



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Paulo Yoshio Kubota
DIMNT
CPTEC/INPE



Objetivos

1. Introduzir: técnicas de modelagem numérica, modelos de PNT e Clima
2. Fundamentos: estrutura, dinâmica, física, diagnóstico
3. Experiência prática: em modelagem numérica e análise de dados
4. Disseminação: Compreensão e uso inteligente das saídas dos modelos de PNTC



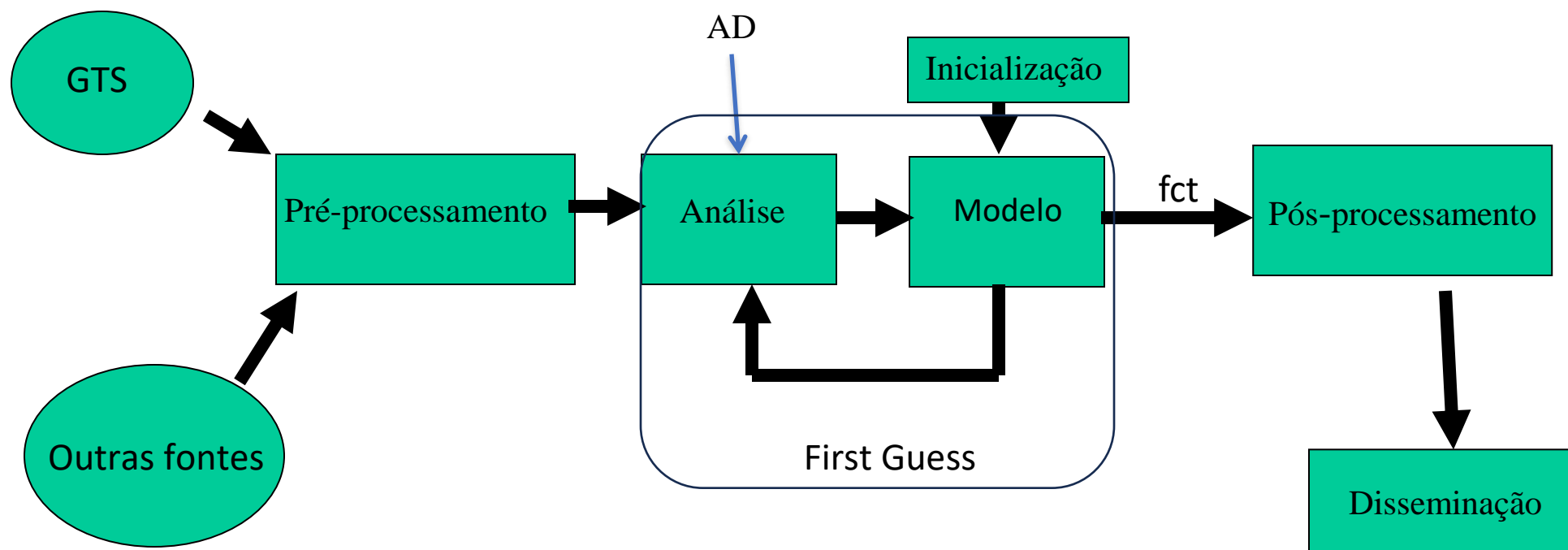
Tópicos

- **Introdução:** histórico da PNT, processos e componentes
- **Fundamentos básicos dos modelos de PNT:** equações, análise de escala e filtragem, coordenadas verticais
- **Métodos numéricos:** diferenças finitas, Galerkin (espectrais e elementos finitos): espaço e tempo; análise de estabilidade numérica



Processos e componentes

Fluxograma de PNT





Sistema de equações governantes da atmosfera



Equações do Momento:
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \text{termos de atrito}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \text{termos de atrito}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \text{termos de atrito}$$

Equação da continuidade:
$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Equação da energia termodinâmica:
$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \text{forçantes diabáticos}$$

Equação de estado:

6 equações, 6 incógnitas (u, v, w, p, T, ρ)



Equações Governantes



$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} - \omega \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p} + f \mathbf{k} \times \mathbf{v} - \nabla \Phi + \mathbf{D}_M \quad \text{Equações do Momento:}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla T + \omega \left(\frac{\kappa T}{p} - \frac{\partial T}{\partial p} \right) + \frac{\tilde{Q}_{rad}}{c_p} + \frac{\tilde{Q}_{con}}{c_p} + D_H \quad \text{Equação da energia termodinâmica:}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla q - \omega \frac{\partial q}{\partial p} + E - C + D_q \quad \text{Equação da conservação de umidade:}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial p} = -\nabla \cdot \mathbf{v} \quad \text{Equação da continuidade:}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p}, \quad \text{Equação de estado:}$$



Métodos numéricos

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} F(u, M_{u,d})$$

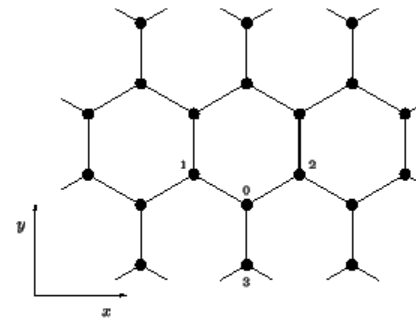
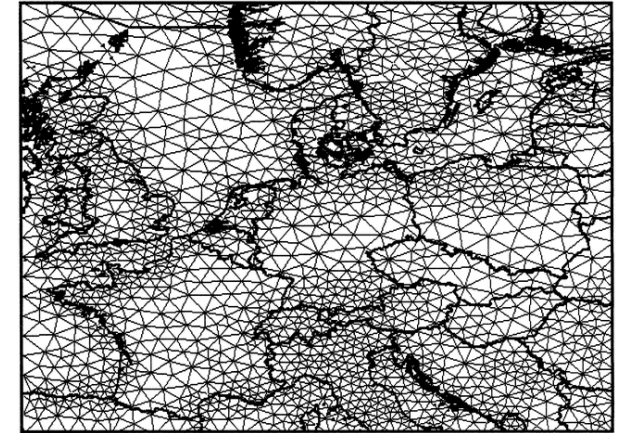
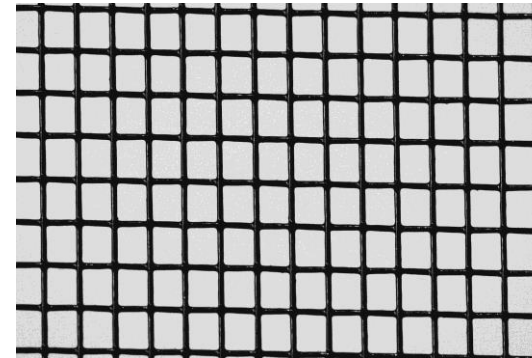
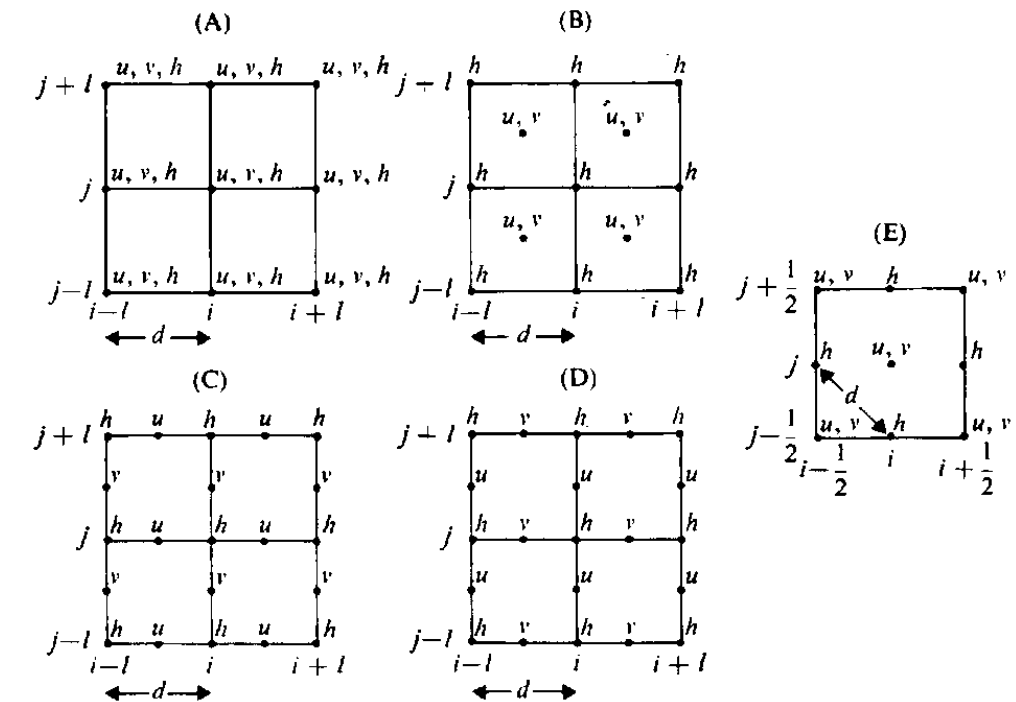
$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} = -\frac{M}{\rho} \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2\Delta z}$$

$$\Rightarrow \lambda = 1 - \frac{M\Delta t}{\rho\Delta z} \left(\frac{e^{ik\Delta z} - e^{-ik\Delta z}}{2} \right)$$

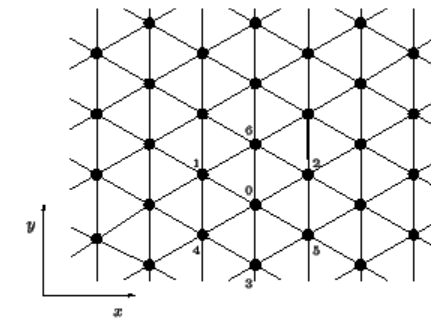
$$\Rightarrow |\lambda| = \sqrt{1 + \left(\frac{M\Delta t}{\rho\Delta z} \right)^2 \sin^2(k\Delta z)} \quad |\lambda| > 1$$



Os tipo de Grades



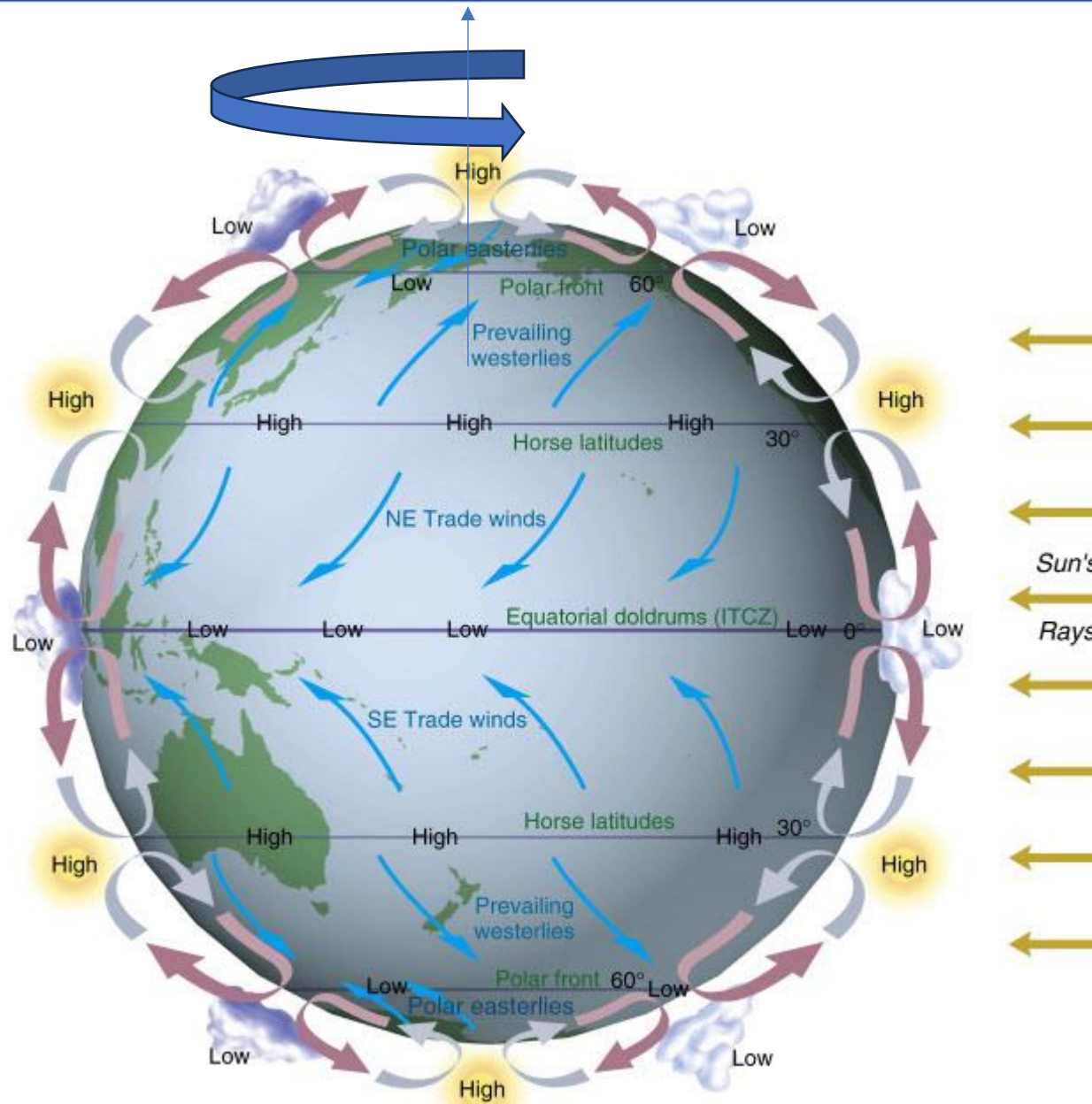
(a)



(b)



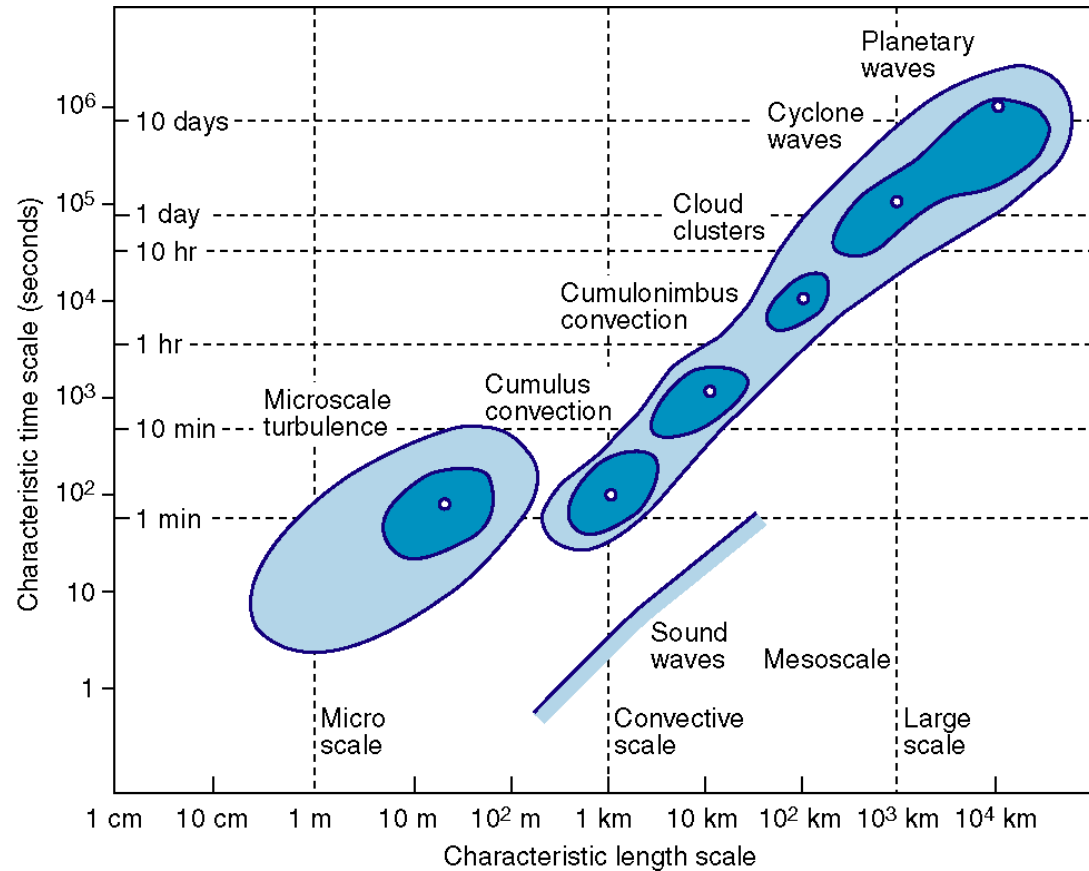
Escalas: temporais e espaciais



As maiores fontes de Energia e Momentum



Escalas: temporais e espaciais



Qual a importância das escalas?

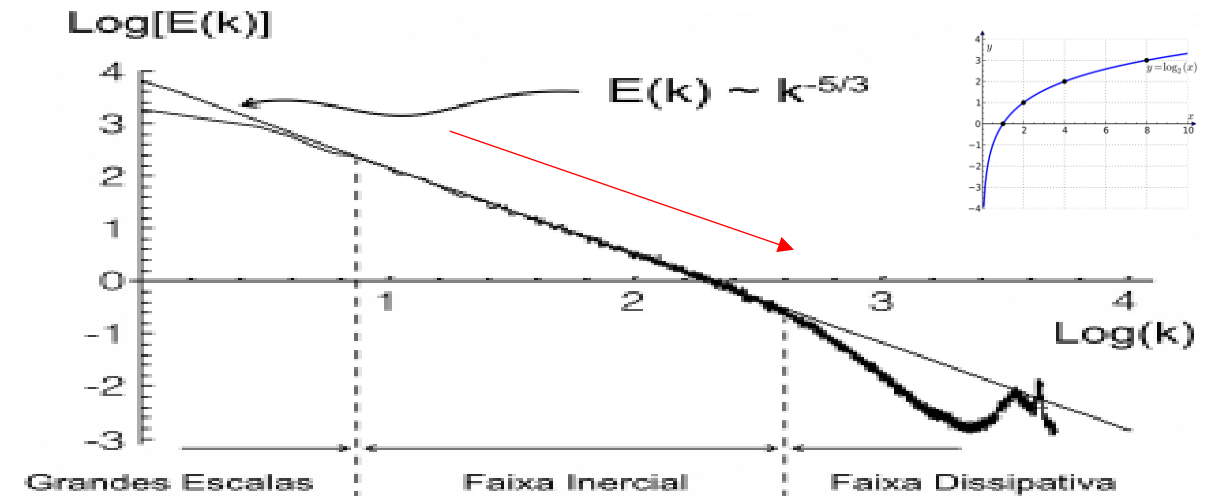


Figura 12: Espectro de energia, em escala dilog (unidades arbitrárias de energia $E(k)$ e número de onda k) obtido a partir de séries temporais (disponíveis na base de dados em turbulência da Universidade Johns Hopkins [129]) para um escoamento em túnel de vento com número de Reynolds $Re = 3 \times 10^4$.



Figura 8: A Grande Onda de Kanagawa (*Kanagawa oki nami uru*), de Hokusai (c. 1831).

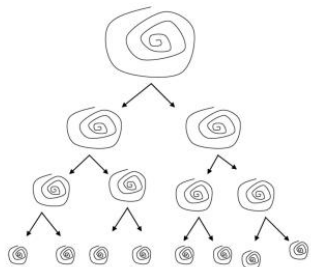


Figura 9: Representação pictórica da cascata de Richardson.

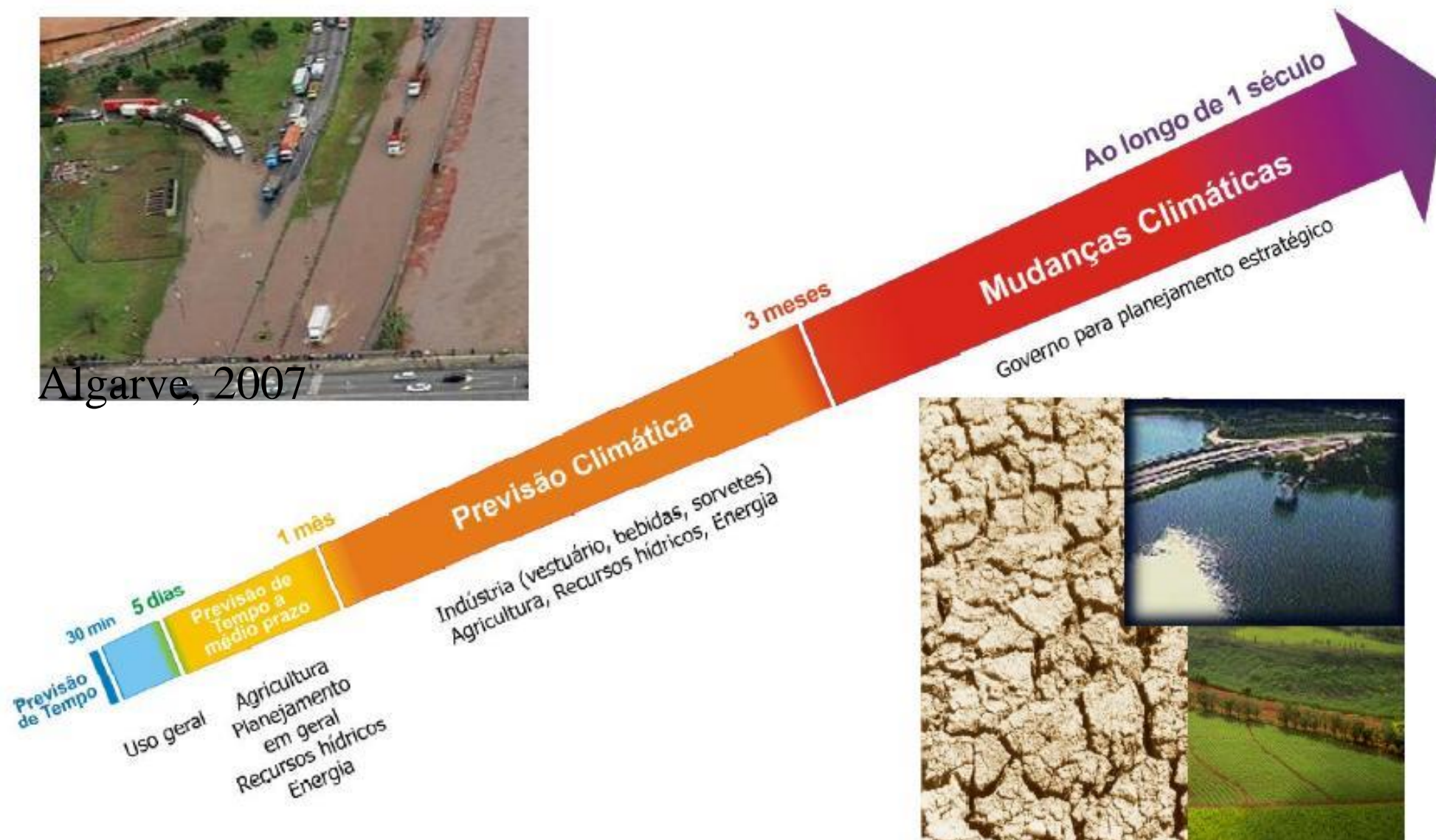
Moriconi, L. e Pereira, R.M.. A física estatística da turbulência. Revista Brasileira de Ensino de Física [online]. 2021, v. 43, n. Supl 1 [Acessado 1 Julho 2023], e20200450. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0450>>. Epub 05 Mar 2021. ISSN 1806-9126. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0450>.



Quais os impactos das Escalas



Algarve, 2007





Utilidade da PNT



Algarve, 2007

OUTROS USUÁRIOS DA NOSSA PREVISÃO DE TEMPO E CLIMA

Petrobrás



Rodovia (Nova Dutra)



Portal do Tempo usado em vários link de internet



Cargill (agrícola)



Cooperativa de agricultores



Agro (Estadão)





Utilidade da PNT



Algarve, 2007



OUTROS USUÁRIOS DA NOSSA PREVISÃO DE TEMPO E CLIMA

Previsão feita para canal da DIRECTV



 www.cptec.inpe.br

TV DIÁRIO DE MOGI DAS CRUZES - SP



TV Vanguarda e Tv Setorial



TV Globo



Tv Cultura

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Previsão de Tempo

Chuvoso no sul e oeste do País.

Os sistemas de baixa pressão continuam predominando no sul e oeste do País. As chuvas são moderadas a fortes, com possibilidade de temporais no sul e oeste. No norte, o tempo é mais variado, com possibilidade de chuvas isoladas.

Temperaturas elevadas.

As temperaturas são elevadas em todo o País, com possibilidade de ondas de calor no norte e centro. No sul, as temperaturas são moderadas a altas.

Chuvas no norte e centro do País.

Os sistemas de baixa pressão continuam predominando no norte e centro do País. As chuvas são moderadas a fortes, com possibilidade de temporais no norte e centro. No sul, o tempo é mais variado, com possibilidade de chuvas isoladas.

Temperaturas elevadas.

As temperaturas são elevadas em todo o País, com possibilidade de ondas de calor no norte e centro. No sul, as temperaturas são moderadas a altas.

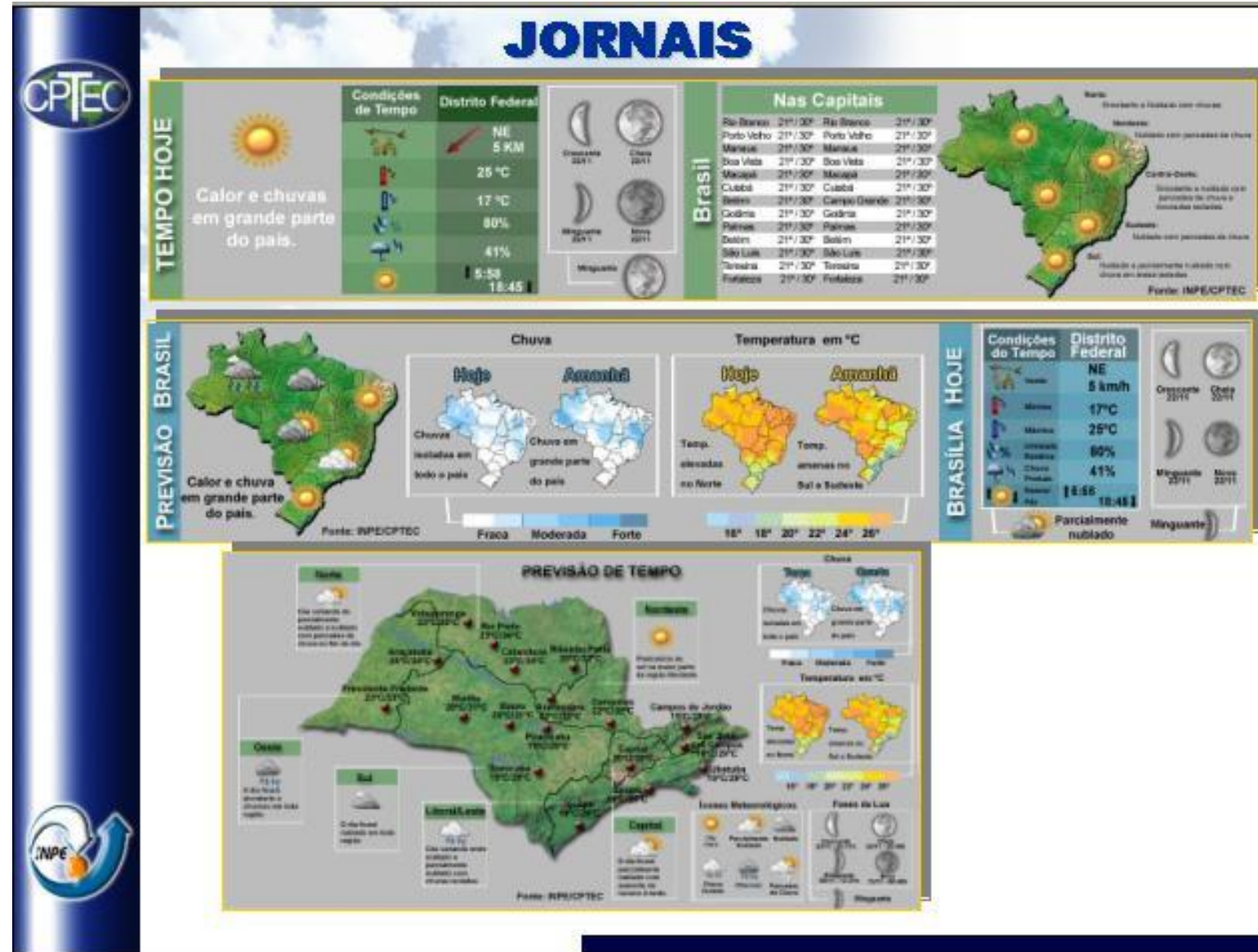




Utilidade da PNT



Algarve, 2007





Principal Ferramenta par a PNTC



- **Modelos:** Tipos de modelos, resolução e condições de fronteira
- **Física e parametrizações dos modelos:** camada limite, fluxos de superfície (interface), física úmida (convecção, microfísica), radiação
- **Modelos global e regional do CPTEC:** atmosféricos/acoplados



Componentes do Modelo



- **parametrização física:** *“procedimento matemático que descreve os efeitos estatísticos de processos de sub-grade sobre o fluxo médio em função de parâmetros de grande escala”,*
- **dinâmica:** *calcula dos outros termos das equações de Navier-Stokes*



Métodos de Avaliação do Modelos



- **Geral:**

- **RMSE**
- **BIAS (VIES)**
- **Variância**

- **Precipitação**

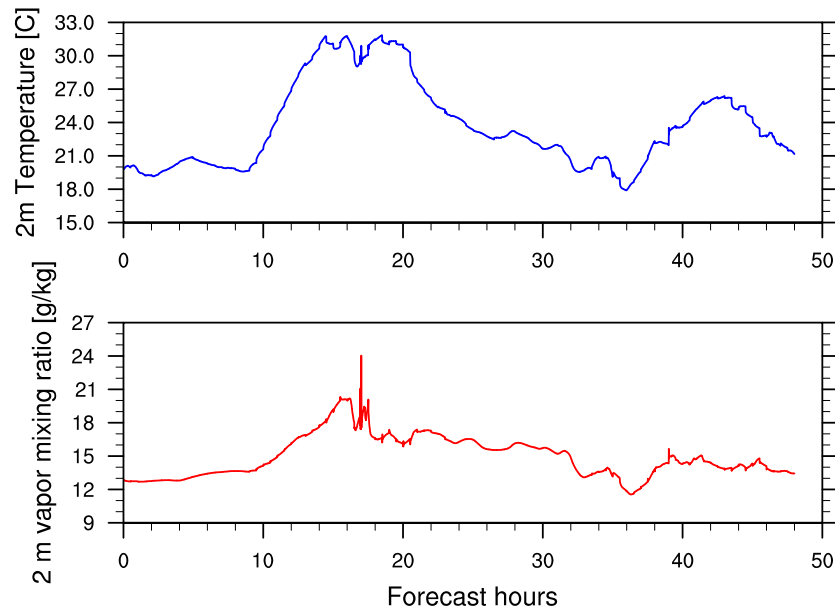
- **Hit hate,**
- **Threat score,**
- **FAR,**
- **POD,**
- **BIAS,**
- **IS,**
- **IR**



Diagnósticos



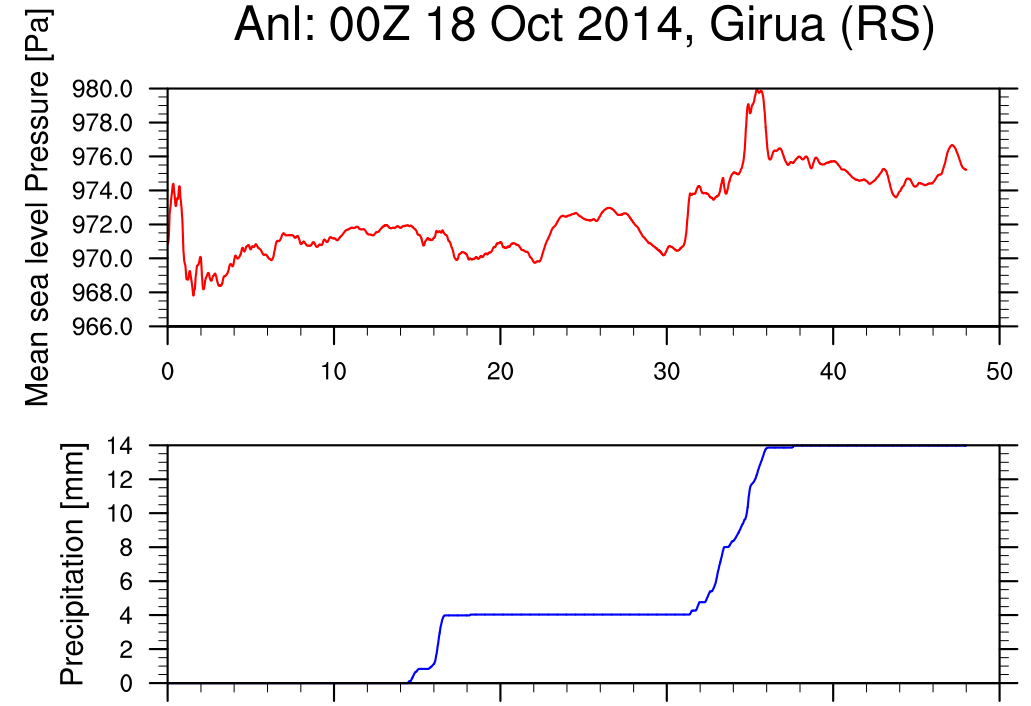
Anl: 00Z 18 Oct 2014, Girua (RS)



Series Temporais por localidade

WRF vs OBS

Anl: 00Z 18 Oct 2014, Girua (RS)

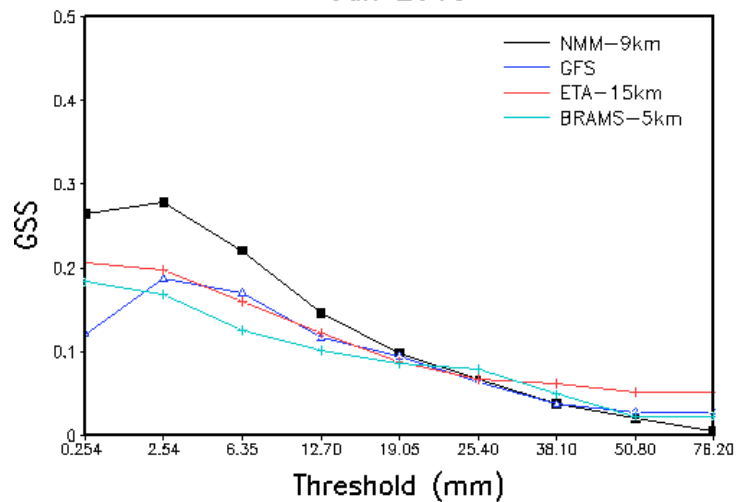




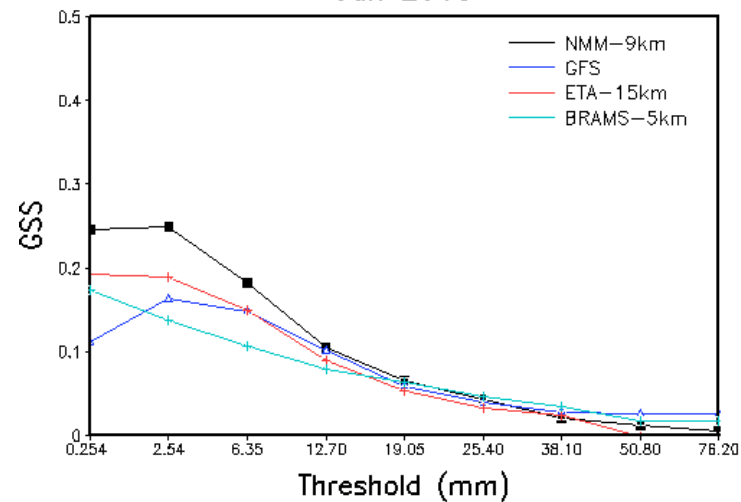
Avaliação



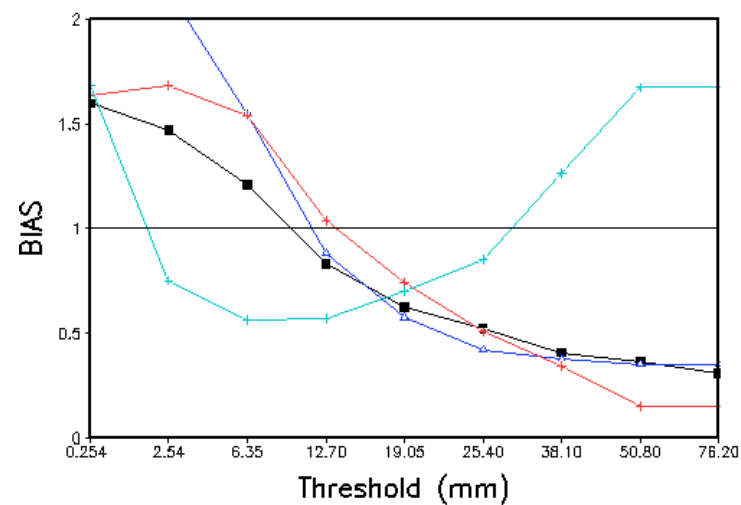
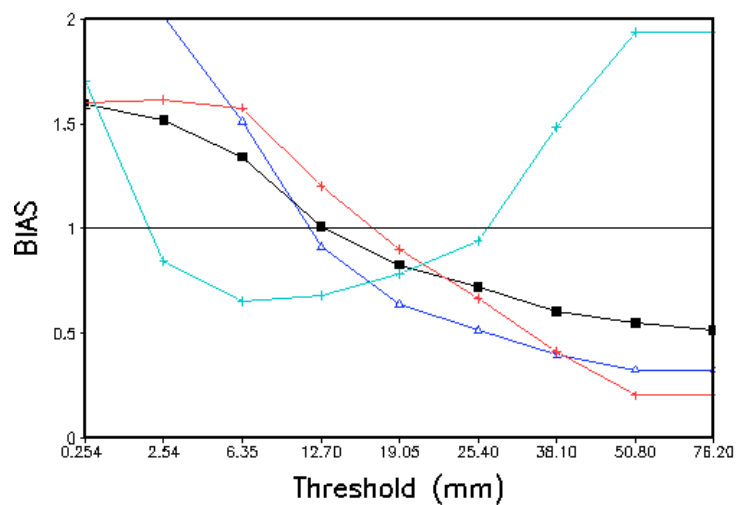
Precipitation 12–36 hrs South America domain
Jan 2015



Precipitation 36–60 hrs South America domain
Jan 2015



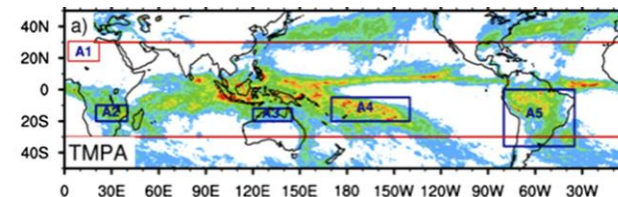
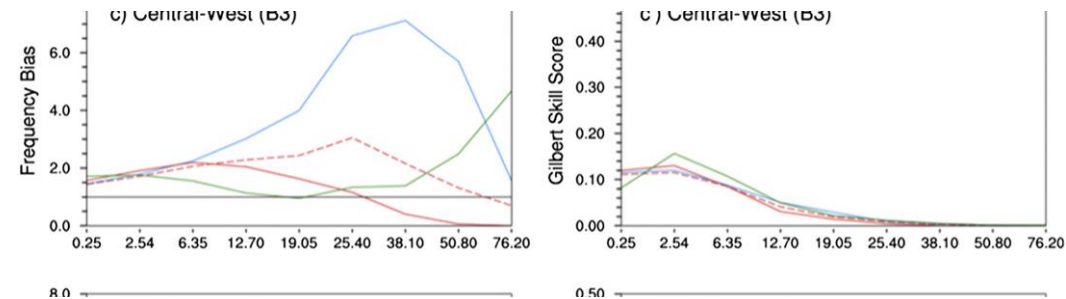
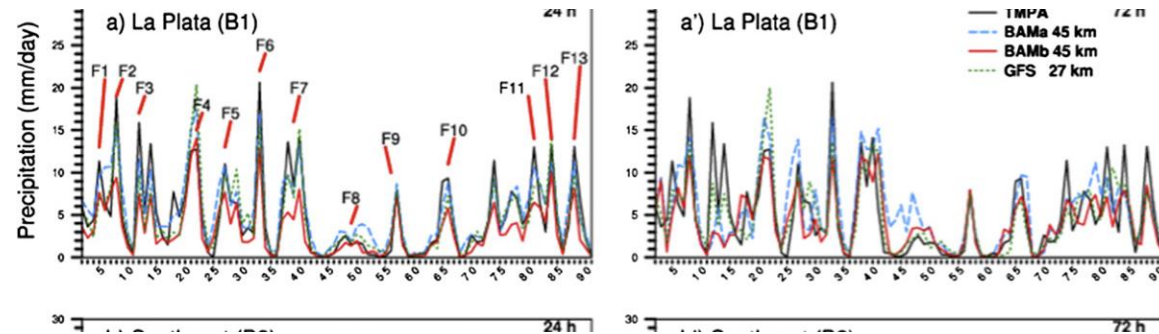
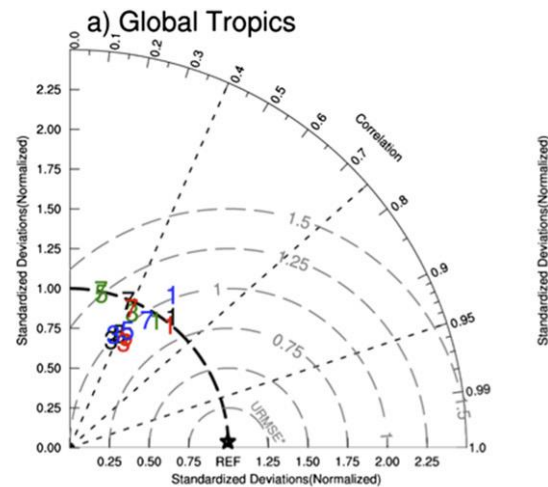
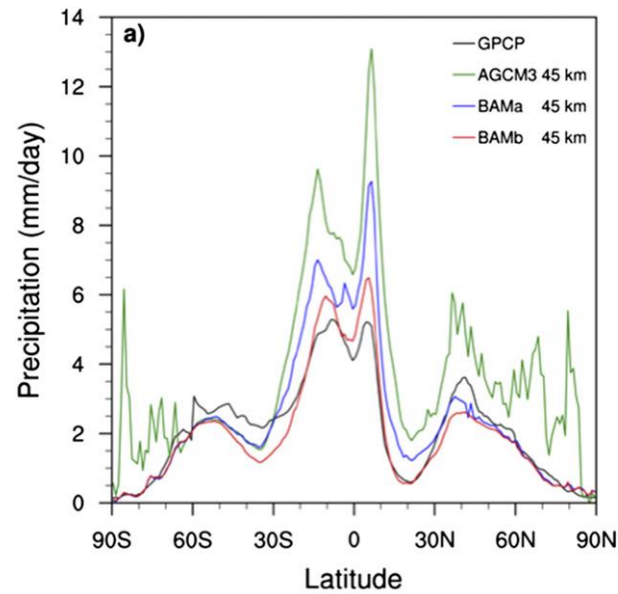
Global Skill Score





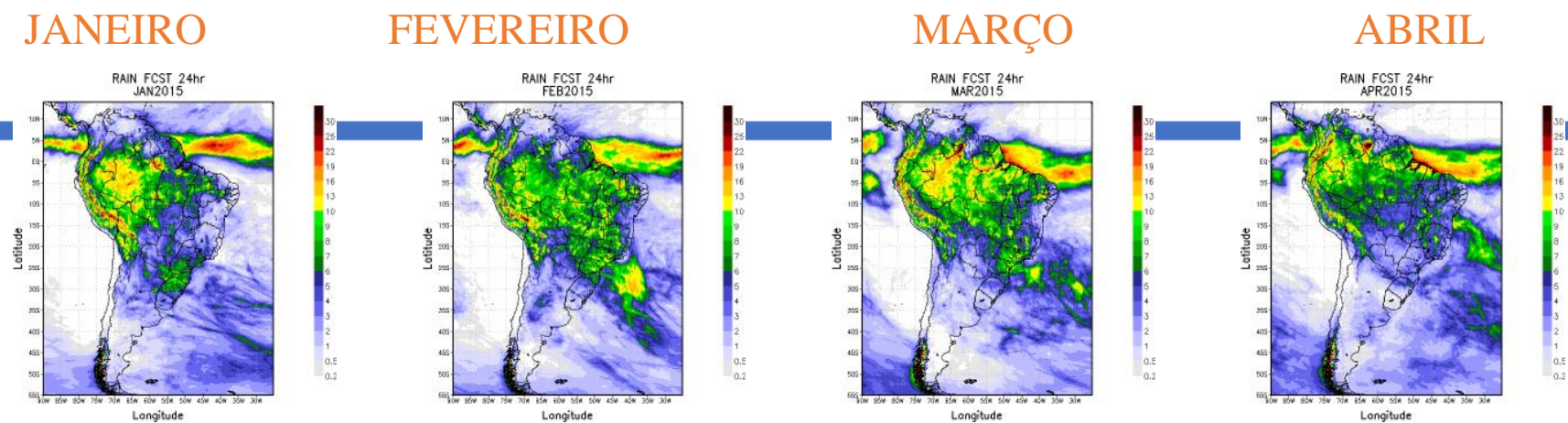
Avaliação

Figueroa et al. 2016 (BAM)

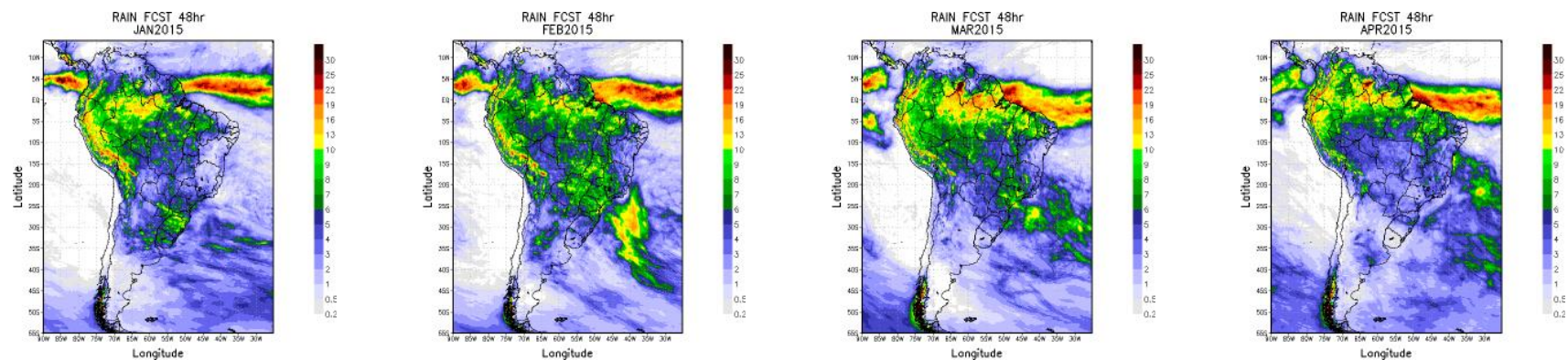




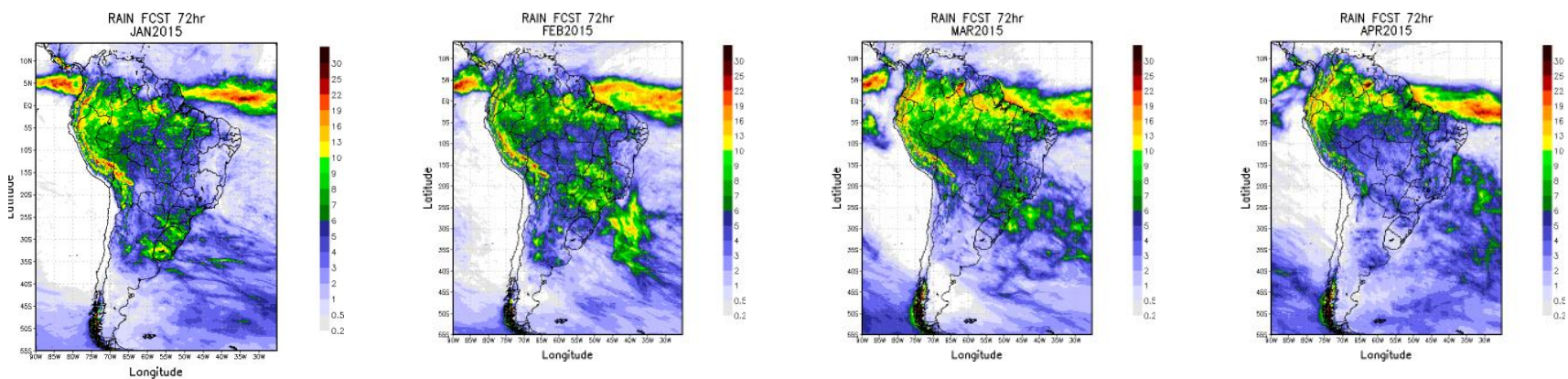
24 hr



48 hr

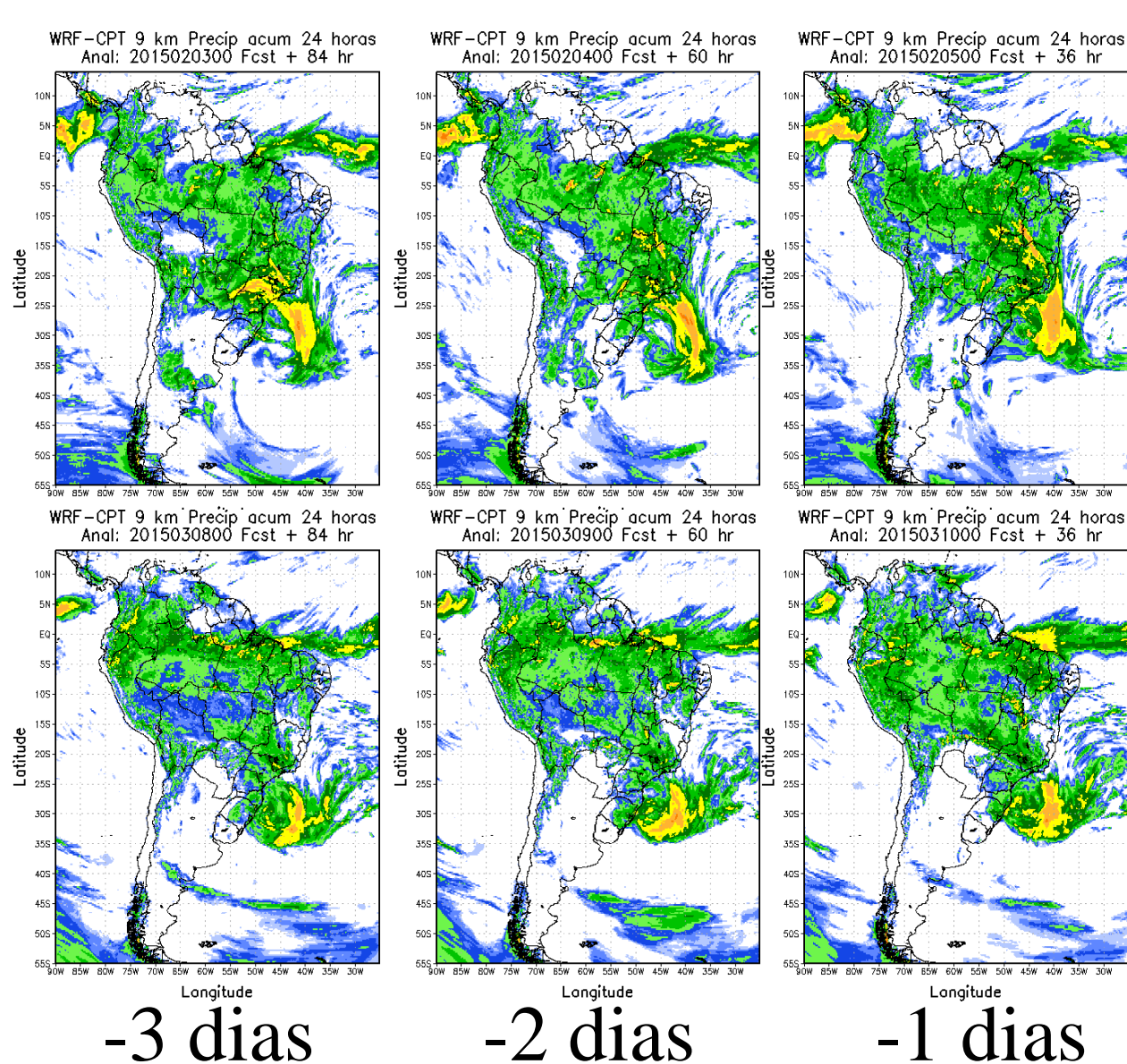


72 hr





América do Sul – 9 km Ciclones extra-tropicais



Prec 24hr [mm]

12Z03FEB2015

BOPE



12Z06MAR2015

CARI

Fernandez et al, 2015

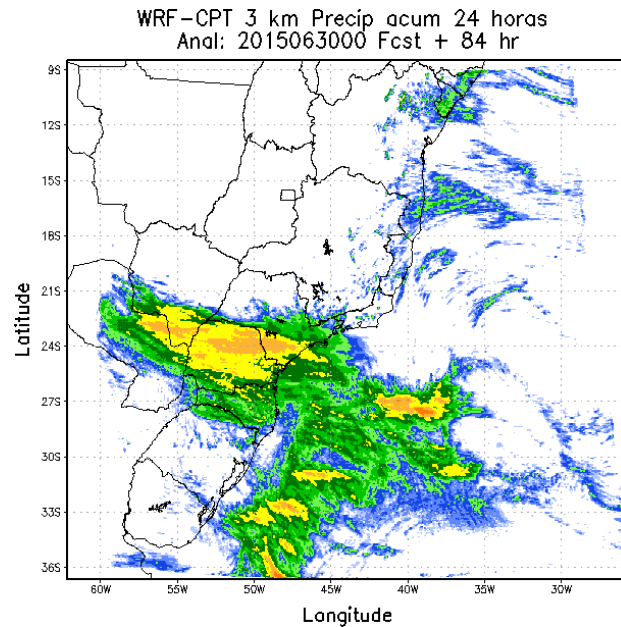
Paulo Yoshio Kubota



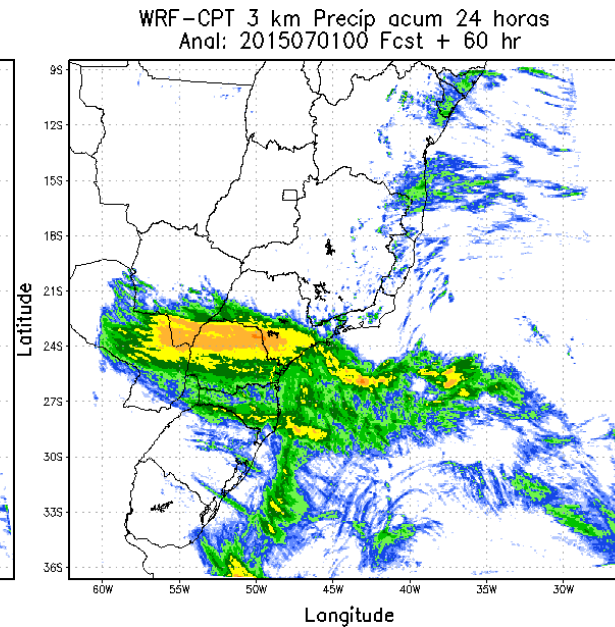
Eventos extremos Parana Julho 2015



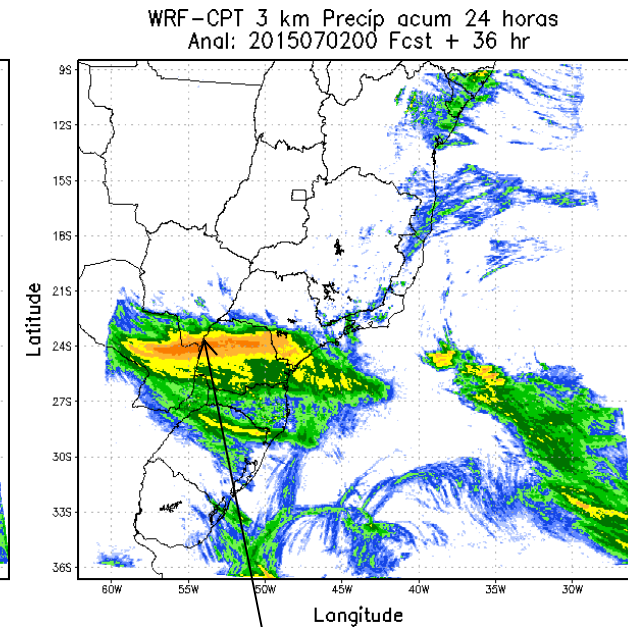
-3 dias



-2 dias



-1 dia



12Z03JUL15



Prec 24hr [mm]

Fernandez et al. 2015
Paulo Yoshio Kubota



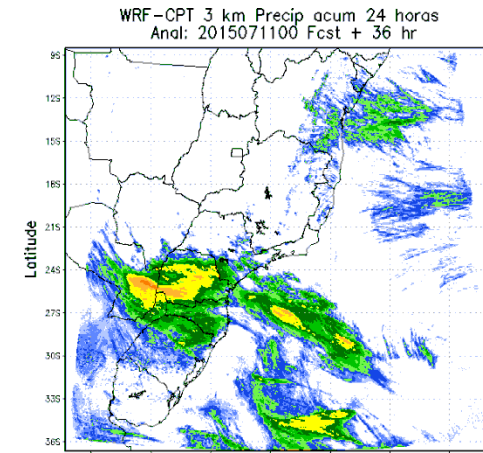
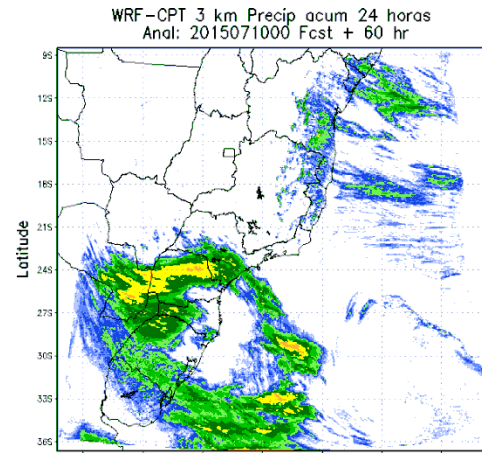
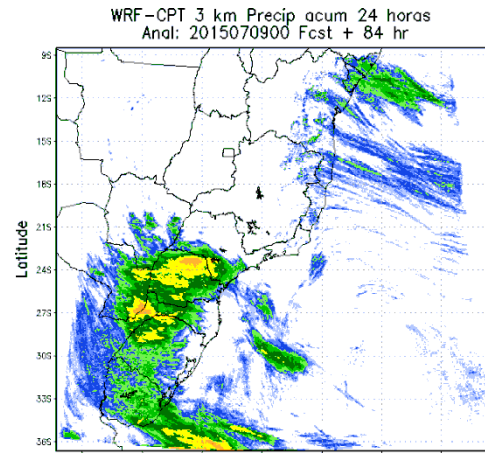
WRF-CPT 03km



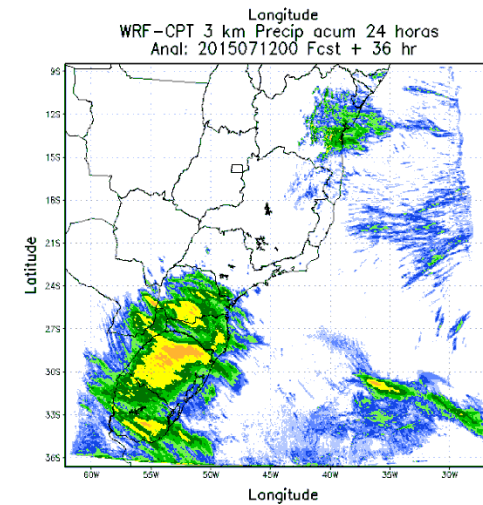
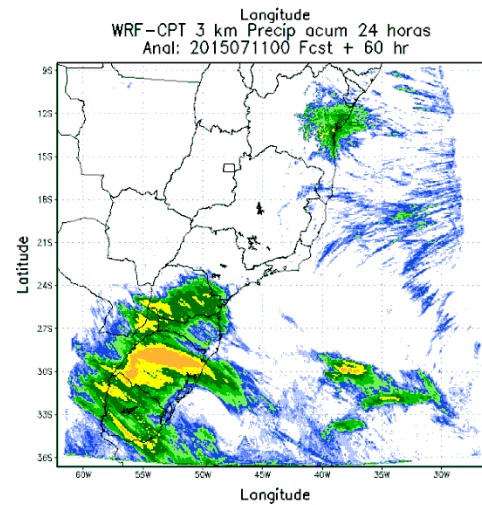
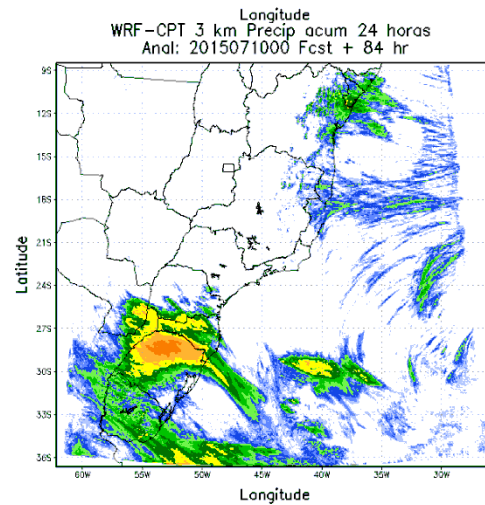
-3 dias

-2 dias

-1 dia



12Z12JUL15



12Z13JUL15



[mm]
Fernandez et al. 2015



Assimilação de dados

$$X_i^a = X_i^b + K [y - H X_i^b]$$

- Fontes e controle de qualidade, esquemas de análise objetiva.
- Introdução a métodos avançados de assimilação.
- Inicialização dinâmica e física



Assimilação de dados

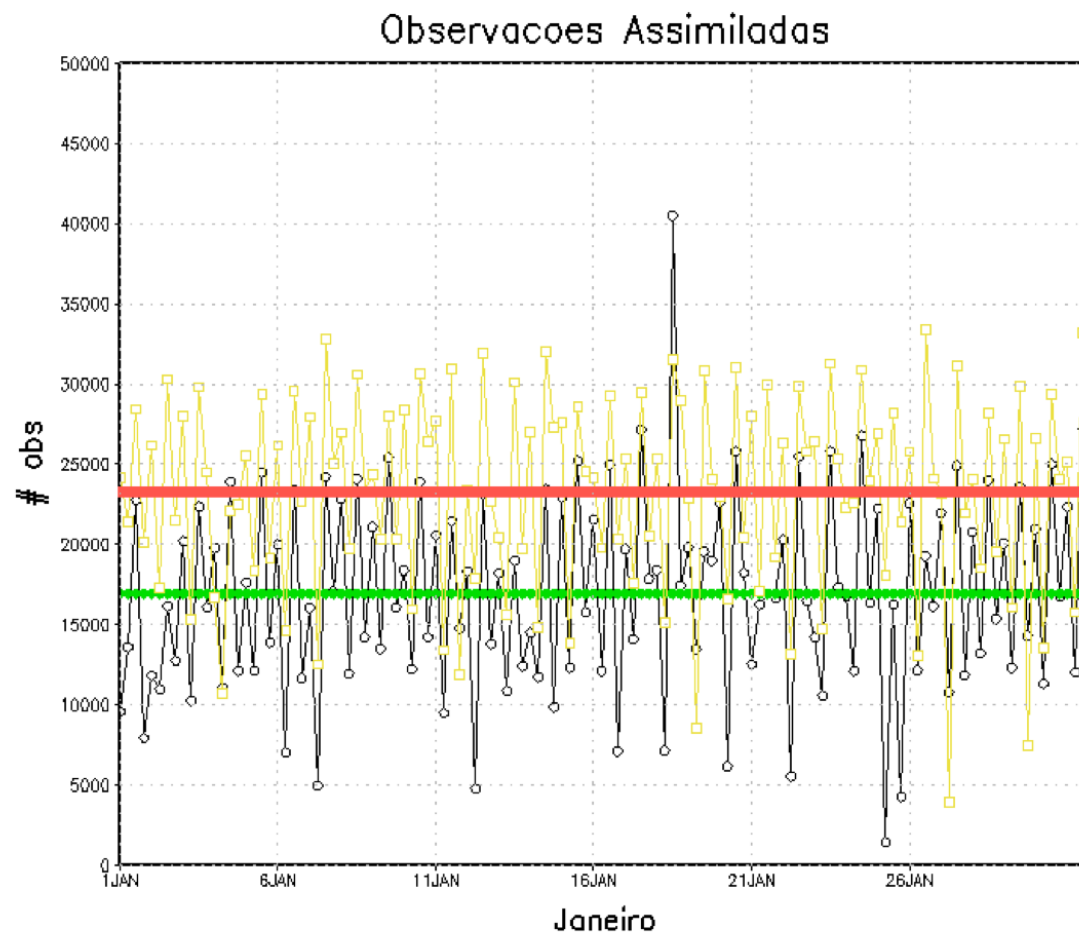
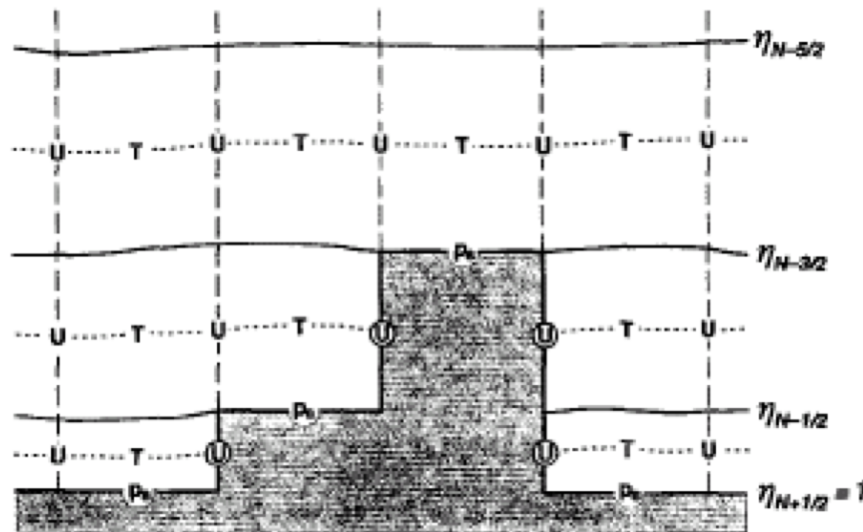


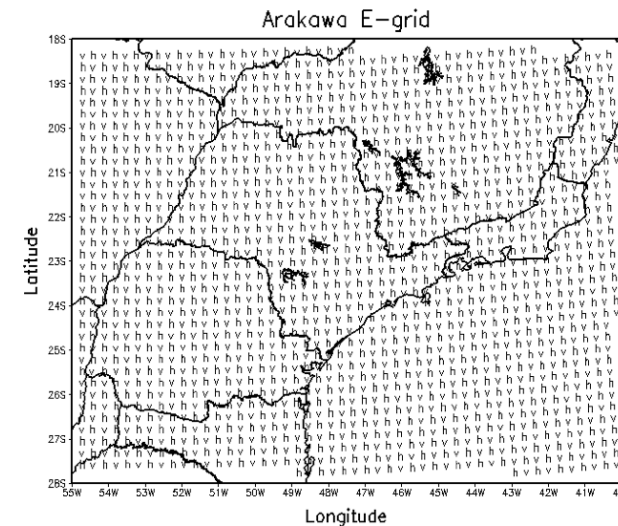
Figura 1 Total de observações utilizadas por ciclo de assimilação durante janeiro de 2003 (linha preta) e 2004 (linha amarela) para a região sul-americana (área compreendida entre 100W e 10W e 60S e 20N). Frequência temporal de 6 horas.

Vertical Grid



a)

Horizontal grid



b)

Figura 2 Disposição das variáveis no modelo ETA: a) vertical (Black, 1994) e b) horizontal (por exemplo, sobre o Sudeste do Brasil).



Assimilação de dados

Data Interpolation

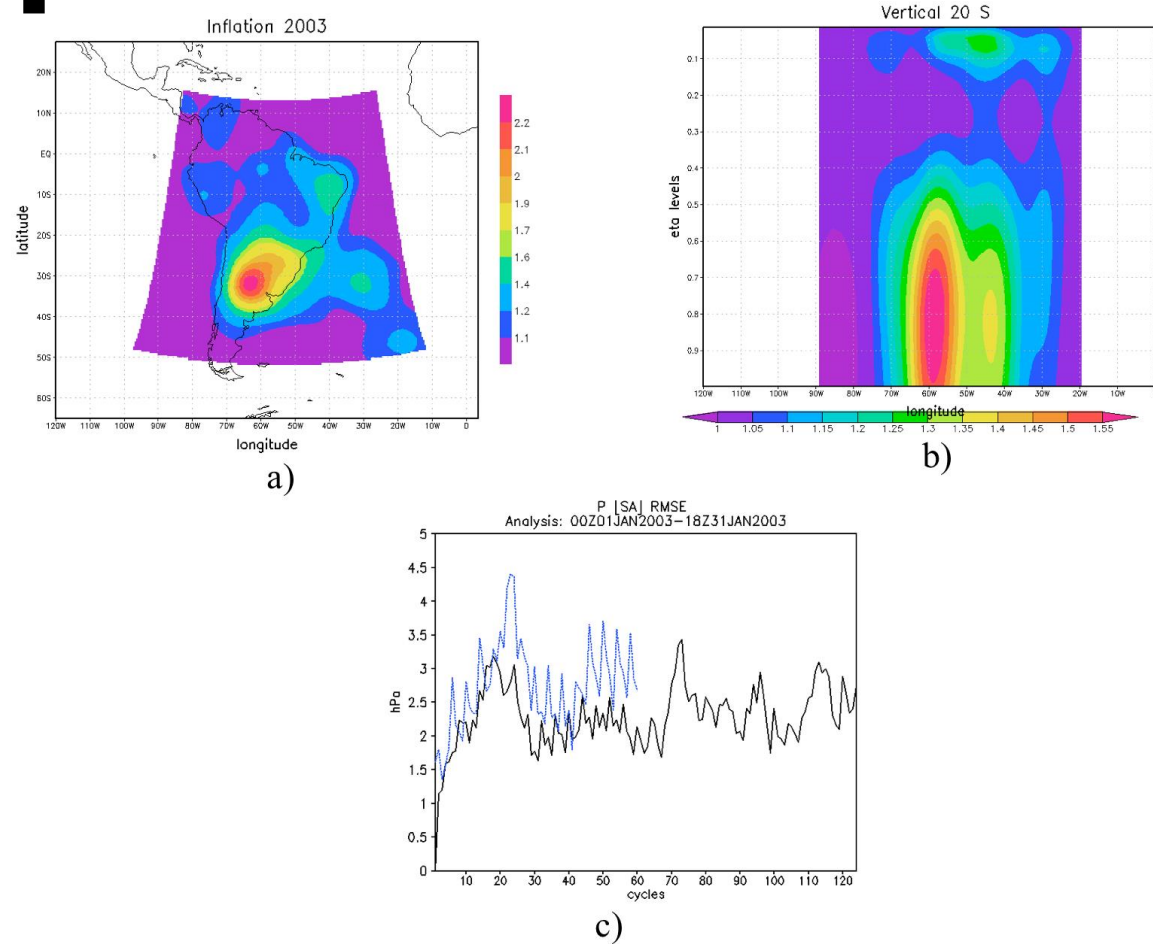
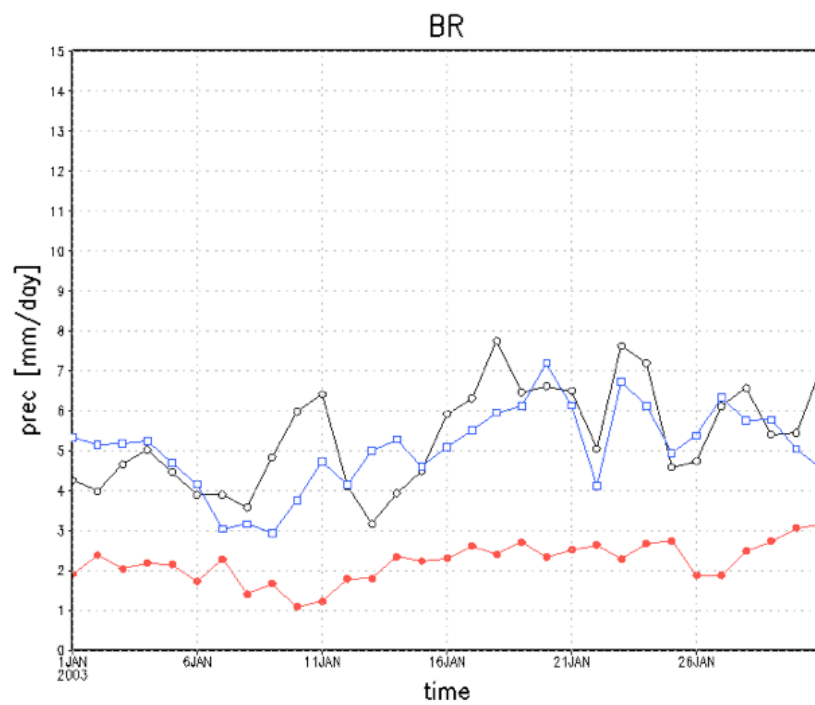


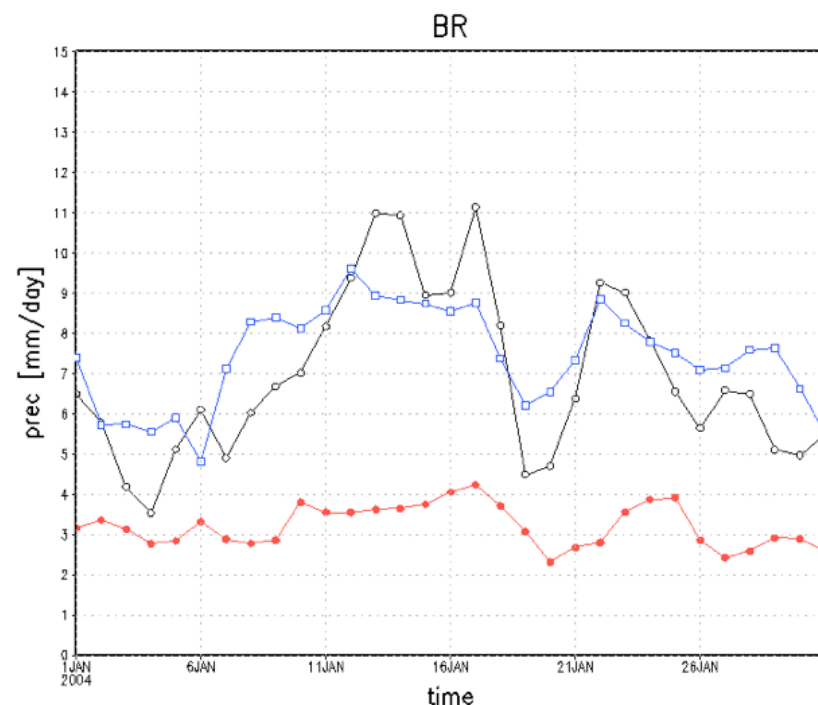
Figura 11 Inflação adaptativa para o período de janeiro de 2003: a) horizontal e b) vertical. c) serie temporal do RMS da pressão a superfície para o mês de janeiro de 2003: Inflação fixa (linha azul) e adaptativa (linha continua).



Tipo de Software de Assimilação de dados



a)



b)

Figura 14: Series temporais de precipitação acumulada diária para janeiro de a) 2003 e b) 2004. Linhas preta (obs), vermelha (RPSAS) e azul (RLETKF).



Comportamento Caótico da Atmosfera



- Conceitos fundamentais de sistemas caóticos e previsibilidade atmosférica
- Previsão por conjuntos operacional e de pesquisa
- Previsão sazonal (climática)
- Projeções do clima futuro



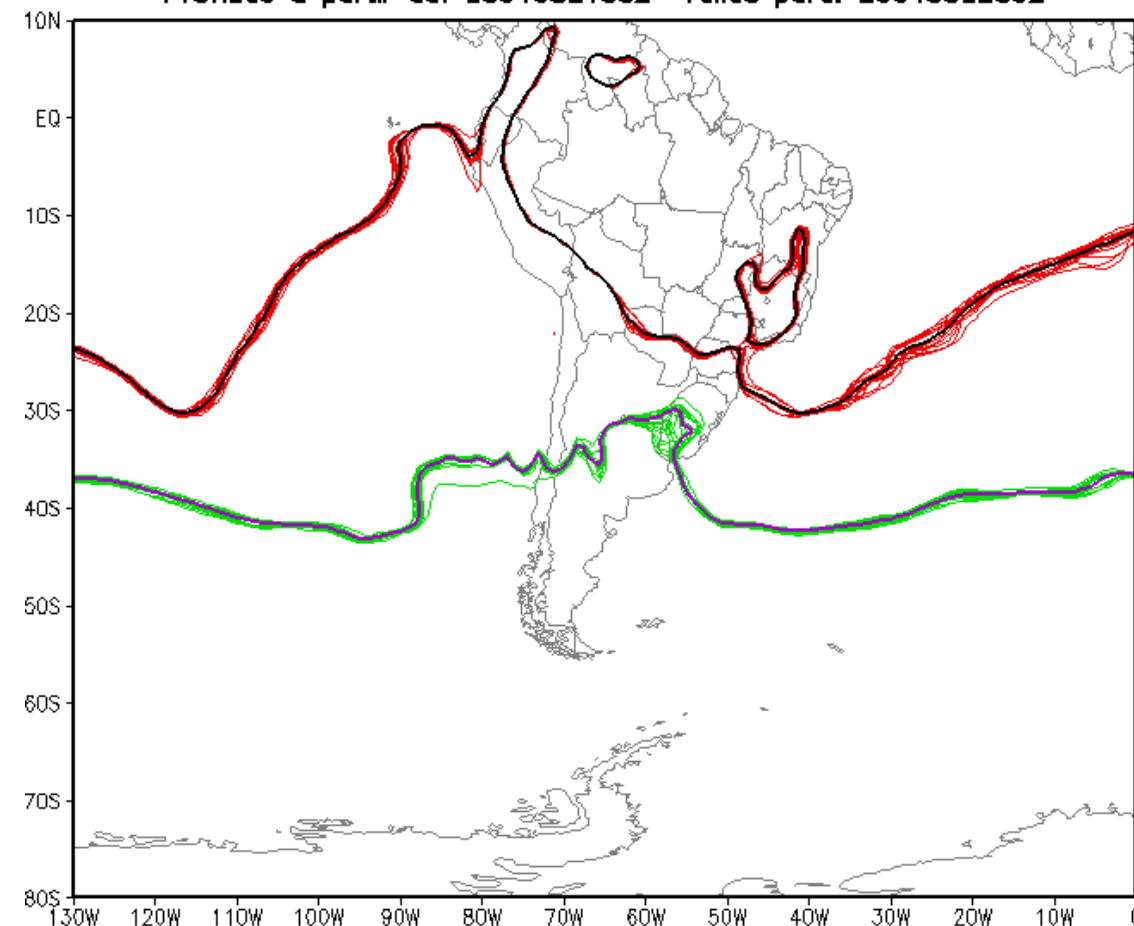
Ensemble



CPTEC/INPE/MCT - PREVISAO DE TEMPO GLOBAL POR ENSEMBLE - T126L28

Diagrama "Spaghetti" - Temperatura (C) (1000 hPa)

Previsao a partir de: 2004082100Z Valido para: 2004082200Z



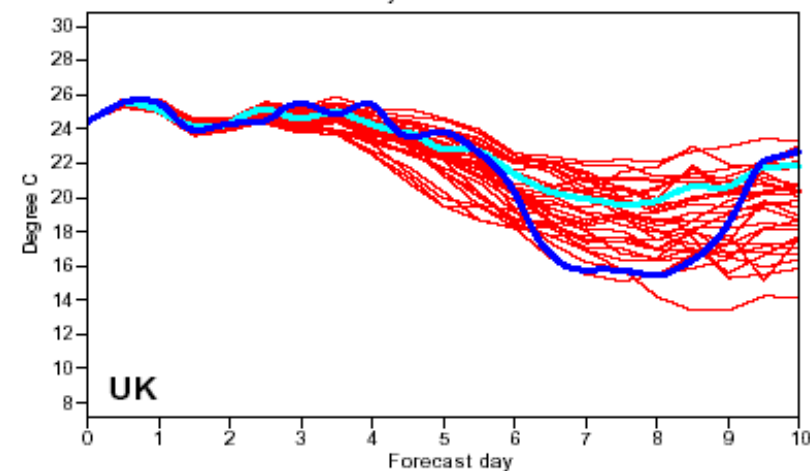
— Membros do Ensemble (20.0 graus) — Ensemble Médio (20.0 graus)

— Membros do Ensemble (10.0 graus) — Ensemble Médio (10.0 graus)

ECMWF ensemble forecast - Air temperature

Date: 26/06/1995 London Lat: 51.5 Long: 0

— Control — Analysis — Ensemble



ECMWF ensemble forecast - Air temperature

Date: 26/06/1994 London Lat: 51.5 Long: 0

— Control — Analysis — Ensemble

