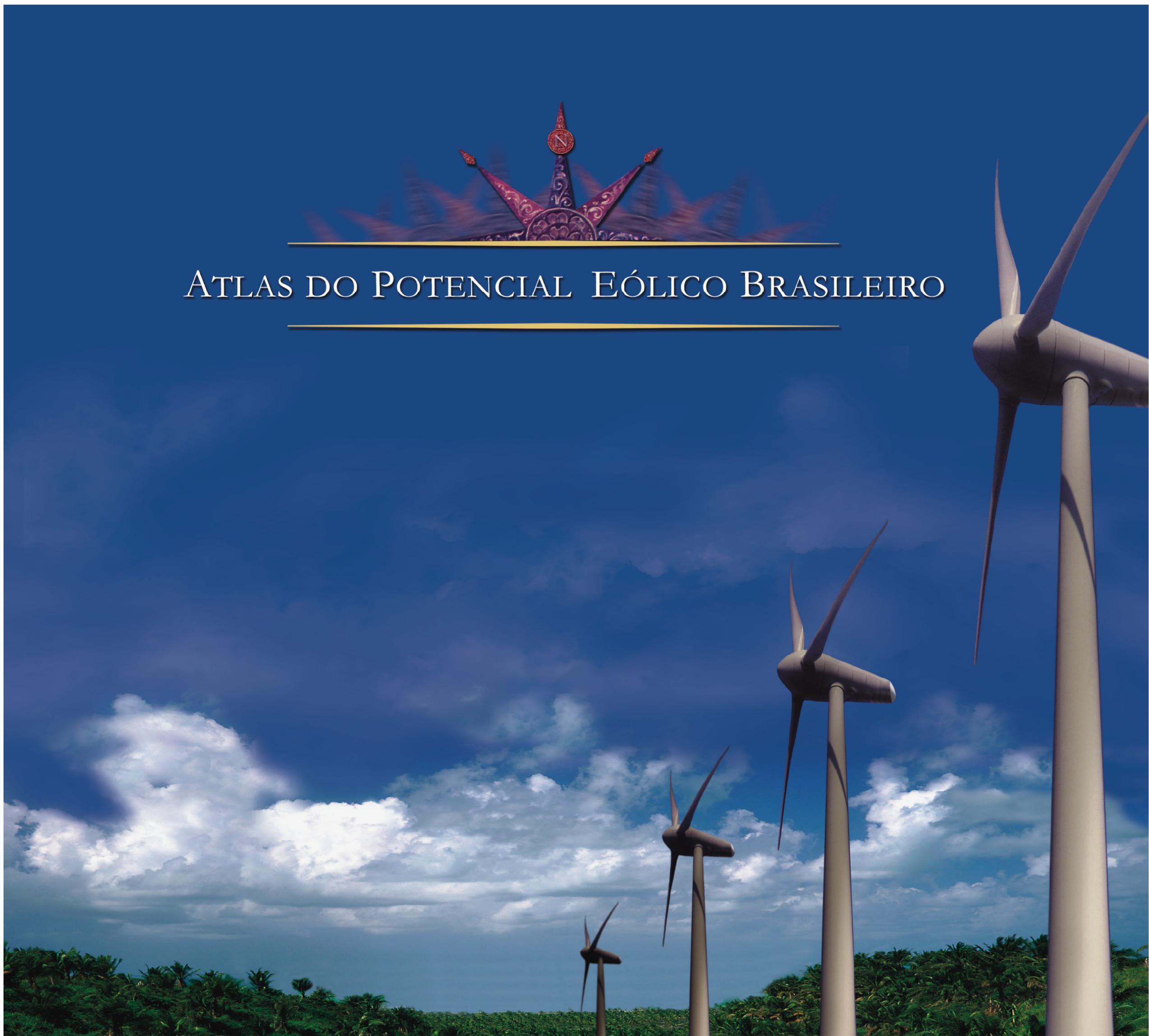




---

ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

---





---

# ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

---

**ODILON A. CAMARGO DO AMARANTE**  
Camargo Schubert Engenharia Eólica

**MICHAEL BROWER E JOHN ZACK**  
TrueWind Solutions

**ANTONIO LEITE DE SÁ**  
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica/CEPEL

**BRASÍLIA, 2001**



**MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA**





## **MENSAGEM**

O aproveitamento de energia eólica no mundo cada vez mais consolida-se como uma alternativa viável e limpa. Esse tipo de energia compõe complementarmente matrizes energéticas de muitos países e, uma vez que os ventos oferecem uma opção de suprimento no século XXI, em conjunto com outras fontes renováveis, poderá conciliar as necessidades de uma sociedade industrial moderna com os requisitos de preservação ambiental.

Os números que indicam a crescente utilização de energia eólica, em várias partes do mundo, comprovam a maturidade da tecnologia que envolve e dos aspectos sócio-econômicos que lhes são pertinentes. Consideradas a sua configuração geográfica, as suas condições climáticas e a necessidade e oportunidade de ampliar e revigorar a nossa matriz energética, para o Brasil mostra-se absolutamente adequado e estratégico conduzir esforços para acompanhar essa tendência e implementar efetivamente a tecnologia da geração de energia eólica.

Para esse fim, no entanto, torna-se indispensável o levantamento de seu potencial eólico com a mais moderna tecnologia de aquisição e tratamento de dados, condição essencial para que projetos de fazendas eólicas se multipliquem, o que possibilitará a transformação dos bons ventos brasileiros em eletricidade para o nosso desenvolvimento.

O ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO, que ora lançamos, traduz o propósito de oferecer todos os dados relativos ao levantamento do potencial eólico, no Brasil, com informações sobre vento de qualidade para uso em projetos de geração eólica em maior número e com maior confiabilidade.

O Ministério de Minas e Energia parabeniza as instituições e pessoas envolvidas na elaboração desse marco para o desenvolvimento da energia eólica no Brasil, bem como se orgulha de entregar, aos pioneiros da energia eólica brasileira e aos novos atores que surgirão nessa área, este importante instrumento de trabalho.

**JOSÉ JORGE DE VASCONCELOS LIMA**

**MINISTRO DE ESTADO DE MINAS E ENERGIA**





## **APRESENTAÇÃO**

O ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO cobre todo o território nacional. O seu objetivo é fornecer informações para capacitar tomadores de decisão na identificação de áreas adequadas para aproveitamentos eólico-elétricos. Este atlas destina-se a autoridades governamentais, planejadores do setor elétrico, agências nacionais e internacionais de financiamento, instituições de fomento e investidores.

Um dos fatores que limitam investimentos em empreendimentos eólicos é a falta de dados adequados e confiáveis. Este atlas vem preencher parte dessa lacuna, apresentando informações de qualidade sobre as áreas com bom potencial eólico no território nacional e suas principais características, tais como: velocidade média, direção, regime e sazonalidade do vento.

Na elaboração deste atlas foram empregadas ferramentas computacionais de última geração para processamento dos dados utilizados na obtenção das informações de interesse. Tais informações são apresentadas em forma de diversos mapas, abrangendo cada uma das regiões brasileiras, Norte, Sul, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste bem como a representação da superfície total do país.

O ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO constitui-se, assim, em um instrumento indicativo fundamental para que se possa pré-avaliar os recursos eólicos para geração de energia elétrica, sua principal finalidade, podendo também ser fonte de consulta para pesquisas acadêmicas e científicas, além de outras possíveis aplicações que utilizem dados dos ventos.

**AFONSO HENRIQUES MOREIRA SANTOS**

**SECRETÁRIO DE ENERGIA**





## SUMÁRIO

### MENSAGEM

### APRESENTAÇÃO

### SUMÁRIO EXECUTIVO

## 1. INTRODUÇÃO

- 1.1 ESTUDOS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO . . . . 9
- 1.2 O BRASIL: GEOGRAFIA . . . . 9
- 1.3 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO . . . . 10
- 1.4 CLIMA E SAZONALIDADE . . . . 12

## 2. FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA

- 2.1 ORIGEM . . . . 13
- 2.2 HISTÓRICO . . . . 13
- 2.3 PRINCÍPIOS E TECNOLOGIA . . . . 14

## 3. METODOLOGIA

- 3.1 O SISTEMA MESOMAP . . . . 15
- 3.2 RESULTADOS DO MESOMAP . . . . 20
- 3.3 LIMITAÇÕES DO MÉTODO . . . . 20
- 3.4 VALIDAÇÃO DO MESOMAP . . . . 21

## 4. POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

- 4.1 REGIMES DE VENTO SOBRE O BRASIL . . . . 23
- 4.2 MAPAS DO POTENCIAL EÓLICO ANUAL . . . . 25
- 4.3 MAPAS DO POTENCIAL EÓLICO SAZONAL . . . . 31
- 4.4 MAPAS DOS POTENCIAIS EÓLICOS REGIONAIS . . . . 37

## 5. ANÁLISE

- 5.1 POTENCIAL EÓLIO-ELÉTRICO ESTIMADO . . . . 43

### REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . 45

## RELAÇÃO DE FIGURAS

- 1.1 POSIÇÃO GEOGRÁFICA DO BRASIL . . . . 10
- 1.2 RELEVO E PRINCIPAIS BACIAS HIDROGRÁFICAS . . . . 10
- 1.3 MOSAICO DE IMAGENS DE SATÉLITE . . . . 10
- 1.4 SÍNTESE DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO . . . . 11
- 1.5 MÉDIAS CLIMATOLÓGICAS SAZONAIS . . . . 12
- 2.1 EVOLUÇÃO MUNDIAL DA CAPACIDADE EÓLIO-ELÉTRICA . . . . 13
- 2.2 ESTEIRA AERODINÂMICA E AFASTAMENTO ENTRE TURBINAS EÓLICAS . . . . 14
- 2.3 USINA EÓLIO-ELÉTRICA DE PRAINHA, CEARÁ . . . . 14
- 2.4 CURVA TÍPICA DE POTÊNCIA DE TURBINAS EÓLICAS . . . . 14
- 2.5 VISTA GERAL DA FABRICAÇÃO DAS PÁS E MONTAGEM DA NACELE . . . . 14
- 3.1 REGIÕES UTILIZADAS NO CÁLCULO DA MESOESCALA . . . . 16
- 3.2 MODELO DE RELEVO . . . . 17
- 3.3 MOSAICO DE IMAGENS DE SATÉLITE (SPOT) . . . . 18
- 3.4 MODELO DE RUGOSIDADE . . . . 19
- 3.5 FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE VENTO BASEADO NA CURVA DE WEIBULL . . . . 20
- 3.6 EXEMPLO DE DETALHES NA SUBESCALA: RIO DE CONTAS, BAHIA . . . . 21
- 3.7 REGRESSÃO LINEAR PARA AJUSTE DE VELOCIDADE . . . . 22
- 4.1 DISTRIBUIÇÃO GERAL DOS VENTOS . . . . 23
- 4.2 MOSAICO SPOT SOBRE RELEVO 3D . . . . 24
- 5.1 POTENCIAL EÓLICO ESTIMADO . . . . 44

## RELAÇÃO DE MAPAS

### POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO ANUAL

- VELOCIDADES MÉDIAS ANUAIS E FLUXOS DE POTÊNCIA EÓLICA . . . . 26
- DIREÇÕES PREDOMINANTES ANUAIS . . . . 27
- REGIMES DIURNOS – MÉDIA ANUAL . . . . 28
- K – FATOR DE FORMA DE WEIBULL – MÉDIA ANUAL . . . . 29

### POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO SAZONAL

- VELOCIDADES MÉDIAS TRIMESTRAIS . . . . 32
- RAZÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA TRIMESTRAL E A ANUAL . . . . 33
- DIREÇÕES PREDOMINANTES . . . . 34
- K – FATOR DE FORMA DE WEIBULL – MÉDIAS SAZONAIS . . . . 35

### POTENCIAL EÓLICO REGIONAL

- NORTE . . . . 38
- NORDESTE . . . . 39
- CENTRO-OESTE . . . . 40
- SUDESTE . . . . 41
- SUL . . . . 42



## SUMÁRIO EXECUTIVO

**ESCOPO:** O presente ATLAS eólico abrange todo o território brasileiro. Seu objetivo é fornecer informações relativas aos ventos, na resolução adequada, para capacitar tomadores de decisão na identificação de áreas para aproveitamentos eólico-elétricos.

**CONTEXTO:** A geração eólio-elétrica expandiu-se no mundo de forma acelerada ao longo da última década, atingindo a escala de gigawatts. Um dos fatores que limitam investimentos em empreendimentos eólicos tem sido a falta de dados consistentes e confiáveis. A maioria dos registros anemométricos disponíveis é mascarada por influências aerodinâmicas de obstáculos, rugosidade e relevo. A disponibilidade de dados representativos é importante no caso brasileiro, que ainda não explorou esse recurso abundante e renovável de forma expressiva.

ESTE ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO tornou-se possível mediante o desenvolvimento, nos últimos três anos, de um abrangente sistema de software de modelamento numérico dos ventos de superfície chamado MesoMap. Esse sistema simula a dinâmica atmosférica dos regimes de vento e variáveis meteorológicas correlatas a partir de amostragens representativas de um banco de dados validado. O sistema inclui condicionantes geográficas como relevo, rugosidade induzida por classes de vegetação e uso do solo, interações térmicas entre a superfície terrestre e a atmosfera, incluídos os efeitos de vapor d'água. No caso presente, as simulações empregaram uma base de dados do período compreendido entre 1983 e 1999. Essas simulações foram balizadas por referências existentes, tais como grades de dados meteorológicos resultantes de reanálises, rádiosondagens, vento e temperatura medidos sobre o oceano e medições de vento de superfície já realizadas regionalmente no Brasil. Entre essas últimas, foram selecionadas apenas as medições com qualidade necessária para referenciar o modelo ou, na falta destas, foram utilizadas referências pré-existentes representativas de grandes áreas, conforme se indica no quadro a seguir.

OS RESULTADOS dessas simulações são apresentados em mapas temáticos por escalas de cores, representando os regimes de vento e fluxos de potência eólica na altura de 50 metros, na resolução horizontal de 1km x 1km, para todo o país. Os mapas revelam que existem extensas áreas com potencial promissor para o aproveitamento eólio-elétrico em todas as regiões do Brasil. Sugere-se a consulta direta aos mapas dos potenciais eólicos deste ATLAS, para uma síntese e identificação detalhada das melhores áreas.

OS MAPAS DO POTENCIAL EÓLICO ANUAL revela uma importante complementaridade geográfica entre os potenciais eólico e hidráulico no Brasil: de modo geral, as melhores áreas para aproveitamento eólico situam-se nas extremidades do sistema elétrico, distantes da geração hidrelétrica. Nessa situação, a inserção de energia eólica no sistema elétrico melhora seu desempenho.

OS MAPAS DO POTENCIAL EÓLICO SAZONAL também confirmam a existência de complementaridade sazonal entre os regimes naturais de vento e as vazões naturais hídricas na parcela hidrelétrica predominante do sistema elétrico brasileiro atual. Nesse sistema, a inserção de energia eólica potencializa uma maior estabilidade sazonal na oferta de energia.

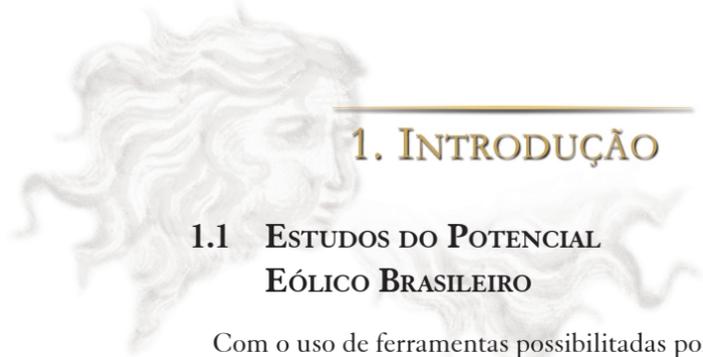
As oportunidades para o uso de geração eólica isolada são geograficamente mais abrangentes, pois turbinas eólicas pequenas são muitas vezes capazes de atender às demandas isoladas com velocidades menores de vento. Para esse tipo de aproveitamento existem amplas áreas em todo o Brasil, com exceção da Floresta Amazônica. Este ATLAS também deve constituir ferramenta útil para a avaliação das áreas vantajosas para a utilização de sistemas eólicos isolados, considerando-se as alternativas existentes.

**COMPLEMENTO:** o presente ATLAS pode ser utilizado na pré-identificação das melhores áreas para projetos de aproveitamentos eólico-elétricos.

Entretanto, devido à grande sensibilidade da energia eólica às condições de microescala, a localização exata das turbinas eólicas e a avaliação econômica do empreendimento deve seguir programas específicos de medições, compatíveis com os padrões da indústria eólica, para se obter em dados com a precisão exigida pelo projeto.

QUADRO 1

Instituição	Abrangência	Nº de estações
CEPEL	Região Norte	7
CELESP	Santa Catarina	6
COPEL	Paraná	17
COELBA	Bahia	13
SUDENE	Ceará	2
Marinha - DHN	Litoral	2
<b>Total</b>		<b>47</b>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 ESTUDOS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

Com o uso de ferramentas possibilitadas por recentes avanços da capacidade computacional, de simulações baseadas nas leis físicas de interação entre as diversas variáveis meteorológicas – registradas e consolidadas em extensos bancos de dados e validadas por registros anemométricos selecionados –, o presente ATLAS supera obstáculos históricos ao conhecimento do potencial eólico brasileiro, que é apresentado com detalhamento e representatividade antes impossíveis.

O potencial eólico brasileiro para aproveitamento energético tem sido objeto de estudos e inventários desde os anos 1970 e o seu histórico revela o lento mas progressivo descortinamento de um potencial energético natural de relevante magnitude existente no país.

Em 1976-77, um processamento específico de dados anemométricos medidos em aeroportos brasileiros foi realizado no Instituto de Atividades Espaciais, no Centro Técnico Aeroespacial, IAE/CTA [1].\* As maiores velocidades médias anuais, da ordem de 4m/s a 10m de altura, já induziam marginalmente a viabilidade técnica de máquinas de pequeno porte para sistemas isolados e apontavam o litoral da região Nordeste e o Arquipélago de Fernando de Noronha como os sítios mais promissores para a realização de projetos-piloto para geração de energia eólio-elétrica. Até 1981, diversos protótipos de turbinas eólicas de pequeno porte (2kW e 5kW) foram desenvolvidos e um campo de testes foi operado no Centro de Lançamento de Foguetes da Barreira do Inferno, na costa do Rio Grande do Norte, em projeto conjunto com o DFVLR-IBK, órgão de pesquisa aeroespacial da Alemanha.

Em 1987, a CHESF – Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco finalizou um inventário do potencial eólico da região Nordeste [2], realizado a partir de processamento/análise de registros anemográficos para um período de 5 anos (1977-1981) de 81 estações a 10m de altura, pertencentes à Rede Meteorológica do Nordeste – SUDENE. Os dados, processados pela Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, foram publicados em sumários e mapas de isolinhas para velocidades a 10m de altura. As maiores velocidades médias anuais encontradas para a altura de 10m foram de 5,5m/s e 4,3m/s, para Macau, RN e Caetitê, BA, respectivamente.

Também na década de 1980, diversos estudos regionais foram conduzidos para mapeamento eólico de es-

tados brasileiros, destacando-se os trabalhos realizados em Minas Gerais e no Rio Grande do Sul.

O primeiro “Atlas do Levantamento Preliminar do Potencial Eólico Nacional” foi iniciado em 1979, pela ELETROBRÁS-CONSULPUC [3]. Ainda na década de 1980, a ELETROBRÁS e a Fundação Padre Leonel Franca deram continuidade a esse trabalho, com a realização de um extenso estudo meteorológico que incluiu o processamento de dados de 389 estações anemométricas de 10m de altura, existentes em todo o território nacional, relacionadas no quadro 2:

QUADRO 2

Instituto Nacional de Meteorologia:	319
Ministério da Aeronáutica (aerportos):	51
CEMIG – Cia. Energética de Minas Gerais:	10
ELETROBRÁS:	2
PORTOBRÁS – Empresa de Portos do Brasil:	2
COPEL – Cia. Paranaense de Energia:	2

O “Atlas do Potencial Eólico Nacional” [4], resultante desse trabalho, indicou a tendência a velocidades maiores de vento no litoral brasileiro e também em áreas do interior favorecidas por relevo e baixa rugosidade. O mapeamento por isolinhas das velocidades médias a 10m de altura também possibilitou identificar locais com médias anuais entre 5m/s e 6m/s.

Todos esses estudos realizados até o final da década de 1980 foram prejudicados pela consideração exclusiva de registros anemométricos obtidos a alturas máximas de 10m. A maioria dos seus dados é mascarada pela influência de rugosidade e obstáculos próximos; esses dados não são necessariamente representativos das áreas geográficas em que estão instalados os equipamentos. Metodologias para a correção e extrapolação desses dados para alturas desejadas (WASP, por exemplo) ainda não se achavam disponíveis na época. Mesmo que existissem, aplicá-las ao território brasileiro em toda a sua extensão possivelmente implicaria custos e prazos excessivos, além de grandes margens de incerteza nos resultados.

Na década de 1990 iniciaram-se medições específicas para inventários de potencial eólico em torres de maior altura ( $\geq 20$ m) instaladas em locais especificamente selecionados em diversas regiões do Brasil: litoral do Ceará e Estados da Bahia, Minas Gerais e Paraná.

Em 1996, um relatório da CHESF [5] apresentou um estudo do potencial eólico do litoral do Ceará e do Rio Grande do Norte, já a partir dessas primeiras medições na região. Simulações computacionais com uso de curvas de desempenho de turbinas de 500kW e 600kW indicaram a possibilidade de geração de 9,55 TWh/ano e 2,96 TWh/ano com a ocupação de 10% dos litorais do Ceará e Rio Grande do Norte, respectivamente.

Em 1999, a COPEL publicou o “Mapa do Potencial Eólico do Estado do Paraná”, a partir das medições efetuadas por 5 anos em 25 locais especialmente selecionados, em torres de 18m a 64m de altura. Esse mapa foi produzido na resolução de 2km a partir do software WindMap, com utilização de modelos de geoprocessamento de relevo e rugosidade do Estado do Paraná. Além de revelar áreas de grande potencial eólico no interior do Paraná, o trabalho indicou um potencial de geração eólica de 5,8 TWh/ano no estado, utilizando-se apenas as áreas com velocidades médias anuais superiores a 6,5m/s.

Com a aceleração mundial do aproveitamento eólio-elétrico em escala e a instalação das primeiras usinas eólicas no Brasil, no final da década de 1990, iniciaram-se as primeiras medições anemométricas específicas para estudos de viabilidade, com uso de torres de 30-50m e equipamentos com precisão e procedimentos requeridos para a finalidade. Essas medições concentraram-se inicialmente nos Estados do Pará, Ceará, Paraná, de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul.

Já resultante dessas medições mais precisas, a Secretaria da Infra-Estrutura do Governo do Estado do Ceará publicou em 2001 o “Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará”. Também com a utilização da metodologia WindMap, os mapas temáticos de velocidades médias anuais de vento são apresentados na resolução de 500m, para as alturas de 50m e 70m. Destacaram-se as áreas de baixíssima rugosidade das dunas do litoral cearense, com velocidades médias anuais da ordem de 9m/s. A integração das áreas em software de geoprocessamento revela um potencial aproveitável da ordem de 12,0 TWh na altura de 50m e de 51,9 TWh na altura de 70m, para ventos médios anuais superiores a 7m/s.

## 1.2 O BRASIL: GEOGRAFIA

Este ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO cobre todo o território brasileiro. Com 8.514.215 km<sup>2</sup>, o Brasil é o quinto país do mundo e o maior da América Latina em área territorial. Estendendo-se entre as latitudes 5°16'N e 33°45'S e longitudes 32°23'W e 73°59'W (figura 1.1), o Brasil apresenta distintas regiões imersas em várias zonas de climas e regimes sinóticos de circulação atmosférica. Seus 7.367 km de extensão litorânea com o Oceano

\* As obras correspondentes às referências em algarismos arábicos entre colchetes encontram-se listadas na página 45



Atlântico constituem um complexo indutor de mecanismos de mesoescala ao longo dos quais ocorrem brisas marinhas de variadas amplitudes diurnas e sazonais.

O relevo interior (figura 1.2) contrapõe extensas planícies com altitudes médias inferiores a 250m – entre as quais se destacam as da Amazônia, do Pantanal e do Rio Grande do Sul – aos planaltos que se estendem do sul até a região central, com altitudes médias entre 750m e 1.000m. Ao contrário de seus vizinhos andinos a oeste, o Brasil não se caracteriza por grandes elevações. Em poucos locais a altitude ultrapassa 2.000m, e em seu ponto máximo, o Pico da Neblina (AM), atinge 3.014m.

No caso eólico, o relevo exerce distintas influências conforme o caso e a região: como obstáculo ao movimento da camada atmosférica inferior, como indutor de fenômenos de mesoescala (brisas montanha-vale) e como gerador de ondas e acelerações orográficas. Como a camada inferior da atmosfera tem espessura da ordem de 600m a 1.500m, áreas territoriais elevadas geralmente estão imersas em distintas camadas atmosféricas e regimes de vento.

Aliado aos regimes pluviais com origem no mecanismo de circulação atmosférica, o relevo brasileiro é responsável pelo notável aproveitamento hidrelétrico realizado em suas bacias, destacando-se as dos rios Paraná-Paraguai, São Francisco e Araguaia-Tocantins. No final do século passado, a eletricidade de fonte hídrica supria cerca de 93% do consumo brasileiro. Visíveis na figura 1.2, essas principais bacias e respectivas áreas alagadas por reservatórios hidrelétricos encontram-se relativamente distantes dos principais centros de consumo, indicados em vermelho.

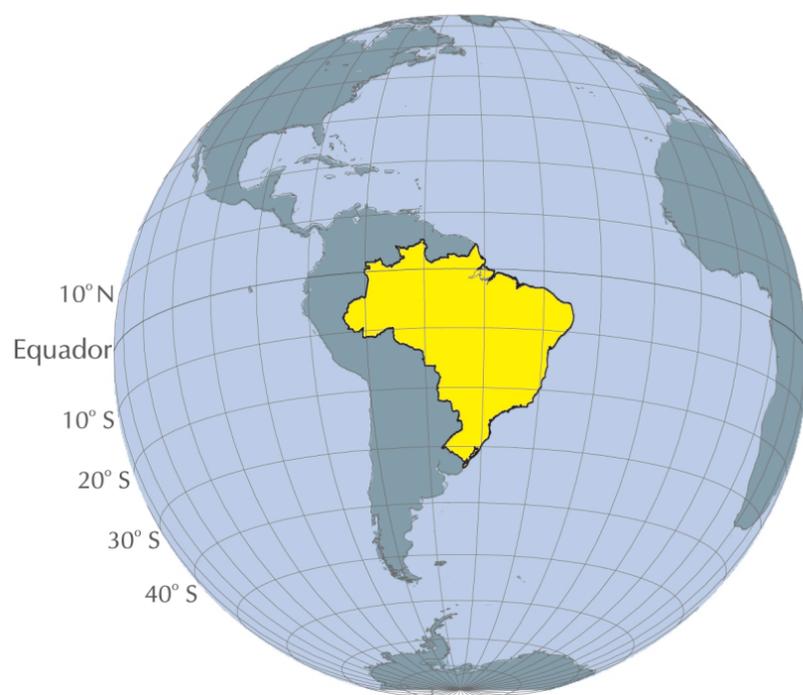


Figura 1.1 – Posição geográfica do Brasil, projeção ortográfica

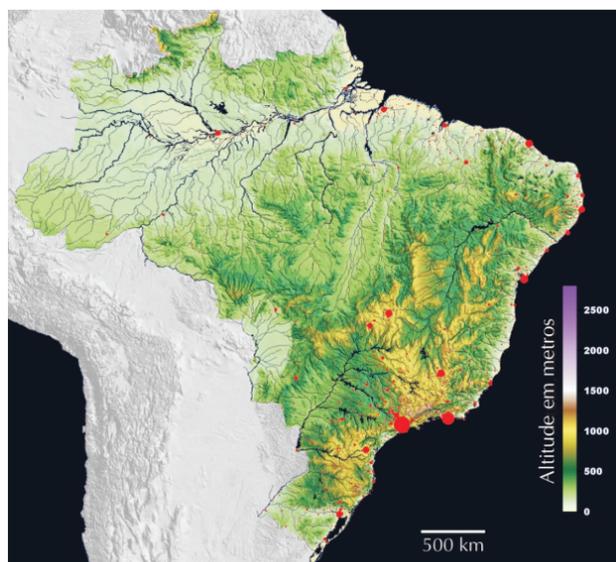


Figura 1.2 – Relevo

A população brasileira é de cerca de 170 milhões de habitantes, 80% concentrados em centros urbanos e 20% dispersos no meio rural. Existem regiões de baixa densidade demográfica, a exemplo da Amazônia, em contraste com regiões de alta densidade, como a Sudeste.

Grande parte do território nacional é coberto por florestas, como se apresenta na figura 1.3.

O Governo brasileiro, por intermédio do Ministério de Minas e Energia, vem desenvolvendo esforços para a universalização da oferta de energia elétrica a todo o meio rural, bem como para a crescente e necessária interligação do sistema elétrico em escala nacional. Além da expansão territorial do sistema elétrico, as taxas de crescimento econômico de um país em desenvolvimento como o Brasil requerem a expansão contínua da capacidade geradora, a taxas compatíveis. Nesse contexto, a tecnologia eólico-elétrica interligada à rede emerge como uma das alternativas de geração complementar. Este ATLAS insere-se nas ações de inventário estratégico das fontes energéticas existentes no território brasileiro.

### 1.3 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Em 1999, cerca de 93% do consumo total (315 TWh) de energia elétrica no Brasil foram supridos por usinas hidrelétricas [6]. Desse percentual, 39,6% foram consumidos pelos setores residencial e comercial; 44%, pelo setor industrial; e 3,9%, pelo setor agropecuário.

O desenvolvimento econômico do país potencializa necessidades de expansão da oferta de energia em níveis acima de 5% ao ano, pelos próximos 10 anos [6].

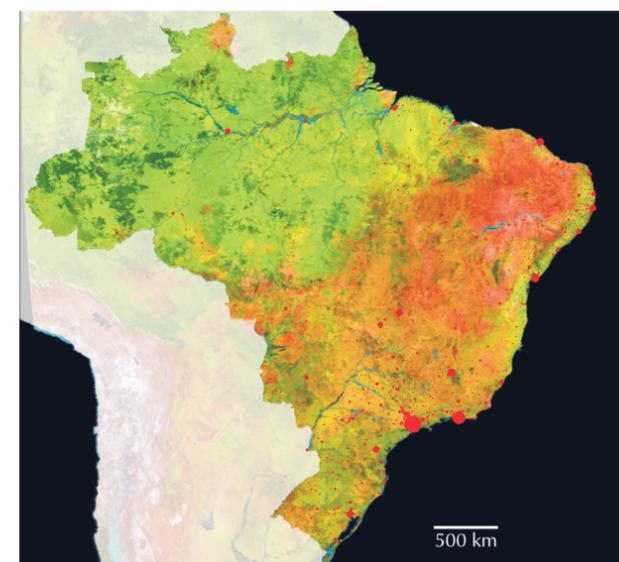


Figura 1.3 – Mosaico de imagens compostas do satélite SPOT

Uma síntese do sistema elétrico brasileiro: geração, transmissão e centros urbanos é mostrada na figura 1.4, na qual pode-se notar:

- ☀ o sistema de transmissão já é interligado em escala nacional, com tendência ao seu fortalecimento à medida que novos investimentos programados forem realizados;
- ☀ os centros de consumo estão relativamente afastados dos principais centros de geração, com distâncias da ordem de 500km a 1.000km. O volume maior de geração e consumo está concentrado na região Sudeste;
- ☀ áreas reconhecidamente importantes para o aproveitamento do potencial eólico no Brasil, como os litorais Nordeste e Sul, encontram-se próximas às extremidades do sistema de transmissão, distantes dos principais centros de geração elétrica.

A figura 1.4 não mostra as malhas de subtransmissão e distribuição elétrica, as quais também encontram-se em notável expansão no âmbito do programa governamental que visa ao atendimento de todos os consumidores rurais do país.

Em 1999, 94,9% das residências de todo o Brasil já eram atendidas com energia elétrica [6].



1. INTRODUÇÃO

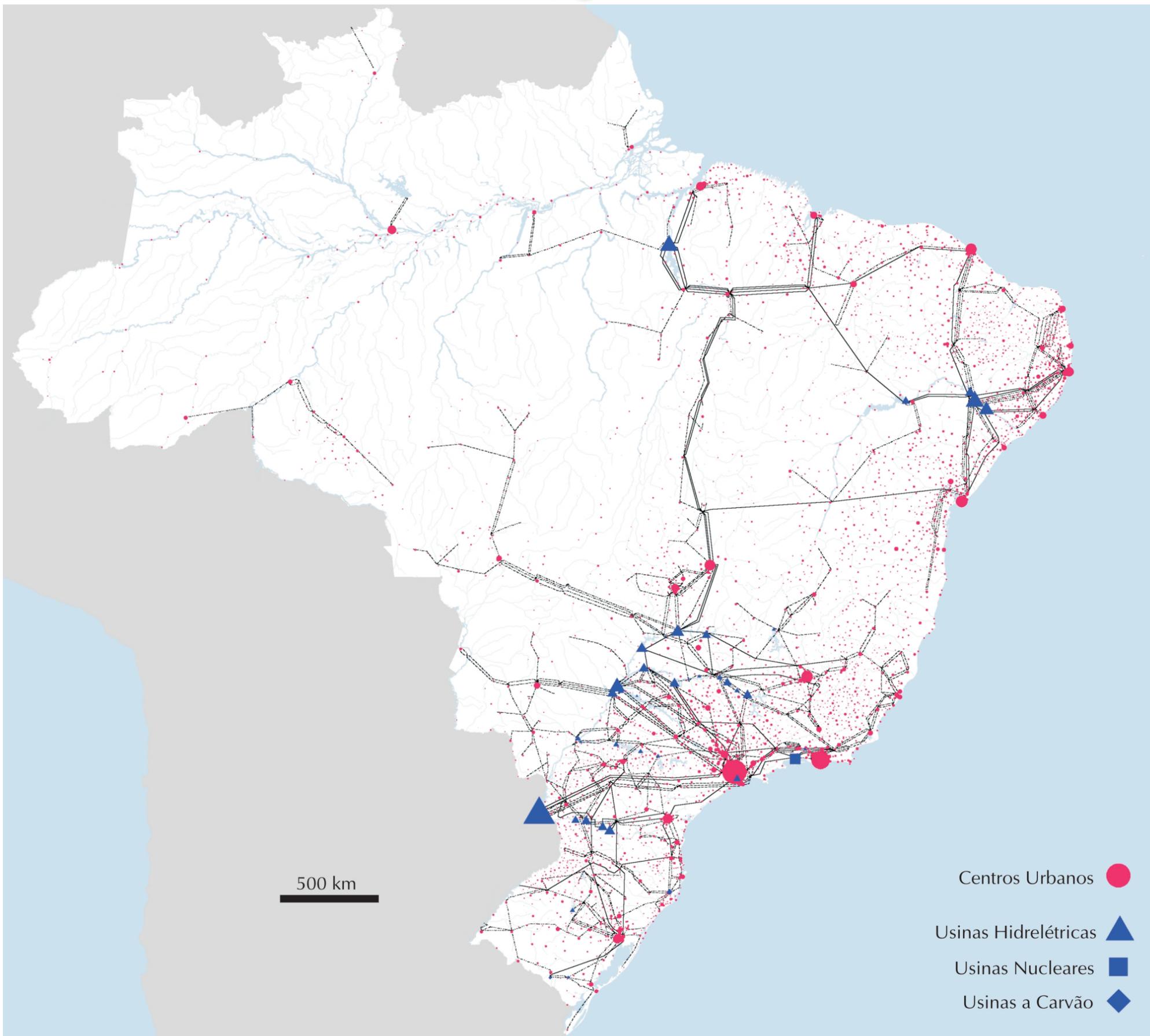


Figura 1.4 – Síntese do sistema elétrico brasileiro: geração, transmissão e centros urbanos



#### 1.4 CLIMA E SAZONALIDADE

Pela sua extensão em latitude, o Brasil apresenta diferentes climas que variam do equatorial (úmido e semi-úmido), na região Norte, ao subtropical, na região Sul. Na figura 1.5 são apresentadas as médias climatológicas sazonais de precipitação e temperatura [7], que ilustram os diferentes tipos de clima e suas sazonalidades. As velocidades médias sazonais de vento (a 50m de altura), resultantes do presente ATLAS, estão adicionadas à figura 1.5 para ilustrar a complementaridade sazonal entre o potencial eólico e o hídrico, sendo este último fundamentalmente associado à precipitação pluviométrica.

O norte do país é dominado pelo clima equatorial úmido, caracterizado por temperaturas médias superiores a 25°C e chuvas acima de 2.000mm/ano. É a região da Floresta Amazônica, gerada e mantida pela maior intensidade pluviométrica, cuja causa é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), para onde convergem os ventos de superfície oriundos dos dois hemisférios terrestres. Uma área de clima equatorial semi-úmido ocorre mais ao norte, abrangendo a metade nordeste do Estado de Roraima e o noroeste do Pará, com totais pluviométricos entre 1.500mm/ano e 2.000mm/ano.

O clima tropical abrange praticamente toda a costa, desde o Maranhão até partes de São Paulo, estende-se a oeste até Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, inclui partes do Nordeste e estados centrais como Goiás e Tocantins. É caracterizado por chuvas com sazonalidade bem definida: estação seca de 4-5 meses (abril-setembro) e chuvosa (novembro-março). Essa sazonalidade tem importante papel energético no sistema elétrico brasileiro, de geração predominantemente hidráulica, pois suas principais bacias de aproveitamento têm origem nessa região (figura 1.2). Ao longo das serras de Minas Gerais e São Paulo o clima é tropical de altitude, com temperatura média anual pouco inferior a 20°C.

No Sertão nordestino destaca-se um enclave de clima semi-árido, com temperaturas médias anuais superiores a 25°C, pluviosidade inferior a 750mm/ano e longas estiagens de mais de 8 meses por ano. Abaixo do Trópico de Capricórnio (latitude 23°27'S) a região Sul é dominada pelo clima subtropical, cujas características térmicas e pluviométricas são similares às do clima temperado, com temperaturas médias anuais inferiores a 20°C e chuvas bem distribuídas ao longo do ano.

As amplitudes térmicas anuais são menores na grande região mais próxima ao Equador, aumentando em direção ao extremo sul do país.

Entre os grandes fatores que influem no clima brasileiro estão a Zona de Convergência Intertropical ao nor-

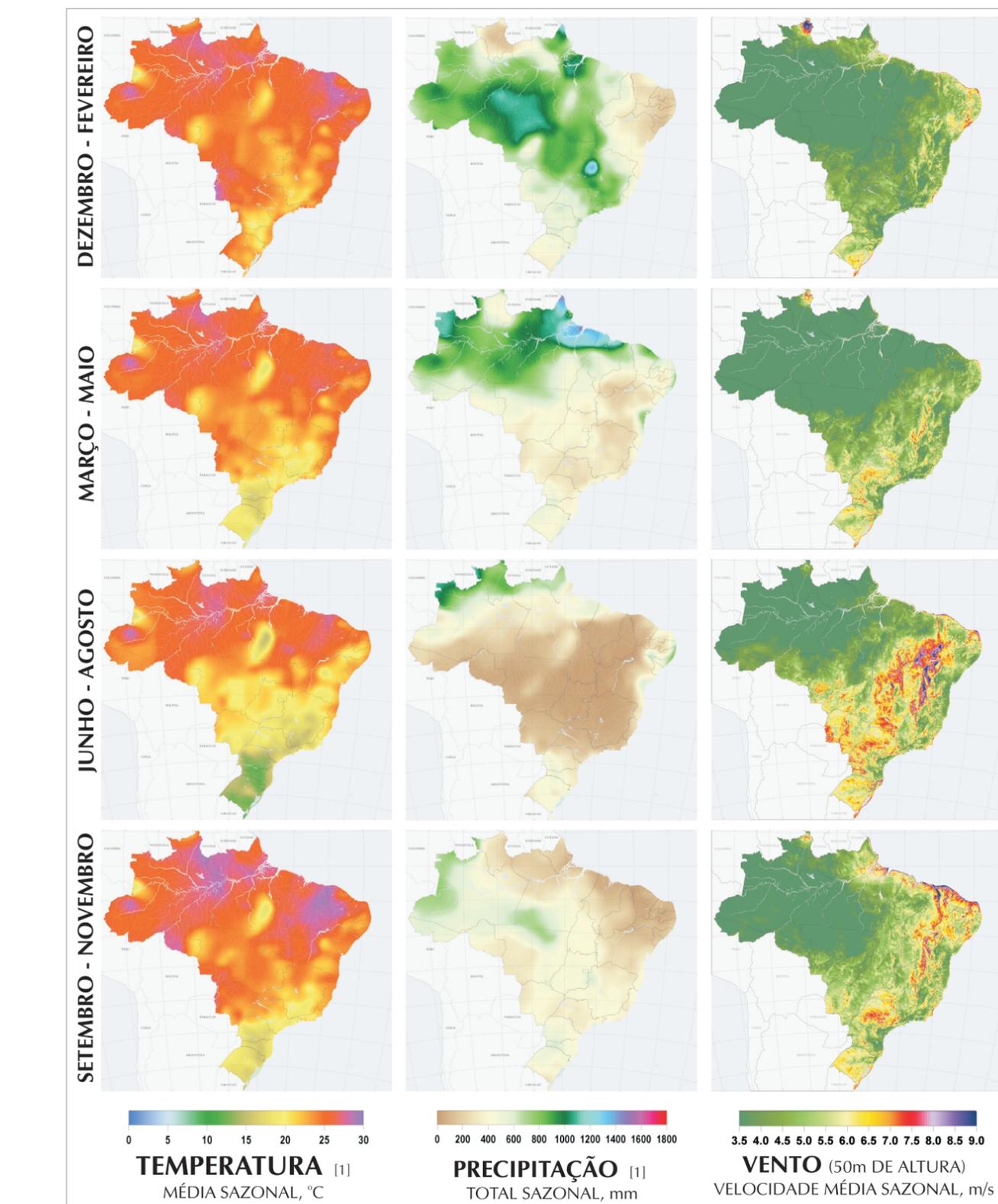


Figura 1.5 – Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento sobre o Brasil

te, móvel ao longo do ano e para a qual convergem os ventos alísios; as distintas ações exercidas pelo relevo continental, incluindo-se a formidável muralha à circulação atmosférica exercida pelo maciço dos Andes no extremo oeste do continente sul-americano; a ação contínua da alta pressão do Anticiclone Tropical Atlântico; e a ação periódica irregular das massas de

ar polares que adentram as regiões Sul e Sudeste em maior intensidade. A Amazônia representa uma região bastante peculiar na Terra, pela extensão da área ocupada por florestas equatoriais e pela intensidade e o volume em que ocorrem as trocas de energia entre água e atmosfera, em um sistema superfície-atmosfera fortemente acoplado.



## 2. FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA

### 2.1 ORIGEM

O vento – atmosfera em movimento – tem sua origem na associação entre a energia solar e a rotação planetária. Todos os planetas envoltos por gases em nosso sistema solar demonstram a existência de distintas formas de circulação atmosférica e apresentam ventos em suas superfícies. Trata-se de um mecanismo solar-planetário permanente; sua duração é mensurável na escala de bilhões de anos. O vento é considerado *fonte renovável de energia*.

### 2.2 HISTÓRICO

Os primeiros aproveitamentos da força dos ventos pelo homem têm data bastante imprecisa, mas, certamente, ocorreram há milhares de anos, no Oriente. Eram provavelmente máquinas que utilizavam a força aerodinâmica de arrasto, sobre placas ou velas, para produzir trabalho.

Estima-se que a partir da Idade Média o homem passou a utilizar em maior escala as forças aerodinâmicas de sustentação, permitindo as grandes navegações e também maior eficiência às máquinas eólicas. Possivelmente, máquinas eólicas movidas por forças de sustentação foram introduzidas na Europa pelas Cruzadas, por volta do século XI [8]. O certo é que no século XIV, na Holanda, essas máquinas já apresentavam grande evolução técnica e de capacidade em potência e ampla aplicação como fonte de energia, principalmente em moagem de grãos, serrarias e bombeamento d'água. À época da descoberta do Brasil, em 1500, havia muitos milhares de moinhos de vento em toda a Europa, da Península Ibérica aos países nórdicos. Durante os séculos seguintes, as máquinas eólicas tiveram grandemente expandida a sua aplicação na Europa: em fabricação de papel para atender à demanda após a invenção da imprensa, em produção de óleos vegetais e até em grandes projetos de drenagem [8]. Com a expansão do uso de máquinas a vapor, no século XIX, os moinhos de vento europeus entraram gradualmente em desuso.

Outro surto de aplicação em larga escala de máquinas eólicas deu-se nos Estados Unidos, no século XIX. Após a abolição da escravatura naquele país, em 1863, iniciou-se a disseminação da utilização do catavento multipá para bombeamento d'água. Cataventos multipás chegaram a ser produzidos industrialmente em escalas de centenas de milhares de unidades/ano, por diversos fabricantes, o que possibilitou preços acessíveis a grande parte da po-

pulação. Ao mesmo tempo em que constituiu um importante fator da economia, muitos historiadores atribuem parcela do sucesso e da rapidez da expansão colonizadora do Oeste à disponibilidade de cataventos multipás de baixo custo – que facilitaram o acesso à água e a fixação de apoios em grandes áreas áridas ou semi-áridas. A tabela 2.1 transcreve o U.S. Statistical Abstract de 1919 [9], que reporta a evolução da indústria de cataventos multipás nos EUA ao longo de 40 anos. Estima-se que mais de 6 milhões de cataventos multipás já foram produzidos no mundo [8].

ANO	EMPREGADOS	FATURAMENTO (US\$)
1879	596	1.011.000
1889	1110	2.475.000
1899	2045	4.354.000
1909	2337	6.677.000
1919	1932	9.933.000

Tabela 2.1 – Indústria de cataventos multipás nos EUA [13]

O uso do catavento multipás estadunidense expandiu-se pelos diversos continentes, inclusive no Brasil. Na década de 1880 encontrava-se quase uma dezena de fabricantes, em todo o país.

Para a geração de energia elétrica, também nos Estados Unidos, a partir da década de 1930, iniciou-se uma ampla utilização de pequenos aerogeradores para carregamento de baterias, o que favoreceu o acesso à energia elétrica aos habitantes do meio rural. Entre 1930 e 1960, dezenas de milhares desses aerogeradores foram produzidos e instalados nos Estados Unidos, bem como exportados para diversos países. A produção dessas máquinas foi desativada gradualmente nas décadas de 1950 e 1960, à medida que as redes de eletrificação passaram a dominar o atendimento rural.

A geração de eletricidade em grande escala, para alimentar de forma suplementar o sistema elétrico com o uso de turbinas eólicas de grande porte, é tecnologia que existe há diversas décadas. Desde a fase experimental, ressaltam-se os primeiros aproveitamentos eólico-elétricos realizados durante as décadas de 1940 e 1950 nos Estados Unidos (Smith-Putnam) e Dinamarca (Gedser). Pode-se dizer que o precursor das atuais turbinas eólicas surgiu na Alemanha (Hütter, 1955), já com pás fabricadas em materiais compostos, controle de passo e torre tubular esbelta.

Na década de 1970 e até meados da década de 1980, após a primeira grande crise de preços do petróleo, diversos países – inclusive o Brasil –

dispenderam esforços em pesquisa sobre utilização da energia eólica para a geração elétrica. Data dessa época a turbina DEBRA 100kW, desenvolvida em conjunto entre os institutos de pesquisa aeroespacial do Brasil e da Alemanha (DEBRA = DEUTSCHE BRASILEIRA).

Entretanto, foi a partir de experiências de estímulo ao mercado, realizadas na Califórnia (década de 1980), Dinamarca e Alemanha (década de 1990), que o aproveitamento eólico-elétrico atingiu escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico, em termos de geração e economicidade. O desenvolvimento tecnológico passou a ser conduzido pelas nascentes indústrias do setor, em regime de competição, alimentadas por mecanismos institucionais de incentivo – especialmente via remuneração pela energia produzida. Características também marcantes desse processo foram: (a) devido à modularidade, o investimento em geração elétrica passou a ser acessível a uma nova e ampla gama de investidores; (b) devido à produção em escalas industriais crescentes, o aumento de capacidade unitária das turbinas e novas técnicas construtivas, possibilitaram-se reduções graduais e significativas no custo por kilowatt instalado e, conseqüentemente, no custo de geração. O principal problema ambiental inicial – impactos das pás em pássaros – praticamente desapareceu com as turbinas de grande porte e menores velocidades angulares dos rotores. Por se mostrar uma forma de geração praticamente inofensiva ao meio ambiente, sua instalação passou a simplificar os minuciosos – e demorados – estudos ambientais requeridos pelas fontes tradicionais de geração elétrica, bastando, em muitos casos, aos poderes concedentes a delimitação das áreas autorizadas para sua instalação. Esse último fato, aliado às escalas industriais de produção de turbinas, tornaram a geração eólico-elétrica uma das tecnologias de maior crescimento na expansão da capacidade geradora. A figura 2.1 apresenta a evolução cumulativa da capacidade eólico-elétrica instalada no mundo, até 31/12/2000 [10, 11].

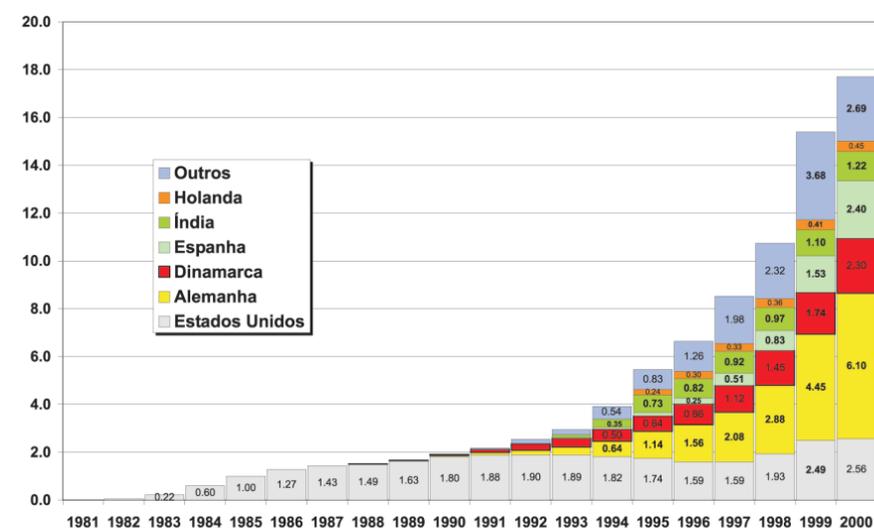


Figura 2.1 – Evolução mundial da capacidade eólico-elétrica instalada, em GW [9, 10]



Como exemplo, apenas na Alemanha – densamente povoada – foram adicionados 1.665 MW eólio-elétricos no ano 2000, totalizando 6.094,8 MW instalados naquele país até 31/12/2000 [10]. Em 2000, o incremento da capacidade eólica também foi notável na Espanha, Índia e China.

### 2.3 PRINCÍPIOS E TECNOLOGIA

Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica. A potência elétrica é função do cubo da velocidade de vento  $v$ :

$$P(\text{Watts}) = \frac{1}{2} \rho A_r v^3 C_p \eta$$

$\rho$  = densidade do ar em  $\text{kg/m}^3$

$A_r = \pi \cdot D^2/4$ , em que  $D$  é o diâmetro do rotor

$C_p$  = coeficiente aerodinâmico de potência do rotor

$\eta$  = eficiência do conjunto gerador/transmissão

A absorção de energia cinética reduz a velocidade do vento a jusante do disco do rotor; gradualmente, essa velocidade recupera-se ao misturar-se com as massas de ar predominantes do escoamento livre. Das forças de sustentação aerodinâmica nas pás do rotor resulta uma esteira helicoidal de vórtices, a qual também gradualmente dissipa-se. Após alguma distância a jusante da turbina, o escoamento praticamente recupera as condições de velocidade originais e turbinas adicionais podem ser instaladas, minimizando as perdas de desempenho causadas pela interferência da turbina anterior. Na prática, essa distância varia com a velocidade do vento, as condições de operação da turbina, a rugosidade de terreno e a condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera. De modo geral, uma distância considerada segura para a instalação de novas turbinas é da ordem de 10 vezes o diâmetro  $D$ , se instalada a jusante, e 5 vezes  $D$ , se instalada ao lado, em relação ao vento predominante (figura 2.2).

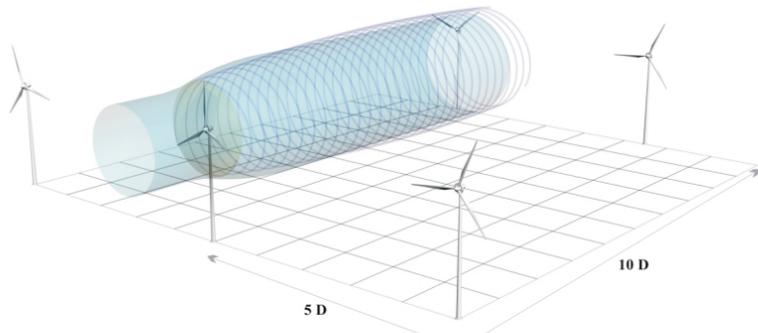


Figura 2.2 – Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas eólicas

A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro  $D$ . Usualmente, a rotação é otimizada no projeto, para minimizar a emissão de ruído aerodinâmico pelas pás. Uma fórmula prática para a avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina eólica é:

$$\text{rpm} = 1150/D$$

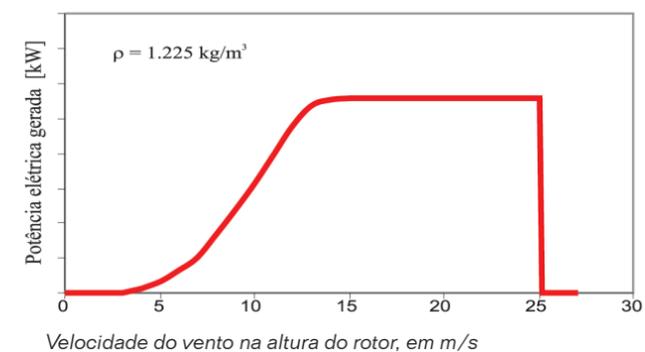
À medida que a tecnologia propicia dimensões maiores para as turbinas, a rotação reduz-se: os diâmetros de rotores no mercado atual variam entre 40m e 80m, o que resulta em rotações da ordem de 30rpm a 15rpm, respectivamente. As baixas rotações atuais tornam as pás visíveis e evitáveis por pássaros em voo. Quanto aos níveis de ruído, turbinas eólicas satisfazem os requisitos ambientais mesmo quando instaladas a distâncias da ordem de 300m de áreas residenciais. Esses aspectos contribuem para que a tecnologia eólio-elétrica apresente o mínimo impacto ambiental, entre as fontes de geração na ordem de gigawatts.



Figura 2.3 – Usina eólico-elétrica da Prainha, Ceará

Uma usina eólica é um conjunto de turbinas eólicas dispostas adequadamente em uma mesma área (figuras 2.2 e 2.3). Essa proximidade geográfica tem a vantagem econômica da diluição de custos: arrendamento de área, fundações, aluguel de guindastes e montagem, equipes de operação, manutenção e estoques de reposição. Usinas eólicas com turbinas de projeto consolidado e equipes de manutenção adequadamente capacitadas apresentam fatores de disponibilidade típicos da ordem de 0,98.

A figura 2.4 mostra a forma típica de curva de potência de turbinas eólicas, e a figura 2.5, diferentes fases de sua fabricação. Usualmente, a geração elétrica inicia-se com velocidades de vento da ordem de 2,5 - 3,0m/s; abaixo desses valores, o conteúdo energético do vento não justifica aproveitamento. Velocidades superiores a aproximadamente de 12,0m/s a 15,0m/s ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo de turbina. Em ventos muito fortes ( $v > 25\text{m/s}$  no exemplo), atua o sistema automático de proteção. Ventos muito fortes têm ocorrência rara e negligenciável em termos de aproveitamento e a turbulência associada é indesejável para a estrutura da máquina; nesse caso, a rotação das pás é reduzida (passo ou estol) e o sistema elétrico do gerador é desconectado da rede elétrica.



Velocidade do vento na altura do rotor, em m/s

Figura 2.4 – Curva típica de potência de turbinas eólicas

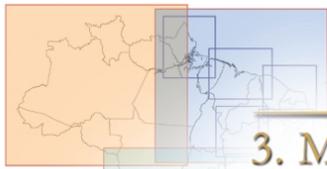
Turbinas eólicas de grande porte têm controle inteiramente automático, por meio de atuadores rápidos, software e microprocessadores alimentados por sensores duplos em todos os parâmetros relevantes. Usualmente, utiliza-se telemetria de dados para monitoramento de operação e auxílio a diagnósticos/manutenção.

As curvas de potência fornecidas por fabricantes de turbinas, geralmente medidas por órgãos credenciados e independentes, usualmente referem-se a velocidades de vento quase instantâneas (médias de 10 minutos) e densidade  $\rho = 1,225\text{kg/m}^3$  (ISA, 15°C ao nível do mar). No caso das temperaturas de grande parte do território brasileiro, correções para a densidade do ar local são necessárias.

O cálculo da energia gerada – anual ou mensal – é realizado pela multiplicação dos valores de potência gerada pelo tempo de duração de ocorrência associado a intervalos de velocidades de vento. A duração de ocorrência de uma velocidade  $v$  é aproximada por equações estatísticas (usualmente Rayleigh ou Weibull). A distribuição mais geral de Weibull é discutida no próximo capítulo.



Figura 2.5 – Vista geral da fabricação das pás e montagem da nacelle (cortesia Wobben-ENERCON E TECSIS)



## 3. METODOLOGIA

### 3.1 O SISTEMA MESOMAP

O MesoMap é um conjunto integrado de modelos de simulação atmosférica, bases de dados meteorológicos e geográficos, redes de computadores e sistemas de armazenamento. Seu desenvolvimento deu-se nos últimos três anos, com suporte do NYSERDA - New York State Energy Research and Development Authority e DoE - US Department of Energy. Além de no projeto inicial de mapeamento eólico do Estado de New York, o MesoMap tem sido ou está sendo utilizado em projetos similares nas Américas do Norte e Central, Europa e Ásia, e foi utilizado para o Brasil neste ATLAS. O MesoMap tem sido aferido por medições anemométricas de alta qualidade em uma grande variedade de regimes de vento.

O MesoMap oferece diversas vantagens sobre métodos tradicionais de mapeamento de recursos eólicos. Primeiro, ele obtém representatividade para grandes áreas continentais sem a necessidade de dados anemométricos de superfície efetivamente medidos – característica importante para regiões como o Norte e o Centro-Oeste brasileiro, onde medições consistentes e confiáveis são poucas. Segundo, o MesoMap modela importantes fenômenos meteorológicos não considerados em modelos mais simplificados de escoamento de ventos (por exemplo, WAsP – Jackson-Hunt, ou WindMap – NOABL). Esses fenômenos incluem ondas orográficas, ventos convectivos, brisas marinhas e lacustres e ventos térmicos descendentes de montanhas. Finalmente, o MesoMap simula diretamente os regimes de vento de longo prazo, diminuindo a incerteza intrínseca de ajustes climatológicos baseados em correlações de registros de vento de curto e longo prazos obtidos por medições em superfície.

#### 3.1.1 MODELOS

O núcleo do Sistema MesoMap é o MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System), um modelo numérico de previsão de tempo, estado-da-arte no setor, desenvolvido desde o início dos anos 1980 pela empresa MESO Inc., que integra a joint-venture TrueWind Solutions e LLC. O MASS é similar a outros modelos de previsão de tempo, como ETA e Mm5. Ele incorpora os princípios físicos fundamentais de movimentação atmosférica, que incluem:

- ✱ conservação de massa, momentum e energia;
- ✱ mudanças de fase do vapor d'água;
- ✱ módulo de energia cinética com turbulência, que simula os efeitos viscosos e de estabilidade térmica sobre o gradiente vertical de vento.

Como é um modelo dinâmico, o MASS simula a evolução das condições atmosféricas em intervalos de tempo necessariamente de poucos segundos. Disso resultam grandes demandas computacionais, que requerem o uso de supercomputadores ou redes de poderosas estações de trabalho com múltiplos processadores em paralelo. Adicionalmente, o MASS também está acoplado a dois módulos de cálculo mais rápido: ForeWind, um modelo dinâmico de camada-limite viscosa desenvolvido pela TrueWind Solutions, e WindMap (versão especial adaptada para esta finalidade), um modelo tridimensional de consistência de massa com interface para dados geográficos de geoprocessamento (SIG) de alta resolução, desenvolvido pela Brower&Co, também integrante da joint-venture TrueWind Solutions. Para áreas e casos específicos, um desses dois módulos é escolhido para aumentar a resolução espacial das simulações do MASS.

#### 3.1.2 DADOS DE ENTRADA

Diversos dados geográficos e meteorológicos são utilizados como entrada para o Sistema MesoMap. Os principais dados geográficos de entrada são topografia, uso do solo e índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN).

O modelo de relevo utilizado pelo MesoMap neste ATLAS foi desenvolvido pela US Geological Survey (USGS), na forma de malha digital de cotas, a partir de diversas fontes de dados, com resolução horizontal de 1km. O modelo USGS foi aferido e eventualmente corrigido em algumas áreas dos Estados do Ceará e de Santa Catarina, onde existiam modelos digitais em maior resolução desenvolvidos pela Camargo Schubert a partir das curvas de nível de cartas 1:50.000 ou 1:100.000 digitalizadas (SUDENE ou IBGE). A figura 3.2(p.17) apresenta o modelo de relevo do Brasil adotado no ATLAS. Para efeito de visualização e síntese, às imagens está sobreposto o relevo sombreado com iluminação a partir da direção predominante geral sobre o Brasil – Leste-Nordeste. Dessa forma são ressaltadas as encostas expostas e sombreados os declives mais pronunciados a jusante.

Os dados de uso do solo utilizados no presente ATLAS foram produzidos em um projeto de cooperação entre a US Geological Survey, a Universidade de Nebraska e o Joint Research Centre (JRC) da Comissão Européia. Assim como os mapas de IVDN, seu desenvolvimento teve como base a interpretação de dados do AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer (Radiômetro Avançado de Resolução Muito Alta). Tanto os dados de uso do solo quanto os de IVDN são convertidos pelo MesoMap em parâmetros biofísicos tais como: modelos de rugosidade, albedo, emissividade, e outros. A resolução horizontal nominal desses conjuntos de dados também é de 1km. O modelo de rugosidade do território brasileiro adotado no ATLAS é apresentado na figura 3.4(p.19). Para comparação, um mosaico

de imagens SPOT é apresentado na figura 3.3(p.18).

Como foram utilizados modelos com resolução horizontal de 1km para os dados geográficos de entrada na simulação para o presente ATLAS, os resultados de saída do Sistema MesoMap foram mapas de parâmetros estatísticos de vento – com maior interesse final nas velocidades médias – na resolução horizontal de 1km. Resoluções maiores são plenamente possíveis para estudos posteriores, desde que os dados geográficos correspondentes estejam disponíveis.

Os principais dados de entrada meteorológicos foram os provenientes de reanálises, radiossondagens e temperaturas sobre a terra e os oceanos. Entre estes, têm maior importância as reanálises, que são constituídas de um banco de dados em malha geográfica global. Nos modelamentos deste ATLAS foi utilizado o banco de dados de reanálises produzido pelo US National Center for Atmospheric Research (NCAR). Esses dados contêm seqüências de parâmetros meteorológicos dos principais níveis de toda a atmosfera terrestre, em intervalos de 6 horas. Em conjunto com dados existentes de radiossondas e temperaturas da superfície terrestre, os dados de reanálises estabelecem as condições de contorno iniciais, bem como as condições de contorno laterais atualizadas para a progressão das simulações do MesoMap. Entretanto, o modelo determina por si a evolução das condições meteorológicas dentro da região em estudo, com base nas interações entre os distintos elementos da atmosfera e entre a atmosfera e a superfície terrestre.

Como os dados de reanálises são estabelecidos em uma malha com resolução horizontal relativamente baixa, de 200km, o Sistema MesoMap precisa ser rodado de forma sucessiva em áreas que são subdivididas em mosaicos de resolução gradualmente maior, em que cada malha utiliza como dados de entrada os parâmetros da respectiva região anterior, até que a resolução desejada seja atingida. A malha inicial pode abranger milhares de quilômetros.

#### 3.1.3 O PROCESSO DE MAPEAMENTO

Os mapas de potencial eólico foram calculados a partir de simulações produzidas pelo MesoMap para 360 dias, extraídos de um período de 15 anos. Os dias foram escolhidos por meio de amostragem estratificada aleatória, de forma a considerar cada mês e estação do ano de forma representativa.

De cada simulação foram geradas as variáveis de vento e meteorológicas (temperatura, pressão, umidade relativa, energia cinética turbulenta, fluxo de calor, e outras) ao longo dos nós de malha do modelo. Essas variáveis foram armazenadas em arquivos de dados horários. Ao término do processo para a área total do Brasil, os milhares de arquivos de dados foram processados e sin-

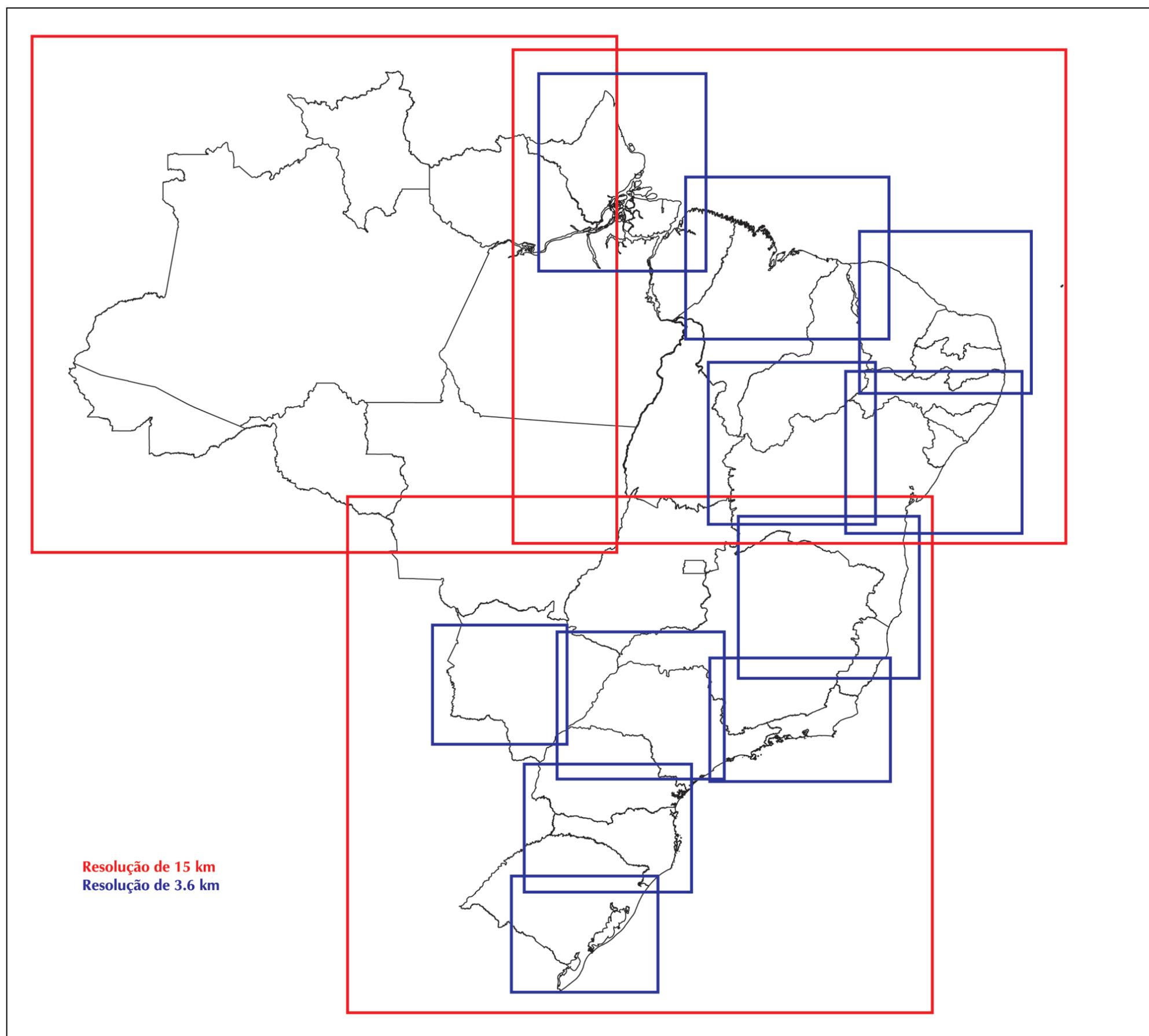
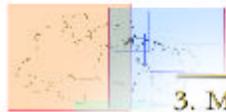


Figura 3.1 – Regiões utilizadas no cálculo de mesoescala



### 3. METODOLOGIA

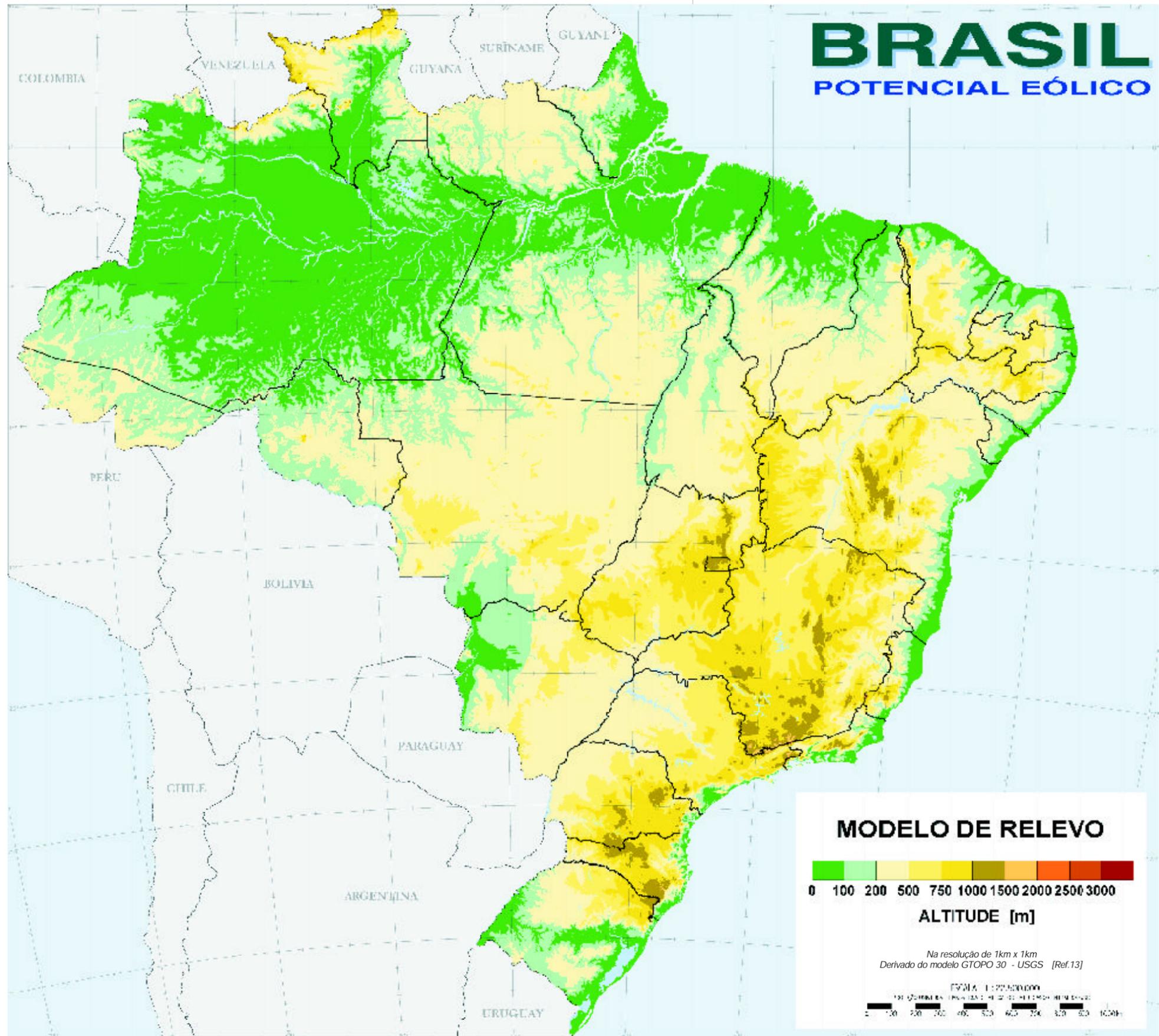


Figura 3.2 – Modelo de relevo

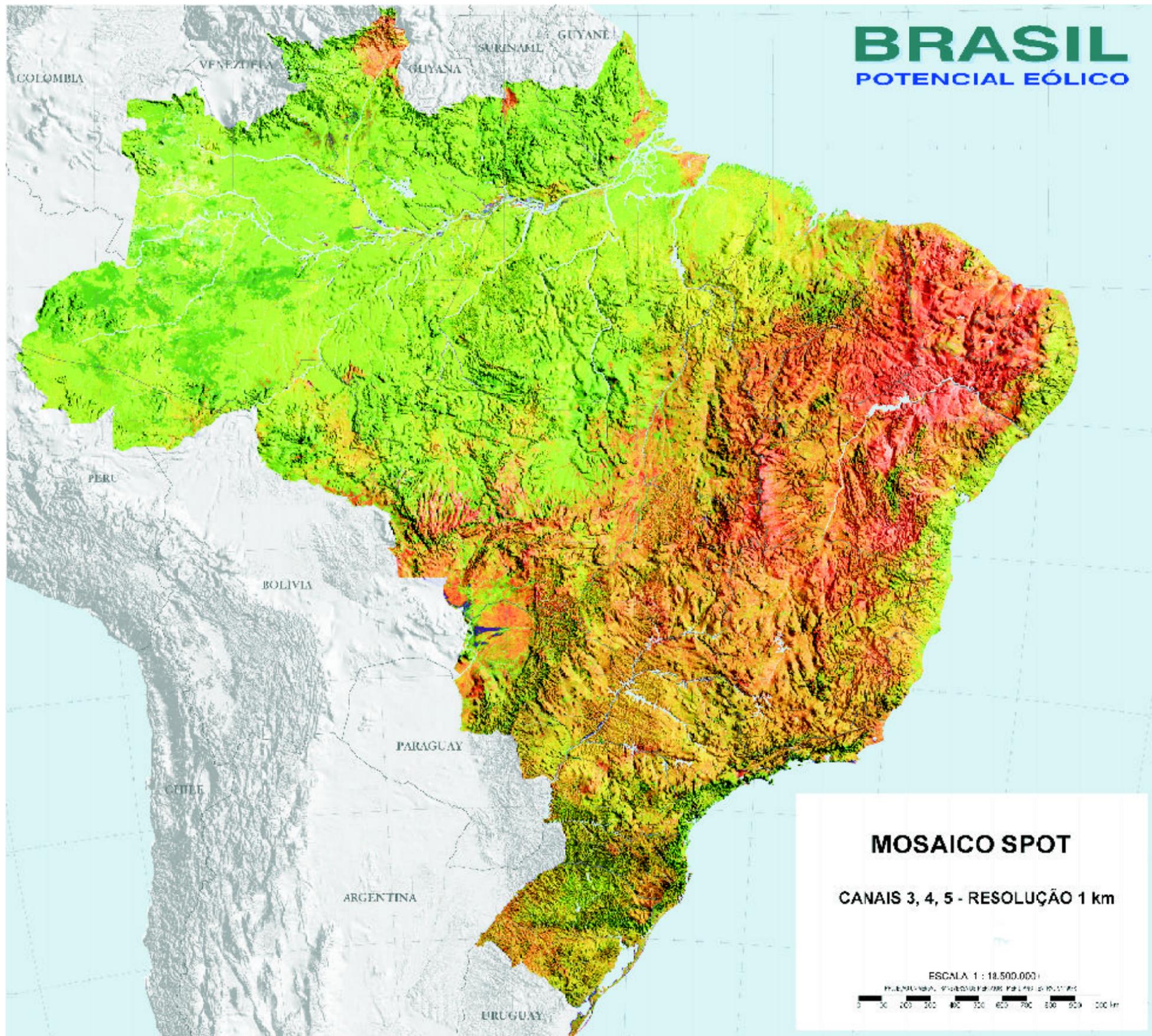


Figura 3.3 – Mosaico de imagens de satélite (spot Image), sobreposto ao relevo sombreado



Figura 3.4 – Modelo de rugosidade, sobreposto ao relevo sombreado



tetizados em formatos apropriadamente escolhidos, tais como mapas temáticos por códigos de cores que apresentam velocidades médias, mapas de rosa dos ventos, arquivos e gráficos contendo os parâmetros das distribuições estatísticas associadas às velocidades de vento.

Numa etapa inicial, esse modelamento de mesoescala no MASS foi realizado para todo o território brasileiro na resolução de 15km. A partir da identificação das áreas de maior interesse quanto ao potencial eólico, sub-regiões foram modeladas novamente, com a resolução horizontal de 3,6km, para assegurar maior exatidão nos resultados, visto que essa resolução permite maior representatividade na simulação de mecanismos tais como brisas marinhas, descolamento de escoamento em relevos complexos, entre outros. Testes realizados com resoluções inferiores a 3,6km não indicaram ganhos substanciais nos resultados, com a contrapartida de tempos de processamento computacional aumentados exponencialmente com a quantidade de elementos nos modelos de entrada. A figura 3.1 apresenta as regiões simuladas em resolução de 15km e 3,6km. A transposição das simulações MASS na resolução de 3,6km para a resolução final de 1km foi realizada pelo WindMap.

### 3.2 RESULTADOS DO MESOMAP

Entre os principais resultados, destacam-se os mapas temáticos por códigos de cores, que permitem visualização rápida do conjunto de dados sobre o território em estudo. O mapa de maior interesse indica, para a altura escolhida de 50m, as velocidades médias anuais e o fluxo de energia eólica. No contexto do Sistema MesoMap, também podem ser elaborados mapas de geração elétrica anual para qualquer tipo específico de turbina eólica existente no mercado. O MesoMap também fornece, em forma tabular, todos os principais detalhes estatísticos do potencial eólico, tais como os regimes sazonais diurnos e diversos parâmetros de interesse usual no setor. A velocidade média é o indicador mais simples da qualidade do potencial eólico e o mais usual em estimativas de geração eólio-elétrica a partir de dados de desempenho de turbinas eólicas disponíveis. Ela é resultante da média das velocidades horárias de vento geradas no MesoMap, a 50m de altura, para todos os dias de simulação:

$$(1) \quad \bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$$

em que  $N$  é o número total de horas simuladas e  $V_i$ , a velocidade horária.

Um outro indicador, mais usual em estudos de potencial energético, é a densidade de potência eólica: representa a potência cinética média do vento que flui através de uma unidade de área sempre perpendicular à sua direção, ao longo do ano. Ela é função da densidade do ar e do cubo

das velocidades médias horárias de vento e é expressa como:

$$(2) \quad \bar{P} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \rho_i v_i^3 \quad \text{W/m}^2$$

A densidade do ar,  $\rho$ , é determinada pela temperatura do ar e a pressão atmosférica, ambas fornecidas pelo Sistema MesoMap.

Além dos mapas temáticos, o Sistema MesoMap produz grande variedade de arquivos de dados numéricos, que detalham todos os principais parâmetros estatísticos relativos ao vento em cada elemento da malha geográfica. Um deles é a rosa dos ventos com as respectivas distribuições estatísticas de frequências de velocidades por setores nas direções geográficas. Essas distribuições estatísticas podem ser combinadas para fornecer a distribuição total das frequências de cada local. A distribuição estatística utilizada é a de Weibull, que é a mais usual e apresenta melhor aderência aos casos mais variados de regimes de vento dada por:

$$(3) \quad p(v) = \frac{k}{C} \left( \frac{v}{C} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{C} \right)^k}$$

em que  $k$  é o fator de forma, sendo que valores maiores de  $k$  indicam maior constância dos ventos, com menor ocorrência de valores extremos (figura 3.5). Valores de  $k$  anuais variam tipicamente entre 2 e 3. Excepcionalmente, durante alguns meses do ano em regiões de ventos alísios, como no Nordeste brasileiro, o fator de forma pode atingir valores mensais superiores a 6 – sendo que existem registros até de  $k = 10,78$  [12].

O fator de escala  $C$  tem relação com a velocidade média:

$$(4) \quad \bar{v} = C \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right)$$

em que  $\Gamma$  é a função Gama. Uma aproximação útil para  $C$  quando os valores de  $k$  estão entre 2 e 3 é dada por:

$$(5) \quad \bar{v} \approx 0,9.C$$

Os parâmetros  $k$  e  $C$  são calculados por ajuste com as curvas de distribuição geradas pelo modelo MesoMap. Além das velocidades médias de vento, o ATLAS apresenta mapas com o fator de forma  $k$  dos regimes anuais de vento no Brasil. Da equação (4), o fator de escala  $C$  pode ser calculado por:

$$(6) \quad C = \frac{\bar{v}}{\Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right)}$$

Apesar de a aderência do ajuste por Weibull ser adequada para a grande maioria dos regimes estatísticos de vento, é importante ter-se em mente que podem ocorrer

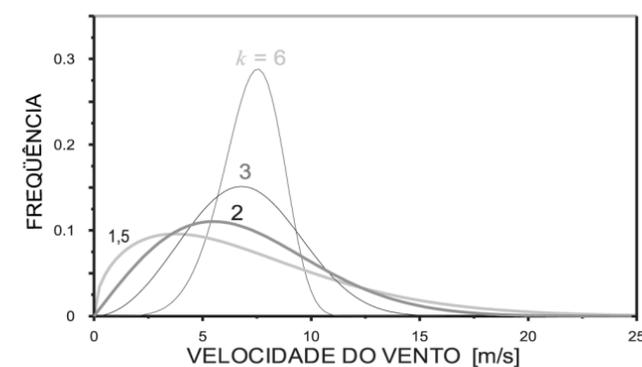


Figura 3.5 – Frequência de ocorrência de vento baseada na Distribuição de Weibull, para diferentes valores de  $k$

discrepâncias significativas com dados reais. Entretanto, a distribuição de Weibull tem-se provado como um método conveniente de caracterização de recursos eólicos. Com os dois fatores  $k$  e  $C$  e com a densidade média do ar, é geralmente possível estimar a produção anual de uma turbina eólica com boa exatidão.

### 3.3 LIMITAÇÕES DO MÉTODO

Apesar de ser reconhecidamente um dos métodos melhores e mais avançados para mapeamento de recursos eólicos, o Sistema MesoMap ainda tem limitações que podem afetar a exatidão das estimativas de potencial eólico. Entre essas principais limitações podem-se citar: erros na base de dados de entrada, efeitos de sub-resolução, e limitações do modelo.

#### 3.3.1 ERROS NA BASE DE DADOS DE ENTRADA

Tanto as bases de dados geográficos quanto de meteorológicos utilizados podem eventualmente conter erros que afetam as estimativas do MesoMap. Eventuais erros na base topográfica tendem a apresentar impactos apenas de caráter localizado. A margem nominal de incerteza nas malhas de cotas utilizadas é de 30m na maior parte do modelo. No entanto, nas áreas cobertas pelo Digital Chart of the World, essa margem de erro pode atingir até 160m.

Erros eventuais nos modelos de uso do solo e IVDN teriam impactos mais consideráveis. A exatidão horizontal de posicionamento nesses modelos, apesar da resolução nominal de 1km, pode eventualmente ser superior a esse valor, dependendo do ângulo em que as medições do satélite foram realizadas. Como avaliação conservativa, pode-se considerar que a margem de incerteza é da ordem de 2-3km. Adicionalmente, erros podem ocorrer na classificação de uso do solo em razão das dificuldades inerentes à interpretação da radiometria por satélite. Um exercício independente de validação foi conduzido sobre os dados da base de uso do solo, por pesquisadores da Universidade da Califórnia, em Santa Bárbara. O estudo verificou que, em casos nos quais uma equipe de

### 3. METODOLOGIA

três pesquisadores estava em acordo unânime acerca de determinado tipo de uso do solo, a base de dados resultante estava correta em 79% dos casos. Entretanto, erros eventuais de classificação entre tipos similares de classes de vegetação terão impacto mínimo nas propriedades de superfícies importantes para o modelo (rugosidade, albedo, etc.). Se as classes de uso do solo são agrupadas por classes de rugosidade, por exemplo, a exatidão observada aumentou para 88% [13]. Entretanto, a frequência estimada para associações incorretas de classes de rugosidade (12%) é substancial.

Erros podem também ocorrer nos dados meteorológicos. Entretanto, o Sistema MesoMap é relativamente insensível a tais erros por duas razões. Primeiro, os dados de reanálises são utilizados apenas para se estabelecerem as condições iniciais e para se atualizarem as condições laterais de contorno, enquanto o modelo determina a coerência da evolução dos parâmetros meteorológicos dentro de cada mesorregião. Segundo, as equações físicas no modelo forçam a reconciliação entre as variáveis físicas, tendendo a suprimir erros de medição isolados ou sistemáticos.

Por exemplo, se uma estação radiossonda registra com erro sistemático as direções e velocidades de vento mas a temperatura é registrada corretamente, os dados de vento serão prontamente suprimidos do modelo MesoMap devido à sua inconsistência com a temperatura e os gradientes de pressão. Da mesma forma, determinadas influências topográficas – tais como serras altas ou grandes ilhas – tendem a estar ausentes do banco de dados de reanálises, devido à baixa resolução de sua malha de dados. Tais influências são introduzidas na resolução de cálculo do MesoMap, o que reconcilia as condições iniciais com a topografia muito mais detalhada.

#### 3.3.2 EFEITOS DE SUBESCALA

Como qualquer modelo físico que utiliza técnicas de elementos finitos, o Sistema MesoMap é vulnerável a erros causados por terreno ou outras características geográficas que não podem ser totalmente resolvidas na resolução da malha do modelo. Como exemplo, considere-se o caso da figura 3.6, na qual a forma detalhada da montanha não aparece no modelo de resolução 1km. A velocidade do vento no topo da montanha será diferente da velocidade em sua base, podendo ser distintas da velocidade estimada pelo modelo na resolução 1km. De forma similar, podem existir variações significativas de uso do solo (rugosidade ou obstáculos) dentro de uma célula da malha do modelo, causando variações na velocidade de vento medida. Esses efeitos locais, não captados pela resolução do modelo, podem afetar as velocidades estimadas para 50m com uma significativa porcentagem em relação ao real.

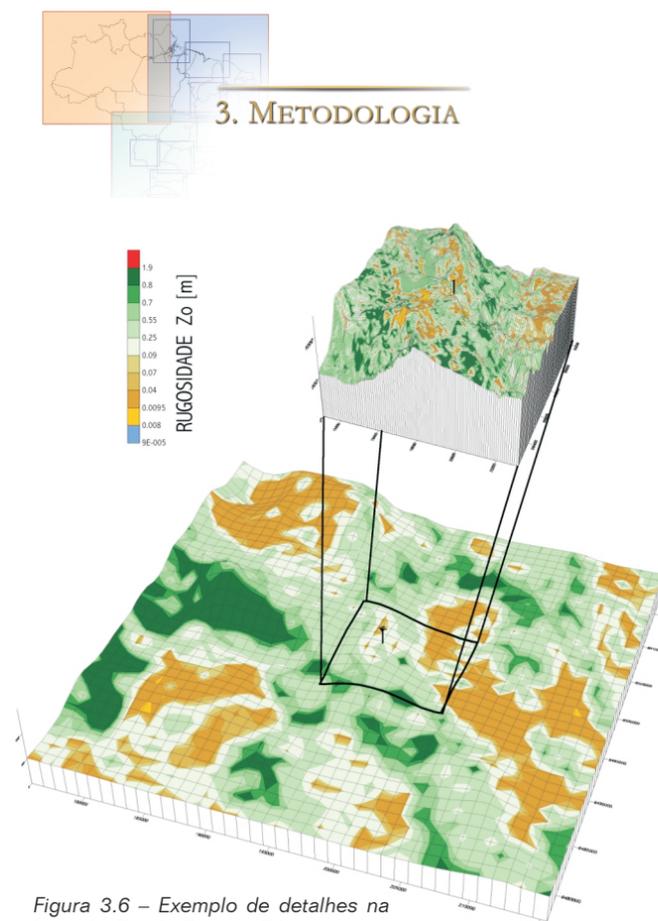


Figura 3.6 – Exemplo de detalhes na subescala: Rio de Contas, BA

Apesar de esses efeitos não poderem ser avaliados diretamente sem um modelamento em resolução muito mais fina, a faixa de velocidades possíveis de ocorrerem dentro de uma célula do modelo – devida a tais efeitos de variações de rugosidade e/ou topografia na subescala – pode ser aproximada por estimativa. O relevo (a diferença entre as cotas máxima e mínima dentro de uma dada célula) não é fortemente dependente da escala da malha e, portanto, essa faixa de variações do relevo na subescala pode ser estimada a partir dos dados em resolução 1km. Às cotas podem então ser associadas faixas de velocidades de vento (estimativa aproximada). O efeito potencial de variações de rugosidade pode ser calculado pelas equações conhecidas da física de camada-limite.

Alguns processos atmosféricos, tais como convecção e turbulência, também não podem ser totalmente resolvidos na escala de malha do modelo. Tais processos precisam ser parametrizados, ou seja, seus efeitos devem ser estimados com o uso de conhecidas equações que utilizam parâmetros disponíveis na escala do modelo. Como nenhum esquema de parametrização é perfeito, erros na estimativa de velocidade de vento podem eventualmente ocorrer, especialmente onde os processos na subescala da malha sejam significativos. Um exemplo é o processo convectivo localizado que ocorre nos trópicos. Felizmente, esses efeitos tendem a ocorrer aleatoriamente na natureza e a sua média tenderá a zero nas centenas de simulações realizadas no modelo.

Brisas marinhas também não podem ser totalmente resolvidas, pois a sua existência depende do desenvolvimento de gradientes térmicos fortes, localizados ao lon-

go da faixa litorânea, enquanto, no modelo, o gradiente de temperatura é limitado à escala de sua resolução. Essa limitação significa que existe uma tendência a que as velocidades próximas à costa sejam subestimadas. Para minimizar esse efeito, o modelo de mesoescala para a principal extensão da costa brasileira foi rodado na resolução de 3,6km (figura 3.1). Essa escolha foi validada por simulações realizadas com resoluções progressivamente maiores, as quais indicaram que os erros induzidos pela resolução de 3,6 km (no modelo de mesoescala) já eram suficientemente pequenos.

#### 3.3.3 LIMITAÇÕES DO MODELO

Fora os inevitáveis efeitos de subescala, existem limitações na formulação das equações do modelo que podem introduzir erros nas estimativas de velocidades de vento, sob certas condições.

Uma das principais fontes de erros eventuais é a hipótese de taxa fixa numérica lateral de difusão de temperatura ao longo da declividade de terreno, que pode resultar em um gradiente incorreto de temperatura entre vales e topos de montanhas. Em particular, sob condições termicamente estáveis em terreno íngreme, vales podem tornar-se demasiado quentes e os topos de montanhas, demasiado frios, o que resulta em um vento descendente de montanha superestimado. No entanto, deve-se enfatizar que tais eventos são relativamente raros e testes têm indicado que teriam pequeno impacto na exatidão das estimativas de velocidades médias de vento.

### 3.4 VALIDAÇÃO DO MESOMAP

A exatidão do Sistema MesoMap tem sido testada extensivamente pela comparação com medições confiáveis de vento, em distintos locais do mundo. No caso do presente mapeamento eólico brasileiro, dentre todas as estações anemométricas com dados disponibilizados para o presente ATLAS, foram selecionadas apenas aquelas que satisfaziam condições mínimas de qualidade: medições com abrangência mínima de 01 ciclo climatológico (em alguns casos obtida por ajustes climatológicos), informações sobre relevo e rugosidade no seu entorno e ausência de obstáculos próximos em relação aos ventos predominantes. Todos os dados anemométricos foram extrapolados para a altura de 50m, a partir de medições em diferentes alturas, ou por informações de rugosidade local nos casos de medições em altura única, e comparados aos resultados do mapa de velocidades médias anuais, para cada local. Essa comparação é apresentada na tabela 3.1 (p.22), em que se observa que, dentre todas as estações aferidas com o mapa calculado, o desvio-padrão das diferenças cálculo-medição foi de 7,5%. Vale observar que algumas das medições, especialmente aquelas obtidas em baixa altura e extrapoladas para 50m, podem conter incertezas superiores a 10%.



Tabela 3.1 – Comparação: cálculos x medições

ESTAÇÃO	FONTE	Altura	Diferença	
		Medição [m]	Cálc - Med [m/s]	[%]
MATELÂNDIA, PR	COPEL	77	-0.02	-0.3
CAMAMU, BA	COELBA	20	0.02	0.4
TEOFILÂNDIA, BA	COPEL	20	0.02	0.4
SANTO ANDRÉ, PR	COPEL	55	-0.03	-0.5
MORRO DA IGREJA, SC	CELESC	48	0.05	0.7
FZ RENASCENÇA, PF	COPEL	18	-0.05	-0.7
CONDE, BA	COELBA	20	0.08	1.2
BOA VISTA, RR	DPV - M.AER	10	-0.07	-1.4
AJURUTEUA, PA	CEPEL	30	-0.12	-1.6
S.FCO.DO SUL, SC	CELESC	48	0.08	1.7
Farol CALCANHAR, RN	DHN - M.MAR	10	-0.16	-1.8
ENTRE RIOS, PR	COPEL	20	0.10	1.8
ALTO ALEGRE, PR	COPEL	67	0.12	2.2
COSTA DOURADA, BA	COELBA	30	-0.15	-2.2
VIT. DA CONQUISTA, BA	COELBA	48	-0.16	-2.5
PALMAS, PR	COPEL	17	0.19	2.5
VENTANIA, PR	COPEL	26	-0.14	-2.5
MONTENEGRO, PR	COPEL	18	-0.16	-2.6
PONTA PORÃ, MS	DPV - M.AER	10	0.15	2.6
APUCARANA, PR	COPEL	31	-0.18	-3.0
SOBRADINHO, BA	COELBA	20	-0.19	-3.2
C. MOURÃO, PR	COPEL	38	-0.19	-3.2
GOIABAL, PA	CEPEL	30	-0.26	-3.4
ÁGUA FRIA, RR	CEPEL	10	0.27	4.3
SA MONTE ALTO, BA	COELBA	40	0.26	4.5
CARAMBEÍ, PR	COPEL	18	0.30	4.6
B.JDIM DA SERRA, SC	CELESC	48	0.31	5.2
BARRAÇÃO, PR	COPEL	18	0.31	5.3
JOANES, PA	CEPEL	30	0.42	5.5
CRATEUS, CE	CHESF-[Ref.5]	10	0.22	5.5
CALMON, SC	CELESC	48	0.31	6.0
FÁTIMA, BA	COELBA	20	-0.36	-6.4
SAUÍPE, BA	COELBA	20	0.43	6.7
IÇARA, SC	CELESC	48	0.40	7.1
S. LUIZ DO PURUNÃ, PR	COPEL	22	0.47	8.2
CAMPO ERÉ, SC	CELESC	30	0.51	8.2
BATAGUASSU, MS	SOCEPPAR	25	0.38	8.4
TERRA RICA, PR	COPEL	19	0.39	8.7
Mo. DO CHAPÉU, BA	COELBA	20	0.50	9.2
PLACAS, BA	COELBA	30	0.53	9.3
COOPAVEL, PR	COPEL	22	-0.53	-9.4
SUPERAGÜI, PR	COPEL	18	0.39	9.9
M.PERDIDOS, PR	COPEL	20	-1.29	-15.0
RIO DE CONTAS, PR	COELBA	30	-1.42	-21.5
CAPÃO REDONDO, BA	COELBA	30	-1.40	-23.0

A transposição das simulações MASS na resolução de 3,6km para a resolução final de 1km foi realizada pelo WindMap, que utilizou os dados medidos – extrapolados para a altura de 50m – para a convergência do modelamento de camada-limite com conservação de massa. Para algumas estações, especialmente da COELBA, COPEL e CELESC, modelos digitais de terreno estavam disponíveis em resolução maior e ajustes adicionais foram efetuados para correção do modelo de rugosidade utilizado no entorno daquelas estações.

As estações que apresentaram maior discrepância entre os valores calculados e aqueles medidos localizam-se em sua maioria em relevo complexo (efeitos de

subescala) ou em locais nos quais o modelo de relevo apresentava as maiores diferenças em relação aos valores reais de altitude. Tomando-se esses poucos casos, com diferenças entre cálculo e medição próximas ou superiores a 10%, e aplicando-se uma correção de velocidades pela altitude, obtida por regressão linear entre os dados (figura 3.7), obtêm-se os resultados da tabela 3.2. A grande coerência na redução dos desvios em velocidade obtidos na tabela 3.2 é um indício muito forte de que as maiores diferenças entre velocidades (calculada - medida) deve-se a discrepâncias no modelo de relevo ou principalmente a efeitos de subescala.

A magnitude dos desvios entre os valores de velocidades médias anuais no cálculo e aquelas medidas nas me-

lhores estações anemométricas disponíveis indica que o presente ATLAS pode ser utilizado para a identificação das melhores áreas para projetos de aproveitamentos eólico-elétricos. Entretanto, como a energia eólica é extremamente sensível a condições de microescala, da ordem de dezenas a centenas de metros, alerta-se que a resolução de 1km x 1km pode ser insuficiente para a localização exata das turbinas eólicas. A análise anterior também revela a possibilidade de ocorrência, eventual e localizada, de discrepâncias nos modelos de relevo e rugosidade utilizados. Assim, no caso mais geral, recomenda-se que a implantação de projetos eólico-elétricos seja precedida das ações necessárias e compatíveis com os critérios técnicos e econômicos de investimentos no setor.

Tabela 3.2 – Ajuste para altitude por regressão linear

Estação	Diferenças Modelo - Medição		Velocidade Ajustada	
	Velocidade [m/s]	Altitude [m]	Desvio [m/s]	Desvio [%]
COOPAVEL	-0.53	-68	0.06	1.05
PLACAS	0.53	118	0.15	2.67
M.PERDIDOS	-1.29	-125	-0.40	-4.71
CAPÃO REDONDO	-1.4	-202	-0.11	-1.87
RIO DE CONTAS	-1.42	-285	0.30	4.51

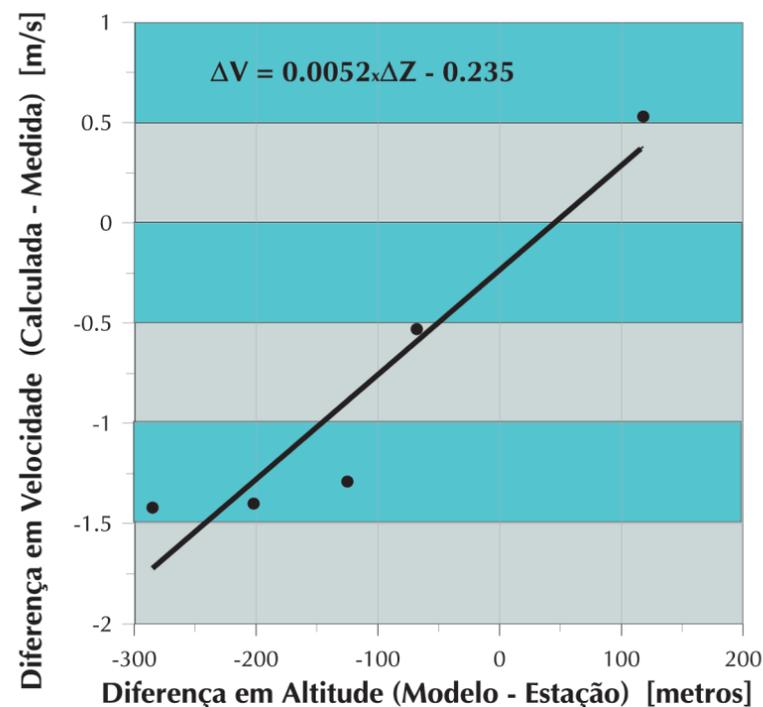


Figura 3.7 – Regressão linear para ajuste de velocidade (correção de discrepâncias em altitude)



## 4. POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

### 4.1 REGIMES DE VENTO SOBRE O BRASIL

A distribuição geral dos ventos sobre o Brasil é controlada pelos aspectos da circulação geral planetária da atmosfera próxima, conforme se apresenta na figura 4.1. Dentre esses aspectos, sobressaem os sistemas de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e do Atlântico Norte e a faixa de baixas pressões da Depressão Equatorial.

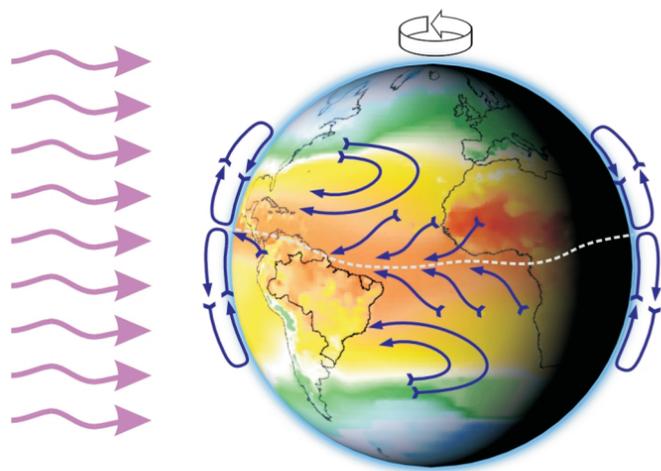


Figura 4.1 – Distribuição geral dos ventos

A posição média da Depressão Equatorial estende-se de oeste a leste ao longo da região Norte do Brasil e sobre o Oceano Atlântico adjacente. Ela coincide com a localização e orientação da Bacia Amazônica, no centro da qual existe uma faixa persistente de baixas pressões. A Depressão Equatorial é geralmente uma zona de pequenos gradientes de pressão e ventos fracos. Ao norte da Depressão Equatorial os ventos são persistentes de leste a nordeste. Ao sul, os ventos são persistentes de leste a sudeste entre a Depressão Equatorial e o Anticiclone Subtropical Atlântico, o qual tem uma posição média anual próxima a 30°S, 25°W. Esse perfil geral de circulação atmosférica induz ventos de leste ou nordeste sobre o território brasileiro ao norte da Bacia Amazônica e no litoral nordeste. Os ventos próximos à superfície são geralmente fracos ao longo da Depressão Equatorial, porém aumentam de intensidade ao norte e ao sul dessa faixa. A área entre a Depressão Equatorial e a latitude de 10°S é dominada pelos ventos alísios de leste a sudeste. Ao sul da latitude 10°S, até o extremo sul brasileiro, prevalecem os efeitos ditados pela dinâmica entre o centro de alta pressão Anticiclone Subtropical Atlântico, os deslocamentos de massas polares e a Depressão do Nordeste

da Argentina – centro de baixas pressões a leste dos Andes.

Esse perfil geral de circulação atmosférica encontra variações significativas na mesoescala e na microescala, por diferenças em propriedades de superfícies, tais como geometria e altitude de terreno, vegetação (a figura 4.2 (p.24) apresenta o modelo de vegetação do Brasil) e distribuição de superfícies de terra e água. Esses fatores atuantes nas escalas menores podem resultar em condições de vento locais que se afastam significativamente do perfil geral da larga escala da circulação atmosférica. Uma síntese dessas características em menores escalas sobre a distribuição dos regimes de vento é apresentada a seguir, organizada em 7 regiões geográficas: (1) Bacia Amazônica Ocidental e Central; (2) Bacia Amazônica Oriental; (3) Zona Litorânea Norte-Nordeste; (4) Zona Litorânea Nordeste-Sudeste; (5) Elevações Nordeste-Sudeste; (6) Planalto Central; (7) Planaltos do Sul.

A *Bacia Amazônica Ocidental e Central* estende-se aproximadamente entre as latitudes 10° S e 5° N, e longitudes 70° W e 55° W. As velocidades médias anuais de vento a 50m de altura através dessa região são inferiores a 3,5m/s. O escoamento atmosférico predominante de leste (alísios) sobre essa região é bastante reduzido pelo atrito de superfície associado à longa trajetória sobre florestas densas e pelos gradientes fracos de pressão associados à zona difusa de baixas pressões centrada nessa região da Bacia Amazônica. Apesar de não refletida nos ventos de superfície, existe uma faixa estreita de ventos médios anuais de 8m/s a 10m/s na camada entre 1.000m e 2.000m acima da superfície; essa faixa inicia-se no Atlântico, a leste da foz do Rio Amazonas, e estende-se para oeste sobre a porção norte da Bacia Amazônica e gradualmente se enfraquece à medida que o escoamento aproxima-se das cadeias montanhosas da parte oeste do continente. Essa faixa de altas velocidades tem pouco significado para os ventos de superfície na Bacia Amazônica, porém torna-se uma fonte de energia eólica para as áreas mais elevadas que ocorrem no extremo norte da Bacia Amazônica: é ela que muito provavelmente constitui o principal fator para a existência de uma área isolada de altas velocidades médias anuais de vento na região da Serra Pacaraima, em Roraima, ao longo da fronteira Brasil-Venezuela. Naquela área, esse escoamento de altitude alcança os níveis da superfície dos terrenos mais elevados, grande parte dos quais cobertos pela baixa rugosidade de savanas, onde em alguns locais também ocorrem canalizações orográficas. Entretanto, excetuando-se essa área isolada e única na região, os ventos nessa grande área da Bacia Amazônica são bastante fracos. As noites são geralmente de calmarias, ocorrendo ventos descendentes de montanhas, fracos e ocasionais, nas áreas a leste e a sul dessa grande região. Durante o dia, podem ocorrer ventos localizados mais for-

tes, causados pelo aquecimento desigual da superfície, induzidos por pequenas diferenças em vegetação, disponibilidade hídrica do solo ou cobertura de nuvens. No entanto, é pequena a magnitude das velocidades de vento geradas por esse processo, devido à baixa amplitude das variações de temperatura e à alta rugosidade/atrito de superfície.

A *Bacia Amazônica Oriental* abrange a área continental a partir da longitude 55° W (Santarém, PA) até aproximadamente 100km da costa que se estende entre o Amapá e o Maranhão. A Depressão Equatorial permanece geralmente próxima a essa região, a qual é dominada por ventos alísios de leste a nordeste, em sua porção norte, e leste a sudeste, em sua porção sul. O vento médio anual é geralmente inferior a 3,5m/s devido à proximidade dos gradientes fracos de pressão associados à Depressão Equatorial e ao elevado atrito de superfície causado pela rugosidade da vegetação densa. Existe um generalizado, porém pequeno, aumento nas velocidades de vento de oeste para leste ao longo dessa região. Isso acontece porque o escoamento predominante de leste percorre trajetórias gradualmente menores sobre as áreas de vegetação densa e o gradiente de pressão aumenta gradualmente para o leste, devido aos contrastes térmicos mais acentuados entre continente e mar. As máximas velocidades médias anuais de vento nessa região são encontradas nas porções nordeste e sudeste, onde existem elevações de terreno que aceleram os ventos pelo efeito de compressão vertical do escoamento atmosférico, e especialmente na porção nordeste, onde algumas elevações alcançam as velocidades de vento de camadas mais altas da atmosfera atuantes nessa área.

A *Zona Litorânea Norte-Nordeste* é definida como a faixa costeira com cerca de 100km de largura, que se estende entre o extremo norte da costa do Amapá e o Cabo de São Roque, no Rio Grande do Norte. Nessa região, os ventos são controlados primariamente pelos alísios de leste e brisas terrestres e marinhas. Essa combinação das brisas diurnas com os alísios de leste resulta em ventos médios anuais entre 5m/s e 7,5m/s na parte norte dessa região (litorais do Amapá e Pará) e entre 6m/s a 9m/s em sua parte sul, que abrange os litorais do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. As velocidades são maiores na parte sul devido a dois principais fatores: (1) os ventos alísios geralmente tornam-se mais fortes à medida que se afastam da Depressão Equatorial; (2) as brisas marinhas são significativamente acentuadas ao sul dessa região em razão dos menores índices de vegetação e de umidade do solo, fazendo que a superfície do solo atinja temperaturas mais elevadas durante as horas de sol e, conseqüentemente, acentuando o contraste de temperaturas terra-mar e as brisas marinhas resultantes. As maiores velocidades médias anuais de vento ao longo



dessa região estão ao norte do Cabo de São Roque, abrangendo os litorais do Rio Grande do Norte e Ceará, onde a circulação de brisas marinhas é especialmente intensa e alinhada com os ventos alísios de leste-sudeste. Adicionalmente, ocorrem áreas em que os ventos são acentuados por bloqueios ao escoamento causados por montanhas na parte continental. Entretanto, o vento médio anual decresce rapidamente à medida que se desloca da costa para o interior, devido ao aumento de atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas.

A *Zona Litorânea Nordeste-Sudeste* é definida como a faixa de aproximadamente 100km de largura que se estende entre o Cabo de São Roque (RN) até aproximadamente o Estado do Rio de Janeiro. As velocidades médias anuais decrescem de 8-9 m/s na porção norte (Rio Grande do Norte) até 3,5m/s a 6m/s sobre a maioria da costa que se estende até o Sudeste. A exceção mais significativa desse comportamento está na costa entre as latitudes 21° S e 23° S (sul do Espírito Santo e nordeste do Rio de Janeiro), onde as velocidades são próximas de 7,5m/s. Isso é resultante do efeito de bloqueio do escoamento leste-nordeste (causado pelo Anticiclone Subtropical Atlântico) pelas montanhas imediatamente a oeste da costa. Nesse caso, é criada uma espécie de aceleração por obstáculo, pois o ar acelera-se para o sul para aliviar o acúmulo de massa causado pelo bloqueio das formações montanhosas. Ao sul dessa região, a costa do Estado do Rio de Janeiro desvia-se para oeste, onde os ventos passam a ser consideravelmente mais fracos devido ao abrigo das montanhas a norte e a nordeste. Disso resultam velocidades relativamente menores na região que engloba a cidade do Rio de Janeiro.

As *Elevações Nordeste-Sudeste* são definidas como as áreas de serras e chapadas que se estendem ao longo da costa brasileira, desde o Rio Grande do Norte até o Rio de Janeiro, a distâncias de até 1.000km da costa. Velocidades médias anuais de 6,5m/s até 8m/s devem ser encontradas nos cumes das maiores elevações da Chapada Diamantina e da Serra do Espinhaço. Essas áreas de maiores velocidades ocorrem em forma localizada, primariamente devido ao efeito de compressão vertical do escoamento predominante em larga escala, que é leste-nordeste, quando ultrapassa a barreira elevada das serras. Os ventos anuais mais intensos são geralmente encontrados nas maiores elevações, onde o efeito de compressão é mais acentuado. No entanto, o escoamento atmosférico é bastante complexo nessa região, existindo outras características locais com influência adicional, resultantes de uma combinação de fatores relacionados à topografia e ao terreno.

O *Planalto Central* está ao sul da Bacia Amazônica e estende-se desde a margem esquerda da Bacia do Rio

São Francisco até as fronteiras com Bolívia e Paraguai. Essa região é dominada pelo escoamento leste-sudeste em torno do Anticiclone Subtropical Atlântico. A velocidade média anual na região situa-se geralmente entre 4m/s e 6m/s. A intensidade do escoamento de leste predominante em larga escala aumenta para o sul, onde o gradiente de pressão é mais acentuado e a superfície tem menor rugosidade, pela vegetação menos densa. Assim, as velocidades médias anuais de vento variam de 3m/s a 4m/s ao norte dessa região (no limite sul da Bacia Amazônica) para 5m/s a 6m/s sobre a porção sul do extenso planalto. Destacam-se nessa área algumas regiões mais elevadas a oeste, na fronteira com o Paraguai (no Mato Grosso do Sul), onde as velocidades médias anuais aproximam-se de 7m/s, resultantes principalmente do efeito de compressão vertical do escoamento ao transpor as elevações.

Na região mais ao sul do Brasil estão os *Planaltos do Sul*, que se estendem aproximadamente de 24°S (São Paulo) até os limites ao sul do Rio Grande do Sul. O escoamento atmosférico geral nessa área é controlado pela Depressão do Nordeste da Argentina, uma área

quase permanente de baixas pressões, geralmente estacionária ao leste dos Andes sobre planícies secas e o Anticiclone Subtropical Atlântico. A posição média da Depressão do Nordeste da Argentina é aproximadamente 29°S, 66°W, sendo criada pelo bloqueio da circulação atmosférica geral pelos Andes e por intenso aquecimento da superfície na região.

O gradiente de pressão entre a Depressão do Nordeste da Argentina e o Anticiclone Subtropical Atlântico induz um escoamento persistente de nordeste ao longo dessa área. Desse escoamento resultam velocidades médias anuais de 5,5m/s a 6,5m/s sobre grandes áreas da região. Entretanto, esse escoamento é significativamente influenciado pelo relevo e pela rugosidade do terreno. Os ventos mais intensos estão entre 7m/s e 8m/s e ocorrem nas maiores elevações montanhosas do continente, bem como em planaltos de baixa rugosidade, como os Campos de Palmas. Outra área com velocidades superiores a 7m/s encontra-se ao longo do litoral sul, onde os ventos predominantes leste-nordeste são acentuados pela persistente ação diurna das brisas marinhas.

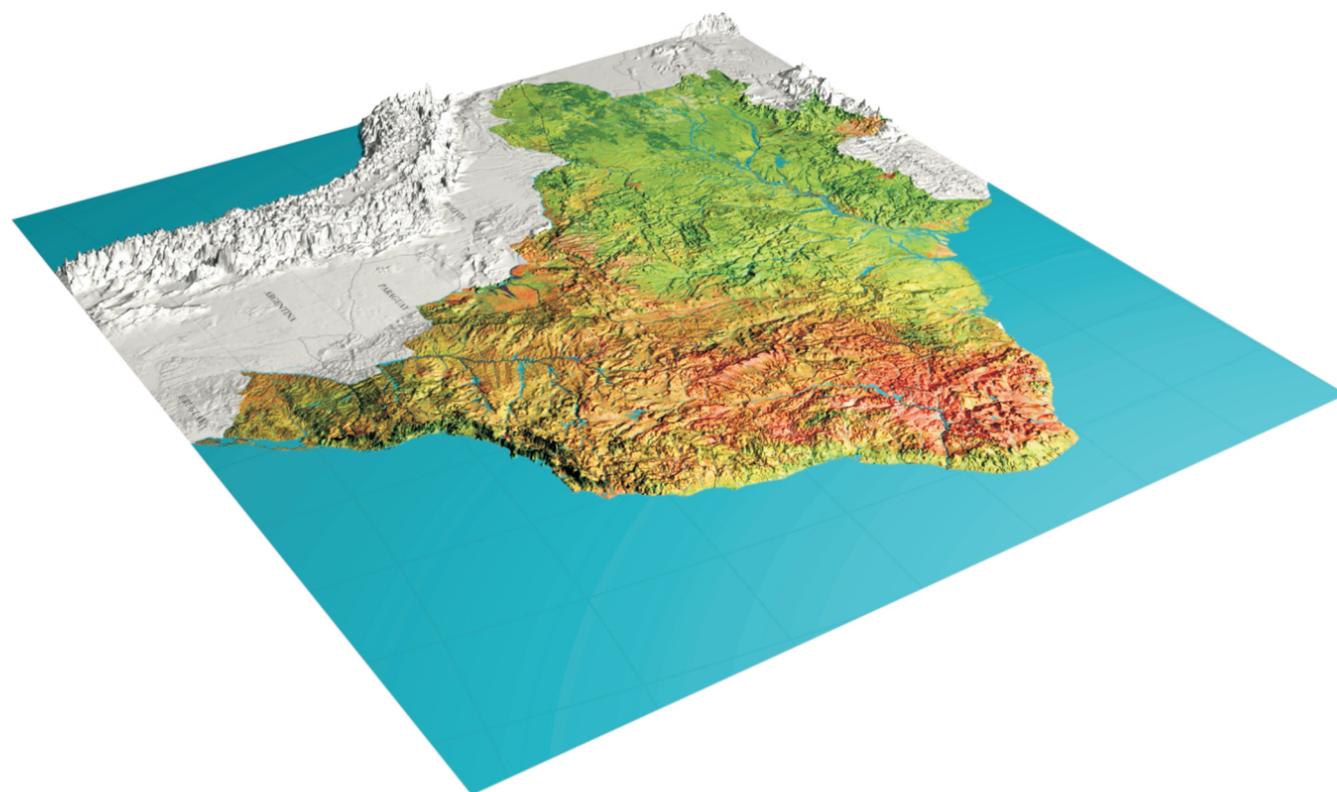


Figura 4.2 – Mosaico de imagens de satélite (SPOT Image), sobreposto ao modelo de relevo

---

## 4.2 MAPAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO ANUAL

**VELOCIDADES MÉDIAS ANUAIS E FLUXOS  
DE POTÊNCIA EÓLICA**

**DIREÇÕES PREDOMINANTES**

**REGIMES DIURNOS – MÉDIA ANUAL**

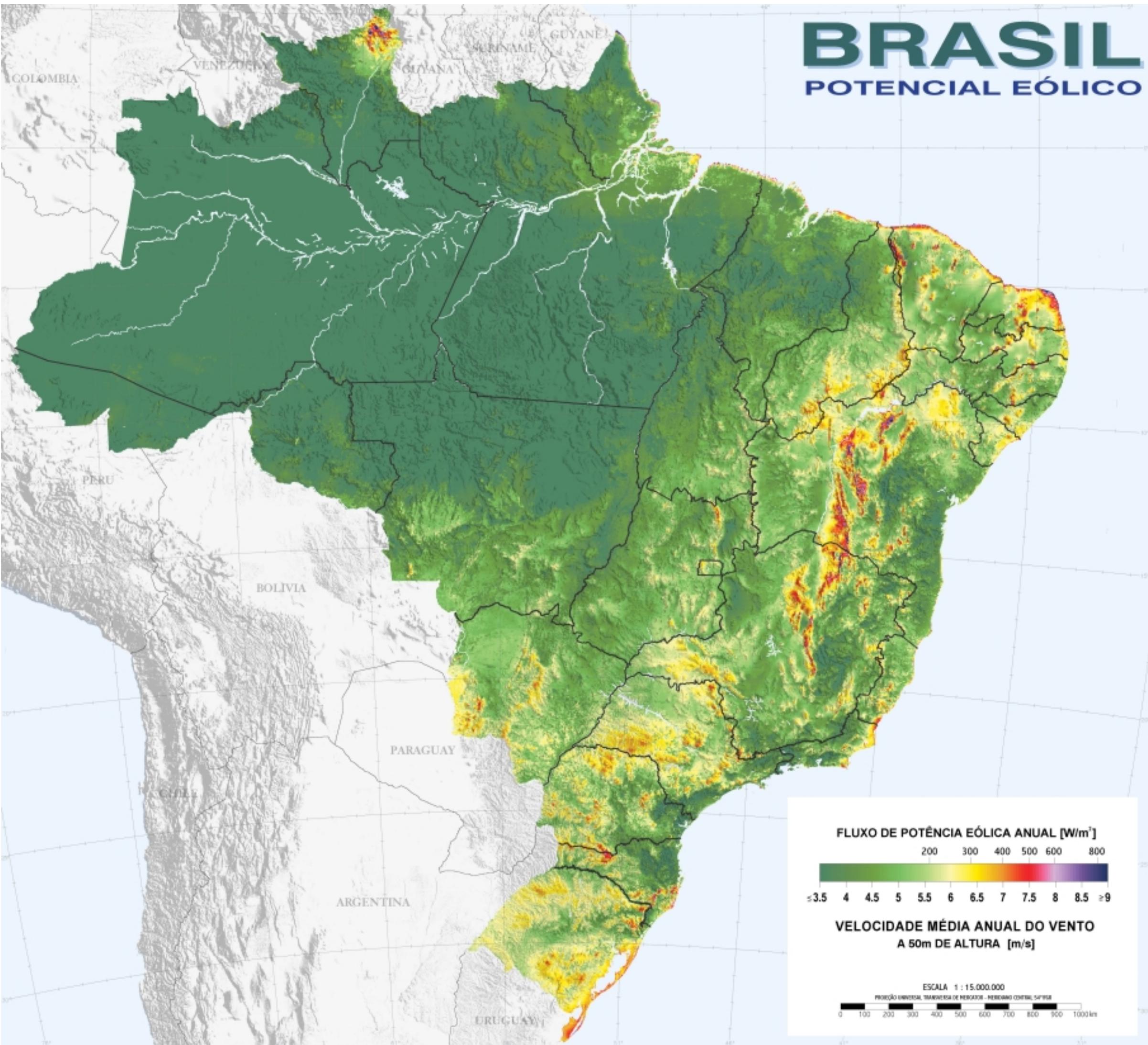
**K – FATOR DE FORMA DE WEIBULL –  
MÉDIA ANUAL**

---



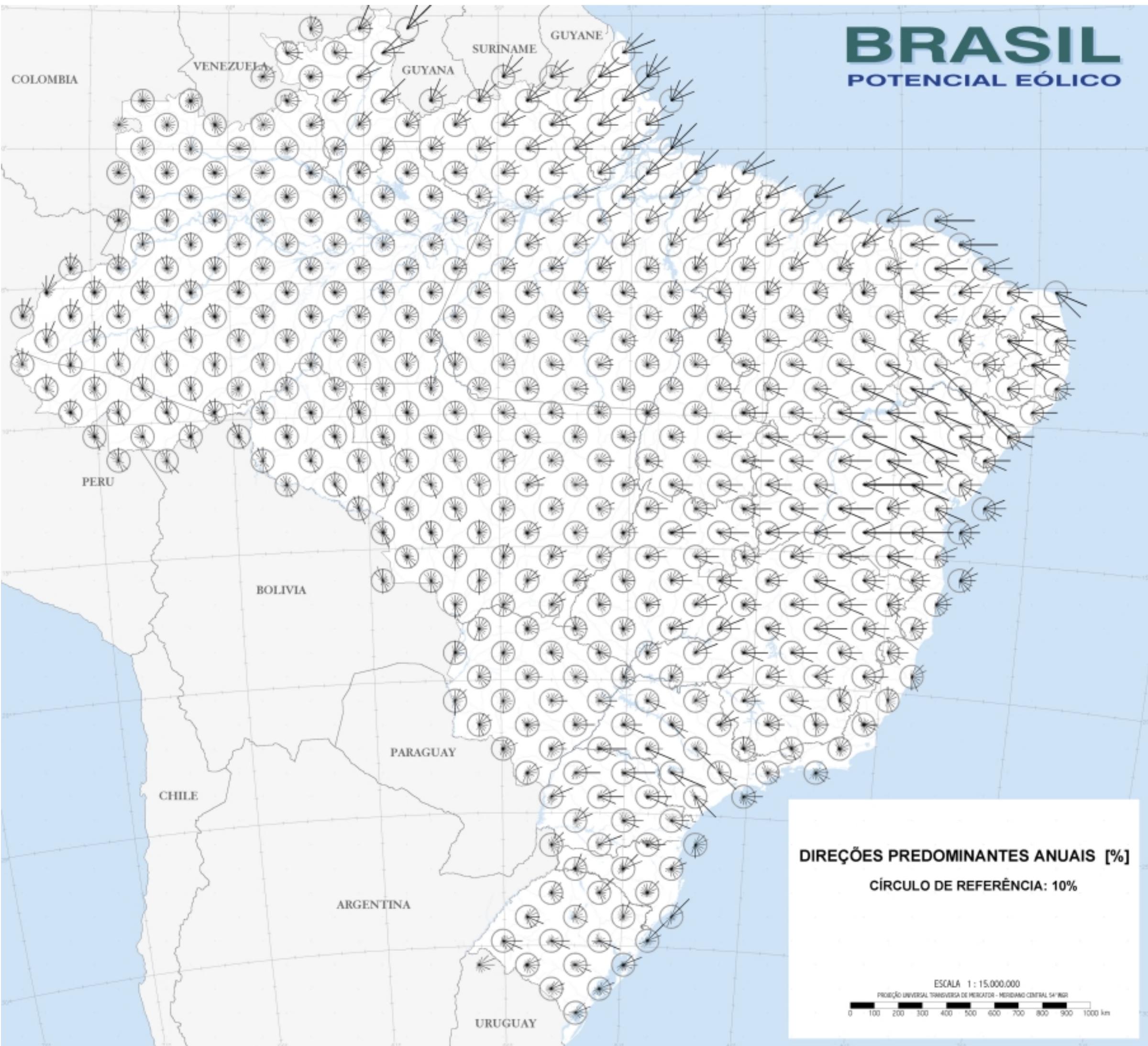
# BRASIL

## POTENCIAL EÓLICO



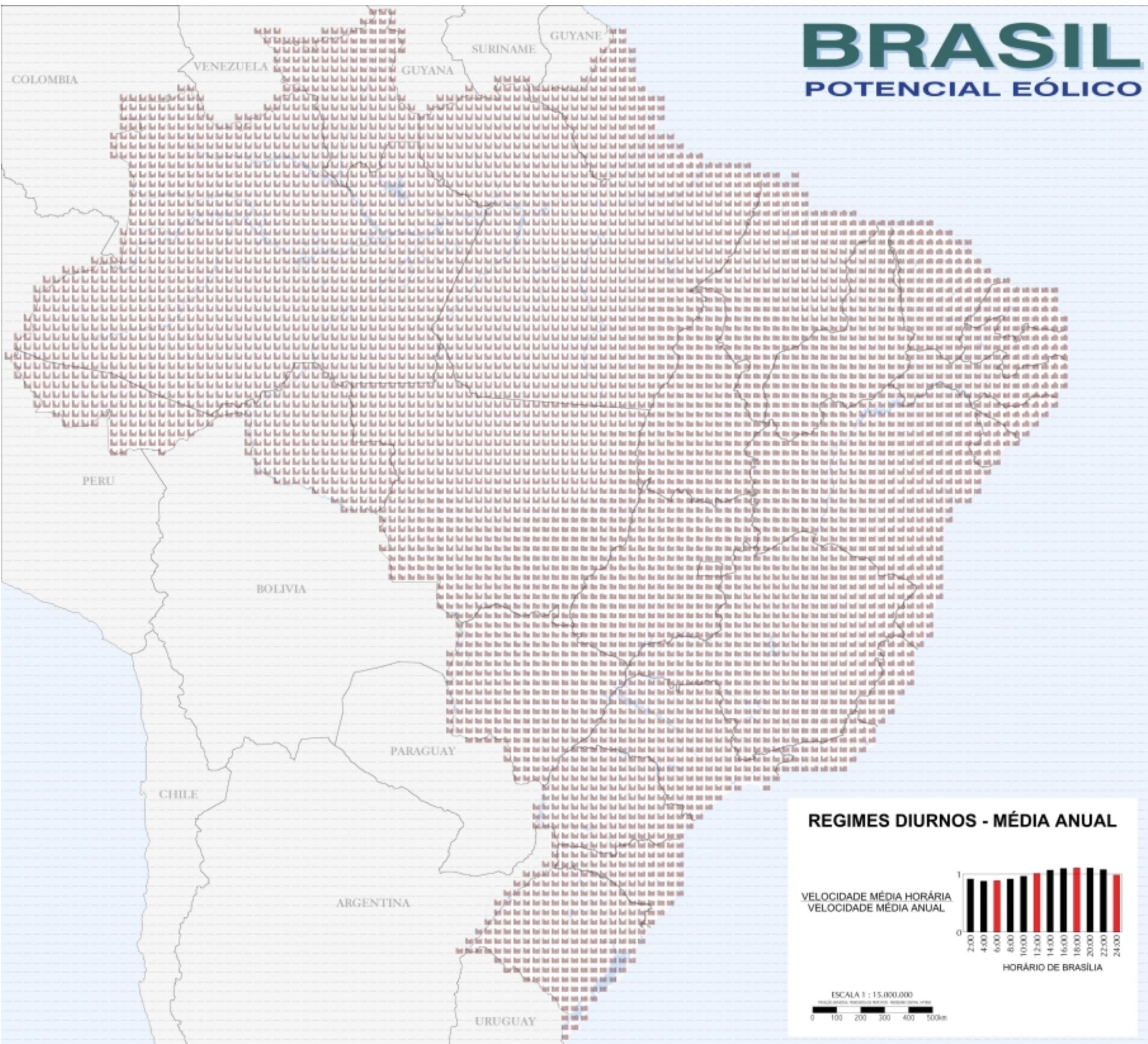
# BRASIL

## POTENCIAL EÓLICO



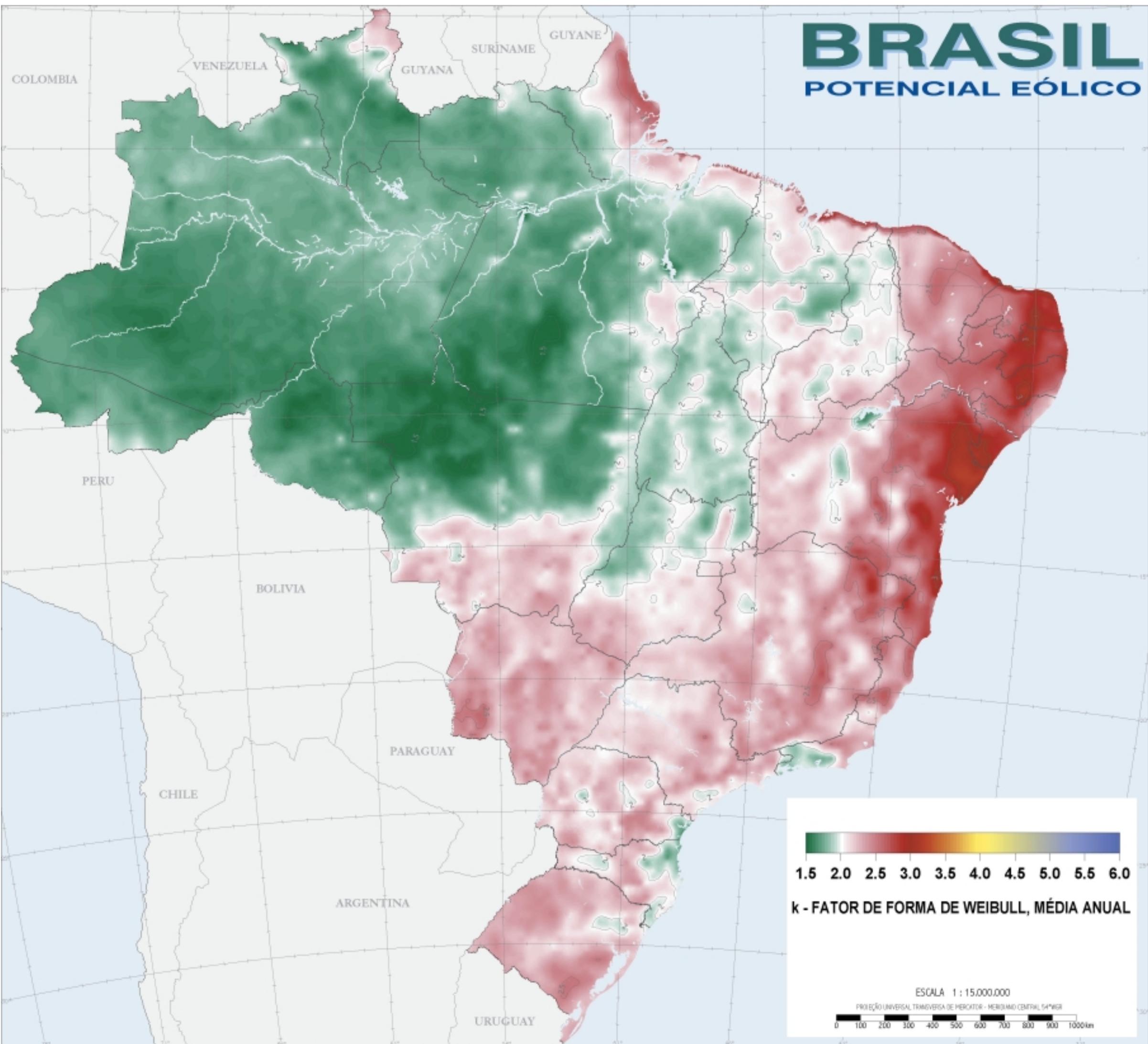
# BRASIL

## POTENCIAL EÓLICO



# BRASIL

## POTENCIAL EÓLICO



---

## 4.3 MAPAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO SAZONAL

**VELOCIDADES MÉDIAS TRIMESTRAIS**

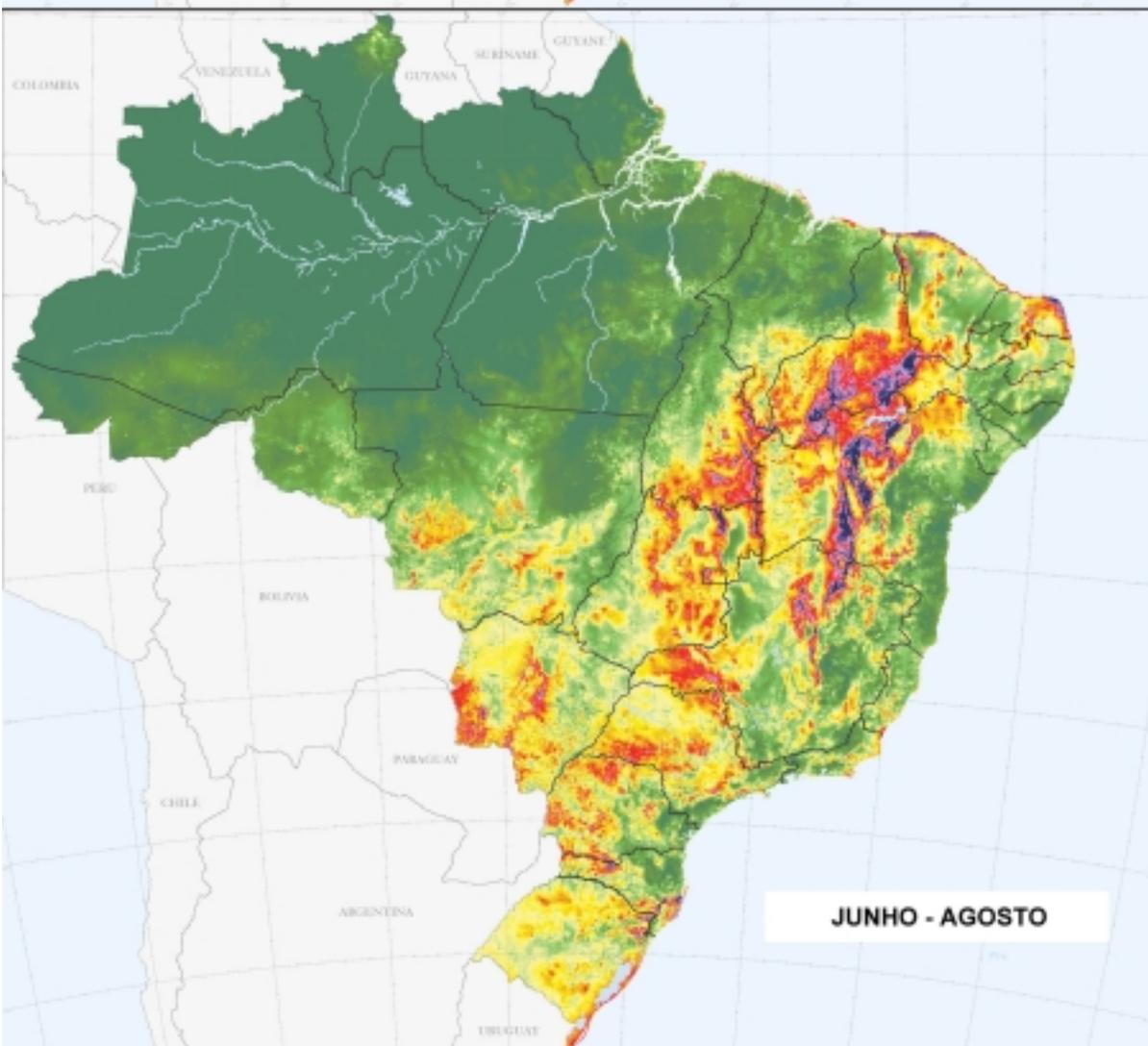
**RAZÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA  
TRIMESTRAL E A ANUAL**

**DIREÇÕES PREDOMINANTES**

**K – FATOR DE FORMA DE WEIBULL –  
MÉDIAS SAZONAIS**

---

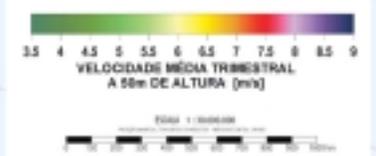


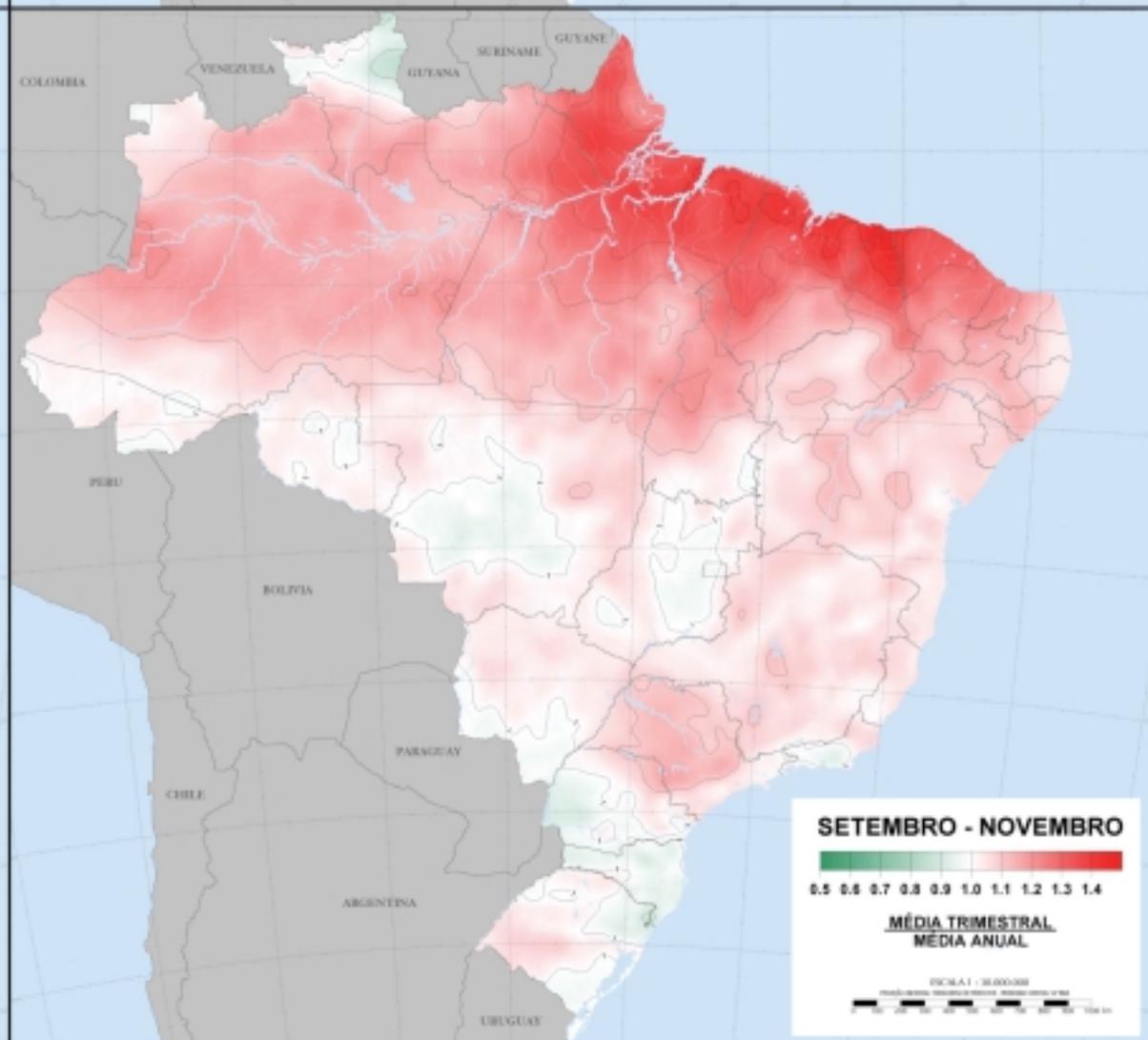
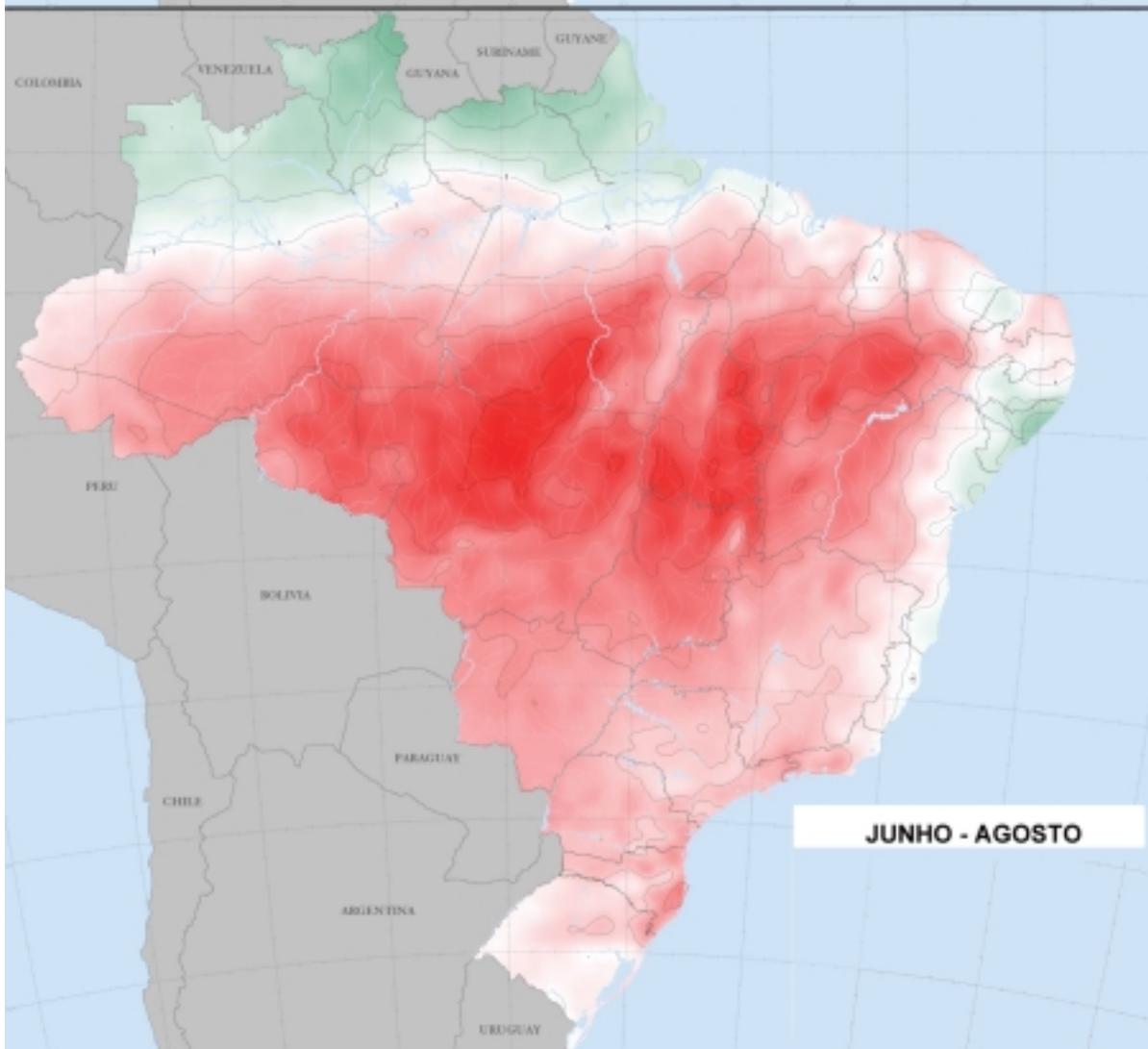
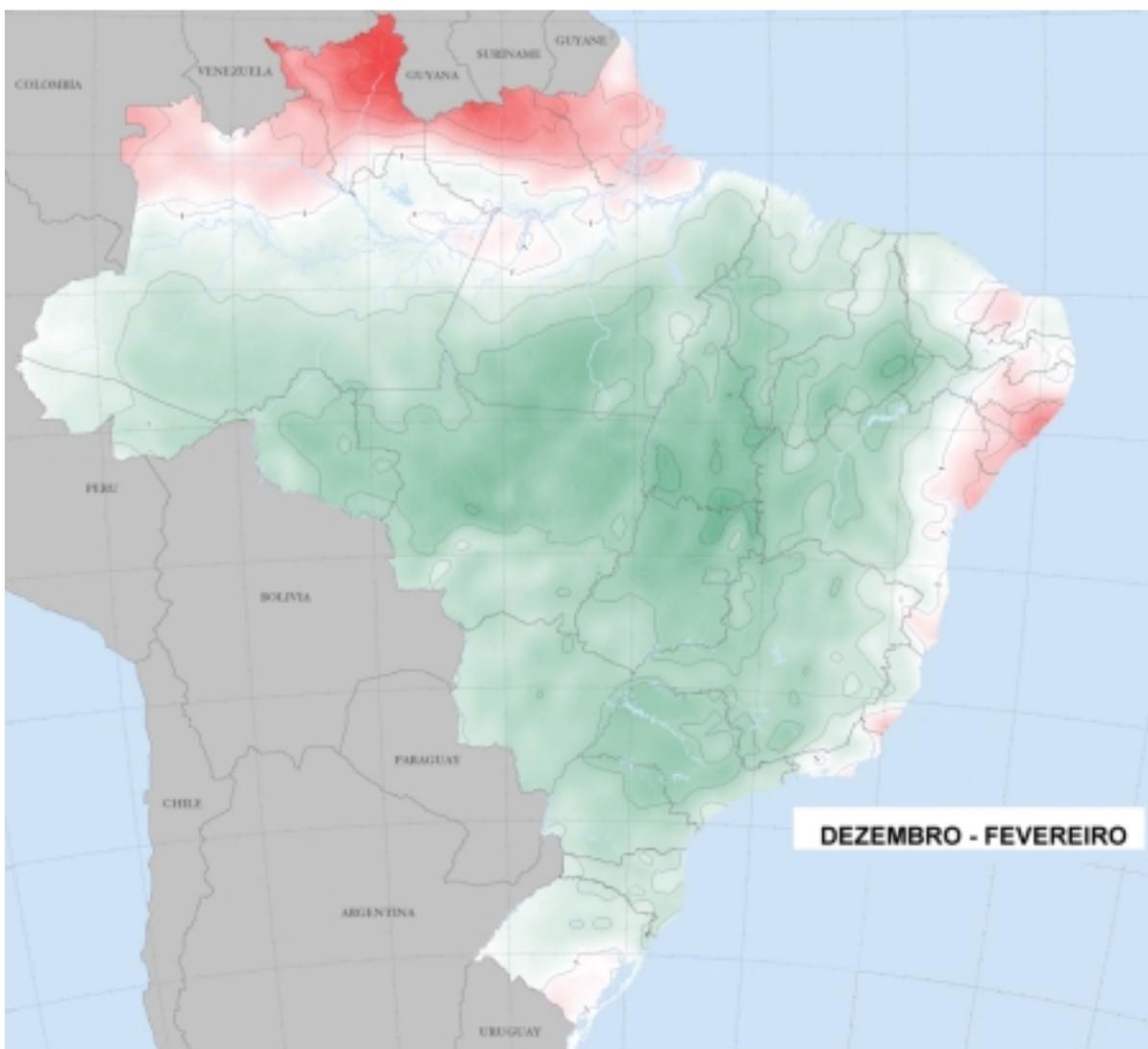


# BRASIL

POTENCIAL EÓLICO

## SETEMBRO - NOVEMBRO





**BRASIL**  
**POTENCIAL EÓLICO**

MINISTÉRIO DE  
 MINAS E ENERGIA  
 Eletrobrás

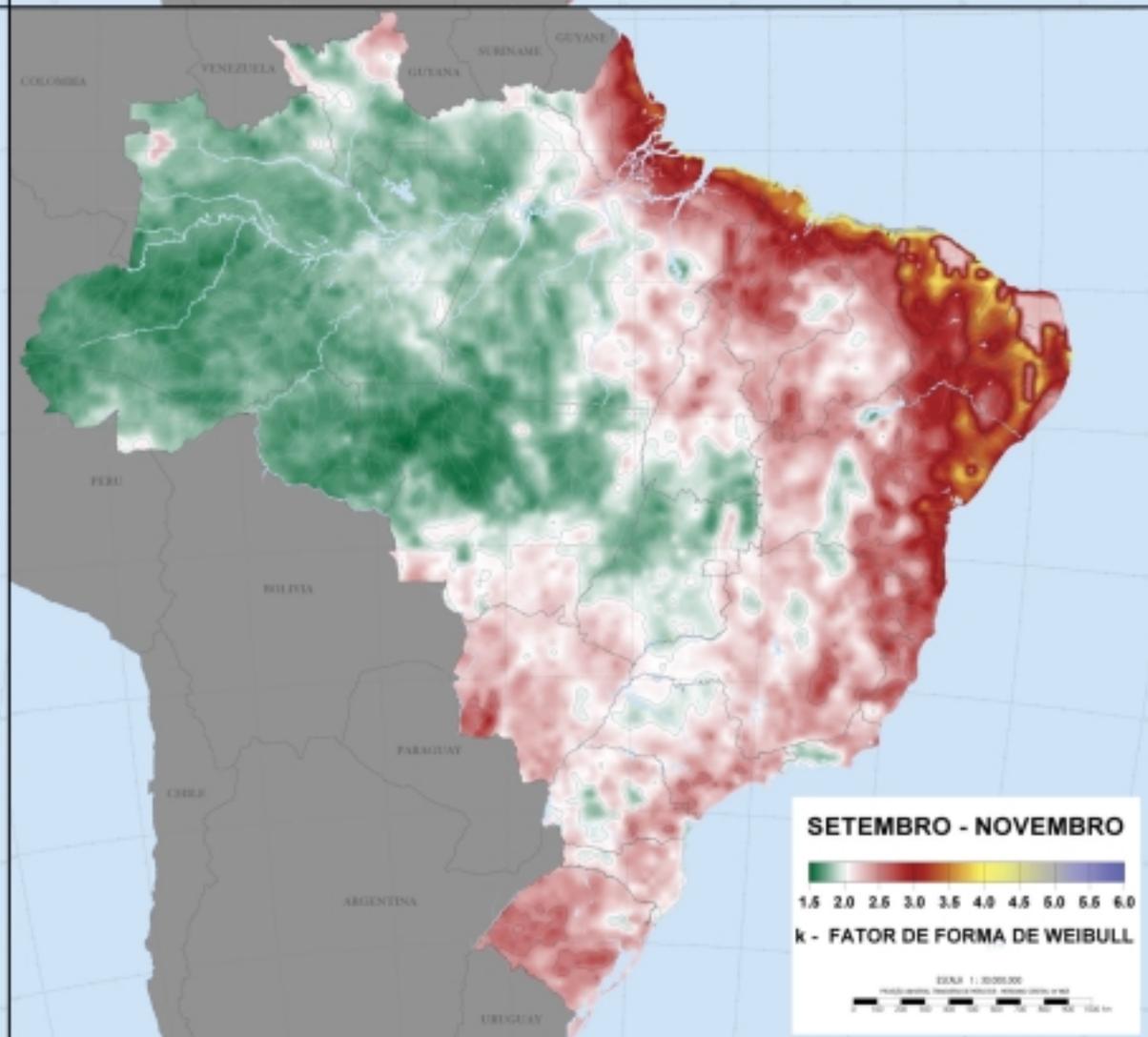
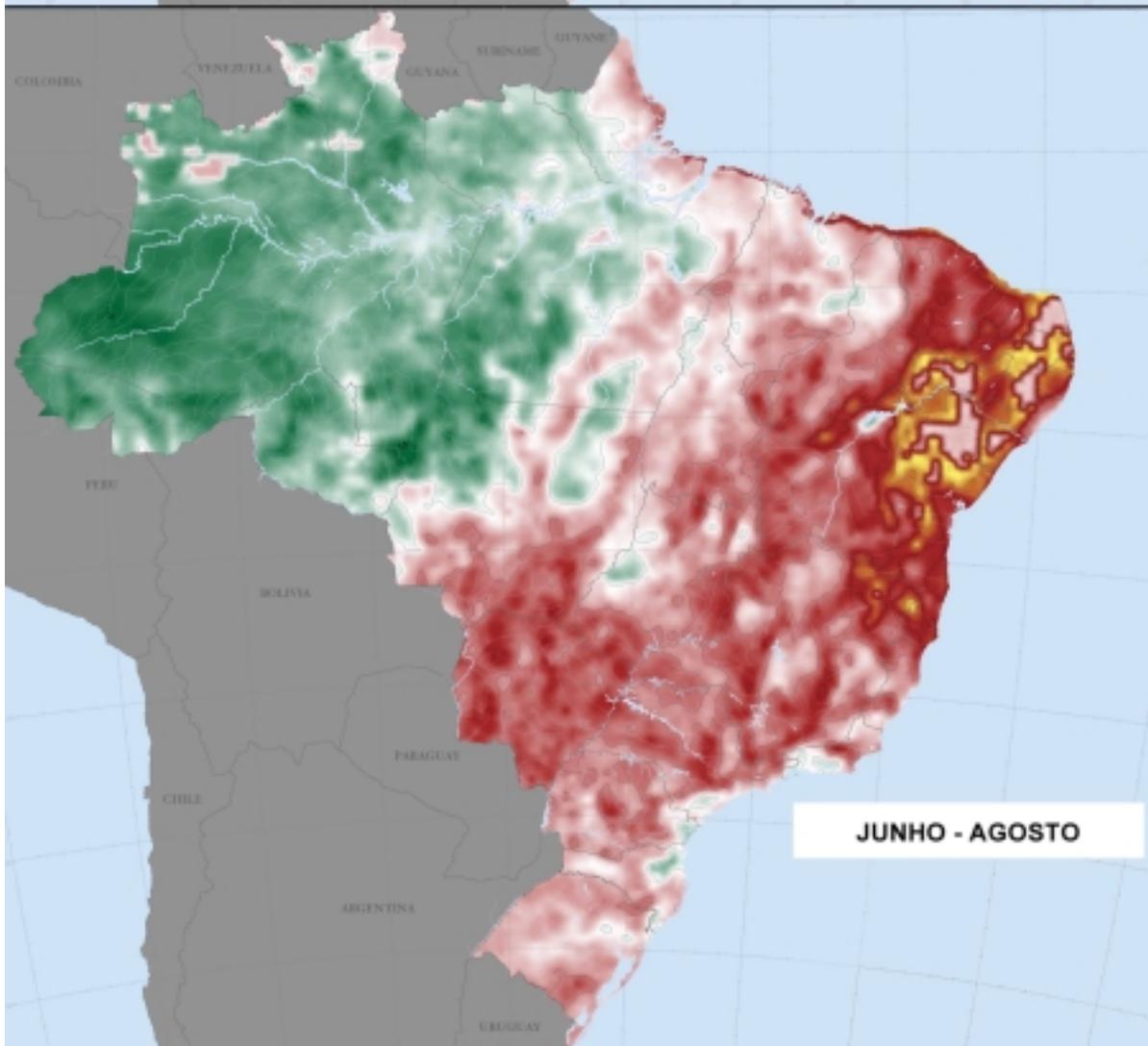
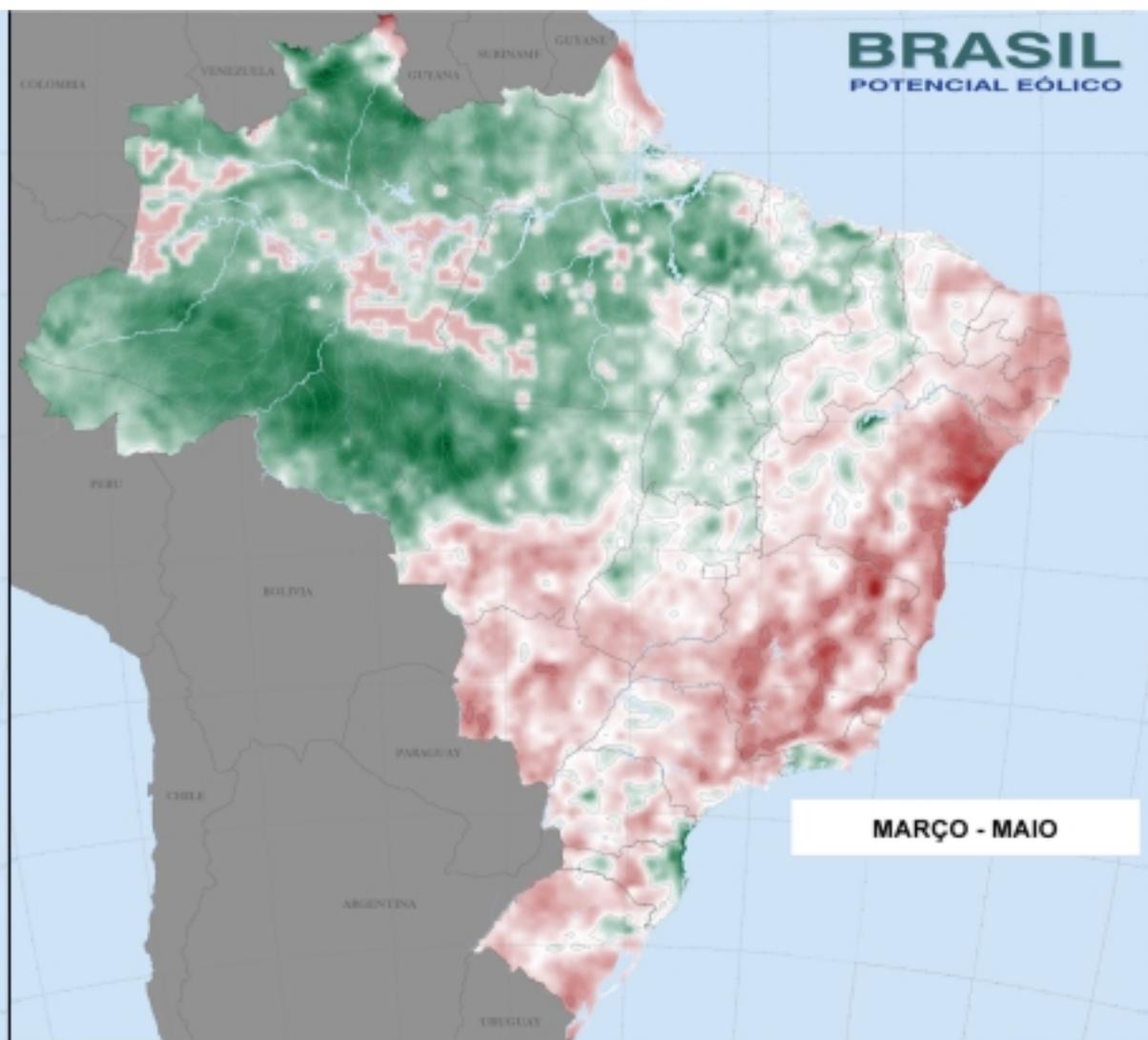
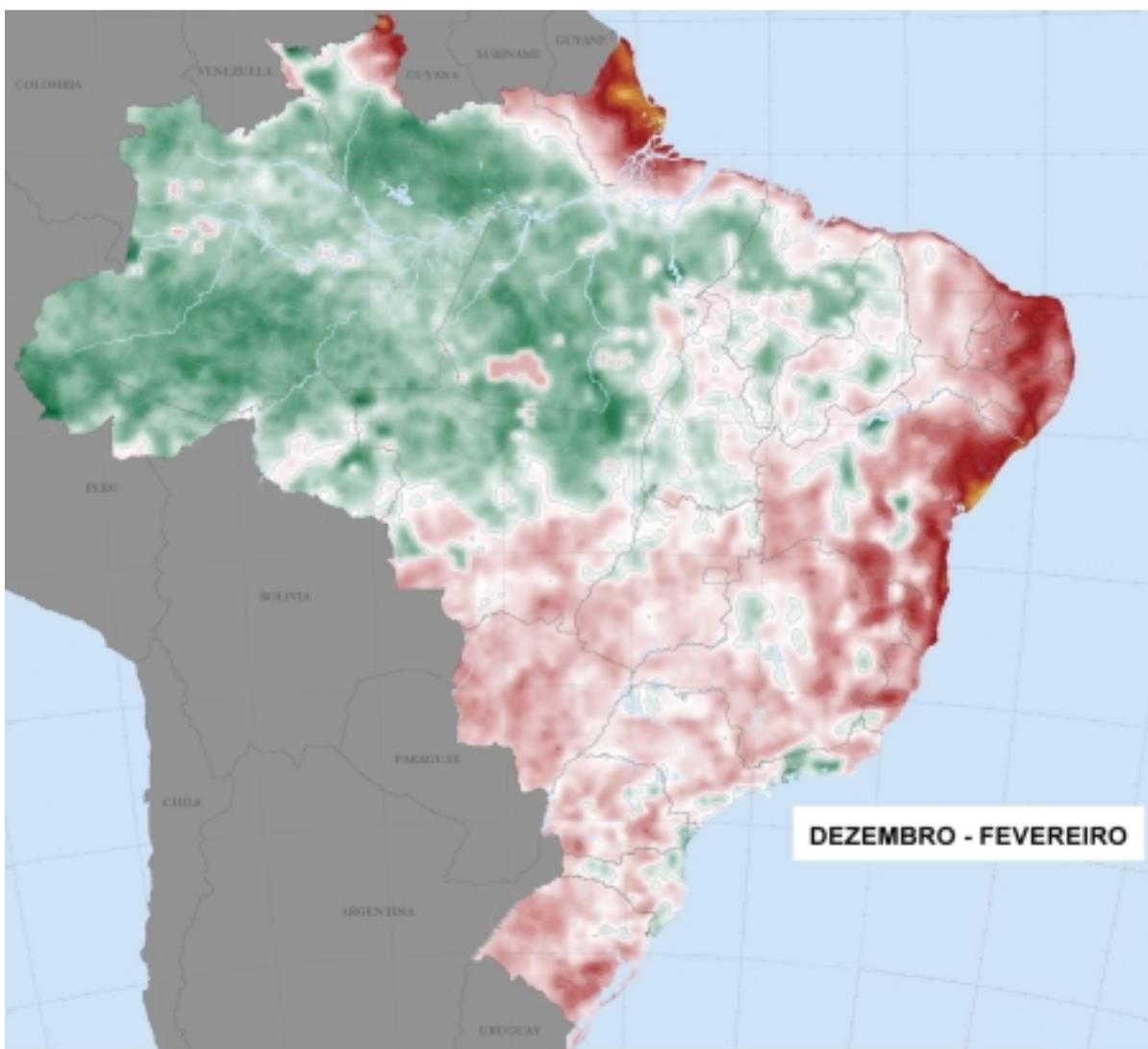
2001





**DIREÇÕES PREDOMINANTES [%]**  
**CÍRCULO DE REFERÊNCIA: 10%**

ESCALA 1:300000



# BRASIL

POTENCIAL EÓLICO

MARÇO - MAIO

DEZEMBRO - FEVEREIRO

JUNHO - AGOSTO

SETEMBRO - NOVEMBRO

1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 5,5 6,0  
k - FATOR DE FORMA DE WEIBULL

ESALA 1: 3000000  
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 km

---

## 4.4 MAPAS DOS POTENCIAIS EÓLICOS REGIONAIS

**NORTE**

**NORDESTE**

**CENTRO-OESTE**

**SUDESTE**

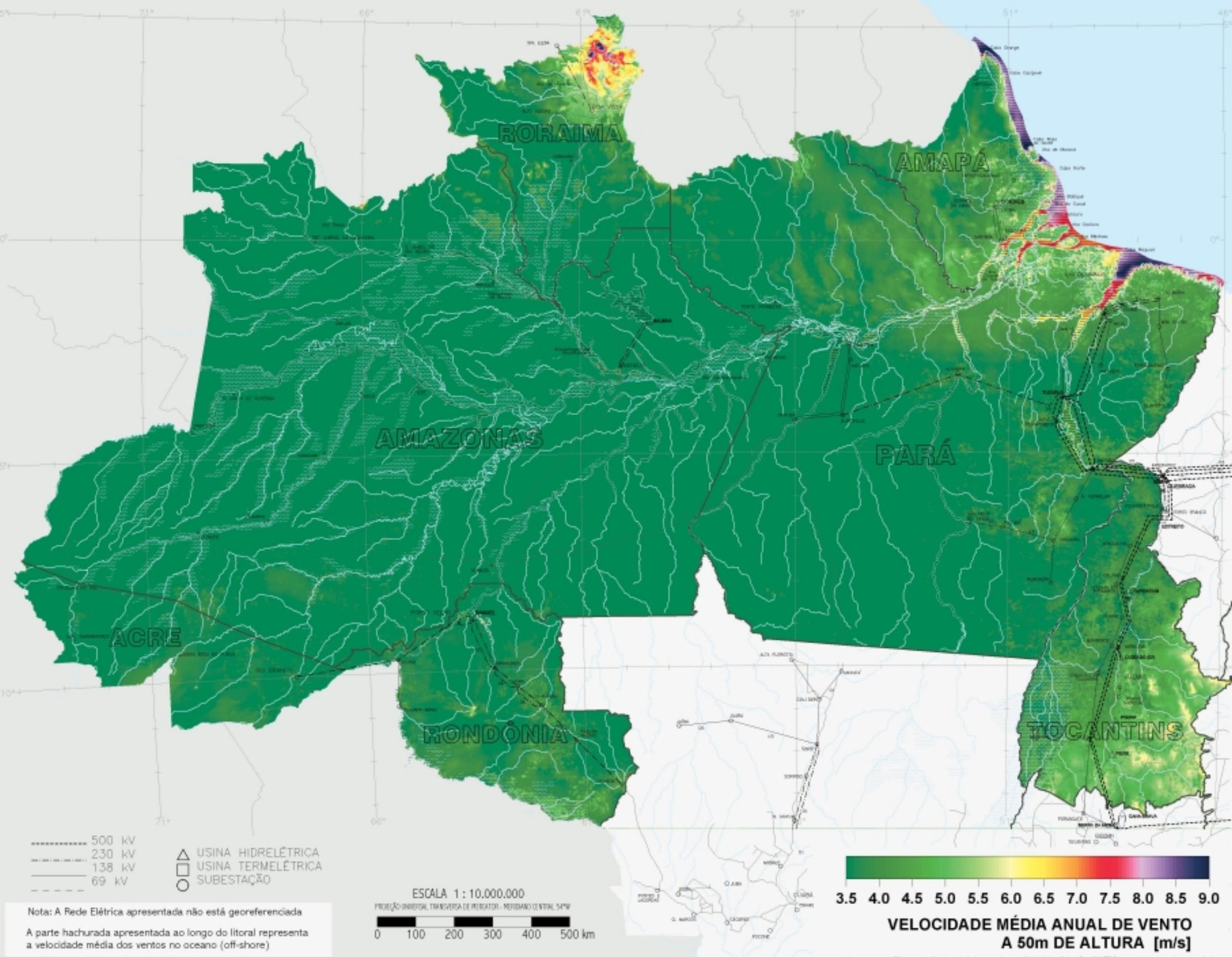
**SUL**

---



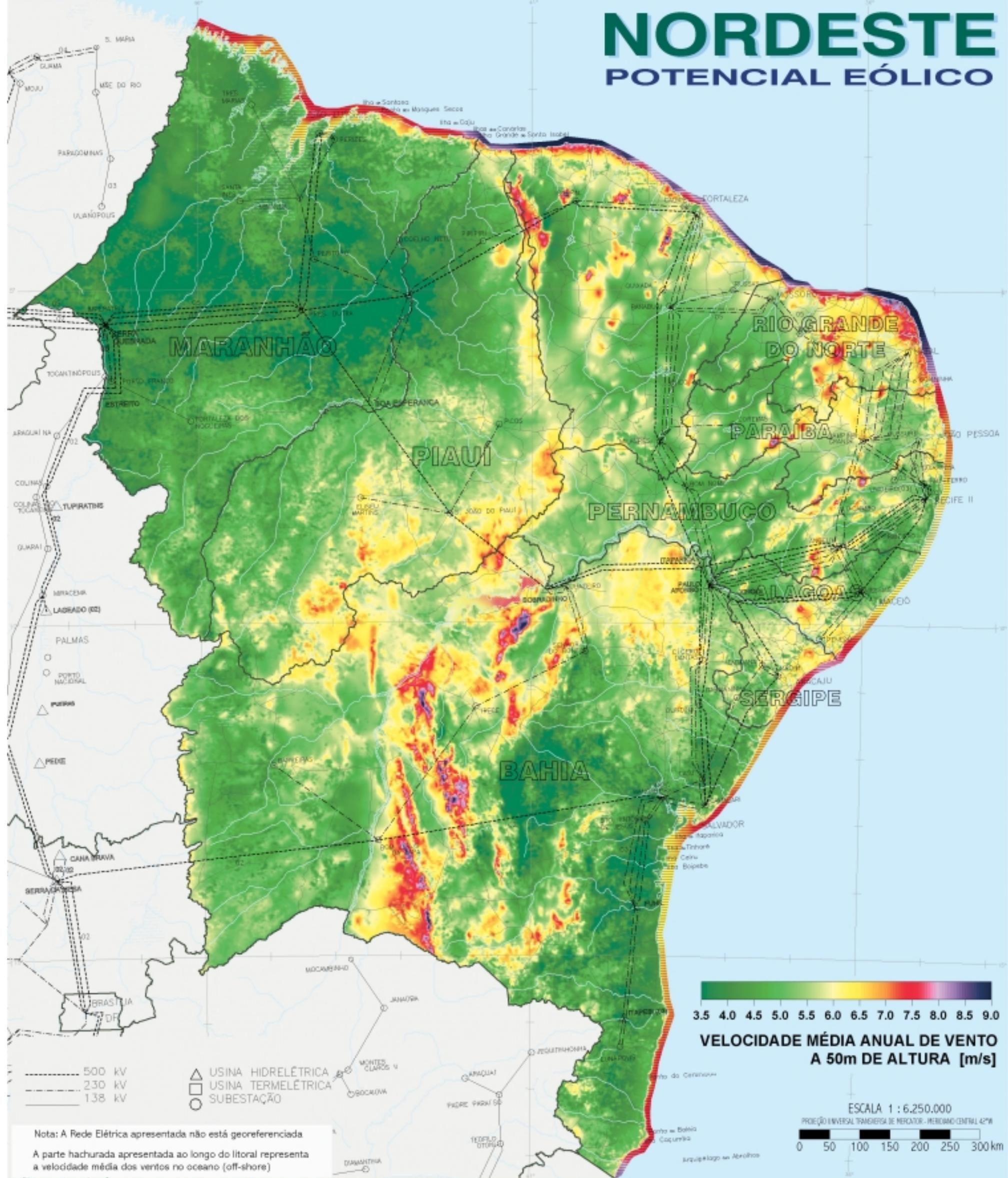
# NORTE

## POTENCIAL EÓLICO



# NORDESTE

## POTENCIAL EÓLICO

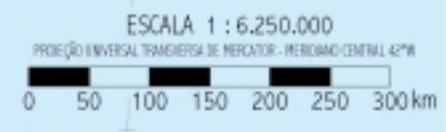


- 500 kV
- 230 kV
- 138 kV
- ▲ USINA HIDRELÉTRICA
- USINA TERMELÉTRICA
- SUBESTAÇÃO

Nota: A Rede Elétrica apresentada não está georeferenciada  
 A parte hachurada apresentada ao longo do litoral representa a velocidade média dos ventos no oceano (off-shore)

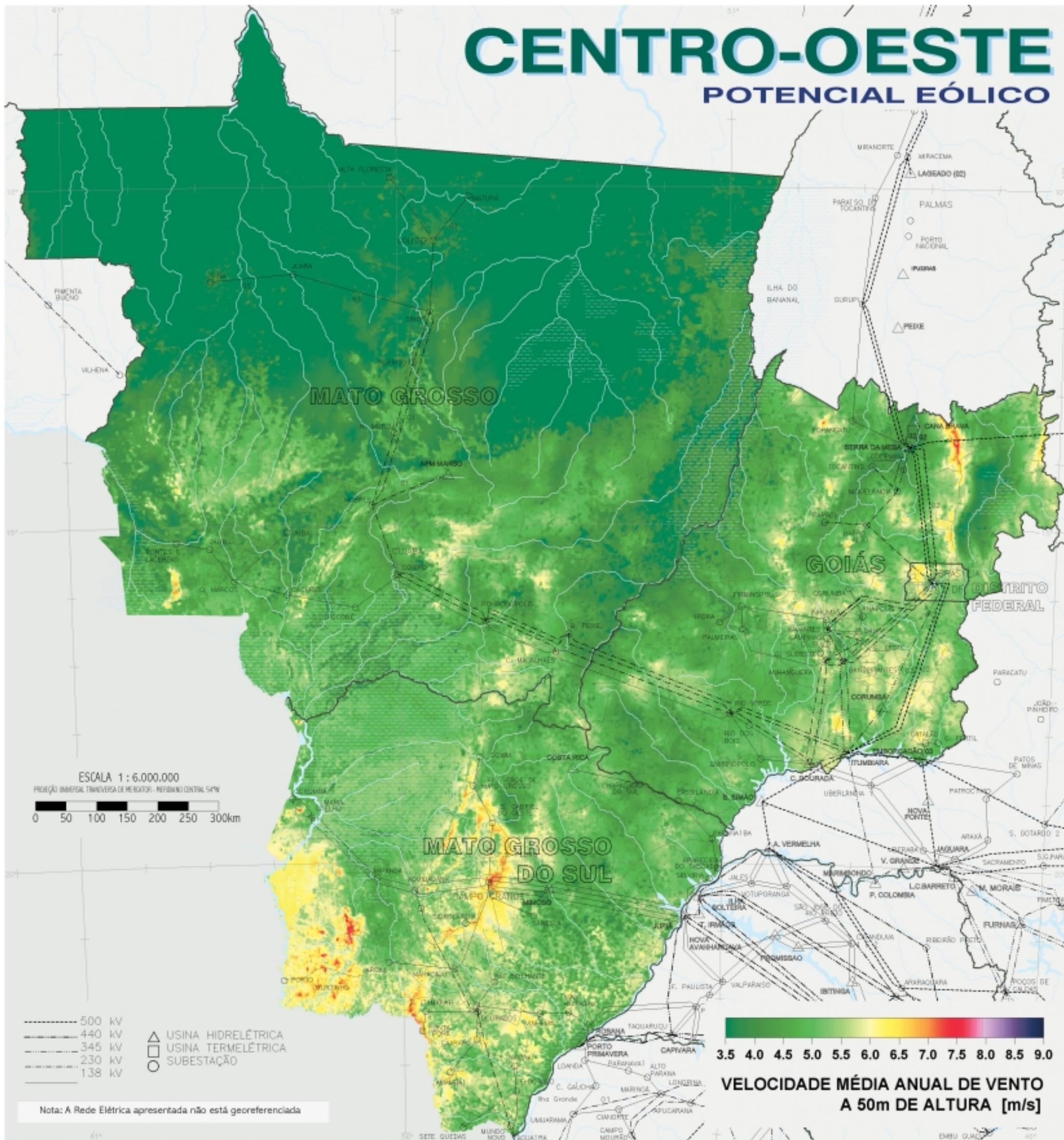


**VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DE VENTO A 50m DE ALTURA [m/s]**



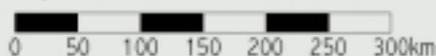
# CENTRO-OESTE

## POTENCIAL EÓLICO



ESCALA 1 : 6.000.000

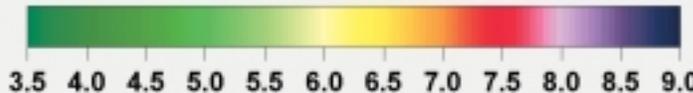
PROJEÇÃO IMERSAL TRANSVERSA DE MERGATOR - MERIDIANO CENTRAL 54°W



- 500 kV
- 440 kV
- 345 kV
- 230 kV
- 138 kV

- △ USINA HIDRELÉTRICA
- USINA TERMELÉTRICA
- SUBESTAÇÃO

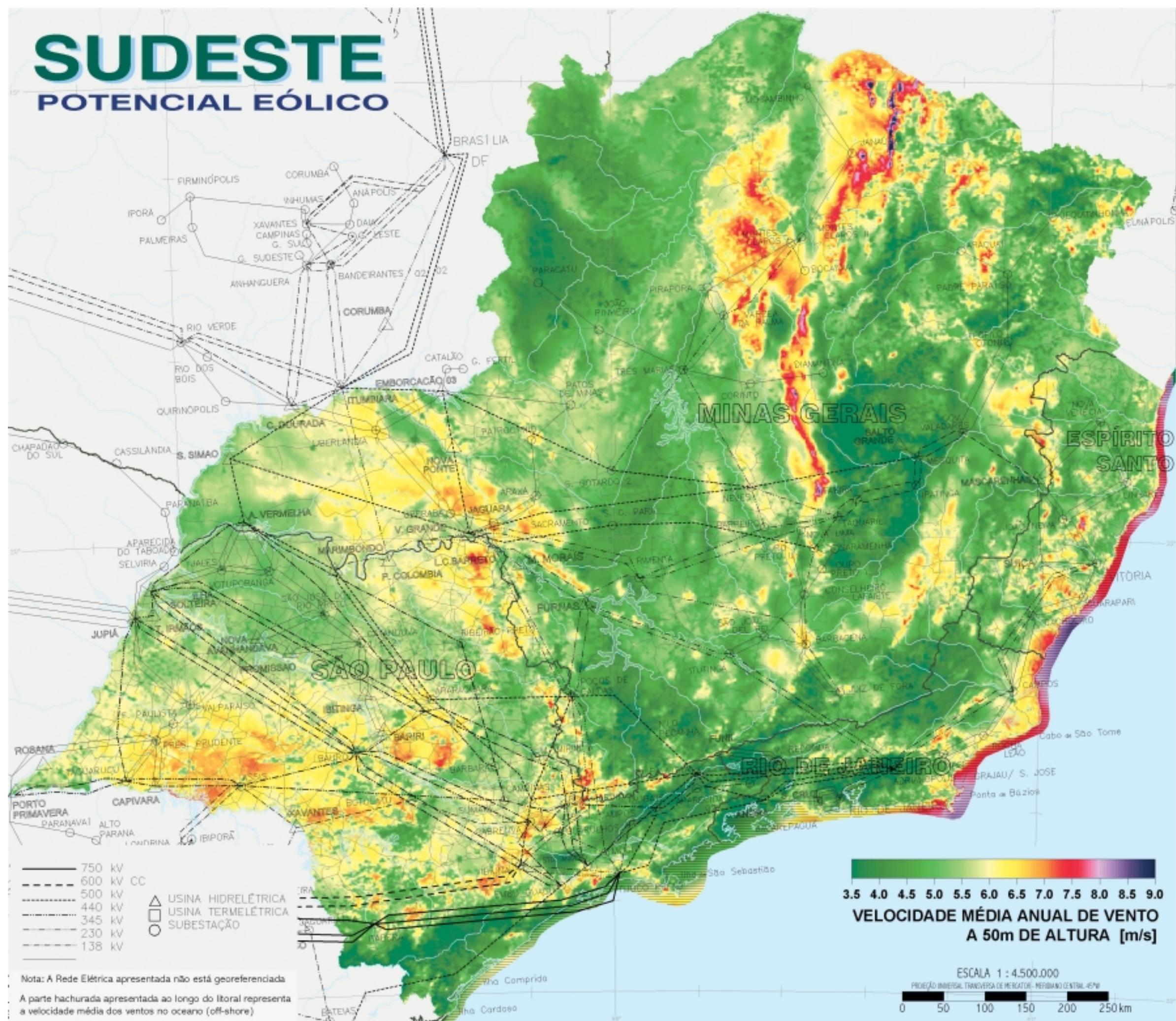
Nota: A Rede Elétrica apresentada não está georeferenciada



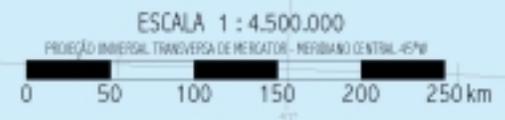
VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DE VENTO  
A 50m DE ALTURA [m/s]

# SUDESTE

## POTENCIAL EÓLICO

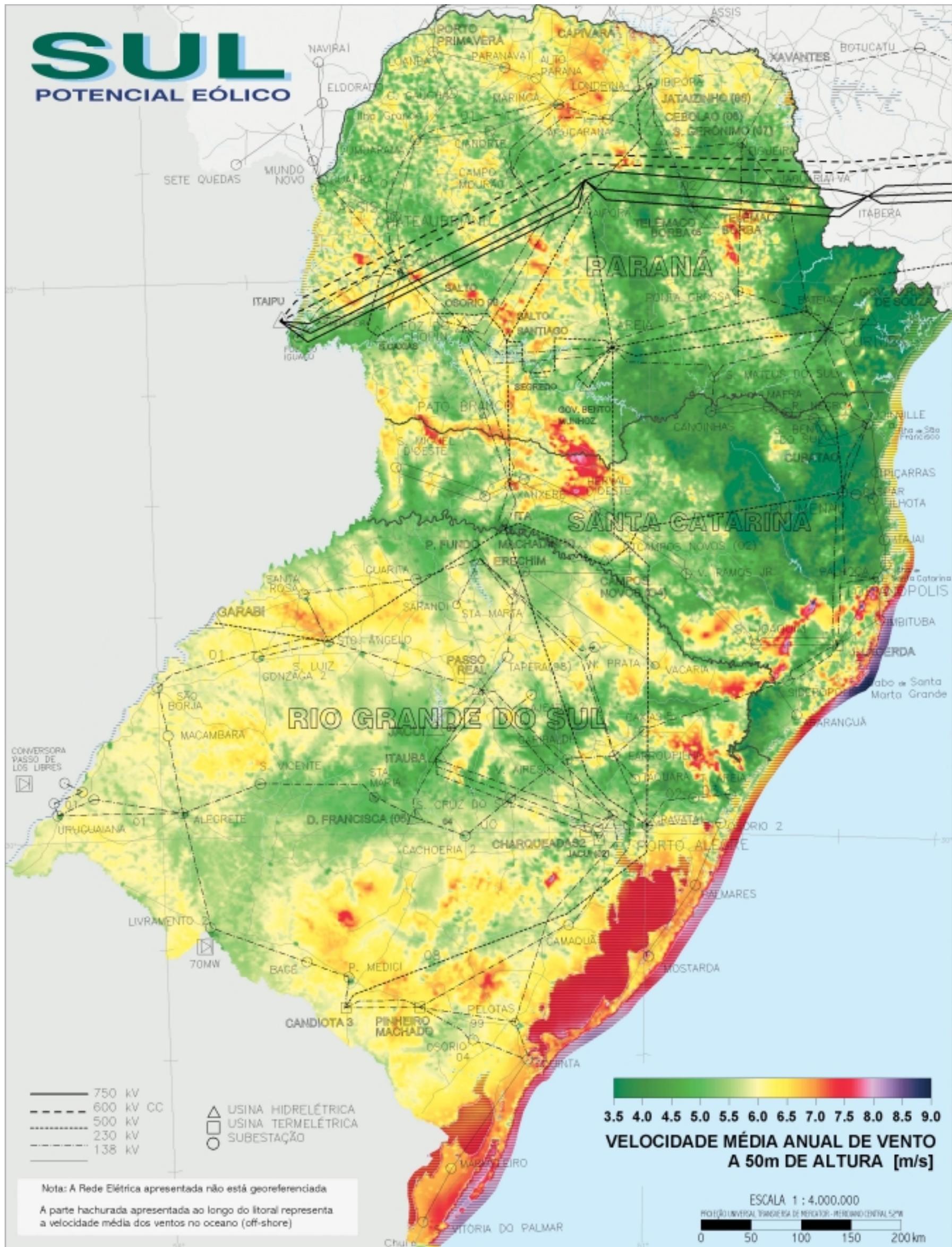


Nota: A Rede Elétrica apresentada não está georeferenciada.  
 A parte hachurada apresentada ao longo do litoral representa a velocidade média dos ventos no oceano (off-shore)



# SUL

POTENCIAL EÓLICO



## 5. ANÁLISE

### 5.1 POTENCIAL EÓLIO-ELÉTRICO ESTIMADO

O ATLAS apresenta as condições médias anuais de vento para todo o território brasileiro na resolução de 1km x 1km.

Por meio da integração dos mapas digitais, utilizando-se recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia elétrica a partir de curvas de potência de turbinas eólicas existentes no mercado, chegou-se aos valores listados na tabela 5.1.

Esse processo indicativo foi realizado considerando-se as seguintes premissas:

- ☀ Foram integradas todas as áreas que apresentaram velocidades médias anuais iguais ou superiores a 6 m/s.
- ☀ Foram consideradas curvas médias de desempenho de turbinas eólicas no estado-da-arte mundial, instaladas em torres de 50m de altura.
- ☀ Para essa estimativa, foi utilizada uma densidade média de ocupação de terreno de apenas 2 MW/km<sup>2</sup>. Esse valor é considerado conservativo, uma vez que representa cerca de 20% do realizável por usinas eólicas em terrenos planos.
- ☀ Foram adotados intervalos com incrementos de 0,5 m/s para as velocidades médias anuais de vento. O desempenho de turbinas eólicas foi calculado para os limites inferiores de cada intervalo.
- ☀ Foi adotado um fator de disponibilidade de 0,98, considerado típico para usinas eólicas comerciais.
- ☀ Foram descartadas da integração as áreas cobertas por água (lagos e lagoas, açudes, rios e mar).

Os resultados da integração, por faixas de velocidade, são apresentados na tabela 5.1 e na figura 5.1(p.44), por regiões.

A partir desses resultados, estimou-se um potencial disponível (segundo as premissas anteriores) da ordem de 143 GW, conforme se mostra na coluna *Integração Cumulativa* da tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Potencial eólico-elétrico estimado do Brasil, calculado por integração de áreas nos mapas temáticos, a partir das premissas apresentadas ao lado

REGIÃO	INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADES					INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
	VENTO [m/s]	ÁREA [km <sup>2</sup> ]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]	VENTO [m/s]	ÁREA (CUMULATIVA) [km <sup>2</sup> ]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
 NORTE	6 - 6,5	11460	22,92	0,13	25,58	>6	24206	48,41	70,49
	6,5 - 7	6326	12,65	0,17	18,46	>6,5	12746	25,49	44,91
	7 - 7,5	3300	6,60	0,20	11,33	<b>&gt; 7 m/s</b>	<b>6420</b>	<b>12,84</b>	<b>26,45</b>
	7,5 - 8	1666	3,33	0,25	7,15	>7,5	3120	6,24	15,11
	8 - 8,5	903	1,81	0,30	4,65	>8	1454	2,91	7,96
	>8,5	551	1,10	0,35	3,31	>8,5	551	1,10	3,31
 NORDESTE	6 - 6,5	146589	293,18	0,13	327,19	>6	245105	490,21	649,50
	6,5 - 7	60990	121,98	0,17	178,02	>6,5	98516	197,03	322,31
	7 - 7,5	24383	48,77	0,20	83,73	<b>&gt; 7 m/s</b>	<b>37526</b>	<b>75,05</b>	<b>144,29</b>
	7,5 - 8	9185	18,37	0,25	39,43	>7,5	13143	26,29	60,56
	8 - 8,5	3088	6,18	0,30	15,91	>8	3958	7,92	21,13
	>8,5	870	1,74	0,35	5,23	>8,5	870	1,74	5,23
 CENTRO-OESTE	6 - 6,5	41110	82,22	0,13	91,76	>6	50752	101,50	120,83
	6,5 - 7	8101	16,20	0,17	23,65	>6,5	9642	19,28	29,07
	7 - 7,5	1395	2,79	0,20	4,79	<b>&gt; 7 m/s</b>	<b>1541</b>	<b>3,08</b>	<b>5,42</b>
	7,5 - 8	140	0,28	0,25	0,60	>7,5	146	0,29	0,63
	8 - 8,5	6	0,01	0,30	0,03	>8	6	0,01	0,03
	>8,5	0	0,00	0,35	0,00	>8,5	0	0,00	0,00
 SUDESTE	6 - 6,5	114688	229,38	0,13	255,99	>6	175859	351,72	446,07
	6,5 - 7	46302	92,60	0,17	135,15	>6,5	61171	122,34	190,08
	7 - 7,5	11545	23,09	0,20	39,64	<b>&gt; 7 m/s</b>	<b>14869</b>	<b>29,74</b>	<b>54,93</b>
	7,5 - 8	2433	4,87	0,25	10,44	>7,5	3324	6,65	15,29
	8 - 8,5	594	1,19	0,30	3,06	>8	891	1,78	4,84
	>8,5	297	0,59	0,35	1,78	>8,5	297	0,59	1,78
 SUL	6 - 6,5	121798	243,60	0,13	271,86	>6	171469	342,94	424,74
	6,5 - 7	38292	76,58	0,17	111,77	>6,5	49671	99,34	152,88
	7 - 7,5	9436	18,87	0,20	32,40	<b>&gt; 7 m/s</b>	<b>11379</b>	<b>22,76</b>	<b>41,11</b>
	7,5 - 8	1573	3,15	0,25	6,75	>7,5	1943	3,89	8,71
	8 - 8,5	313	0,63	0,30	1,61	>8	370	0,74	1,95
	>8,5	57	0,11	0,35	0,34	>8,5	57	0,11	0,34
 TOTAL BRASIL ESTIMADO	>6	667391	1334,78		1711,62	>6	667391	1334,78	1711,62
	>6,5	231746	463,49		739,24	>6,5	231746	463,49	739,24
	<b>&gt; 7 m/s</b>	<b>71735</b>	<b>143,47</b>		<b>272,20</b>	<b>&gt; 7 m/s</b>	<b>71735</b>	<b>143,47</b>	<b>272,20</b>
	>7,5	21676	43,35		100,30	>7,5	21676	43,35	100,30
	>8	6679	13,36		35,93	>8	6679	13,36	35,93
	>8,5	1775	3,55		10,67	>8,5	1775	3,55	10,67

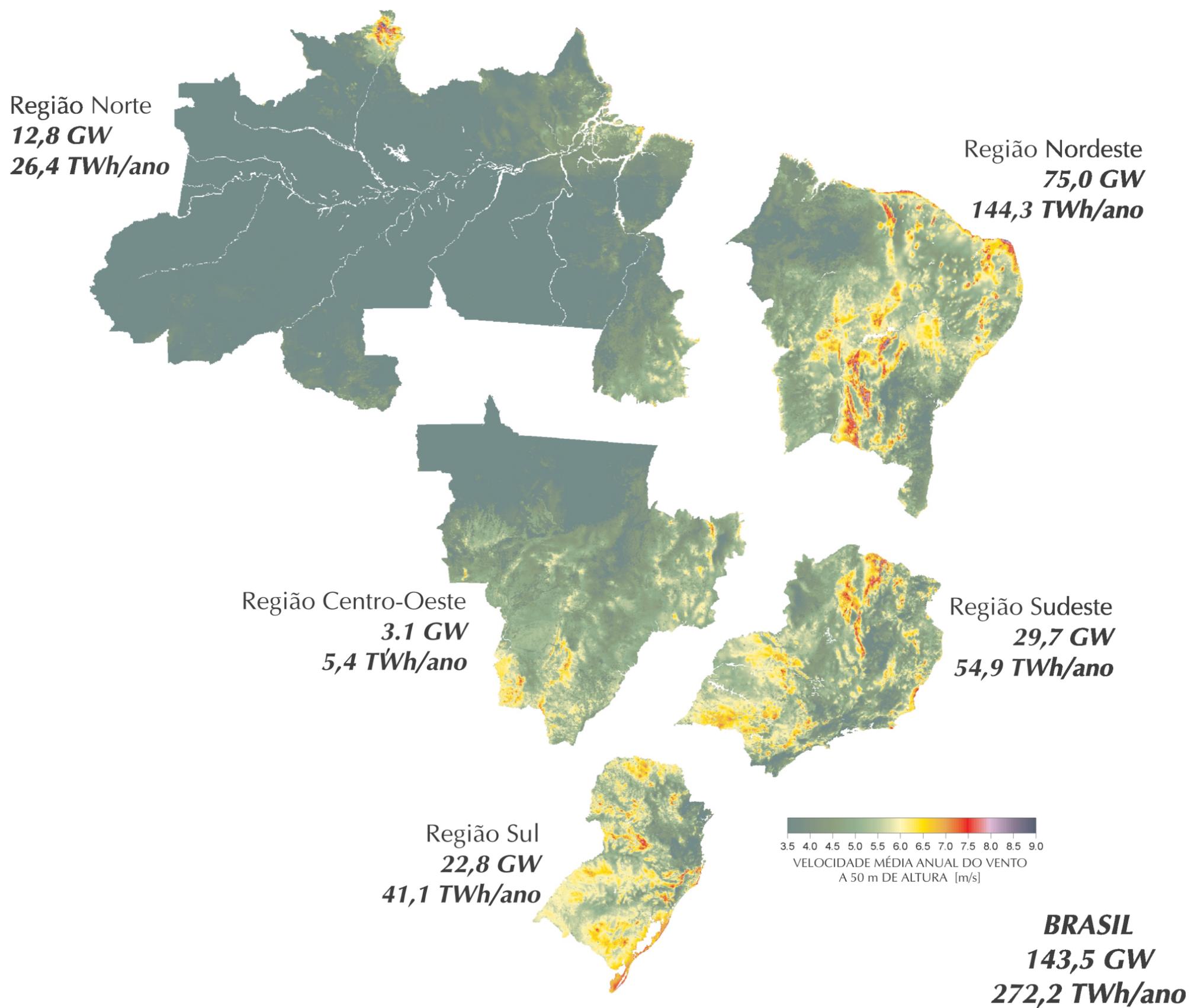


Figura 5.1 – Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DADOS DE Vento de Superfície nos Principais Aeroportos do Brasil. IAE/CTA, s.d.
- [2] ENERGIA Eólica: Inventário / Tecnologia. v. II e V. Fontes Energéticas Brasileiras, CHESF, 1987.
- [3] ATLAS DO Levantamento Preliminar do Potencial Eólico Nacional. ELETROBRÁS-CONSULPUC. S.d. Convênio ECV-192/79
- [4] ATLAS DO Potencial Eólico Nacional. ELETROBRÁS / Fundação Padre Leonel Franca, Centrais Elétricas Brasileiras, 1988.
- [5] BITTENCOURT, R., ALMEIDA G. e CARPENTIERI, E. *Potencial eólico no litoral do Ceará e Rio Grande do Norte para geração de energia elétrica*. CHESF, out.1996. DEFA-EO-RT-002/96 rev.1.
- [6] BALANÇO Energético Nacional 2000 - Ano Base 1999. Brasília: DNDE Secretaria de Energia, Ministério de Minas e Energia, 2000.
- [7] LEGATES, D. R. e WILLMOTT, C. J. Monthly average surface air temperature and precipitation. digital raster data on a 30 minute cartesian orthonormal geodetic (lat/long) 360x720grid. In: *Global ecosystems database. Version 2.0*. Boulder, CO: NOAA National Geophysical Data Center. Forty-eight independent and four derived single-attribute spatial layers. 47,846,439 bytes in 194 files. 1992. [first published in 1989]
- [8] ELDRIDGE, F.R. *Wind machines*. Van Nostrand, 1980.
- [9] TORREY, V. *Wind catchers, american windmills of yesterday and tomorrow*. The Stephen Greene Press, 1976.
- [10] REHFELDT, K. e CHRISTIAN, S. - Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland - Stand 31.12.2000. *DEWI MAGAZIN*, Wilhelmshaven, n.18, Feb. 2001.
- [11] THE WINDICATOR: Operating Wind Power Capacity. *Windpower Monthly*, v.17, n.4, Apr. 2001.
- [12] ESTADO DO CEARÁ - Secretaria da Infra-Estrutura do Governo/Camargo Schubert Engenharia Eólica. *Atlas do potencial eólico*. Mar. 2001.
- [13] US Geological Survey EROS Data Center, "Global Land Cover Characteristics Data Base" - Section 6.0 ([http://edcdaac.usgs.gov/glcc/globdoc2\\_0.html](http://edcdaac.usgs.gov/glcc/globdoc2_0.html))
- [14] TEN-YEAR Expansion Plan 1999/2008. GCPS, Eletrobrás, Ministry of Mines and Energy, s.d.
- [15] FRANCHITO, S. H. e KOUSKY, V. E. *Um modelo numérico para simulação das circulações locais, aplicado à região costeira do Nordeste do Brasil*. INPE-2270-PRE/051. s.d.
- [16] GOMES FILHO, M. F. *Um estudo sobre a influência do albedo diferencial e da orografia na circulação atmosférica: uma aplicação para o Nordeste brasileiro*. INPE-1640-TDL/015.s.d.
- [17] ROCHA, N. A.; SCHULTZ, D.; BITTENCOURT, R.; AMARANTE, O.A.C. do e SUGAI, M. *Estabilização sazonal da oferta de energia através da complementaridade entre os regimes hidrológico e eólico*. XV SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Grupo de Planejamento de Sistemas Elétricos. Foz do Iguaçu, PR, 17-22/out.1999.
- [18] PETERSEN, N., MORTENSEN, N. G., LANDBERG, L, HOEJSTRUP, J. e FRANK, H. P. *Wind Energy, Wiley InterScience*, v.1, n.1, p.2-22, 1998. Wind power meteorology. Part I: Climate and turbulence.
- [19] PETERSEN, N., MORTENSEN, N.G., LANDBERG, L, HOEJSTRUP, J. e FRANK, H.P. *Wind Energy, Wiley InterScience*, v.1. n.2, p.55-72, 1998. Wind power meteorology. Part II: Siting and models.
- [20] WEGLEY, H.L. *et al. Journal of Climate and Applied Meteorology*, v.26, n.6, June 1987. Improving the performance of mass - Consistent numerical models using optimization techniques.
- [21] MARKUS, M., BAILEY, B. *Survey of wind flow models*. National Renewable Energy Laboratory, TAT-5-15208-01, oct. 1996.
- [22] BARNARD, J.C. *Solar Energy*, v.46, n.5, p. 283-294, 1991. An evaluation of three models designed for siting wind turbines in areas of complex terrain.
- [23] SIPOT2000. *Banco de dados hidrológicos*. ELETROBRÁS, 2000.
- [24] RELATÓRIO CHESF-SCEL-GTAS 02/99 de mar./abr. 1999.
- [25] ESTUDOS Energéticos para a Usina Eólica de Palmas. COPEL - Relatório CNPG 22/97.
- [26] AMARANTE, O.A.C. do, SCHULTZ, D., BITTENCOURT, R. e ROCHA, N. *Wind/hydro complementary seasonal regimes in Brazil*. DEWEK2000, Wilhelmshaven,2000.