

Tem física nas previsões de mudanças climáticas?

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

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



Este seminário

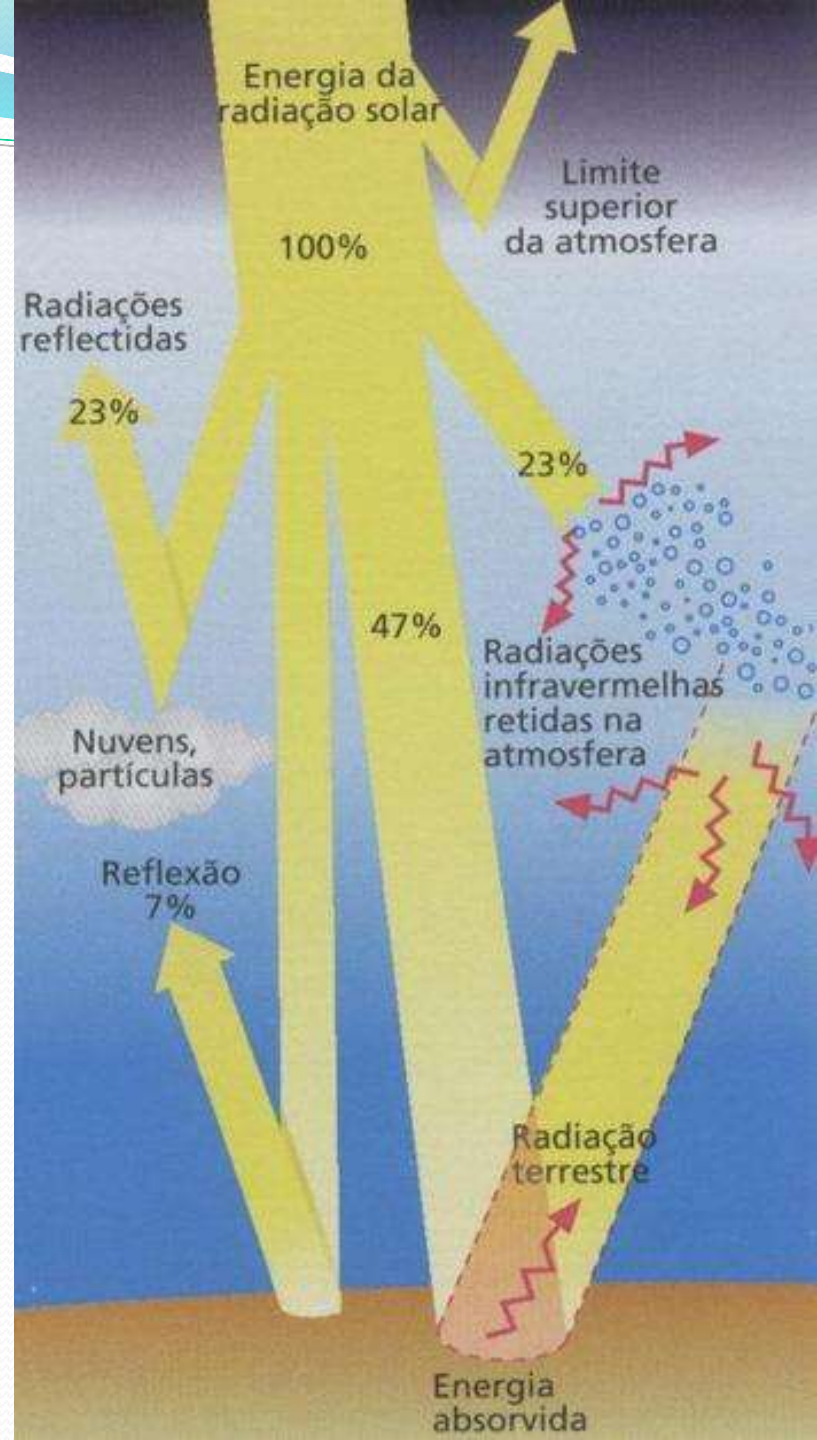
- **Mudanças climáticas**
- **Previsões numéricas de tempo e clima**
- **Exemplos e problemas de modelos numéricos**
- **Estudando física da atmosfera na Amazônia**



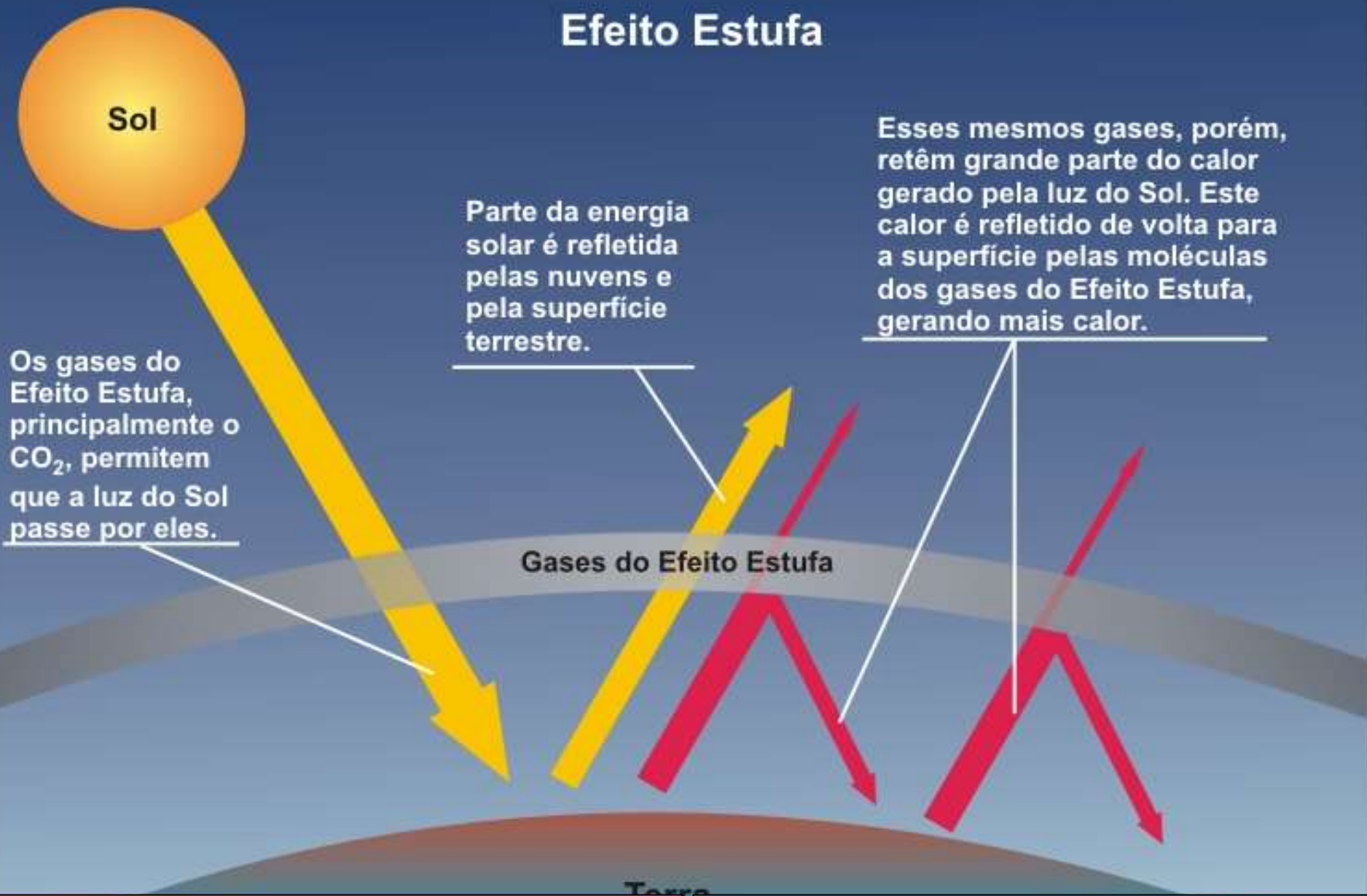
Sun-Earth Day 2008: Space Weather Around the World
sunearthday.nasa.gov

Energia do sol

- Radiação eletromagnética:
 - Ultra-violeta
 - Visível
 - Infra-vermelho
- A energia é repartida:
 - 30% é refletida
 - 50% é absorvida na superfície
 - 20% é absorvida na atmosfera



Efeito Estufa



Sol

Os gases do Efeito Estufa, principalmente o CO_2 , permitem que a luz do Sol passe por eles.

Parte da energia solar é refletida pelas nuvens e pela superfície terrestre.

Gases do Efeito Estufa

Esses mesmos gases, porém, retêm grande parte do calor gerado pela luz do Sol. Este calor é refletido de volta para a superfície pelas moléculas dos gases do Efeito Estufa, gerando mais calor.

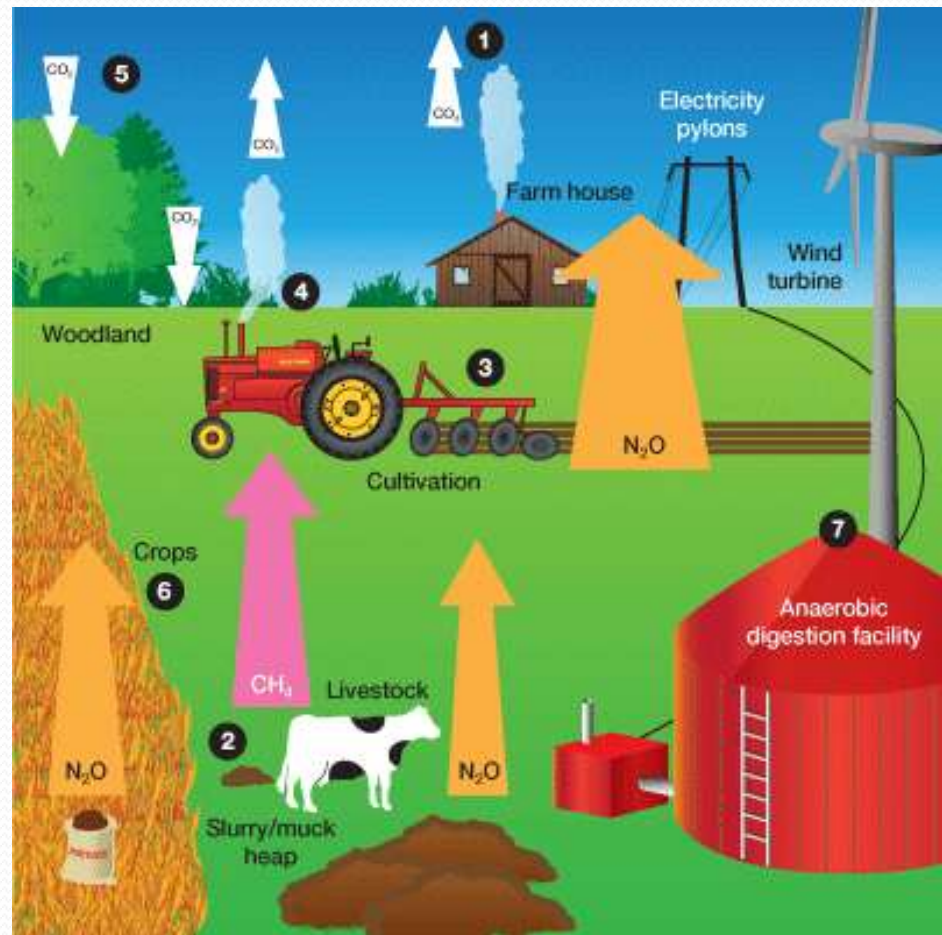
Terra

Sem o efeito estufa, a temperatura média seria de apenas -18°C

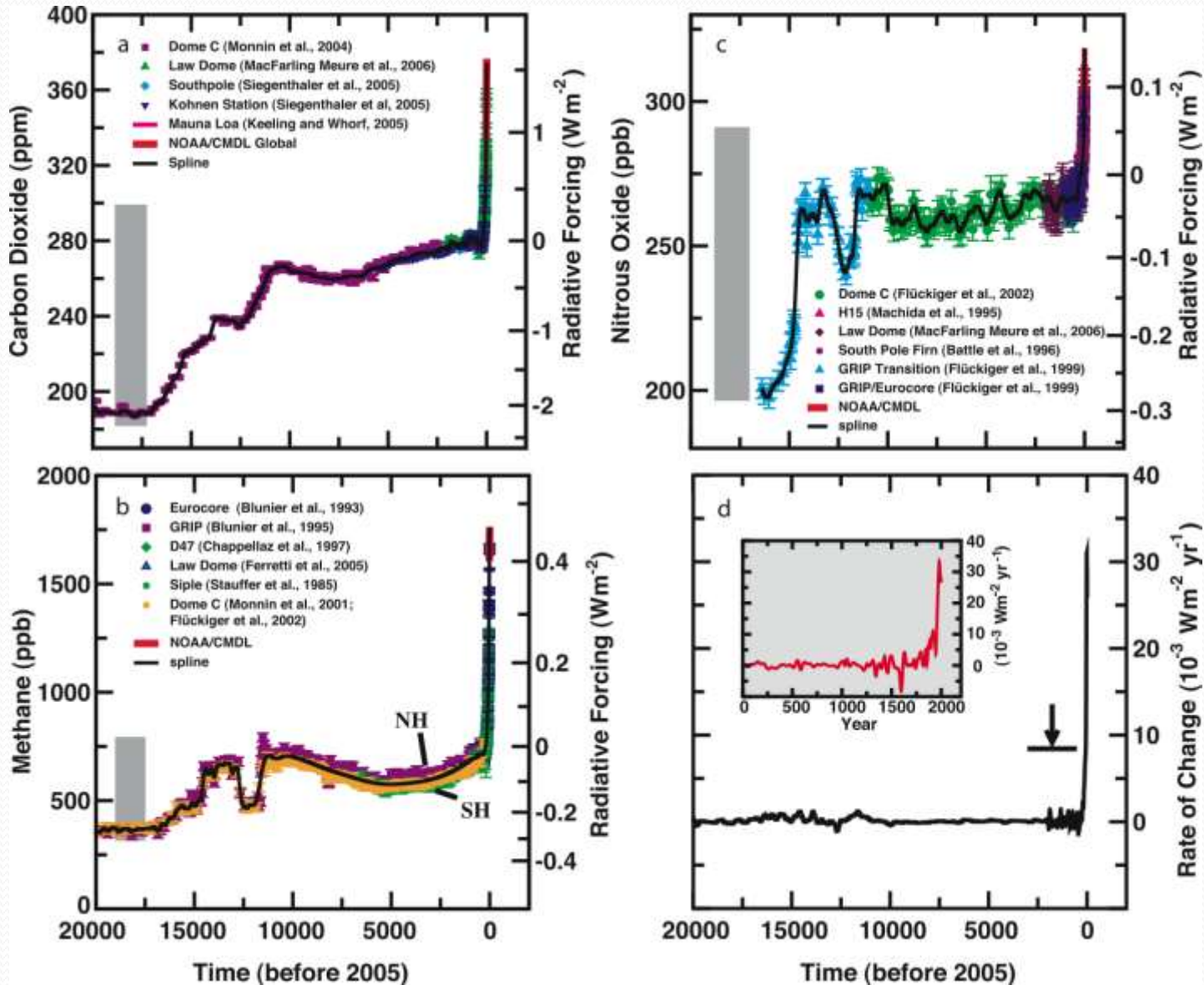
Com o efeito estufa, ela fica em torno de $+15^\circ\text{C}$

Mudanças Climáticas

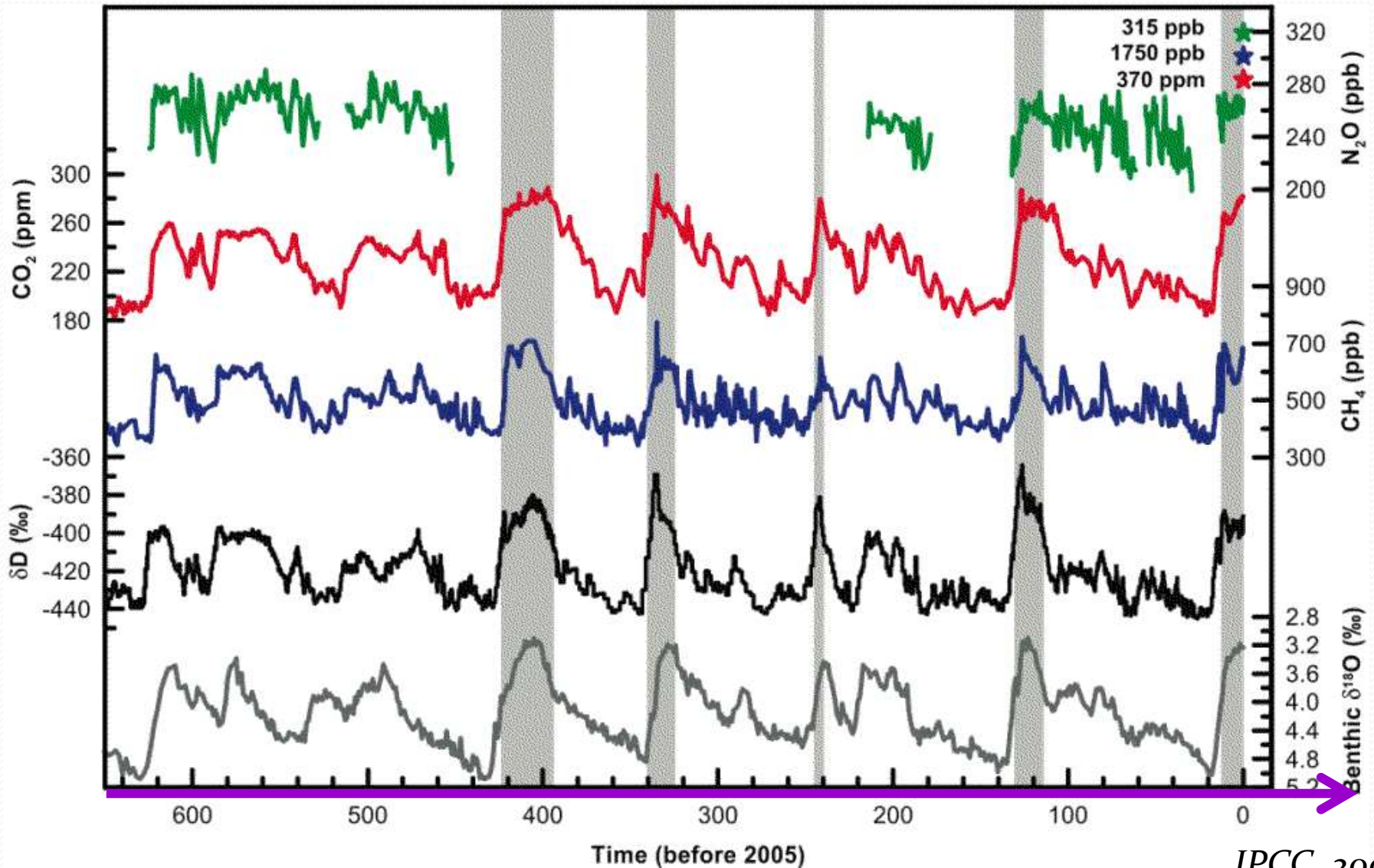
- Quando emitimos **gases de efeito estufa** na atmosfera, parte do calor que devia ser perdido para o espaço fica preso na Terra.
- Esse calor extra esquenta a atmosfera!



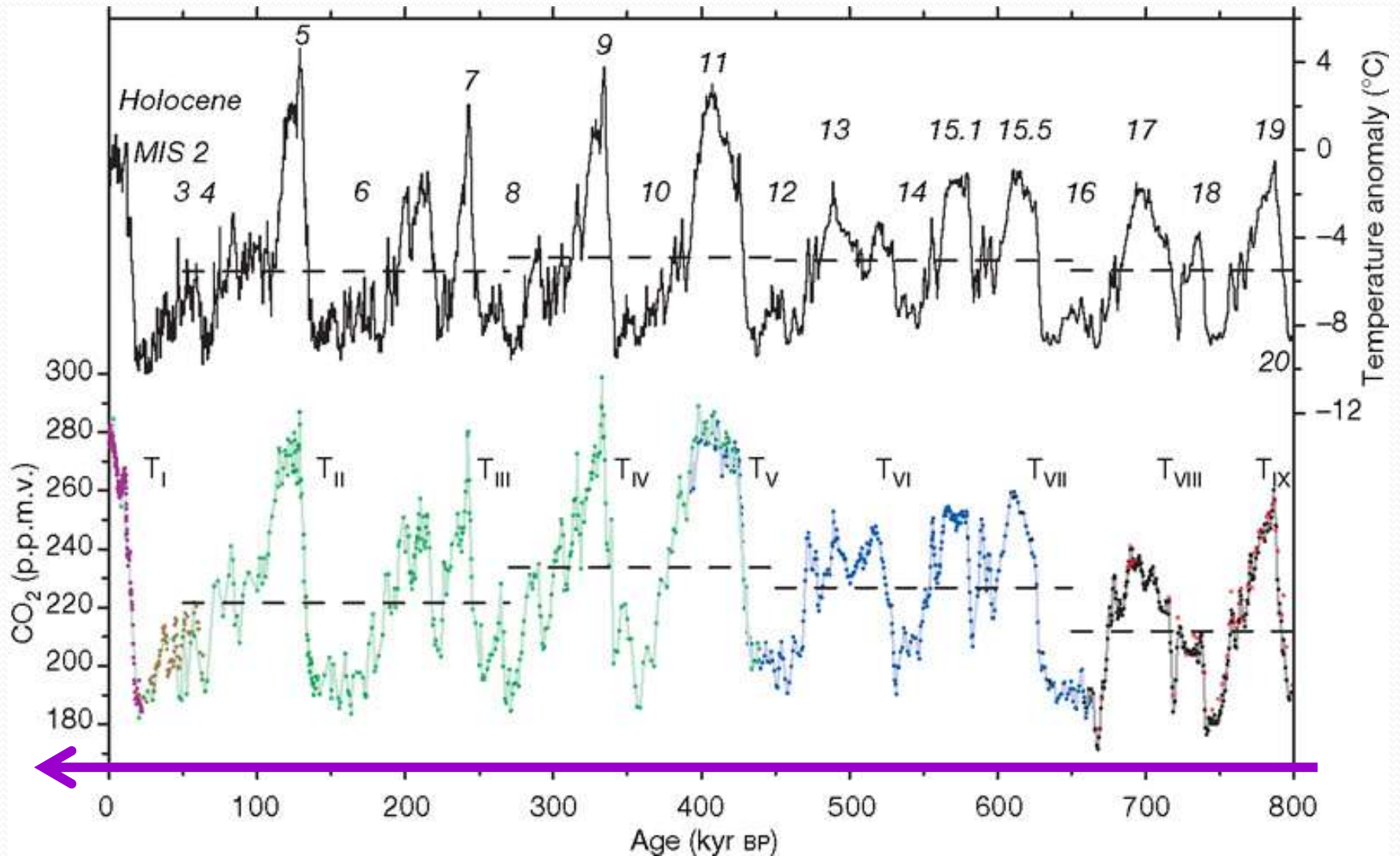
Efeito Antropogênico ? Sim!



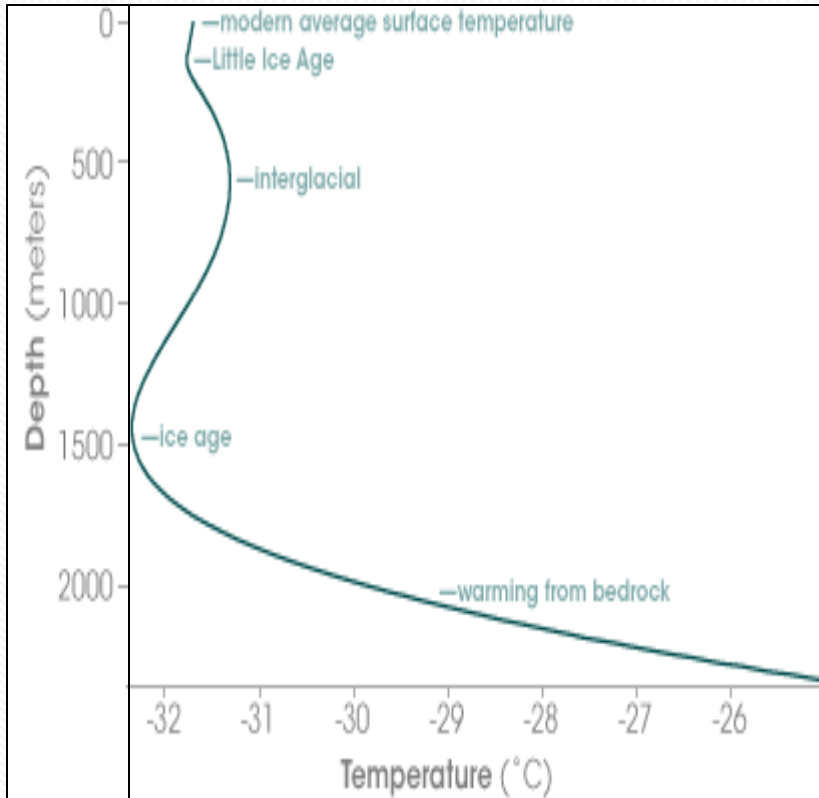
Paleoclimate – Vostok (650ky)



Paleoclima – Dome C (800ky)



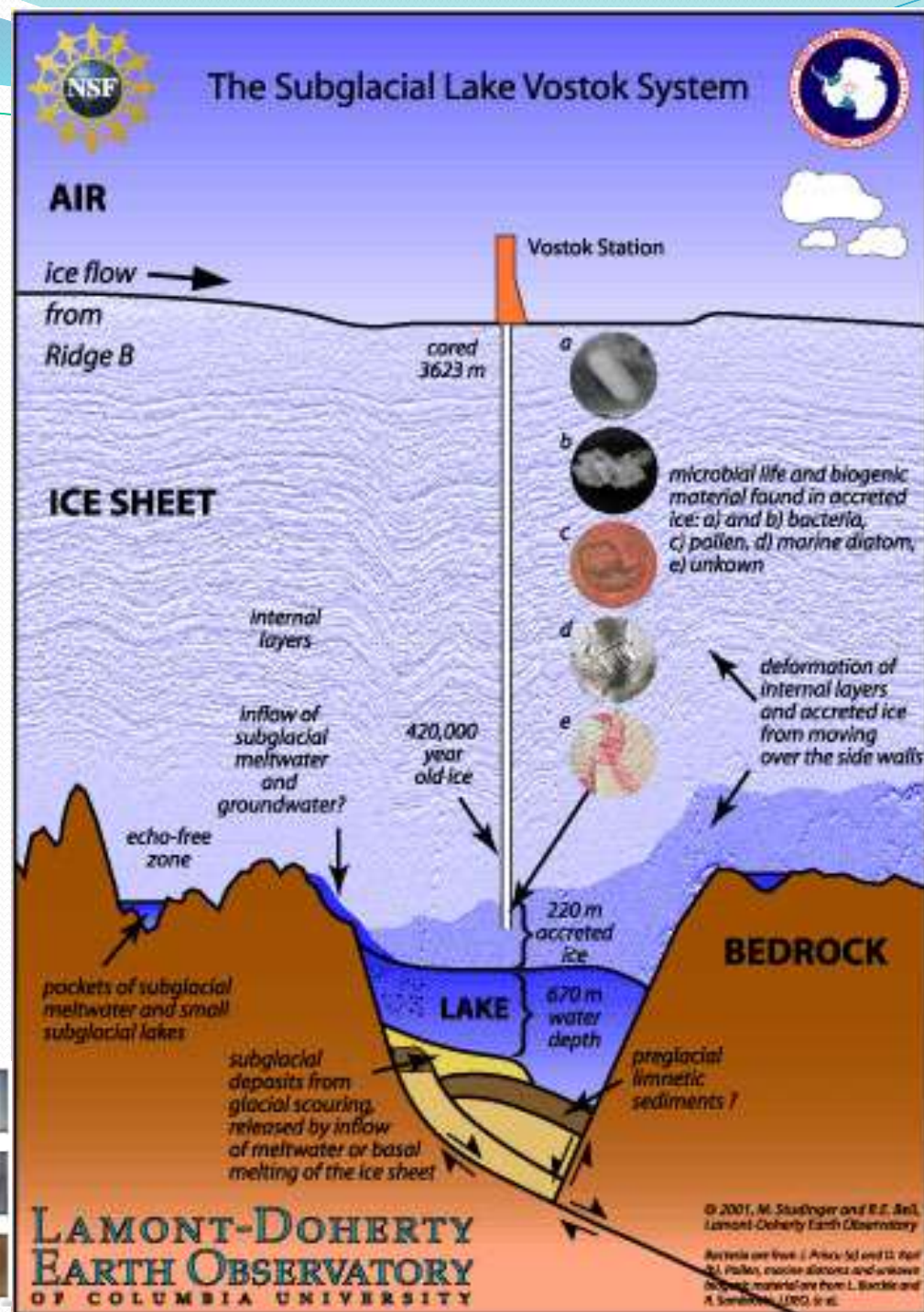
Ice Cores



53-54m

1836-1837m

3050-3051m



Ice Cores

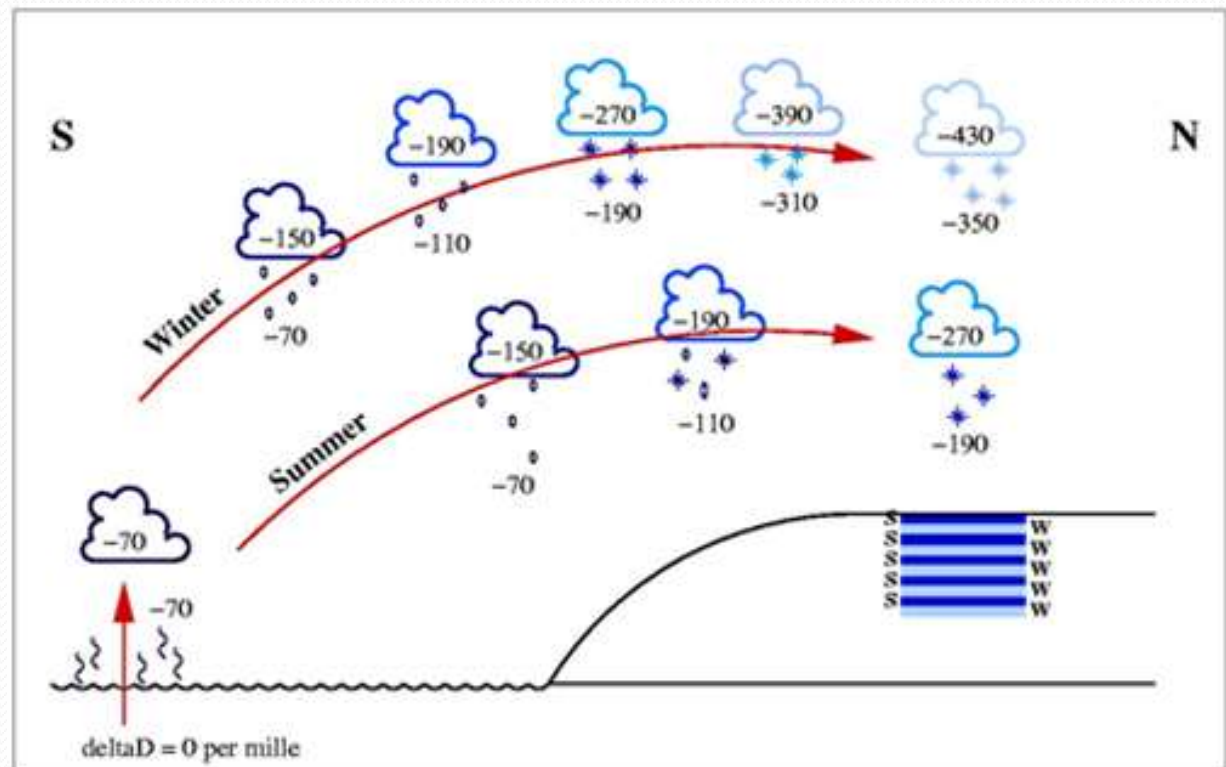


Datação do Gelo

1. Por contagem das camadas
 - Dependentes da Temperatura
 - Dependentes da Irradiação
2. Por marcadores pré-datados
 - Outros Ice-Cores já medidos
 - Erupções Vulcânicas
3. Elementos radioativos

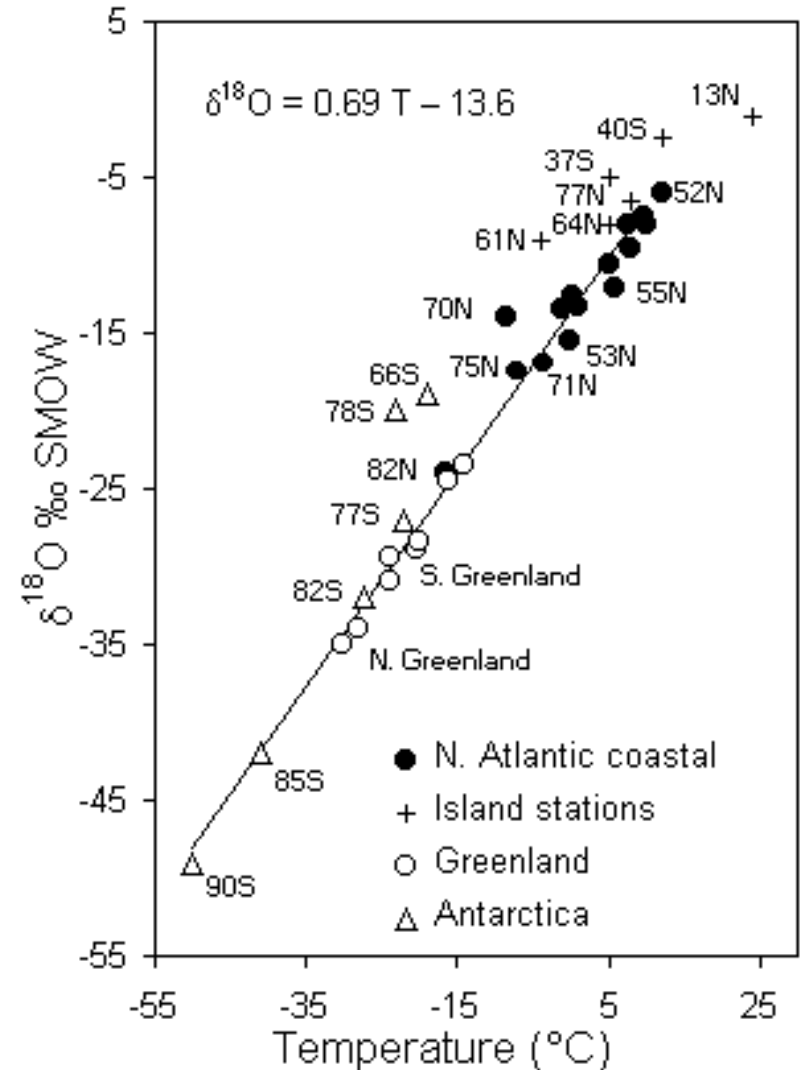
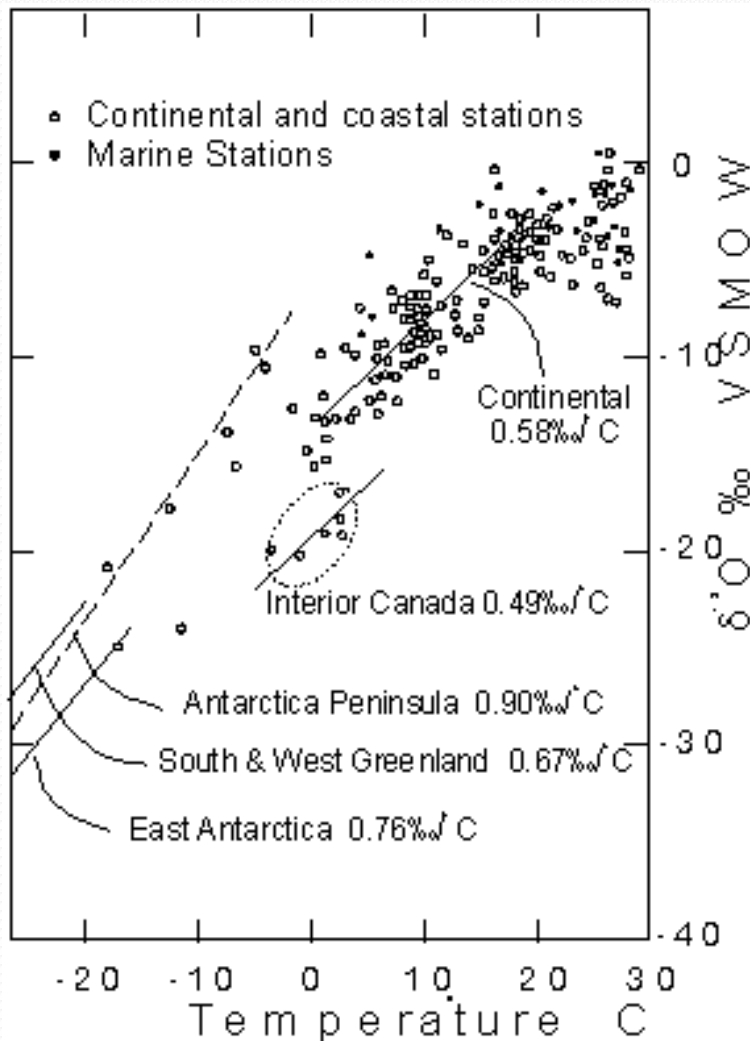
Datação do Gelo

- A molécula H_2^{18}O evapora mais devagar e chove mais rápido que a molécula H_2^{16}O . Por isso a chuva sobre o continente é pobre em H_2^{18}O ... O quanto mais pobre depende da temperatura!



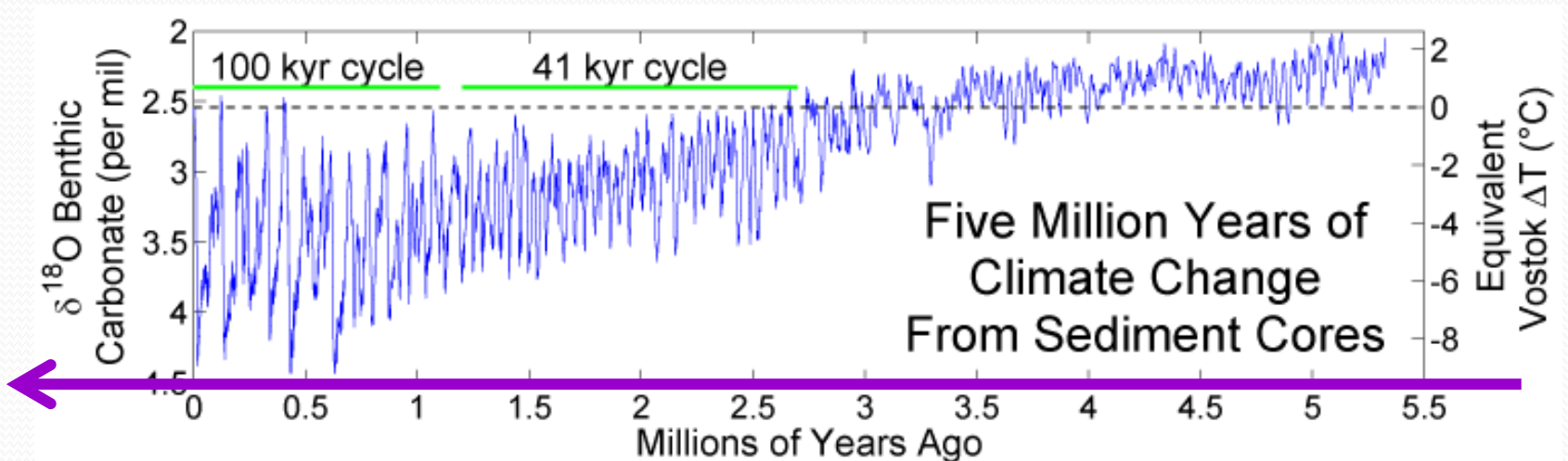
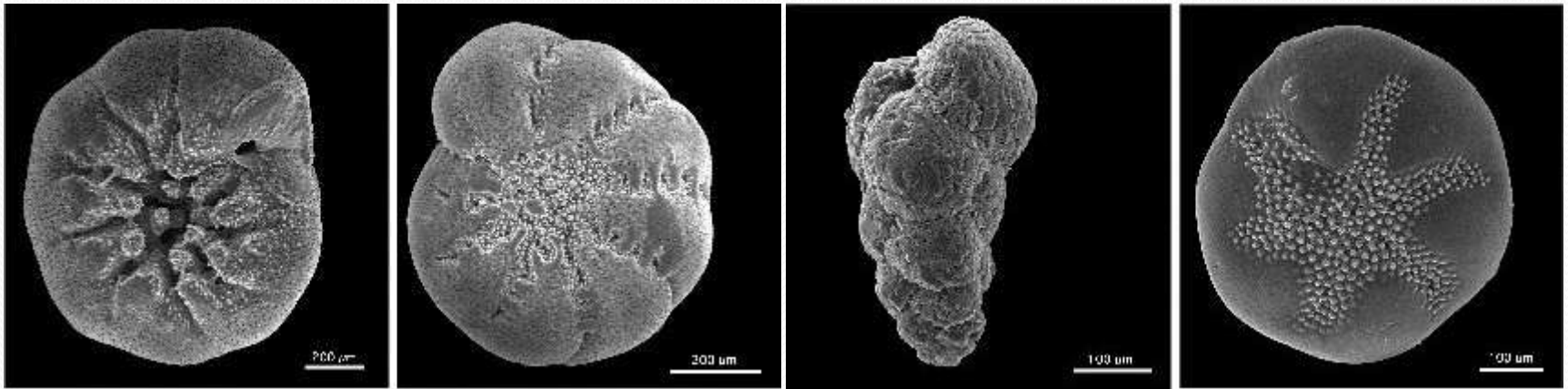
$$\delta^{18}O = \left(\frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{sample}}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{standard}} - 1 \right) * 1000 \text{ ‰}$$

Datação do Gelo



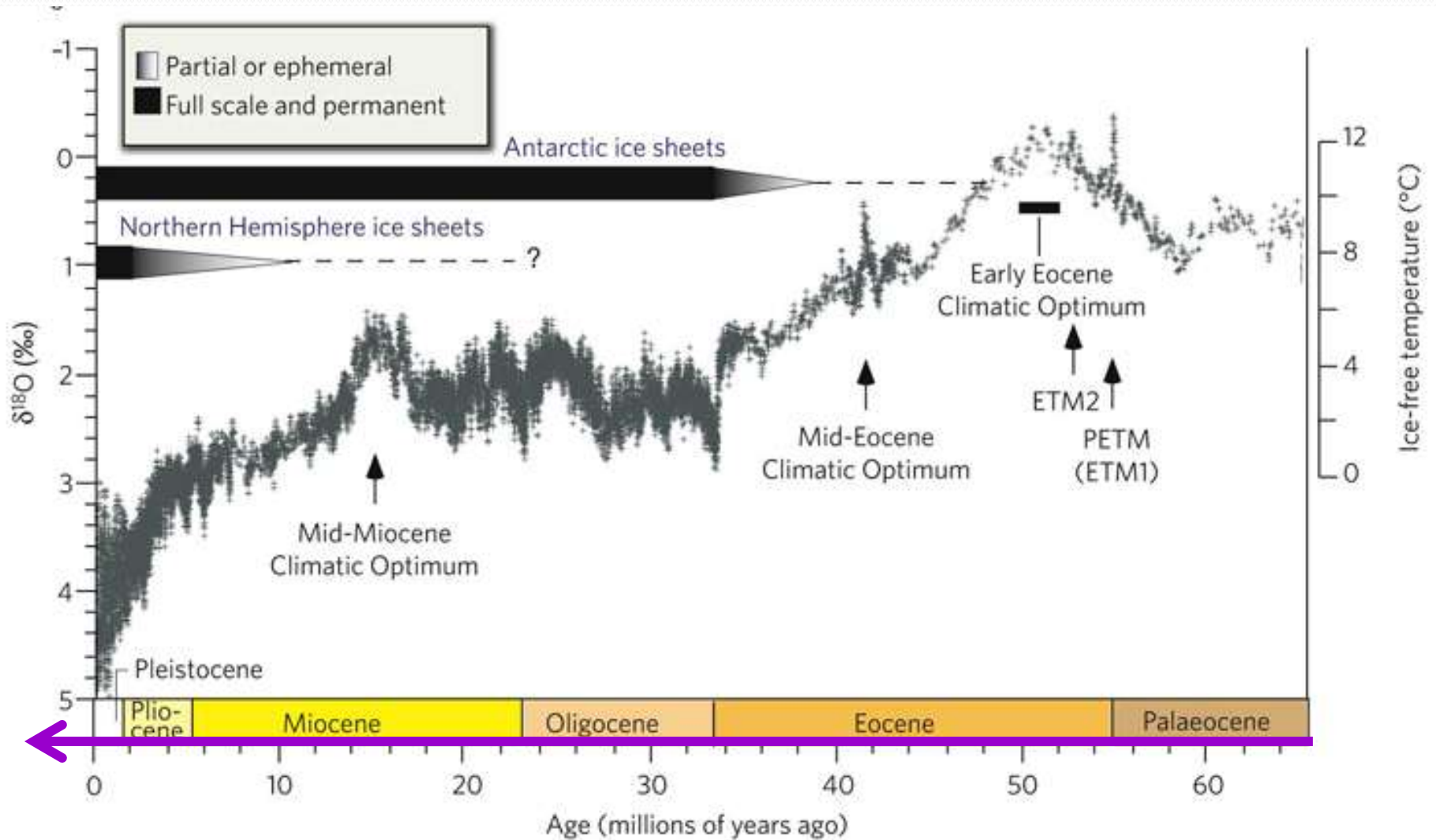
Sedimentos no fundo do oceano

A casca das Foraminíferas é de CaCO_3



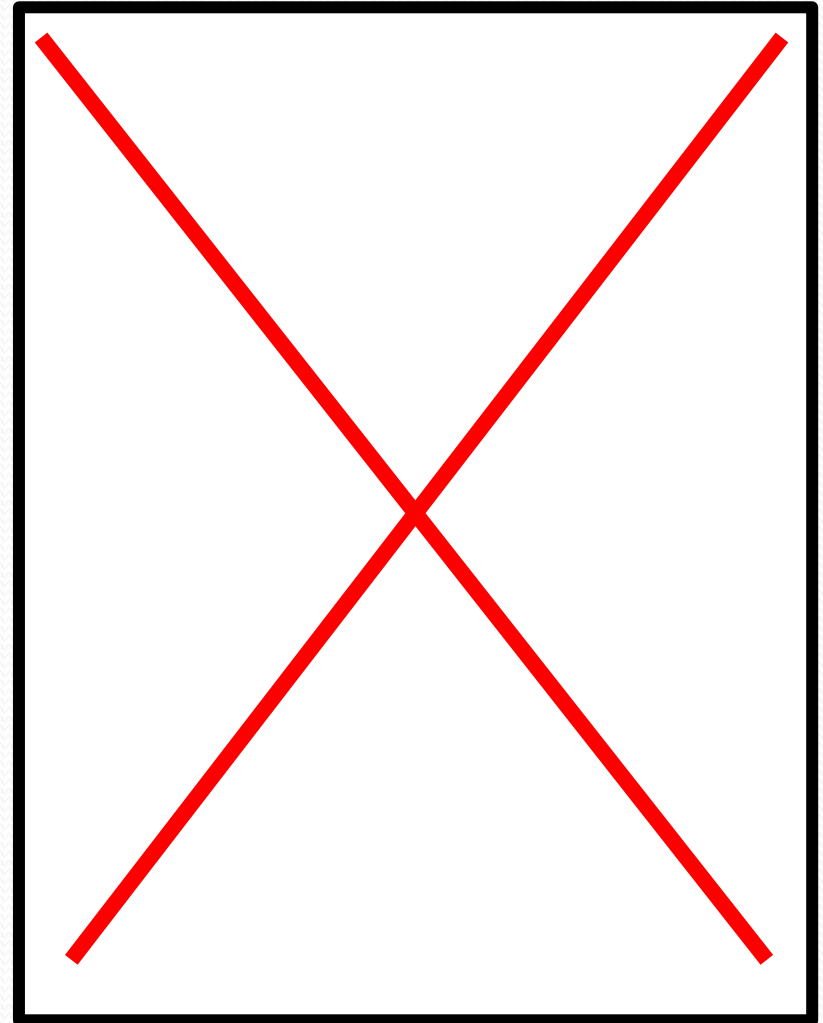
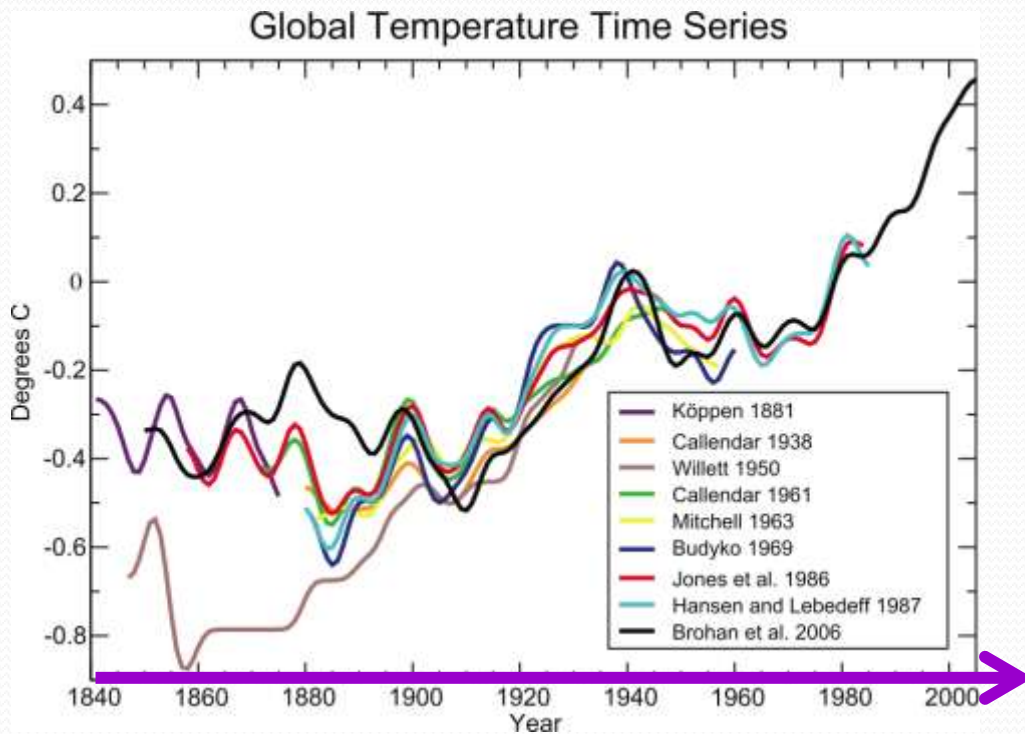
Lisiecki and Raymo (Paleoceanography, 2005).

Ainda mais profundo

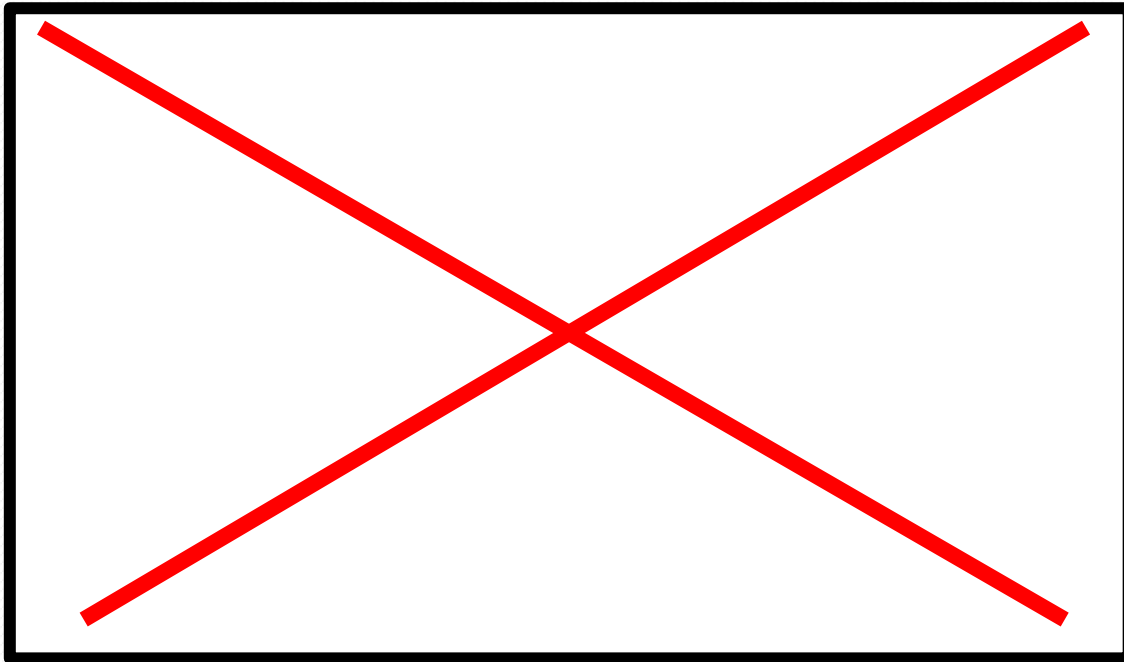
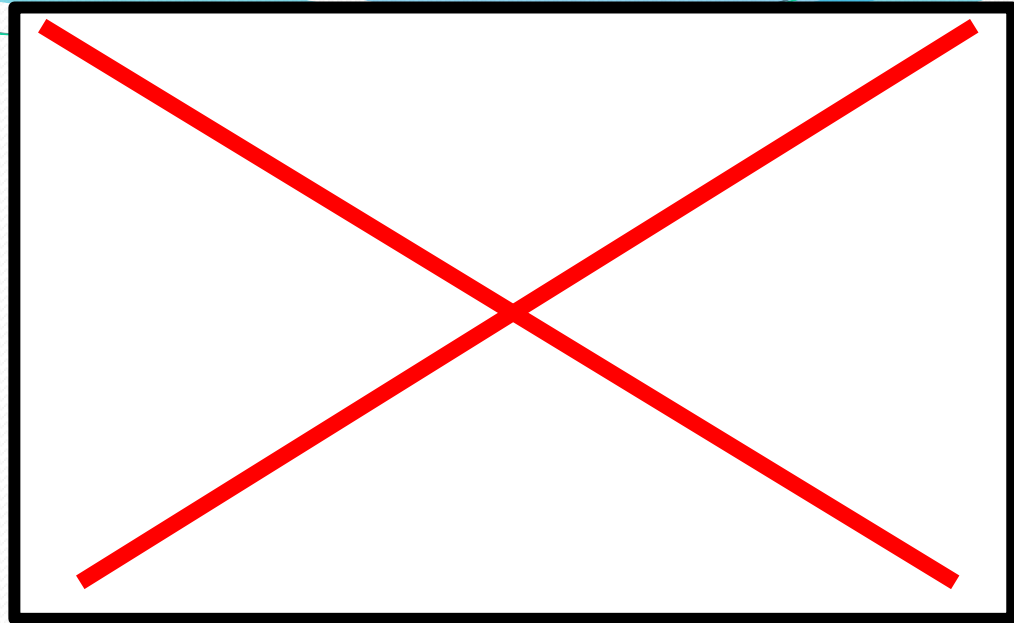


Zachos et al. (Nature, 2008)

Obs(1) Aumento de Temperatura



(2) Nível do mar



Church and White, 2011;
Jevrejeva et al., 2008;
Nerem et al., 2010

Este seminário

- Mudanças climáticas
- **Previsões numéricas de tempo e clima**
- Exemplos e problemas de modelos numéricos
- Estudando física da atmosfera na Amazônia

Um pouco de História...

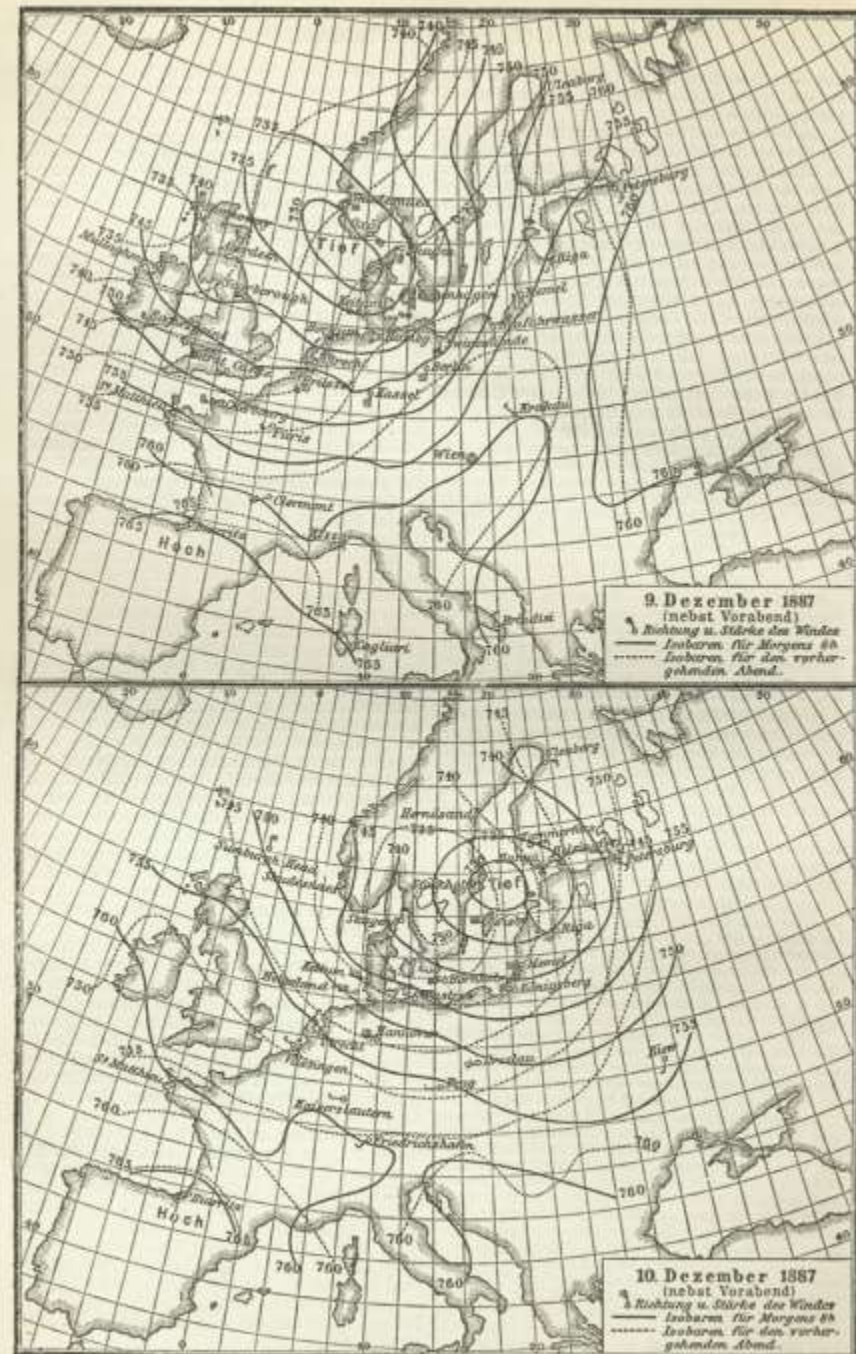
As previsões de tempo começaram baseadas na observação de padrões repetitivos:

- 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

Era moderna

- 1400's
 - Hygrometer - Cryfts (1450)
 - Anemometer - Alberti (1450)
- 1500's
 - Thermoscope - Galileo
- 1600's
 - Barometer - Torricelli (1643)
 - Les Meteoires - 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)

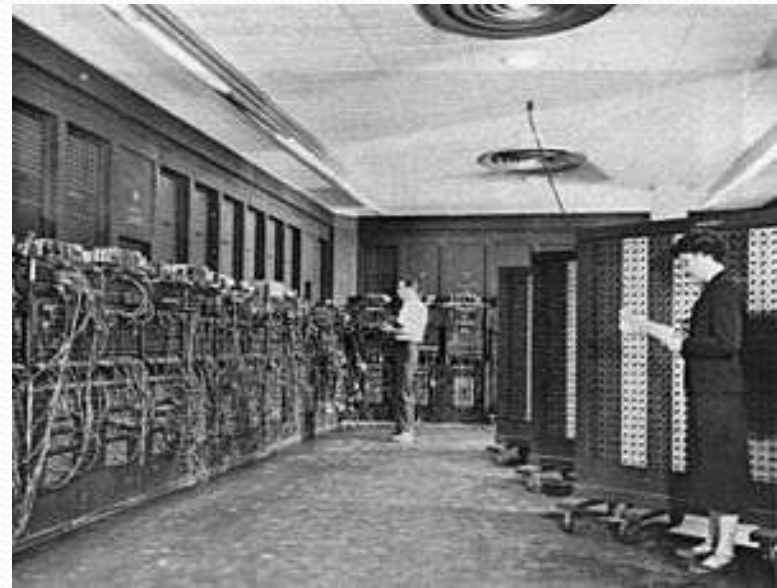
Previsão para a Europa 9 e 10 de dezembro de 1887



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

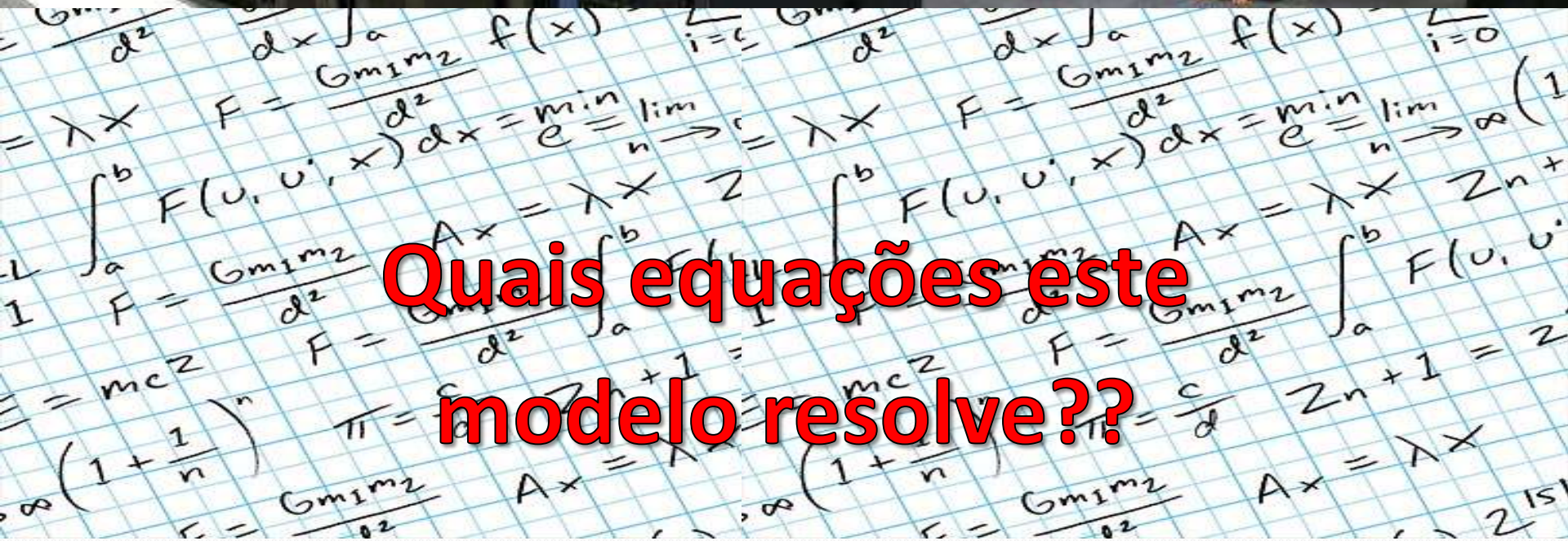
Previsão Numérica de Tempo

- Durante a 2ª guerra, os EUA construíram o primeiro computador
- 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





O que é um modelo numérico?



Quais equações este modelo resolve??

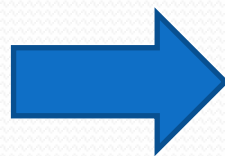
Equações de Din. dos Fluídos

- 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

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

- Parcial
- 2º ordem
- 1º grau
- Homogênea
- **NÃO-Linear**

$$\sum_j v_j \frac{\partial v_j}{\partial x_j}$$



CAOS

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

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

Conservação de Massa

- A massa é conservada, então $d\rho/dt=0$, onde

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

- ... Semelhante a conservação de momento:

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

Difusão
moleluclar

Fontes e
sumidouros de
vapor

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

Fontes e sumidouros de
momento: 2ª lei de
Newton

Até 50km...

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

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

Mov. Browniano
(Einstein)

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2D} = \frac{(1m)^2}{2 \cdot 0.2 \text{ cm}^2 / \text{s}} \approx 1.5 \text{ dias}$$

- Assim:

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

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

Algumas Equações da atmosfera

$$dp_a = -\rho_a g dz$$

$$p_a = \rho_a R' T_v$$

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

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

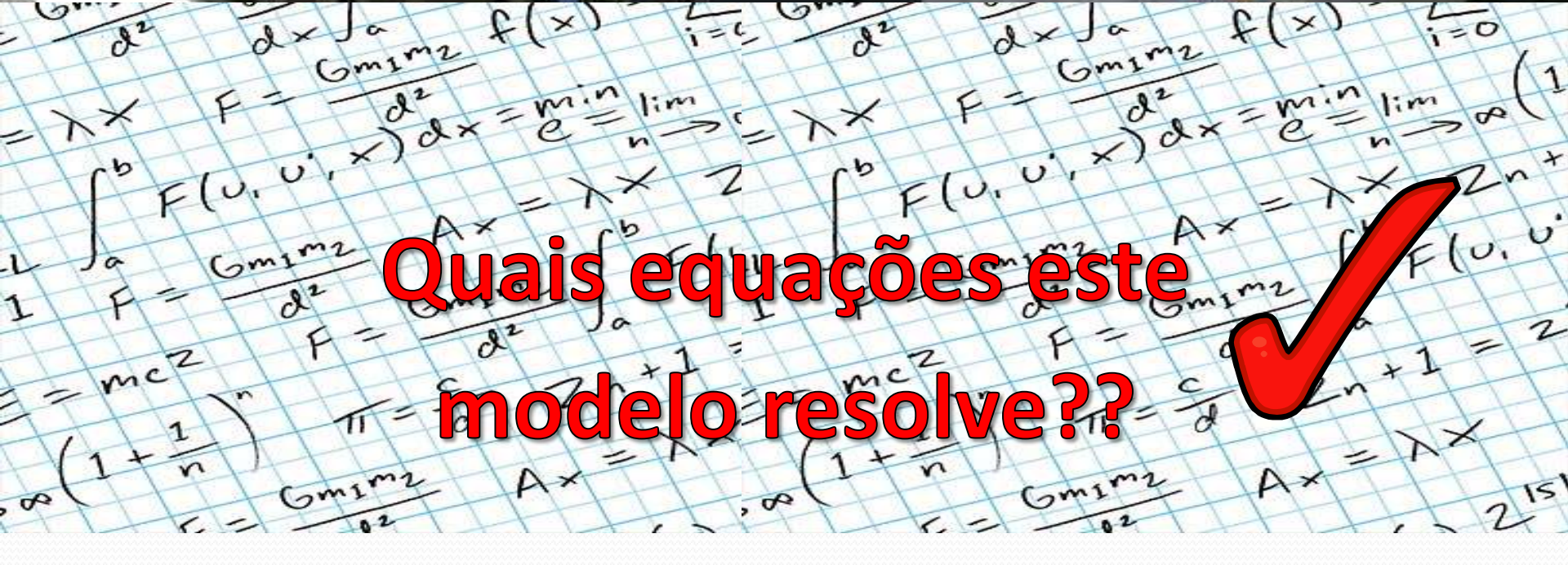
$$\theta_v = T_v \left(\frac{1000 \text{ hPa}}{p_a} \right)^\kappa$$

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

+ Reações químicas
+ Aerossóis



O que é um modelo numérico?



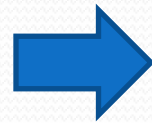
Quais equações este modelo resolve??



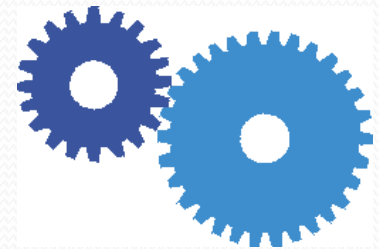
Previsão de Tempo Global

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

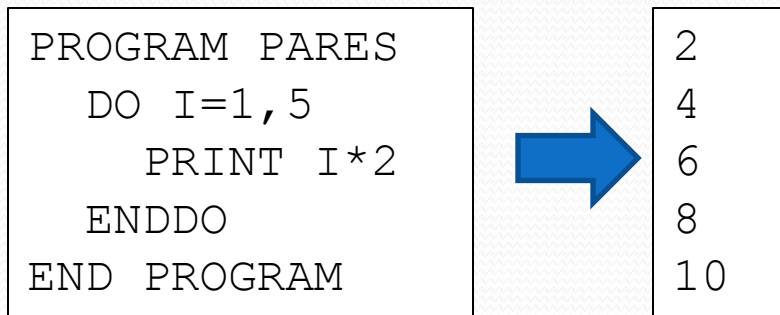
Precisamos:

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

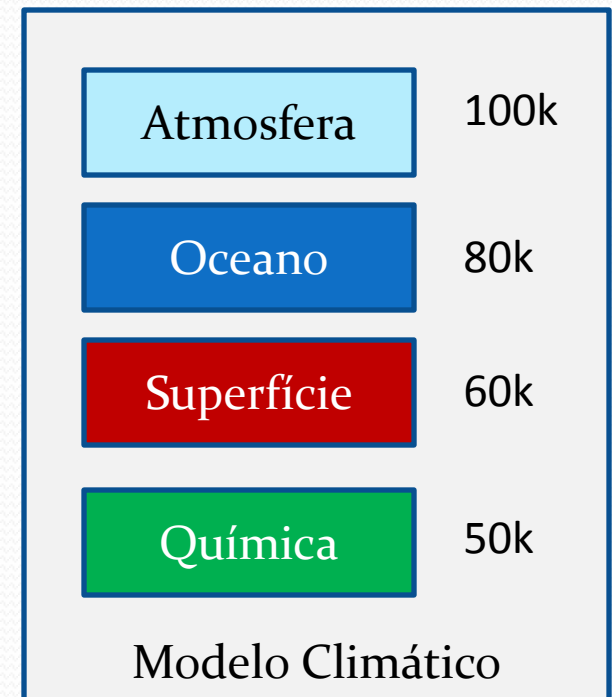


Complexidade Computacional

- A alta complexidade de um modelo atmosférico requer muitos pesquisadores e muitos anos para o seu desenvolvimento.

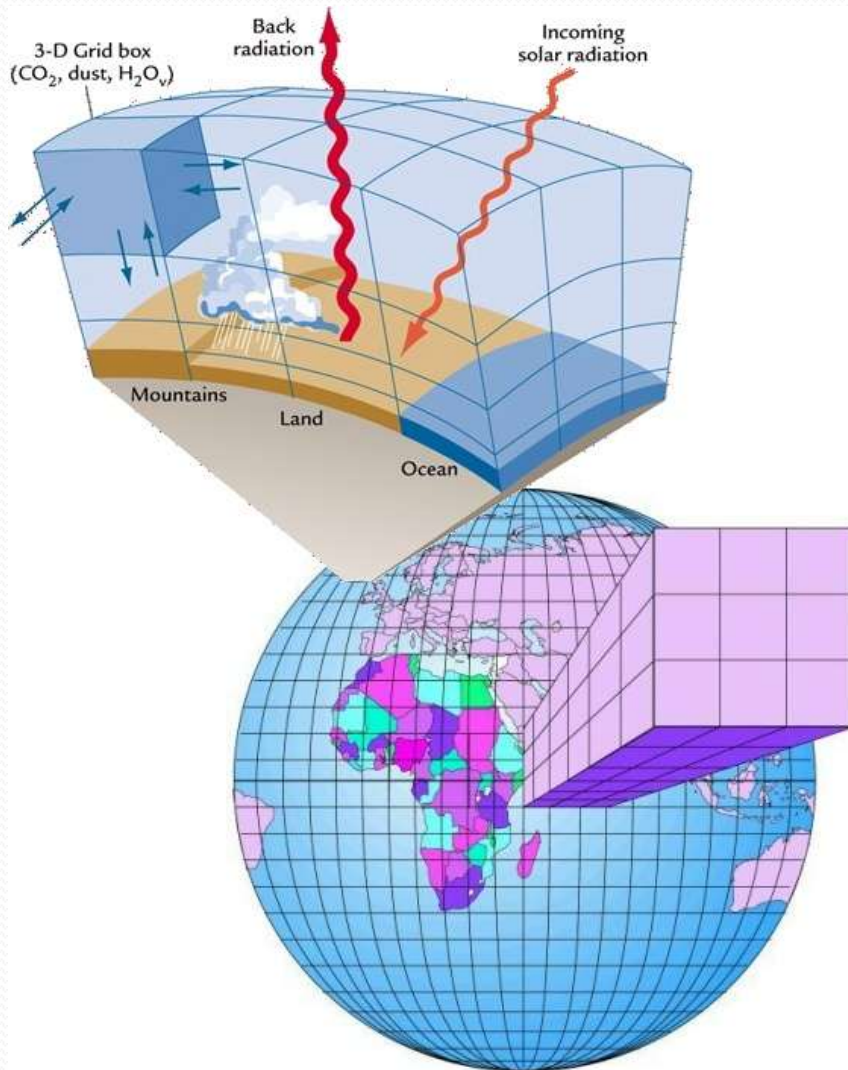


Programa de 3 linhas para escrever na tela os 5 primeiros números pares

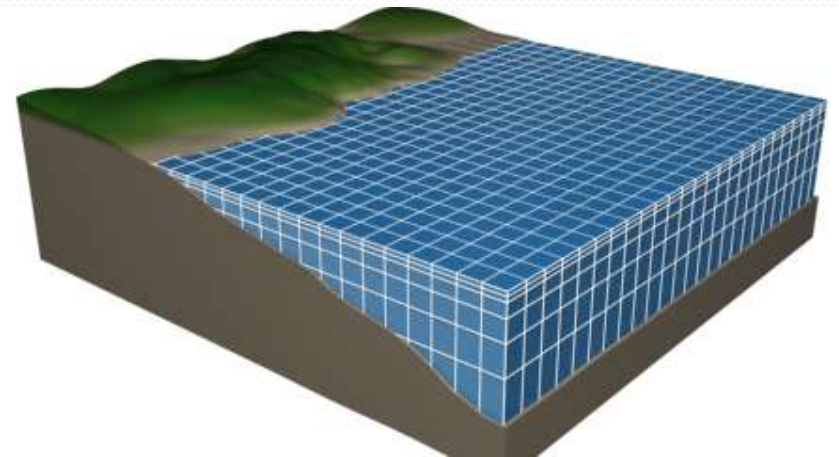


100-300 MIL linhas de código

Como resolver

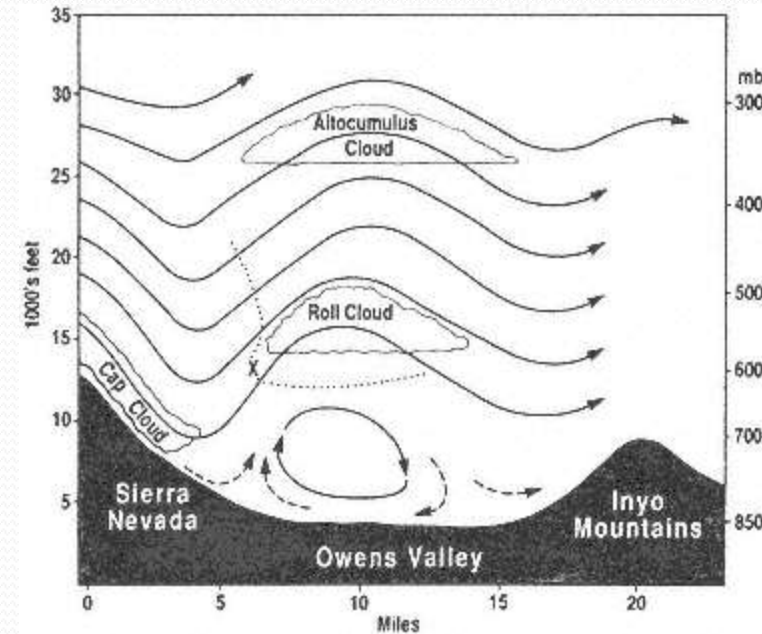


- Para resolver as equações no computador, precisamos dividir o problema em pequenos pedaços (**discretização numérica**).
- As equações são calculadas apenas nos pontos definidos por essa **grade**.

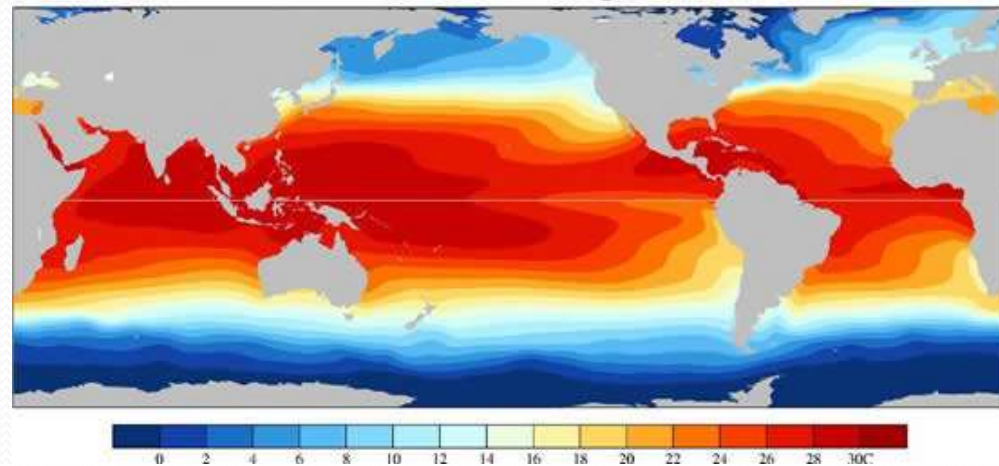


Solução

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



2007 mean sea surface temperature (C)

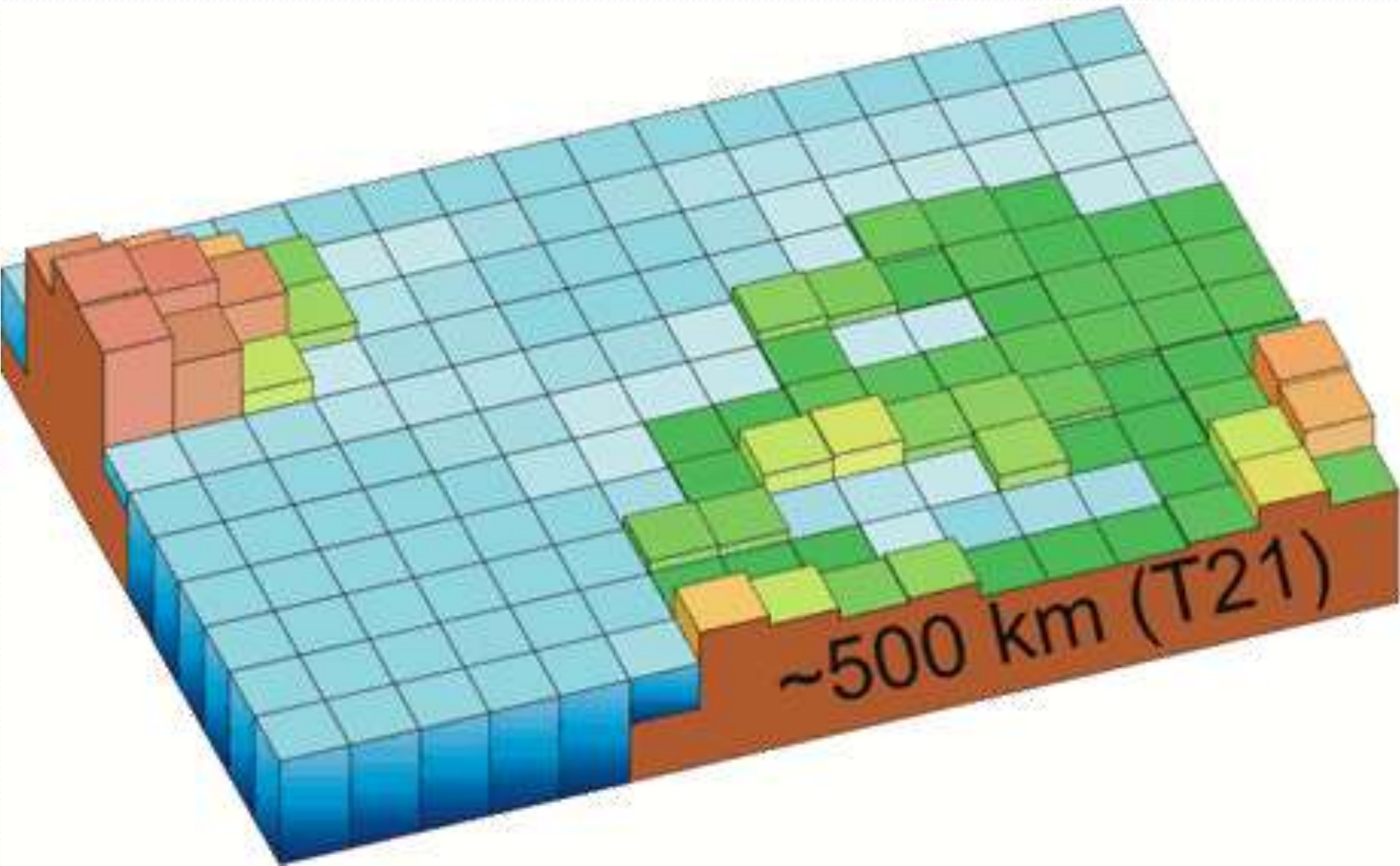


O resultado da previsão é bom??

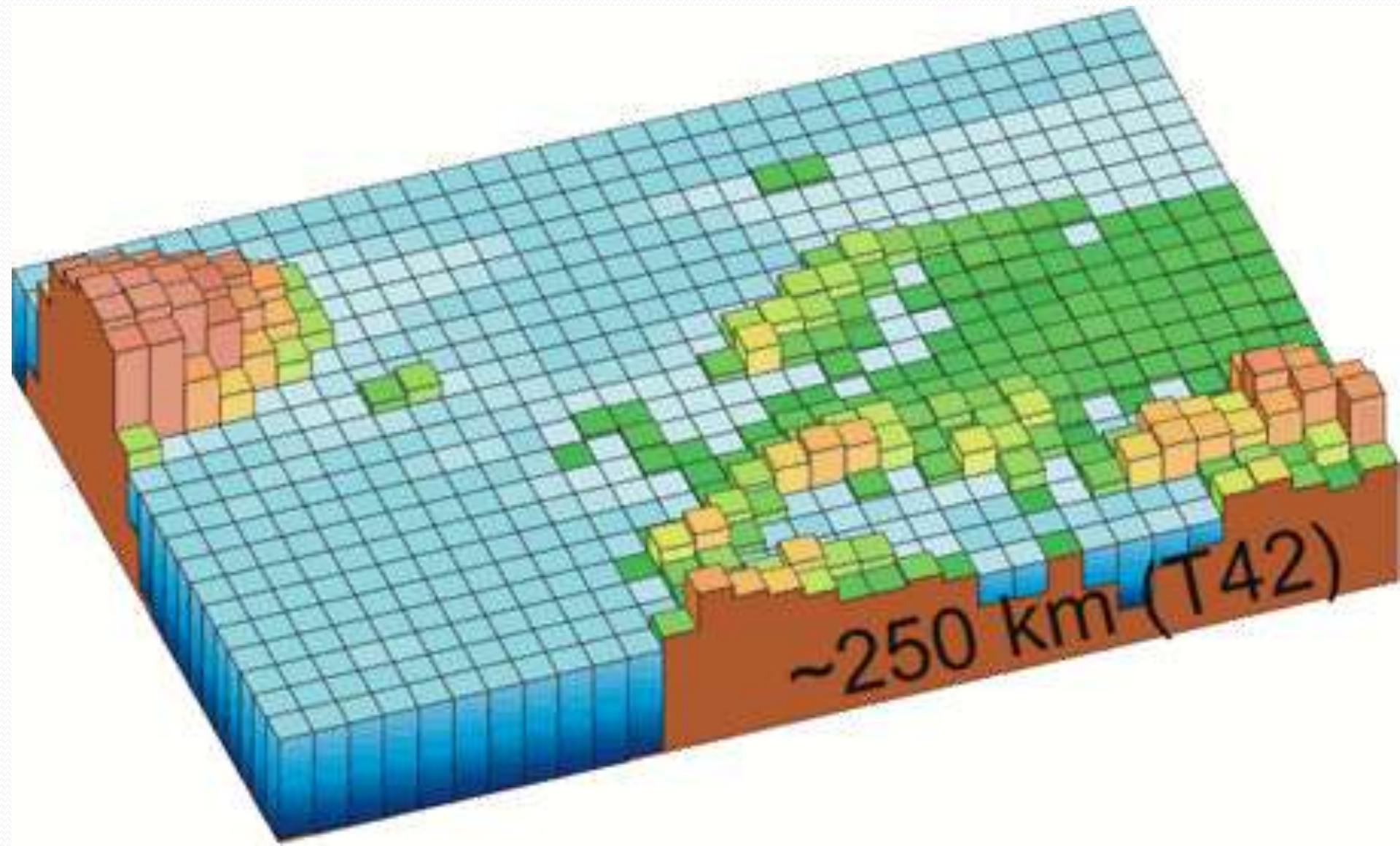
A qualidade da nossa solução (previsão de tempo) vai depender de vários fatores:

- A **resolução** espacial e temporal adequada

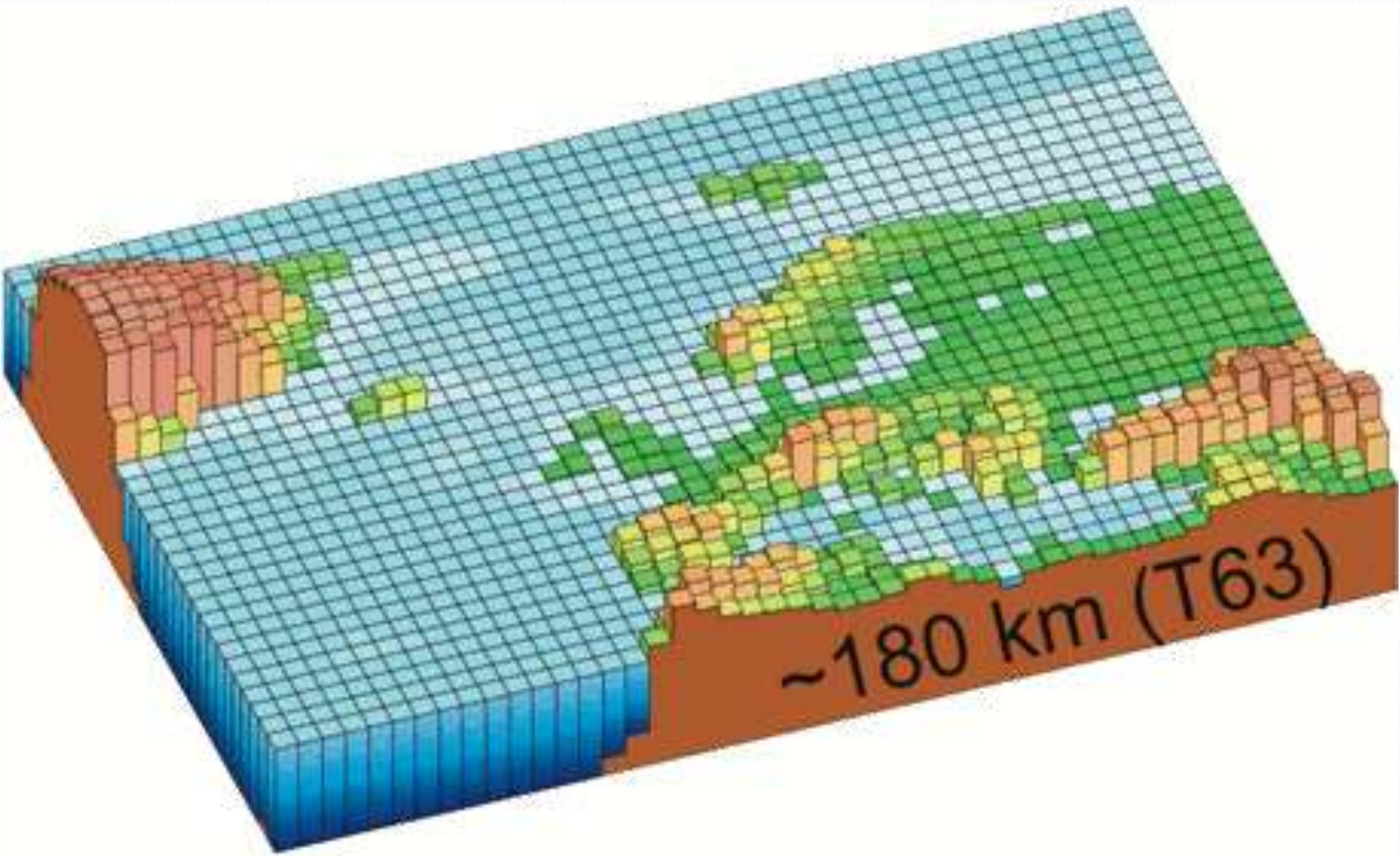
Resolução espacial



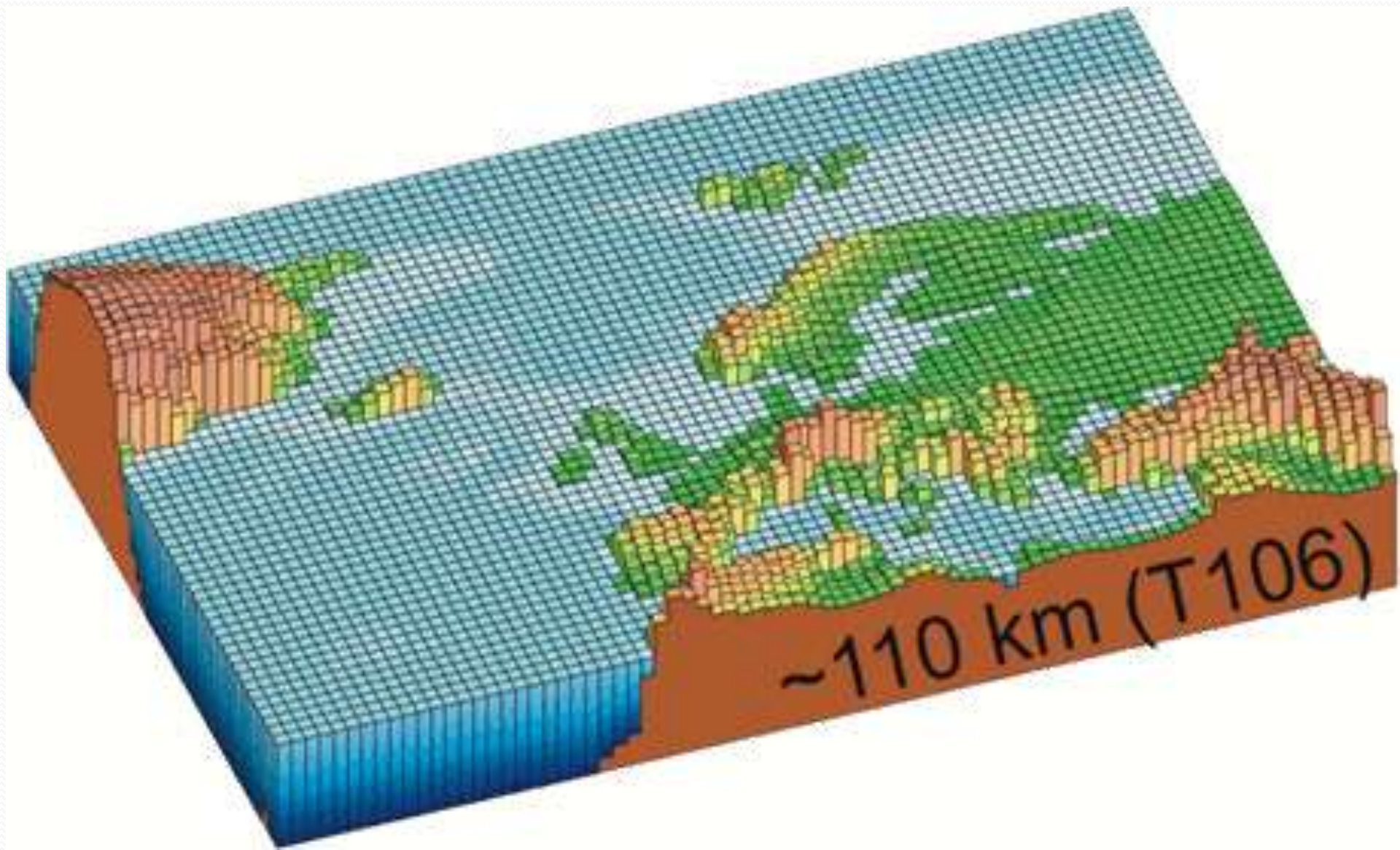
Resolução espacial



Resolução espacial



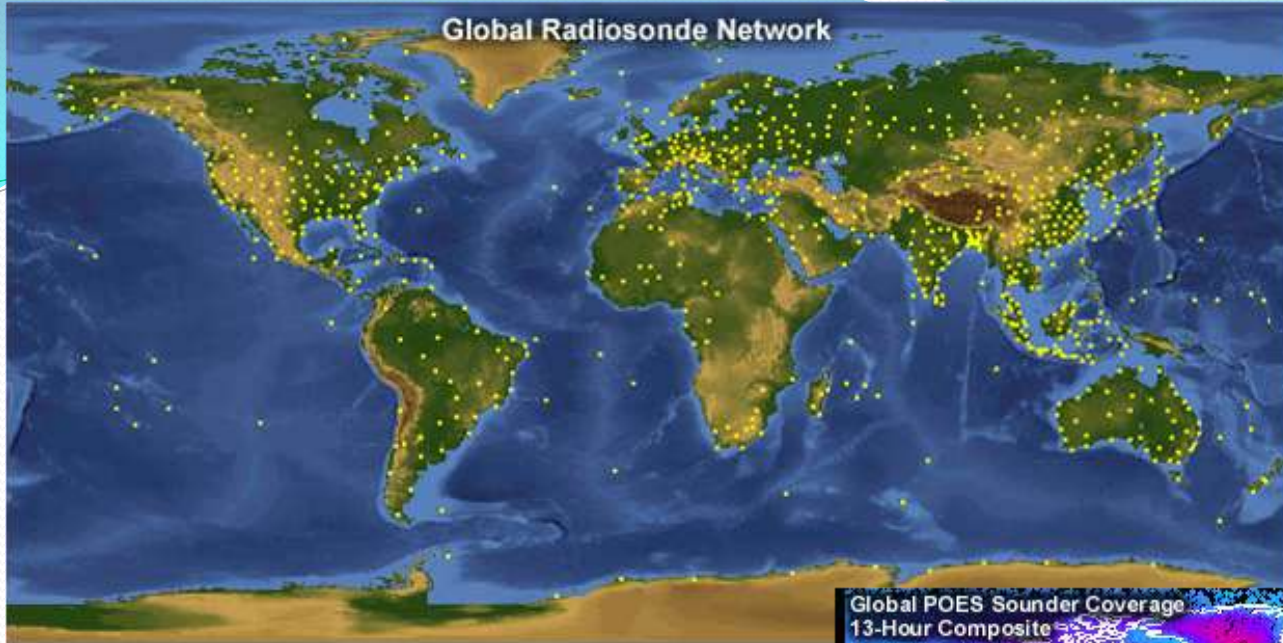
Resolução espacial



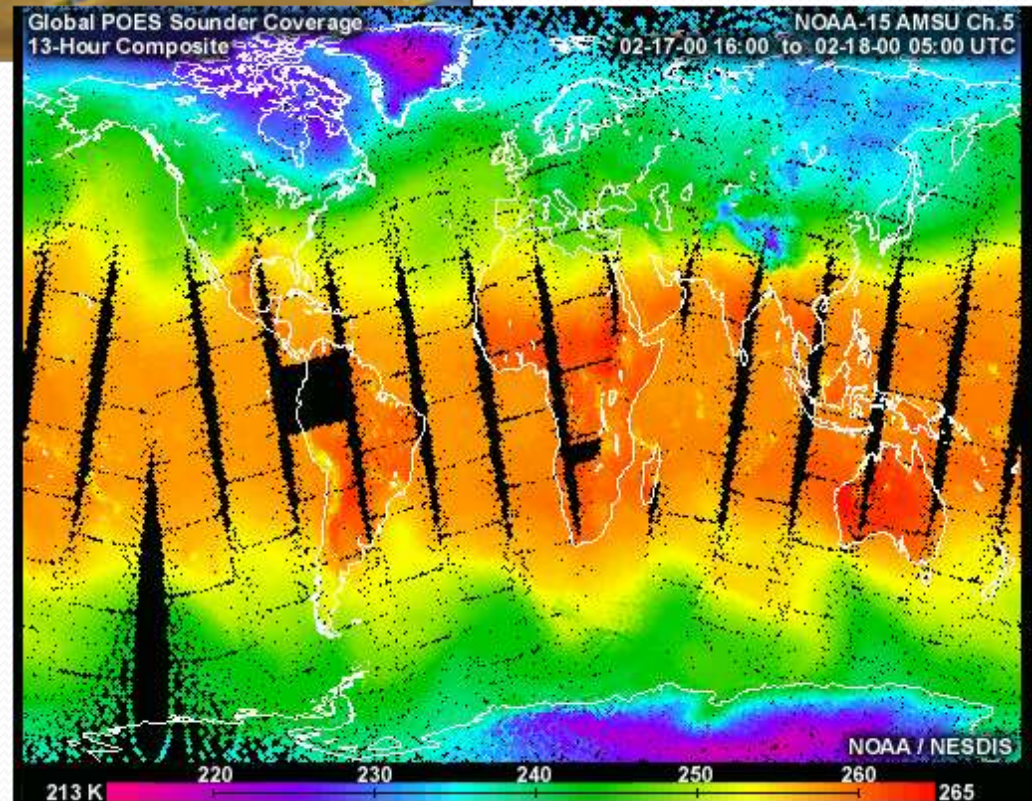
O resultado da previsão é bom??

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:

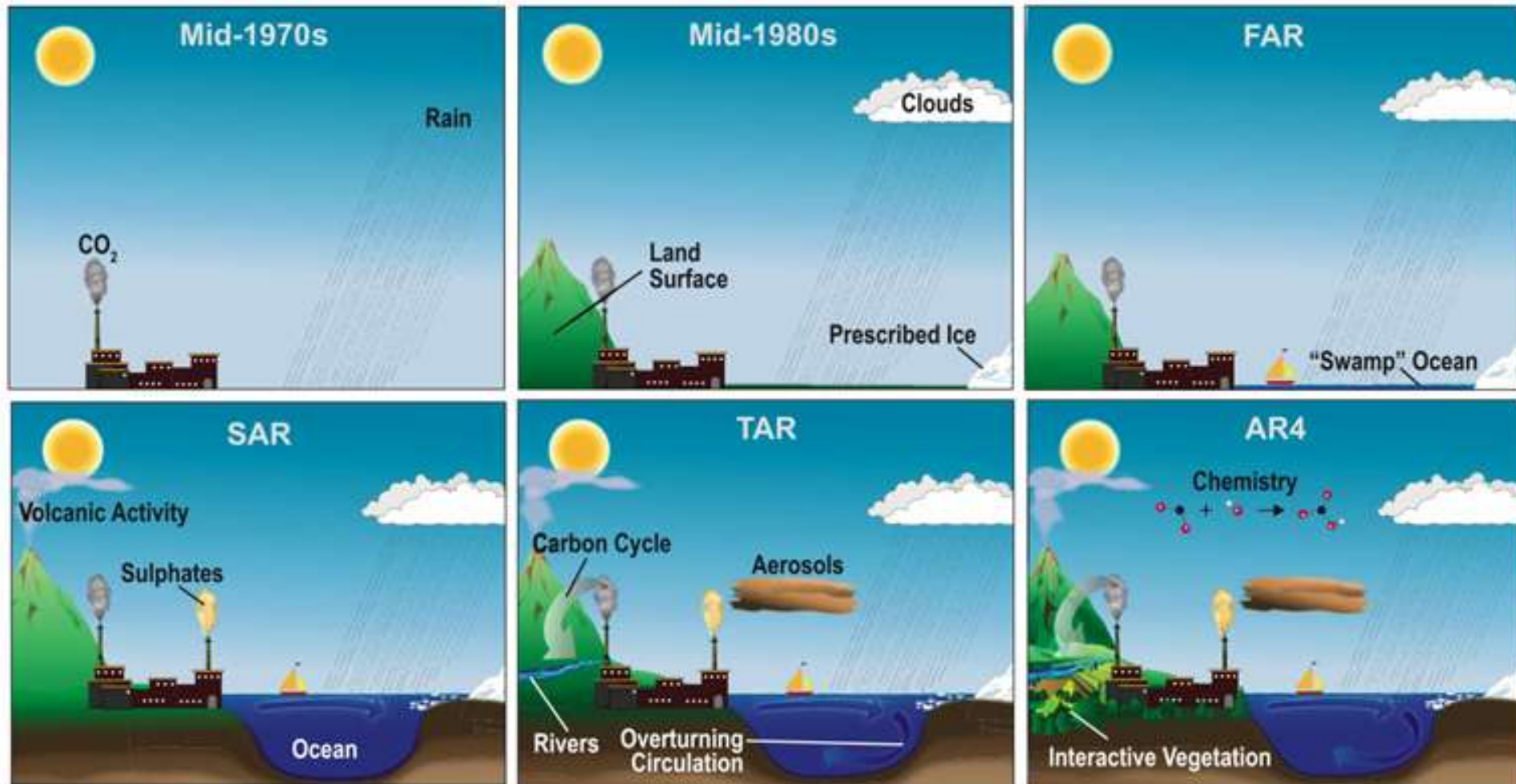
- ✓ A **resolução** espacial e temporal adequada
- ✓ Qualidade da condição inicial
 - Melhorou muito com os satélites a partir de 1970
 - É o limitante da qualidade hoje em dia
- Processos físicos sub-grade incluídos
 - Radiação
 - Dinâmica dos fluídos
 - ...

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**.

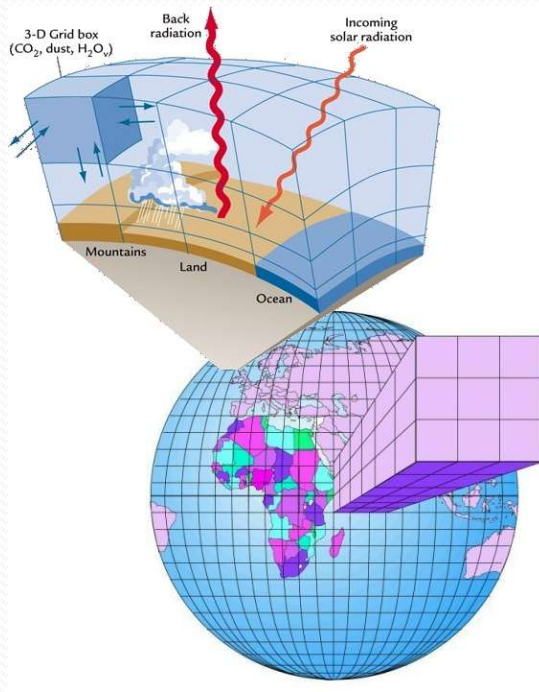
Evolução dos modelos atmosféricos



Este seminário

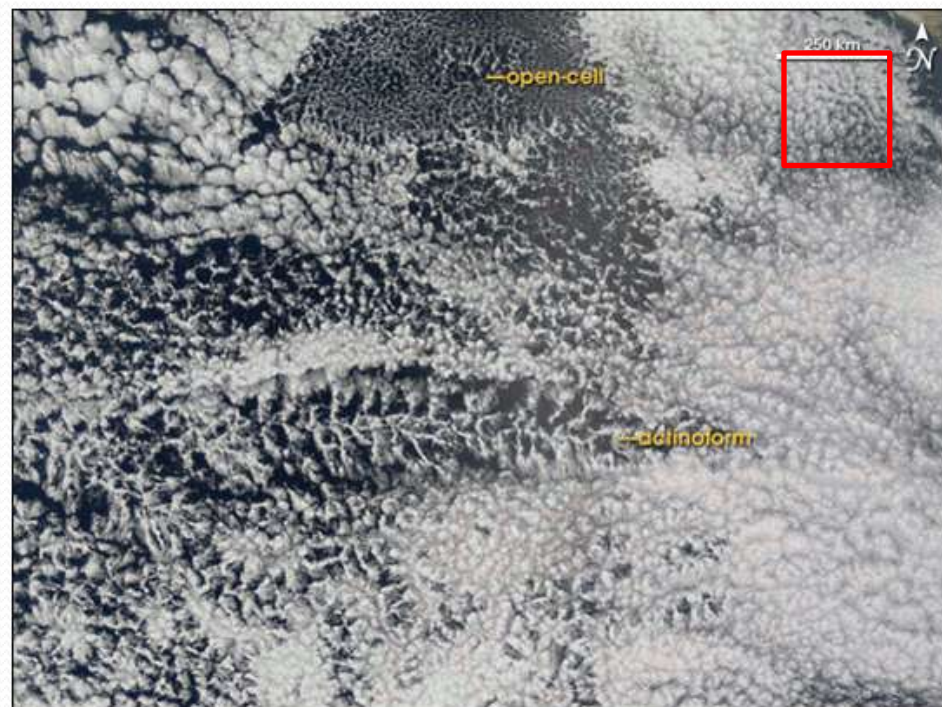
- Mudanças climáticas
- Previsões numéricas de tempo e clima
- Exemplos e problemas de modelos numéricos
- Estudando física da atmosfera na Amazônia

Como incluir processos sub-grade?

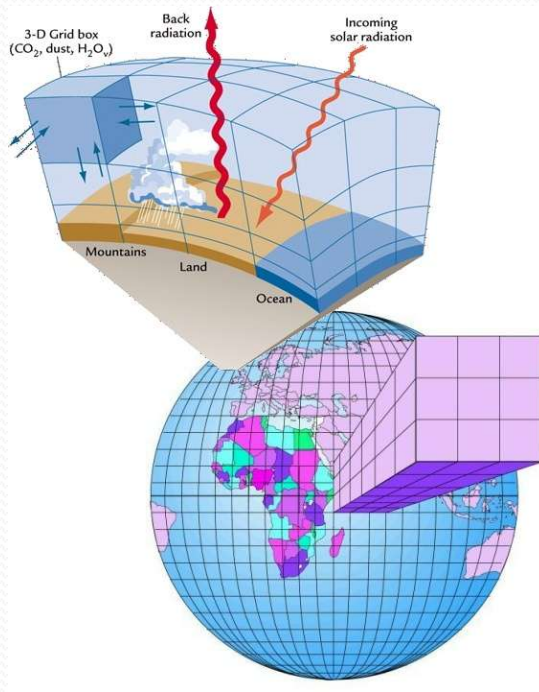


- Nossas equações só conseguem resolver o que pode ser representado usando os pontos que escolhemos!

Como representar as nuvens?

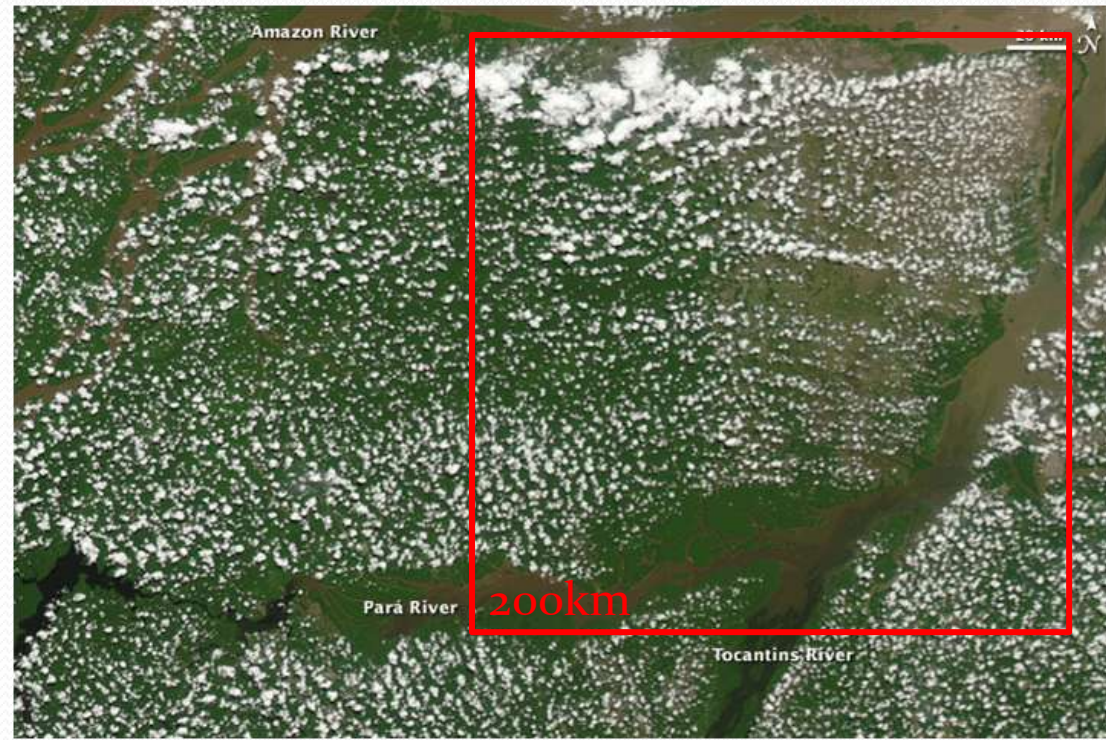


Como incluir processos sub-grade?

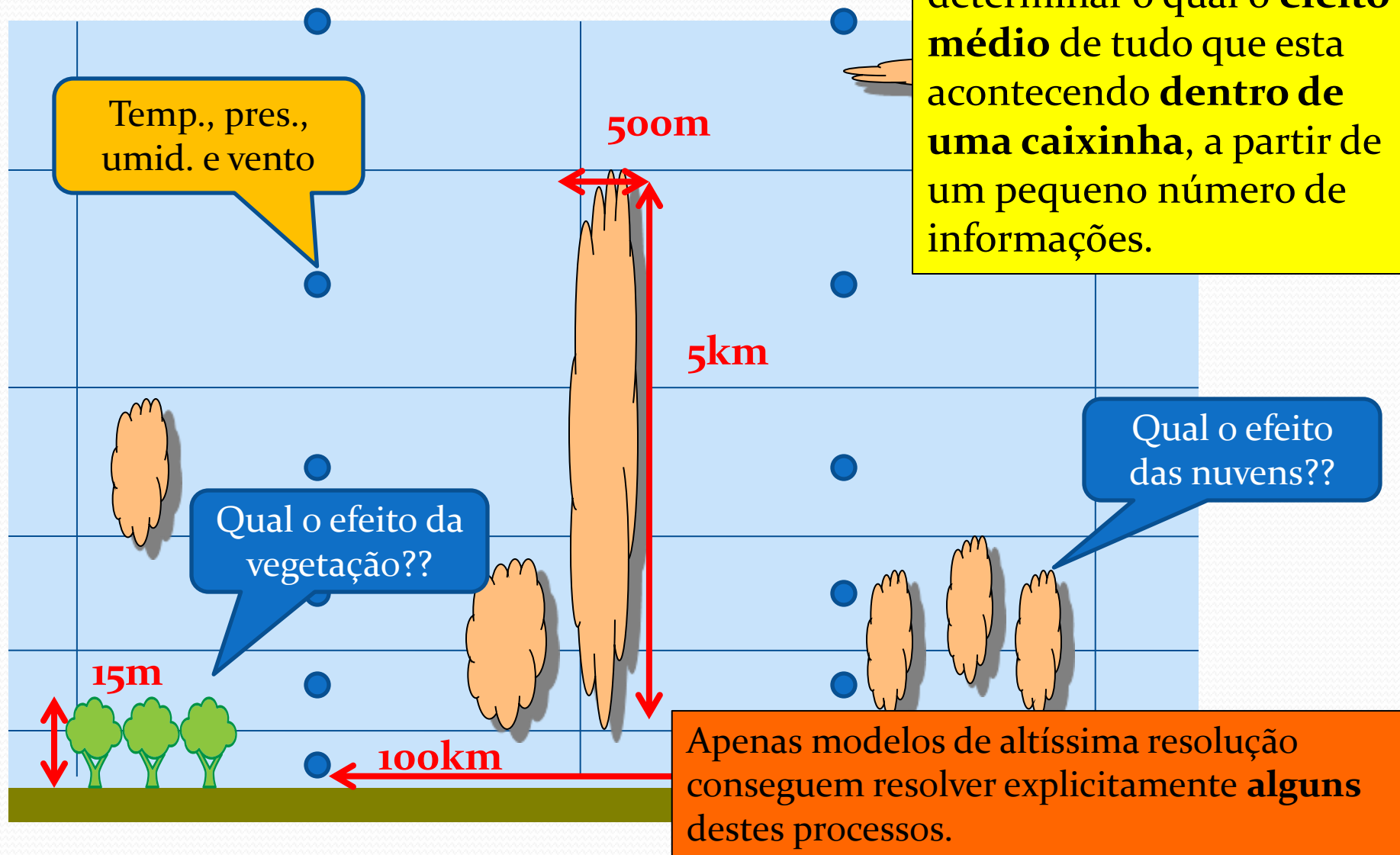


- Nossas equações só conseguem resolver o que pode ser representado usando os pontos que escolhemos!

Como representar a floresta?

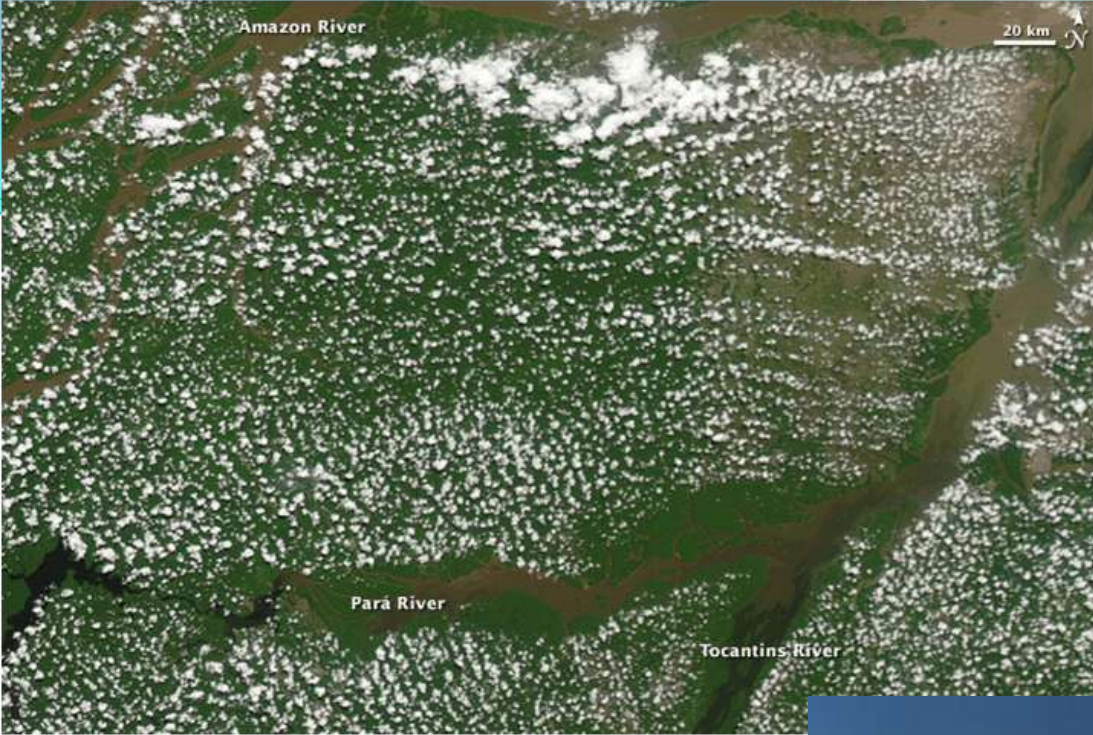


Parametrização



↑ Resolução ↓

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

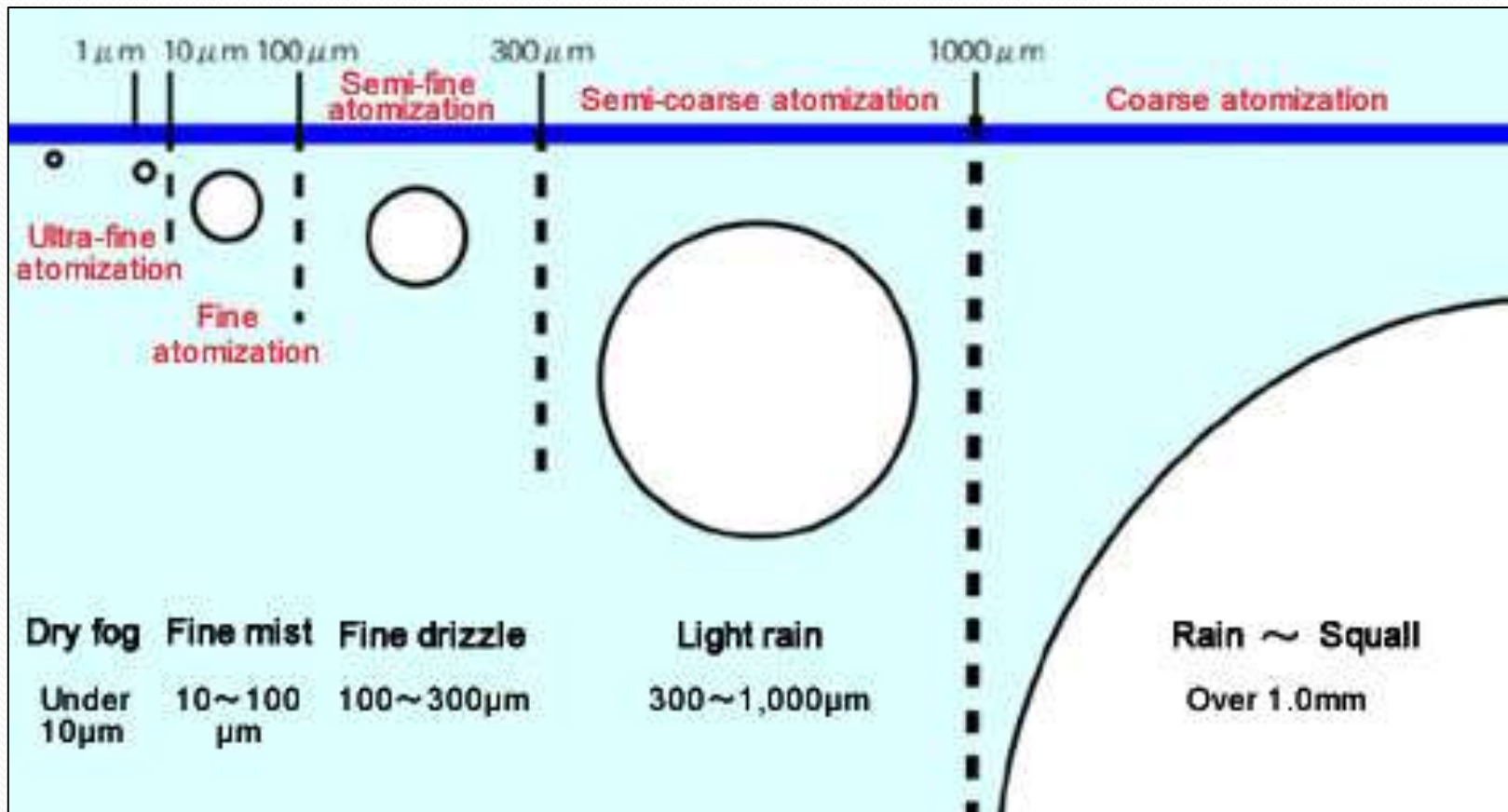


Como
representar a
convecção?



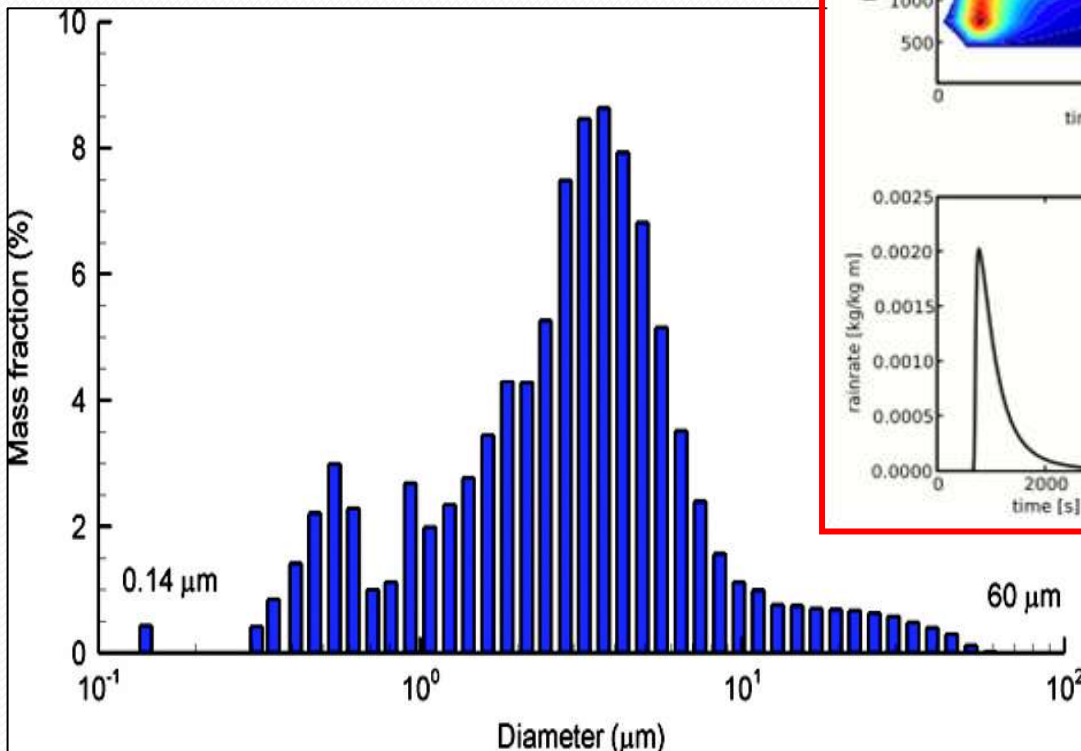
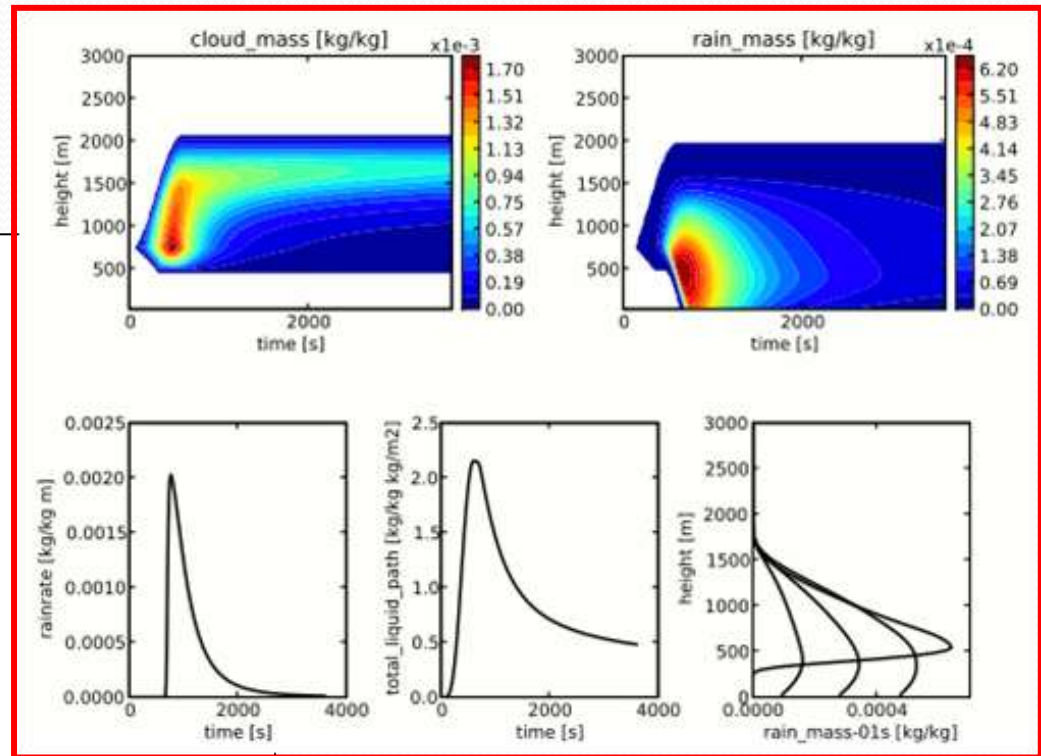
Single Particle Microphysics

- 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.



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)
- São usados normalmente em modelos de meso escala
- São muito mais rápidos que “bin”

Ref.: S. Freitas, K. Longo et al, GMAI - INPE

00:00:00

26 Apr 2007

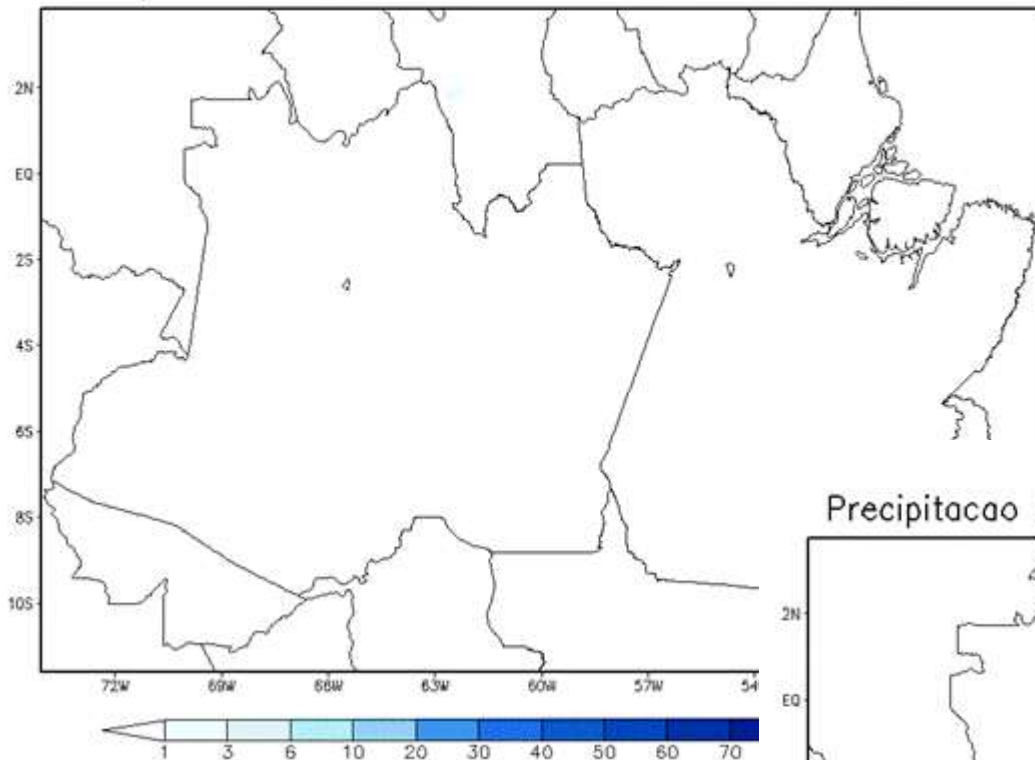
1 of 16

Thursday

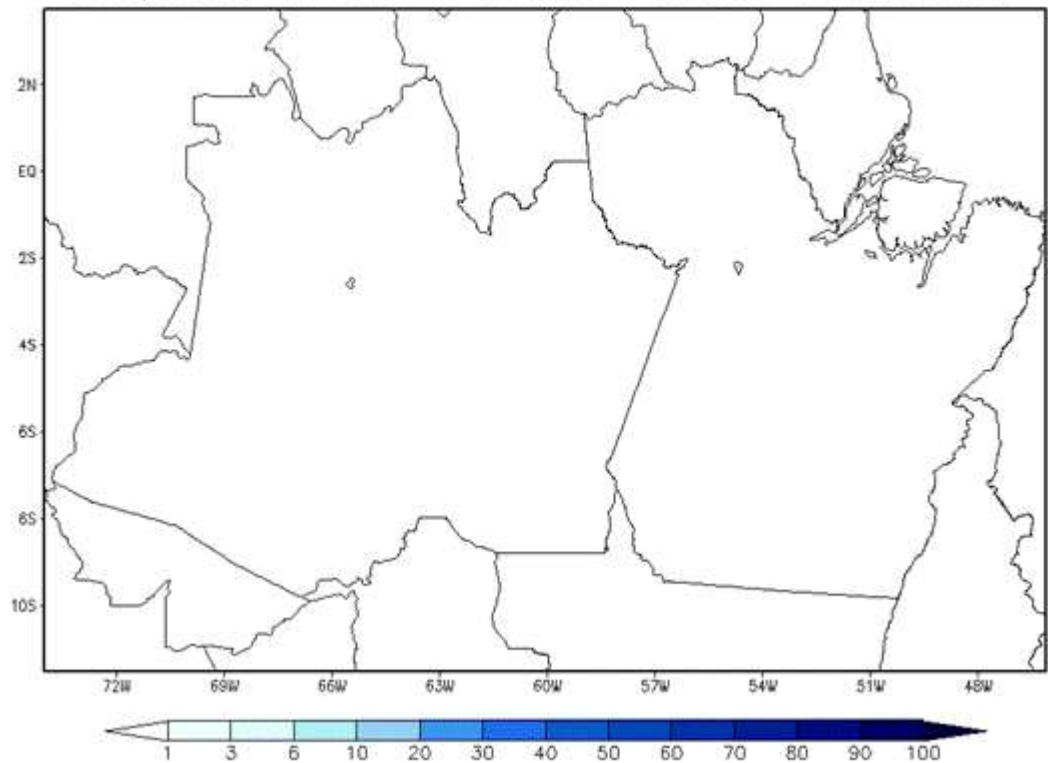


Microfísica Modelo Mesoescala

Precipitacao AM PAR-OFF resolucao 3.5Km 01Z26APR2007



Precipitacao AM PAR-ON resolucao 17.5Km 01Z26APR2007

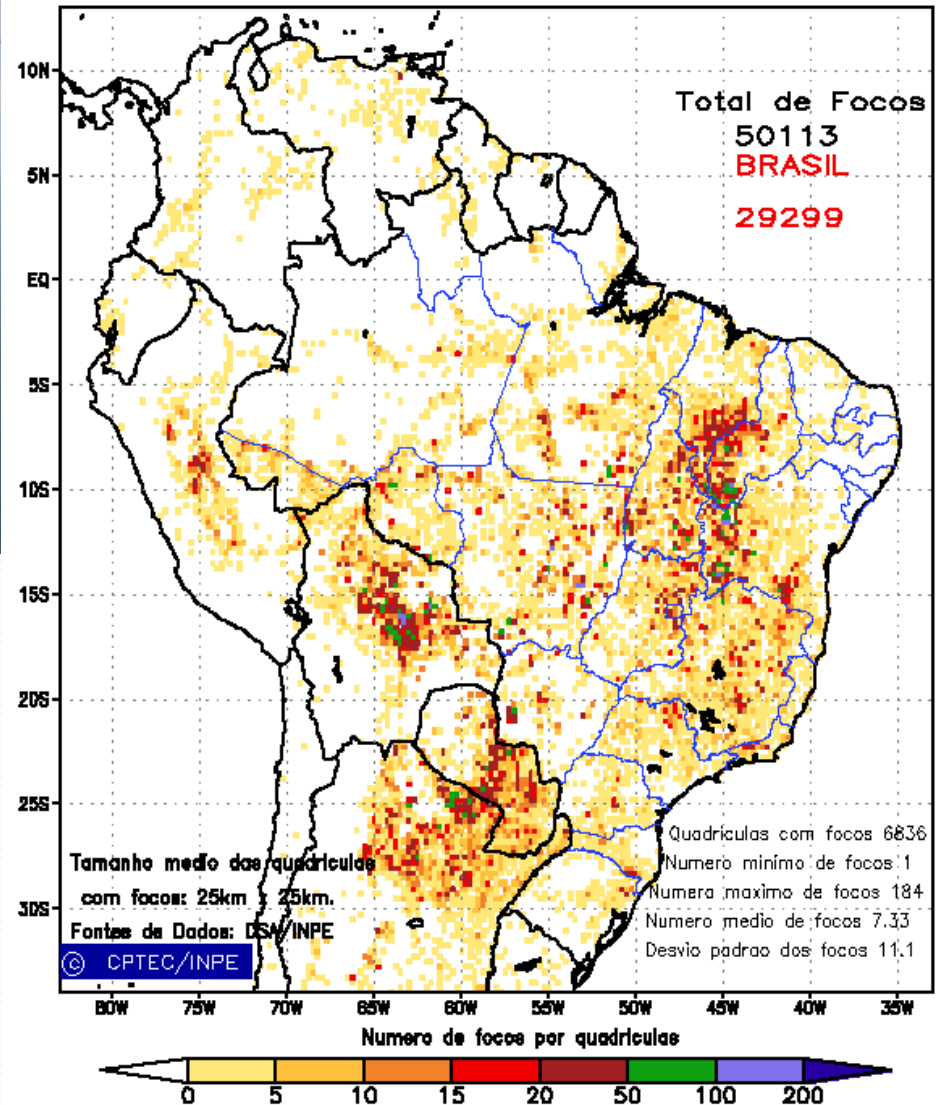


Parametrização Modelo Climático



Focos de Queima

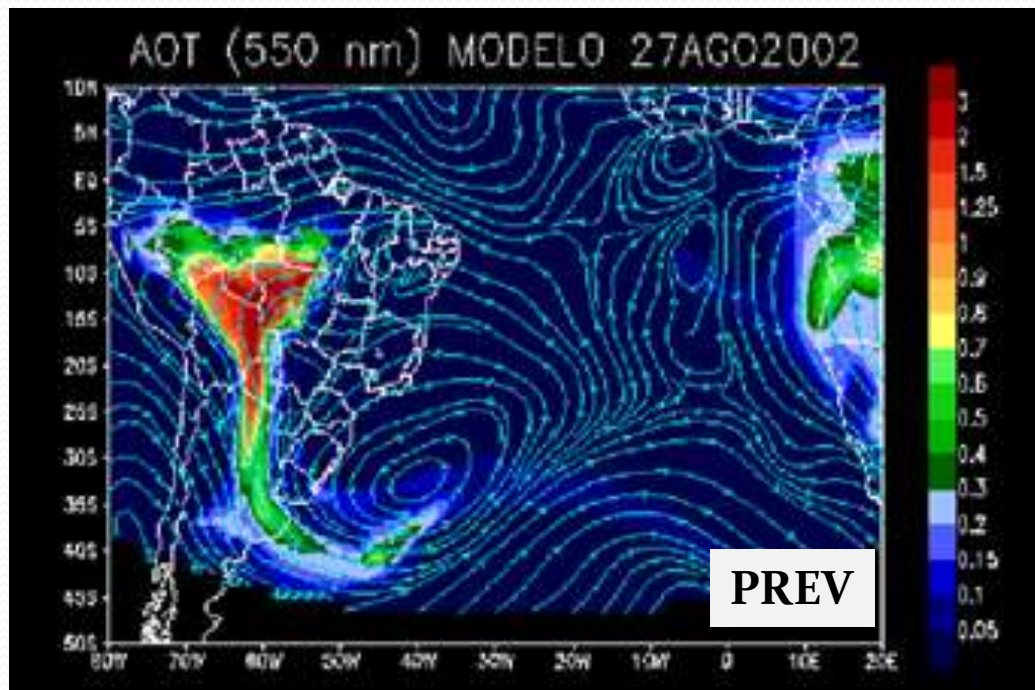
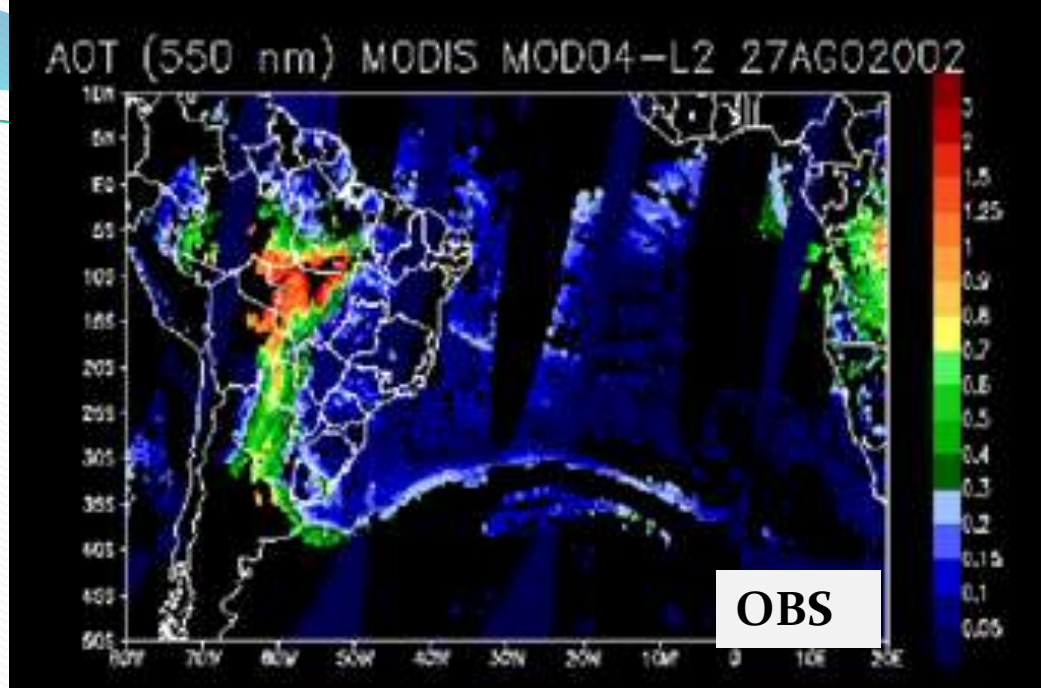
Acumulado de 01 a 17 de Setembro de 2011
AQUA_M-T - passagem as 17:30 UTC



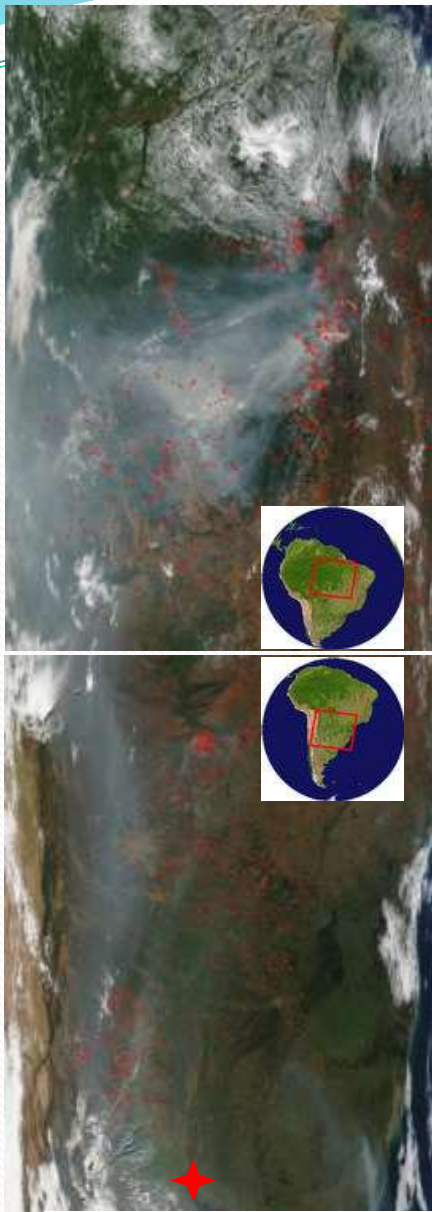
E a química e os aerossóis?

Química

- O Brasil é 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

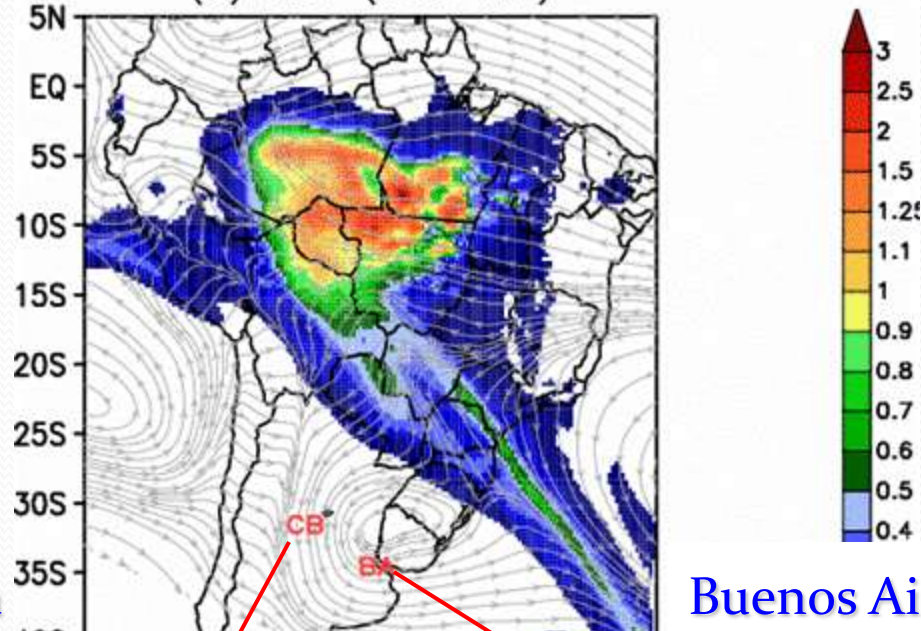


27 August 2002

AOT

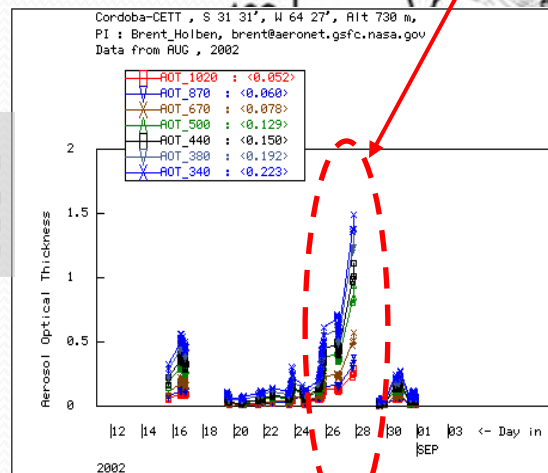
Time: 00Z22AUG2002

(a) AOT (500 nm)

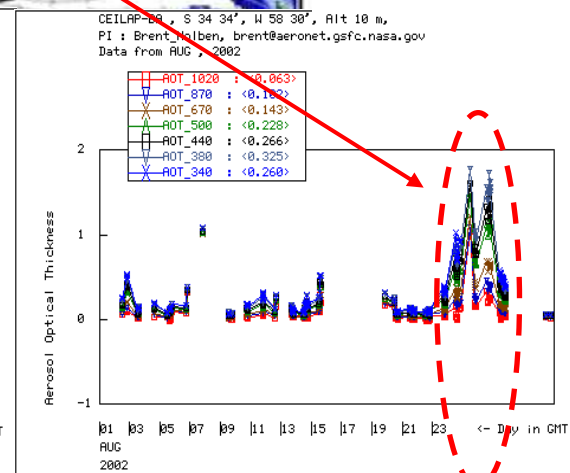


Córdoba

Buenos Aires



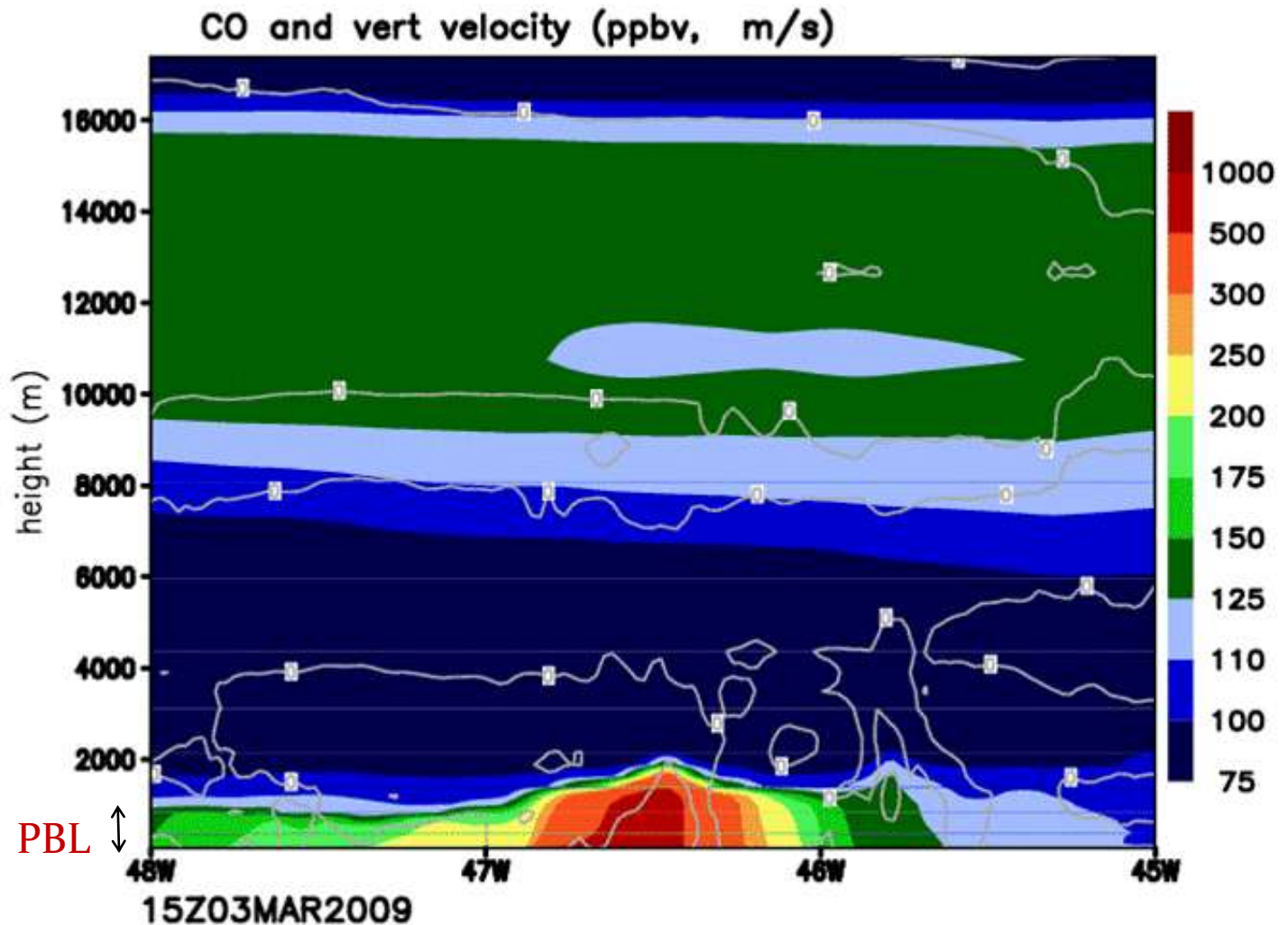
26-29 Aug 2002



26-29 Aug 2002

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

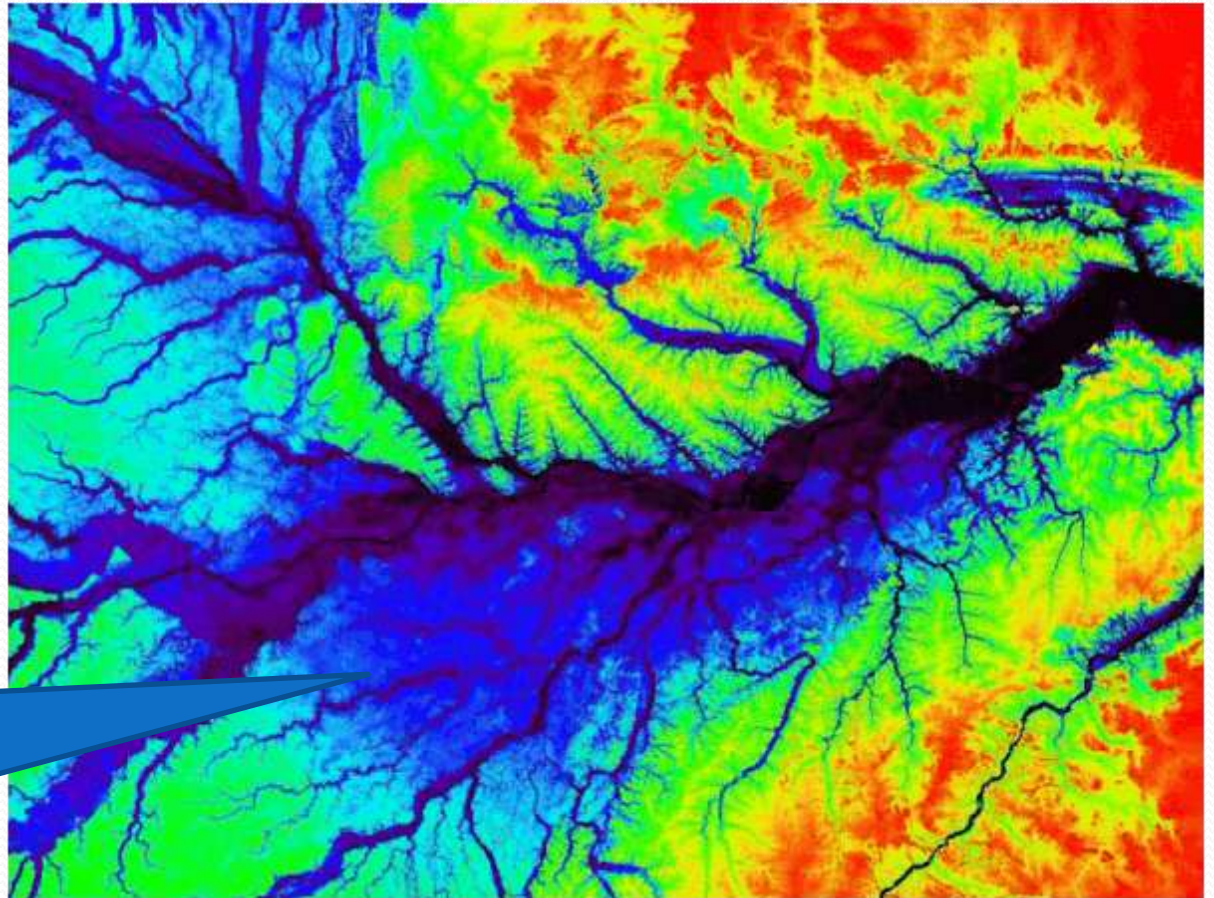
Plume rise



Não conhecemos tudo...

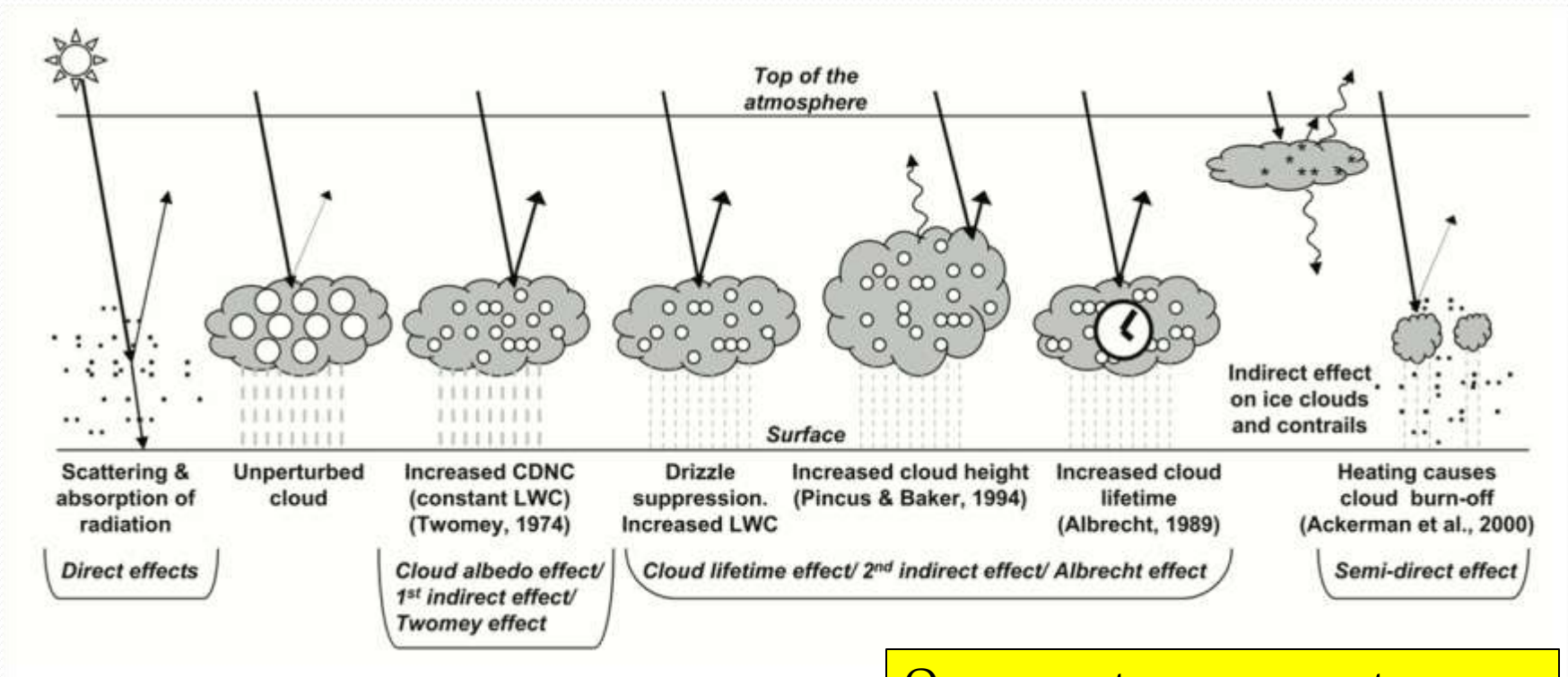
- Quando modelamos a floresta, não incluímos as área alagadas!

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



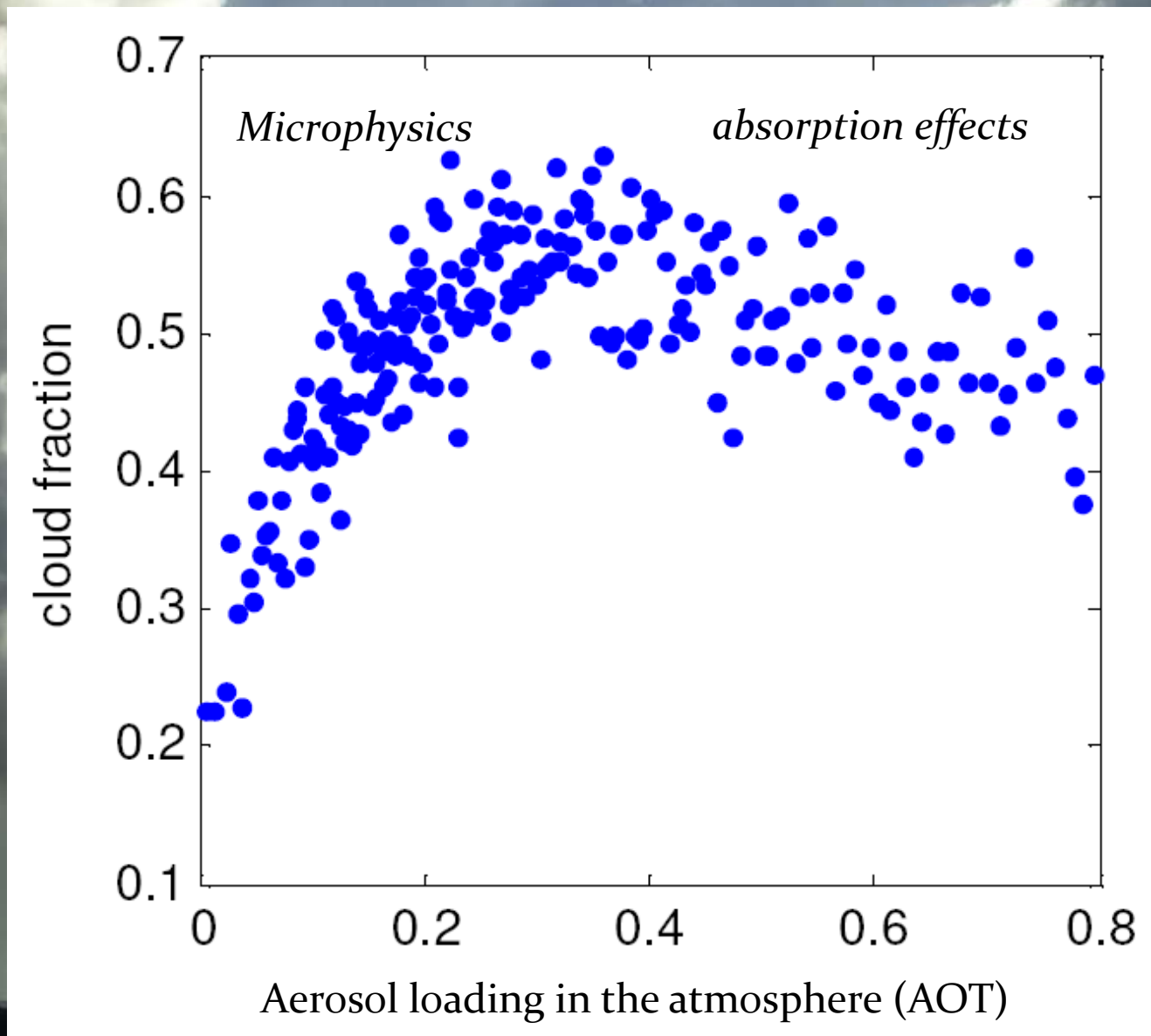
Não conhecemos tudo...

- Se conhece pouco os efeitos dos aerossóis nas nuvens e menos ainda na precipitação.

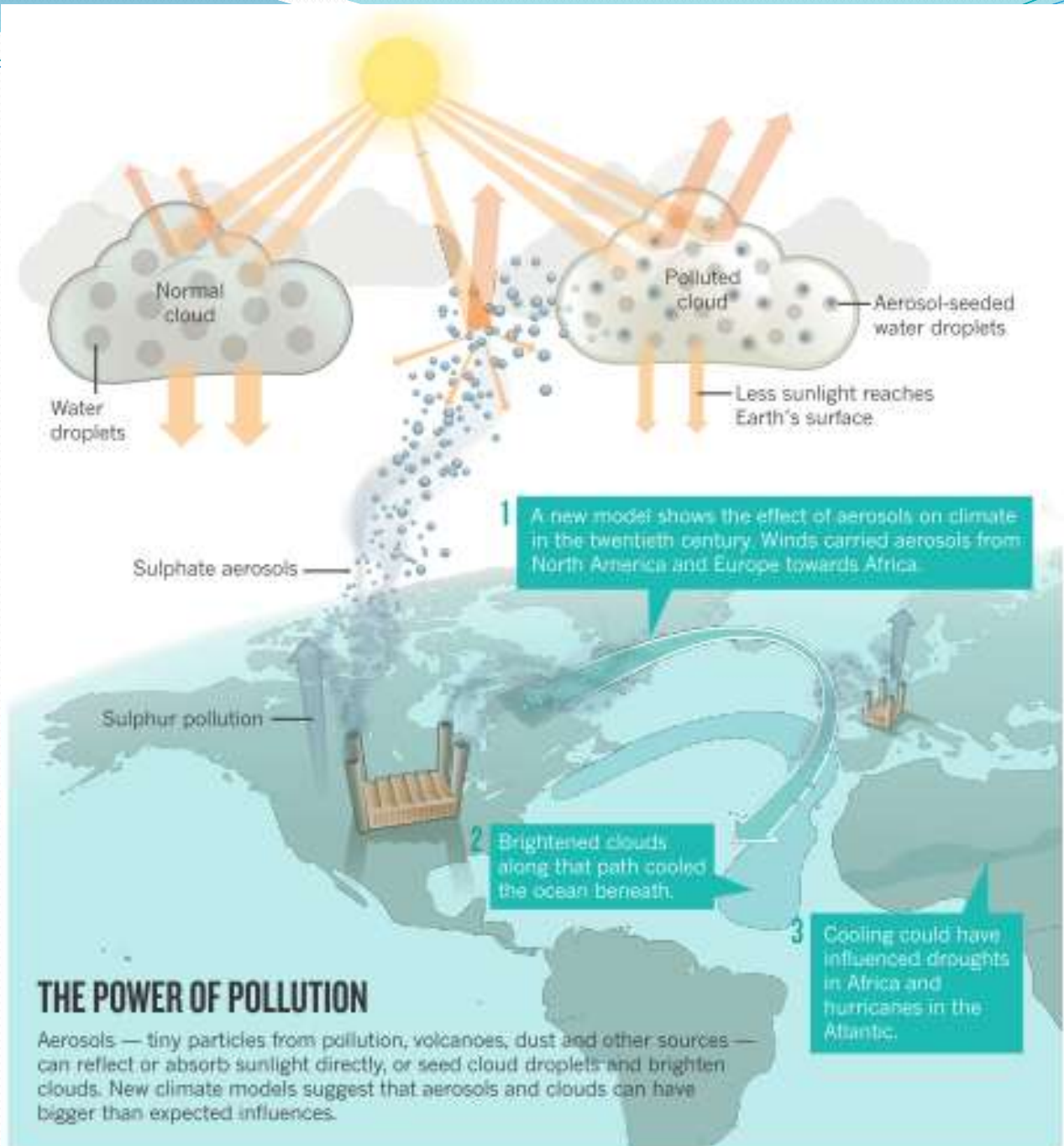


O que acontece se aumentar ou diminuir a poluição?

Relationships between cloud properties and aerosol loading in Amazonia

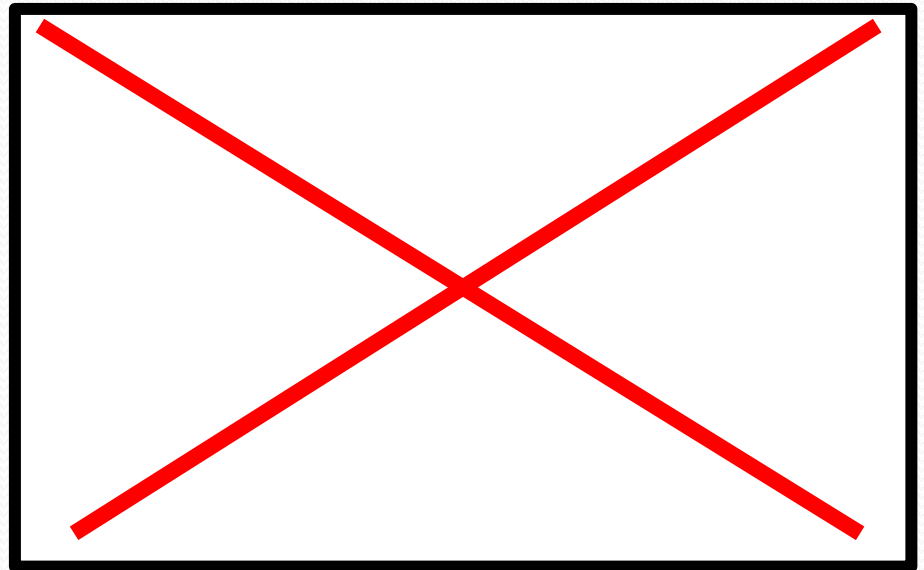
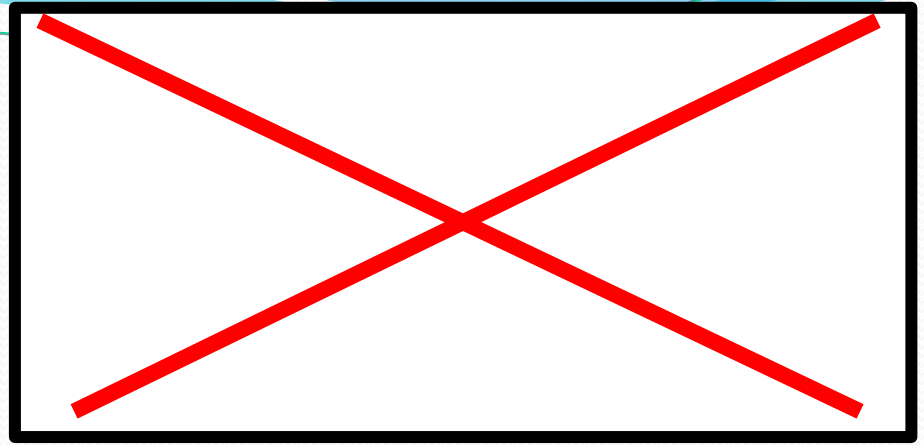


Tollefson, Nature, maio 2012



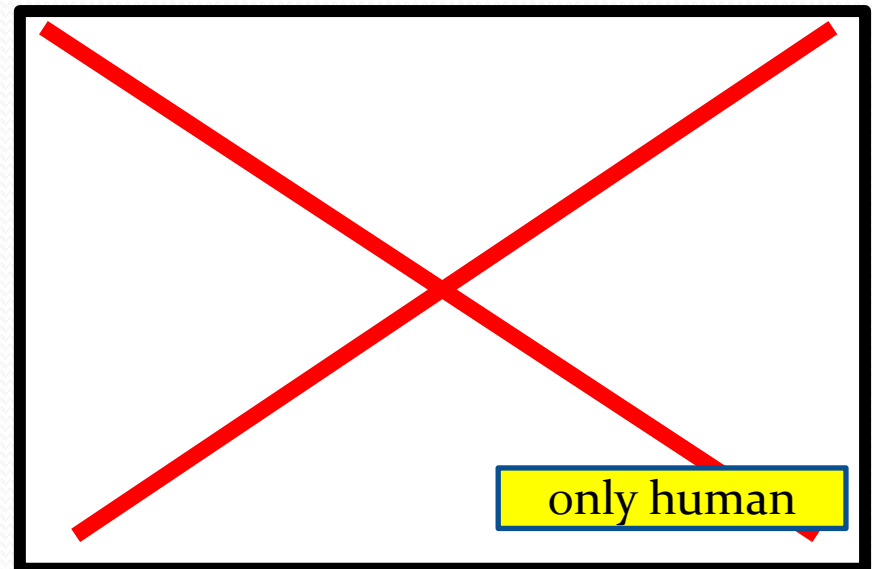
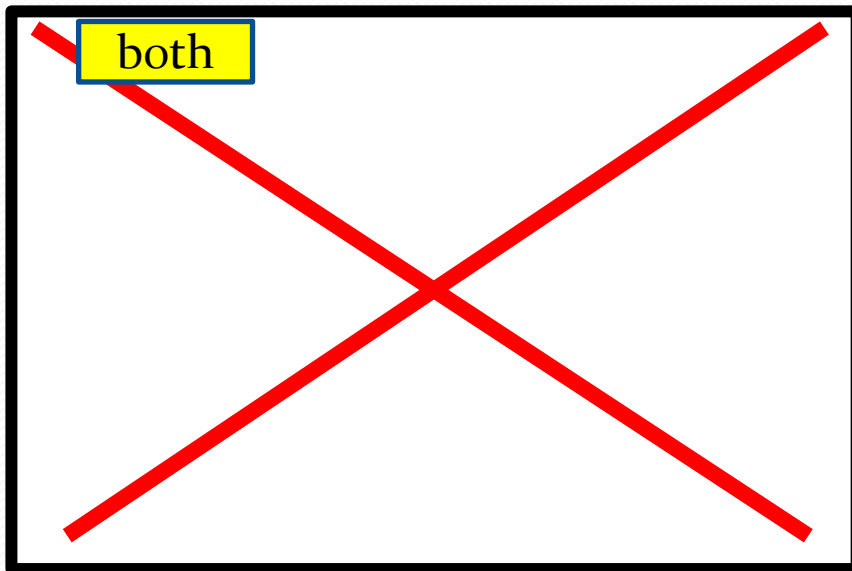
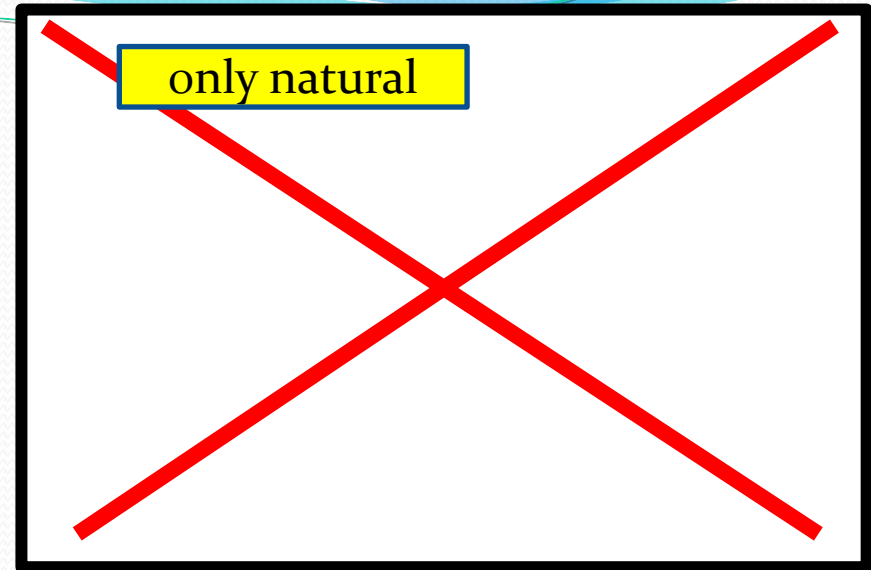
Apesar de tudo

- Apesar de todos os problemas dos modelos climáticos, as **previsões** que foram feitas desde o 1º IPCC acertaram em **cheio** o que ia acontecer!



Apesar de tudo

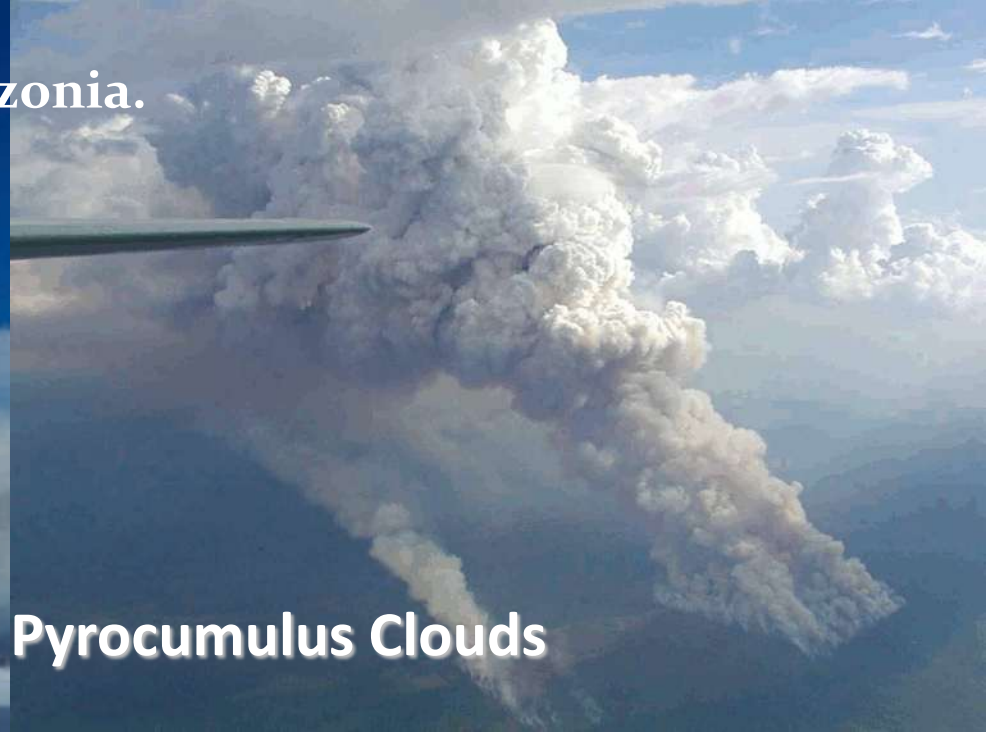
- Só acertamos a previsão se incluir:
natural+antropogênico



Este seminário

- Mudanças climáticas
- Previsões numéricas de tempo e clima
- Exemplos e problemas de modelos numéricos
- Estudando física da atmosfera na Amazônia

Hydrological cycle critical for Amazonia.
Variety of cloud structure caused
by different CCN amounts and
other cloud dynamic issues



Pyrocumulus Clouds



“Green Ocean Clouds”



The Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia - LBA

Water ↔ **Clouds** ↔ **Aerosols**

(in clouds and biosphere)

(and trace gases)

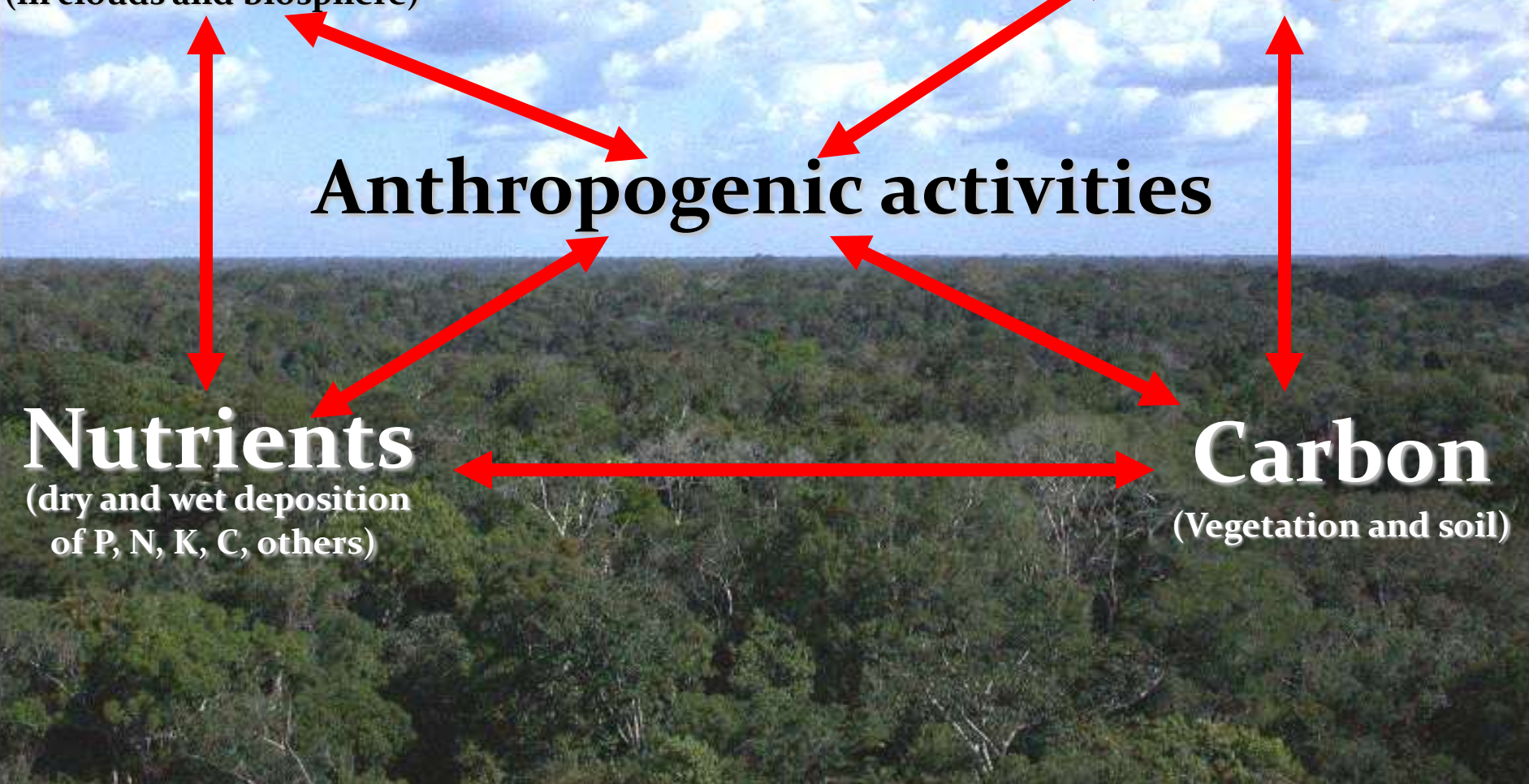
Anthropogenic activities

Nutrients

(dry and wet deposition
of P, N, K, C, others)

Carbon

(Vegetation and soil)

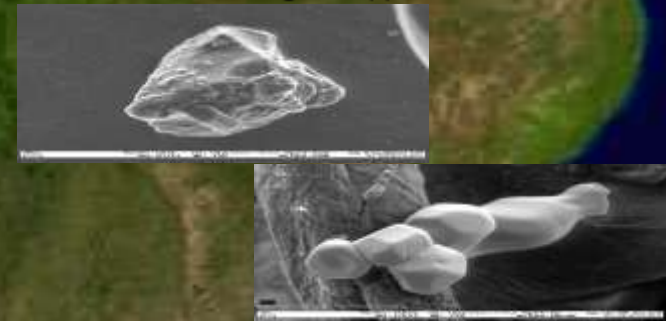
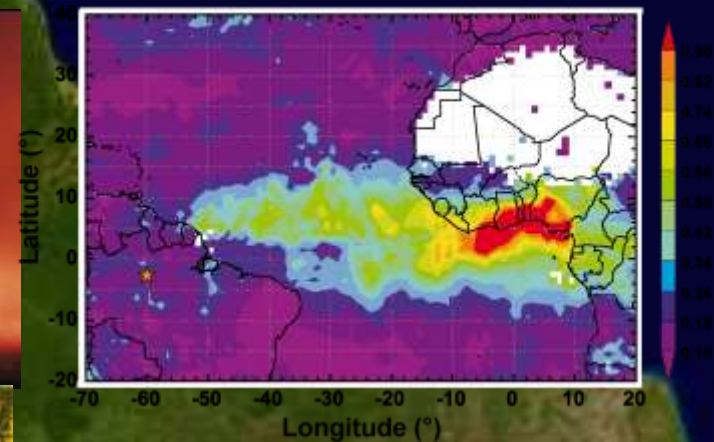
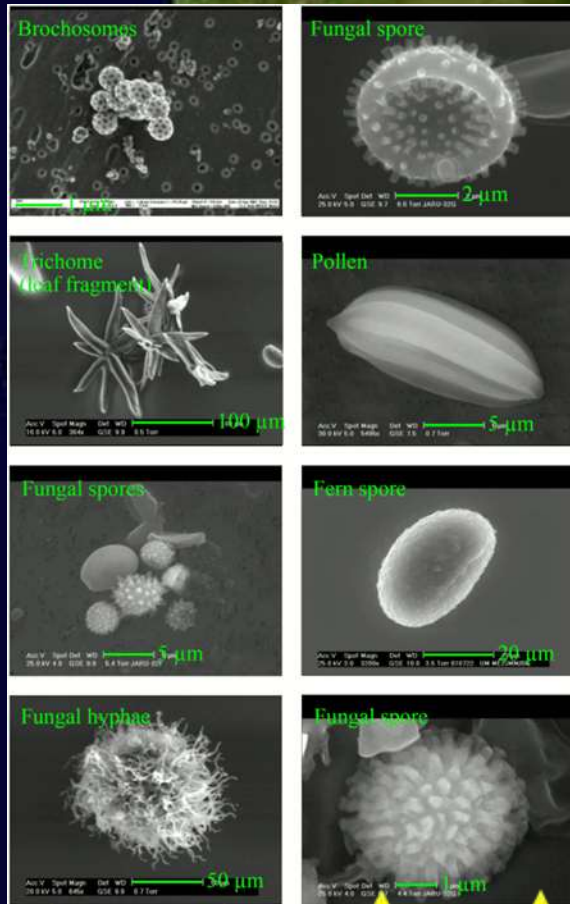


Amazonia: 3 different types of aerosols

Biogenic (primary and SOA)

Biomass Burning

Dust from Sahara

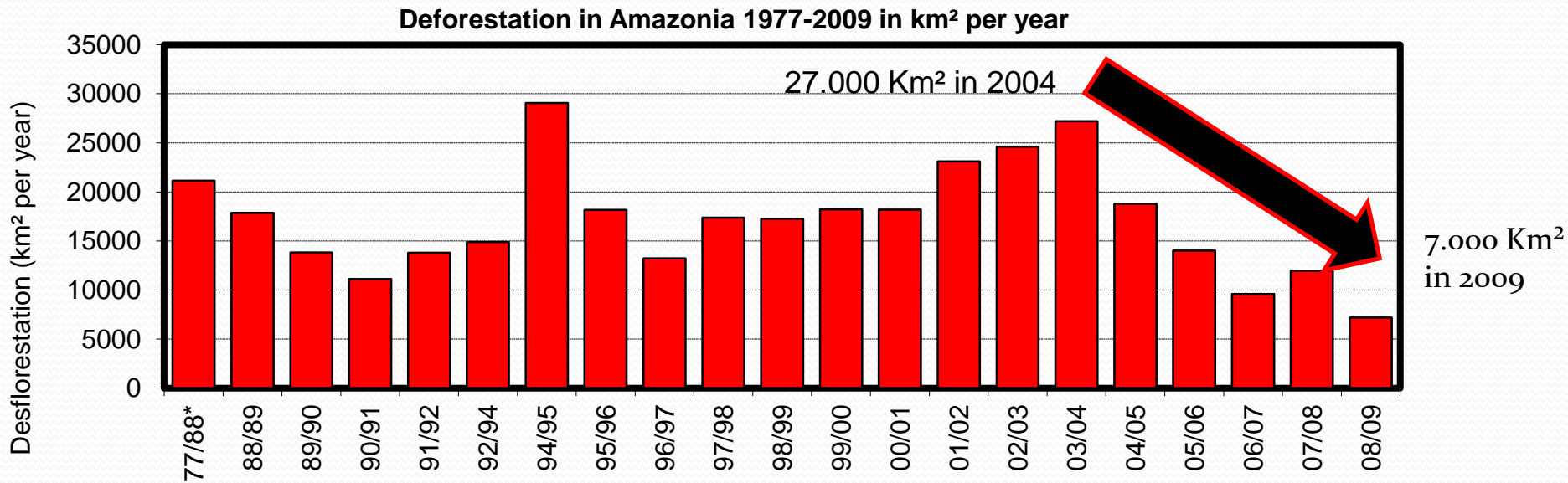


Each with VERY different properties and impacts



Deforestation was reduced from 27,000 Km² in 2004 to 7,000 Km² in 2009.

How much aerosols were reduced?

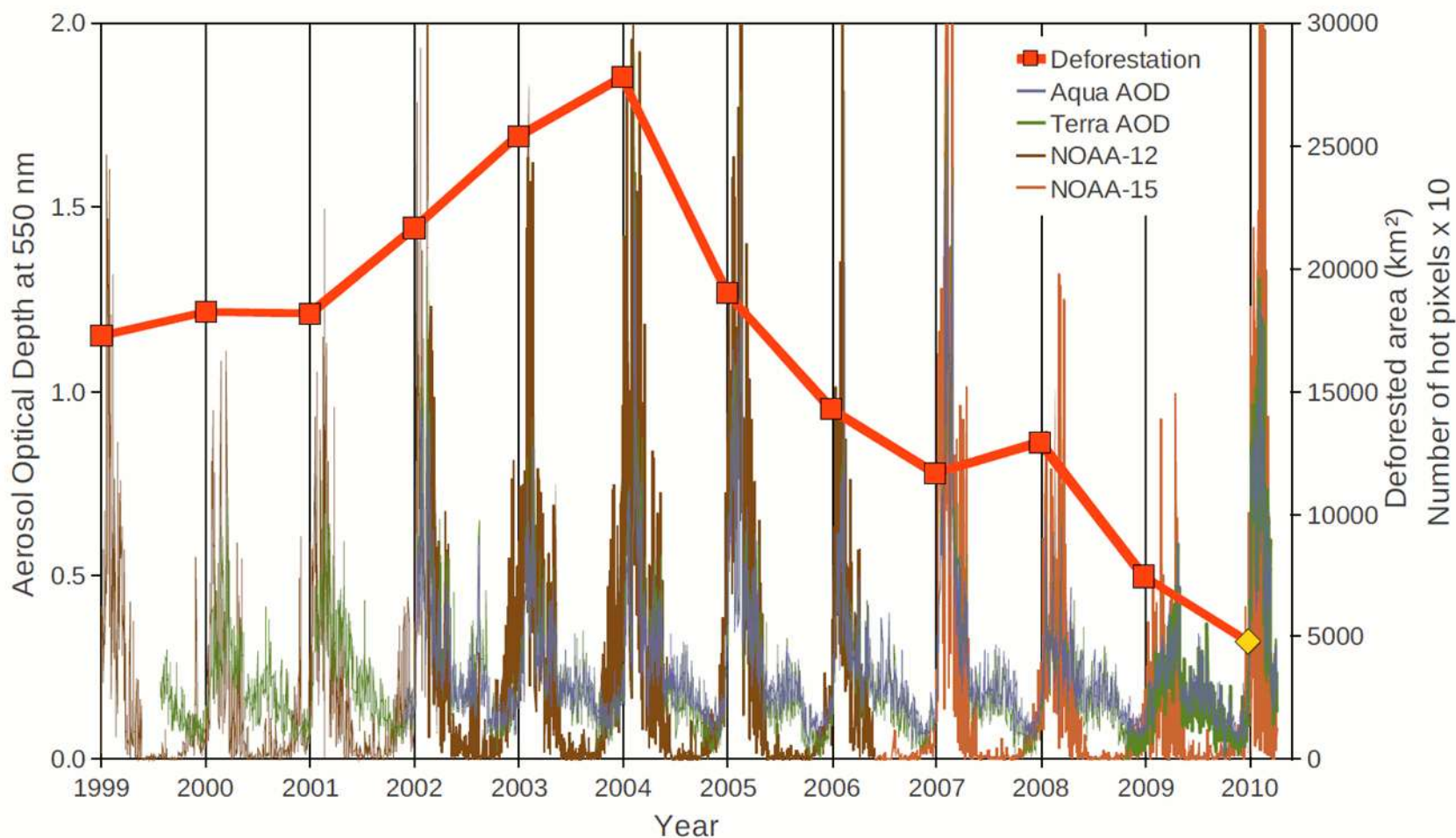


* annual average per year

Data from UNEP 2009

What public policies are needed to sustain this reduction?

Yearly deforestation with MODIS AOD and hot pixels from NOAA



Yearly deforestation over the Brazilian Amazon region (INPE, 2010) compared to MODIS daily smoke optical depth and the daily number of hot pixels from NOAA-12 and NOAA-15.



Amazonia

Average aerosol forcing clear sky

Top: - 10 w/m²



Atmosphere: + 28 w/m²

Surface: - 38 w/m²

Conditions: surface: forest vegetation
AOT ($\tau=0.95$ at 500nm); 24 hour average
7 years (93-95, 99-02 dry season Aug-Oct)

INDOEX

average aerosol forcing clear sky

Top: - 7 \pm 1 w/m²



Atmosphere: + 16 \pm 2 w/m²

Surface: - 23 \pm 2 w/m²

Conditions: surface: ocean
AOT ($\tau=0.3$ at 630 nm); 24 hour average
Jan-Mar 99



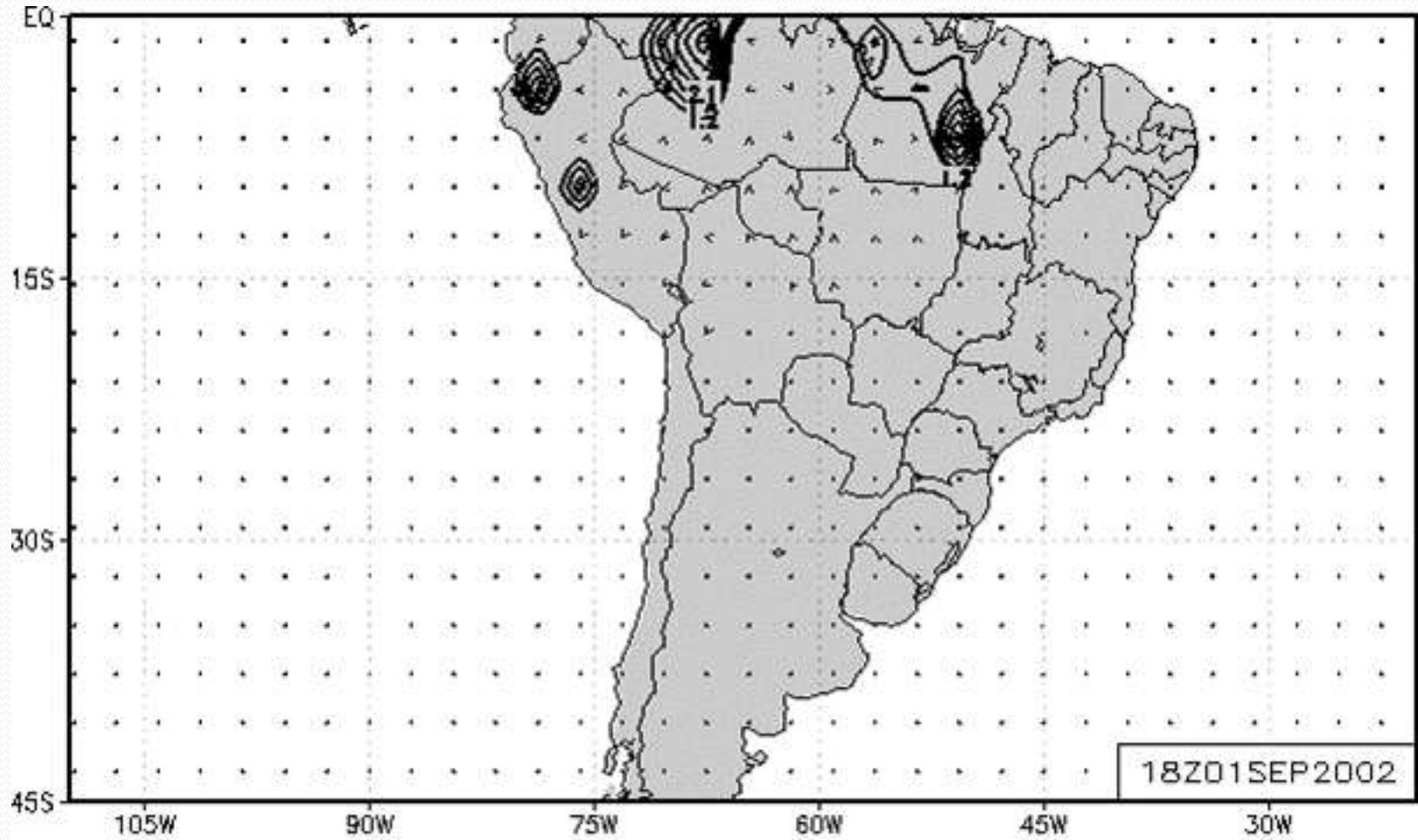
Possible effects of biomass burning for water vapor transport over South America ??

1600 km

Image NASA

Google

Transporte, água precipitável e precipitação - Evapotranspiração



Barbosa, 2010

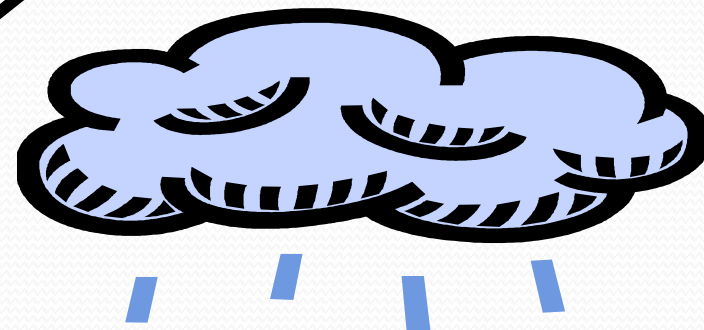
Futuros experimentos

+ CHUVA
+GoAmazon
+ATTO

In situ
Microphysics



Remote
sensing
Microphysics



LIDAR

Radar

Dense
GNSS
network



Container with equipment powered by generators



Embrapa Site - Instruments



Raman Lidar



Rain Radar



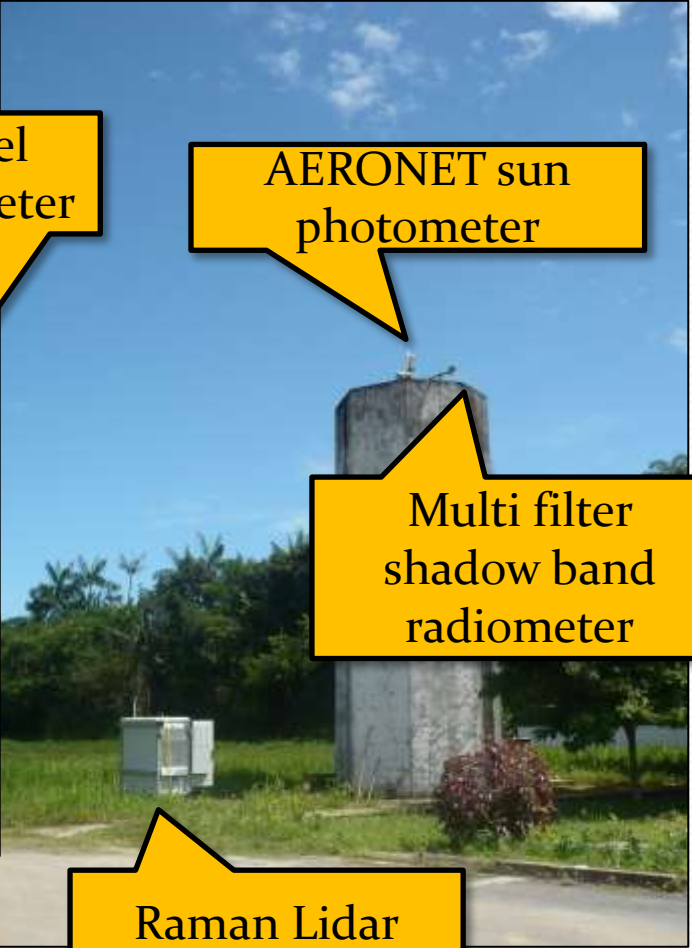
GNSS Trimble



Parsivel
disdrometer



AERONET sun
photometer



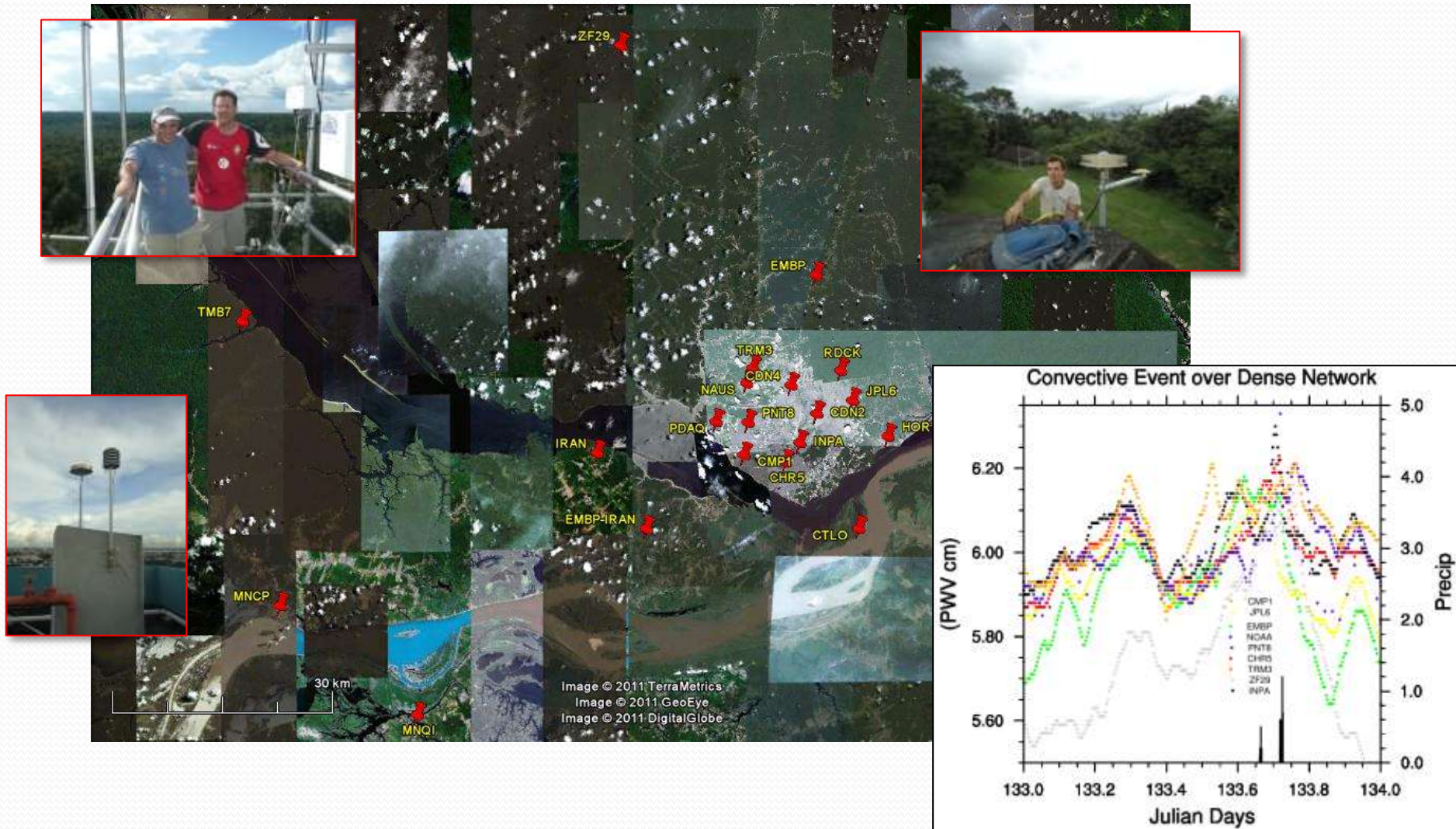
Multi filter
shadow band
radiometer



Raman Lidar

GNSS Network

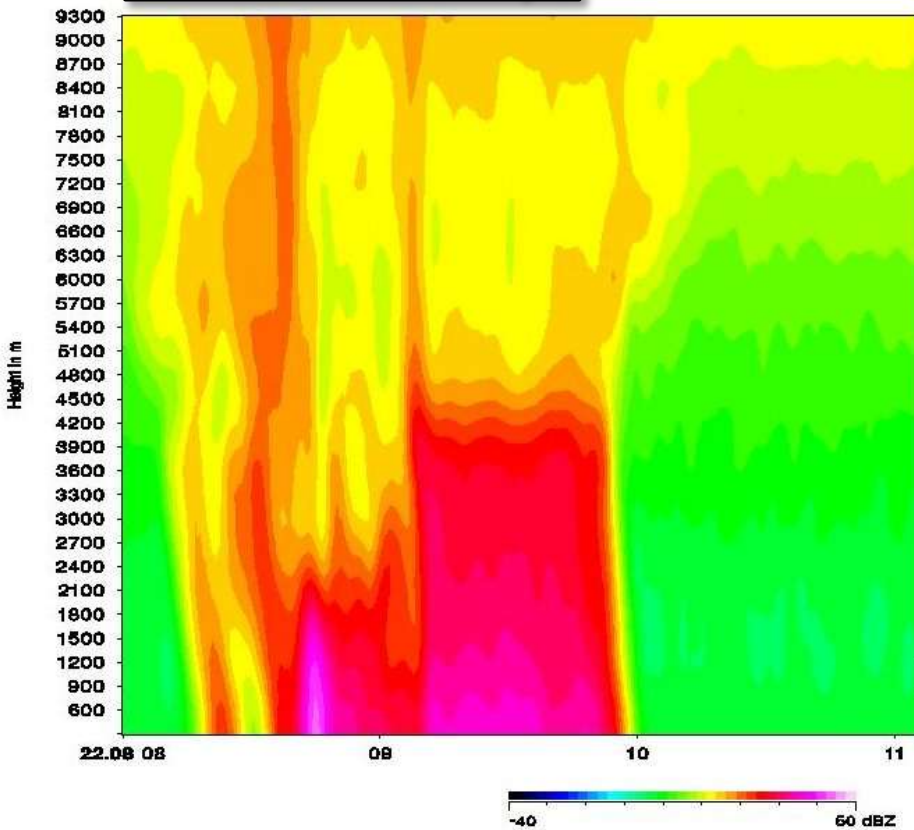
Precipitable Water Vapor



Vertical Pointing Radar (MRR)

Embrapa - 22nd August 2011

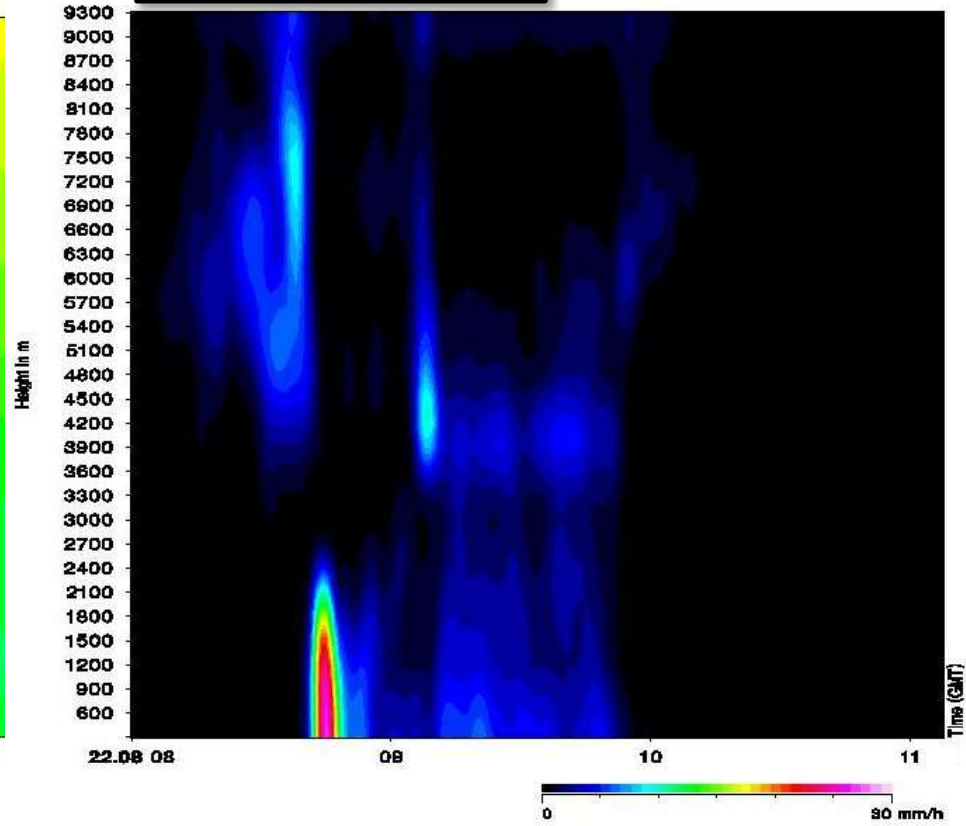
Radar Reflectivity



Sodargram of 1'-Averages of the Radar Reflectivity (Z)

WETEK

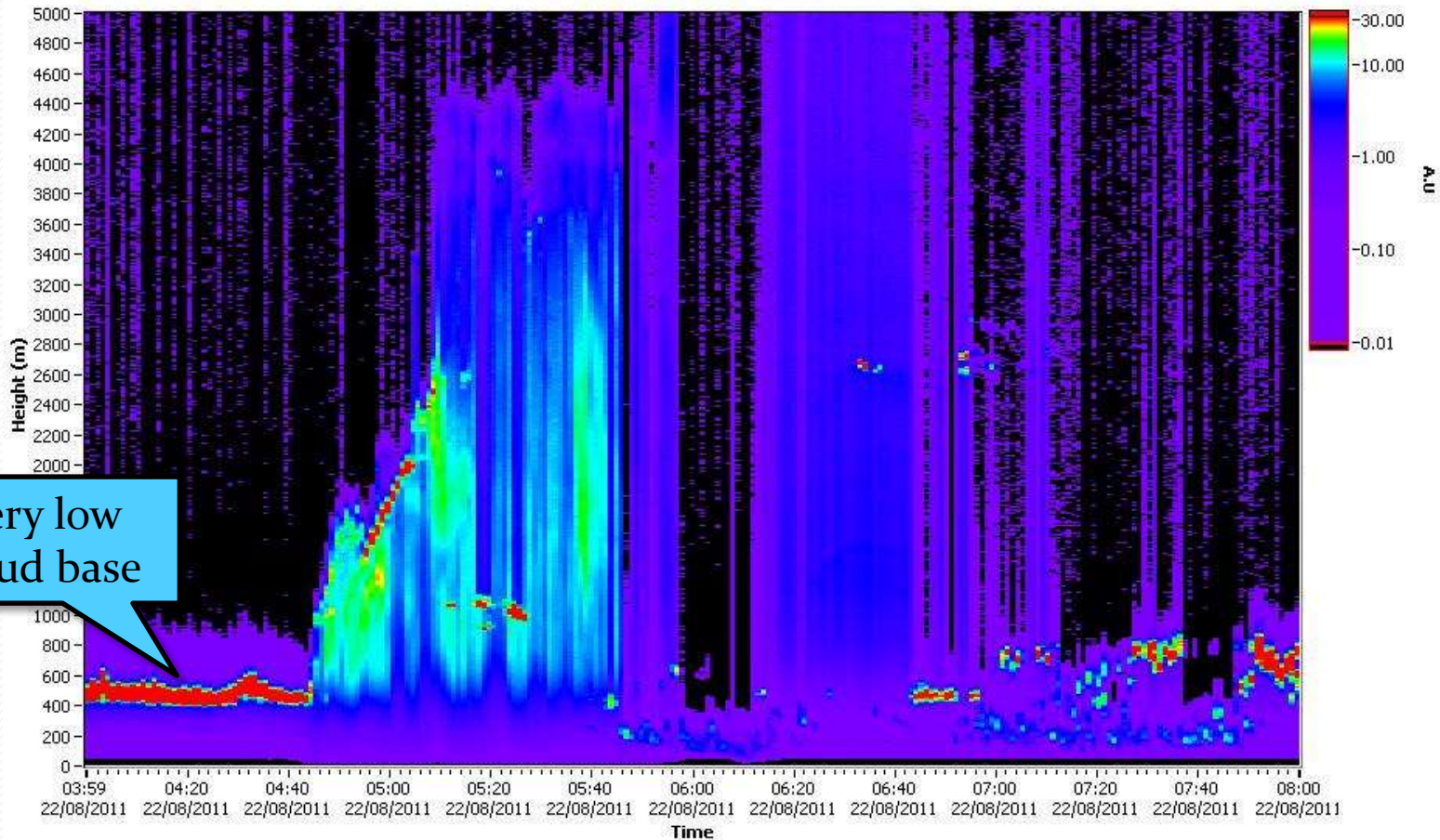
Rain Rate



Sodargram of 1'-Averages of the Rain Rate (RR)

WETEK

Lidar Extinction Coefficient Embrapa - 22nd August 2011



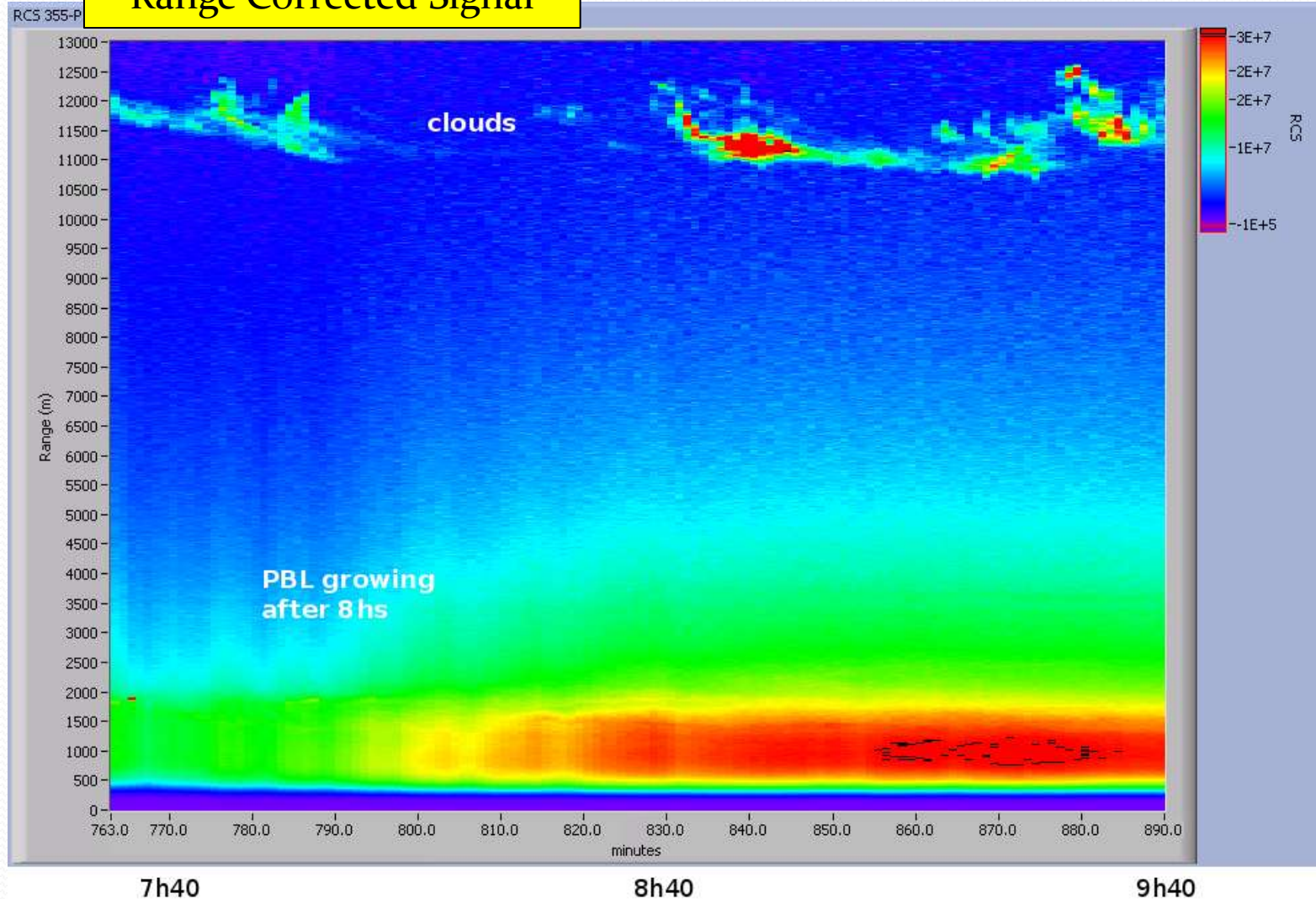
Very low
cloud base

Heavy Rain

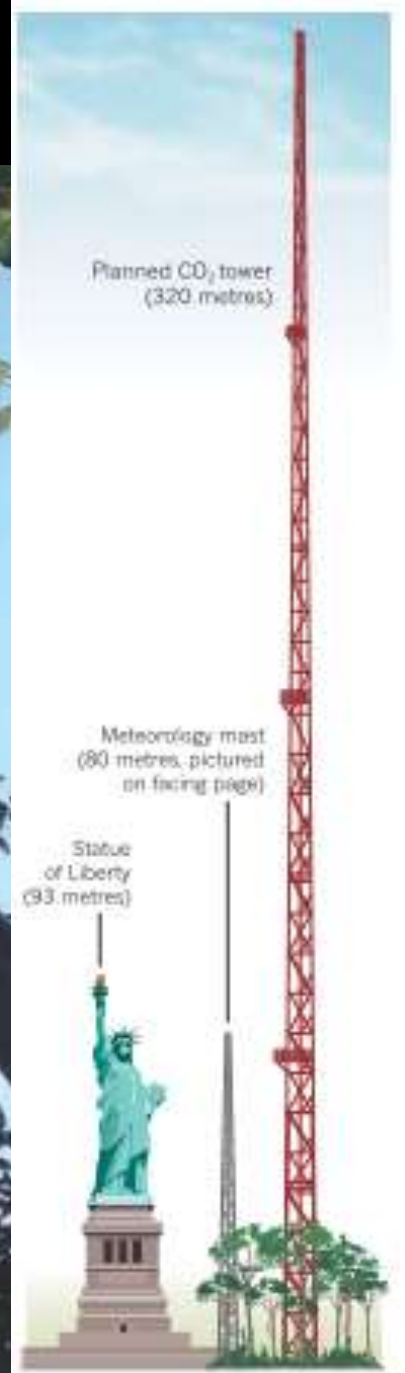
PBL Growth and Clouds

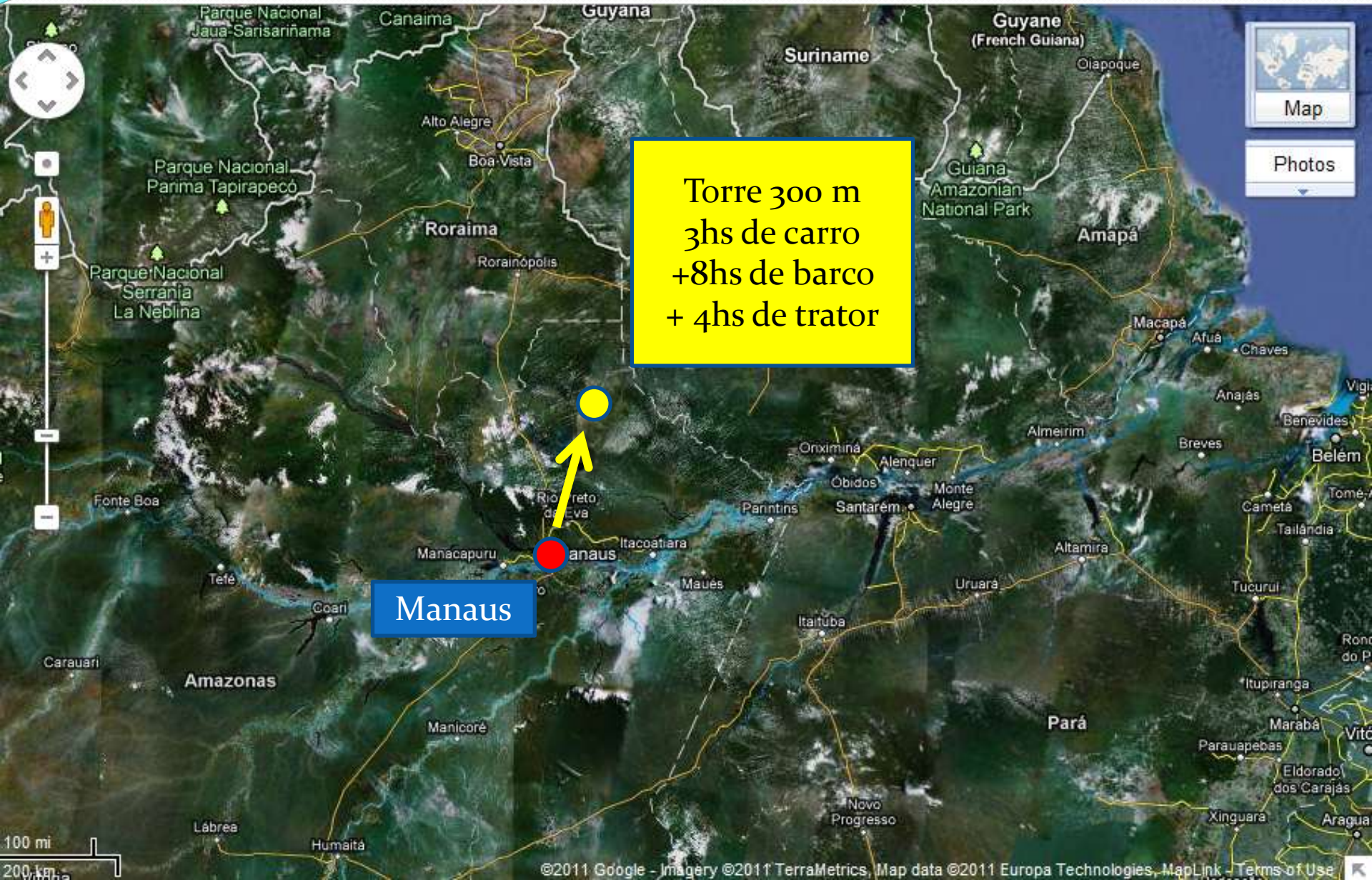
Embrapa, July 28th 2011

Range Corrected Signal



ATTO – Torre pequena (80m)





Torre 300 m
3hs de carro
+8hs de barco
+ 4hs de trator

Manaus



Logística complicada....



hbarbosa@if.usp.br

www.fap.if.usp.br/~hbarbosa