



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Fonte: diversas

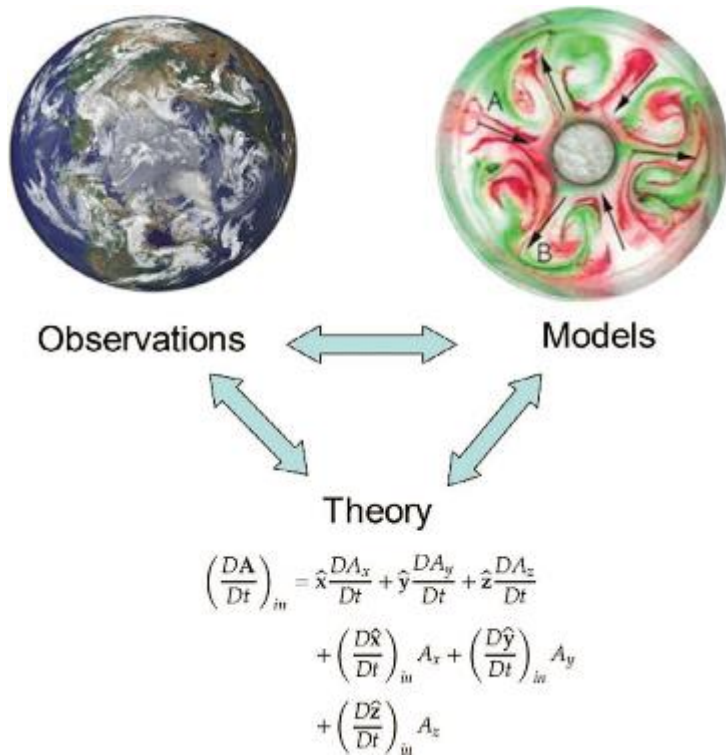


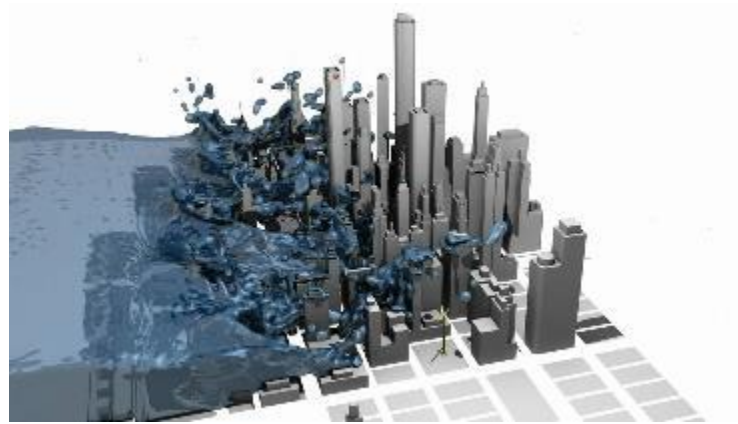
Conceitos básicos

- O que é modelo?
- Tipos:
 - Modelos físicos: por exemplo, tuneis de vento: efeitos do vento em escala sobre cidades, construções, aviões, carros; ondas, terremotos, etc.
 - Meteorologia: circulações planetárias, convecção, etc.



Illari et al. BAMS 2009



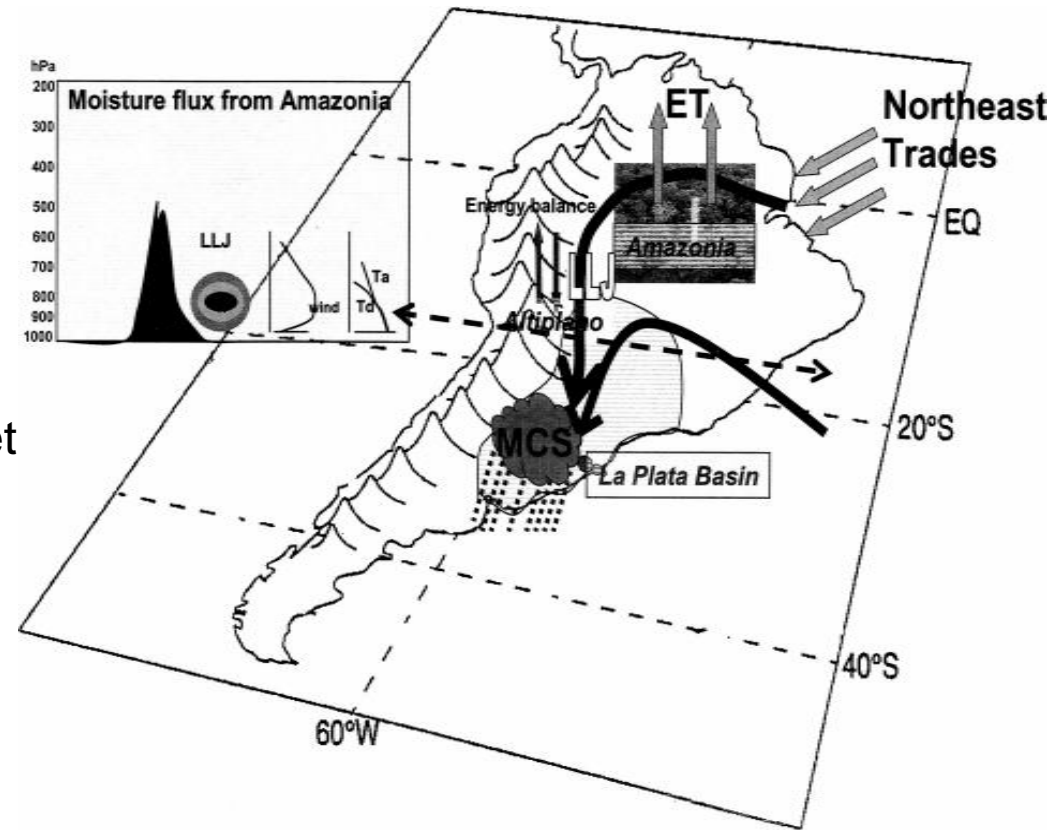




- Modelos conceituais:
 - Descrevem um processo fazendo simplificações, ou seja detalhes sem importância e periféricos são omitidos , com apropriadas assunções
 - Apresentam uma coleção de ideias e conceitos
- Exemplos:
 - Jato de baixos níveis sobre América do Sul, frentes, etc.

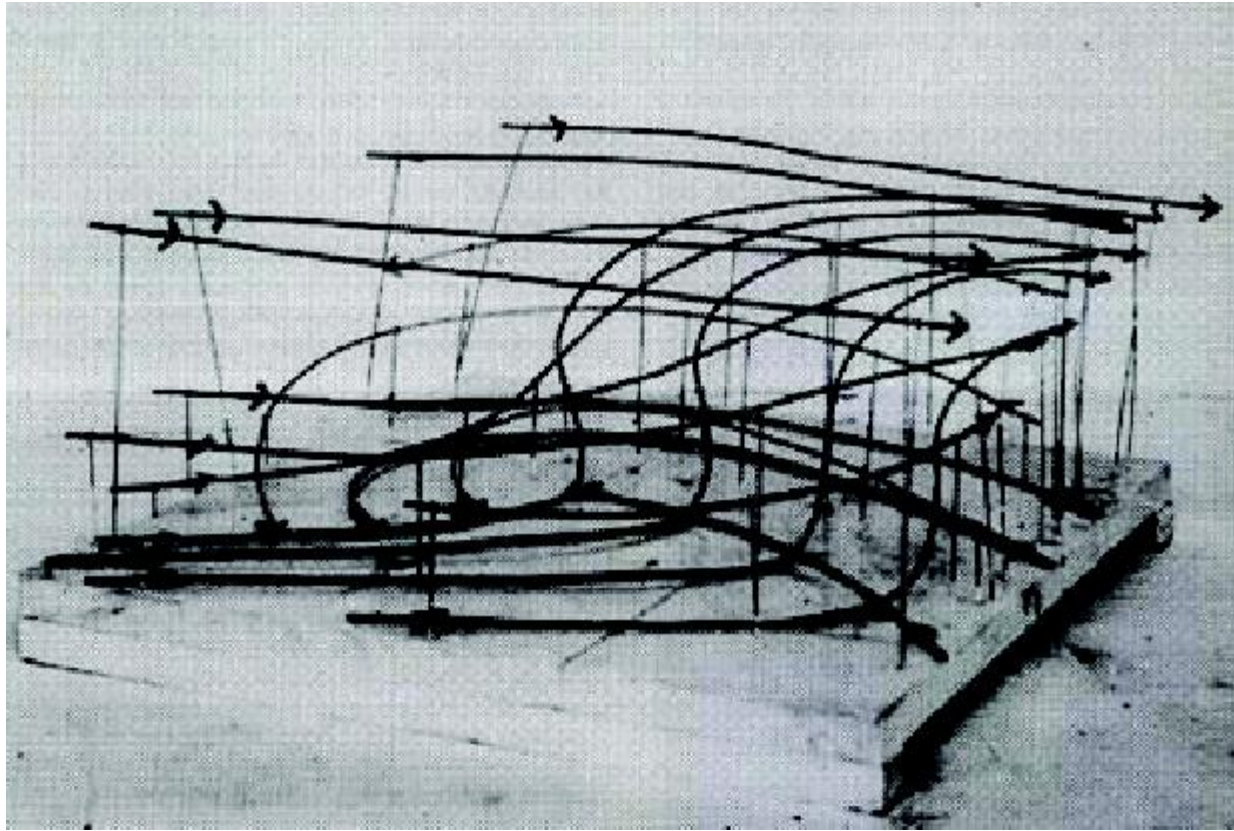


Marengo et
al. 2004





Bergeron





- Modelos matemáticos
 - Um modelo conceitual trasladado a equações/expressões matemáticas
 - Um conjunto de equações que descrevem um processo (atmosfera)
- Exemplo:
 - Equações primitivas



- Modelo numérico
 - Um modelo matemático implementado no computador
- Exemplos:
 - Códigos dos modelos de PNTC



Utilidade

- Ferramentas diagnosticas:
 - Estudos de processos (detalhe)
 - Obter uma melhor compreensão
 - Informação em 3-D e 4-D
- Ferramentas de previsão:
 - Previsão (PNT, clima, etc.)
 - Projeções ou cenários; idealizados para verificar potenciais impactos de alguns processos; variabilidade interna



Limitações

- Os modelos numéricos não são perfeitos
- Incluem o conhecimento atual (+modernos)
 - Embora possam ser testadas novas teorias
- Não todos os processos necessariamente são incluídos (custo em tempo de CPU e espaço)
- Resolução espacial (horizontal/vertical)
- Aproximações



Limitações II

- Meteorologia não exata
- Bons resultados algumas vezes por razões erradas
- Depende da qualidade do modelador: meteorologista, físico, químico, cientista em geral
- Depende da qualidade do programador: normalmente nenhum modelo esta livre de bugs.



Modelo numérico

- Desenho: equações simples/complexas
- Codificar: fortran, C, python, html, etc.
- Mídia: computador, notebook, celular, etc.
- Utilidade: acadêmico, comercial, social, etc.



Histórico da PNTC

- O por que?
- Motivação
 - Política
 - Social



- A previsão de tempo (sinótica) era/é realizada
- - a) Persistência
 - b) Tendência
 - c) Analogia



Qual é a relação entre o cometa Halley e a previsão numérica de tempo?

Tanto a previsão do movimento de um cometa quanto a previsão do clima dependem de modelos matemáticos complexos que resolvem equações físicas que descrevem o comportamento da natureza.



Teoria

- Dinâmica dos fluidos e termo dinâmica:
- Equações de Navier-Stokes
- Equação de estado dos gases (Kelvin e Helmholtz)
- Meteorologia sinótica: ciclones e frentes



Abbe (1901) e Bjerknes (1904) definiram que a previsão de tempo é um problema determinístico de valor inicial

Solução através de métodos gráficos

Bjerknes estabeleceu os principais postulados (manifesto):

1. Condições iniciais → diagnóstico
2. Equações governantes → prognóstico



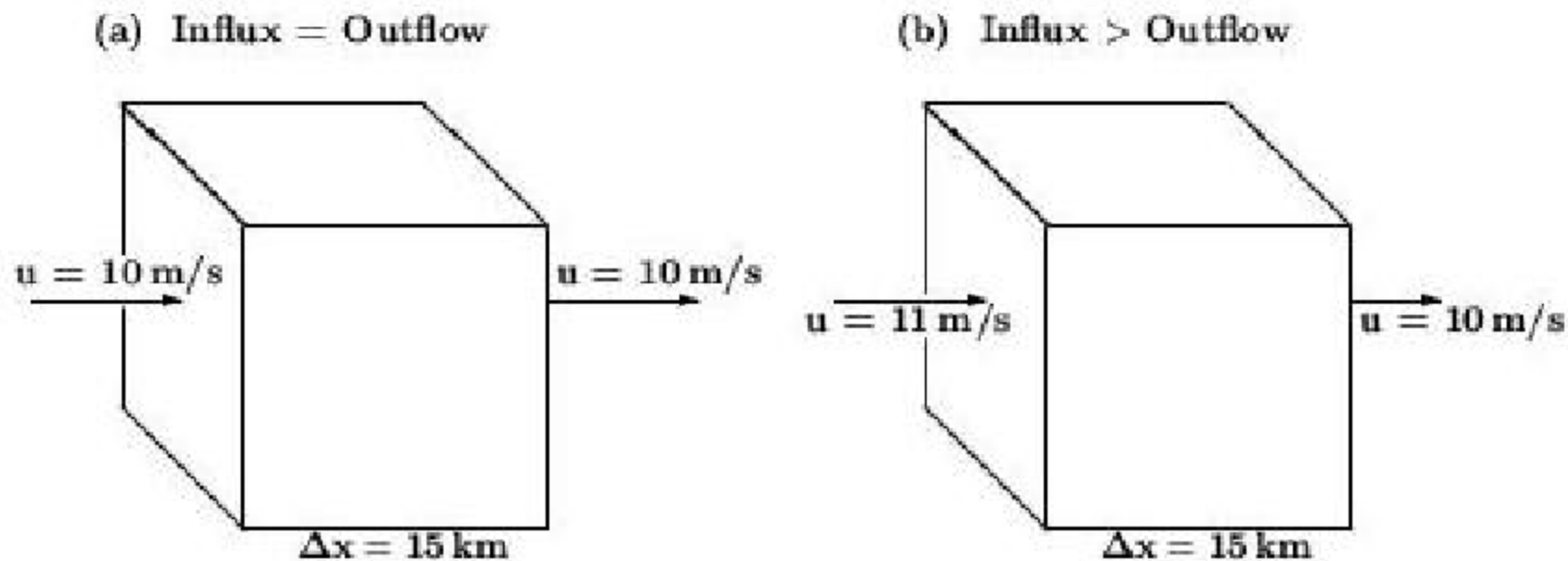
- Max Margules (1856-1920)



Tendência da pressão através da equação de continuidade

Tendência realística → necessário ventos com alta acurácia

Conclusão previsão não é possível



Supondo uma pressão inicial de 1000 hPa, $u > 0$ e $v=0$ e considerando conservação de massa: em b) 7 Pa/s, então em 4 horas será o dobro. Como? E em a)?



- Felix Maria Exner (1876-1930)

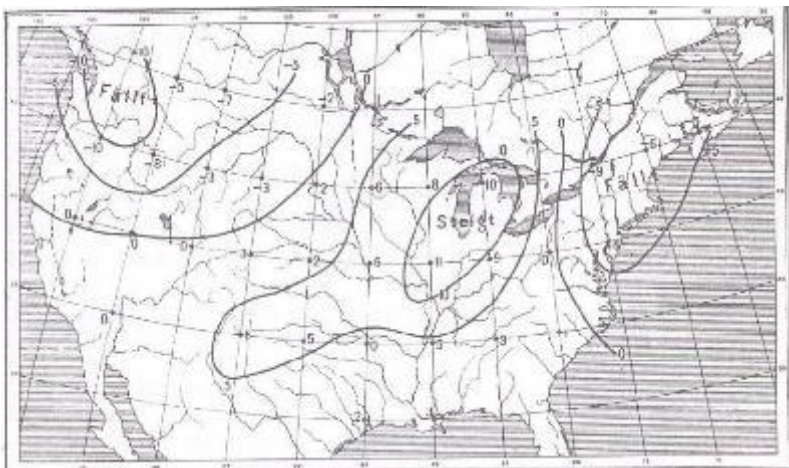


Primeiro em usar princípios físicos para calcular mudanças sinóticas

Sem usar a equação de continuidade

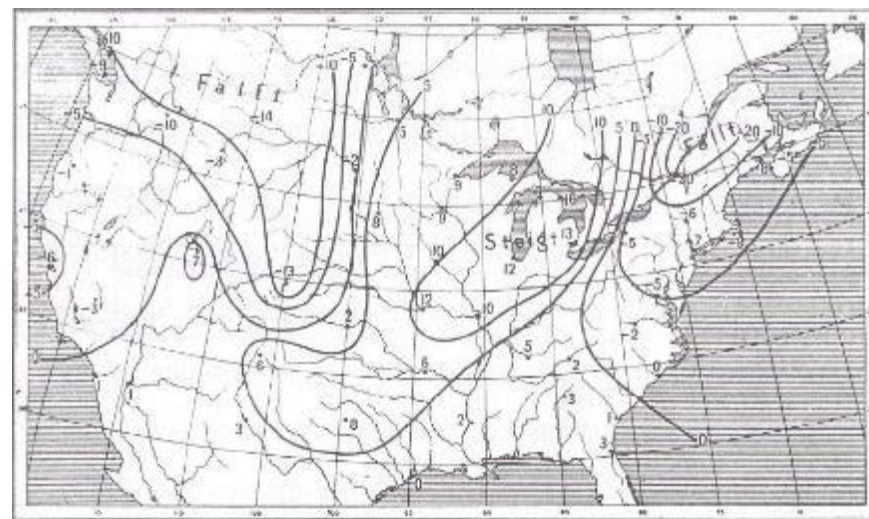
Balanço geostrófico, forçante térmica constante → vento zonal médio

Derivou uma equação prognostica da advecção da pressão



Primeiro intento científico de previsão de tempo

Resultados razoáveis





Dificuldades:

1. Conhecimento científico

2. Recursos tecnológicos (computadores)



1881-1953

L F Richardson (1916-1922) descreveu um método para integrar numericamente as ***equações*** que governam a atmosfera (mas que equações?)

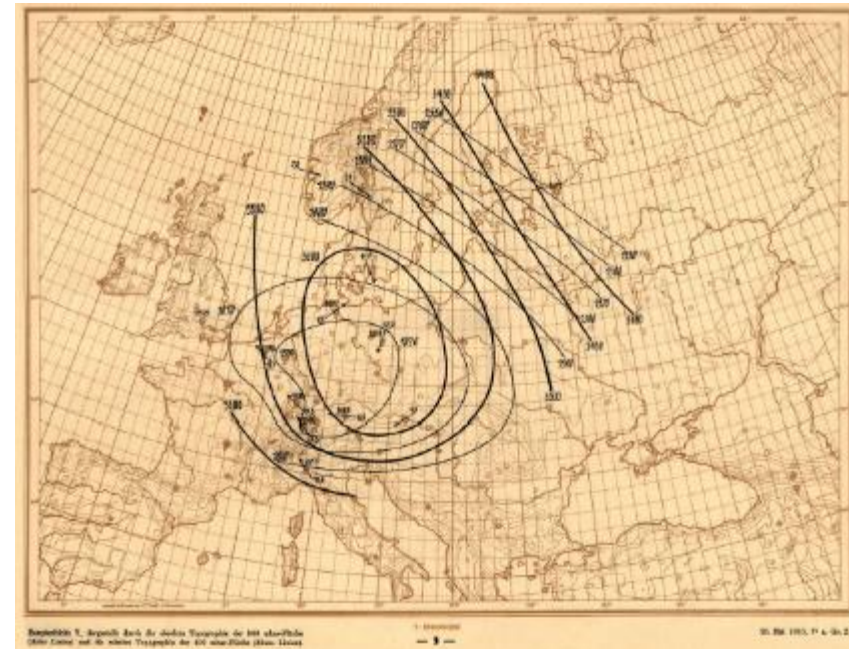
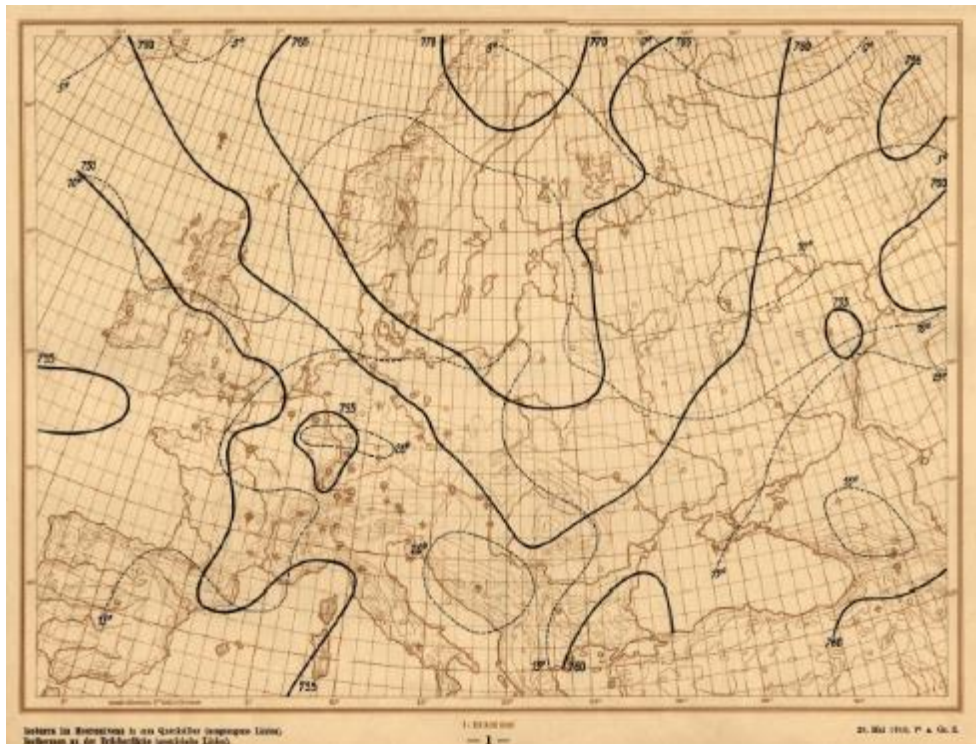


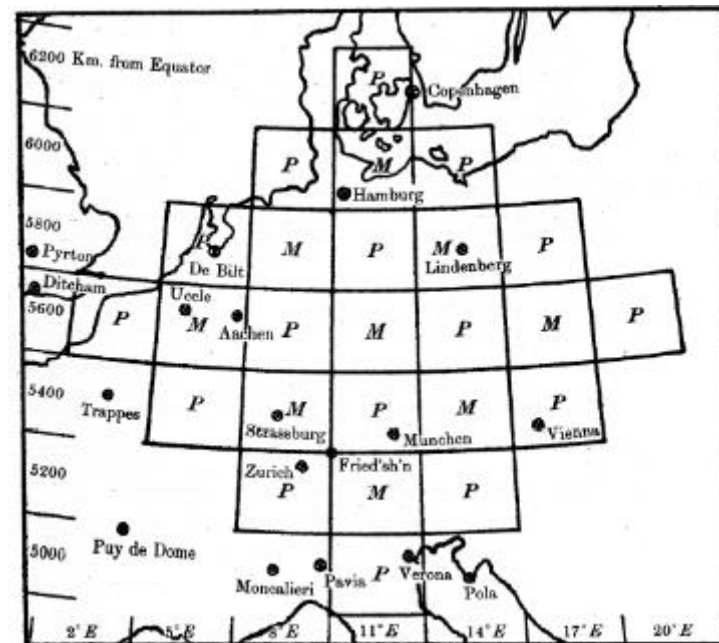
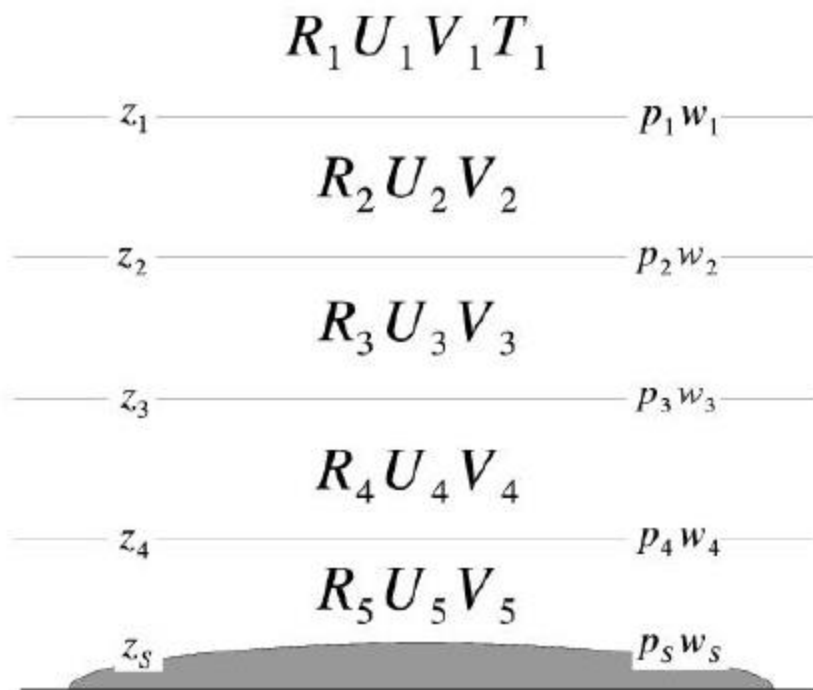
Experimento

- 7 UTC para 20 maio de 1910, por que?
- 200 km, 4 camadas com 200 hPa c/u, Alemanha
- Cálculos manuais de vários meses

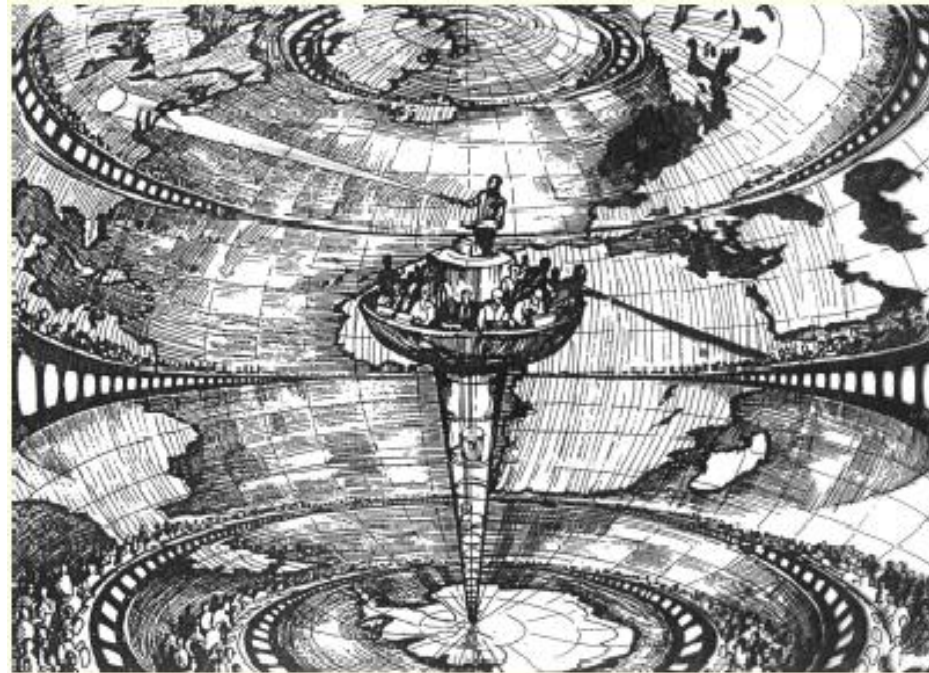
Dados

- Analises de pressão ao nível do mar e geopotencial em 500 hPa (Bjerknes)





Área de
integração



Fabrica de tempo
(supercomputadores)



- Errou em determinar a magnitude da tendência da pressão (146 hPa/ 6 h), por que?

“Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the computations faster than the weather advances . . . But that is a dream.”

L F Richardson



- Qual foi o resultado?
- O que provocou?



- Como?
- Bases teóricas: nas décadas 1920-1950
 - Meteorologia dinâmica:
 - Ondas de Rossby
 - Teoria quase-geostrófica
 - Instabilidade baroclínica



- Métodos numéricos:
 - CFL
- Observações: radio sondas (1940), satélites (1960)
- Computadores: ENIAC (1950) e outros



- Courant, Friedrichs e Lewy, 1928

$$C \frac{Dt}{Dx} \leq 1$$

Numero de Courant



$$Dt \leq \frac{Dx}{C}$$



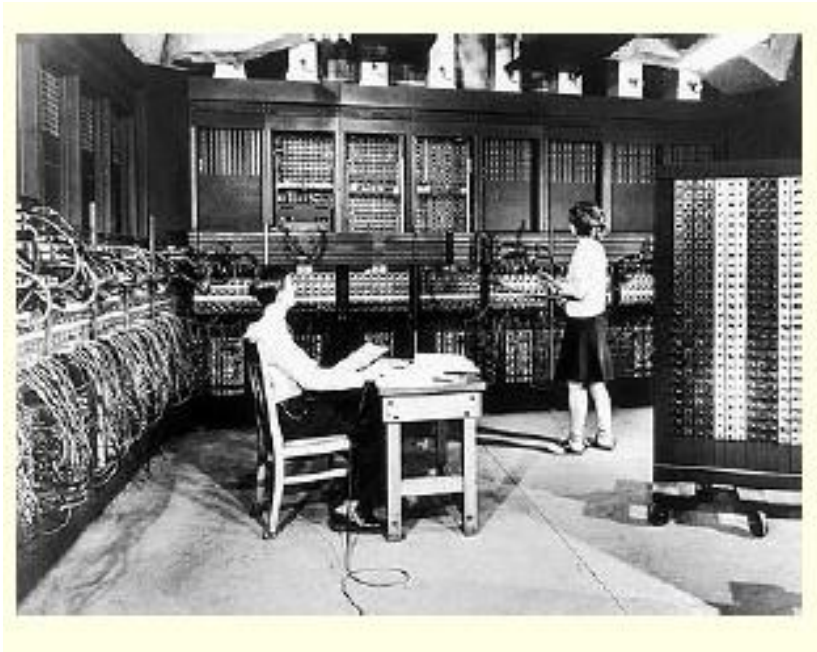
- Planos:
 - Integrar equações primitivas
 - Integrar sistema Q-G baroclínico
 - Integrar equação de vorticidade barotrópica
- Do complexo ao simples ou do simples ao complexo?



- Modelos Barotrópicos regionais

- Charney, Fjortoft e Neuman (1950) primeira previsão numérica de tempo – 1948-49
- Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC)

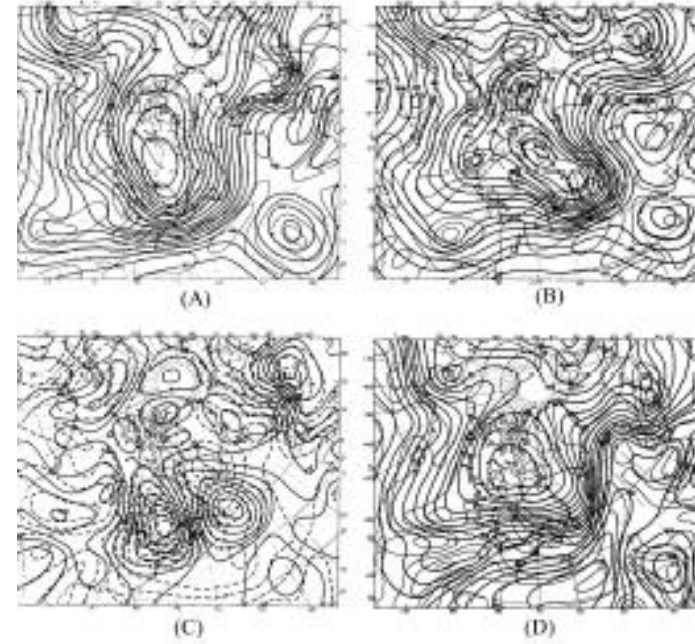
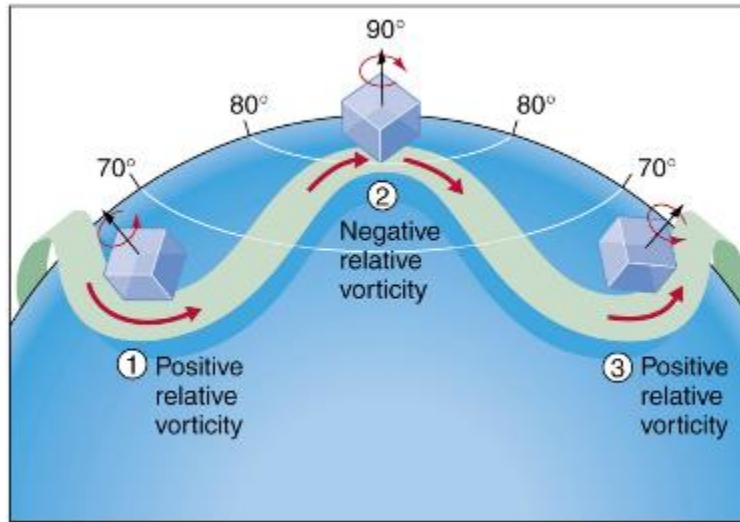




ENIAC

$$\frac{d_H(Z + f)}{dt} = \frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} + v \frac{\partial Z}{\partial y} + v \frac{\partial f}{\partial y} = 0$$
$$\frac{dh}{dt} = 0$$

Ondas de som e gravidade





- **PNT operacional**

- Binary Electronic Sequence Calculador (BESK) (1954) Suécia
- Joint Numerical Weather Prediction Unit (JNWPU) (1955) EU
- Outros



- Coffee break



Modelos Baroclínicos (1962)

Varias camadas

Advecção de vorticidade pela componente divergente do vento

Equação de balanço para manter relação de massa e vento



Modelos de equações primitivas (1960)

Problemas: Instabilidade não linear

Melhoras substanciais no desempenho das previsões associado ao desenvolvimento dos computadores:

Mais pontos de grade, níveis verticais, maior domínio, inclusão de topografia, tipo de solo: neve, gelo,

Inclusão de processos físicos: radiação, precipitação, nuvens, turbulência



Equações

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f v - \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial u}{\partial \phi} - \dot{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{R_d T_v}{a \cos \phi} \frac{\partial \ln P_s}{\partial \lambda} - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} + K_u + F_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -f u - \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial v}{\partial \phi} - \dot{\sigma} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{R_d T_v}{a} \frac{\partial \ln P_s}{\partial \phi} - \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} + K_v + F_v$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \phi} - \dot{\sigma} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} + K_\theta + F_\theta$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial q}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial q}{\partial \phi} - \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} + K_q + F_q$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial t} = - \int_0^1 \vec{\nabla} \cdot (\vec{V} P_s) d\sigma$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \log \sigma} = - R_d T_v$$

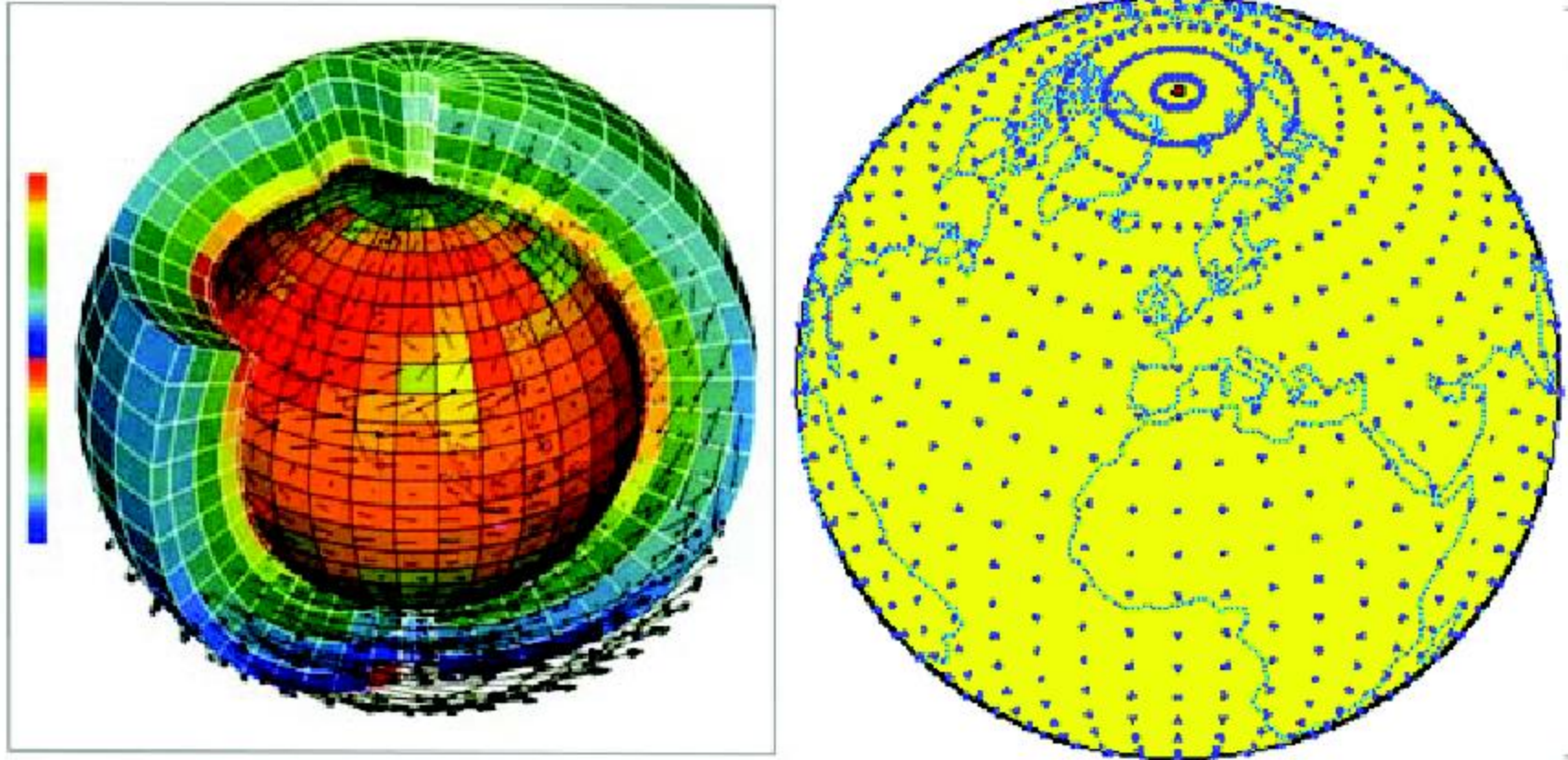
$$P = \rho R_d T_v \quad T_v = T(1 + \delta q)$$

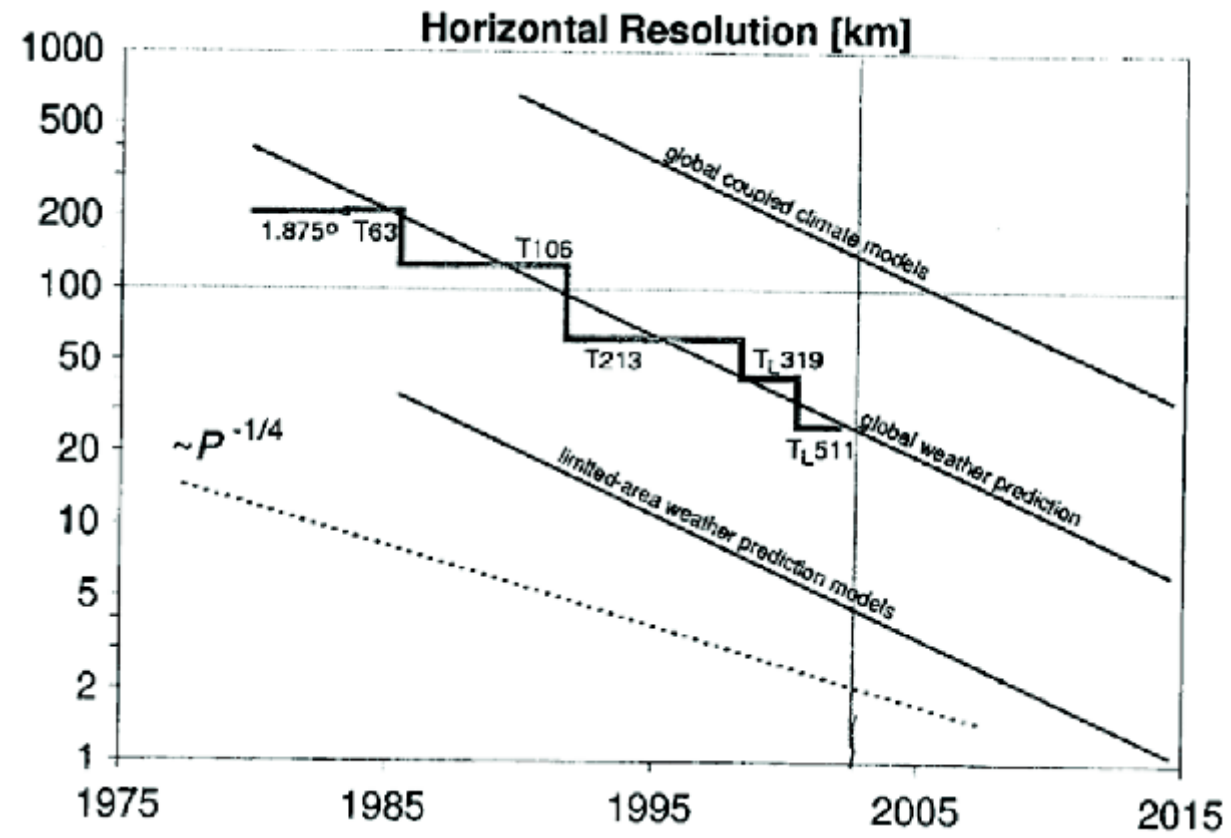
$$\dot{\sigma} P_s = (1 - \sigma) \frac{\partial P_s}{\partial t} + \int_\sigma^1 \vec{\nabla} \cdot (\vec{V} P_s) d\sigma$$

$$\theta = T(P_0/P)^{R_d/C_p}$$



Domínio







Efeitos

Radiação de onda curta e longa (1967),

Topografia (1968),

Calculo de vapor d'água e do calor latente (1968),

Convecção (1971)



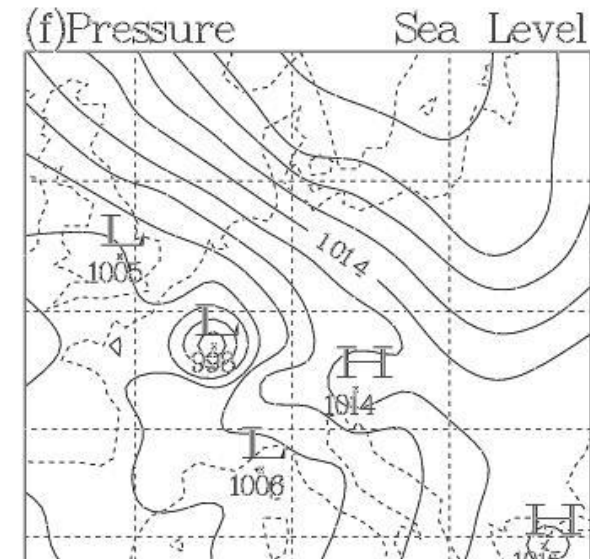
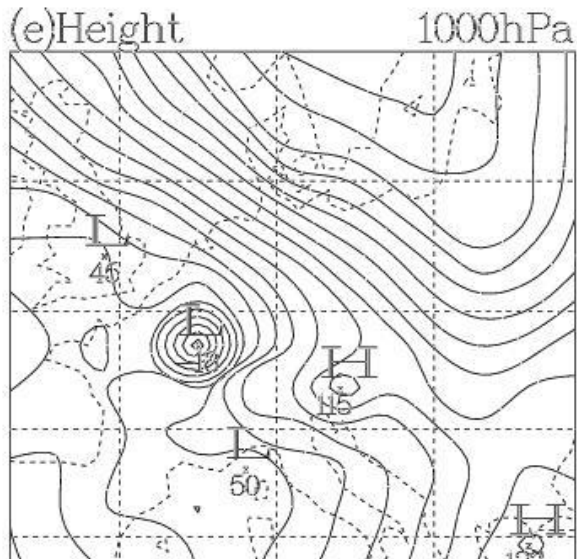
Condição Inicial

Análise objetivo dos dados: Assimilação

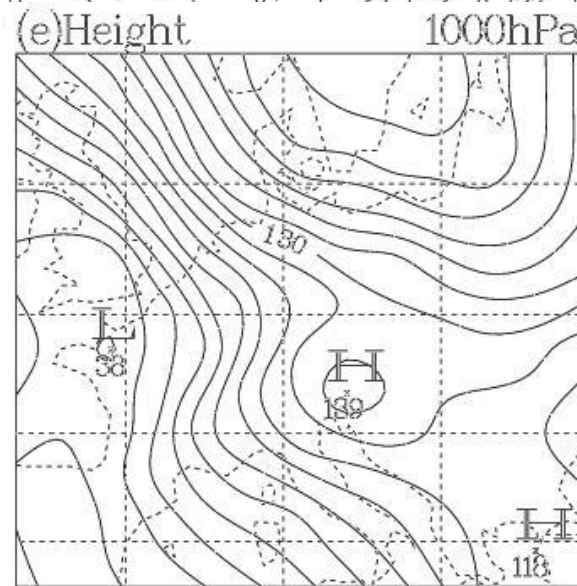
Inicialização: **ajustamento** de massa e movimento, dinâmica do modelo

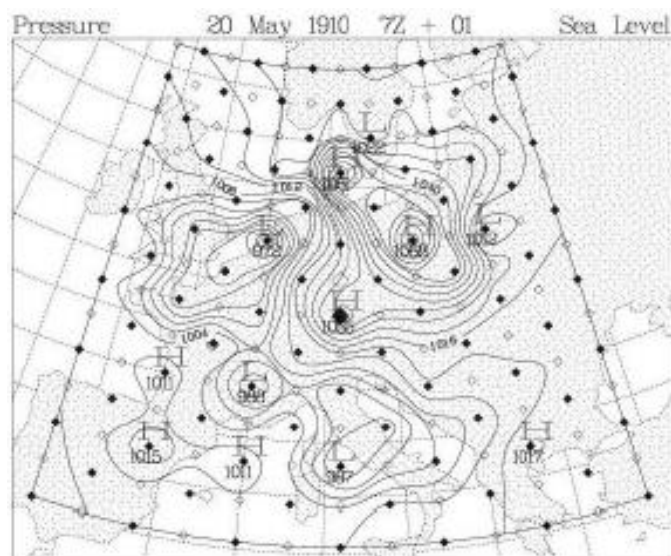


Condição inicial

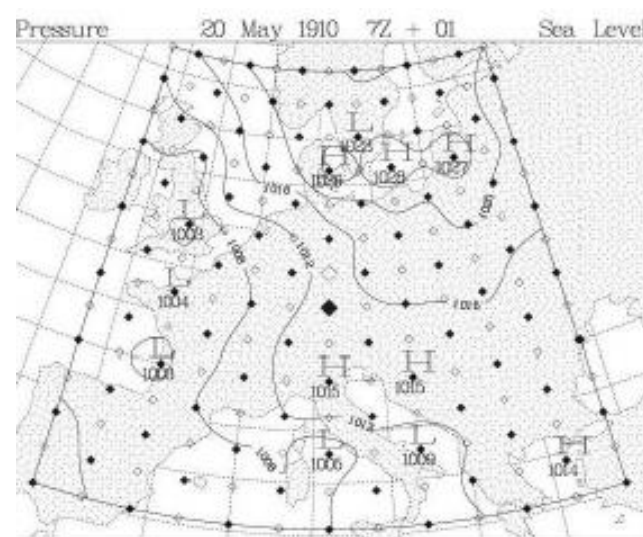


Sem filtro





Sem filtro



Filtro

Pressão
(Previsão)

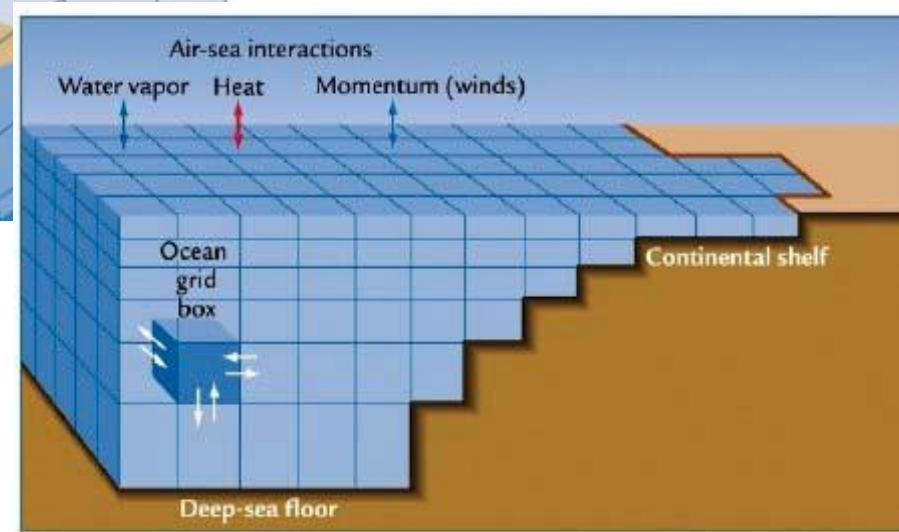
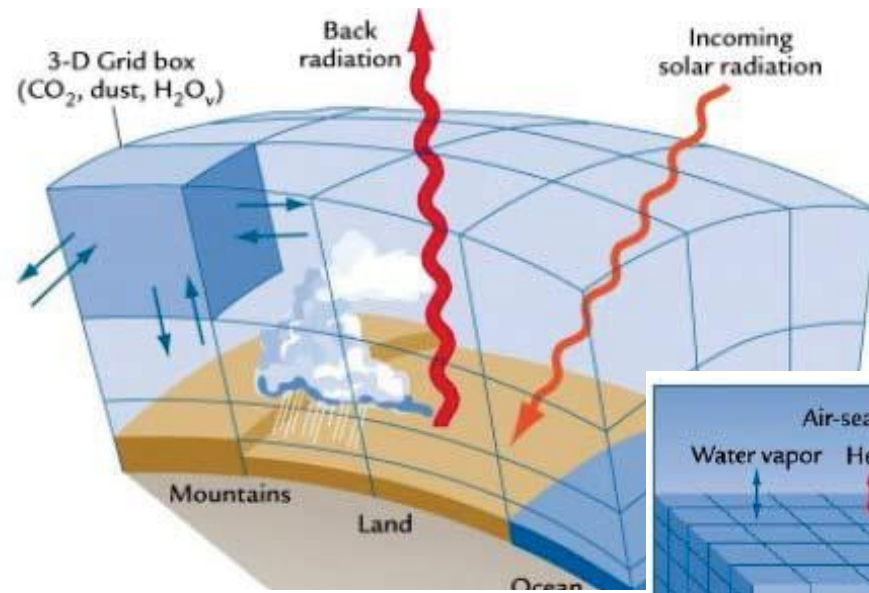
Peter Lynch

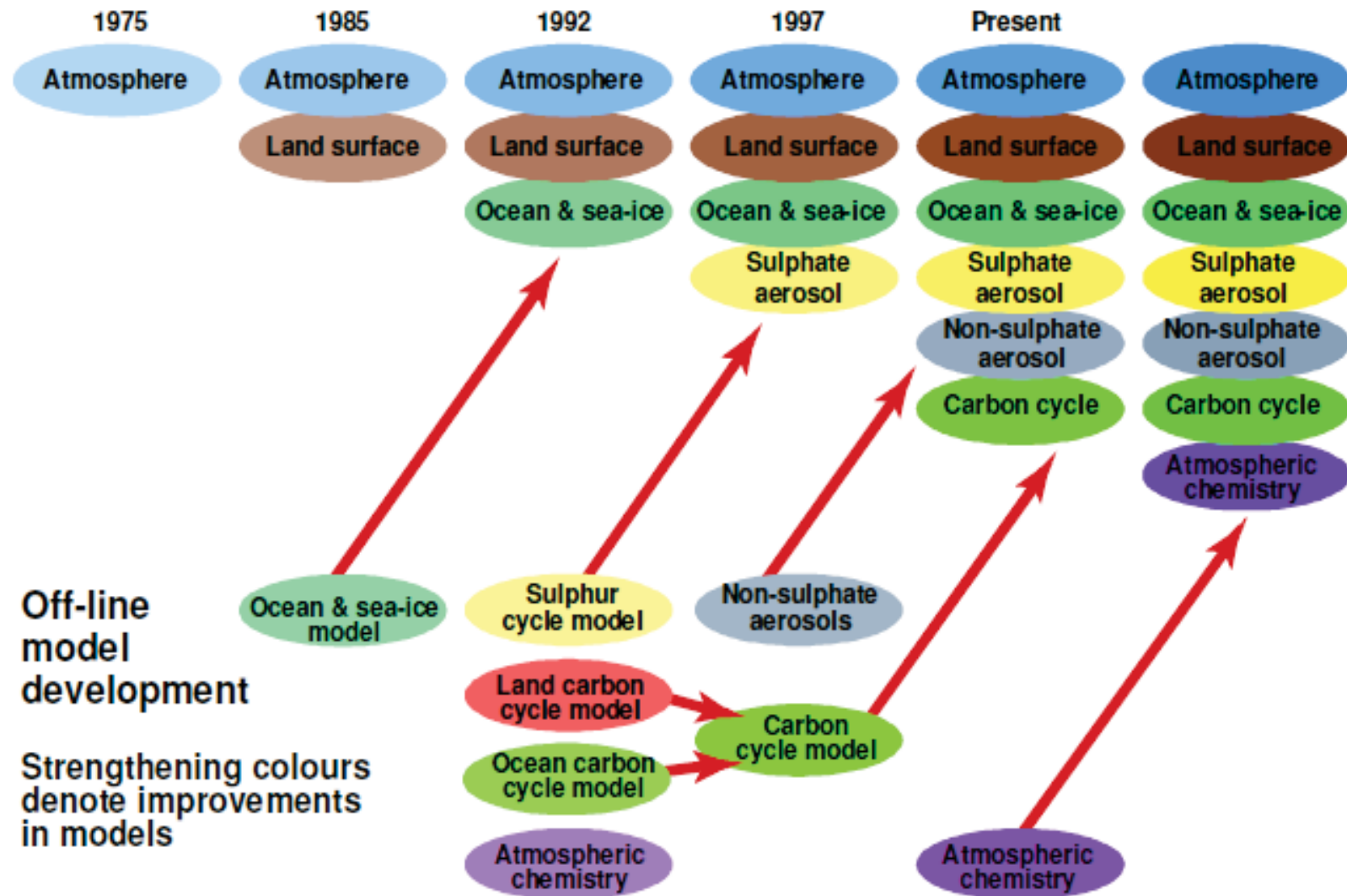


- Malha
- Regional a global (1974)
- Diferenças finitas a espectral (1980)
- Não-hidrostáticos (regionais e globais)



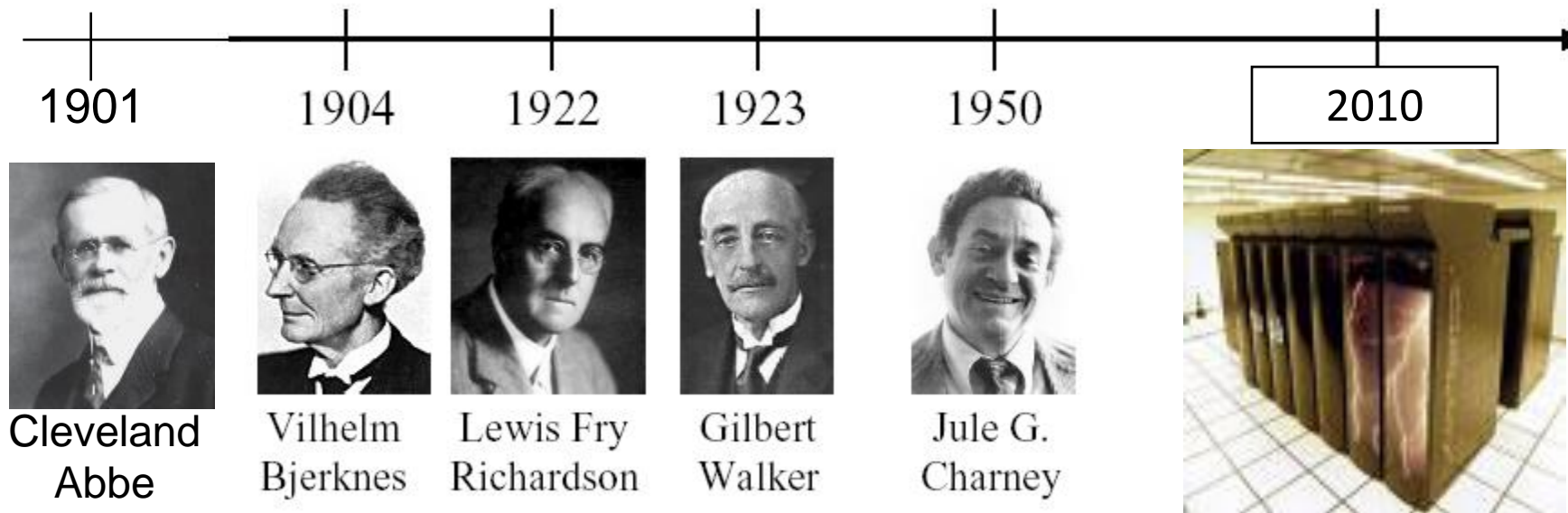
- Desenvolvimento nos modelos atuais: refinamento
 - Técnicas de integração (esquemas numéricos)
 - Estado da atmosfera (assimilação de dados)







Previsão Numérica

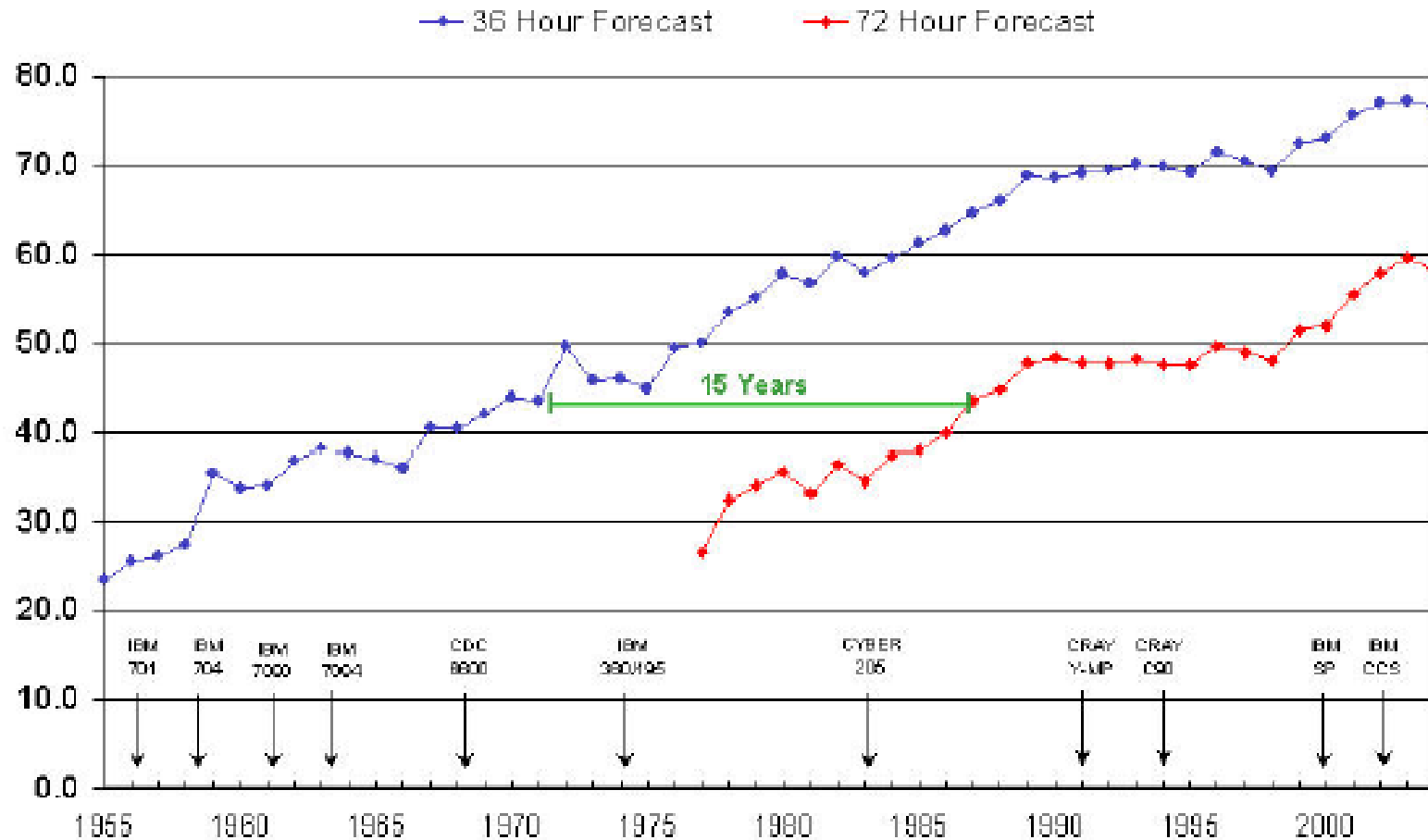


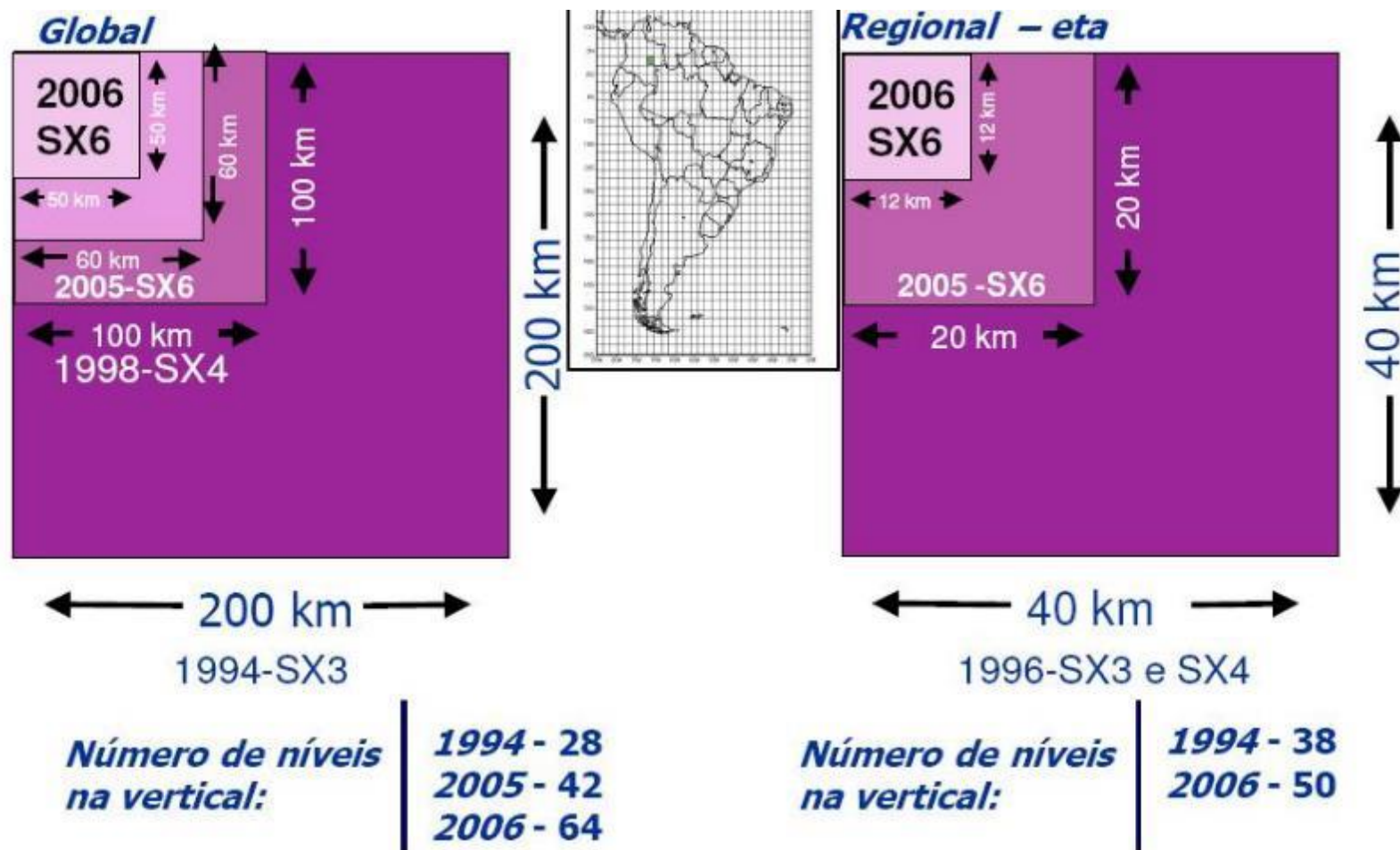
Tupã



NCEP Operational Forecast Skill

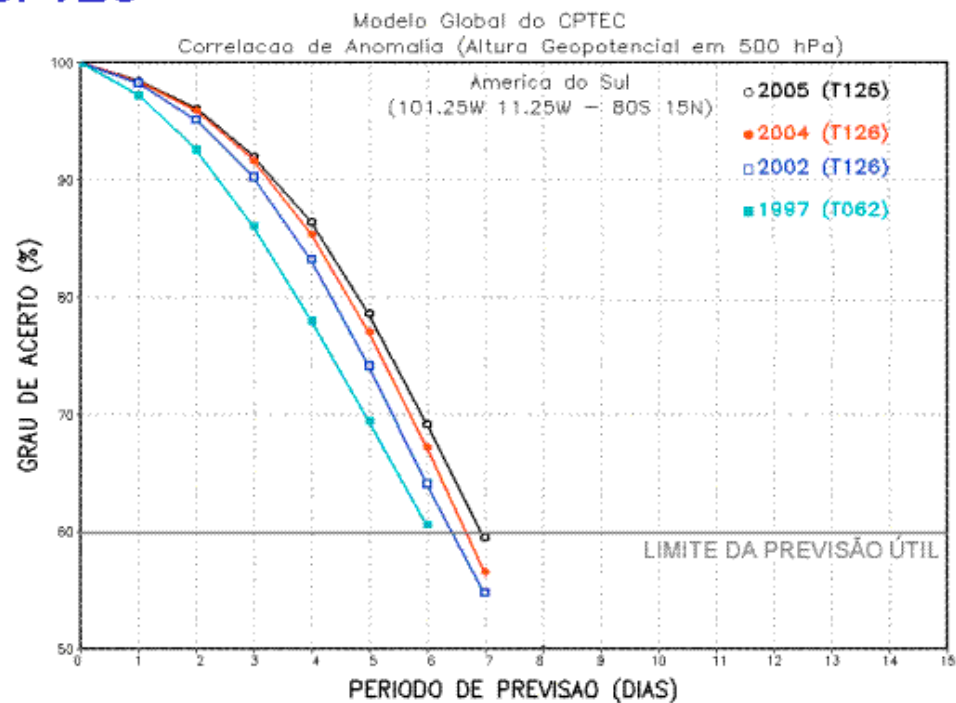
36 and 72 Hour Forecasts @ 500 MB over North America
[100 * (1-S1/70) Method]







Desempenho das previsões do Modelo Global do CPTEC



**O CPTEC apresenta índices de acerto comparáveis
aos maiores Centros de Previsão do Mundo**



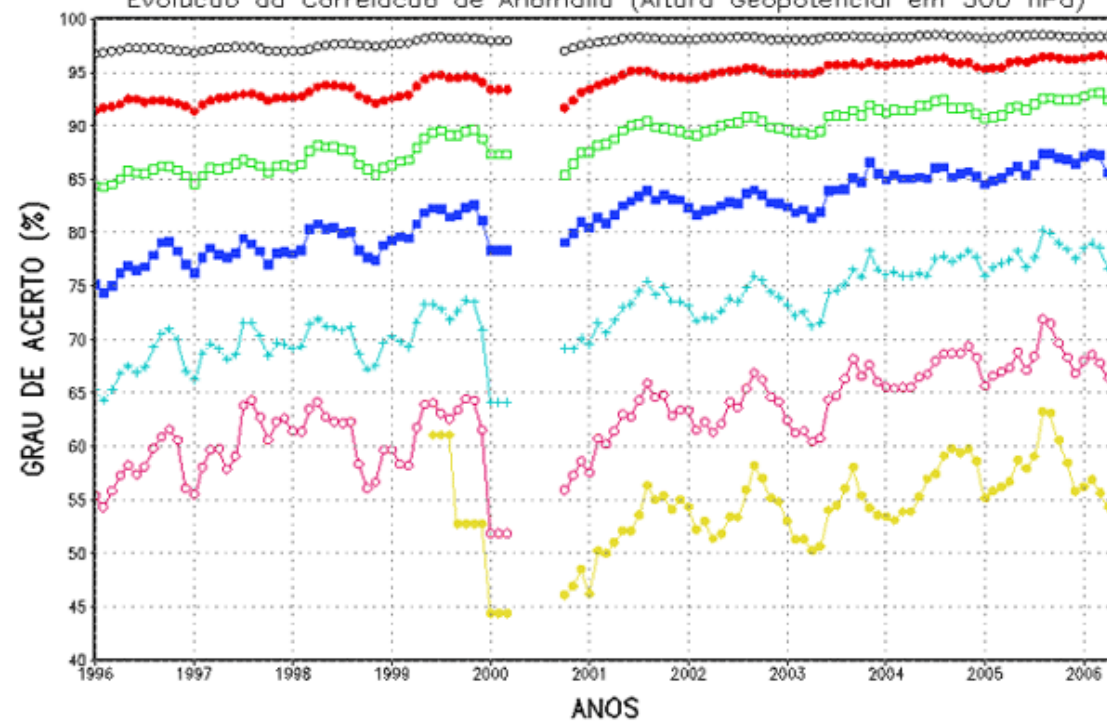
Ministério da Ciência e Tecnologia



Evolução do desempenho das previsões do Modelo Global do CPTEC

Modelo Global do CPTEC [T062 (2003) e T126 (2006)]

Evolução da Correlação de Anomalia (Altura Geopotencial em 500 hPa)



24horas 48horas 72horas 96horas 120horas 144horas 168horas



“... one flap of a sea-gull’s wing may forever change the future course of the weather”

(Lorenz, 1963)

Qual é a relação entre Henri Poincaré e a teoria do caos?