



XIJEELB  
Universidade Federal de Uberlândia  
Abril de 2010

# “Mapas Eólicos no Brasil”

*Fernando Ramos Martins*



*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Centro de Ciências do Sistema Terrestre  
Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos*

fernando.martins@cptec.inpe.br

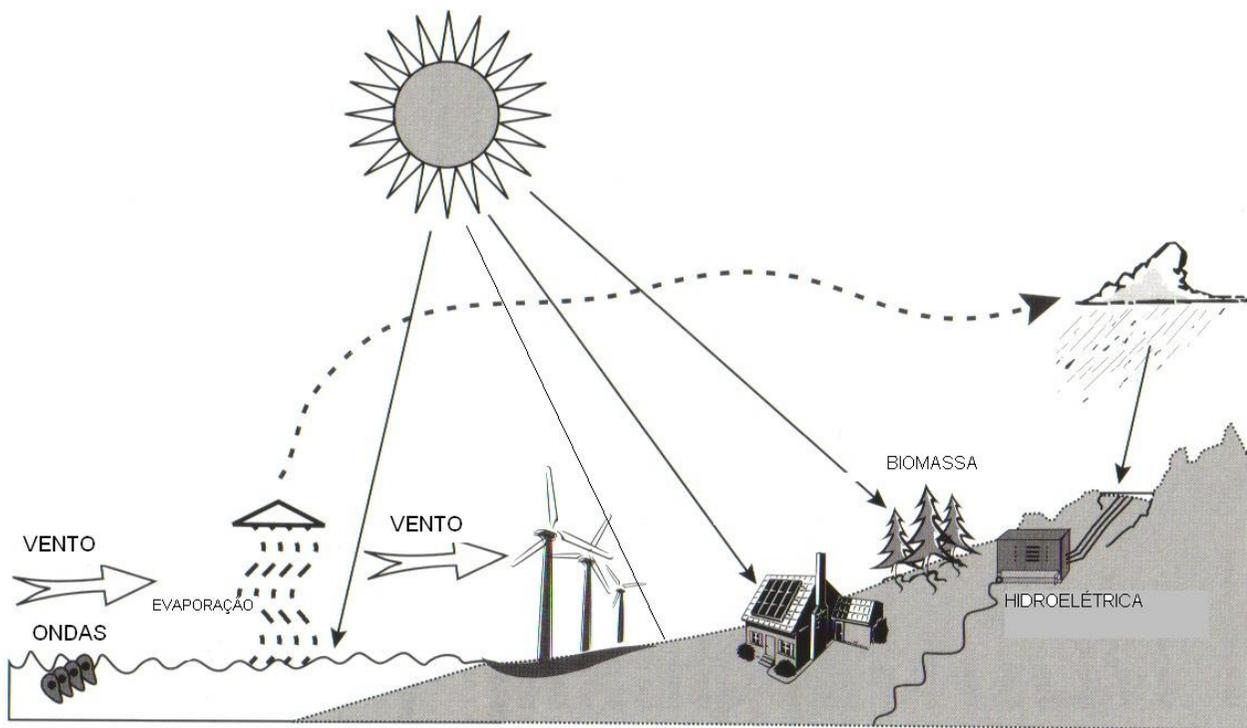


# *Tópicos*

- ❖ Meteorologia e vento
- ❖ Metodologias de mapeamento eólico
- ❖ Resultados do Mapeamento Eólico no Brasil
- ❖ Aquisição e Tratamento de Dados de campo
- ❖ Pesquisas em desenvolvimento
- ❖ Situação atual da Energia Eólica no Brasil

# *O que é a energia eólica e de onde ela vem?*

- ✧ É a conversão da energia cinética contida no vento
- ✧ Assim como a maioria das fontes renováveis de energia, a energia eólica provem do Sol

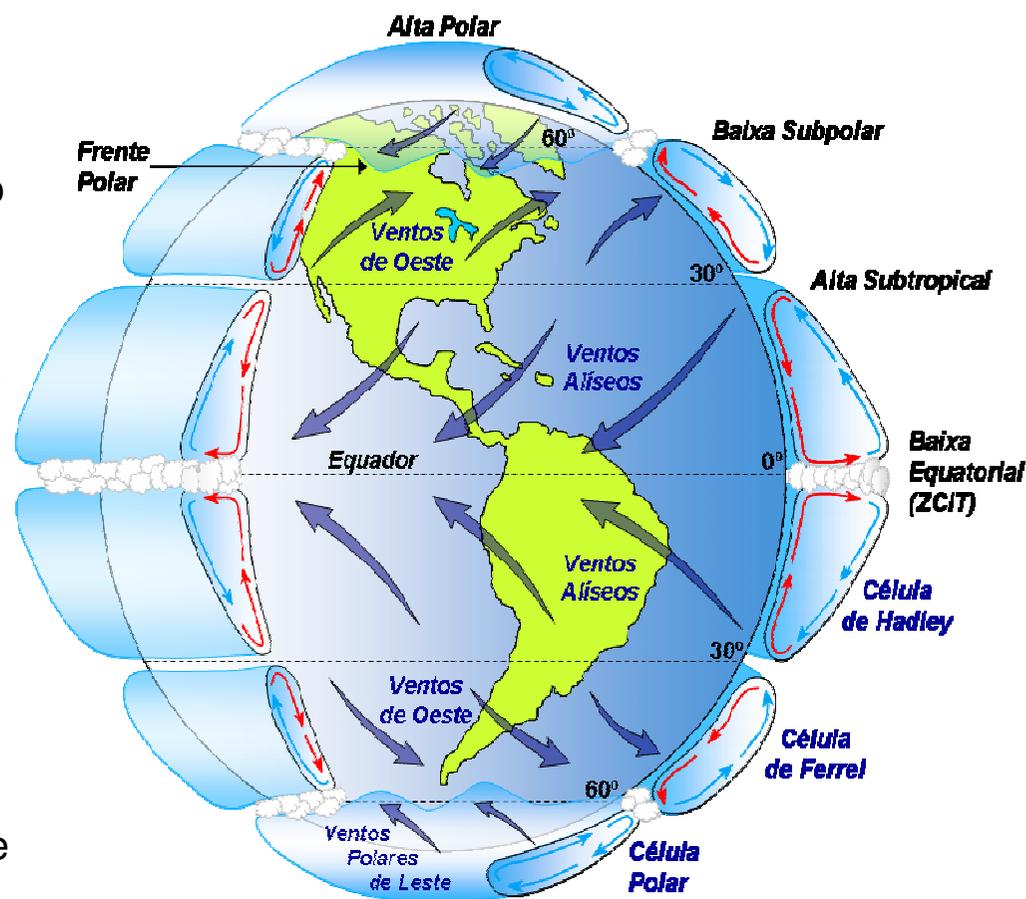


## **Fatores de Influência:**

- Rotação da Terra
- Relevo
- Obstáculos

# O que é vento e de onde ele vem?

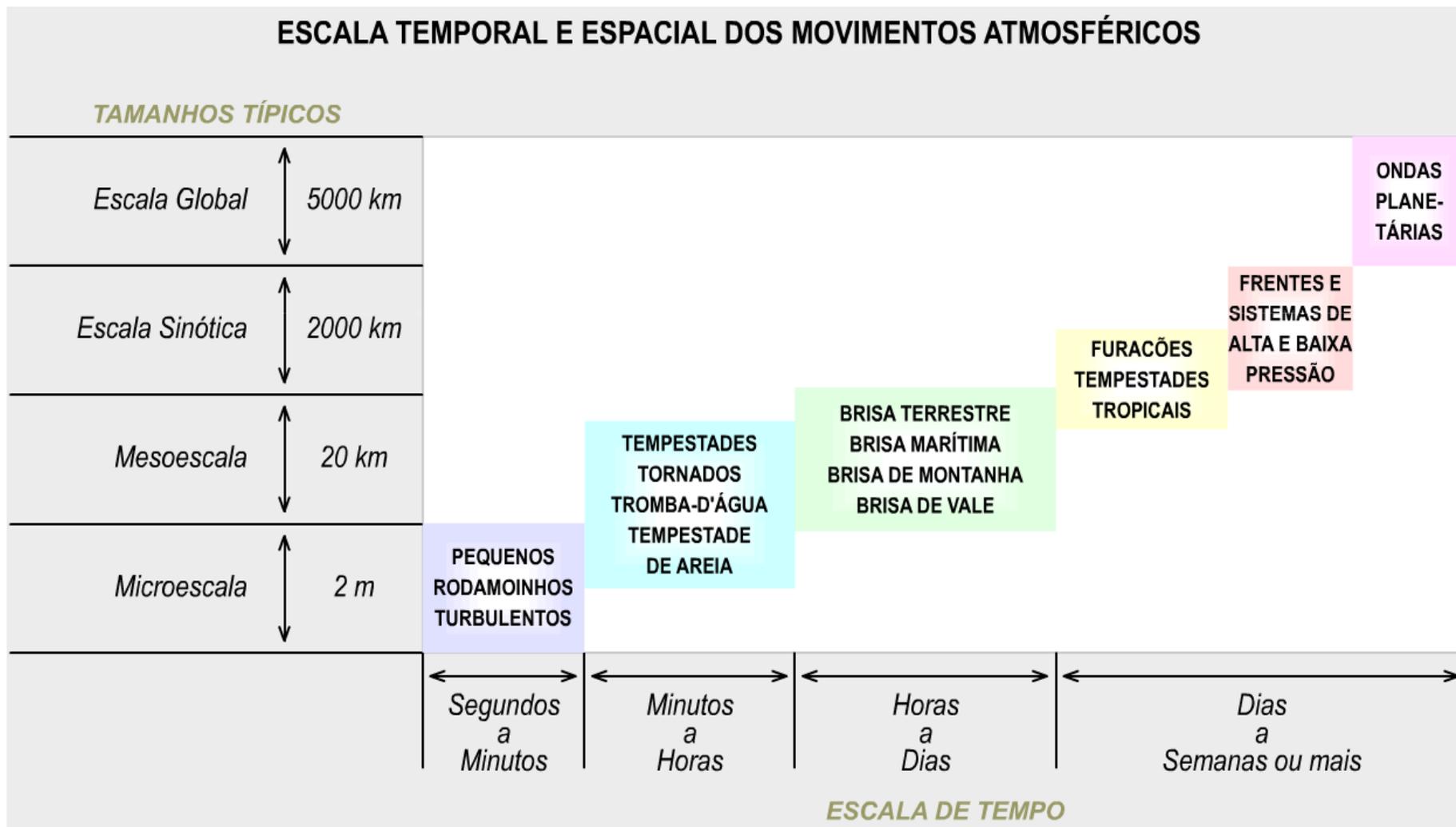
- ❖ As regiões próximas ao Equador estão sujeitas a uma irradiação solar maior do que as regiões próximas aos pólos.
- ❖ O equilíbrio térmico do planeta é mantido pela transferência contínua de energia das regiões equatoriais aos pólos.
- ❖ Cada tipo de superfície (terra ou oceano) e de cobertura vegetal (floresta ou deserto) reage de forma diferente à absorção/reflexão da radiação solar.
- ❖ O vento surge principalmente pela ação da força do gradiente de pressão.
- ❖ O efeito conjugado do aquecimento diferencial da Terra, somado ao aquecimento diferencial das superfícies e a rotação da Terra (força de Coriolis), geram os regimes-padrão de vento.





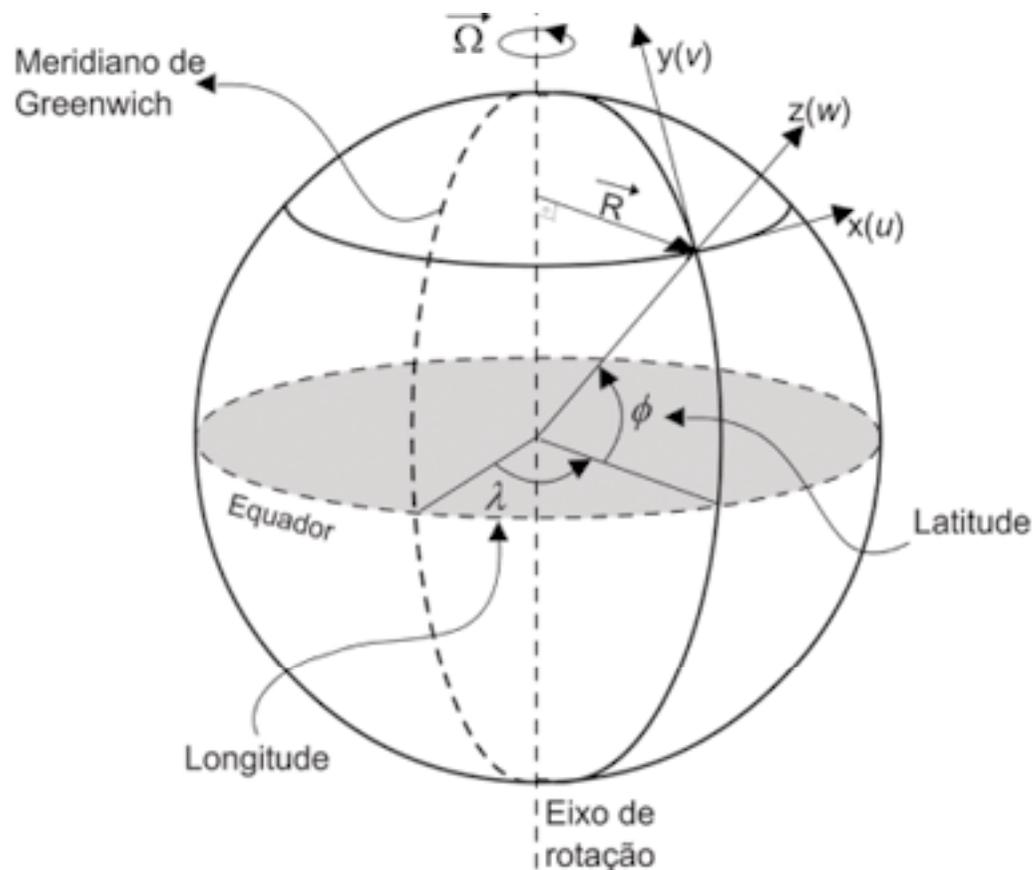
# Modelagem do vento

## modelos de escala reduzida (mesoescala)





# Como estimar o vento?



Matematicamente:

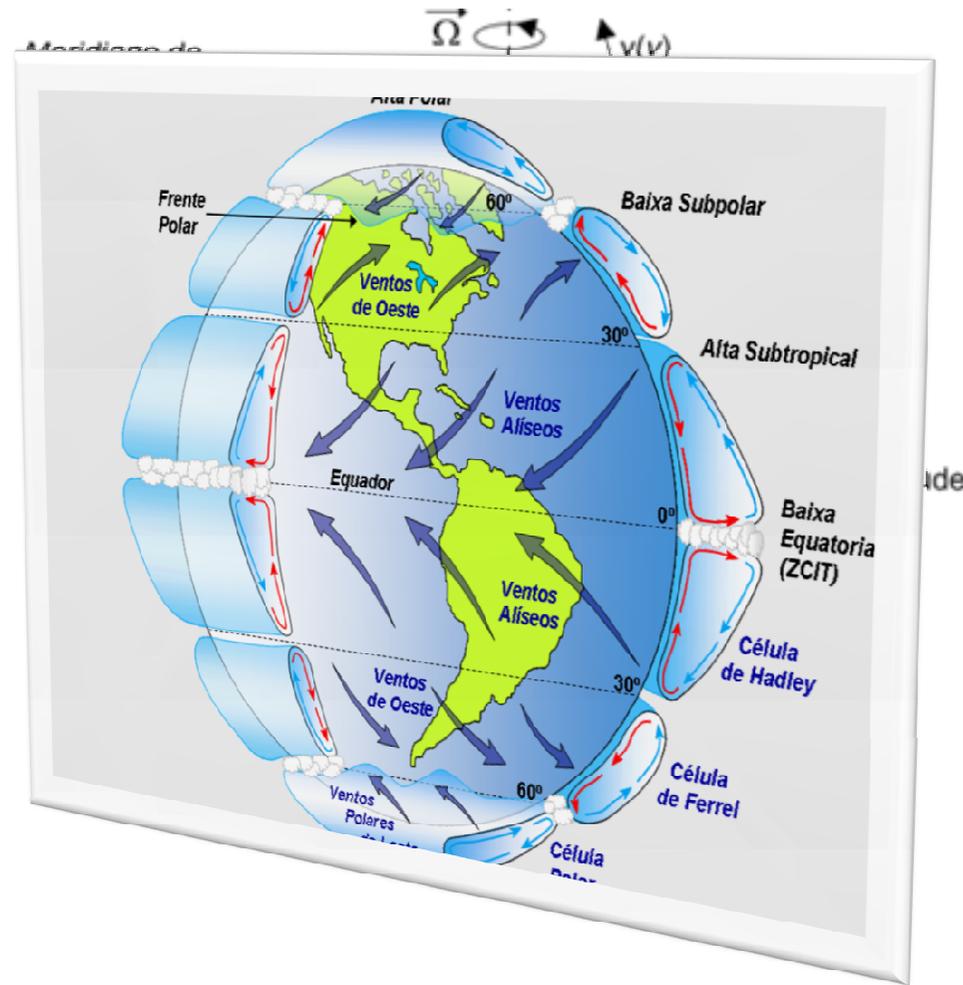
$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{U} + \Omega^2 \vec{R} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{g}^* + \vec{F}_r$$

# Como estimar o vento?

Matematicamente:

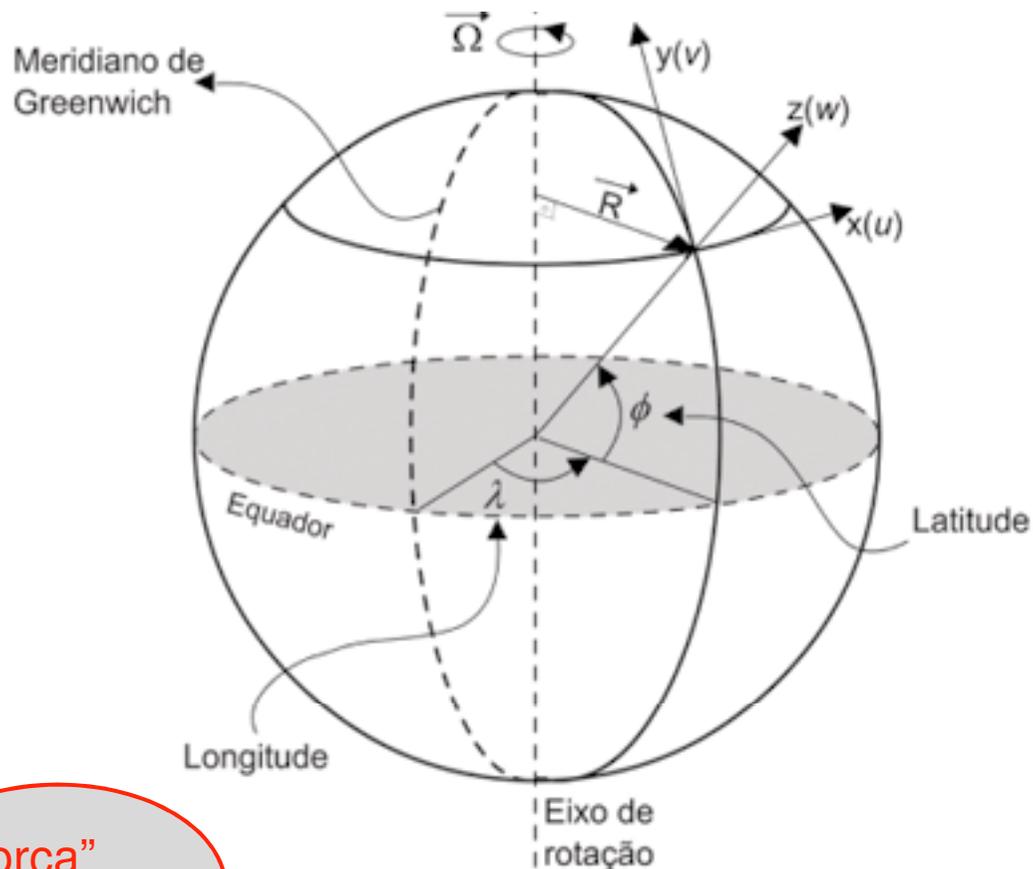
$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{U} + \Omega^2 \vec{R} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{g}^* + \vec{F}_r$$

efeito de Coriolis





# Como estimar o vento?



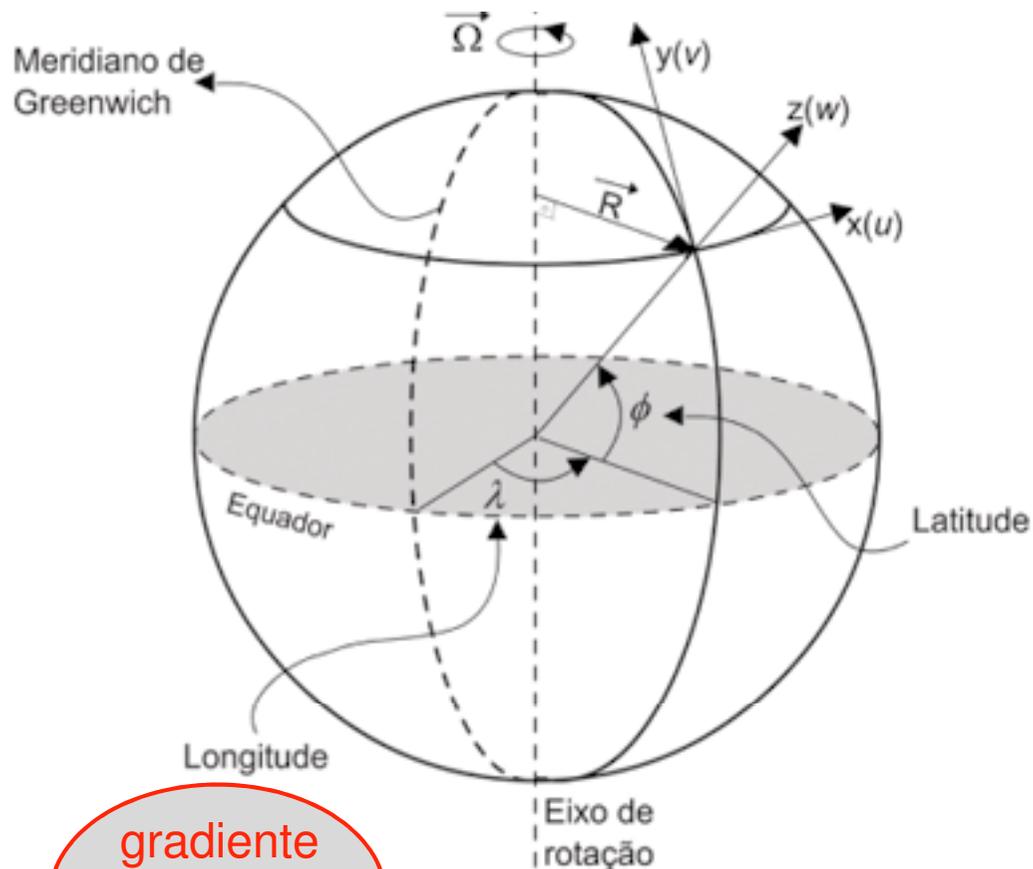
Matematicamente:

“força”  
centrifuga

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{U} + \Omega^2 \vec{R} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{g}^* + \vec{F}_r$$



# Como estimar o vento?

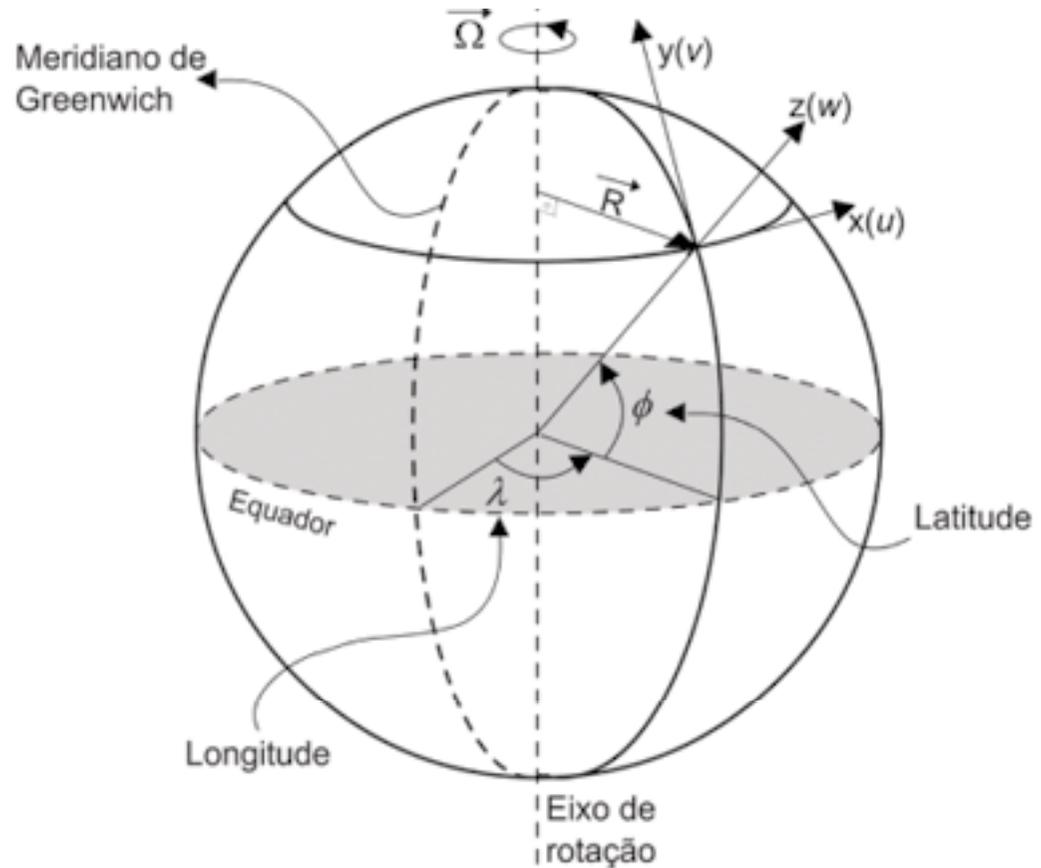


gradiente de pressão

Matematicamente:

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{U} + \Omega^2 \vec{R} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{g}^* + \vec{F}_r$$

# Como estimar o vento?



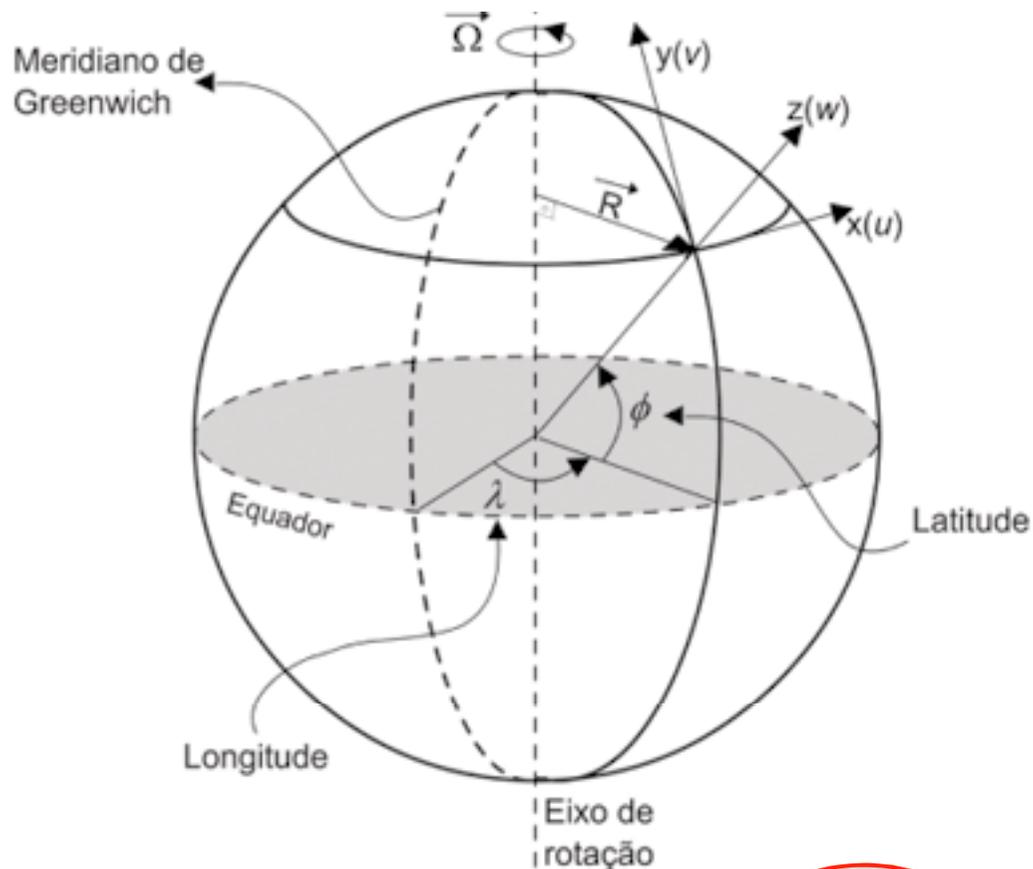
Matematicamente:

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{U} + \Omega^2 \vec{R} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{g}^* + \vec{F}_r$$

gravidade



# Como estimar o vento?



Matematicamente:

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{U} + \Omega^2 \vec{R} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{g}^* + \vec{F}_r$$

atritos



# Como estimar o vento?

Duas outras equações descrevem as parcelas de ar na atmosfera

A equação da conservação da energia:

calor específico

$$c_v \frac{DT}{Dt} + p \frac{D\alpha}{Dt} = J$$

A equação da conservação da massa:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{U}$$



# Como estimar o vento?

Duas outras equações descrevem as parcelas de ar na atmosfera

A equação da conservação da energia:

$$c_v \frac{DT}{Dt} + p \frac{D\alpha}{Dt} = J$$

A red speech bubble points to the  $T$  in the first term, containing the word "temperatura".

A equação da conservação da massa:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{U}$$



# Como estimar o vento?

Duas outras equações descrevem as parcelas de ar na atmosfera

A equação da conservação da energia:

$$c_v \frac{DT}{Dt} + p \frac{D\alpha}{Dt} = J$$

vol. espec.  
do ar

A equação da conservação da massa:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{U}$$



# Como estimar o vento?

Duas outras equações descrevem as parcelas de ar na atmosfera

A equação da conservação da energia:

$$c_v \frac{DT}{Dt} + p \frac{D\alpha}{Dt} = J$$

taxa de aquecimento por unidade de massa  
radiação, condução, liberação de calor latente

A equação da conservação da massa:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{U}$$



# Como estimar o vento?

Duas outras equações descrevem as parcelas de ar na atmosfera

A equação da conservação da energia:

$$c_v \frac{DT}{Dt} + p \frac{D\alpha}{Dt} = J$$

A equação da conservação da massa:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{U}$$

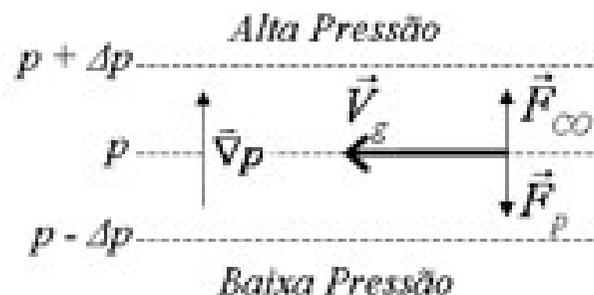
densidade  
do ar



# Aproximação geostrófica

Em altos níveis, quando as forças de atrito são nulas, o vento resultante depende apenas do equilíbrio entre a força de Coriolis e o Gradiente de Pressão. Quando as isóbaras não são paralelas e/ou quando as forças de atrito não são desprezíveis, o vento é conhecido como vento gradiente

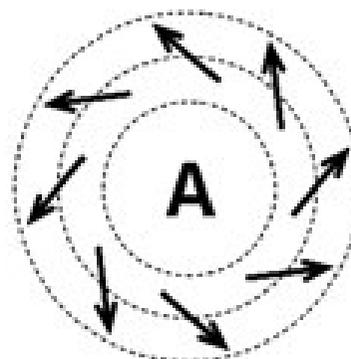
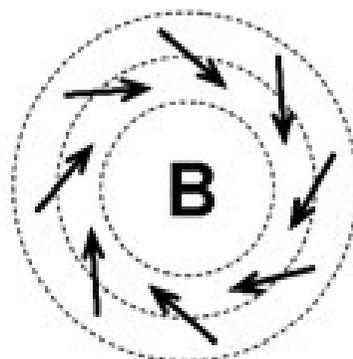
(a) Hemisfério Norte



(b) Hemisfério Sul



vento geostrófico  
(altos níveis)



vento gradiente  
(próximo à superfície)

## Representação da “camada limite planetária”

Comprimento de rugosidade

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \psi(z) \right]$$

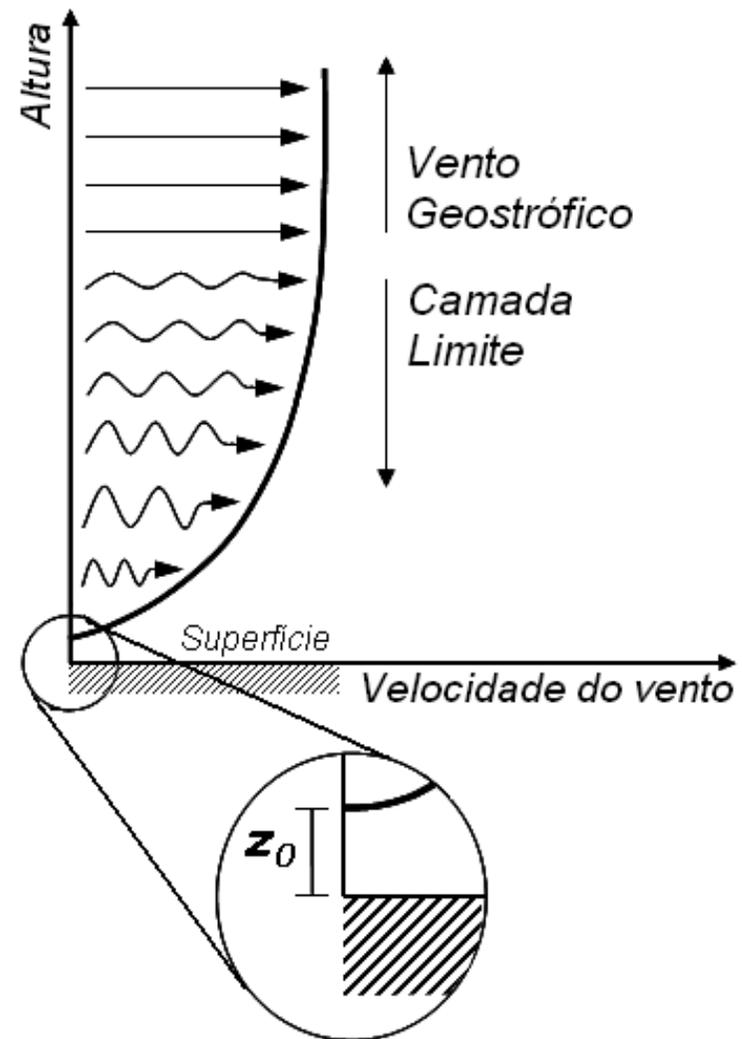
$u(z)$  velocidade do vento

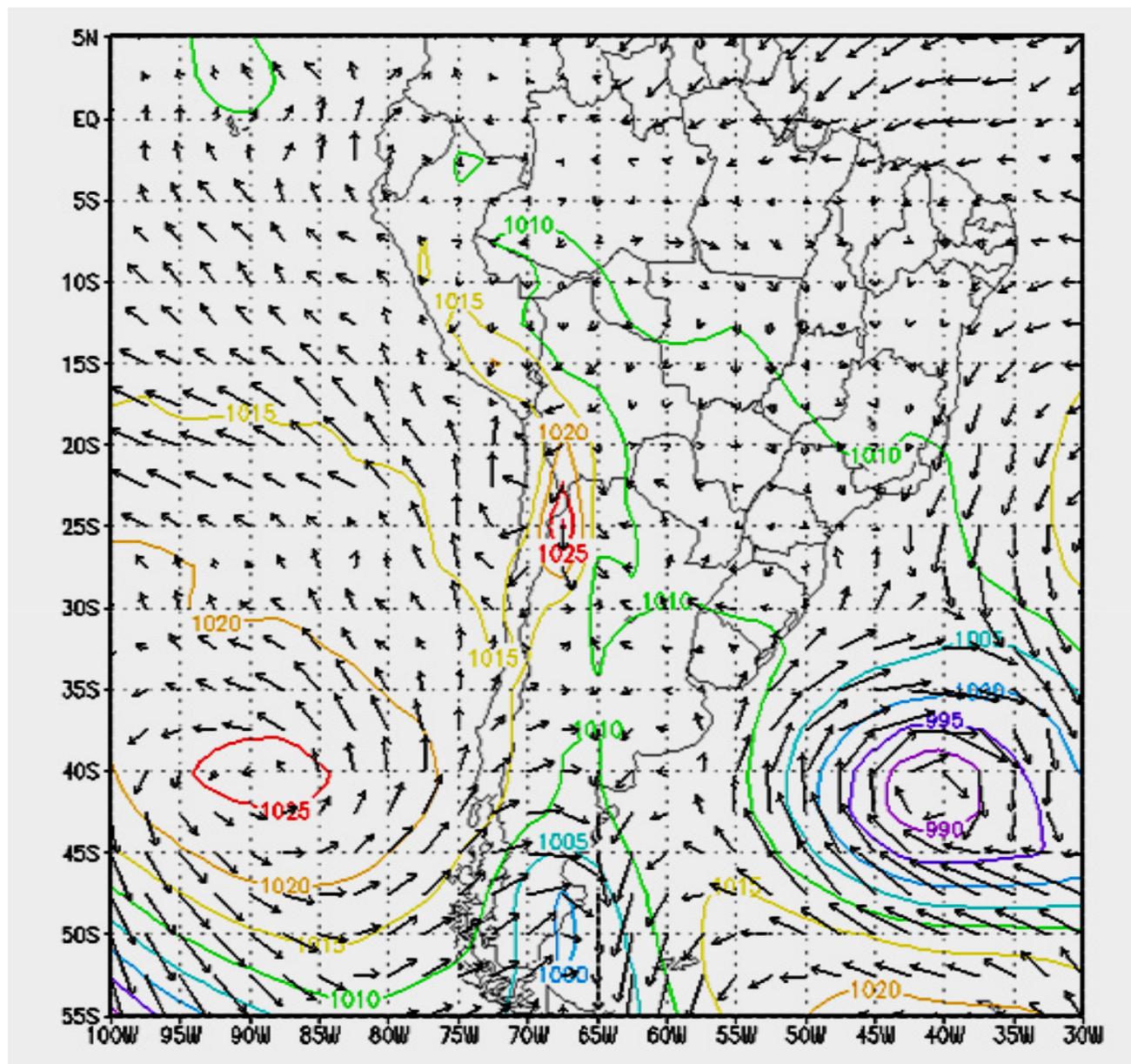
$u_{ref}$  velocidade do vento medida pelo anemômetro na altura  $z_{ref}$

$z_0$  comprimento de rugosidade

$k$  constante de von Karmán ( $\approx 0,4$ )

$\psi(z)$  função de correção p/ estabilidade térmica da camada limite





Representação gráfica dos ventos (vetores) e dos níveis de pressão (isóbaras), próximo ao nível do mar

# Potência extraída do vento

A potência  $P_d$  disponível no vento, pelo fluxo de uma massa de ar fluindo perpendicularmente através de uma área  $A$  e com velocidade  $u$  é dada por:

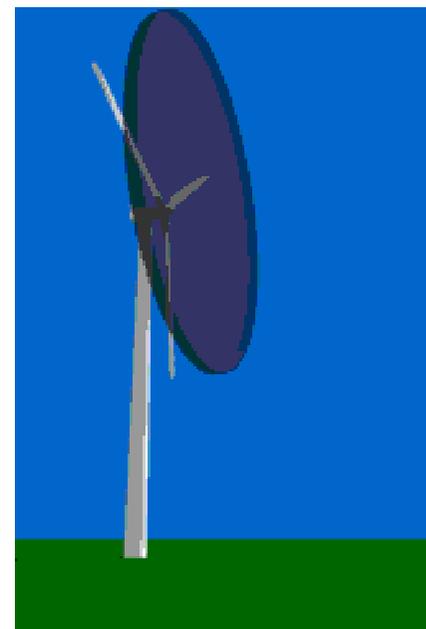
$$P_d = \frac{1}{2} \rho A u^3$$

$$\rho(z) = \frac{p_0}{RT} e^{-\frac{gz}{RT}}$$

$\rho(z)$  densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)  
 $p_0$  pressão nível do mar (kg/m<sup>3</sup>)  
 $T$  temperatura do ar (K)  
 $g$  constante gravitacional (m/s<sup>2</sup>)  
 $R$  constante específica do ar (em J/K mol)

$$P_u = C_{\text{betz}} P_d$$

Potência útil





## *Densidade de potência eólica*

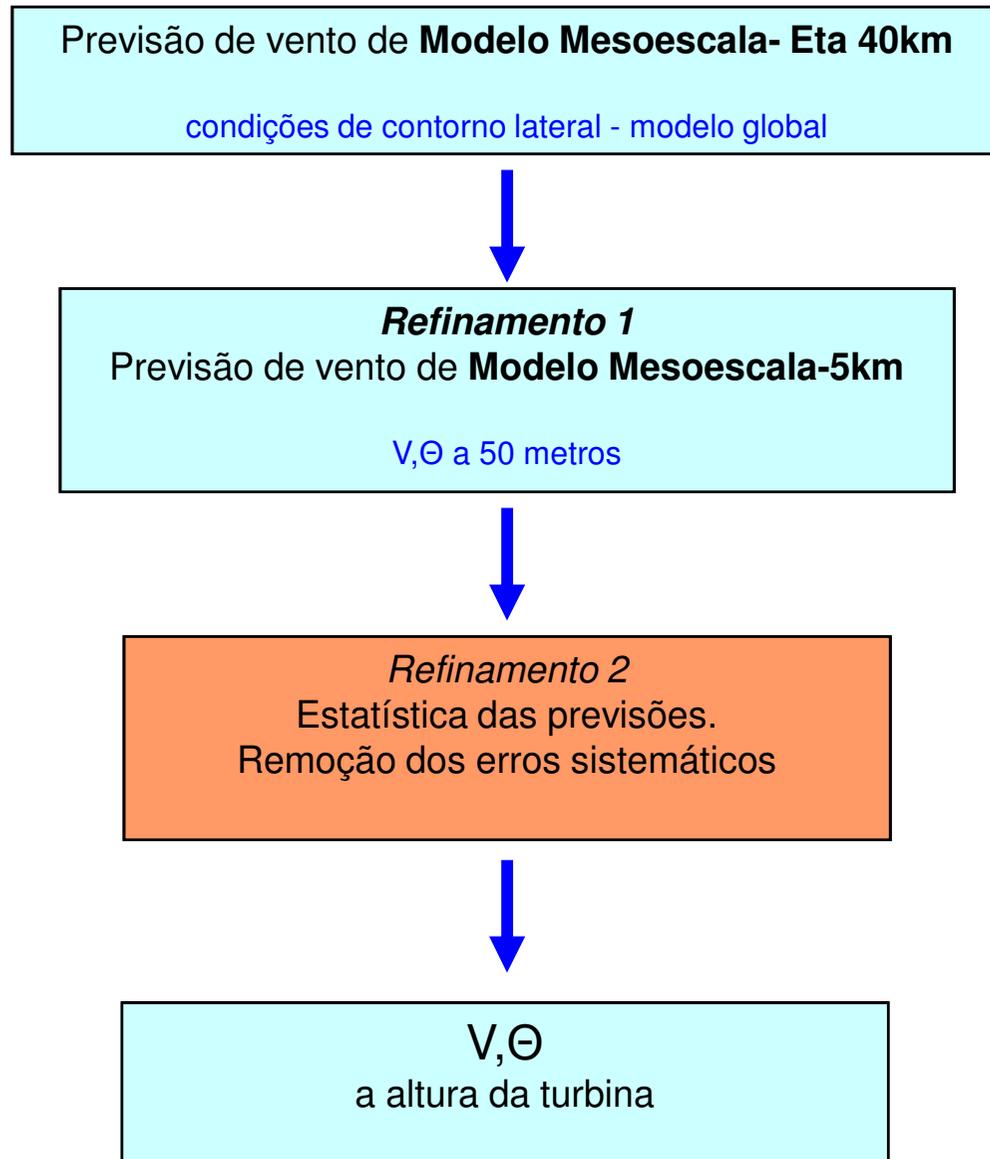
- ✧ A densidade de potência ( $DP$ ) representa a relação entre a potência eólica disponível ( $P$ ) no vento e a área da seção transversal ( $A$ ), é dada por:

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho u^3$$

- ✧ Como exemplo:
  - ✧ na Alemanha: os valores de  $DP$  oscilam entre 144,1 e 208,9 W/m<sup>2</sup>;
  - ✧ no Brasil: varia entre 200 e 800 W/m<sup>2</sup>.



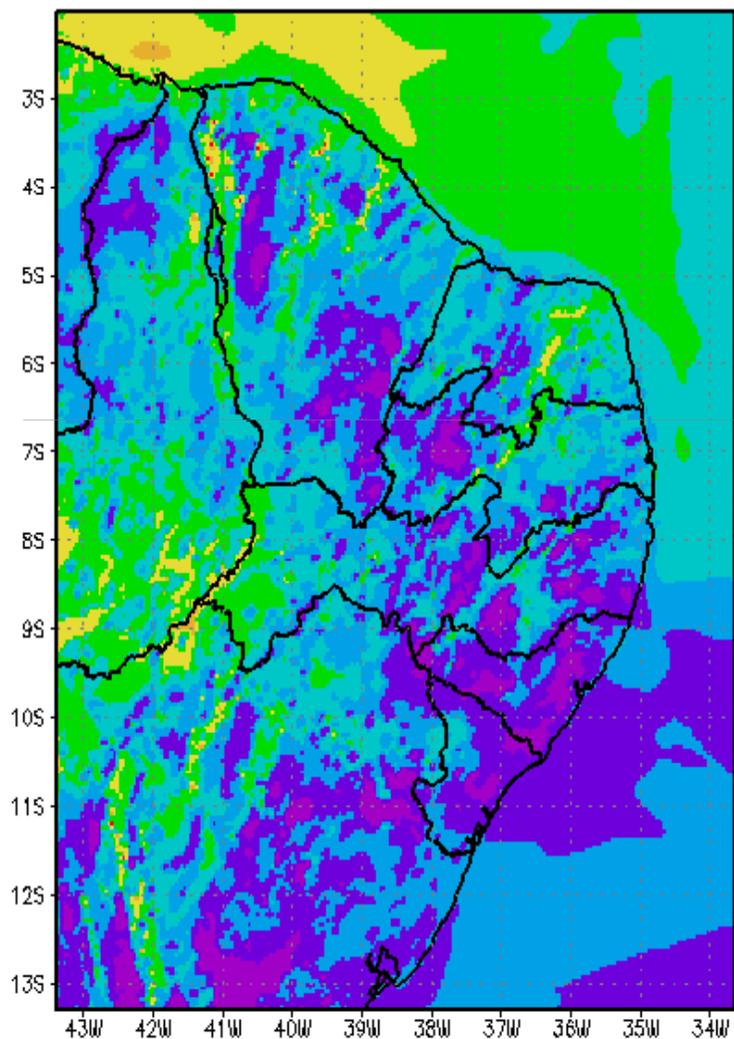
## *Mapeamento do vento ao nível da turbina*





# Previsão Numérica de Vento

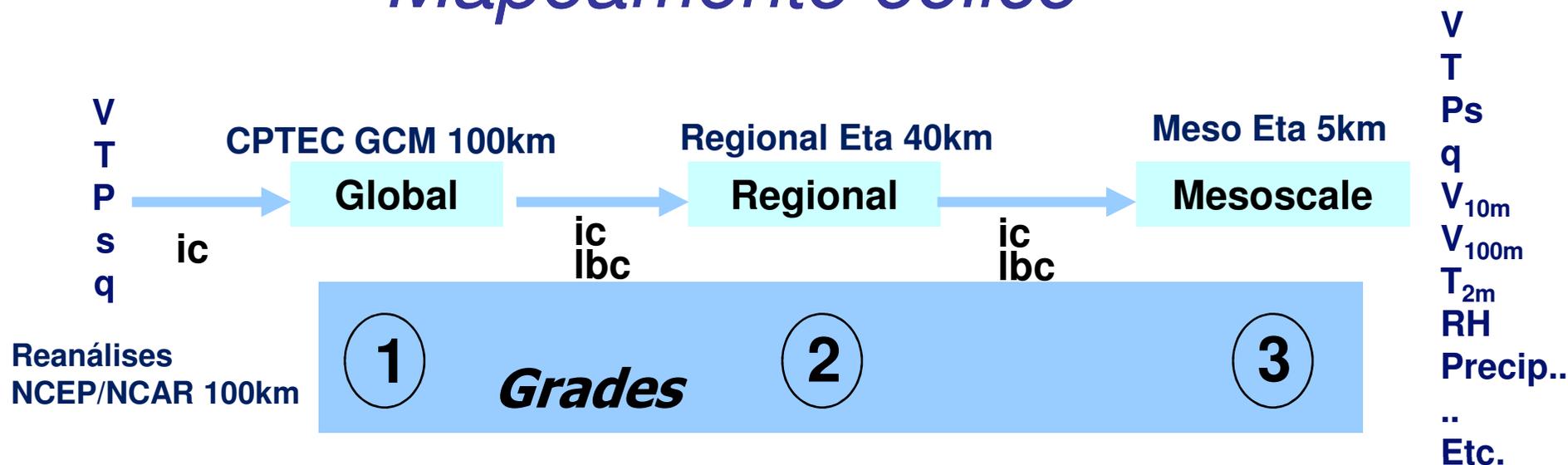
## Modelo Atmosférico Eta



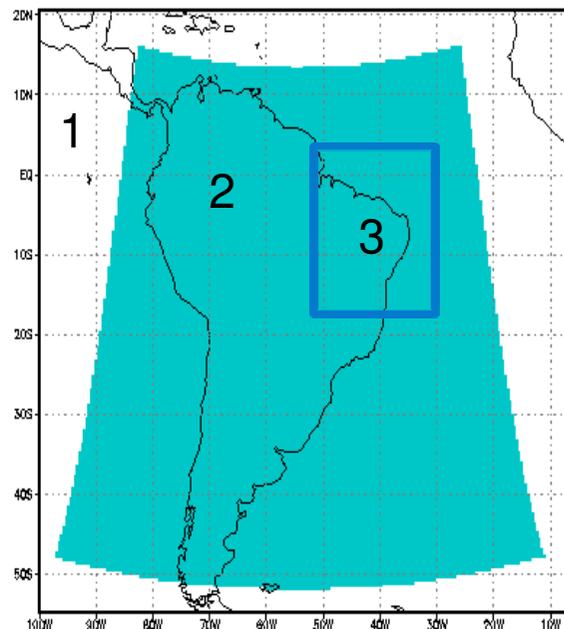
- **Domínio:** Nordeste do Brasil
  - **Resolução:** 5 km, 38 camadas,  $\Delta t=12s$
  - Modelo em pontos de grade (**Grade E**)
  - Coordenada vertical: **Eta**
  - **Topo:** 50 hPa
  - Prazo de previsão: **72** horas, as 00Z.
  - Variáveis prognósticas: **T, q, u, v, Ps, TKE, hidrometeoros da nuvem**
  - **Esquema de Integração:** 2 níveis, explícito (split-explicit)
  - **Condições iniciais:** NCEP GCM T126L28
  - **Condições de contorno:**
    - lateral:* Eta-CPTEC, 40km;
    - inferior:* TSM observada;
- Umidade do solo prevista de 12h pelo GCM ou climatológica, albedo sazonal.



# Mapeamento eólico

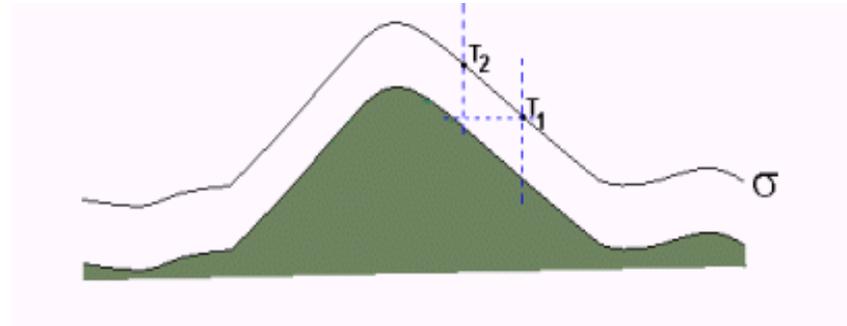


Eta aninhado: grades (2) – (3)  
 Roda para dois horários do dia:  
 0000 and 1200 UTC



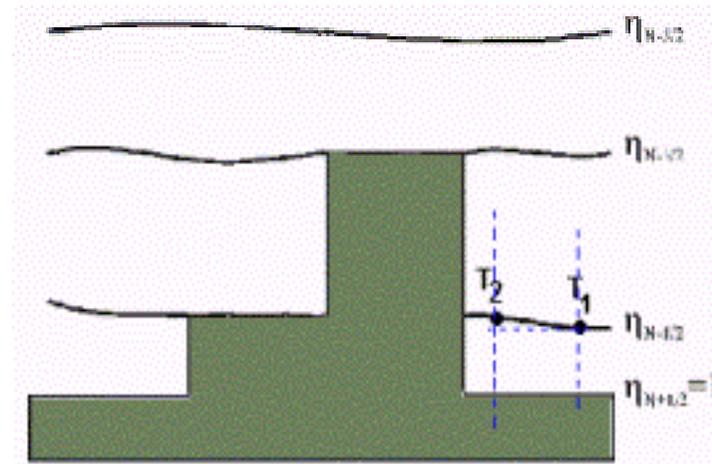
## Coordenadas dos modelos

**sigma**  $\sigma = \left( \frac{P - P_T}{P_S - P_T} \right)$



**eta**  $\eta = \left( \frac{P - P_T}{P_S - P_T} \right) * \eta_s$

$$\eta_s = \frac{P_{ref}(z_S) - P_T}{P_{ref}(0) - P_T}$$



Eta quasi horizontal  
coordinate

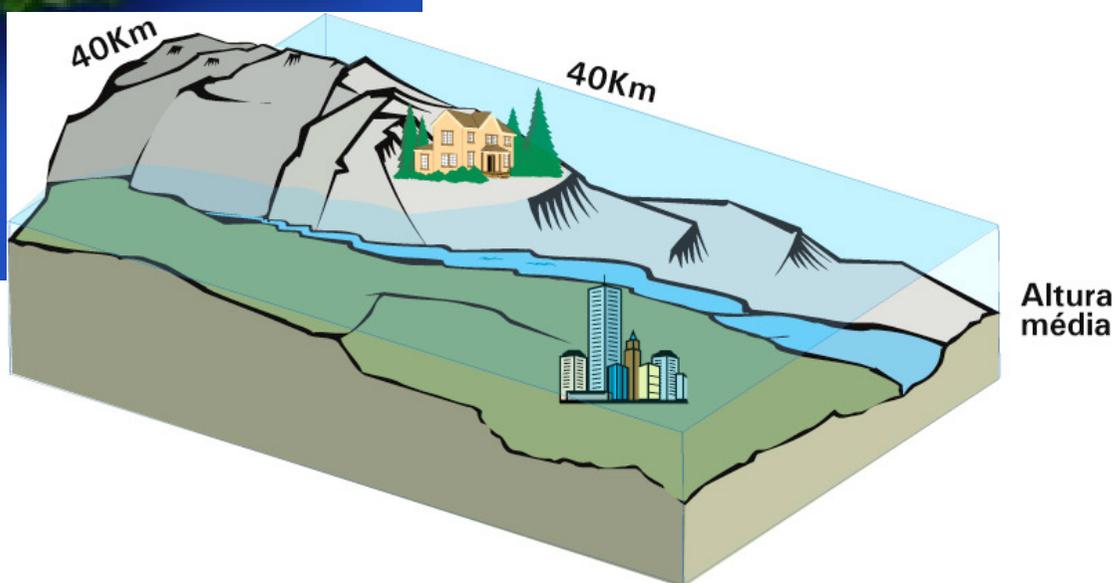


- Redução dos erros nos cálculos das derivadas horizontais
- Adequado a regiões de forte topografia

## *Porque é necessário refinar as previsões geradas pelo Modelo Eta?*



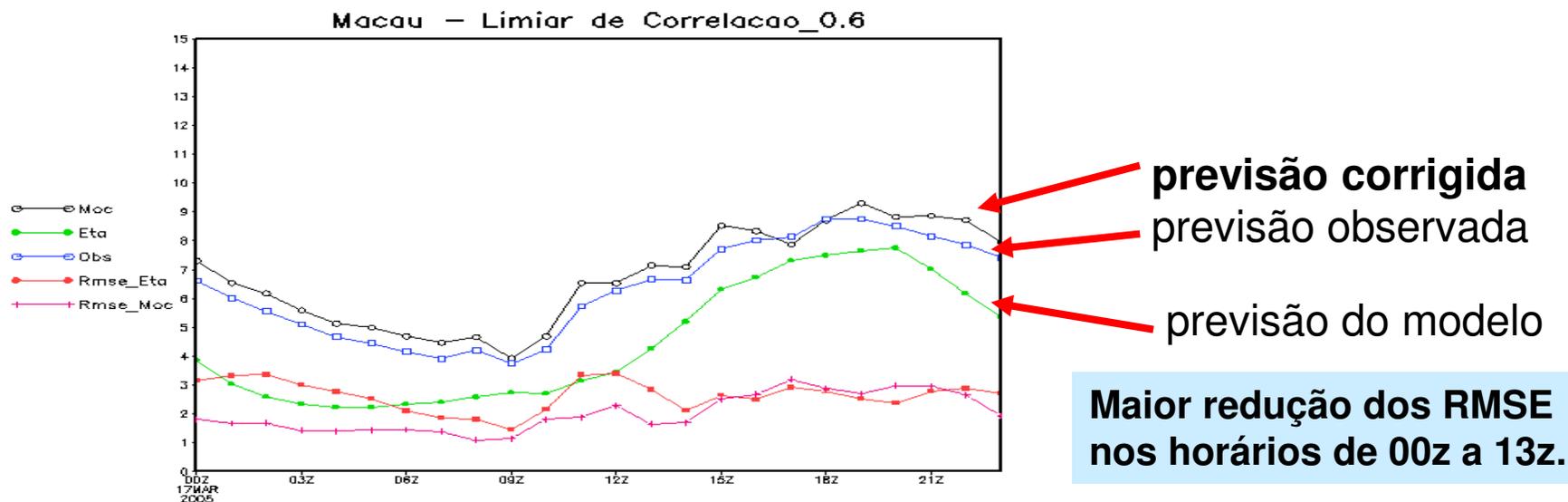
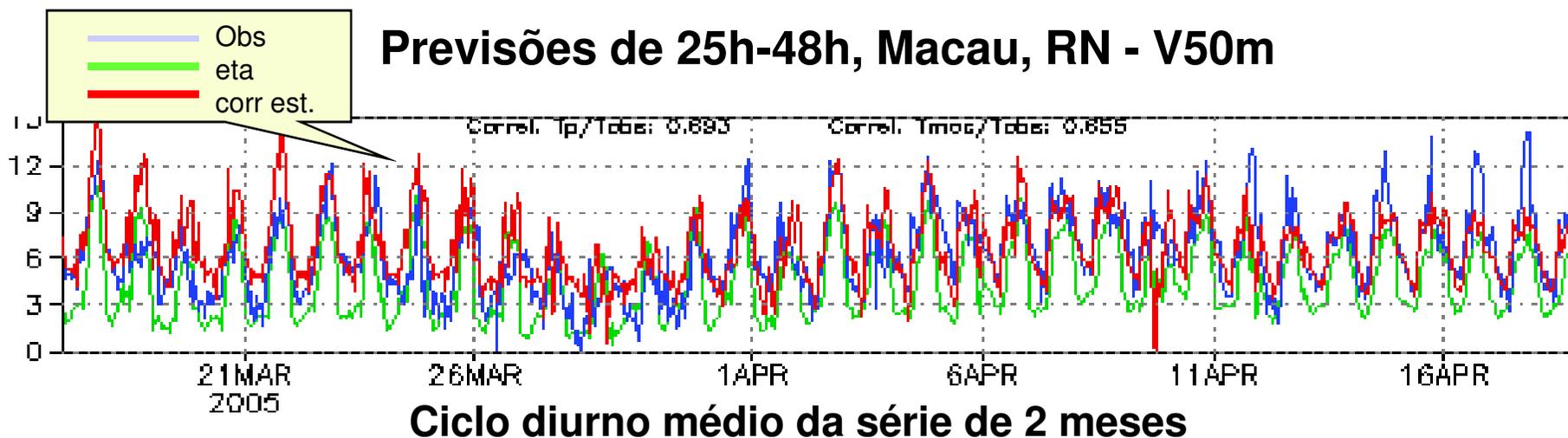
Por ex., 2 cidades de altitudes bastante diferentes mas localizadas na mesma caixa de grade do modelo. O modelo fornece um único valor de previsão para a caixa.





# Previsão do Modelo Eta e Correção estatística das previsões

São testados diferentes parâmetros para obter melhor ajuste das curvas.





# *Aquisição de dados de campo*



# Parâmetros Medidos e Procedimentos básicos

## Measurement Parameters

Measured Parameters	Monitoring Heights
Wind Speed (m/s)	10 m, 25 m, 40 m
Wind Direction (degrees)	10 m, 25 m, 40 m
Temperature (°C)	3 m

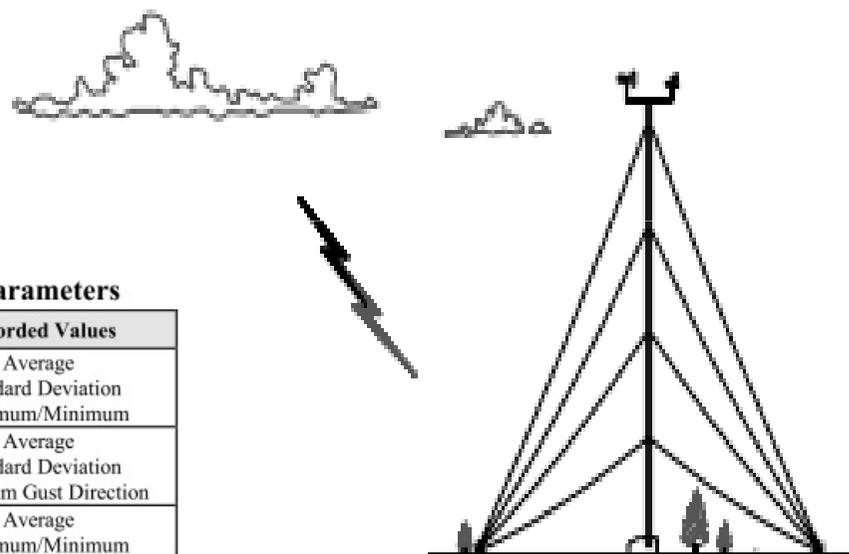
## Measurement Parameters

Measured Parameters	Monitoring Heights
Solar Radiation (W/m <sup>2</sup> )	3 - 4 m
Vertical Wind Speed (m/s)	38 m
Delta Temperature (°C)	38 m 3 m
Barometric Pressure (kPa)	2 - 3 m

## Basic and Optional Parameters

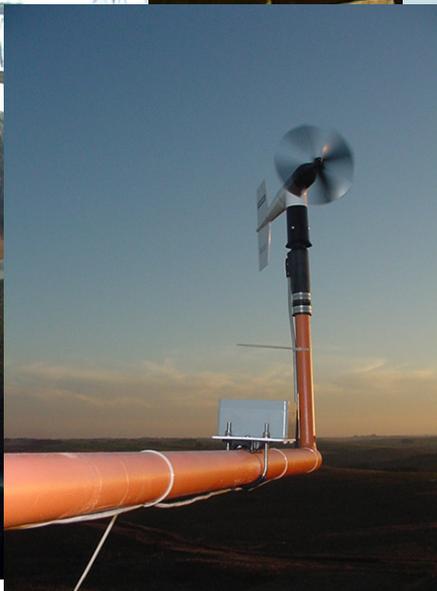
Measured Parameters	Recorded Values
Wind Speed (m/s)	Average Standard Deviation Maximum/Minimum
Wind Direction (degrees)	Average Standard Deviation Maximum Gust Direction
Temperature (°C)	Average Maximum/Minimum
Solar Radiation (W/m <sup>2</sup> )	Average Maximum/Minimum
Vertical Wind Speed (m/s)	Average Standard Deviation
Barometric Pressure (hPa)	Average Maximum/Minimum
Delta Temperature (°C)	Average Maximum/Minimum

\* Shaded parameters are optional





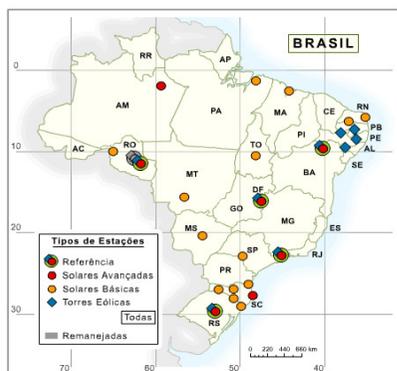
# SONDA





**SONDA** - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais - é um projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para implementação de uma infra-estrutura física e de recursos humanos destinada a levantar e melhorar a base de dados dos recursos de energia solar e eólica no Brasil.

Navegue pelo mapa e clique nas estações para detalhes ou escolha pelo MENU.



## POR QUE?

- Os recursos solares e eólicos são primariamente controlados pelo clima. Dados climáticos e ambientais qualificados são, portanto, necessários ao desenvolvimento de modelos de levantamento dos recursos de energia solar e eólica.
- A definição das incertezas da variabilidade climática sobre os recursos de energia solar e eólica é necessária para obtenção de dados confiáveis.
- Modelos importados foram criados e validados em regiões climáticas diferentes do Brasil e sempre necessitam ajustes e validações com verdade terrestre.
- O direcionamento das pesquisas e produtos nas áreas de recursos solares e eólicos atende às necessidades do setor de energia.
- O investimento nas energias solar e eólica no Brasil é inibido pela escassez, baixa confiabilidade e falta de continuidade de dados.
- A inexistência de um sistema nacional de coleta e distribuição de dados dificulta o desenvolvimento do setor de energias renováveis.
- Investidores interessados em novos projetos necessitam de uma base sólida e acessível de informações ambientais e climáticas para que possam, através de ferramentas específicas, avaliar o retorno de seus investimentos.

### MÓDULO SONDA

Bancada de Sensores e Sistema de Aquisição de Dados



O módulo SONDA é composto de estrutura de suporte aos sensores instalada acima do container que abriga computador, nobreak, datalogger e equipamentos de comunicação responsáveis pelo gerenciamento dos dados coletados.

### ACESSO À BASE DE DADOS

#### NOTÍCIAS

**04/05/2006 - SÃO MARTINHO DA SERRA** - Os primeiros dados ambientais qualificados (2005) da estação de Referência de São Martinho da Serra estão disponíveis na Base de Dados.

**FLORIANÓPOLIS** - Dados ambientais de 2005 da estação de Florianópolis também estão disponíveis.

**03/04/2006 - SÃO MARTINHO DA SERRA** - Os primeiros dados eólicos qualificados da estação de Referência de São Martinho da Serra foram disponibilizados. Acesse a Base de Dados.

**23/03/2006 - PETROLINA** - Os primeiros dados eólicos qualificados da estação de Referência de Petrolina foram disponibilizados na Base de Dados.

**21/03/2006 - BELO JARDIM** - Os primeiros dados eólicos qualificados da estação de Belo Jardim estão disponíveis para download na Base de Dados.

**17/03/2006 - TRIUNFO** - Os primeiros dados eólicos qualificados da estação de Triunfo estão disponíveis para download. Acesse a Base de Dados para obtê-los.

**08/03/2006 - FLORIANÓPOLIS** - Os primeiros dados ambientais da estação estão disponíveis para download. Acesse a Base de Dados para obtê-los.



<http://sonda.cptec.inpe.br/>



MENU



# SÃO MARTINHO DA SERRA BASE DE DADOS



Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

Quinta-feira, 25 de Maio de 2006.

Instantâneo Região

Index of /sonda/basedados/dados\_estacoes/SMS/2005

**DADOS DISPONÍVEIS A PARTIR DE AGORA**

**FORMATO CSV COMPACTADO**

■ *Como importar arquivos CSV (extensão .csv) em*

---

Padrões utilizados:

- (ponto) separador decimal
- (vírgula) separador de milhar
- (ponto-e-vírgula) separador de campos

casas decimais: no máximo 3

DOWNL

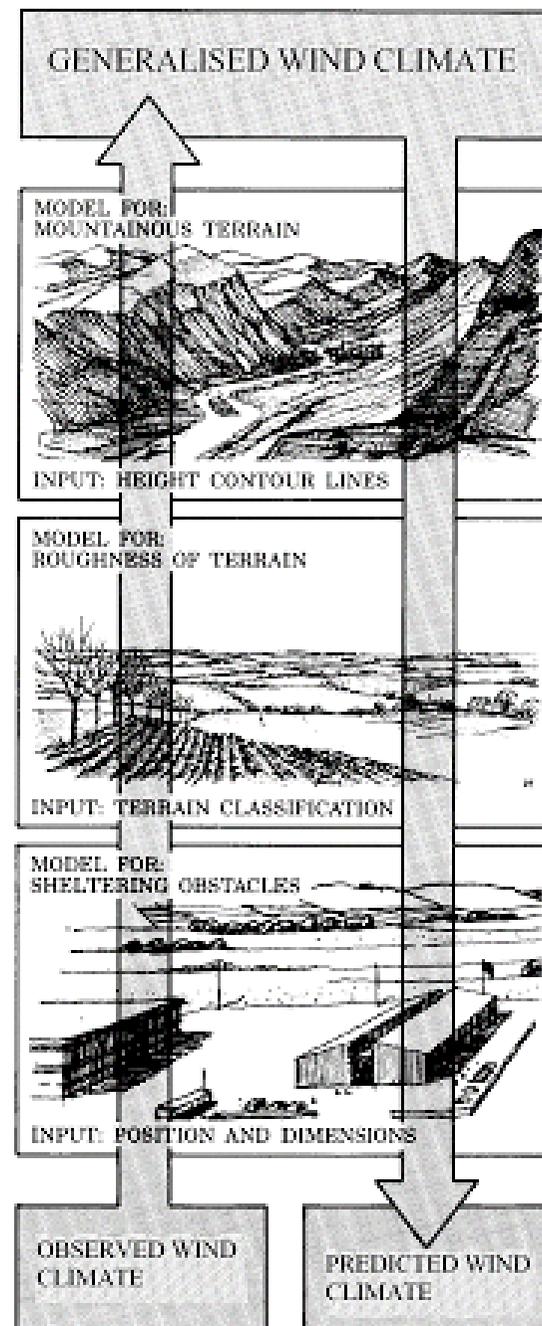
Name	Last modified	Size	Description
Parent Directory	22-Feb-2006 10:45	-	
SMS0501ED.csv.zip	04-May-2006 16:52	870k	
SMS0501ED_QQC.csv.zip	04-May-2006 16:52	230k	
SMS0501WD.csv.zip	03-Apr-2006 18:47	74k	
SMS0501WD_QQC.csv.zip	03-Apr-2006 18:47	15k	
SMS0502ED.csv.zip	04-May-2006 16:52	787k	
SMS0502ED_QQC.csv.zip	04-May-2006 16:52	210k	
SMS0502WD.csv.zip	03-Apr-2006 18:47	65k	
SMS0502WD_QQC.csv.zip	03-Apr-2006 18:47	13k	
SMS0503ED.csv.zip	05-May-2006 15:27	854k	
SMS0503ED_QQC.csv.zip	05-May-2006 15:27	233k	
SMS0503WD.csv.zip	03-Apr-2006 18:47	74k	
SMS0503WD_QQC.csv.zip	03-Apr-2006 18:47	15k	
SMS0504ED.csv.zip	05-May-2006 17:08	812k	
SMS0504ED_QQC.csv.zip	05-May-2006 17:08	230k	
SMS0504WD.csv.zip	03-Apr-2006 18:47	71k	
SMS0504WD_QQC.csv.zip	03-Apr-2006 18:47	14k	
SMS0505ED.csv.zip	09-May-2006 17:40	832k	
SMS0505ED_QQC.csv.zip	09-May-2006 17:40	237k	
SMS0505WD.csv.zip	03-Apr-2006 18:47	74k	



# WAsP

## *Wind Atlas Analysis and Application Program*

- ❖ O cerne desse modelo é a determinação da “climatologia do vento regional” para uma situação ideal, sem topografia, rugosidade uniforme, sem obstruções, a partir de dados de torres anemométricas (situações reais)
- ❖ A partir dessa climatologia, e com base nas condições reais da região de estudo, pode-se estimar a densidade de potência à altura da turbina em outros pontos ao redor da torre anemométrica, dentro dos limites do modelo
- ❖ Método aplicado na fase avançada de prospecção, após a aplicação dos modelos de mesoescala e determinação das áreas-alvo.

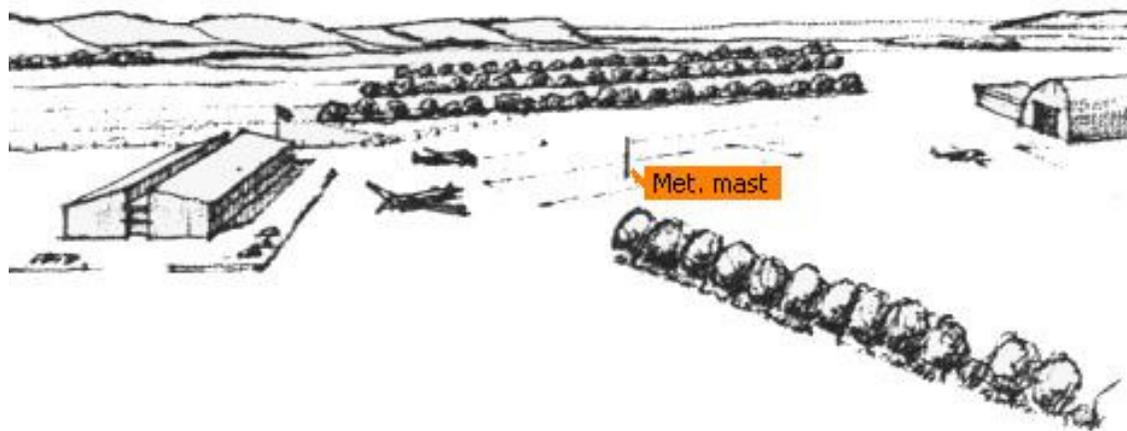


# PARÂMETROS DE ENTRADA DO WASP

## Relevo do terreno



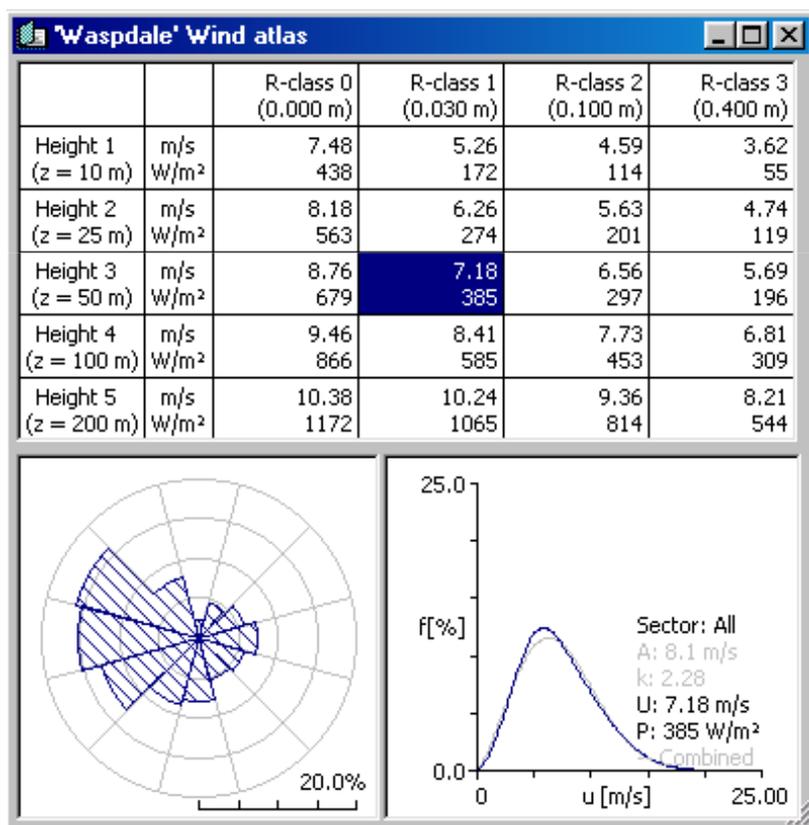
Topografia e Obstáculos  
(prédios, construções,  
obstáculos naturais)



Dados de velocidade e direção do vento  
obtidos por anemômetros

# Climatologia do vento

Análise de qualquer série temporal de medidas de vento para prover um resumo estatístico do clima de vento observado para um local específico



Extrapolar a velocidade do vento para cinco alturas: 10, 25, 50, 100, 200 metros;

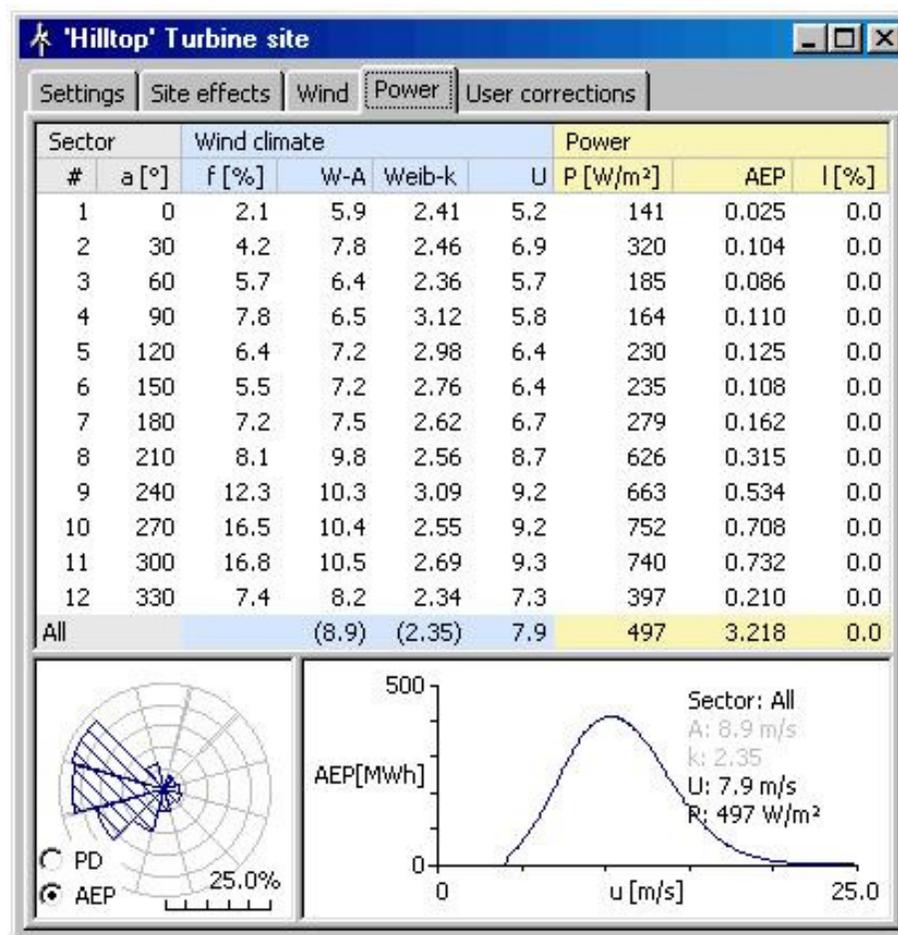
Determinar os parâmetros de distribuição de Weibull para o vento em cada altura;

Calcular a Potência do vento para cada altura;



## Produção da fazenda eólica

Calculo da energia gerada por setor, de acordo com o tipo de turbina e a climatologia dos ventos realizada pelo WAsP;





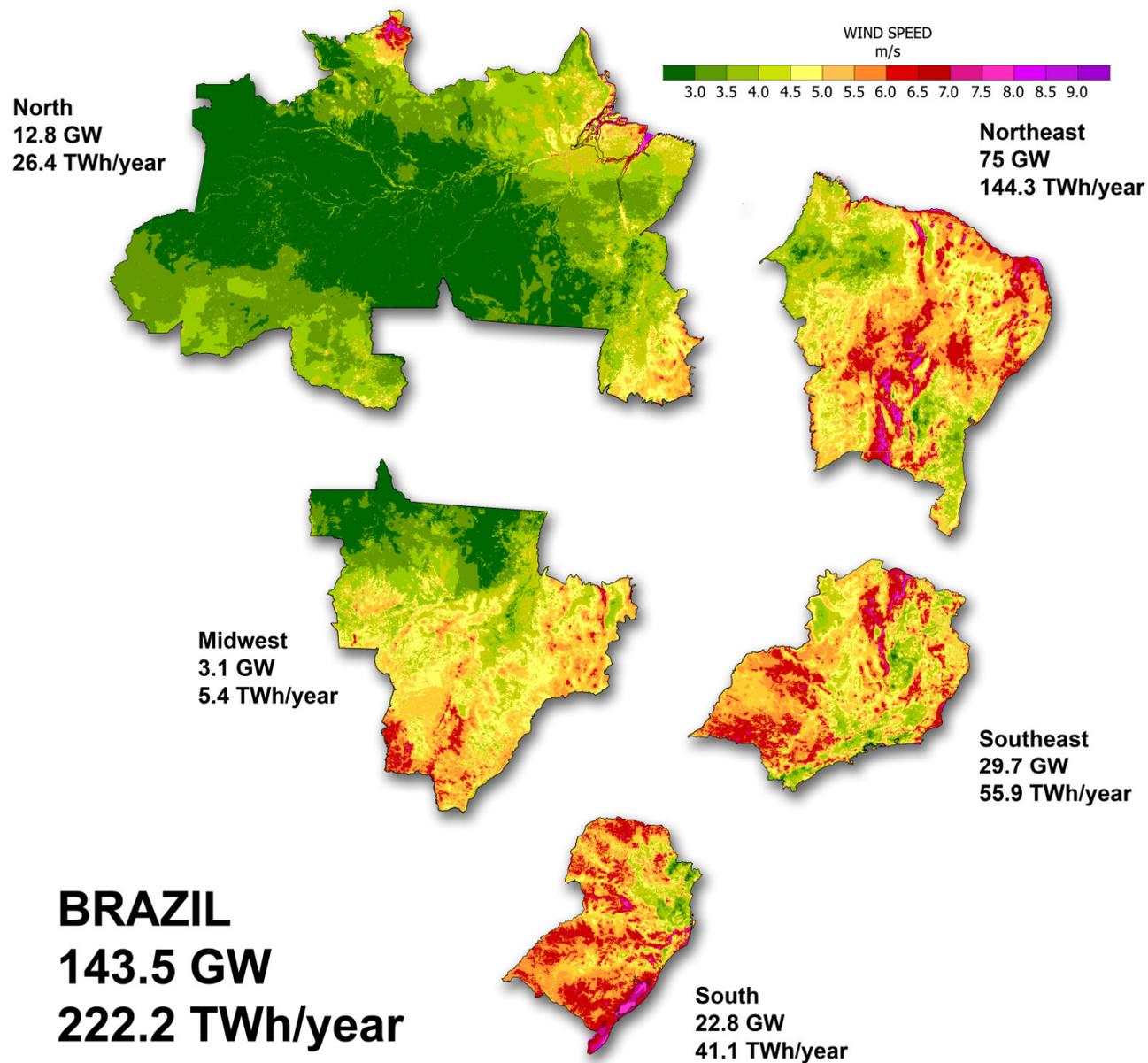
# Mapas eólicos nacionais

- ✧ **Brasil** ([www.cresesb.cepel.br/atlas\\_eolico\\_brasil/atlas.htm](http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico_brasil/atlas.htm))  
([www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia\\_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf))
- ✧ **Ceará** (<http://www.seinfra.ce.gov.br/>)
- ✧ **Rio Grande do Sul** (<http://www.semc.rs.gov.br>)
- ✧ **Bahia** (<http://www.coelba.com.br>)
- ✧ **Rio de Janeiro** ([romilda@desenvolvimento.rj.gov.br](mailto:romilda@desenvolvimento.rj.gov.br))
- ✧ **Alagoas** ([http://www.desenvolvimentoeconomico.al.gov.br/minas-e-energia/mapa-eolico/ATLAS\\_EOLICO\\_AL\\_cap03.pdf/view](http://www.desenvolvimentoeconomico.al.gov.br/minas-e-energia/mapa-eolico/ATLAS_EOLICO_AL_cap03.pdf/view))
- ✧ **Paraná** (<http://www.copel.com/>)
- ✧ **Região Sul** (<http://sonda.cptec.inpe.br/>)
- ✧ **Região Nordeste** (<http://sonda.cptec.inpe.br/>)
- ✧ **Ilha de Marajó** (<http://sonda.cptec.inpe.br/>)
- ✧ **São Paulo** (em execução)
- ✧ **Santa Catarina**
- ✧ **Espírito Santo**
- ✧ **Mato Grosso do Sul**
- ✧ **Rio Grande do Norte**



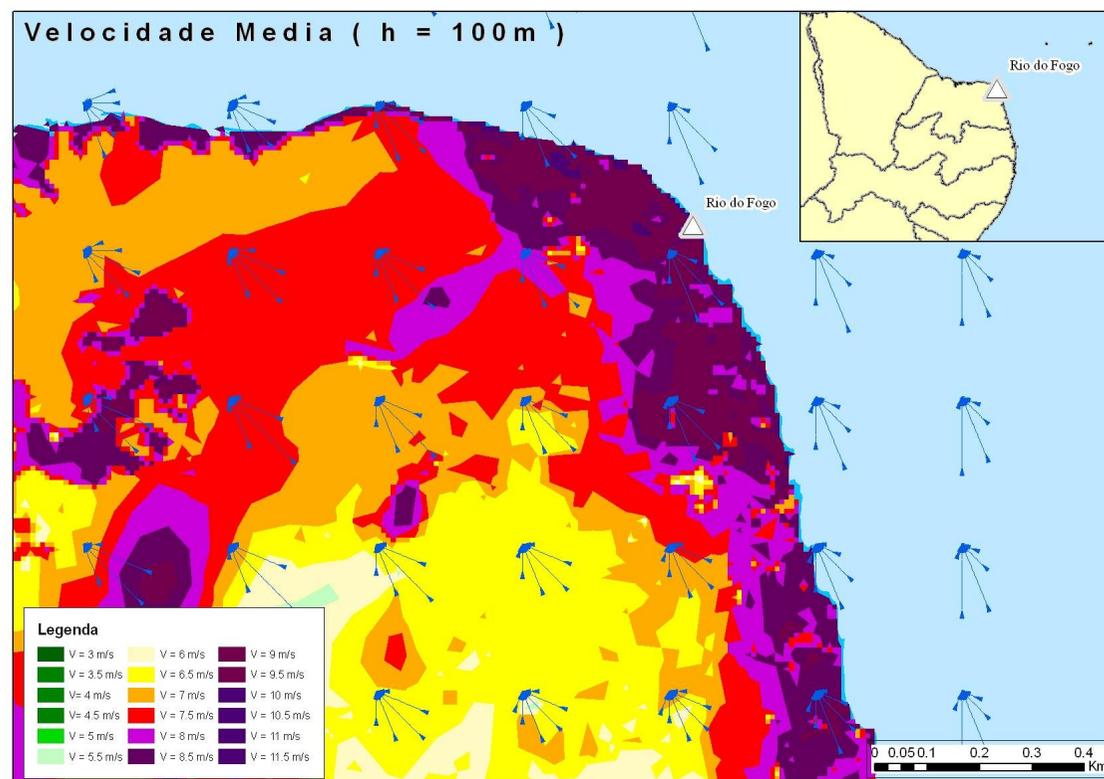
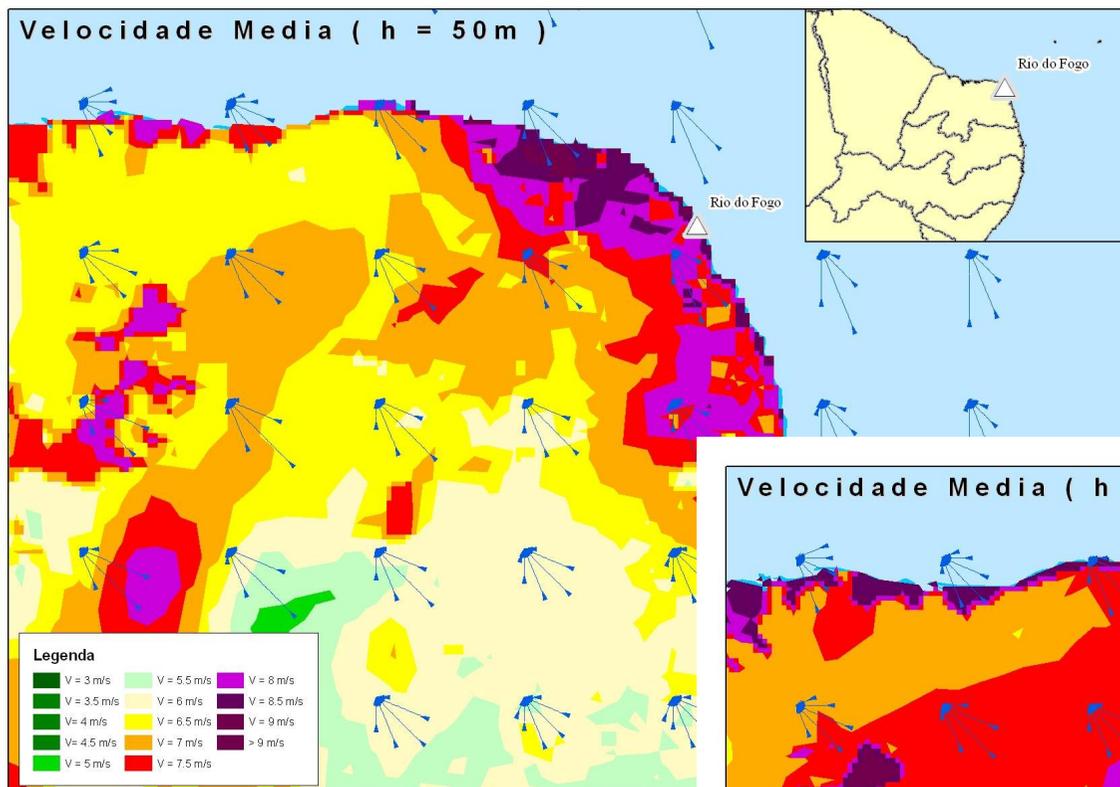
# Potencial eólico nacional

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. - Amarante et al., Ministério de Minas e Energia / Eletrobrás / CEPEL / Cresesb, 2001



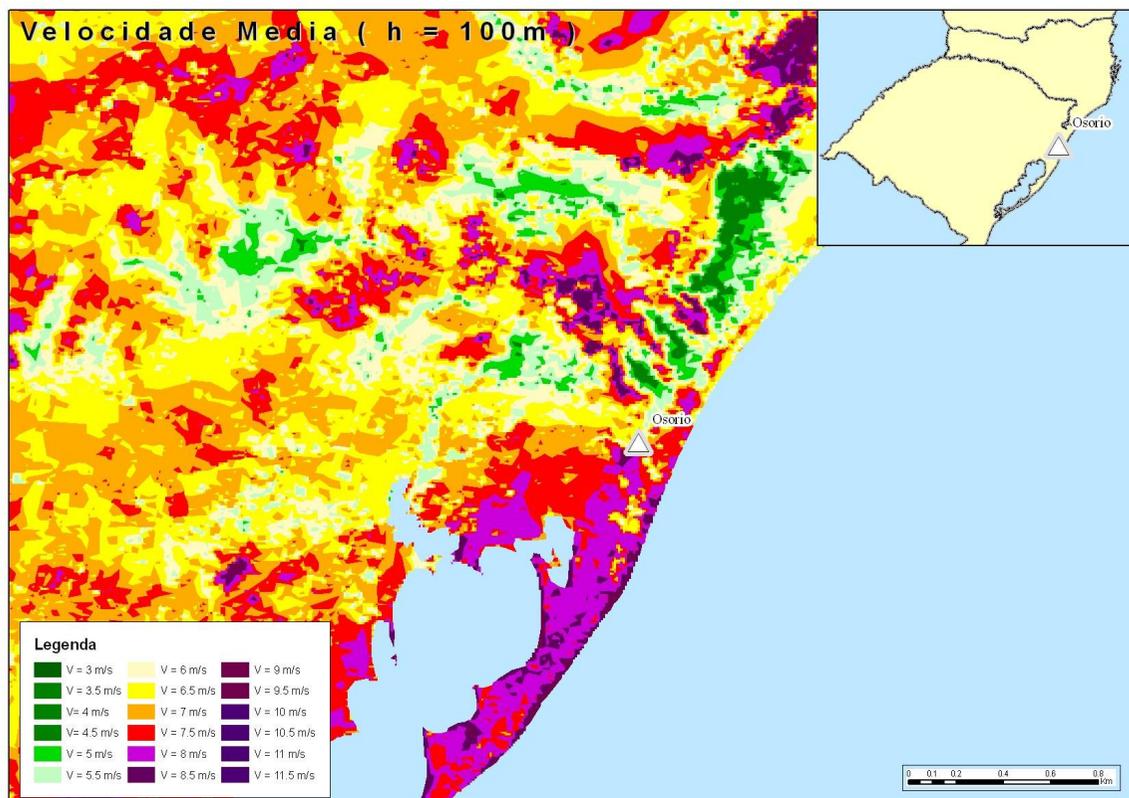
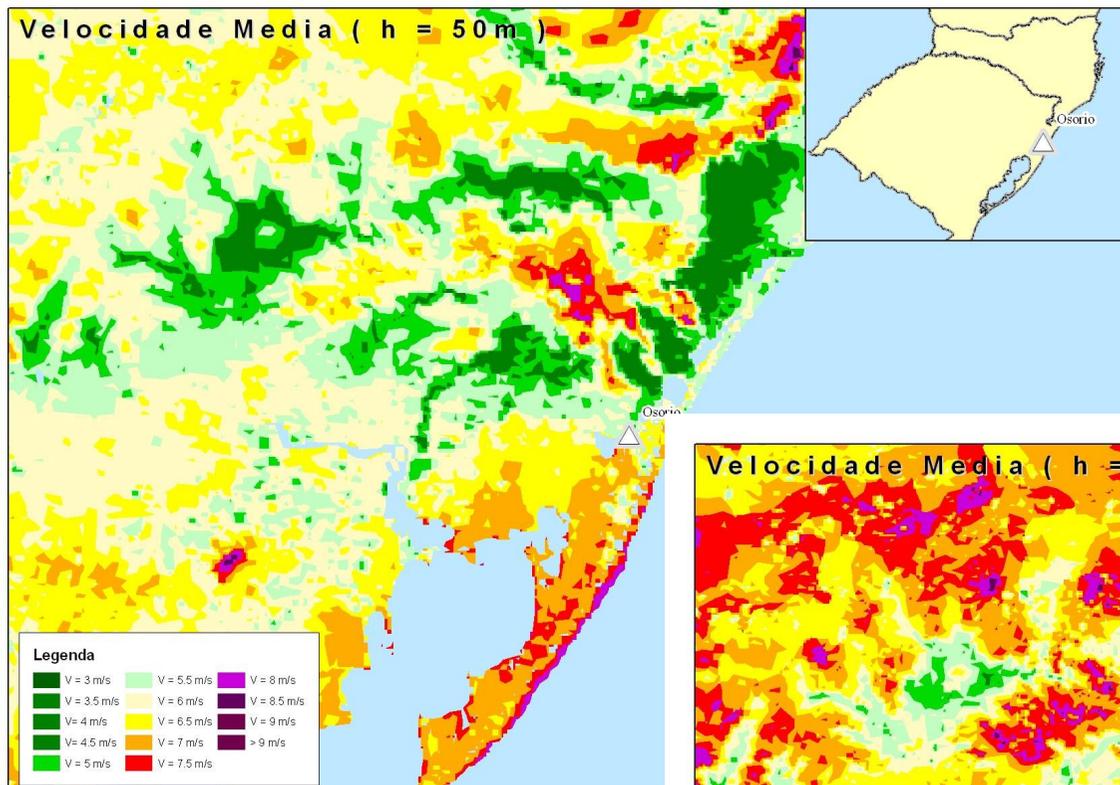
# Reinventários

nordeste



Fonte: CEPEL

# Reinventários sul



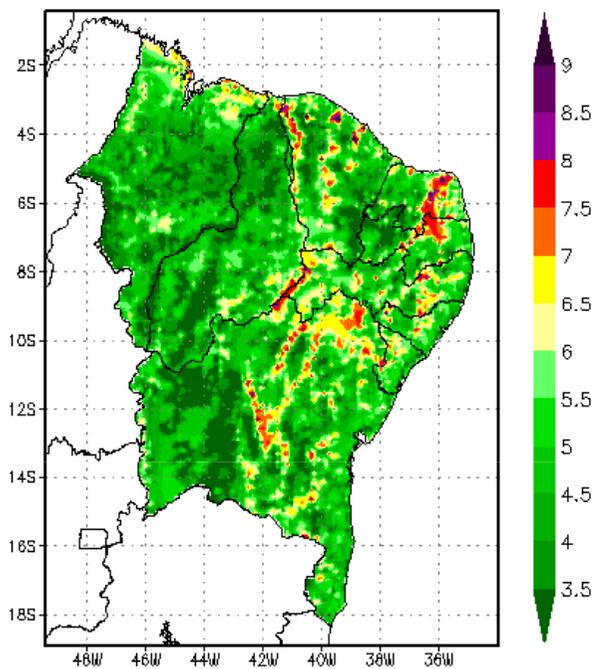
Fonte: CEPEL



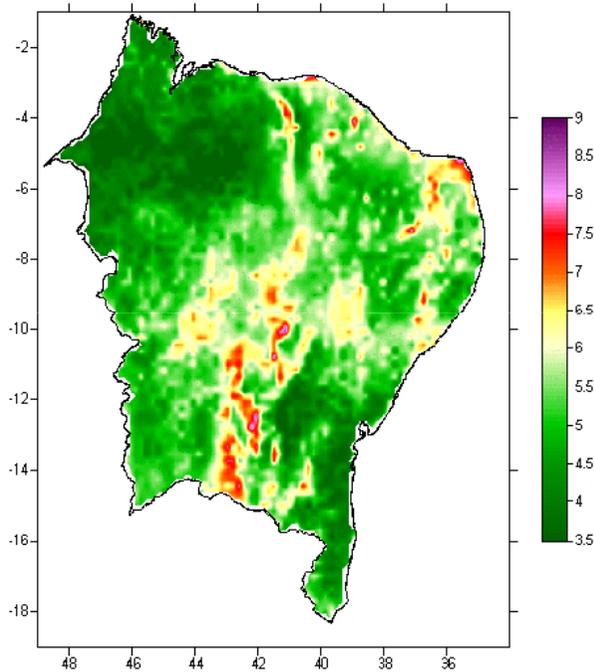
# Eta X MesoMap

*nordeste*

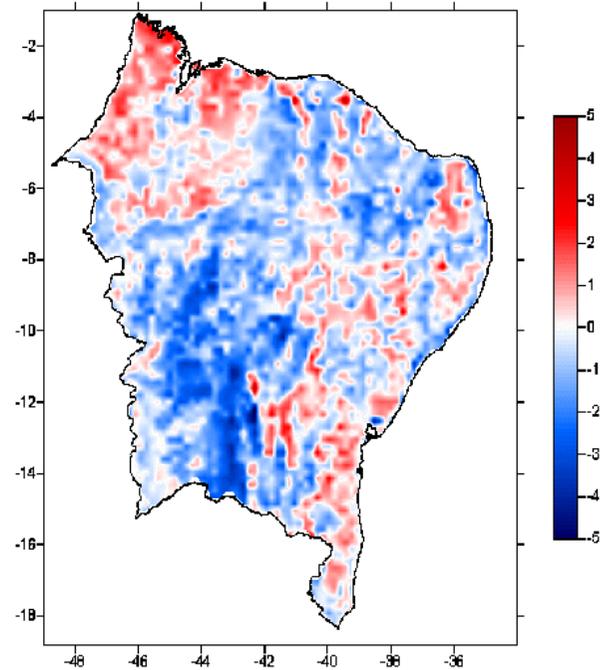
Annual Wind Mean 50m



Atlas

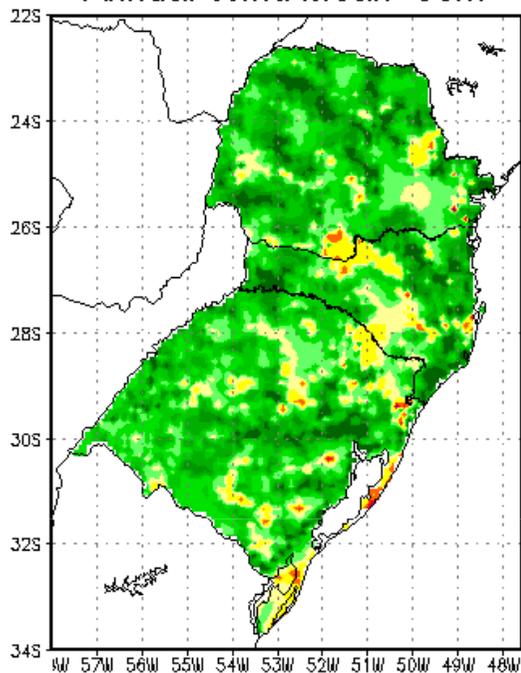


Eta minus Atlas



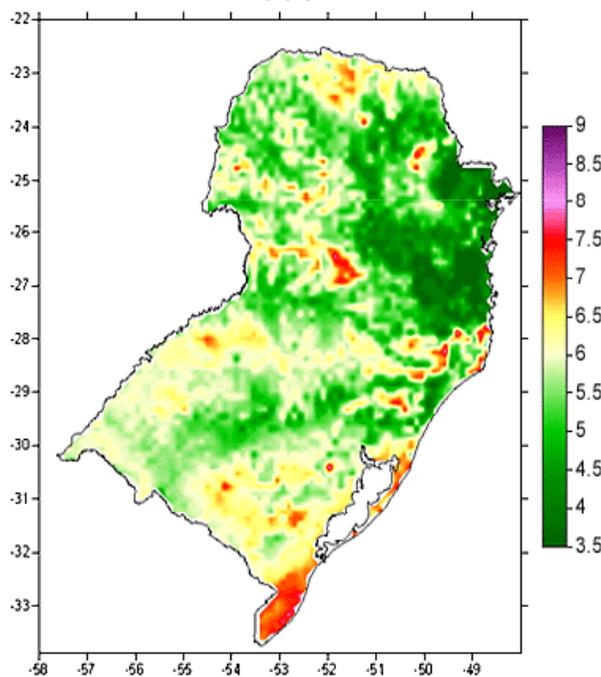


Annual Wind Mean 50m

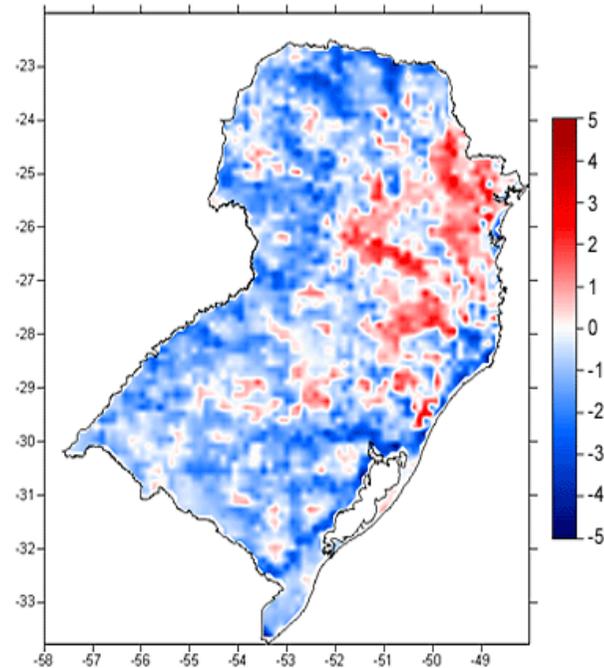


# Eta X MesoMap sul

Atlas



Eta minus Atlas



# Estudo de Caso

## Mapeamento eólico da Ilha de Marajó



- ✧ 16 Municípios.
- ✧ 16 Grupos de Geradores.
- ✧ Fonte óleo Diesel.
- ✧ Produção de 26.000 kW.



# *Estudo de Caso*

## *Mapeamento eólico da Ilha de Marajó*

### *Metodologia*

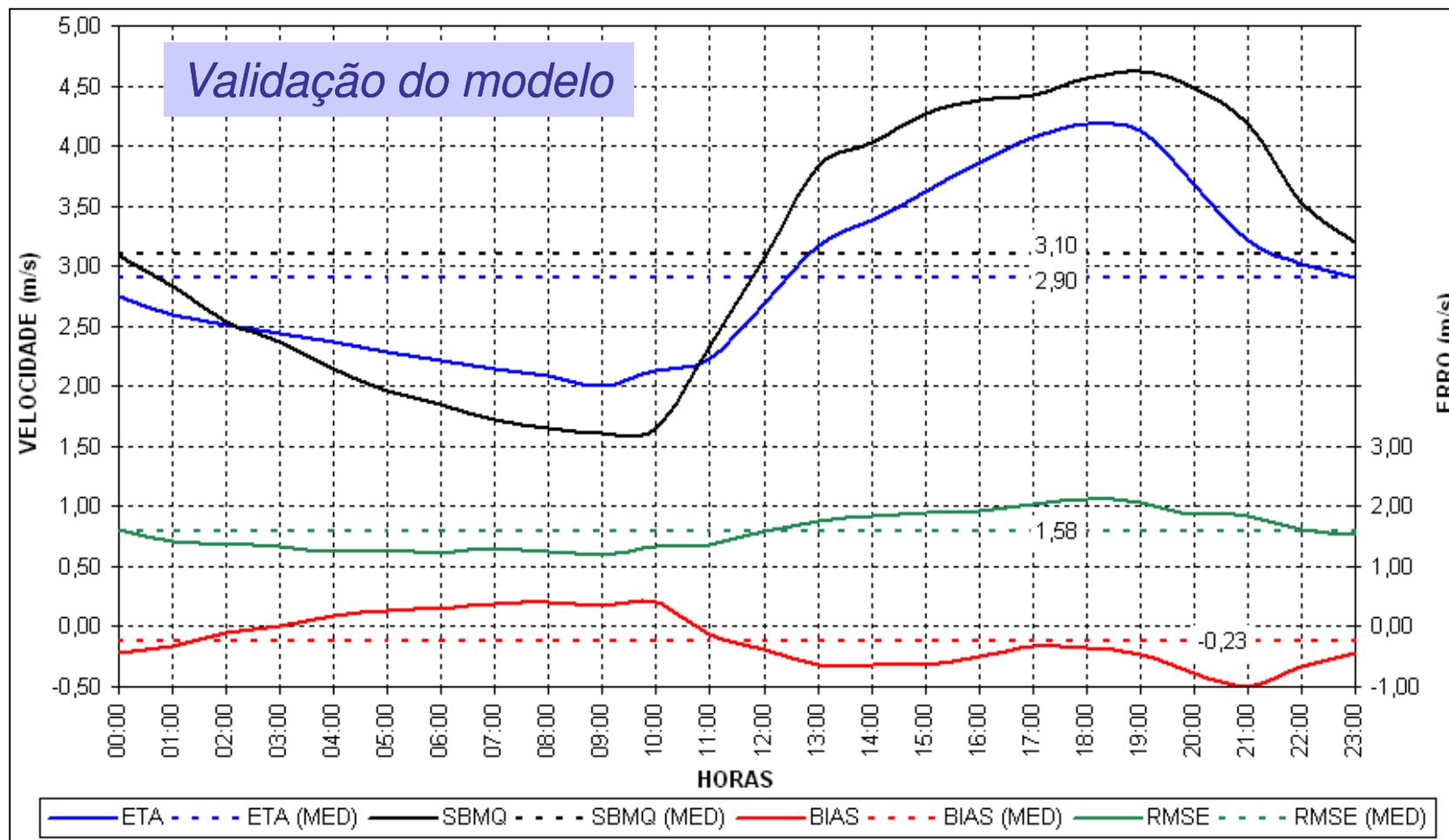
#### Modelagem Numérica:

- ✧ Modelo Eta.
- ✧ Resolução horizontal de 8 x 8 km.
- ✧ Dados de entrada do Eta 40.
- ✧ Rodadas para 36 horas, deixando as primeiras 12 horas para o modelo se ajustar.
- ✧ Período de dez/2004 a nov/2006, fechando 2 ciclos sazonais.
- ✧ Previsão de vento a 50m de altura.



# Estudo de Caso

## Mapeamento eólico da Ilha de Marajó



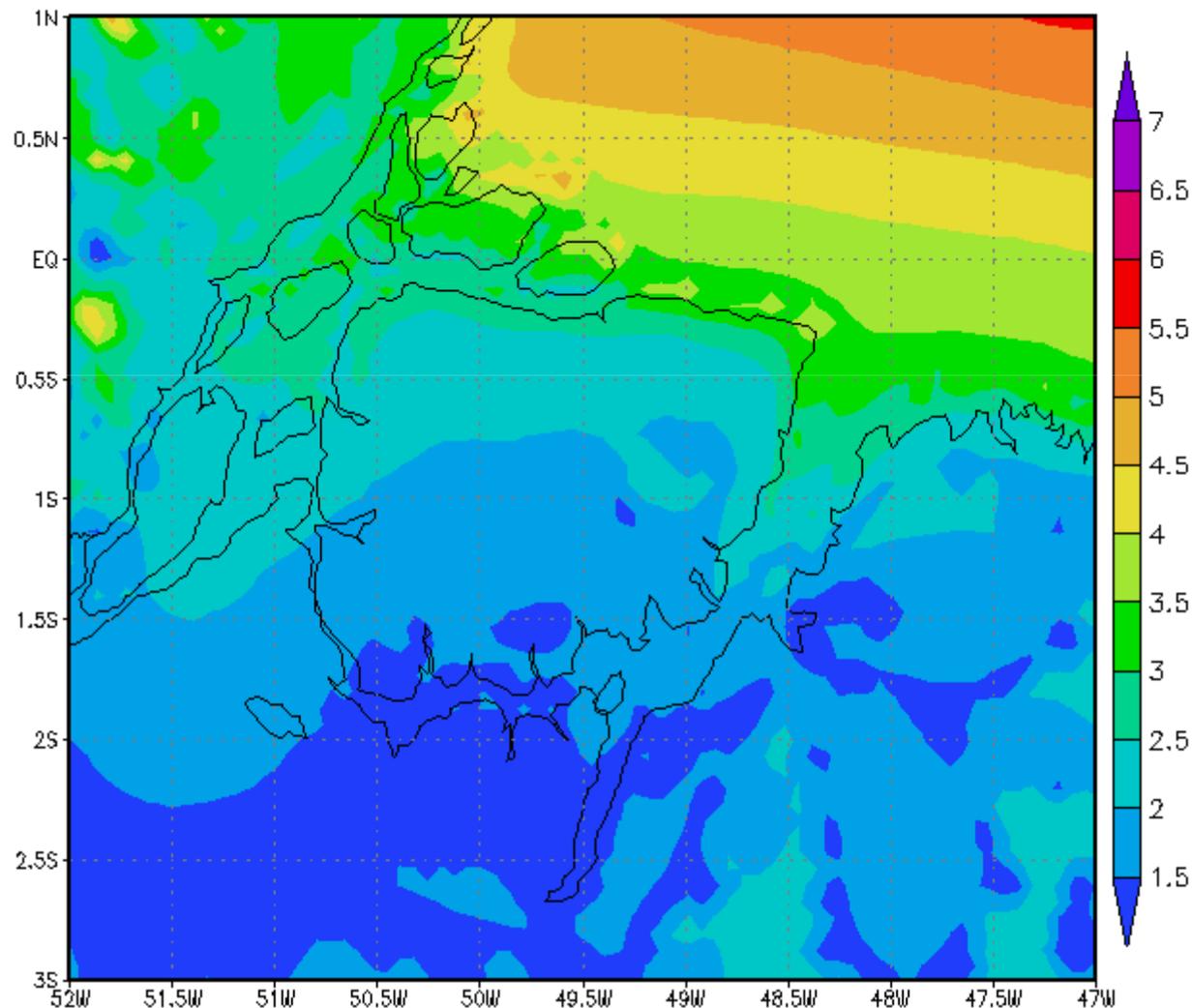




# Estudo de Caso

## Mapeamento eólico da Ilha de Marajó

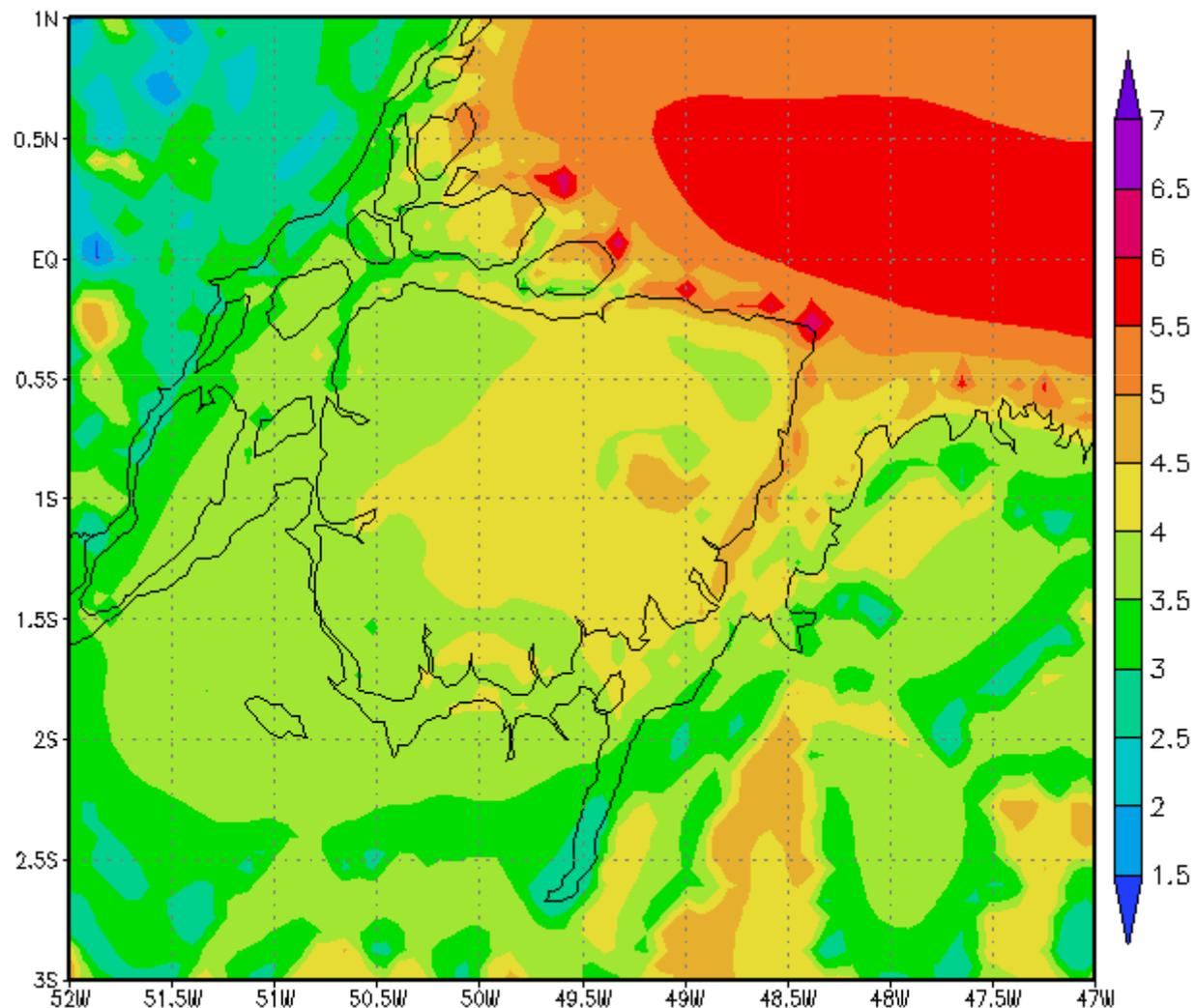
**RESULTADOS:**  
*Média MAM*



# Estudo de Caso

## Mapeamento eólico da Ilha de Marajó

*RESULTADOS:*  
*Média JJA*

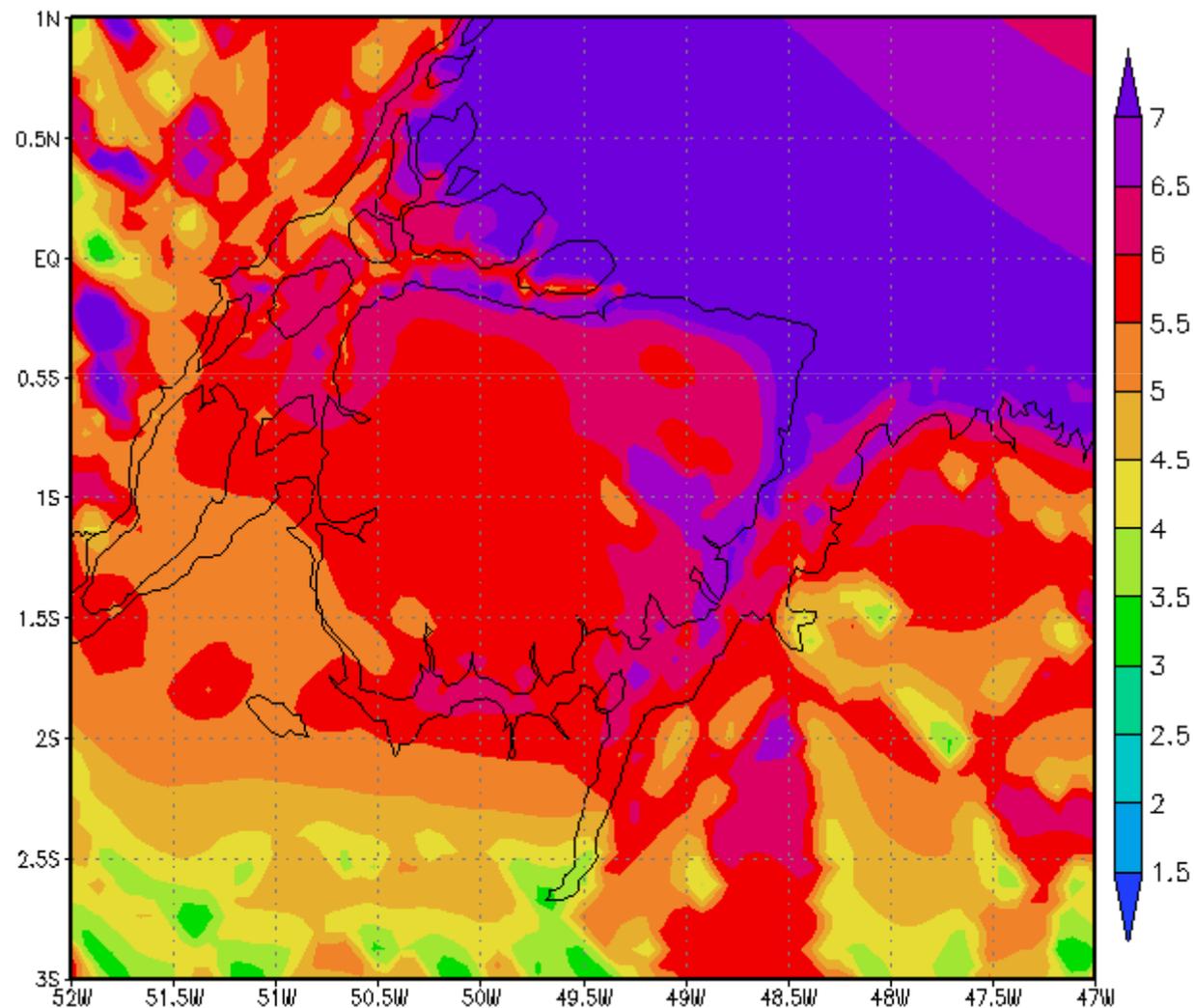




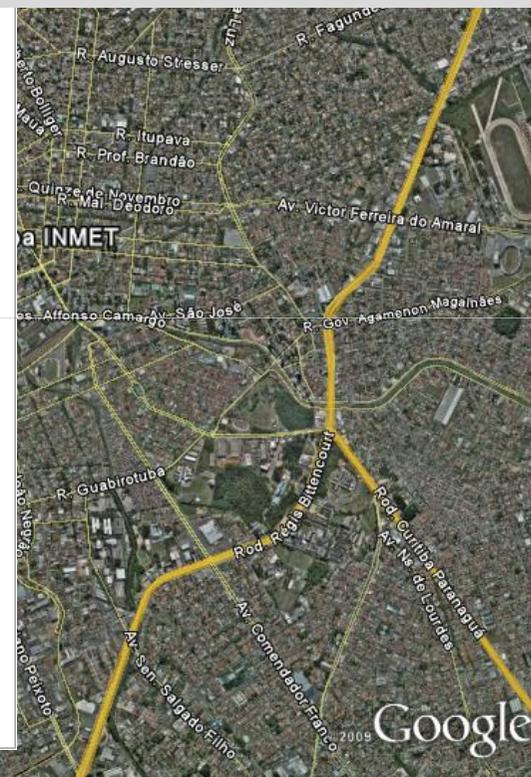
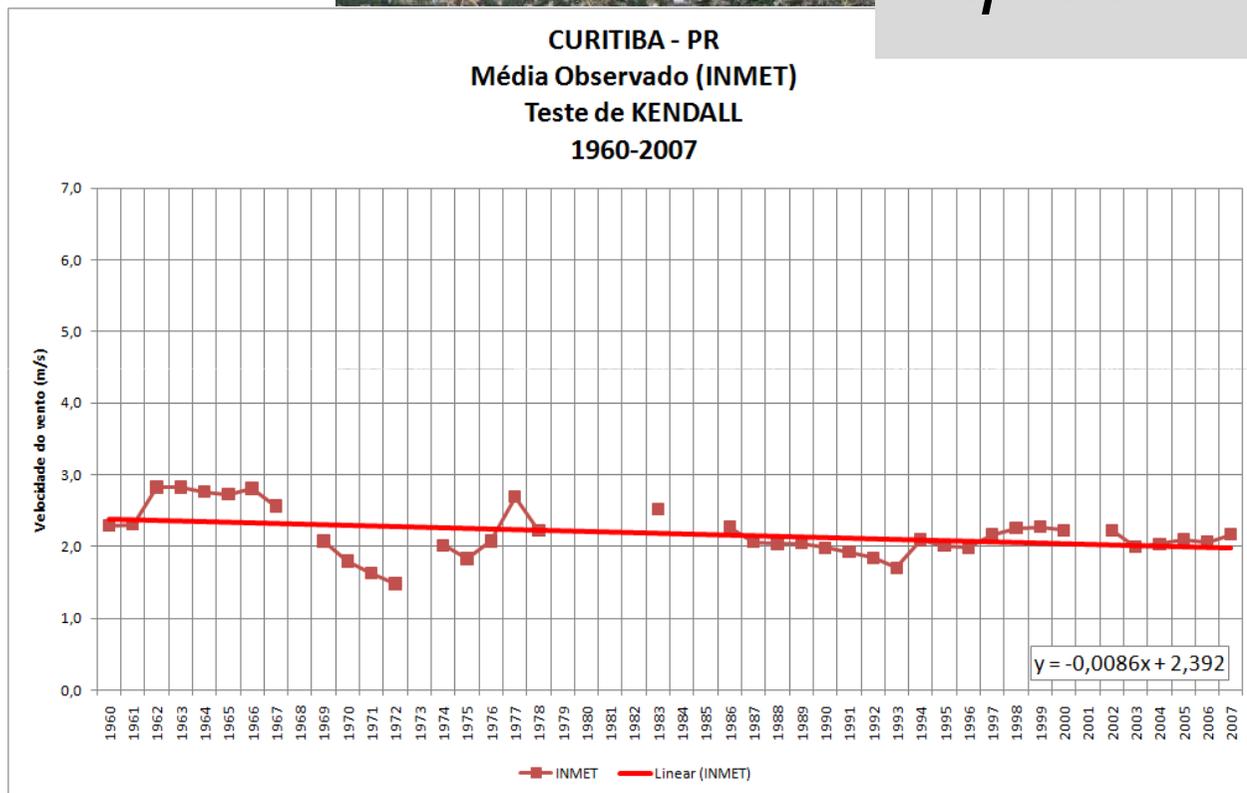
# *Estudo de Caso*

## *Mapeamento eólico da Ilha de Marajó*

*RESULTADOS:*  
*Média SON*



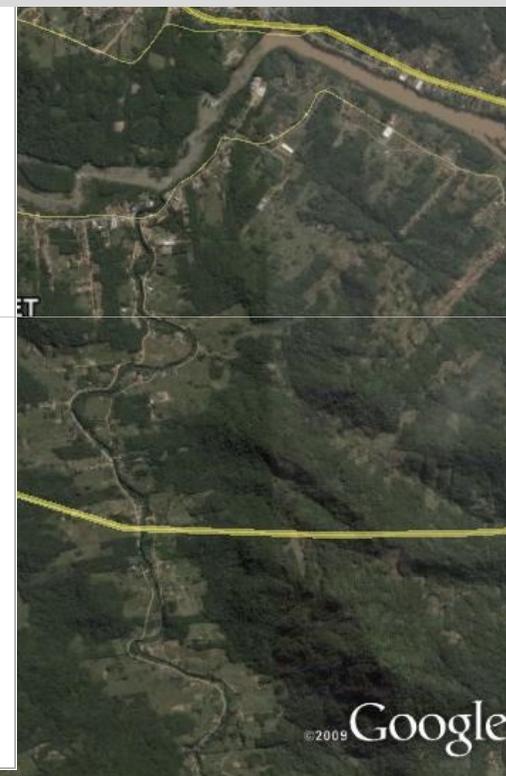
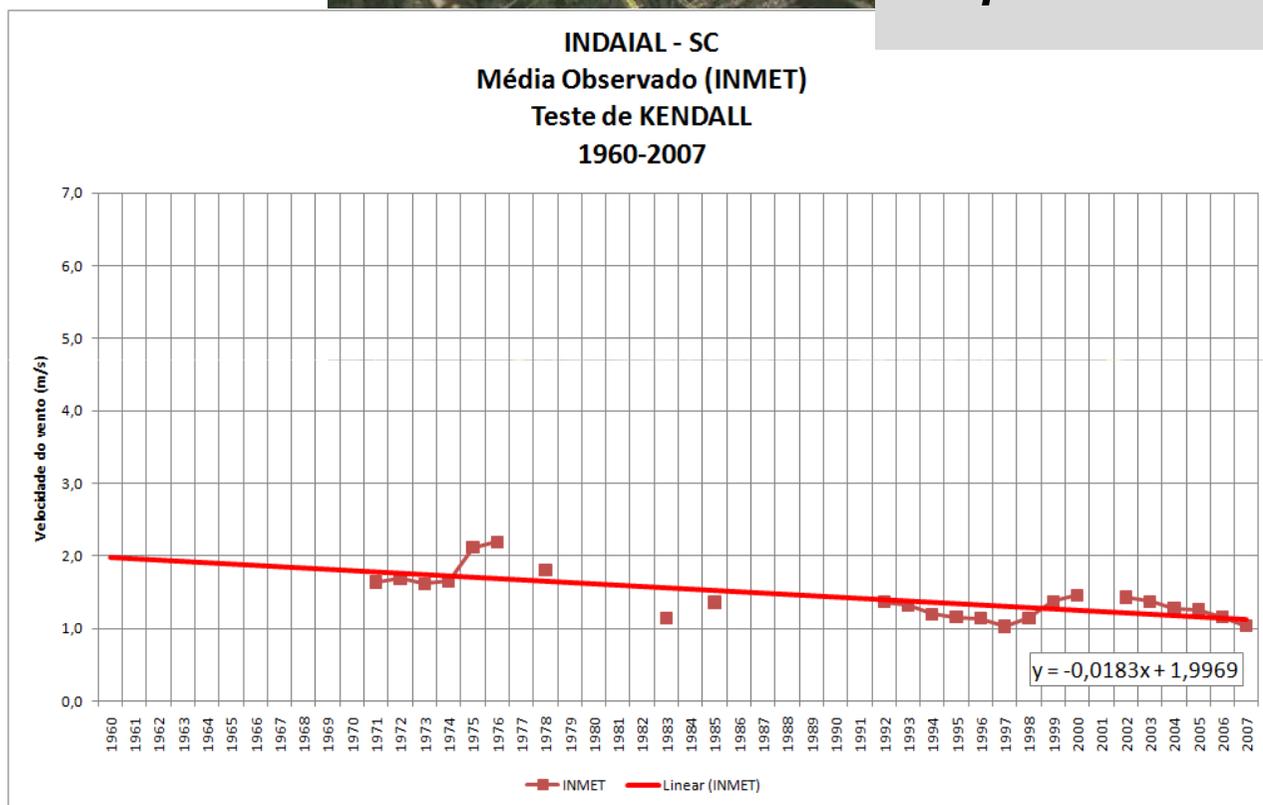
# Cenários futuros Aquecimento Global



## *Tendências das séries temporais de dados de campo*

\* estudo desenvolvido com dados de vento coletados em aeroportos e rede de estações meteorológicas gerenciada pelo INMET

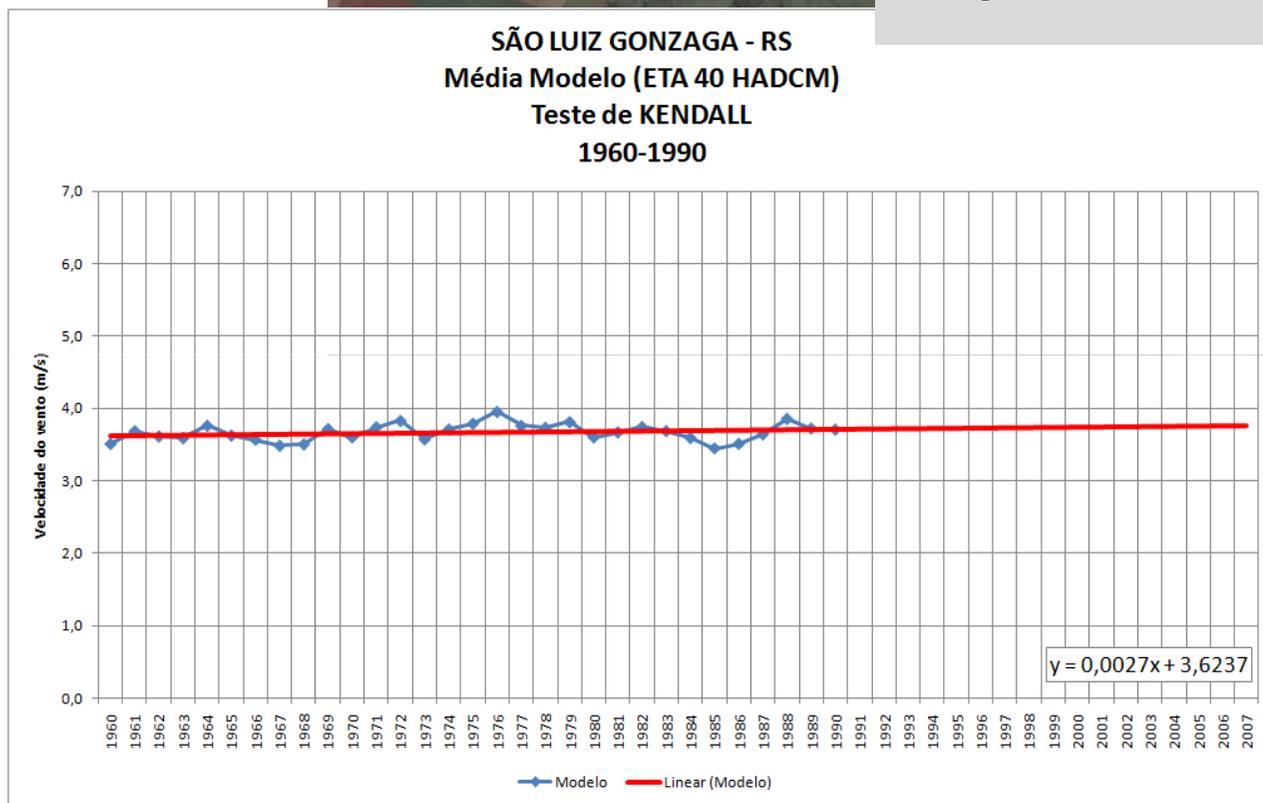
# Cenários futuros Aquecimento Global



## Tendências das séries temporais de dados de campo

\* estudo desenvolvido com dados de vento coletados em aeroportos e rede de estações meteorológicas gerenciada pelo INMET

# Cenários futuros Aquecimento Global

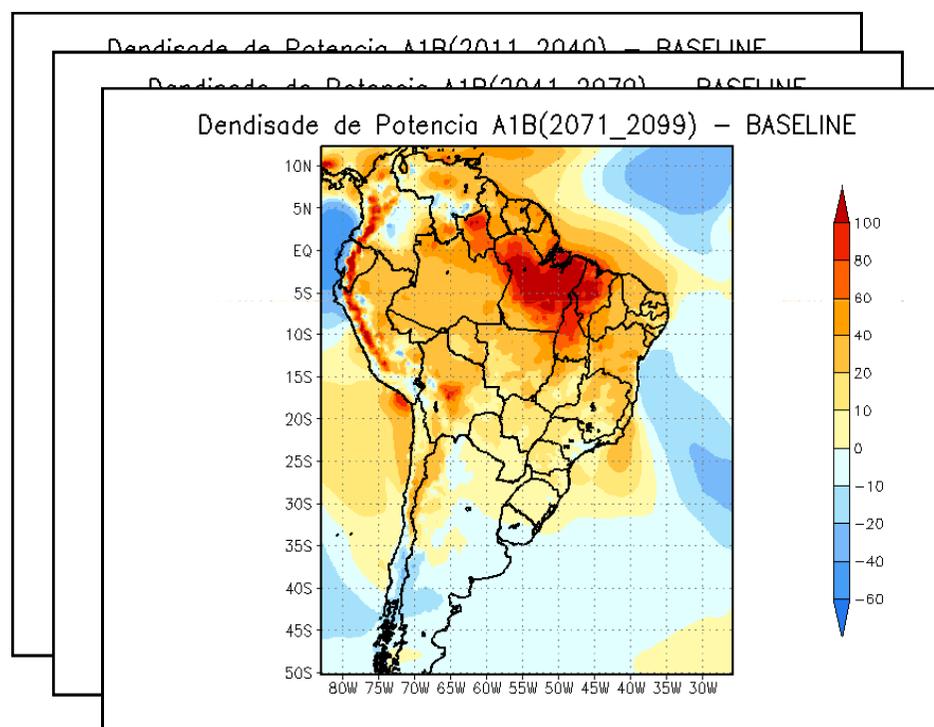


## Tendências das séries temporais de dados de campo

\* estudo desenvolvido com dados de vento coletados em aeroportos e rede de estações meteorológicas gerenciada pelo INMET



# Cenários futuros Aquecimento Global

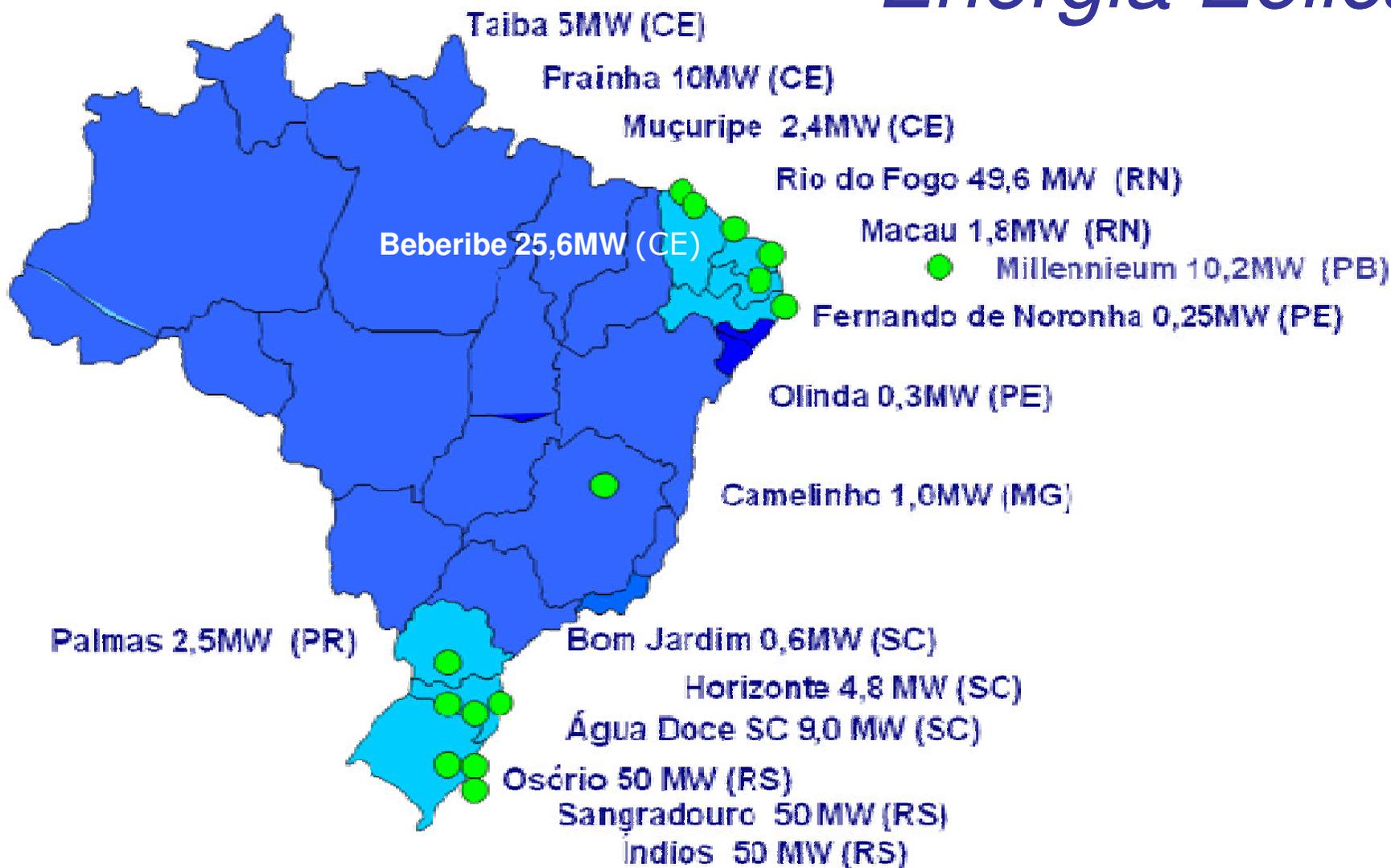


## Projeções do modelo Eta Cenário A1B\*

\* cenário de maior equidade nas fontes de energia, elevado desenvolvimento económico e crescimento da população moderado.



# Exploração de Energia Eólica





# *Relevância do estudo*



*Prainha (RS)*



*Osório, Sangradouro e Índios (RS) - 150MW*



*obrigado*

Fernando Ramos Martins

[fernando.martins@cptec.inpe.br](mailto:fernando.martins@cptec.inpe.br)

<http://sonda.cptec.inpe.br/>