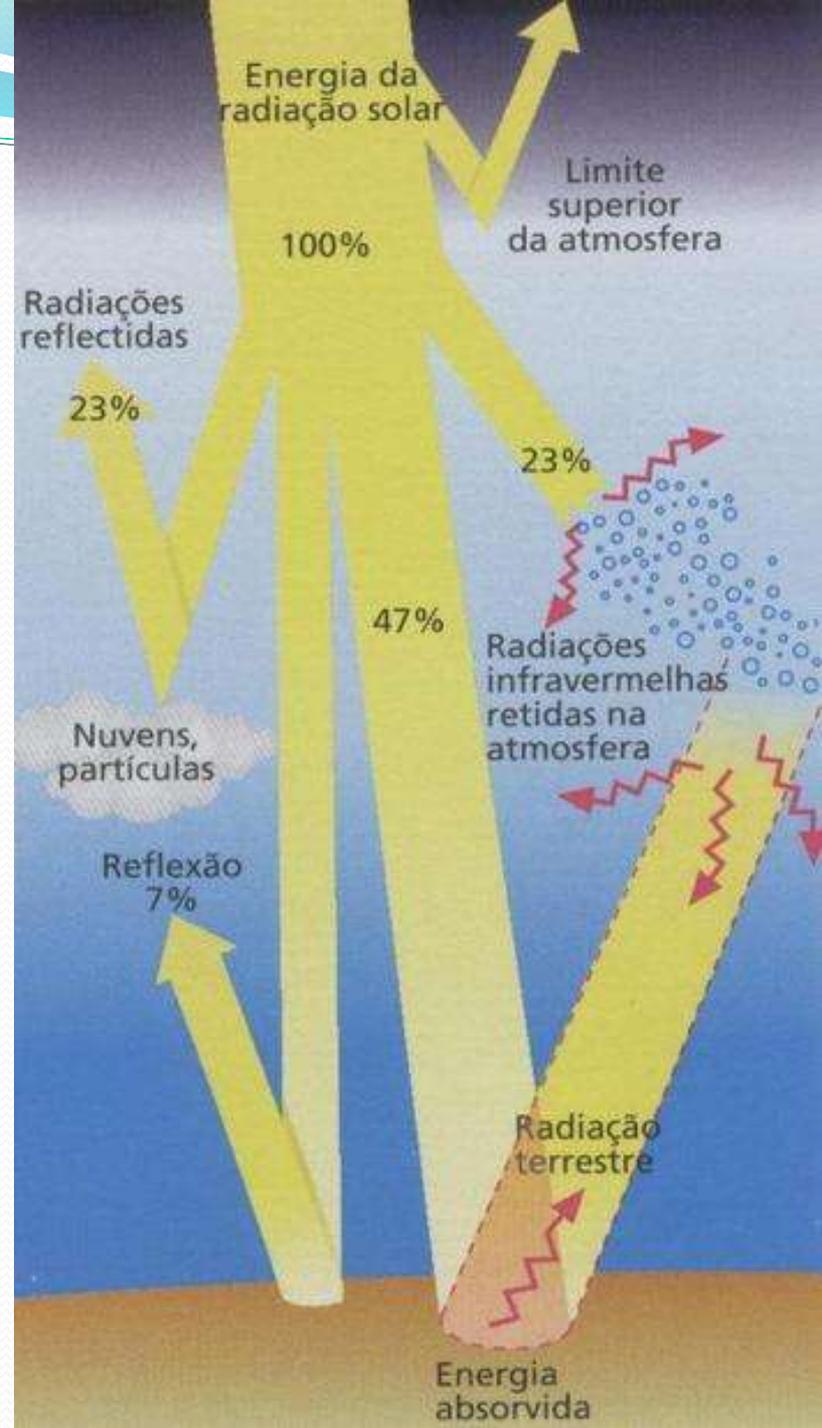
SOHO (ESA and NASA)

Radiação Solar

- A energia do sol vem na forma de radiação eletromagnética
 - Ultra-violeta
 - Visível
 - Infra-vermelho

A energia é repartida:

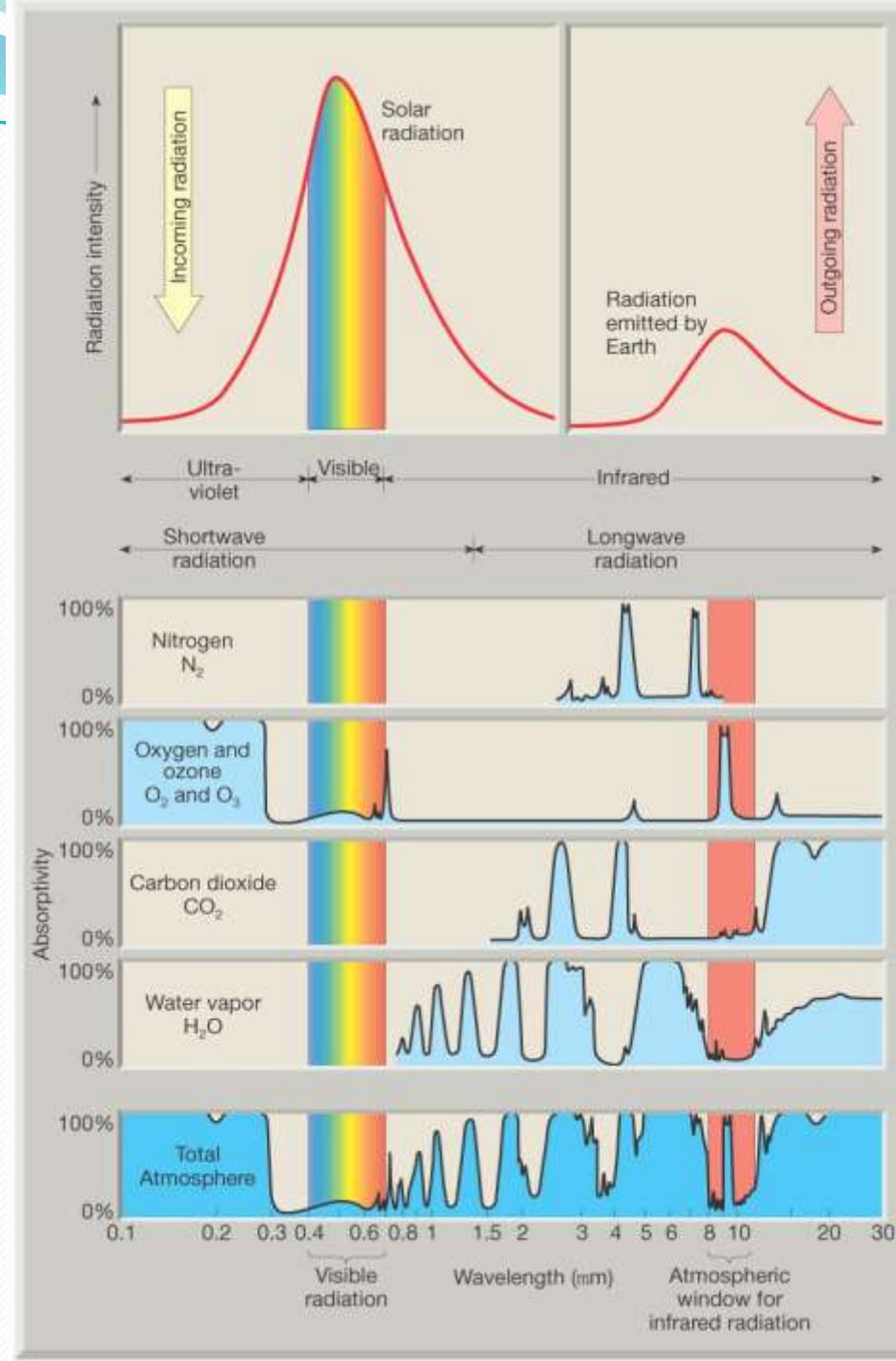
- 30% é refletida pelas nuvens, pela atmosfera ou pela superfície e volta para o espaço
- 50% atravessa a atmosfera e é absorvida na superfície
- 20% é absorvida na atmosfera pelos gases e nuvens



Efeito Estufa

A superfície aquecida perde energia na forma de calor, mas:

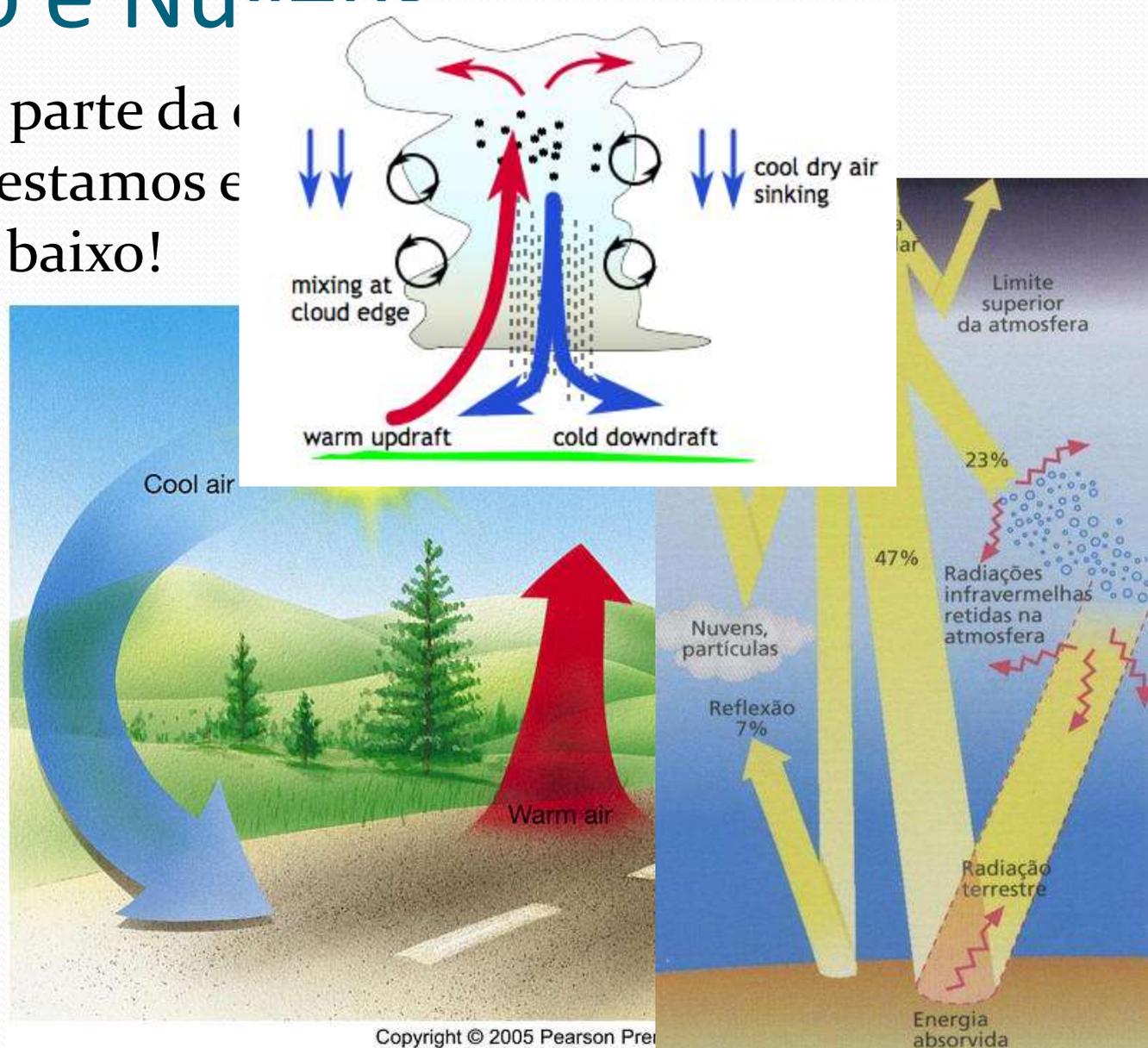
- Os gases do efeito estufa:
 - Transparentes para a radiação do Sol
 - Opacos para a radiação (calor) emitido pela Terra
- Sem o efeito estufa, a temperatura média seria de apenas -18°C
- Com o efeito estufa, ela fica em torno de $+15^{\circ}\text{C}$



Convecção e Nuvens

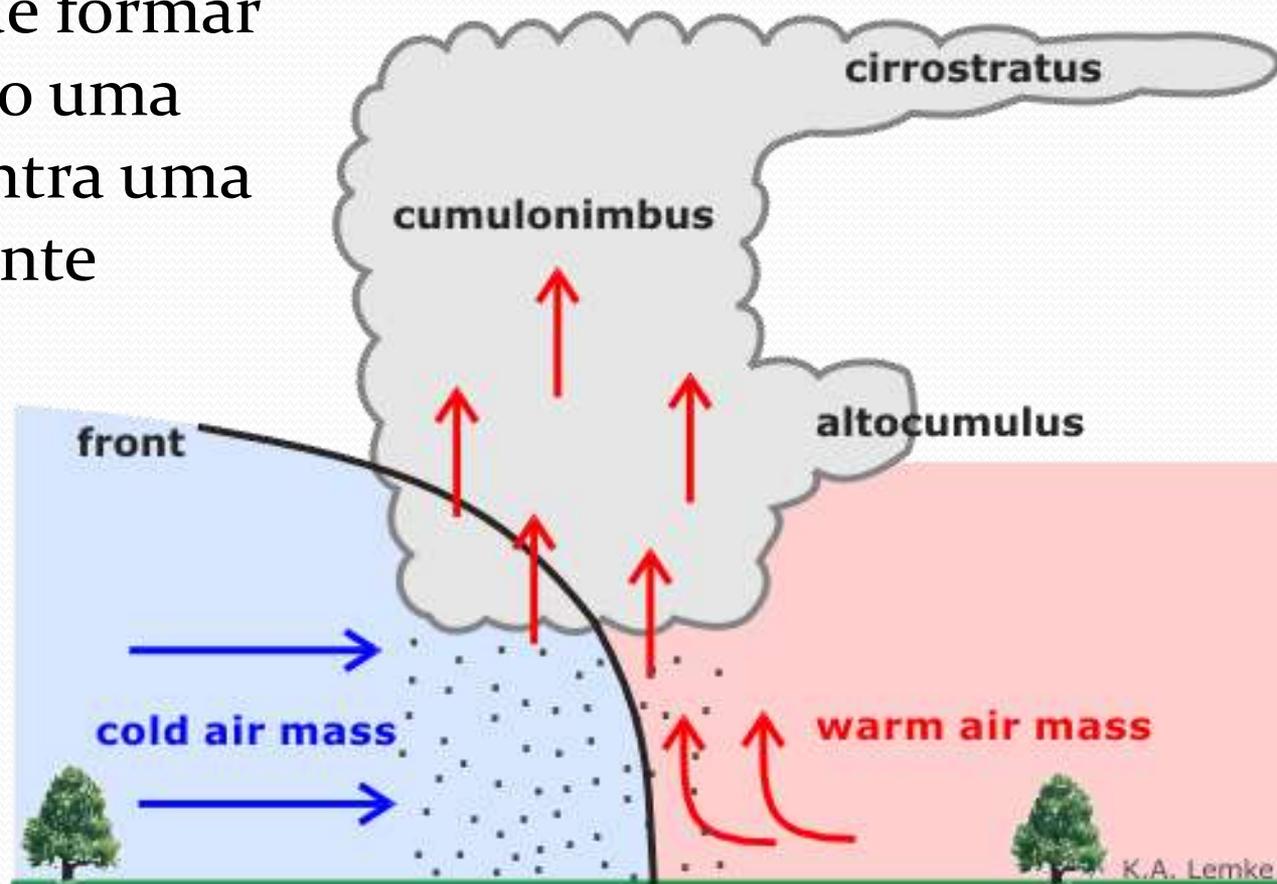
- Como a maior parte da energia solar na superfície, estamos e a atmosfera por baixo!

O ar quente é menos denso e sobe, pois o ar frio que está em cima é mais pesado.



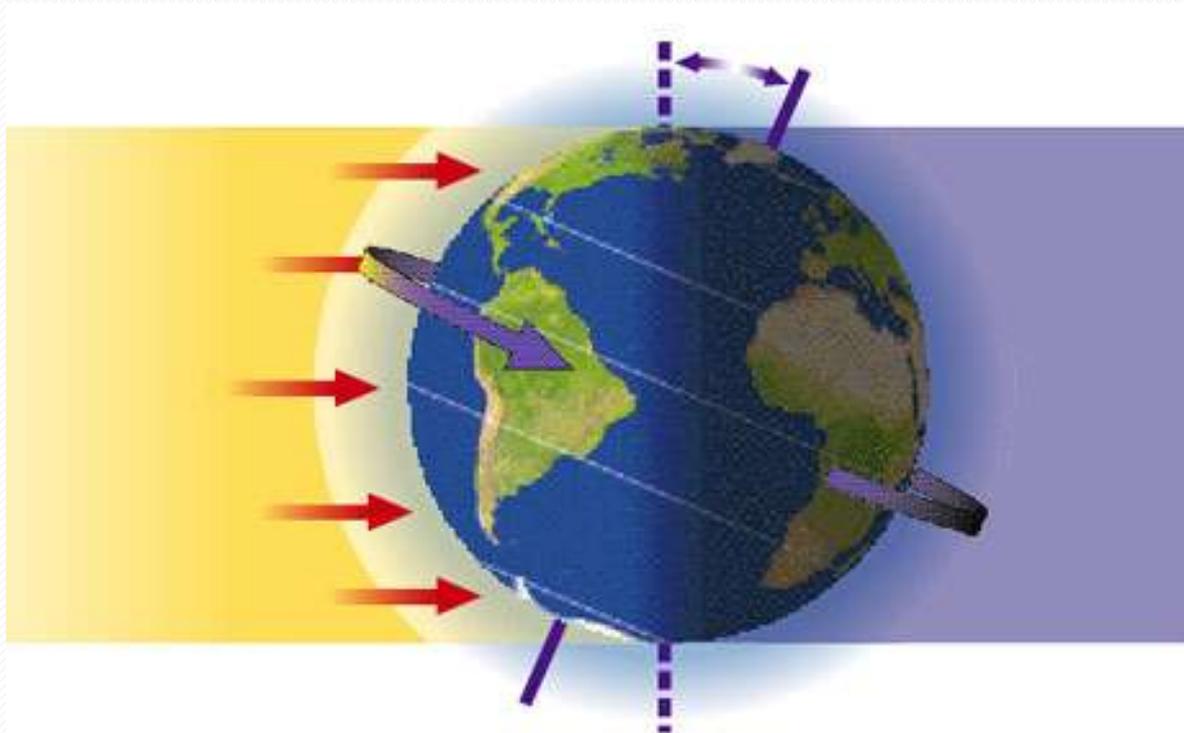
Nuvens e Frentes

- Uma outra maneira muito comum de formar nuvens é quando uma frente fria encontra uma massa de ar quente

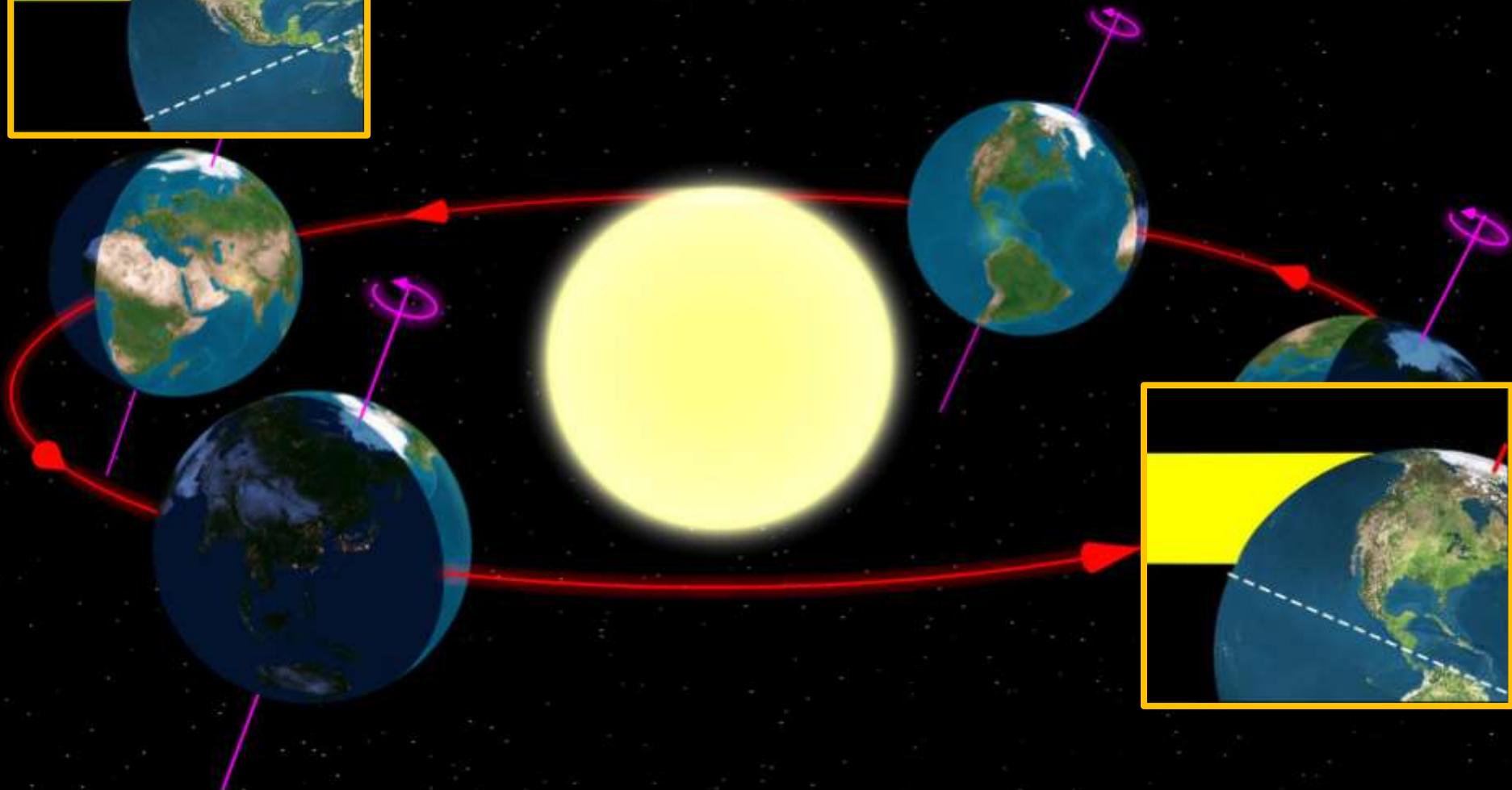


Dia e Noite

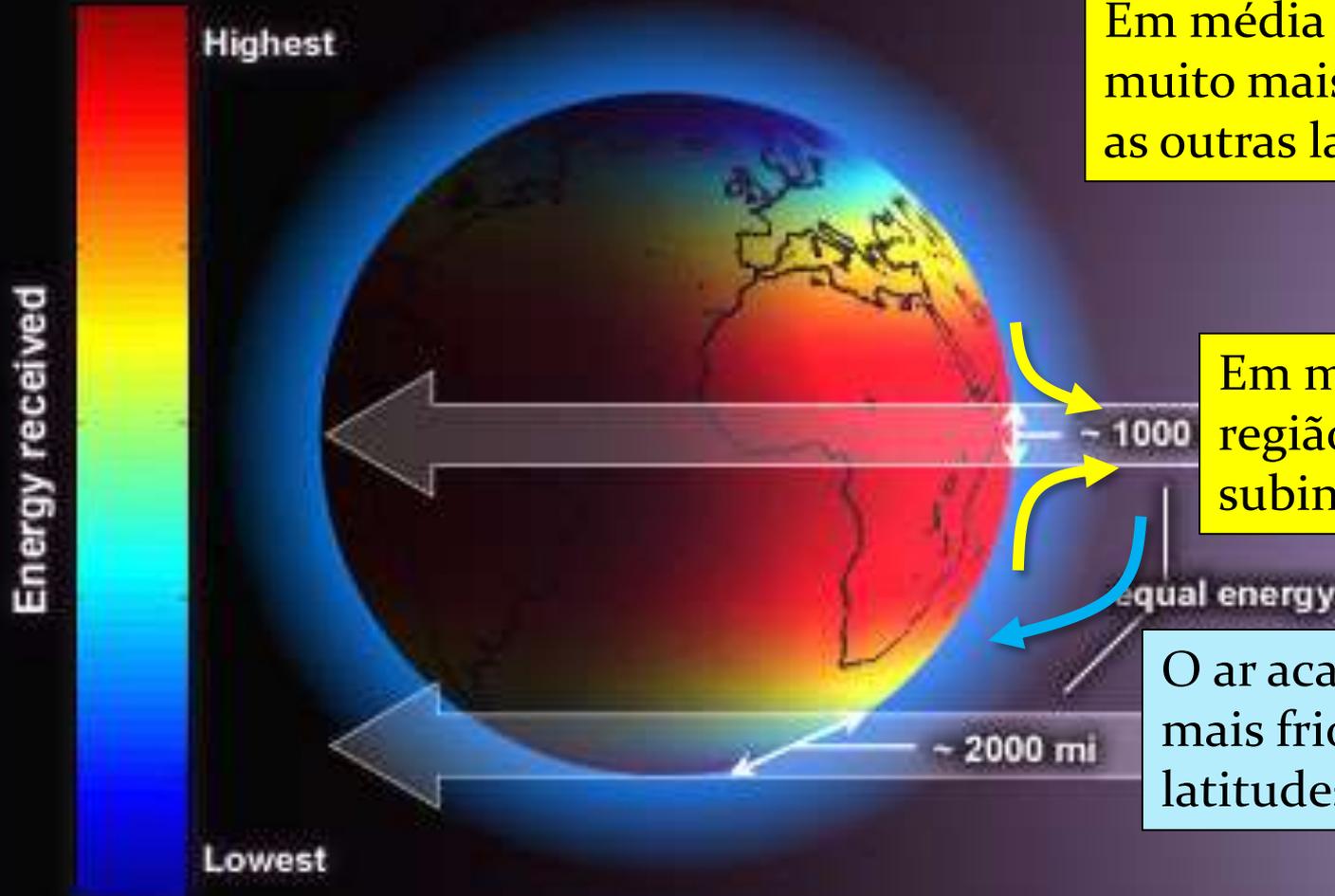
- A energia que recebemos do Sol também não é distribuída igualmente pela superfície do planeta!
 - Giro em torno do próprio eixo
 - O eixo é inclinado em relação a órbita em torno do Sol



Estações do ano



Mean Annual Global Insolation



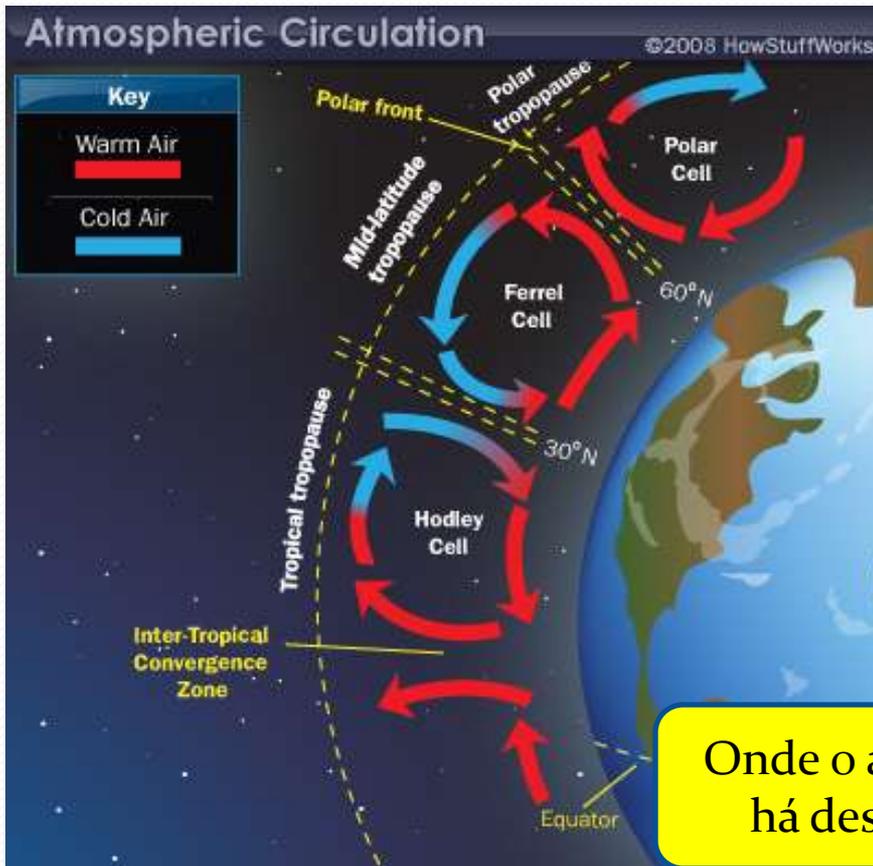
Em média o equador recebe muito mais energia do que as outras latitudes!

Em média o ar nessa região está sempre subindo!

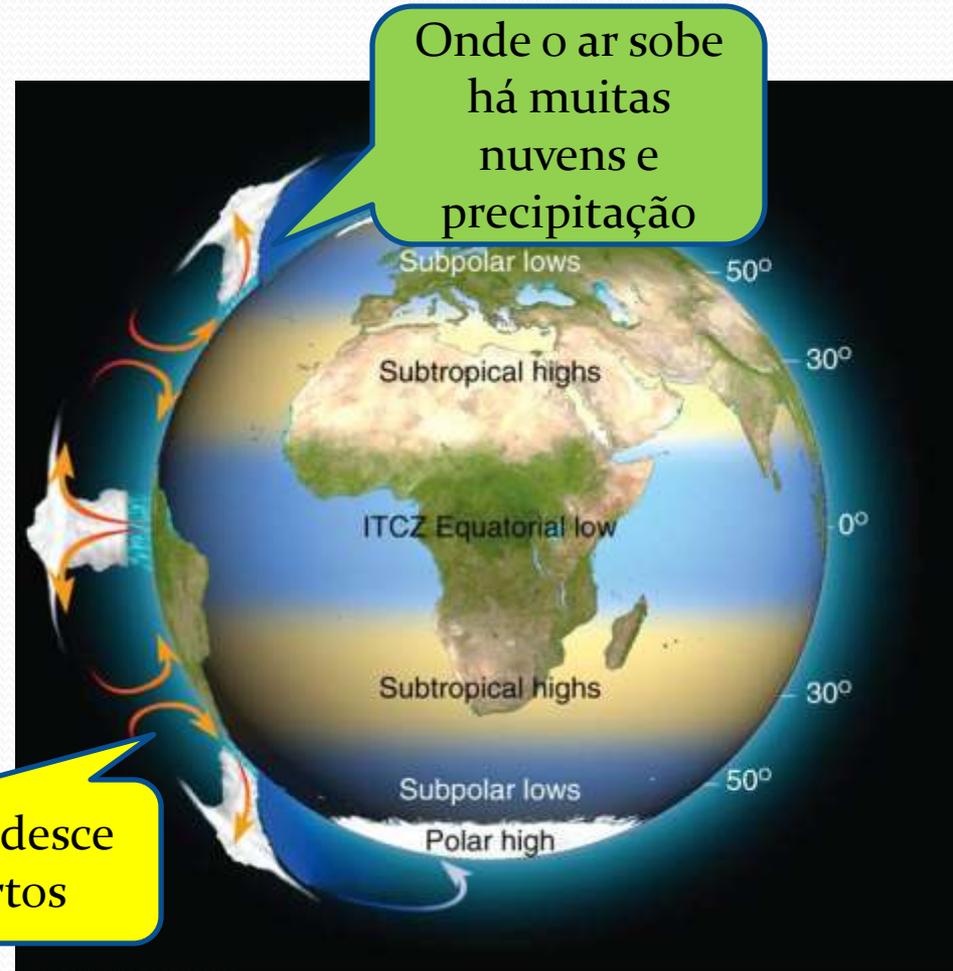
O ar acaba descendo mais frio em latitudes mais altas



Circulação de grande escala



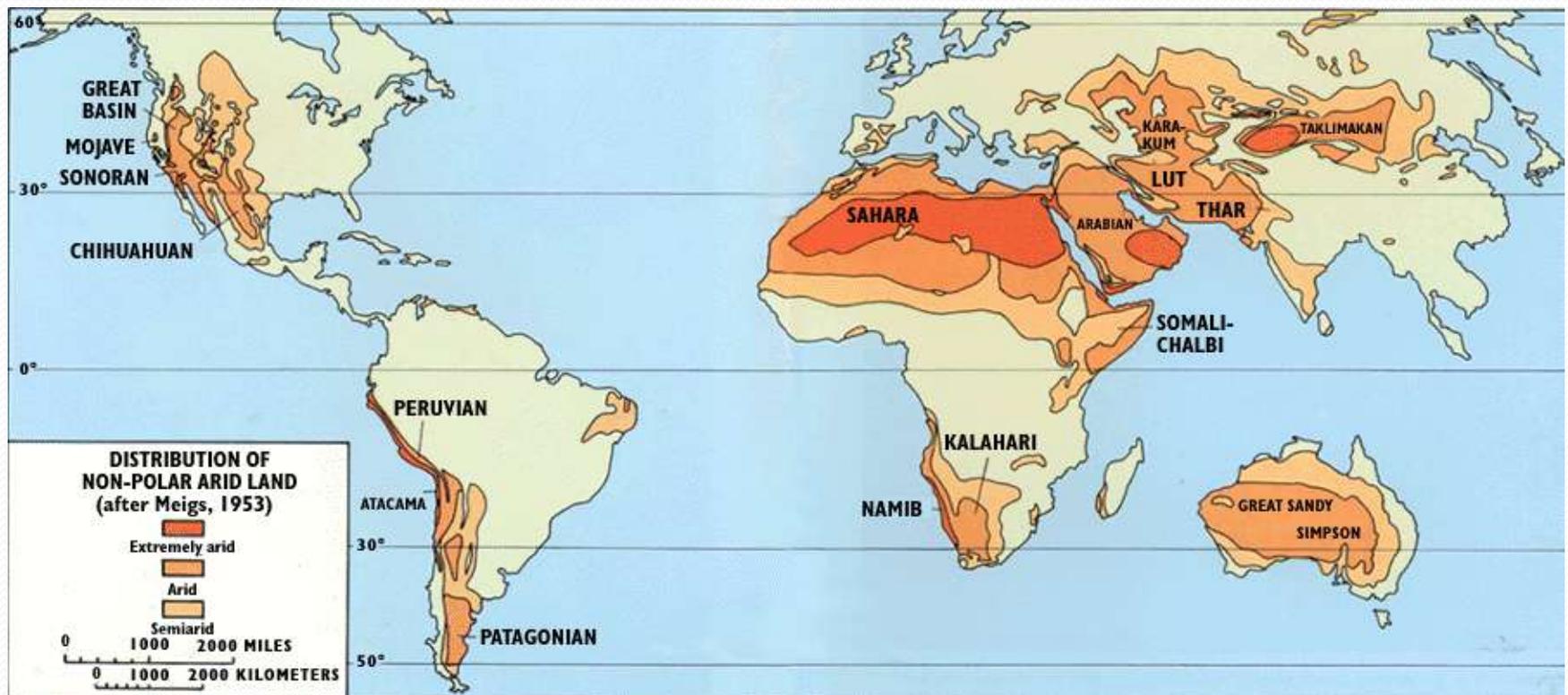
Onde o ar desce
há desertos



Onde o ar sobe
há muitas
nuvens e
precipitação

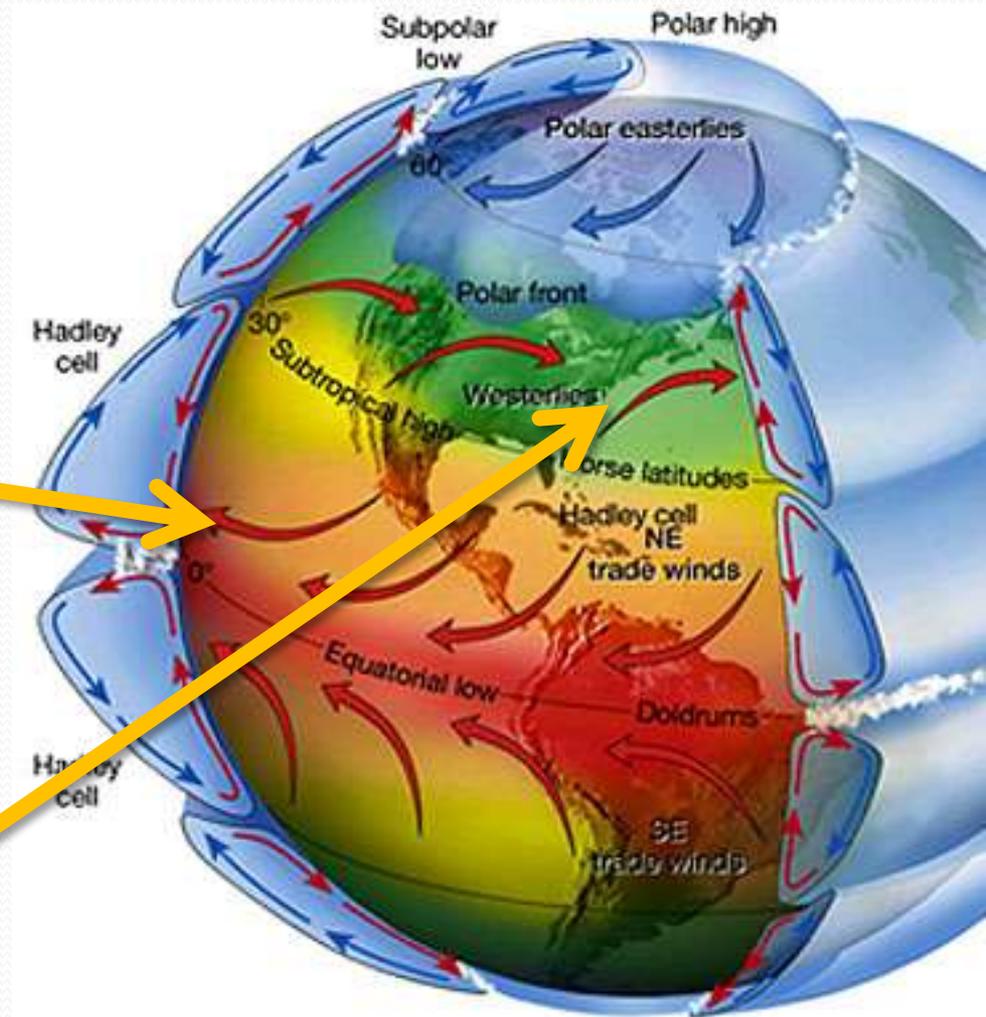
Localização dos grandes desertos

- Nas latitudes onde o ar desce seco e frio, há pouca precipitação e as regiões são desérticas.



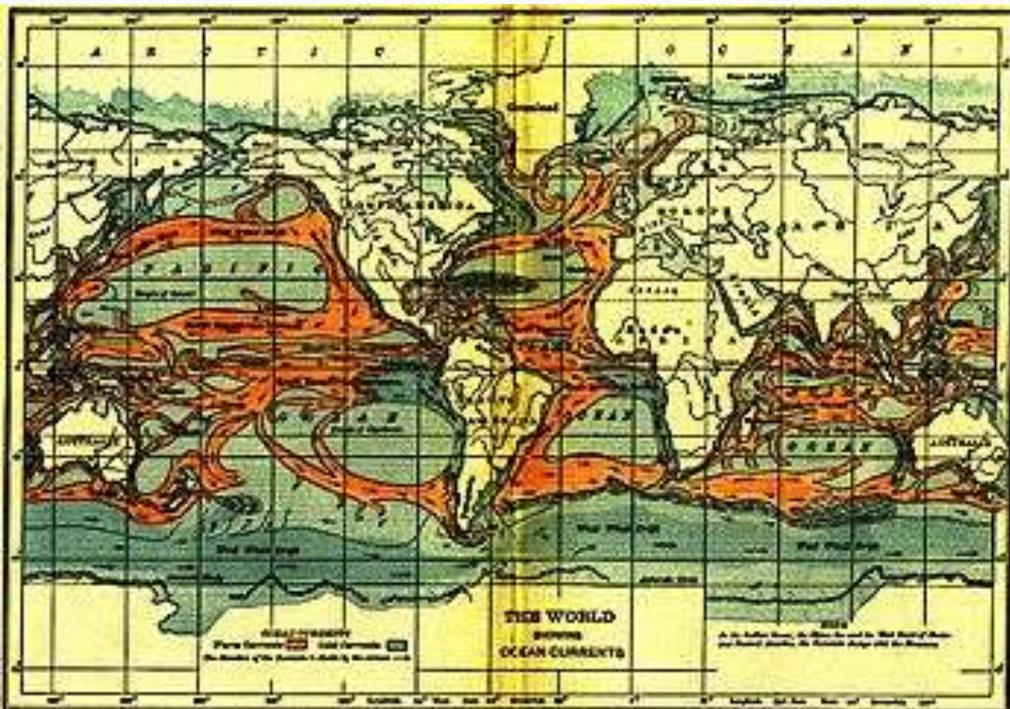
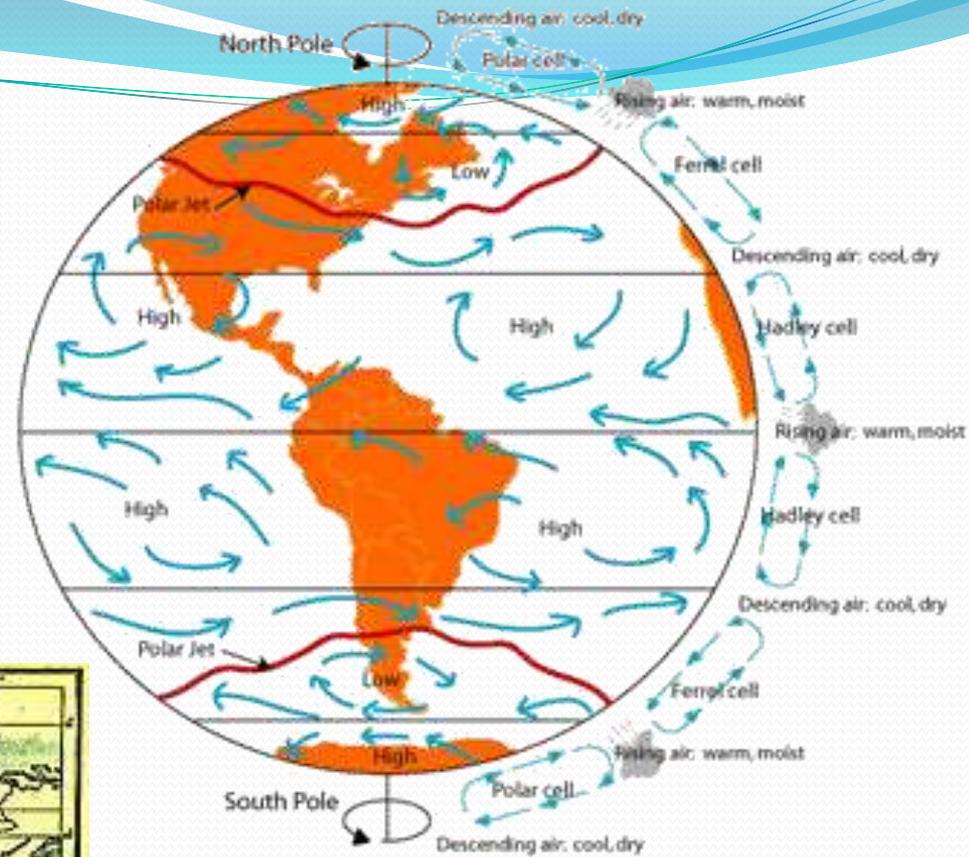
Circulação global

- Como a terra gira, por inércia, a atmosfera acaba ficando para traz.
 - A célula de Hadley fica inclinada no equador, formando os **Alísios**.
 - Já o ar que desce em latitudes mais altas está girando mais rápido que a chão (ele estava no EQ), e a circulação é ao contrário



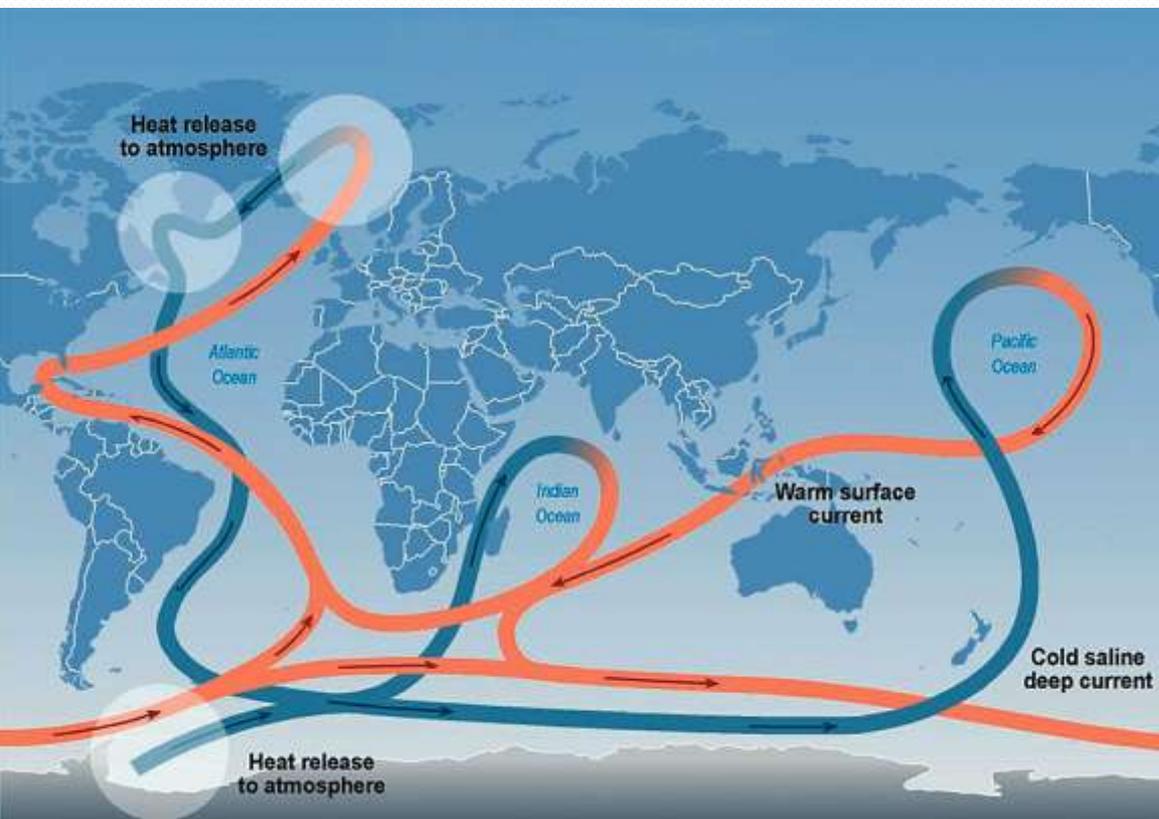
Circulação Global

- Os ventos próximos da superfície forçam o surgimento de correntes oceânicas



Circulação Oceânica

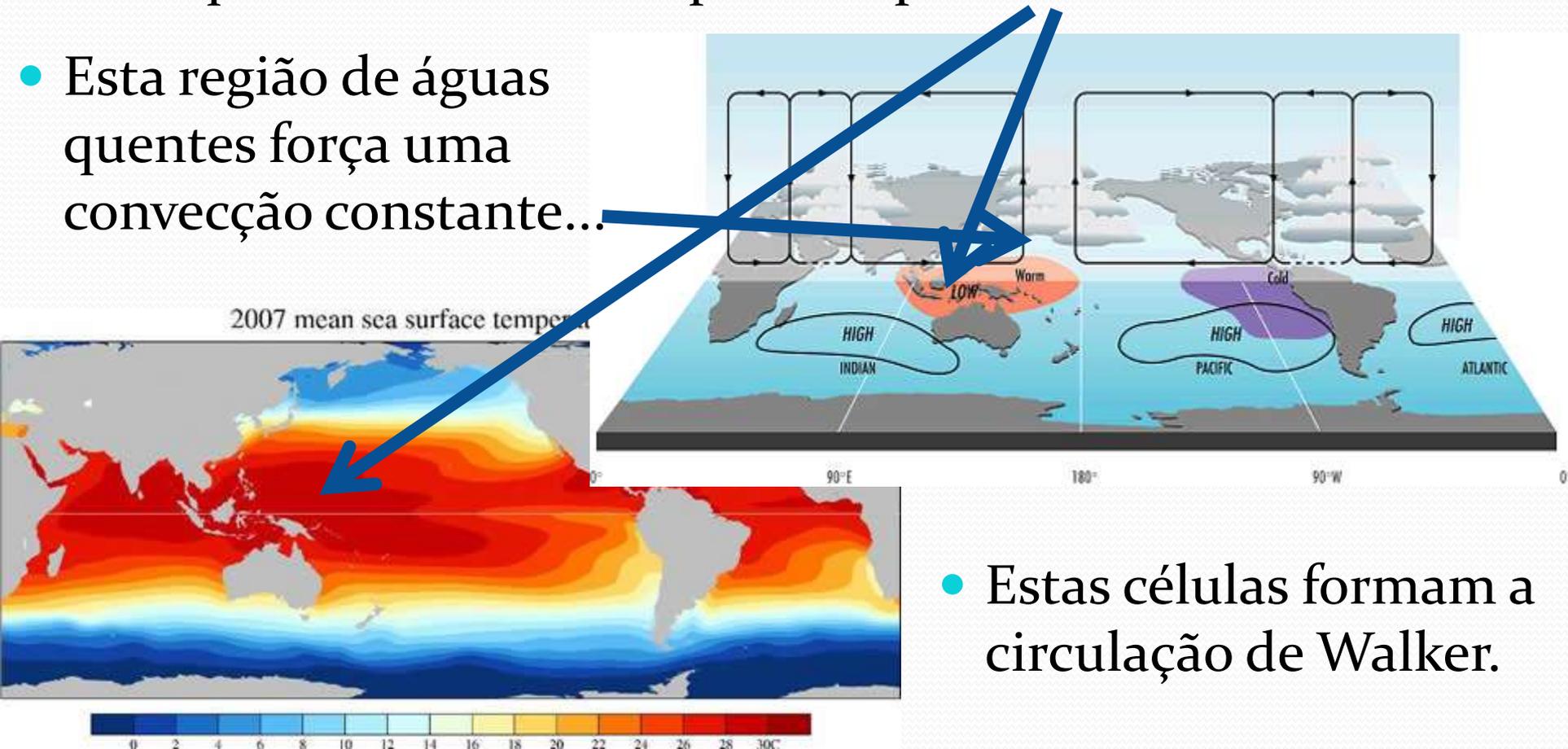
- As correntes oceânicas existem não só na superfície, mas também em águas profundas. É como um grande cinturão.



- As água superficiais são aquecidas pelo sol e levam a energia para outras regiões
- Por causa dessa corrente, a Europa é bem mais quente que o Canadá.

Circulação de Walker

- Devido a presença constante dos ventos alísios, a água mais quente vai sendo empurrada para oeste.
- Esta região de águas quentes força uma convecção constante...

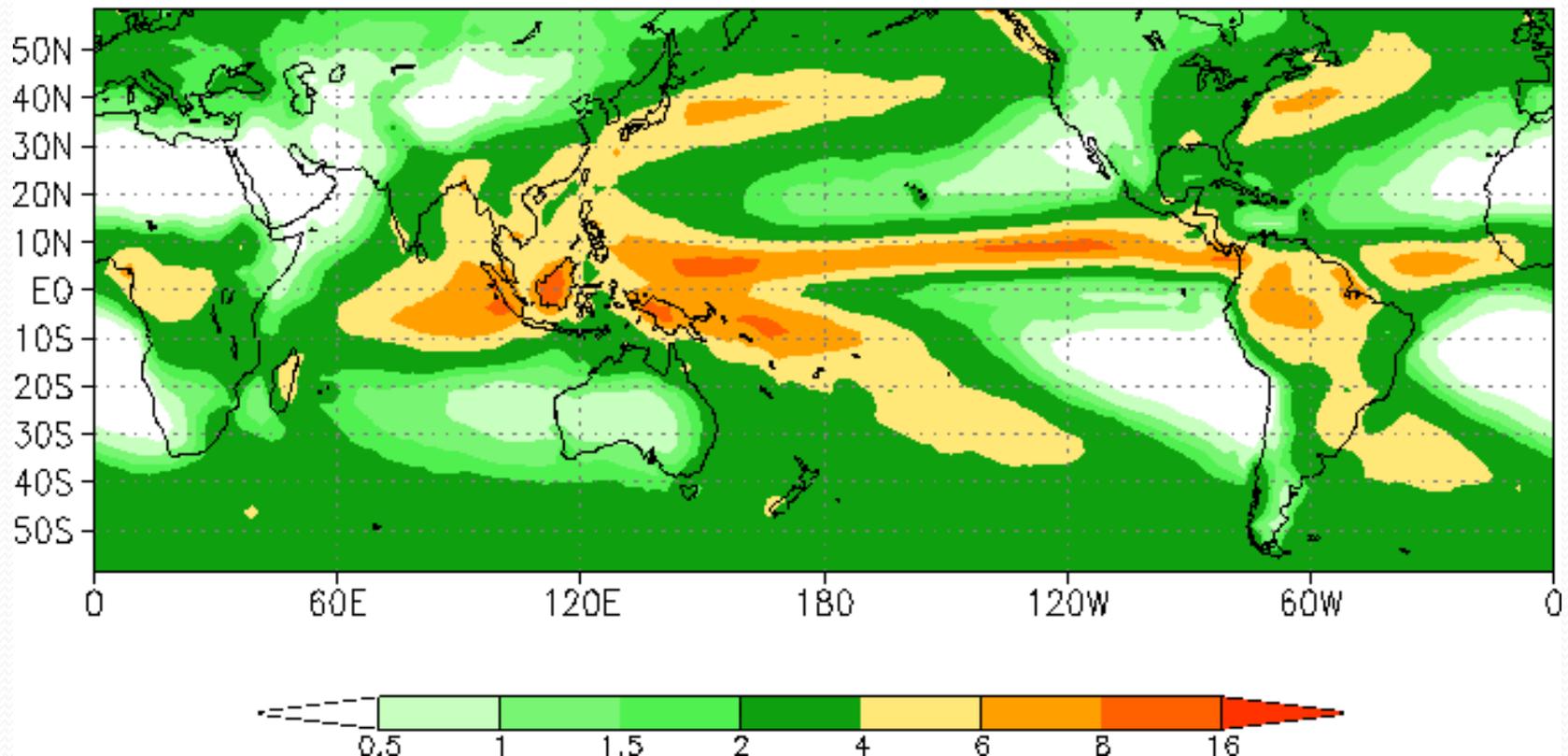


- Estas células formam a circulação de Walker.

Precipitação

- A distribuição global dos ventos, e principalmente de onde eles sobem e descem, determinam em grande parte a distribuição da precipitação

Pentad mean Precipitation (mm/day): Annual mean



Circulação da Atmosfera e do Oceano

- A terra recebe energia do sol, a maior parte chega na região tropical e é absorvida na superfície.
- Esse aquecimento desigual força o surgimento de ventos na atmosfera e de correntes no oceano.
- Esta circulação redistribui a energia

- Mas o que é um modelo numérico?
- Quais equações este modelo resolve?

✓ Como a atmosfera funciona??



Equações de Din. dos Fluídos

- A principal equação de dinâmica dos fluídos é a de Navier-Stokes. Derivada a partir da 2ª lei de Newton, estabelece a conservação do momento

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla T + f$$

Equação de estado do ar úmido

Pressão total é dada pela soma da pressão de ar seco e vapor:

$$p_a = p_d + p_v = \rho_d R' T + \rho_v R_v T = \rho_a R' T \frac{\rho_d + \rho_v R_v / R'}{\rho_a}$$

Juntando os termos, temos:

$$p_a = \rho_a R' T \frac{1 + \omega_v / \varepsilon}{1 + \omega_v} \quad \text{onde:} \quad \varepsilon = \frac{R'}{R_v} \quad \omega_v = \frac{\rho_v}{\rho_d}$$

E assim podemos escrever a pressão total como:

$$p_a = \rho_a R_m T$$

Onde a constante dos gases para o ar úmido é:

$$R_m = R' \frac{1 + \omega_v / \varepsilon}{1 + \omega_v} = R' (1 + 0.608 q_v)$$

Temperatura Virtual

- Assim, a equação de estado para o ar úmido pode ser escrita de duas maneiras:

$$p_a = \rho_a R_m T = \rho_a R' T_v$$

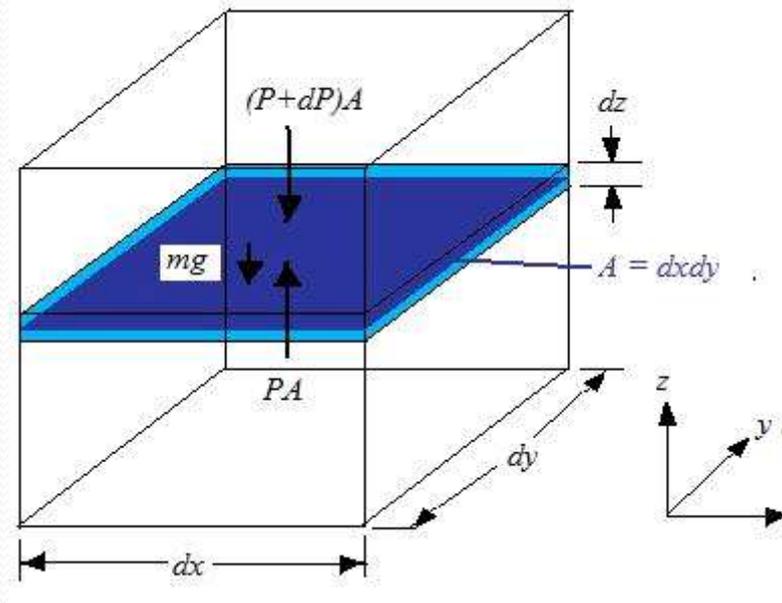
- T_v é a temperatura necessário para o ar seco ter a mesma pressão e densidade do ar úmido.

$$T_v = T \frac{R_m}{R'} = T \frac{1 + \omega_v / \varepsilon}{1 + \omega_v} = T \left(1 + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} q_v \right) = T (1 + 0.608 q_v)$$

Equação Hidrostática

- É a equação de movimento na ausência de aceleração verticais. É dada pelo equilíbrio entre a força gradiente de pressão e a gravidade

$$dp_a = -\rho_a g dz$$



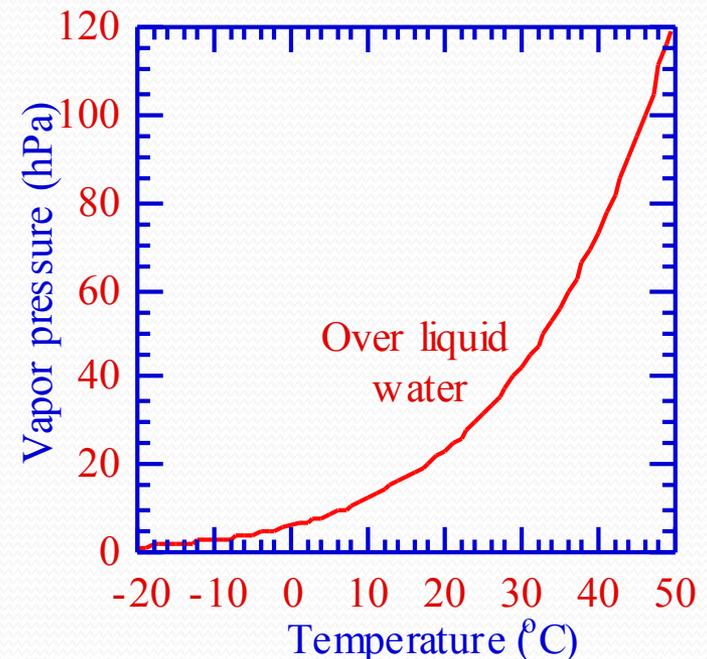
Equação de Clausius-Clapeyron

- A pressão de vapor de saturação varia com a temperatura:

$$\frac{dp_{v,s}}{dT} = \frac{\rho_{v,s}}{T} L_e$$

- E podemos encontrar uma expressão para ela:

$$p_{v,s} = 6.112 \exp\left(\frac{17.67T_c}{T_c + 243.5}\right)$$

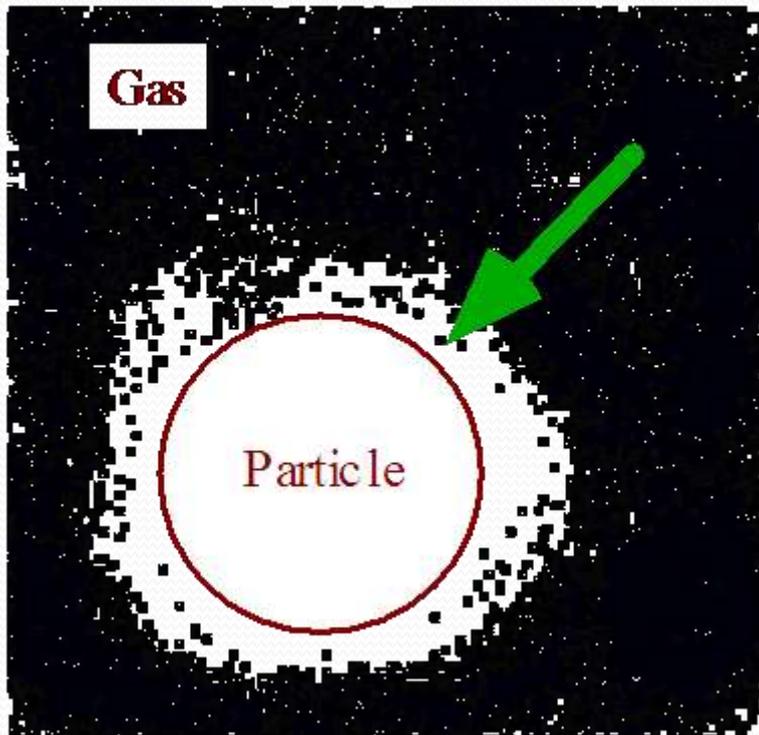


Condensação/Evaporação

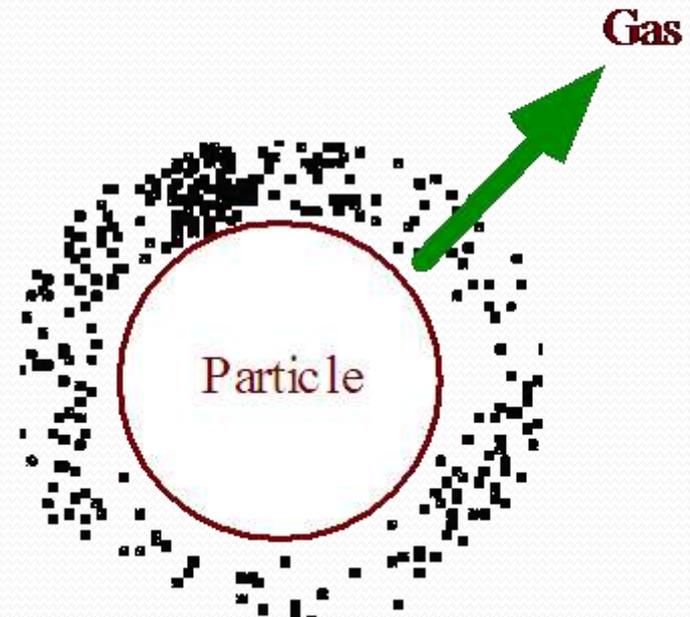
Condensação para $p_v > p_{v,s}$

Evaporação para $p_v < p_{v,s}$

Condensation

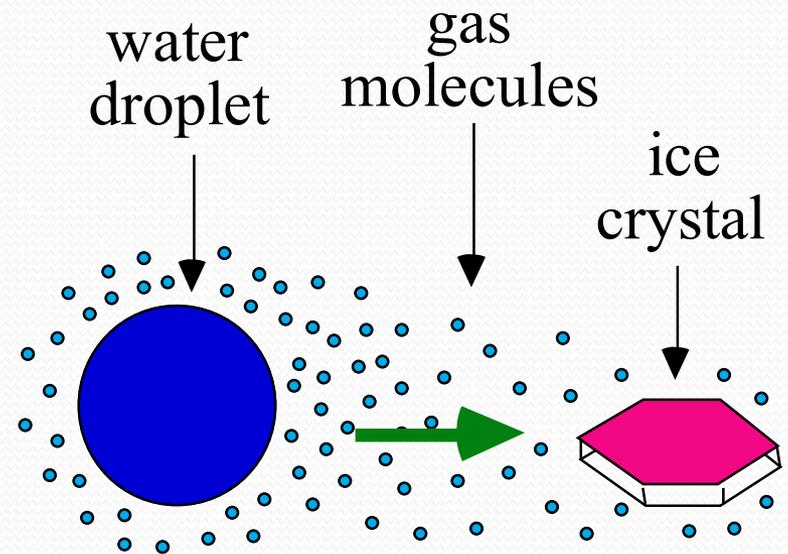
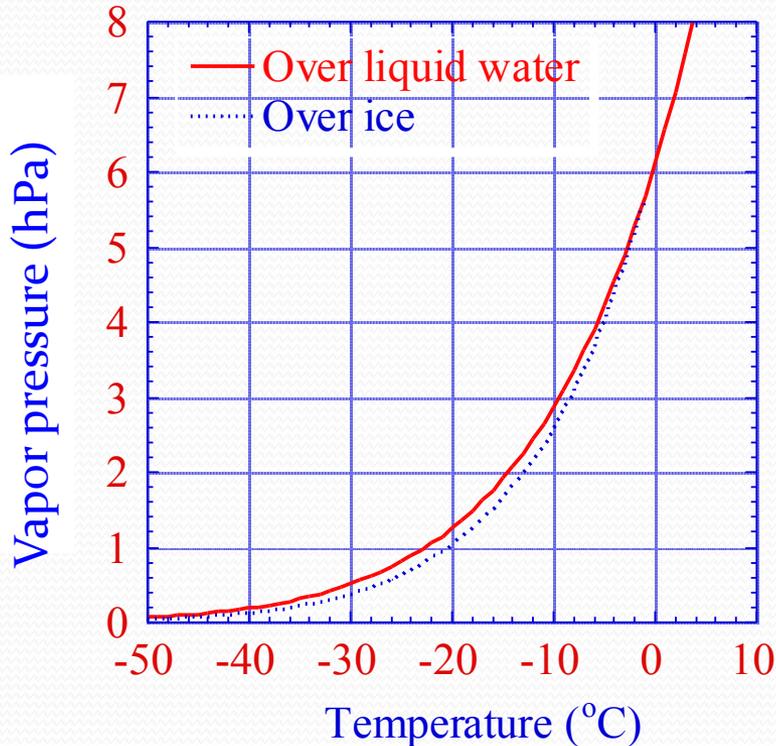


Evaporation



Formation of Rain in Cold Clouds

Ice Crystal (Bergeron) Process



- $p_{v,s}$ sobre gelo é menor que sobre água
- As gotas evaporam e o vapor flui para os cristais

1a lei da termodinâmica

- Não vamos mostrar toda a dedução, mas podemos definir uma temperatura potencial virtual

$$\theta_v = T_v \left(\frac{1000 \text{hPa}}{P_a} \right)^\kappa$$

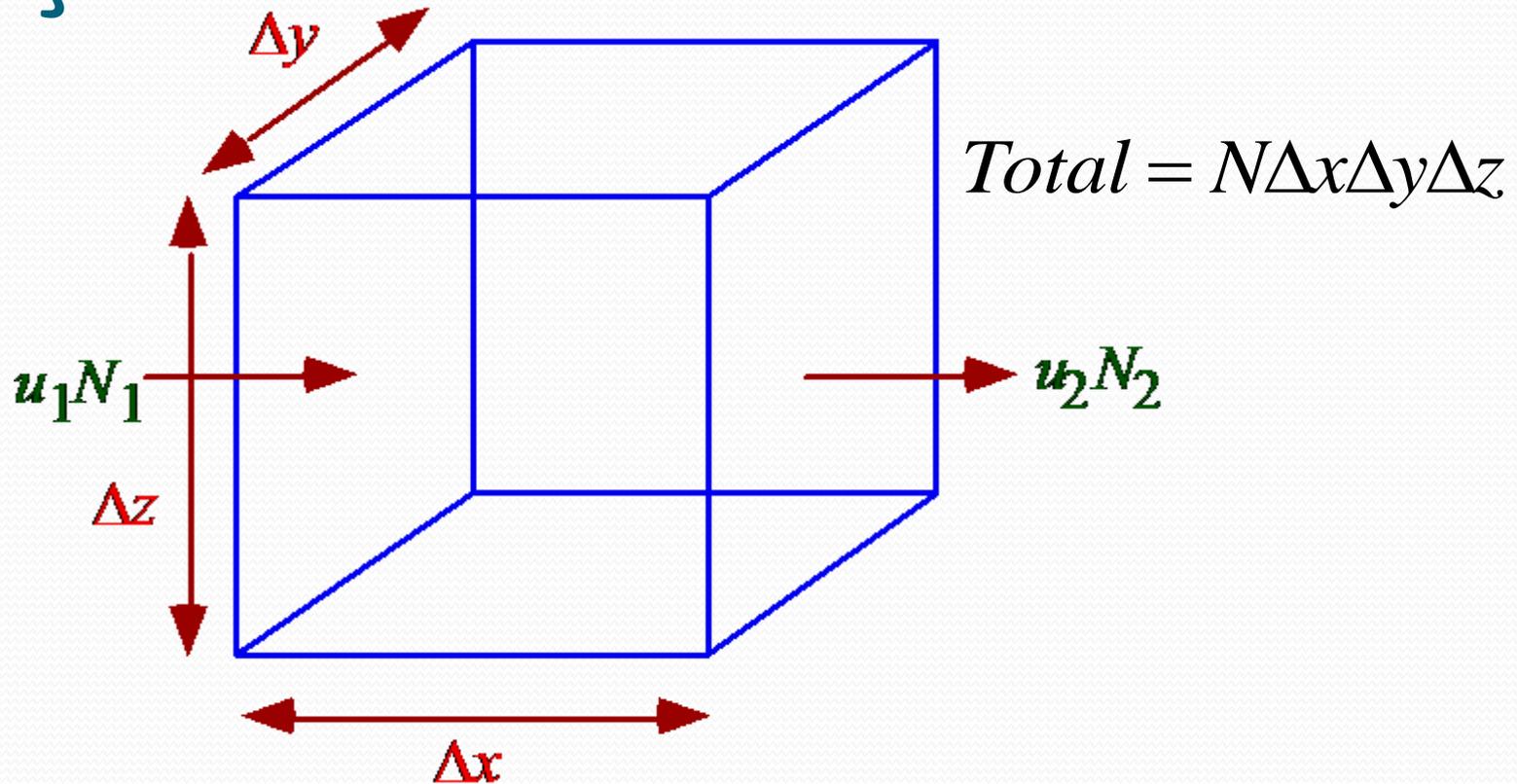
- Que já inclui a variação com a pressão e escrever a equação termodinâmica resolvida pelos modelos

$$\frac{d\theta_v}{dt} = \frac{1}{c_p^d} \frac{\theta_v}{T_v} \frac{dQ}{dt}$$

Quase lá...

- Já revimos quase todas as equações importantes para a atmosfera...
- Vamos deduzir a equação da continuidade, que será importante nas próximas aulas.

Equação da continuidade



Considerando apenas a direção x, temos:

$$\Delta N\Delta x\Delta y\Delta z = u_1 N_1 \Delta y\Delta z\Delta t - u_2 N_2 \Delta y\Delta z\Delta t$$

Equação da continuidade

Dividindo os dois lados por Δt e pelo volume ($\Delta x \Delta y \Delta z$)

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = - \left(\frac{u_2 N_2 - u_1 N_1}{\Delta x} \right)$$

E tomando o limite para $\Delta t, \Delta x \rightarrow 0$, encontramos

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \frac{\partial (uN)}{\partial x}$$

Que pode ser generalizado para escrever a equação de conservação na forma de divergência do fluxo

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{V}N)$$

Similar a conservação de carga elétrica

Equação da continuidade

Como a massa de cada molécula não muda

$$\rho = \frac{Nm}{N_A} \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{V})$$

Usando a regra da cadeia

$$\nabla \cdot (\mathbf{v} \rho) = \rho (\nabla \cdot \mathbf{v}) + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \rho$$

Dá definição de derivada total:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho$$

Transporte do
gradiente

Substituindo, chegamos a forma da divergência da velocidade:

Lagrangiano

$\frac{d}{dt}$

$\rho(\mathbf{v})$

Euleriano

$\frac{d}{dt}$

$\rho_a (\nabla \cdot \mathbf{v})$

Continuidade da umidade específica

A umidade específica é dada por

$$\rho_v = q_v \rho_{ar}$$

Substituindo na equação da continuidade, temos:

$$\partial(q\rho_a) / \partial t = -\nabla \cdot (\mathbf{v}q\rho_a)$$

$$q \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \rho_a = -q \nabla \cdot (\mathbf{v} \rho_a) - \rho_a \mathbf{v} \cdot \nabla q$$

Assim a equação para a umidade específica fica:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla q \Rightarrow \frac{dq}{dt} = 0$$

Detalhes

- Assumimos que o fluxo era dado pelo (Vento * N), mas também há um fluxo devido a difusão molecular.
- Pela lei de Fick:

$$\mathbf{F}\psi = -D\nabla\psi$$

$$D \approx 0.2 \text{ cm}^2/\text{s}$$

- Onde D é o coeficiente de difusão molecular.
- Também esquecemos das fontes e sumidouros.
Considerando tudo junto, temos:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\nabla \cdot (N\mathbf{v}) + D\nabla^2 N + F - S$$

Para o vapor de água

- Na troposfera e na estratosfera, o termo de difusão é desprezível pois o livre caminho médio das moléculas é muito pequeno.

Mov. Browniano
(Einstein)

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2D} = \frac{(1m)^2}{2 \cdot 0.2cm^2 / s} \approx 30dias$$

- Assim:

$$\frac{dq}{dt} = F - S$$

- A forma lagrangeana (d/dt) muito simples é o que está nas bases dos modelos de parcela.

Conservação

- A equação de conservação de massa é semelhante a conservação de momento:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\nabla \cdot (N\mathbf{v}) + D_N \nabla^2 N + F_N - S_N$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla q + D_q \nabla^2 q + F_q - S_q$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + \nu \nabla^2 \mathbf{v} - \frac{\nabla P}{\rho} + \mathbf{g}$$

Fontes e sumidouros de momento: 2ª lei de Newton

Equações que regem a atmosfera

$$dp_a = -\rho_a g dz$$

$$p_a = \rho_a R' T_v$$

$$\frac{d\theta_v}{dt} = \frac{1}{c_p^d} \frac{\theta_v}{T_v} \frac{dQ}{dt}$$

$$T_v = T(1 + 0.608q_v)$$

$$\theta_v = T_v \left(\frac{1000 \text{ hPa}}{p_a} \right)^\kappa$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} - \frac{\nabla P}{\rho} + \mathbf{g}$$

Equações de Din. dos Fluídos

- Estas equações juntas podem descrever o movimento
 - da atmosfera,
 - das correntes oceânicas,
 - da água em um cano,
 - do ar passando sobre uma asa
 - das estrelas em uma galáxia

• Mas o que é um modelo numérico?

✓ Quais equações este modelo resolve?

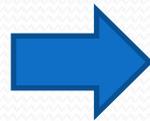
✓ Como a atmosfera funciona??



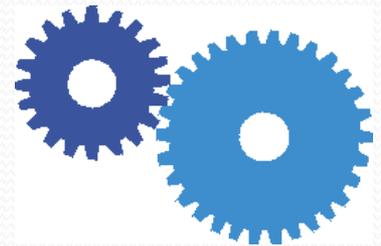
Previsão de Tempo Global

Precisamos:

- Equações que descrevem a física da atmosfera
- Escrever um programa para resolvê-las
- Um bom computador



Compilador



Código fonte:
um texto escrito em
uma linguagem de
programação

**Programa
executável:**
Linguagem de
máquina

Previsão de Tempo Global

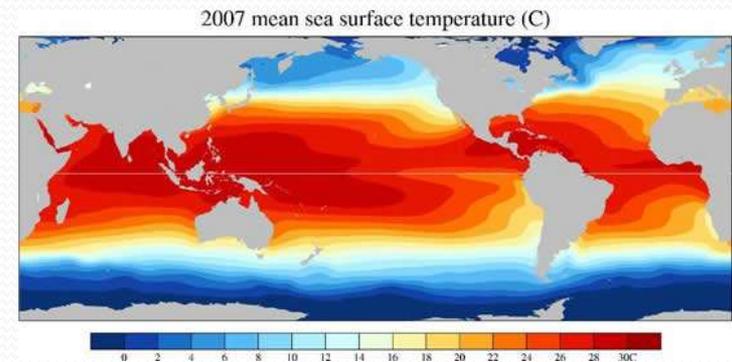
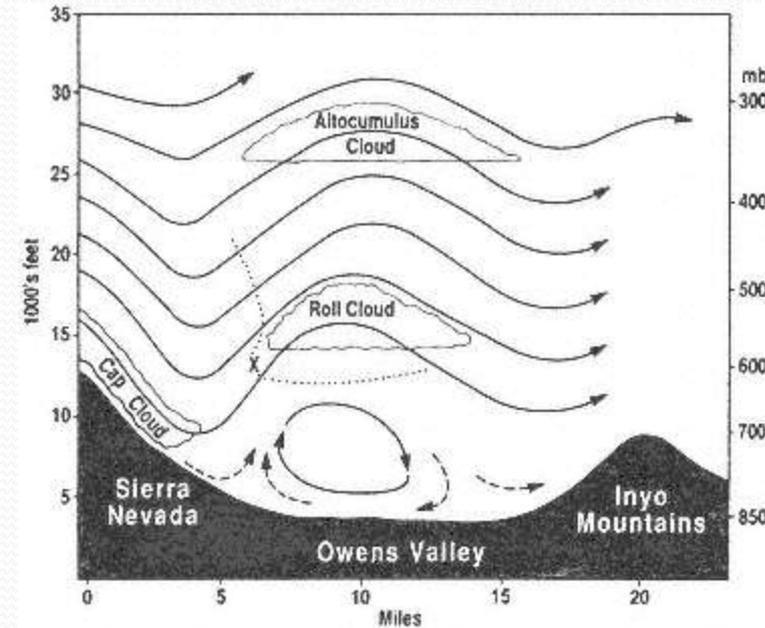
Precisamos:

- Equações que descrevem a física da atmosfera
- Escrever um programa para resolvê-las
- Um bom computador

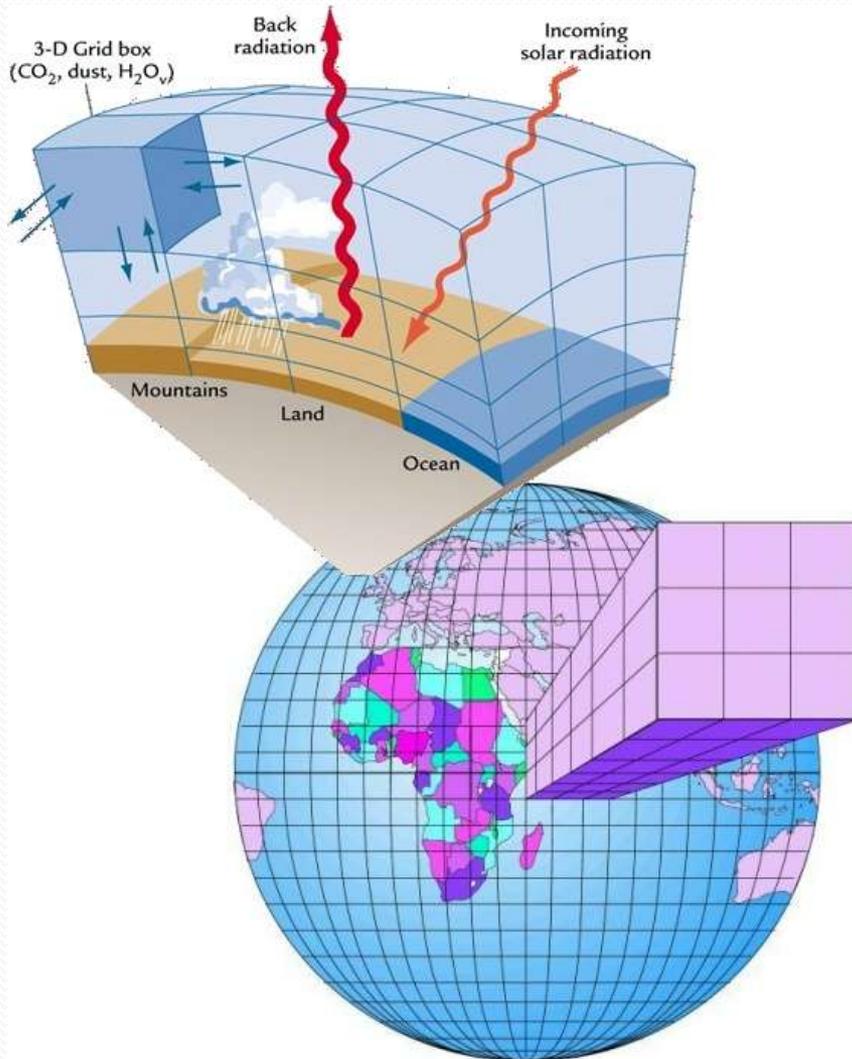


Solução

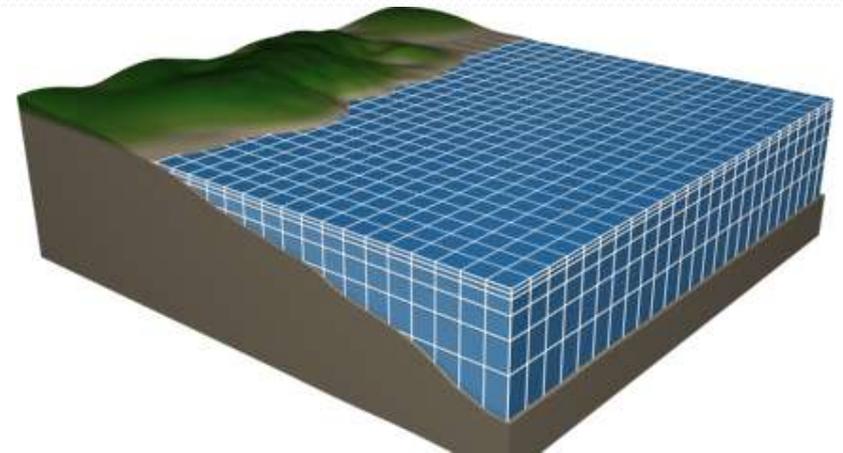
- Para resolver as equações
- A solução depende das:
 - Condições iniciais
 - Estado inicial da atmosfera
 - Condições de contorno:
 - Relevo
 - Concentração dos gases
 - Temperatura da superfície do mar



Como resolver



- Para resolver as equações no computador, precisamos dividir o problema em pequenos pedaços (**discretização numérica**).
- As equações são calculadas apenas nos pontos definidos por essa **grade**.

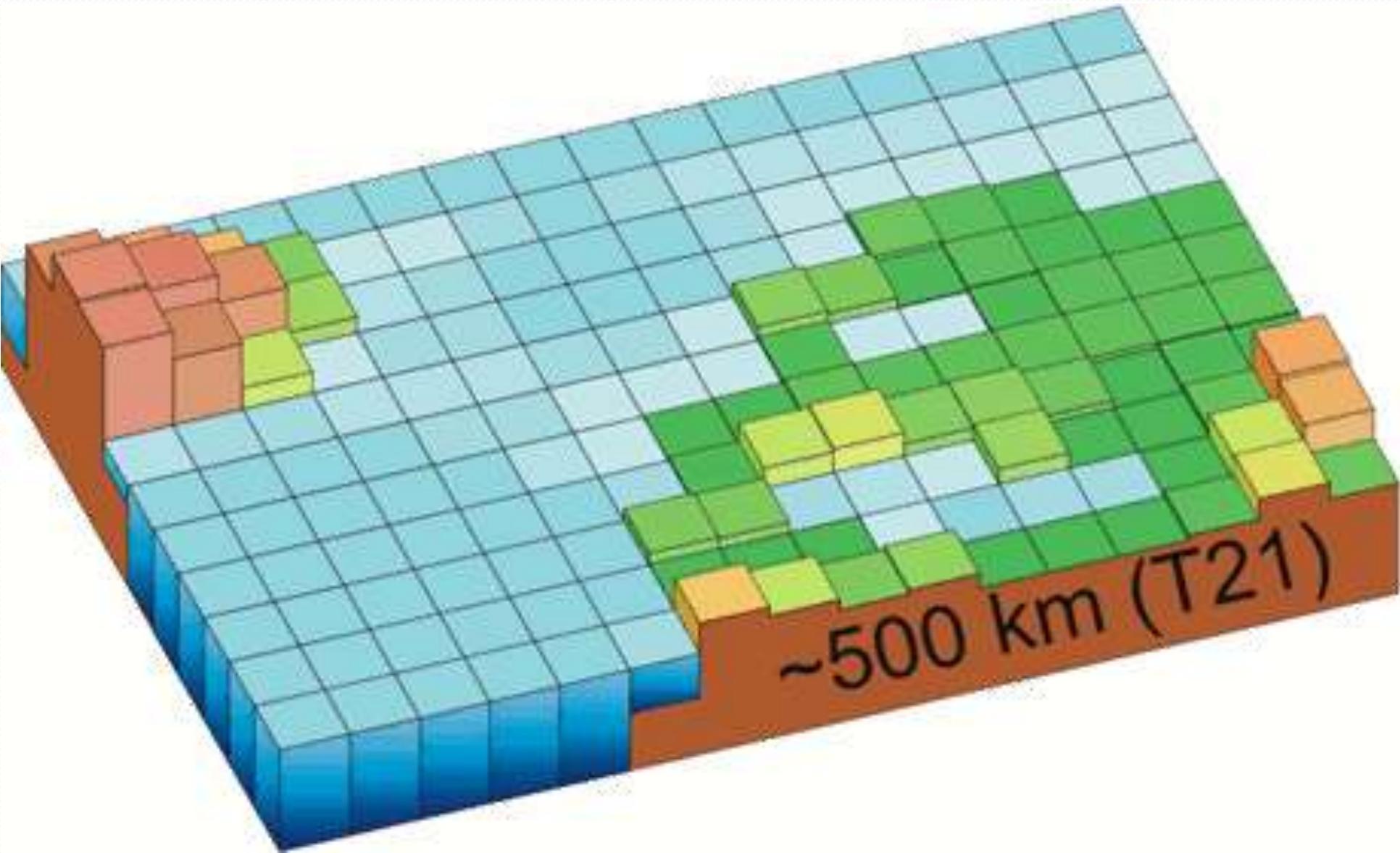


O resultado da previsão é bom??

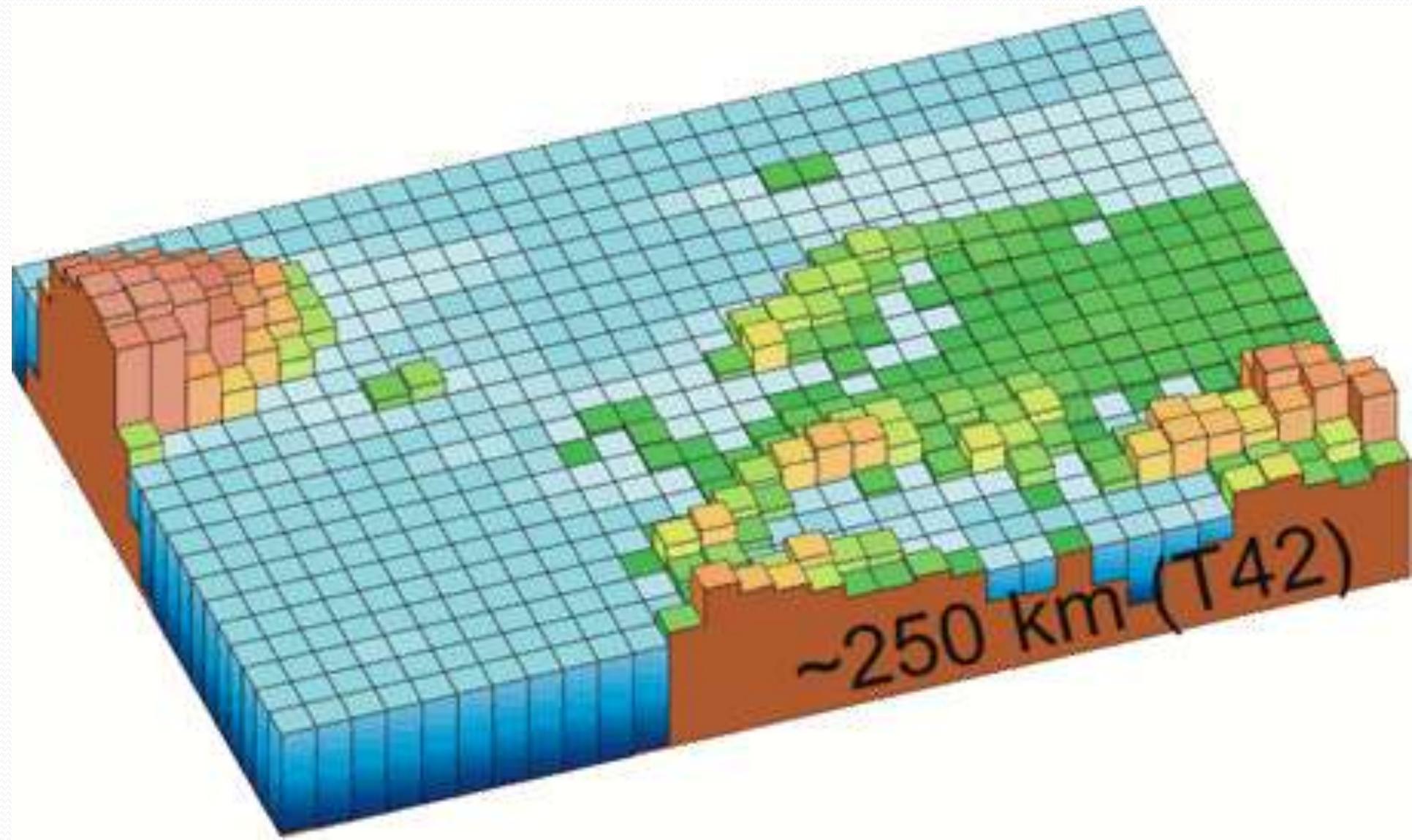
A qualidade da nossa solução (previsão de tempo) vai depender de vários fatores:

- A **resolução** espacial e temporal adequada

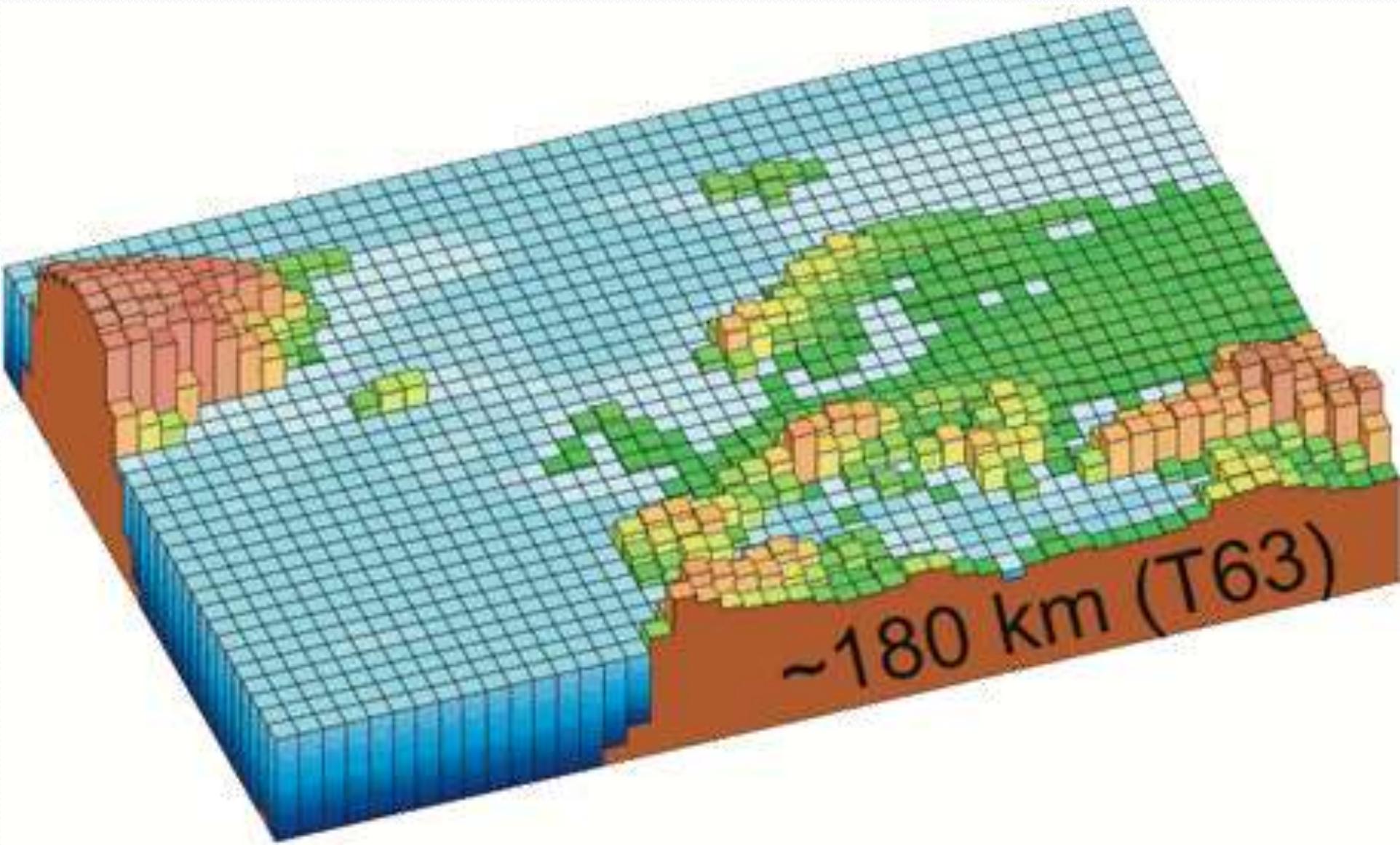
Resolução espacial



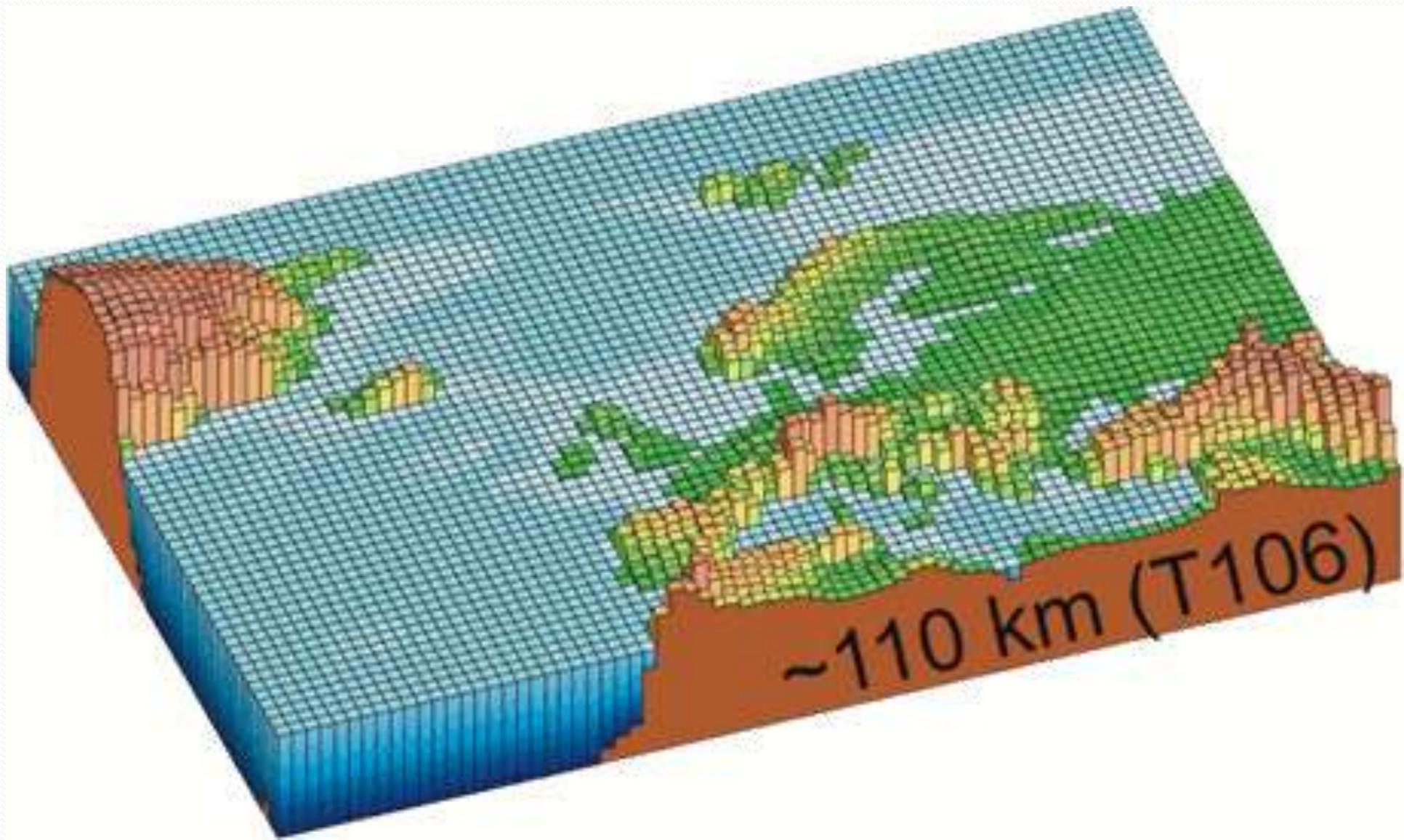
Resolução espacial



Resolução espacial



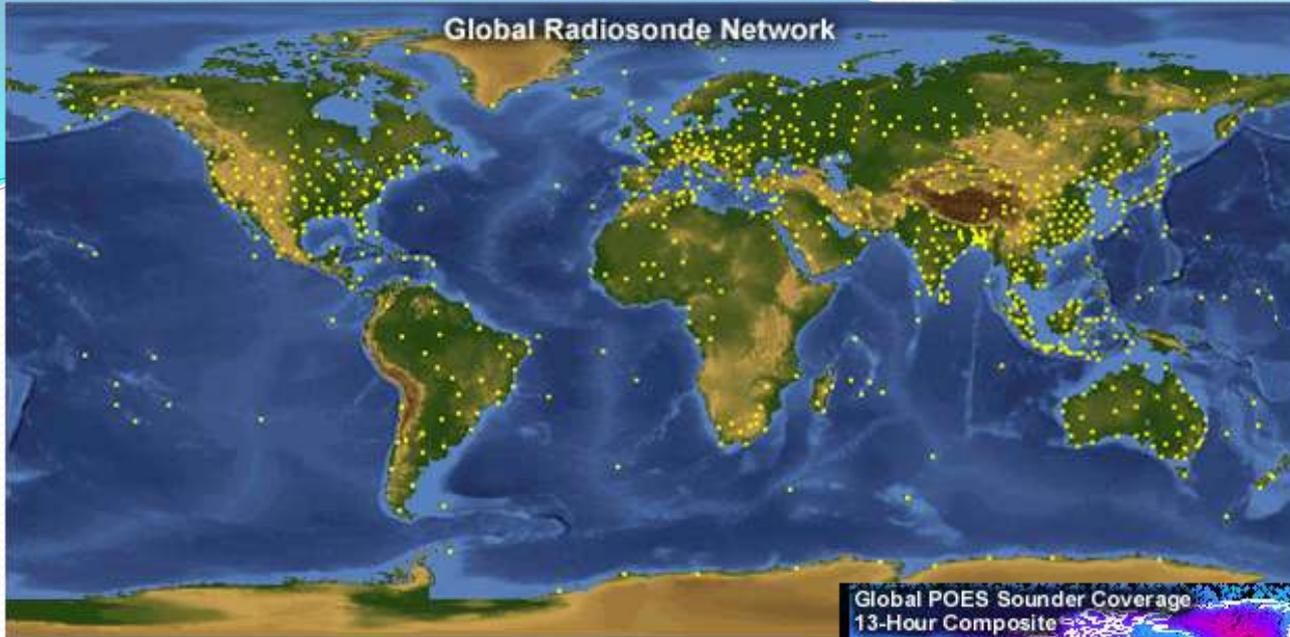
Resolução espacial



O resultado da previsão é bom??

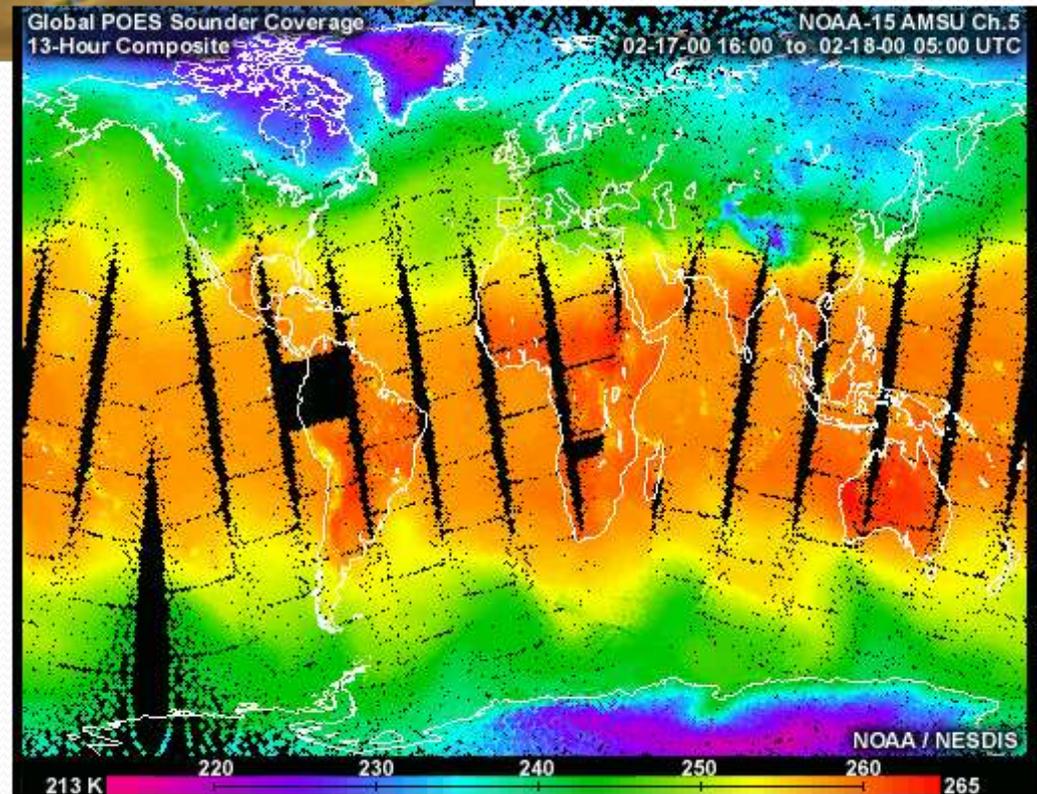
A qualidade da nossa solução (previsão de tempo) vai depender de vários fatores:

- ✓ A **resolução** espacial e temporal adequada
- Qualidade da condição inicial
 - Melhorou muito com os satélites a partir de 1970
 - É o limitante da qualidade hoje em dia



Radio sondagens,
esforço de muitas
pessoas, todos os
dias

Apenas 1 satélite
nos dá muito mais
informações



O resultado da previsão é bom??

A qualidade da nossa solução (previsão de tempo) vai depender de vários fatores:

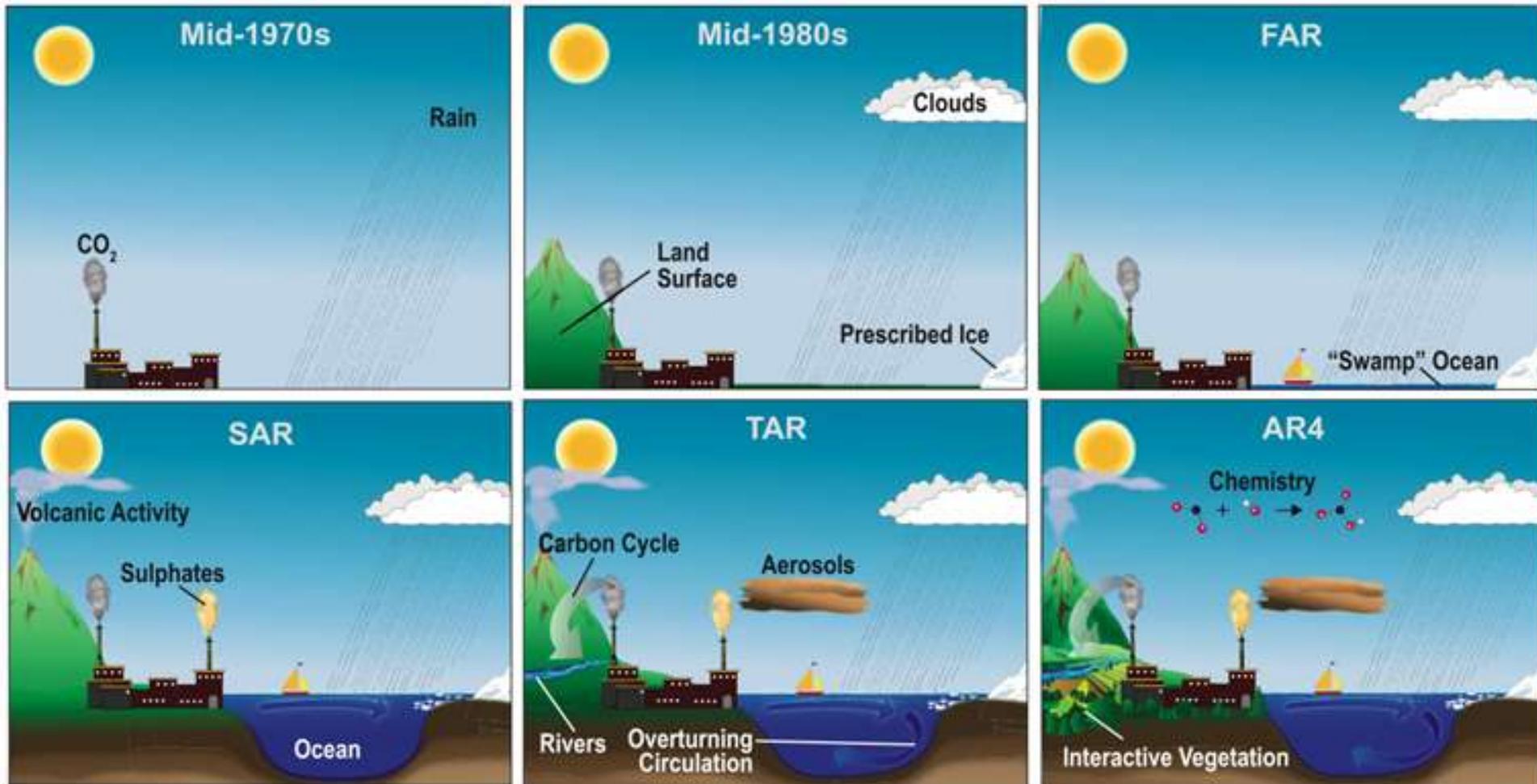
- ✓ A **resolução** espacial e temporal adequada
- ✓ Qualidade da condição inicial
 - Melhorou muito com os satélites a partir de 1970
 - É o limitante da qualidade hoje em dia
- Processos físicos incluídos
 - Radiação
 - Dinâmica dos fluídos
 - ...

Quais processos físicos incluir depende do problema que queremos resolver!

Processos Físicos

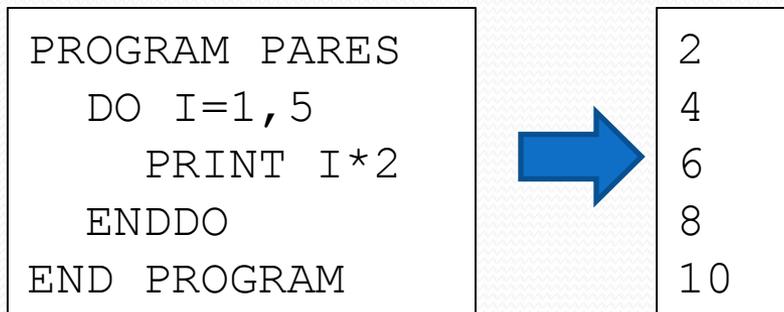
- Quais processos físicos incluir depende do problema que queremos resolver!
- Exemplo:
 - Para previsão de tempo de 5 dias, podemos considerar que a temperatura da superfície do mar não vai mudar, ela é uma condição de contorno.
 - Para uma previsão de vários meses (clima), isso não é verdade!! Nesse caso precisamos de um **modelo oceânico** para prever as correntes marinhas, a absorção de energia, e a **temperatura da superfície do mar**.

Evolução dos modelos atmosféricos

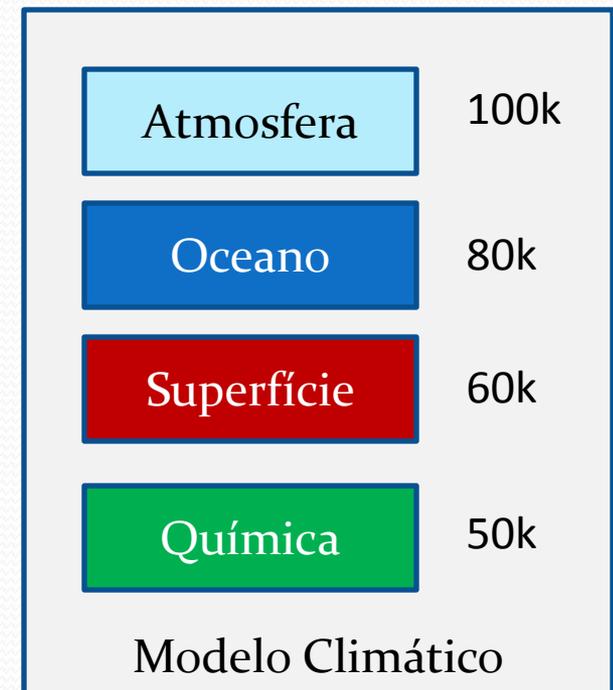


Complexidade Computacional

- A complexidade de um modelo atmosférico é tão grande e seu desenvolvimento envolve tantos pesquisadores que é fácil alguém cometer um erro de programação.



Programa de 3 linhas para escrever na tela os 5 primeiros números pares



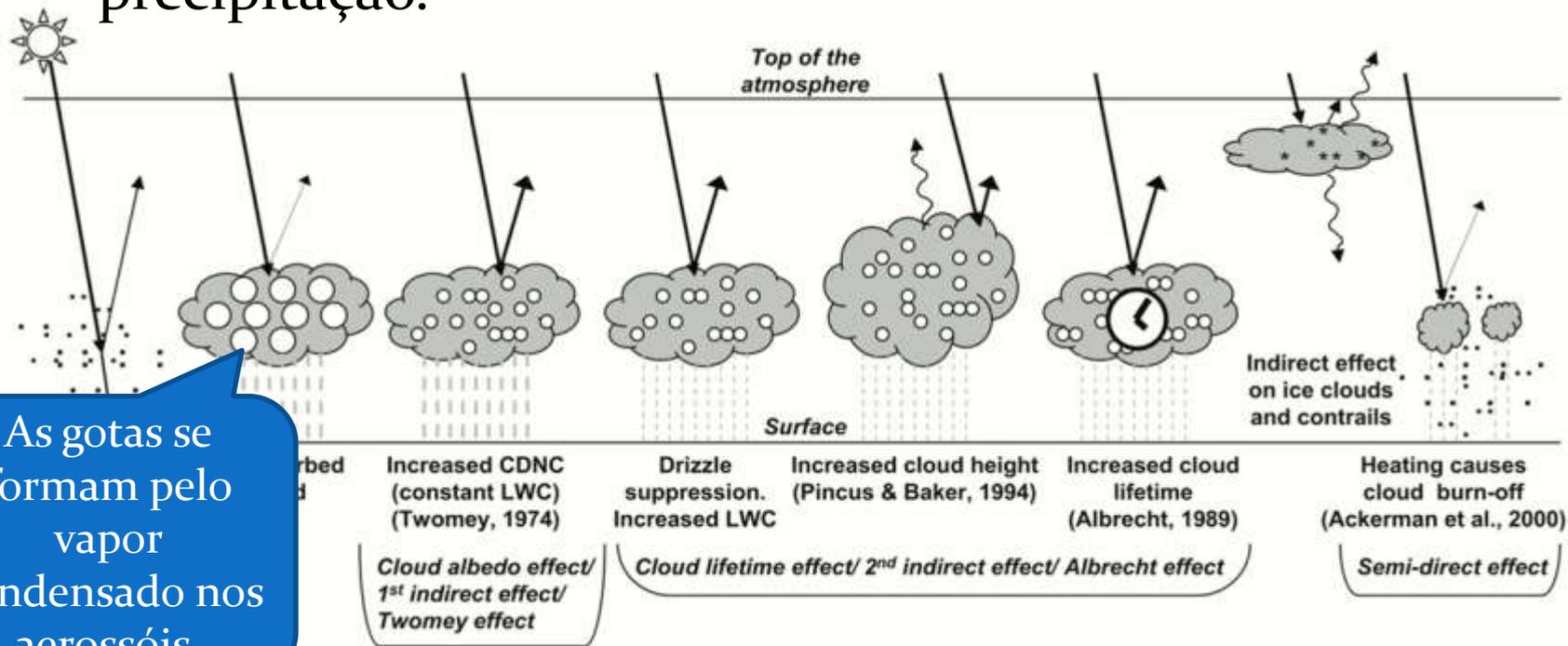
100-300 MIL linhas de código

Retroalimentação

- Cada um destes **processos** está ligado a alguma **interação** existente no **sistema climático terrestre**
 - Os ventos sobre o mar mudam sua temperatura \Leftrightarrow a temperatura do mar força a precipitação, que influi no vento
 - A vegetação determina quanto de água é evaporada para a atmosfera \Leftrightarrow as chuvas molham o chão deixando-os úmidos e mais propícios a evaporarem
 - Uma queimada liberada fuligem na atmosfera \Leftrightarrow essa fuligem prejudica a formação de nuvens e reduz a chuva, deixando a vegetação mais propícia ao fogo
 - Etc...

Mas não conhecemos tudo...

- Se conhece pouco os efeitos dos aerossóis (partículas de poeira, poluição, etc...) nas nuvens e menos ainda na precipitação.

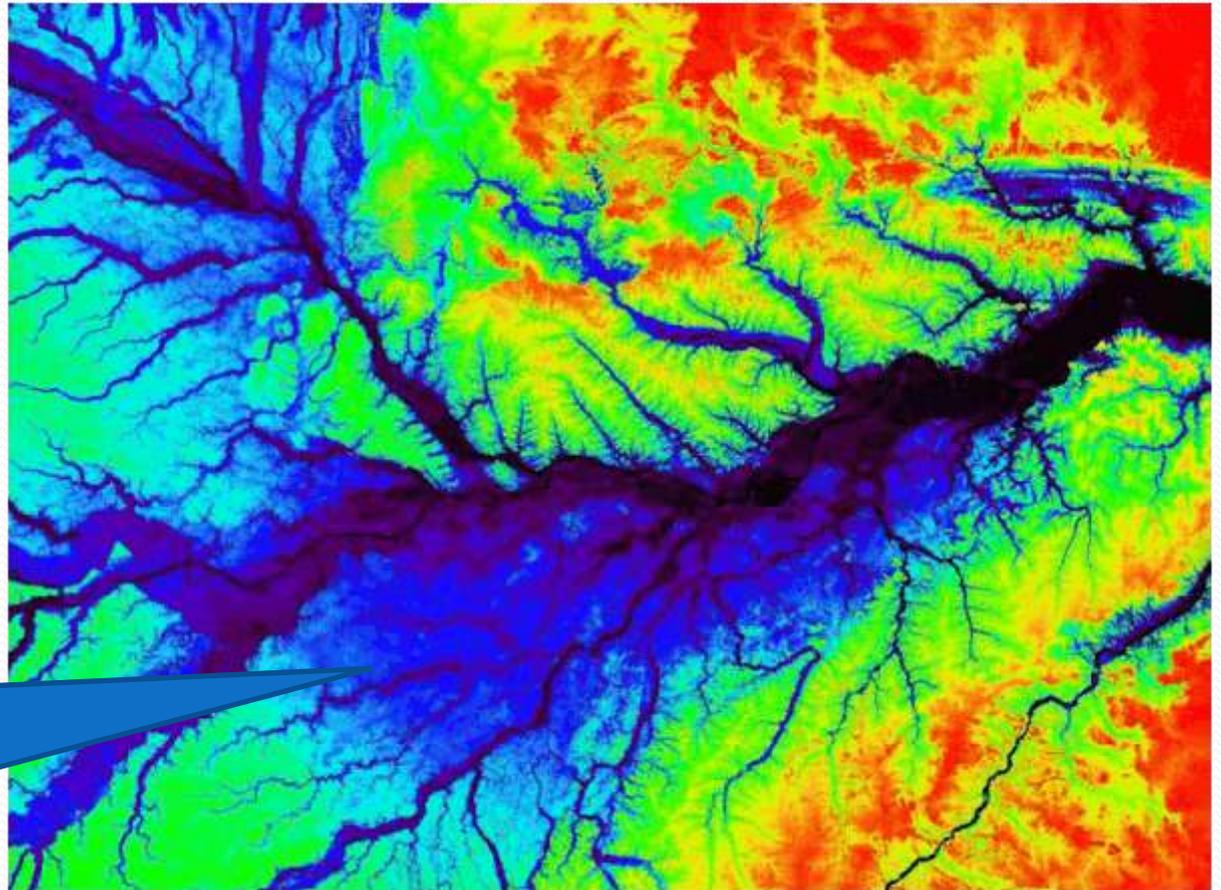


O que acontece se aumentar ou diminuir a poluição?

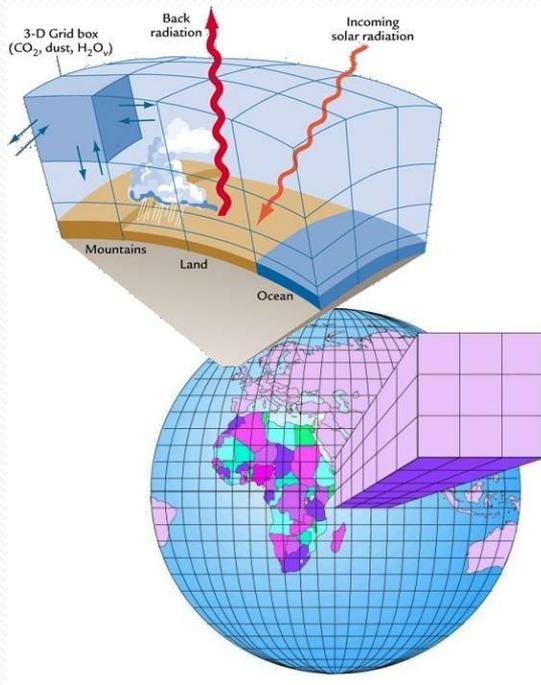
Mas não conhecemos tudo...

- Quando modelamos a floresta, não incluímos as área alagadas!

Como as área alagadas modificam a evaporação e a temperatura da floresta?



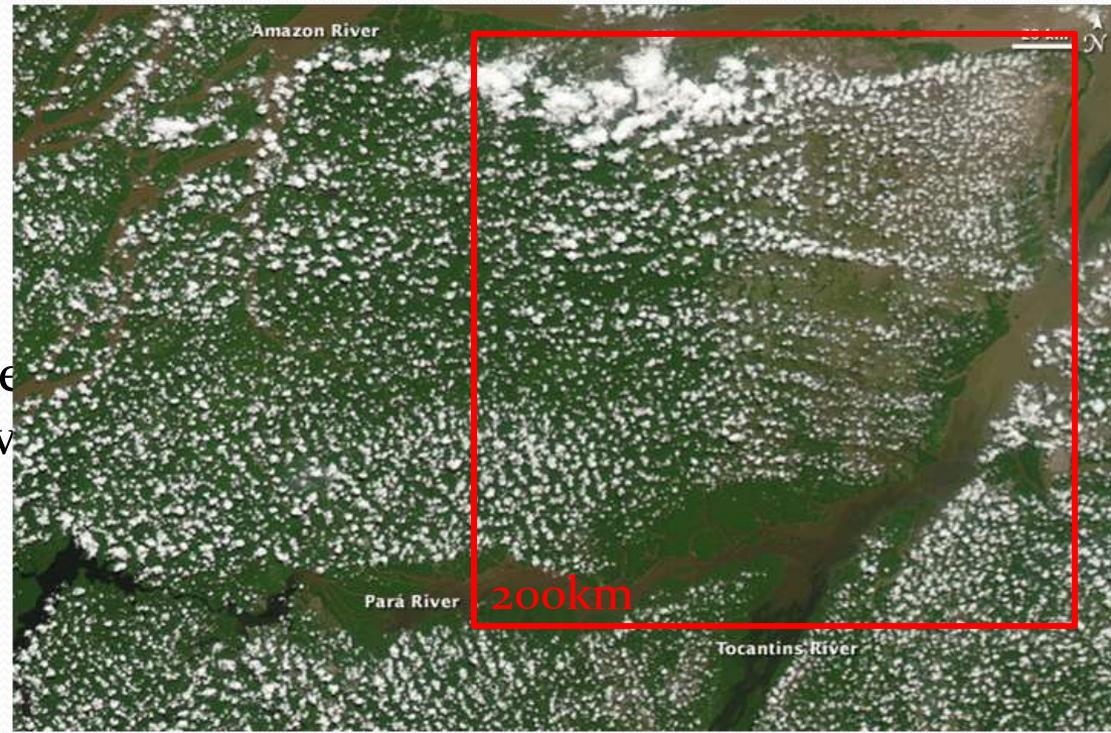
Como incluir processos sub-grade?



- Nossas equações só conseguem resolver o que pode ser representado usando os pontos que escolhemos!

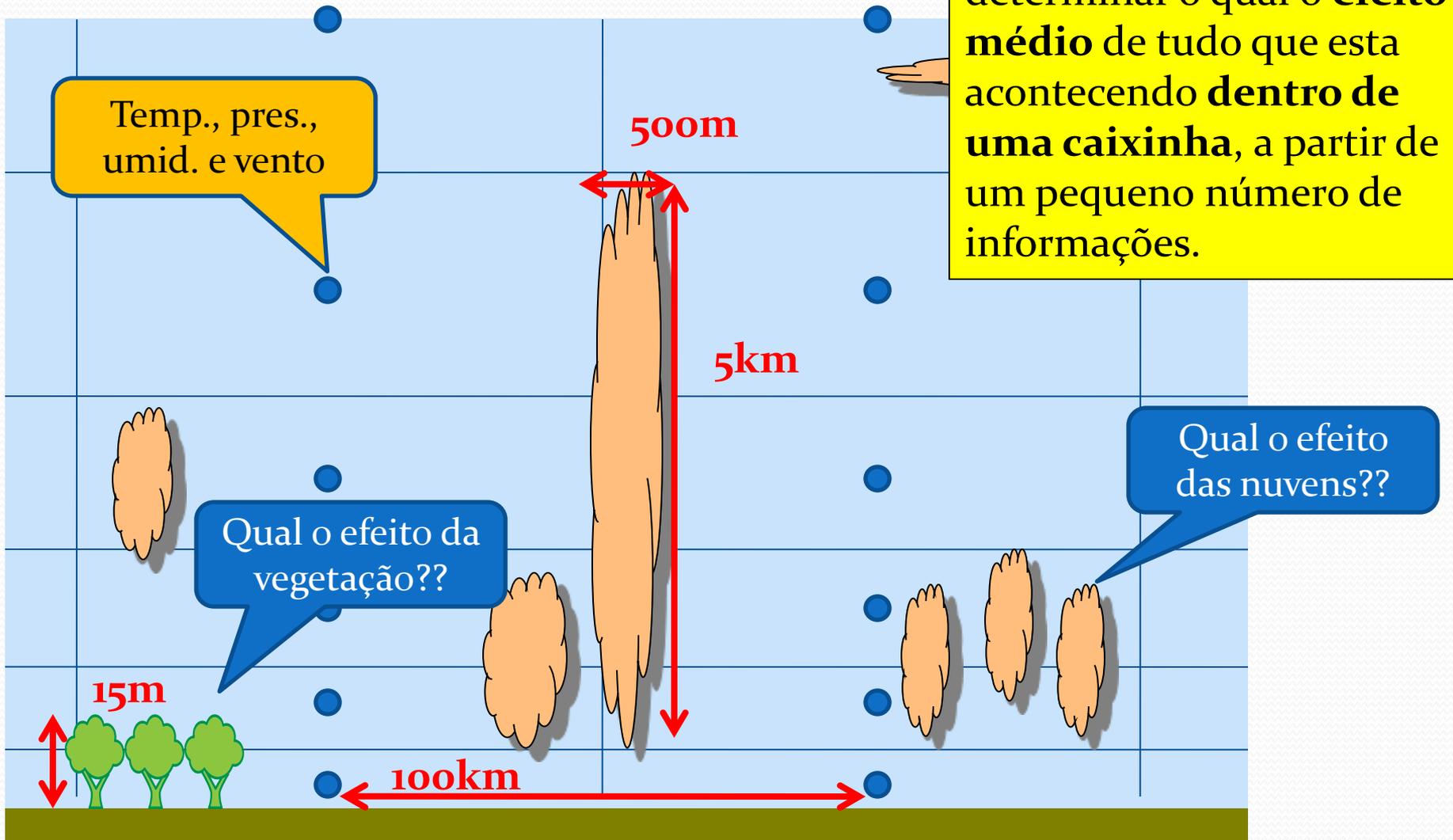
Como representar
as nuvens

Como representar
a floresta?



Parametrização

Parametrização é um conjunto de equações empíricas usadas para determinar o qual o **efeito médio** de tudo que esta acontecendo **dentro de uma caixinha**, a partir de um pequeno número de informações.



Temp., pres.,
umid. e vento

500m

5km

Qual o efeito da
vegetação??

Qual o efeito
das nuvens??

15m

100km

Parametrização

- Os chamados “processos físicos”, como:
 - convecção, interação da vegetação com a atmosfera, absorção e espalhamento da radiação pelos gases e aerossóis, reações químicas, etc...
- ... acontecem geralmente em escalas sub-grade e precisam, portanto, serem parametrizados!
- Apenas modelos de altíssima resolução conseguem resolver explicitamente alguns destes processos.

↑ Resolução ↓

- Modelos climáticos de baixa resolução representam razoavelmente a atmosfera, **mas tem problemas:**
 - Representação da convecção com parametrizações
 - Representação da interação aerossol-nuvem
 - Representação da interação biosfera-atmosfera

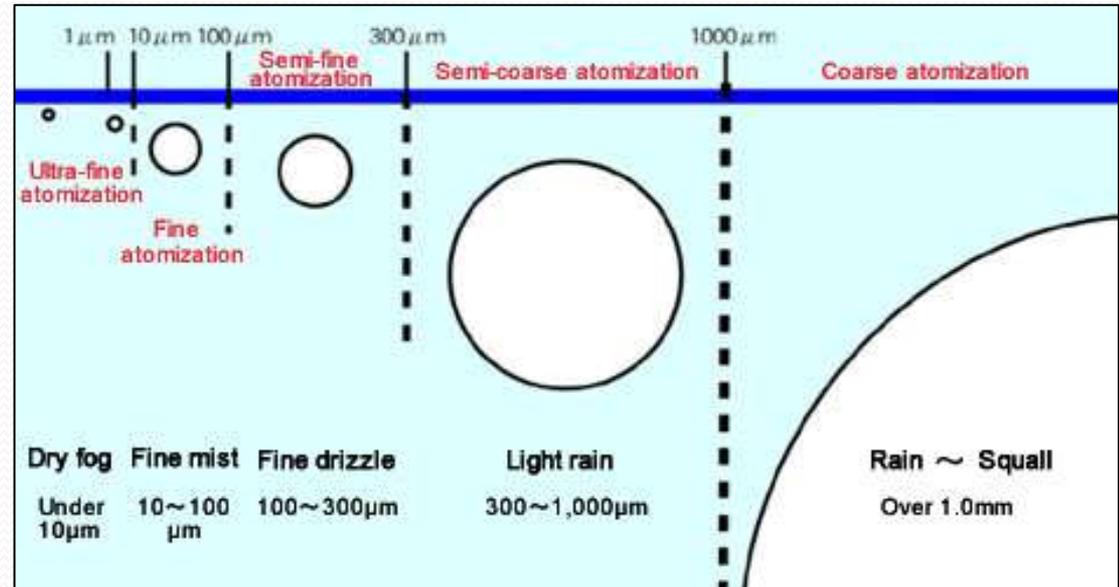
Exemplo 1 - Convecção

Normalmente os modelos incluem:

- Dinâmica sofisticada com parametrização de convecção (CPTEC-AGCM)
- Dinâmica sofisticada com microfísica simplificada (BRAMS): **bulk microphysics**
- Dinâmica simplificada com um microfísica elaborada; resolvem a distribuição de tamanhos explicitamente (TauBin/Kid): **bin microphysics**
- Sem dinâmica, mas equações explícitas (parcela): **single particle microphysics**
- Incluem uma microfísica detalhada junto com uma dinâmica também detalhada (e.g. Grabowski's **super-parameterização**) mas são muito custosos computacionalmente.

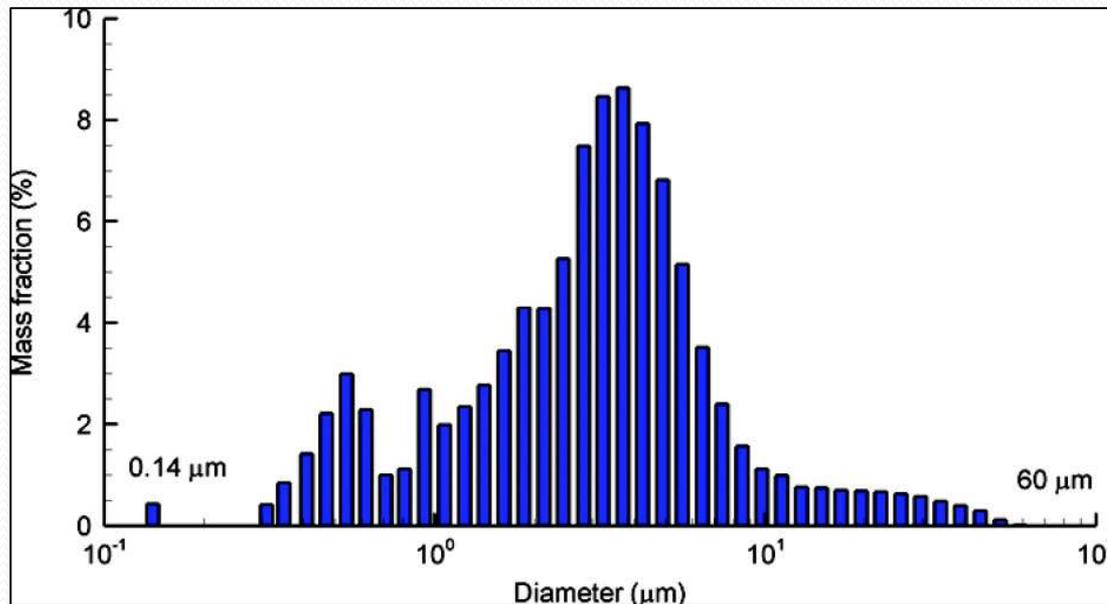
Single Particle Microphysics

- Muito detalhados em termos da descrição microfísica da nuvem, pois resolvem explicitamente as equações explícitas
- Mas são modelos do tipo parcela, sem dinâmica, sem mistura vertical ou lateral



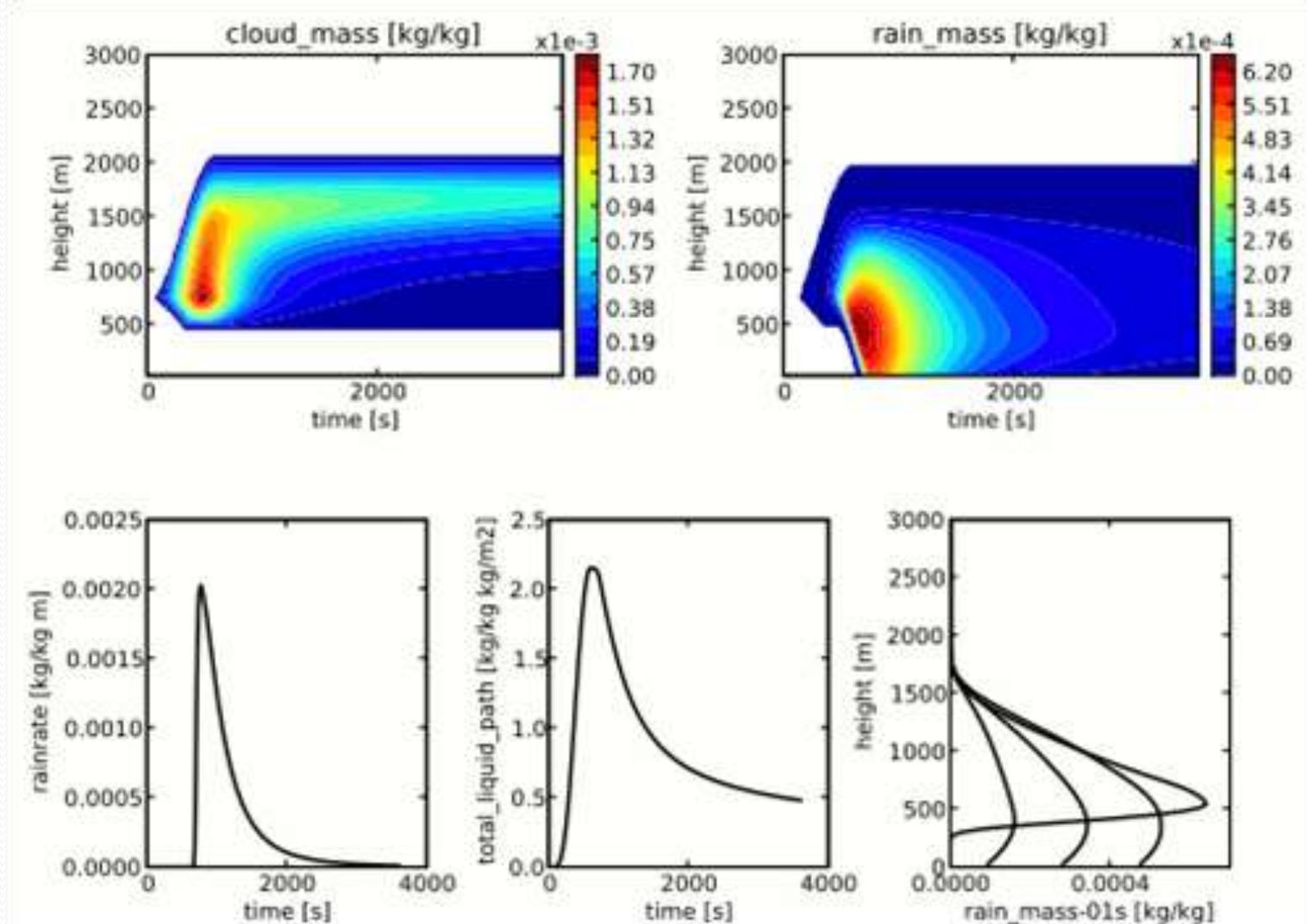
Microfísica explícita – BINS

- Resolvem a distribuição de tamanhos explicitamente, dividindo o espectro de tamanhos em intervalos discretos.



- Geralmente são usados em modelos com uma dinâmica bastante simplificada, ou mesmo em modelos 1D (coluna) forçados pela tendência de grande escala.

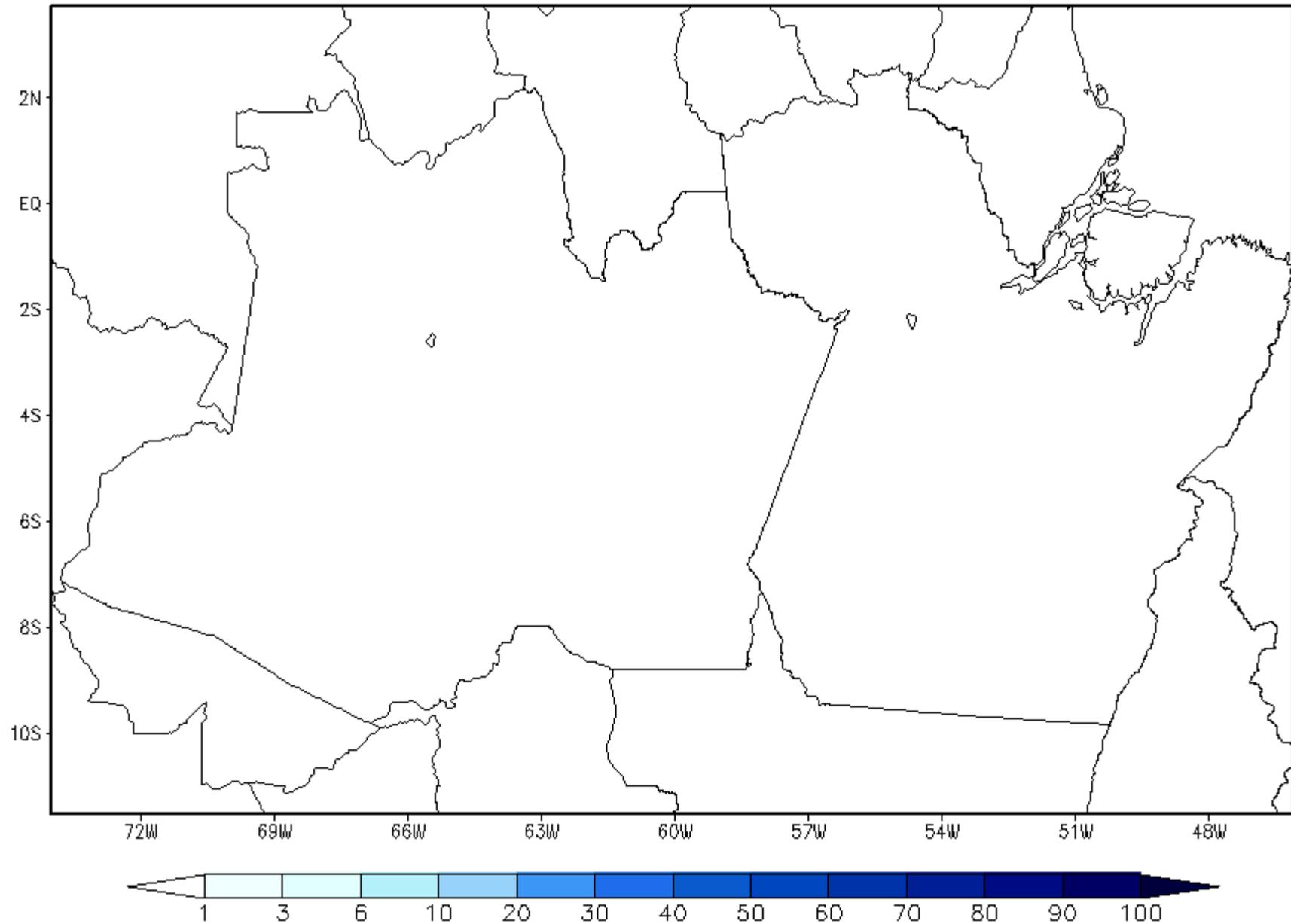
Ex.: Taubin – Feingold et al.



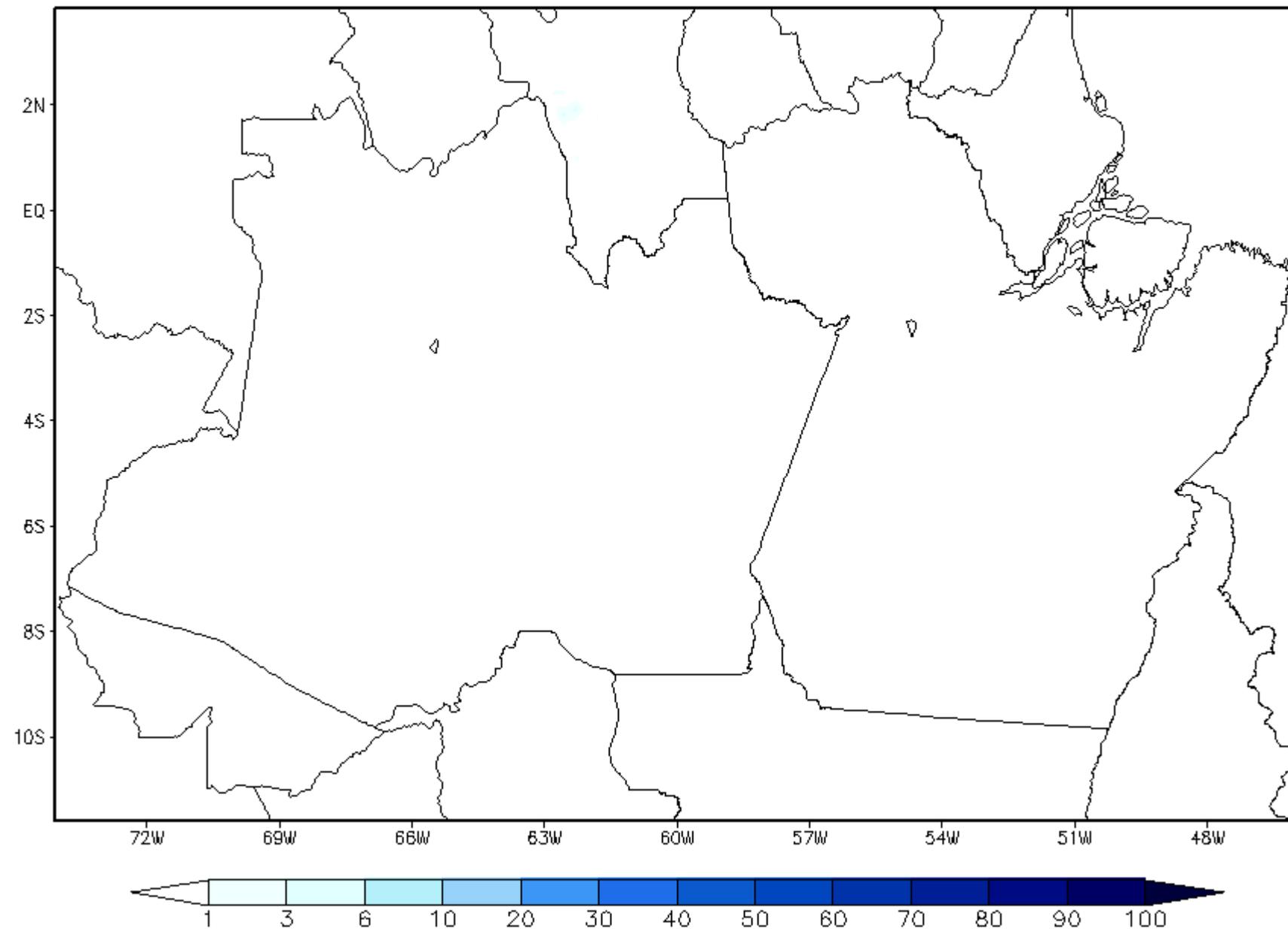
Modelo tipo Bulk (e.g. BRAMS)

- Resolvem as equações de balanço apenas para algumas grandezas totalizadas que caracterizam a nuvem. Tipicamente:
 - Concentração em Massa (momento 1)
 - Concentração em Número (momento 0)
- Tradicionalmente transportavam apenas o 1º momento (esquema de Kessler)
 - Agora há mais esquemas de 2 momentos
- São usados normalmente em modelos de meso escala ou globais
- São muito mais rápidos que esquemas “bin”, mas não resolvem a distribuição de tamanhos explicitamente, perdendo em realismo.

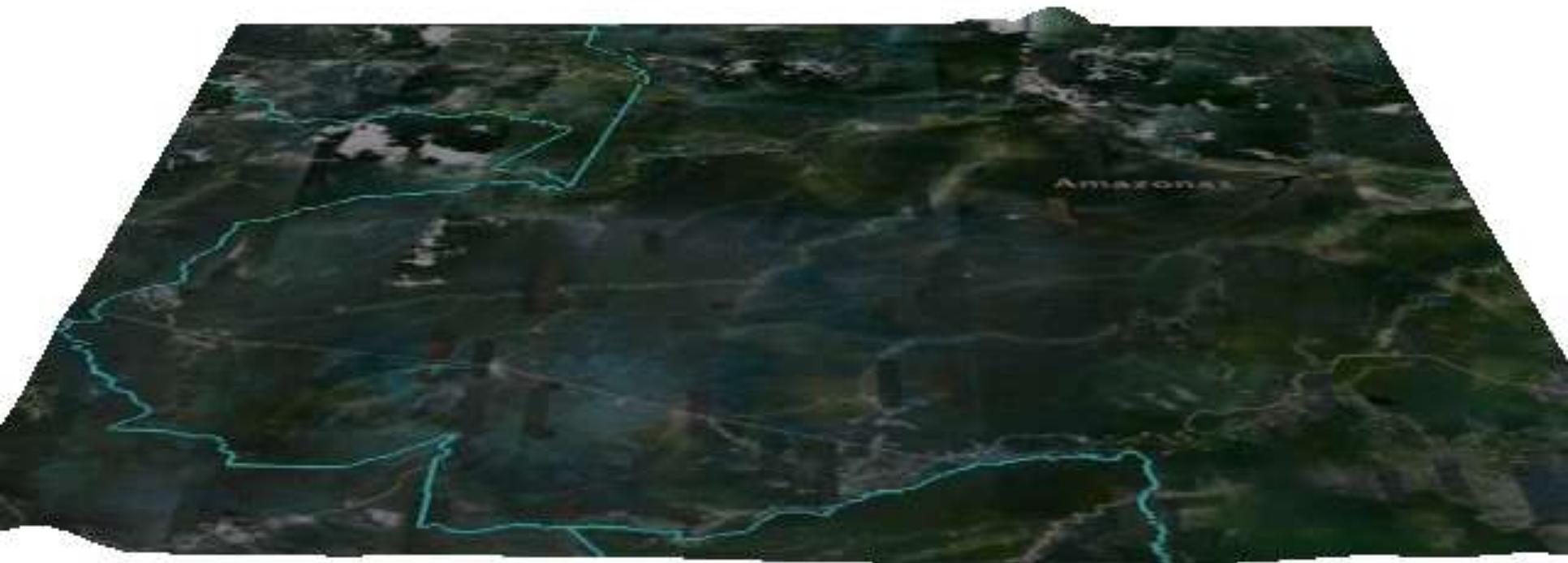
Precipitacao AM PAR-ON resolucao 17.5Km 01Z26APR2007



Precipitacao AM PAR-OFF resolucao 3.5Km 01Z26APR2007



00:00:00
26 Apr 2007
1 of 16
Thursday

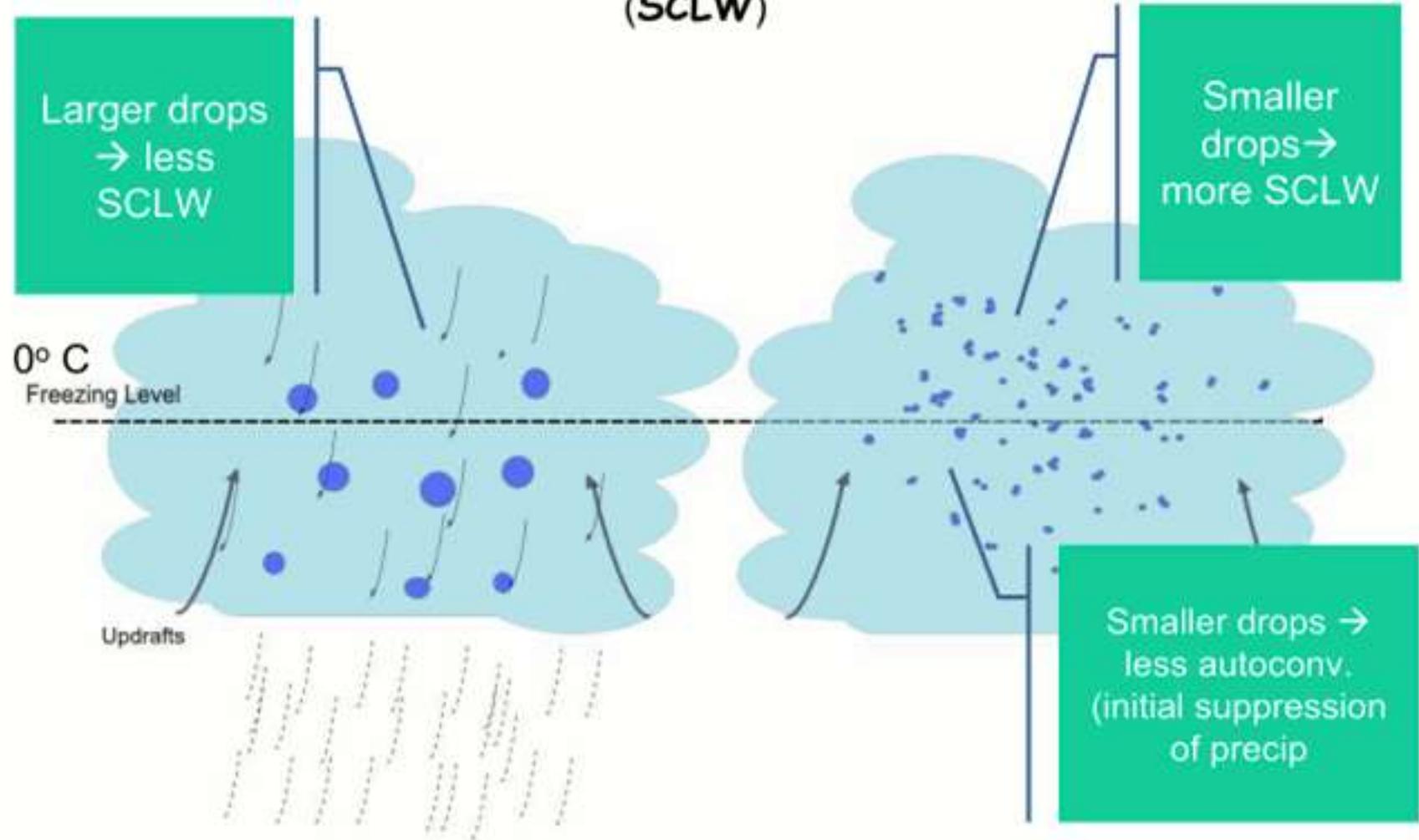


RAMS – 2 momentos (BULK)

- Cloud droplets has two moments Cloud droplets has two moments and sources can be:
 - activation of CCN
 - evaporation of drizzle drops
- Second mode of cloud droplets (drizzle drops $\sim 60\mu\text{m}$) observed in nature, also with two moments and sources can be:
 - self collection of cloud droplets
 - activation of GCCN
 - evaporation of rain
- Activation of CCN and GCCN based on a explicit parcel models that is run offline. models that is run offline.

The basic principle

Change in the supercooled liquid water
(SCLW)



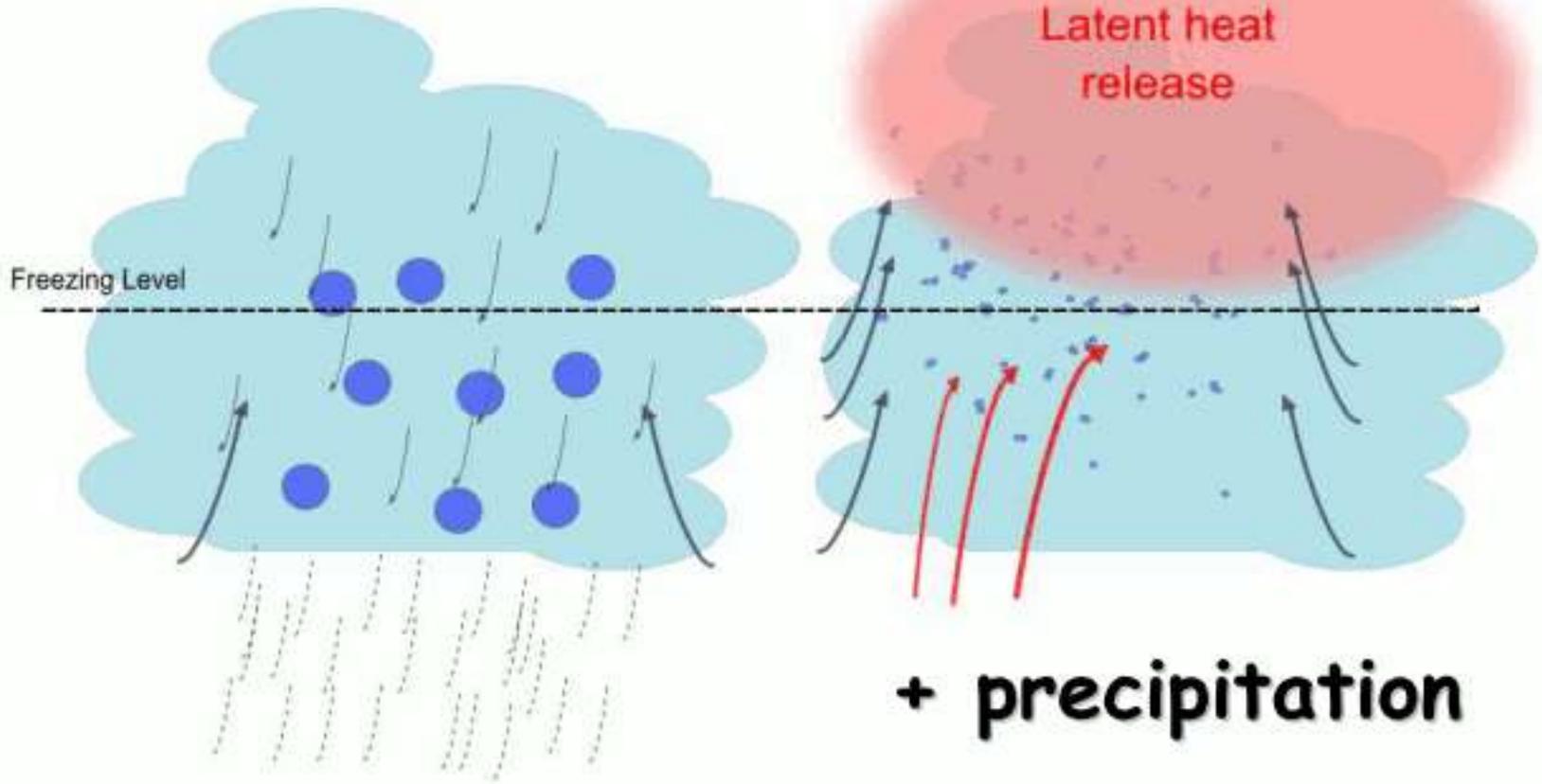
The basic principle

+ convection

Latent heat
release

Freezing Level

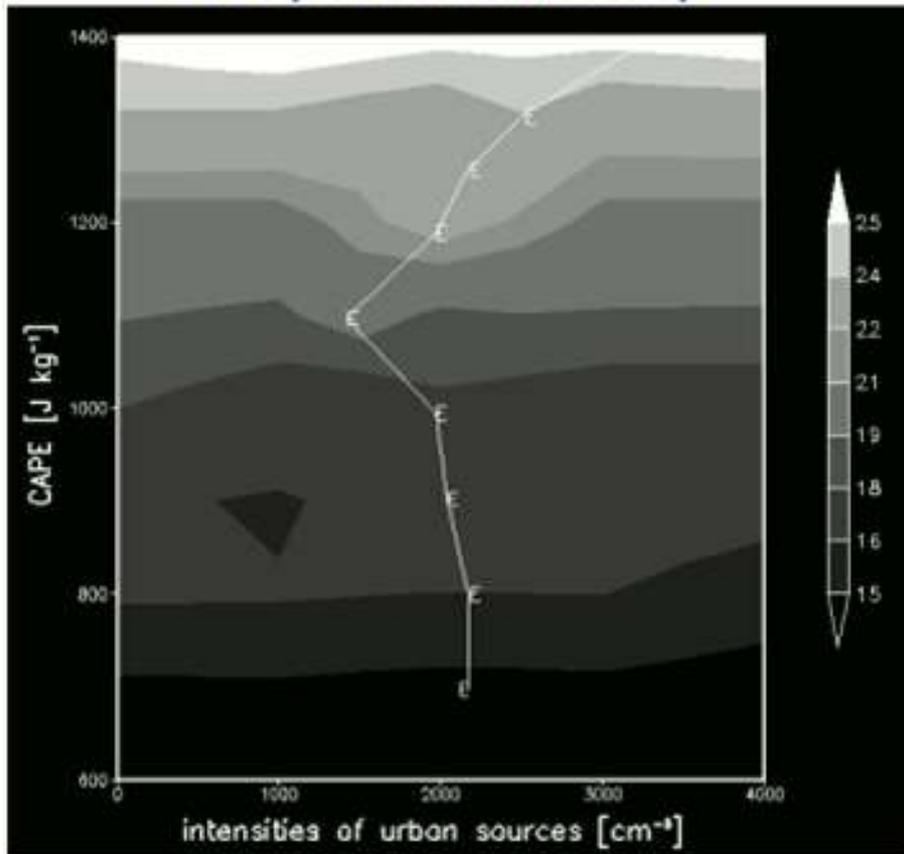
+ precipitation



The response of precipitation in NOT monotonic

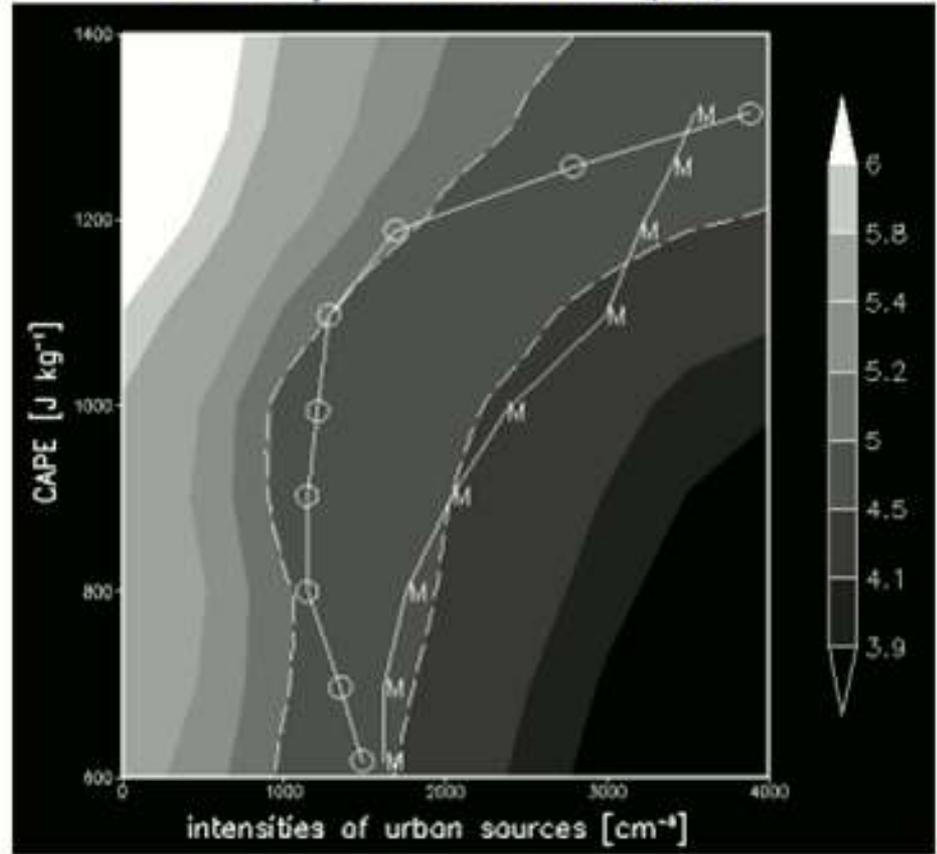
(Atmos Res: Carrió et al 2010, Carrió y Cotton, 2010b)

Precipitation efficiency



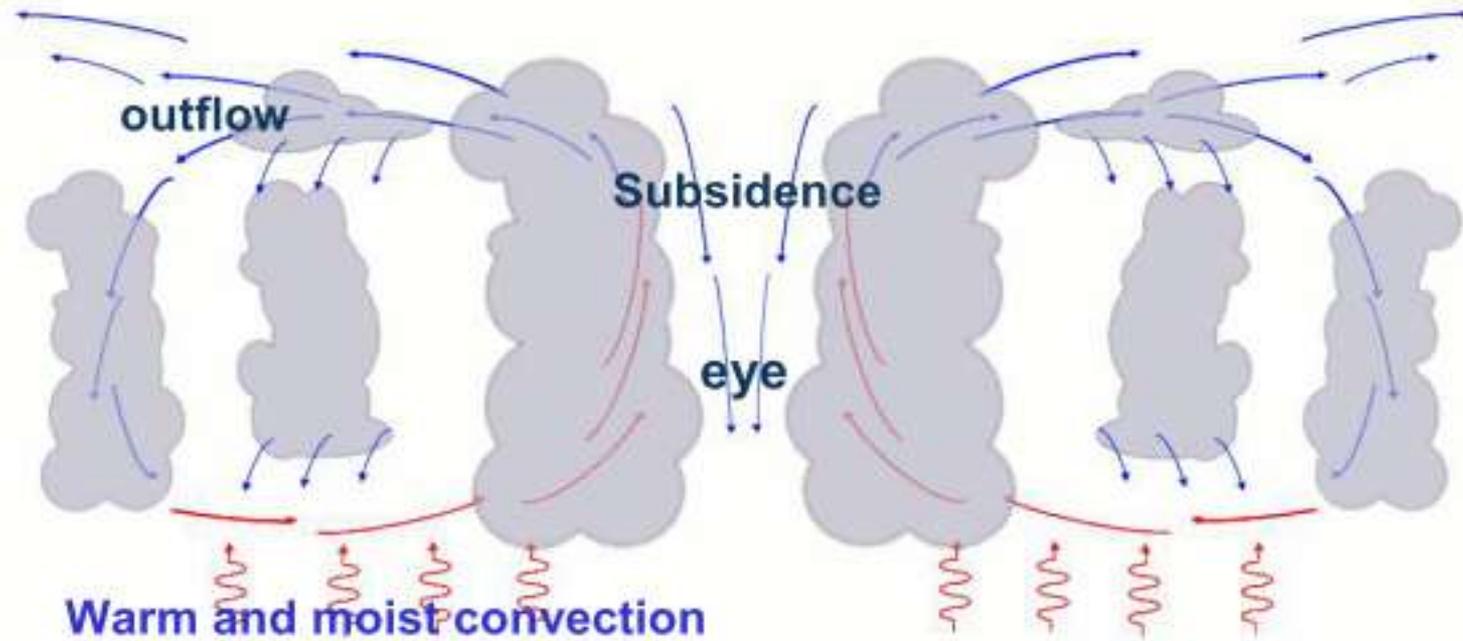
"E": Efficiency peak

SC droplet diameter (μm)



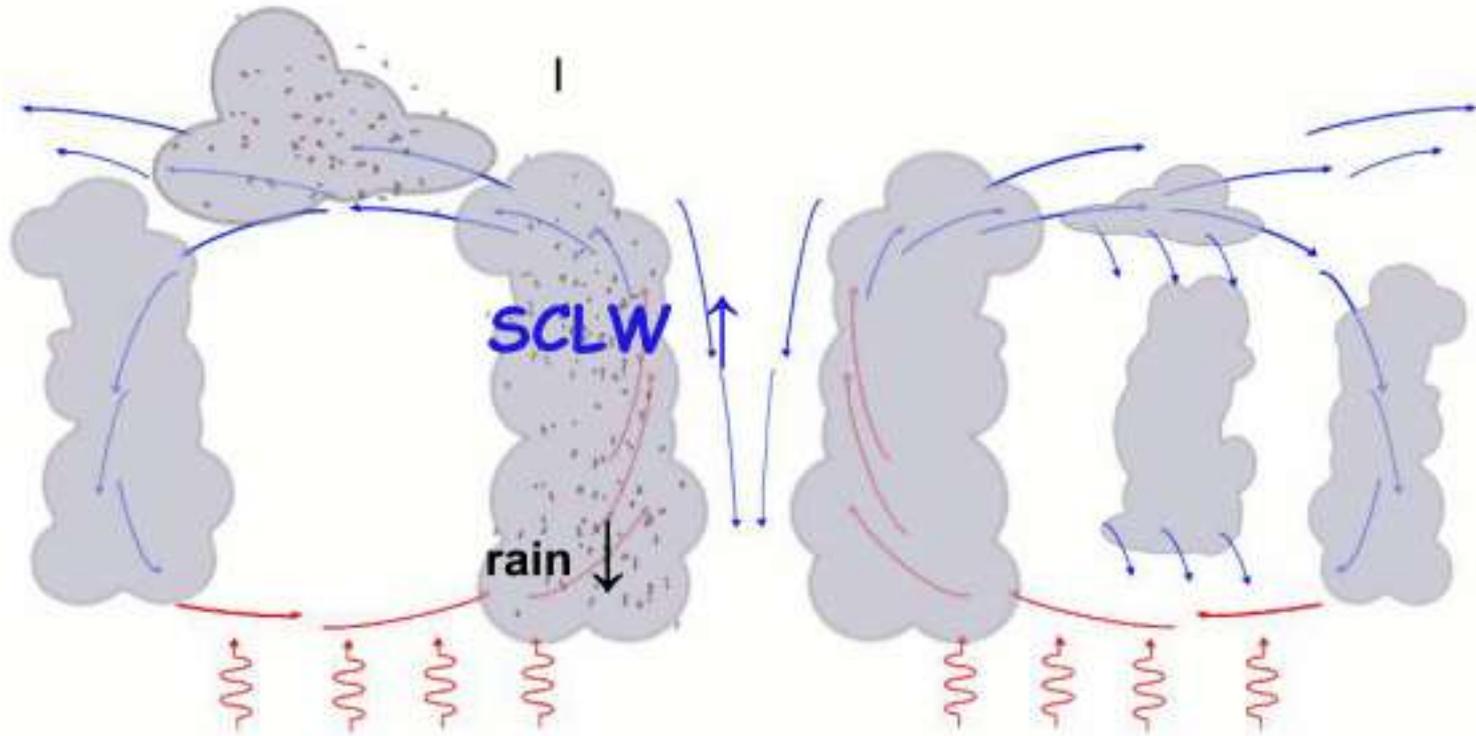
"M": SCLW peak
"O": Precipitation peak

The Hypothesis

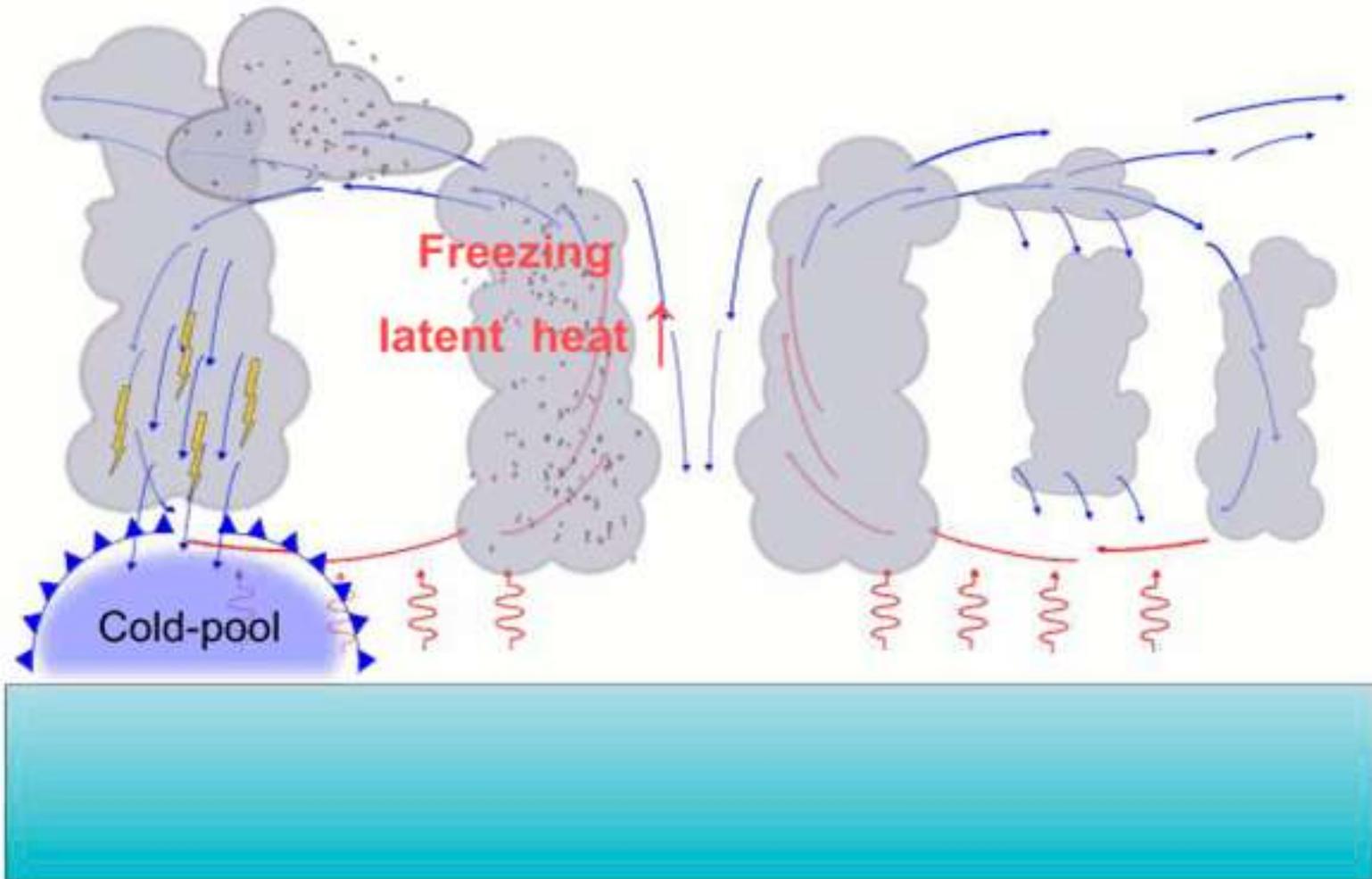


Warm ocean waters

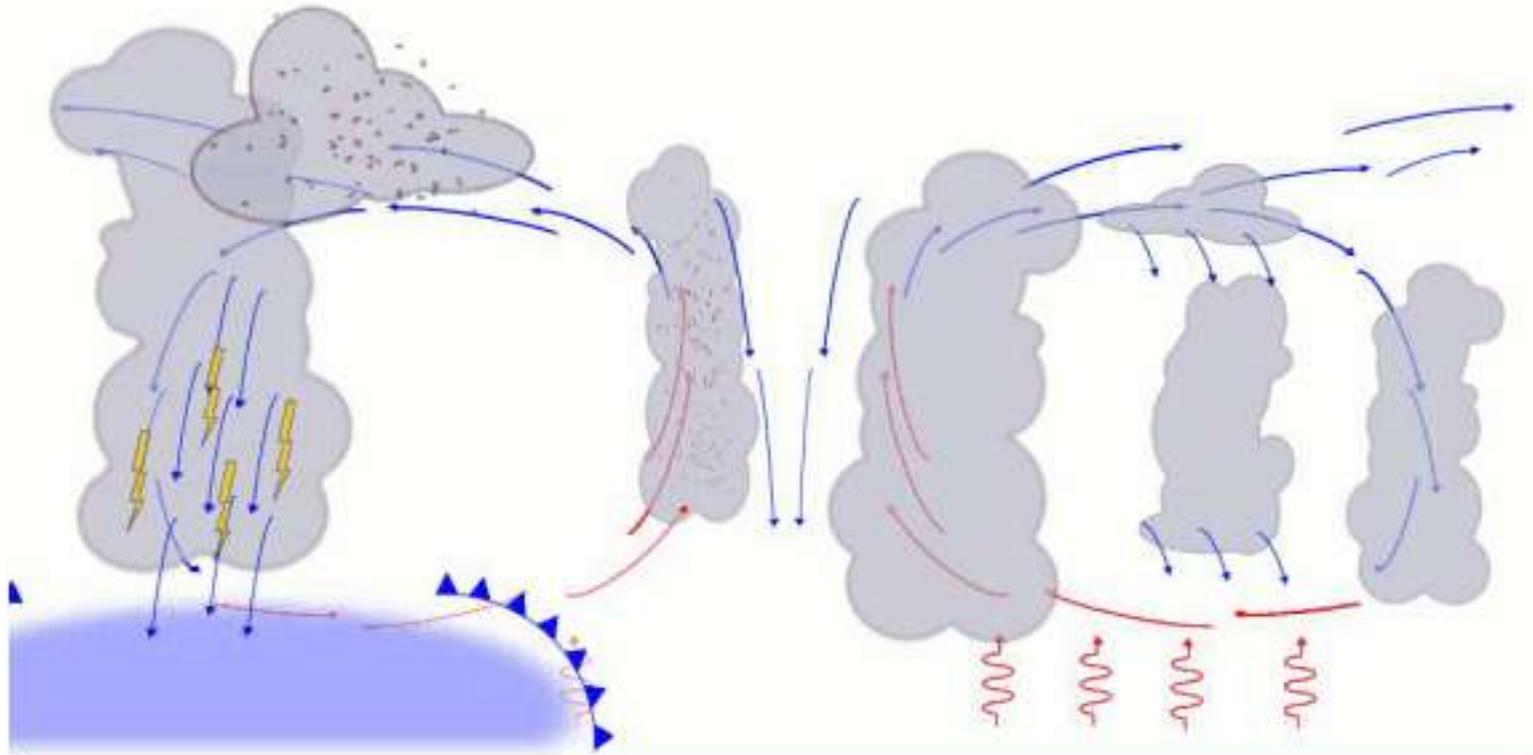
After introducing CCN's



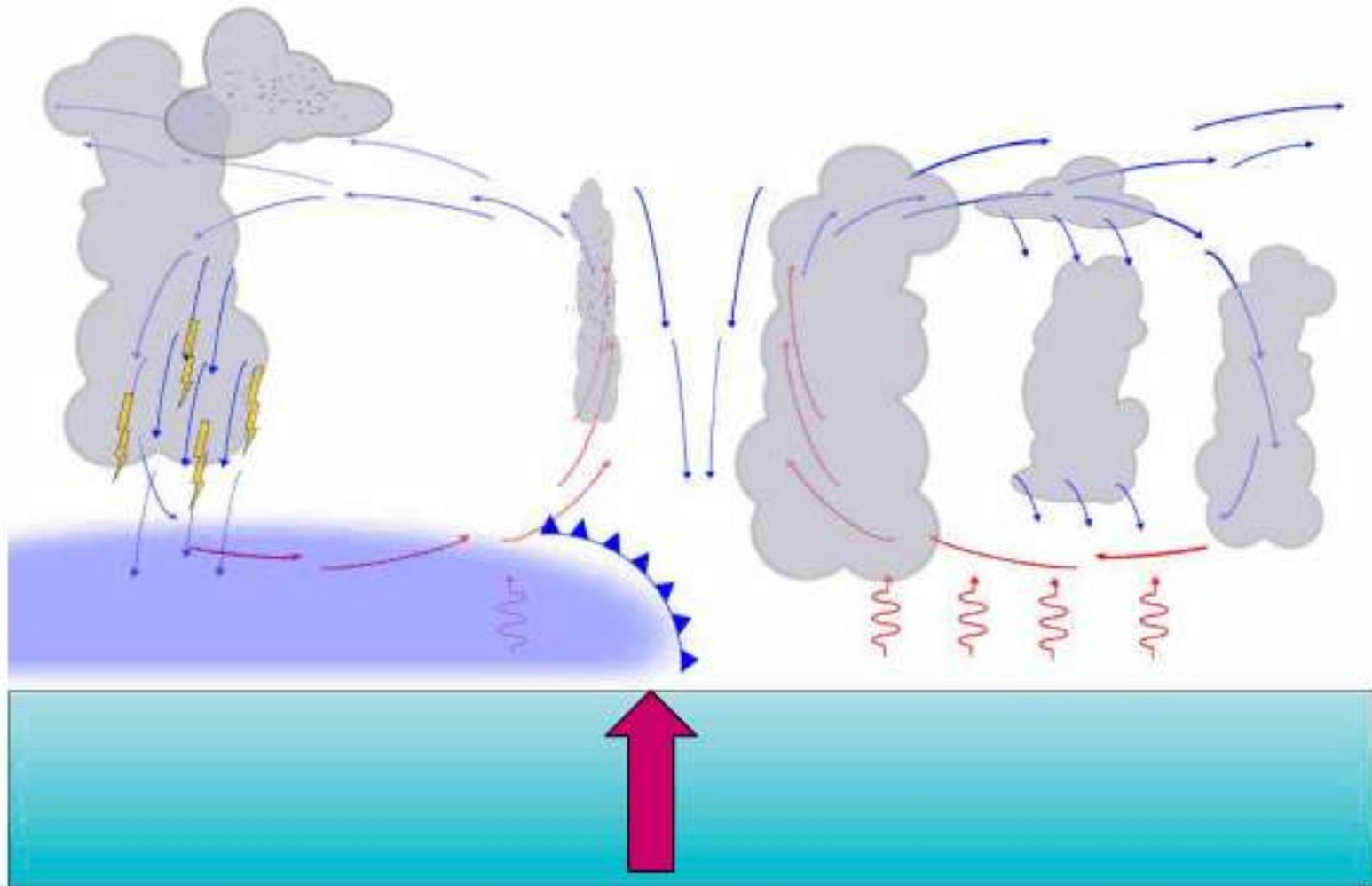
More precipitation in the rainbands



The largest *cold-pools* propagate



The energy source is blocked



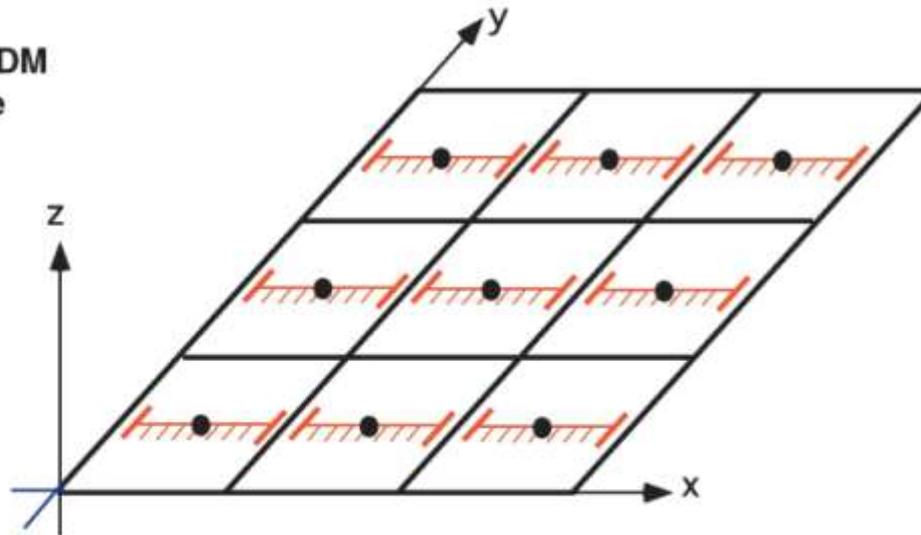
Grabowski – Super parametrização

Cloud-Resolving Convection Parameterization or Super-Parameterization

Grabowski (2001), Khairoutdinov and Randall (2001)

Application of
a 2D CSRМ within each column of a large-scale dynamical model (LSDM)
with periodic lateral boundary conditions

At the ● points, the LSDM
and the domain-average
of the CSRМ interact.



Concept and viewgraph from Akio Arakawa

Grabowski – Super parametrização

- Convecção profunda resolvida explicitamente
- Fração de cobertura resolvida explicitamente
- Intersecção entre camadas de nuvens calculado explicitamente

Mas...

- Um modelo global usando uma super-parameterização é 3 ordens de magnitude mais “caro” que um modelo convencional. Por outro lado, é mais fácil de paralelizar....

Fizeram simulações com modelo global acoplado e reproduziram Maden-Julian e El Nino!!

Compromisso

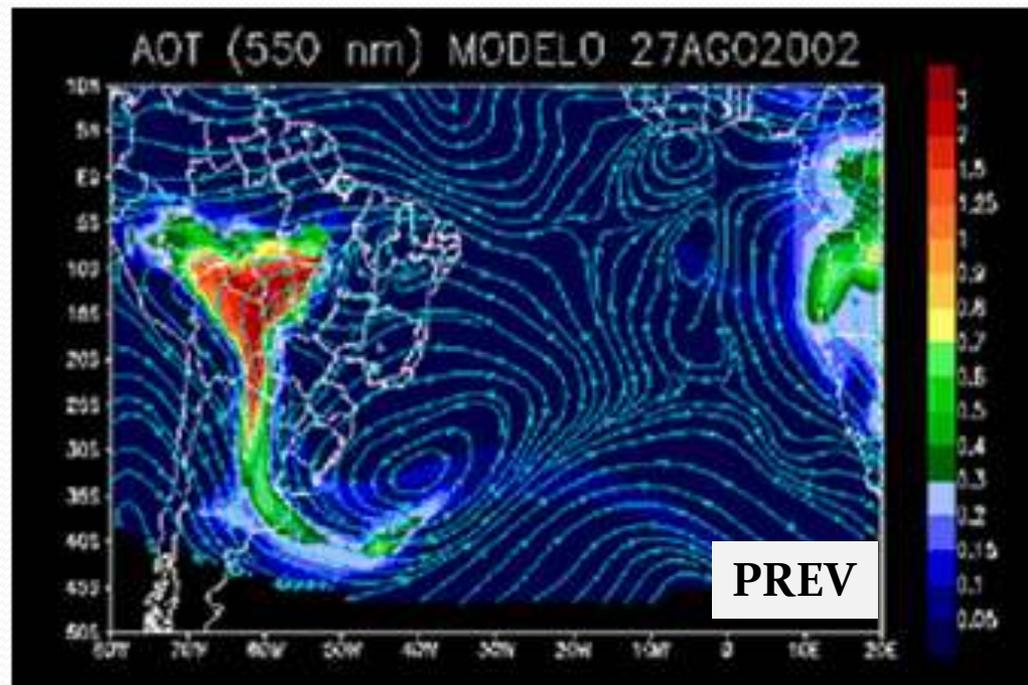
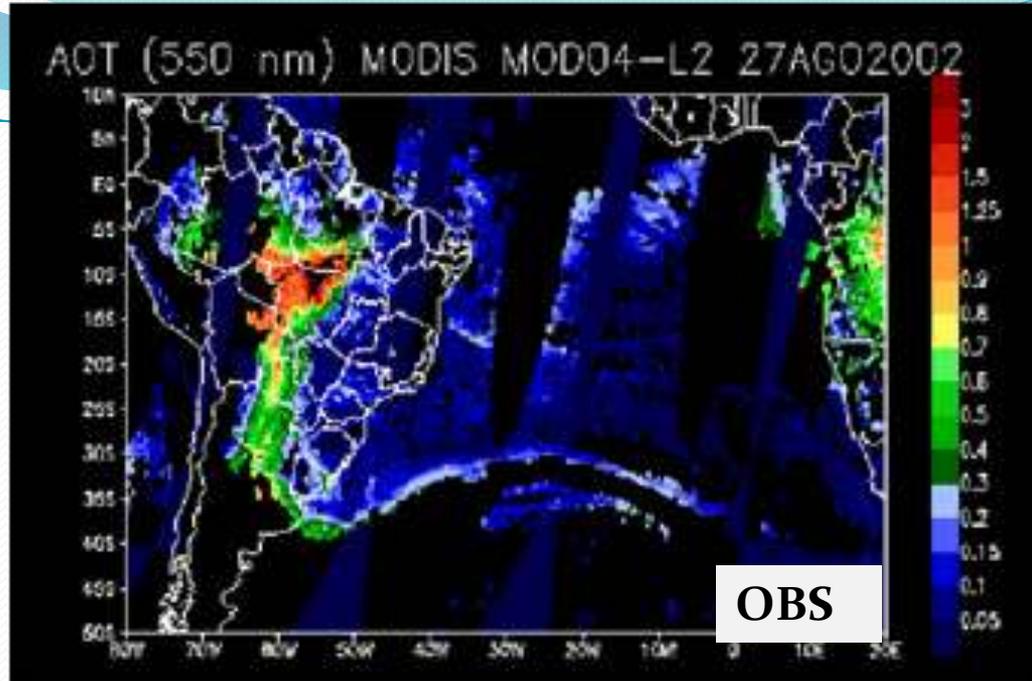
- Ao modelar a atmosfera, precisamos fazer um compromisso entre
 - Esforço computacional
 - Custo de CPU,
 - Total de tempo de máquina,
 - Consumo de memória e de espaço em disco
 - Nossa própria ambição científica.



Exemplo 2 – Química e aerossóis

Química

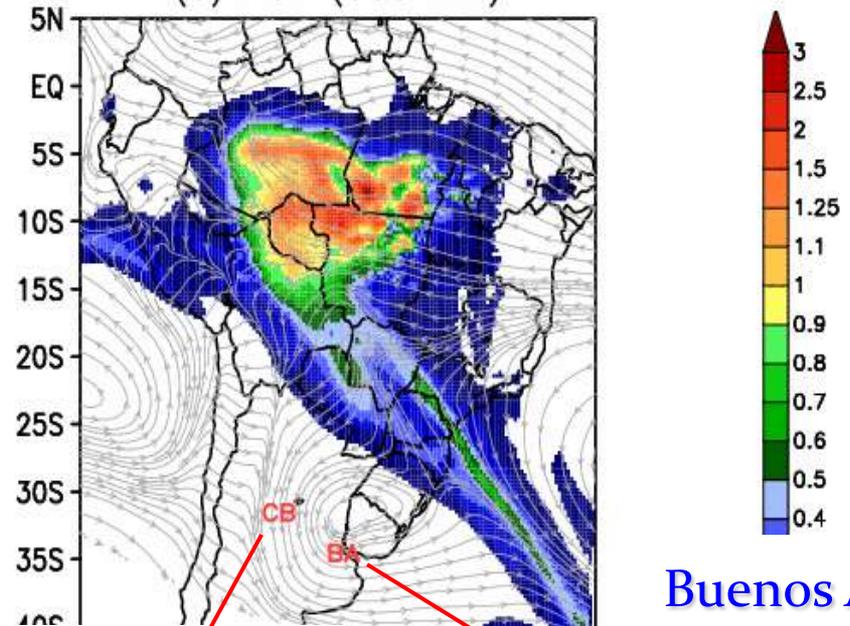
- O Brasil foi o líder mundial na previsão de qualidade do ar, modelando a química e os aerossóis na atmosfera
- ... mais 200 equações para o modelo resolver!
 - Ok para prev. de 5 dias
 - Mas como fazer isso numa escala de tempo de centenas de anos??



An example of long range transport (advection) of smoke

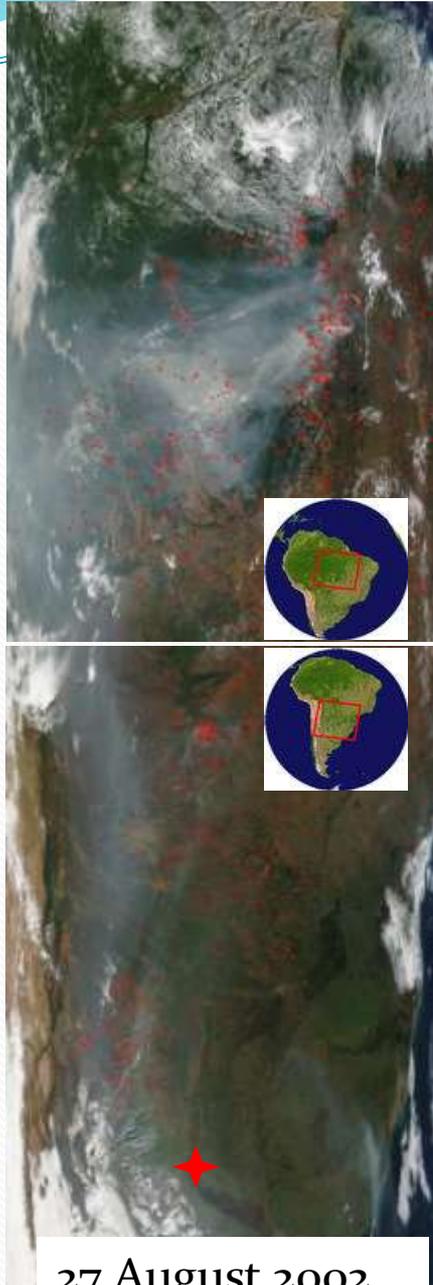
Time: 00Z22AUG2002

(a) AOT (500 nm)



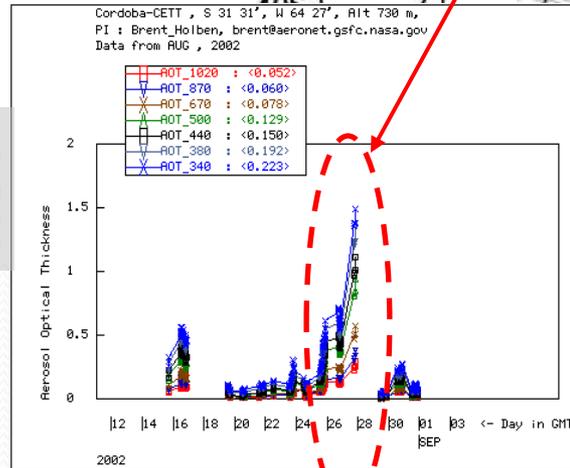
Córdoba

Buenos Aires

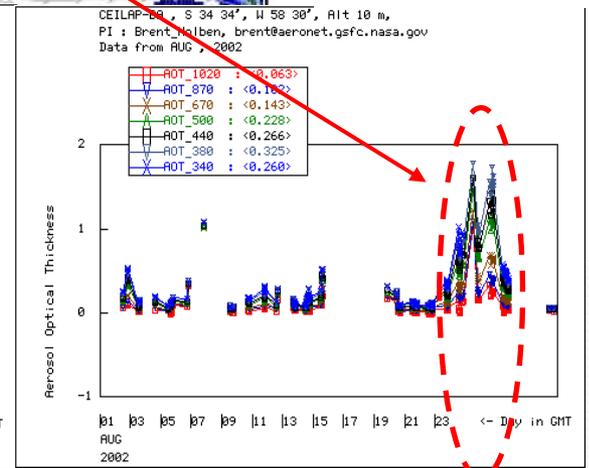


27 August 2002

AOT



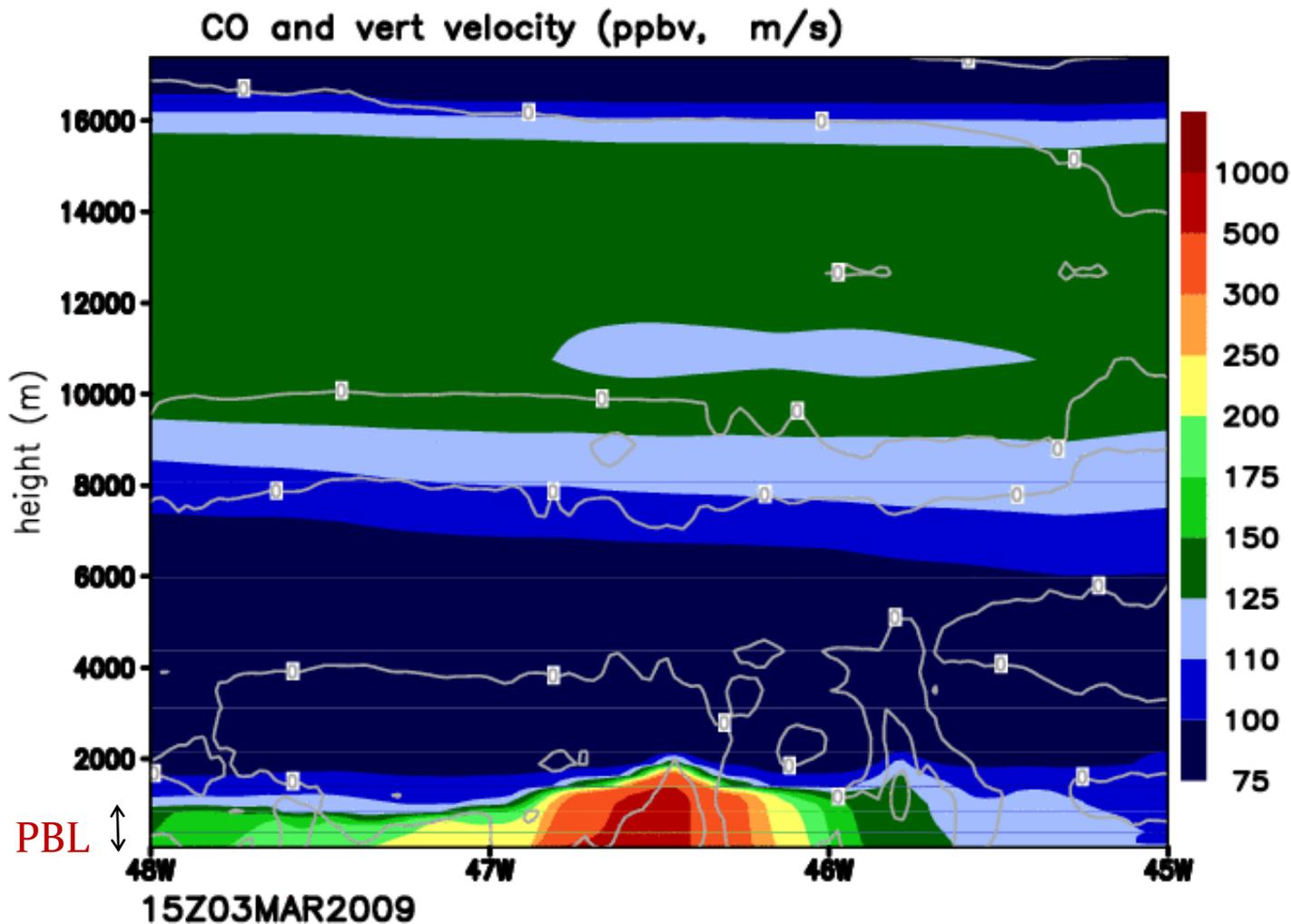
26-29 Aug 2002



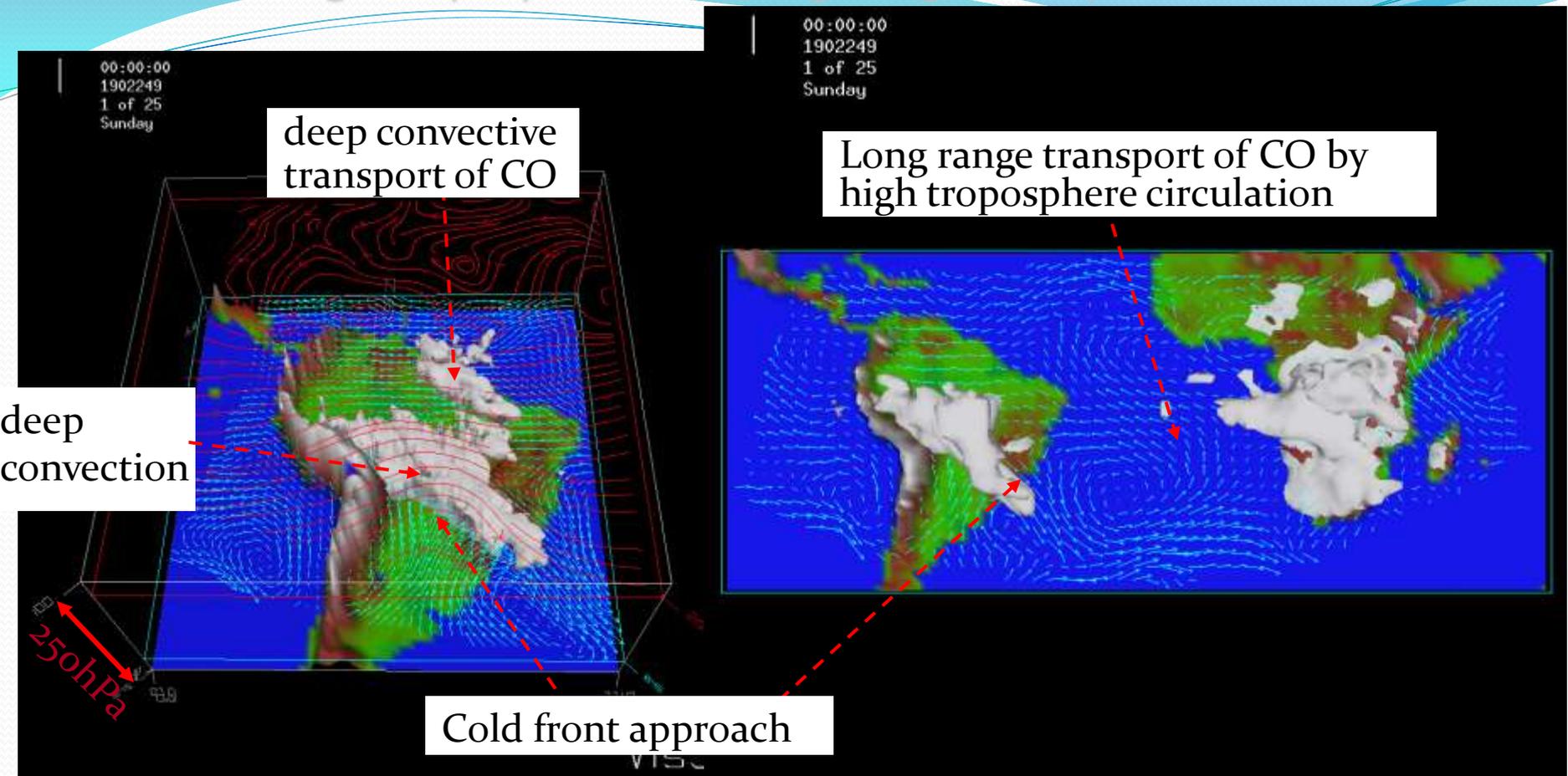
26-29 Aug 2002

Vertical cross section showing vertical velocity and the transport of CO from the PBL to the high troposphere

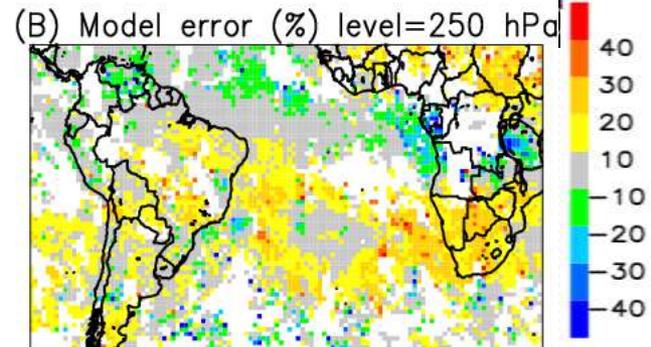
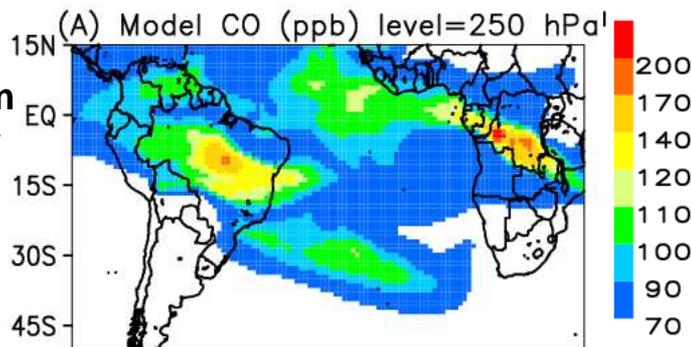
Plume rise



High Troposphere and Long Range Transport of CO



Avaliação do modelo com dados de CO obtidos por sensoriamento remoto (MOPITT)



Numerical simulation of transport of CO with CATT-BRAMS during CLAIRE flight 8

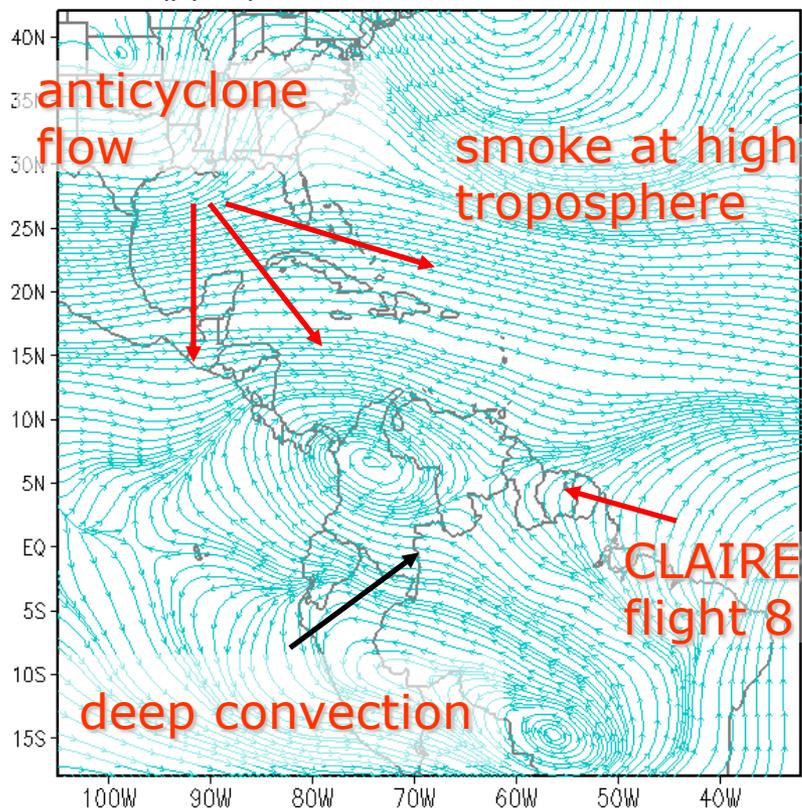
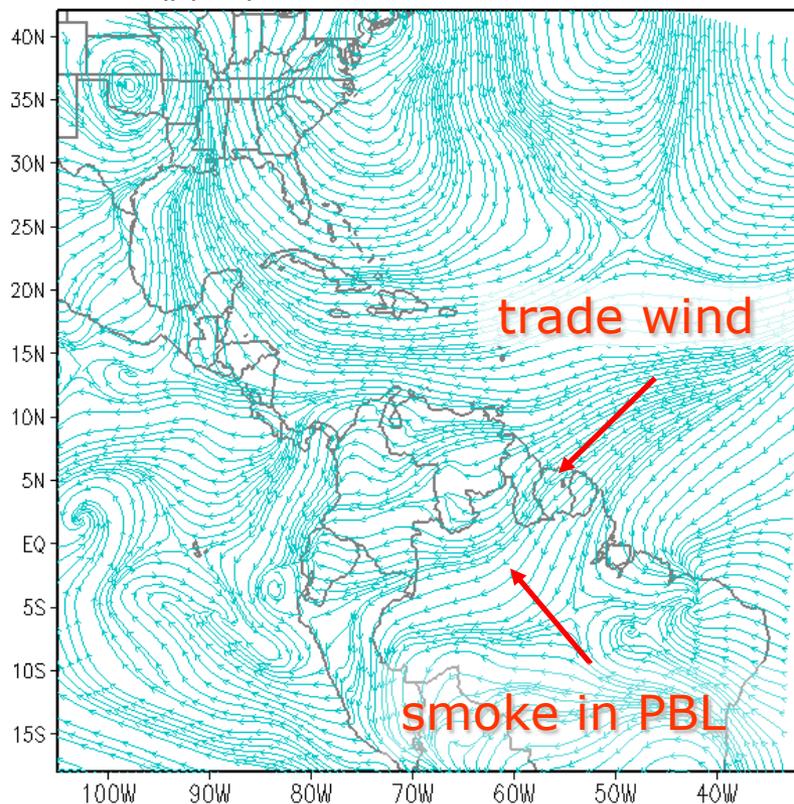
1 km

<= height =>

11,7 km

CO BB (ppbv) - 12Z17MAR1998 - 1.0296 km

CO BB (ppbv) - 12Z17MAR1998 - 11.748 km





Exemplo 3 – Cãnion urbano

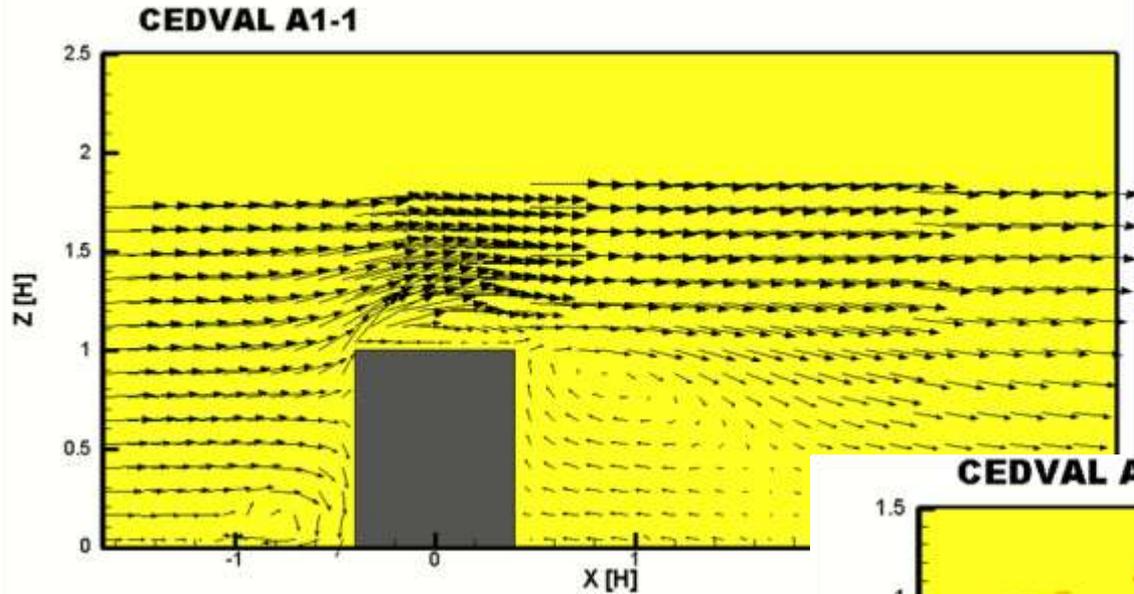
RAMS/ADAP Very High-Resolution Simulation Examples

- 1) Flow around a single rectangular building
(CEDVAL A1-1, $Re = 32750$)
- 2) Flow through an array of buildings
(CEDVAL B1-1, $Re = 56390$)
- 3) Flow through an array of buildings on a slope

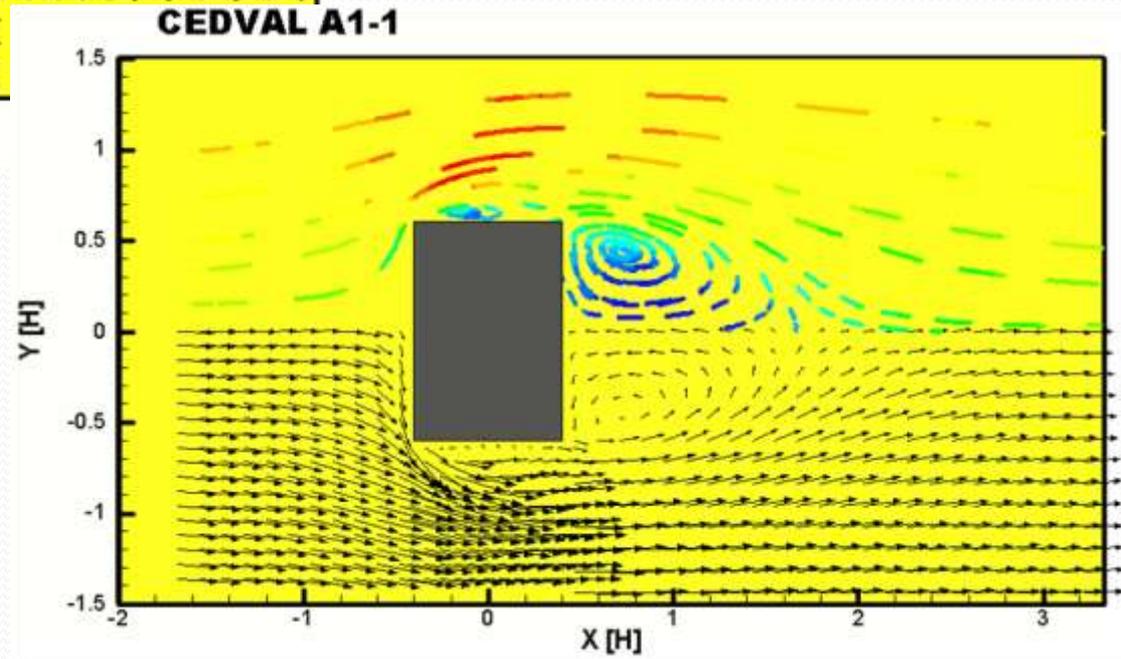
RAMS configuration

- Two grids: $x = 10 \text{ m} \times 2 \text{ m}$; $z = 2 \text{ m}$, stretched
- Neutral, horizontally homogeneous initialization
- 5 m/s initial flow; $Re \approx 100$
- Deardorff isotropic TKE subgrid scheme

Flow around a single building



Building size:
✎ $x=20\text{m}$ ✎ $y=30\text{m}$ ✎ $z=25\text{m}$



Craig J. Tremback, ATMET
Robert L. Walko, ATMET/Duke