

ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

Simulações 2013



Atlas do Potencial Eólico Brasileiro

Simulações 2013

1º Edição

Rio de Janeiro - RJ

Maio/2017

Agradecemos o apoio dado pelo então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, através da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – Setec, que, em parceria com a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, viabilizou diversos contatos com operadores de parques eólicos no sentido de obter autorizações para uso dos dados anemométricos exclusivamente para ajuste do modelo utilizado.

Também agradecemos as empresas Brasventos/Eletróbrás, BWGuirapa, Brennand/Chesf. CPFL Renováveis, Desenvix, Eletrosul, ENEL, Enerfin, MSPAR/Cúbico, Petrobrás, Queiroz Galvão Renováveis e Renova pelas autorizações concedidas para realização deste projeto

Coordenação

Ary Vaz Pinto Junior - Cepel
Ricardo Marques Dutra – Cepel
Waldenio Gambi de Almeida – CPTEC/Inpe

Autores

Antonio Carlos de Barros Neiva – Cepel
Ricardo Marques Dutra – Cepel
Sergio Roberto Ferreira Cordeiro de Melo – Cepel
Vanessa Gonçalves Guedes – Cepel
Angelo Alberto Mustto Cabrera – PUC-Rio
Waldenio Gambi de Almeida – CPTEC/Inpe
Rodrigo de Oliveira Braz – Funcate

C399a

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL
Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013 /
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL – Rio de Janeiro:
CEPEL, 2017.
50 p. il.

Inclui bibliografia

1. Energia Eólica. 2. Mesoescala. 3. Modelo Brams. 4. Mapas
Temáticos. I. Título. II. Série.

CDU: 621.548

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel
Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária
Rio de Janeiro - RJ - Brasil, CEP: 21941-911
www.cepel.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Inpe
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC
Rodovia Dutra, km 39
Cachoeira Paulista – SP – 12630-000
www.cptec.inpe.br

Financiadora de Estudos e Projetos – Finep
Ventura Tower, Torre Oeste - Av. República do Chile, 330
Centro, Rio de Janeiro - RJ, 20031-170
www.finep.org.br

Sumário

1 APRESENTAÇÃO	6
2 METODOLOGIA	9
2.1 O MODELO BRAMS	9
2.2 DADOS ANEMOMÉTRICOS	11
2.3 METODOLOGIA DE AJUSTE	12
2.3.1 Avaliação dos dados observados	13
2.3.2 Elaboração de campos de ajustes	15
2.3.3 Validação e avaliação estatística dos resultados	15
3 MAPAS TEMÁTICOS	17
4 ATLAS ONLINE	32
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
ANEXO I – Avaliação estatística dos resultados obtidos a partir do campo de ajuste	38
ANEXO II – Interpolação dos resultados do brams para alturas comerciais	42

Figuras

Figura 1 - Representação esquemática do modelo Brams (FREITAS, et al., 2017)	9
Figura 2 - Áreas de diferentes resoluções do Brams	11
Figura 3 - Ilustração das diferenças entre o "mundo real" e a representação matemática dos modelos numéricos (KARL, et al., 1989)	11
Figura 4 - Esquematisação da grade do modelo Brams mostrando os pontos de referência para as simulações no entorno da localização do ponto de observação	14
Figura 5 - Redução do erro RMSE observado com progressão dos ajustes aplicados nos resultados do modelo	16
Figura 6 - Visualização da apresentação, via <i>web</i> , do conteúdo das simulações 2013 do novo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro	32
Figura 7 - Tela inicial da consulta <i>online</i>	32
Figura 8 - Exemplo de apresentação das informações no ambiente de consulta <i>online</i>	33
Figura 9 - Organização dos mapas temáticos, consultas comparativas e tabulares para visualização <i>online</i>	33
Figura 10 - Exemplo de pontos de grade e da informação tabular da rosa dos ventos	34
Figura 11 - Exemplo de pontos de grade e da informação tabular do regime diurno	34
Figura 12 - Consulta comparativa entre mapas temáticos de velocidade média anual em duas alturas distintas	35
Figura 13 - Consulta comparativa entre mapas temáticos de velocidade média anual em quatro alturas distintas	36
Figura 14 - Consulta tabular de todas as informações dos mapas temáticos	36

1 Apresentação

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado em 2001 e concebido para a altura de 50 metros (altura suficiente para as tecnologias dos aerogeradores da época), foi, sem dúvida, um importante marco para o desenvolvimento do setor eólico no Brasil. Com o passar dos anos, o mercado eólico brasileiro experimentou crescimento significativo, tanto devido à implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - Proinfa, quanto aos resultados alcançados pelos leilões de energia. Ao longo do tempo, a tecnologia de aerogeradores desenvolveu-se significativamente disponibilizando modelos de maiores potências e dimensões para operação em alturas mais elevadas, quando comparados aos modelos comercializados em 2001.

O então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, através da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - Setec e da Coordenação Geral de Tecnologias Setoriais - CGTS, tomou a iniciativa de promover a atualização do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, considerando alturas superiores a 50 metros e as novas tecnologias disponíveis comercialmente.

Nesse sentido, foi aprovado, pelo Comitê Gestor do Fundo Setorial de Energia - CT-ENERG, um projeto de encomenda vertical ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel, implementado pela Financiadora de Estudos e Projetos - Finep, por meio do Convênio de nº 01.09.539.00, sob o título "Atualização do Atlas Eólico Brasileiro".

Para a realização deste projeto, o Cepel estabeleceu parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Inpe para alocação da infraestrutura e de profissionais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. A partir do trabalho conjunto entre o Cepel e o CPTEC, foi possível estimar o potencial eólico para todo o território nacional através do uso de modelos numéricos utilizados para previsões do tempo. Considerando a complexidade de tais modelos e a necessidade de abranger todo o território brasileiro, o processamento das informações contou amplamente com o uso do supercomputador do CPTEC.

Dentre os diversos modelos numéricos utilizados pelo CPTEC para previsão do tempo, o modelo de mesoescala Brams (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) foi escolhido para estimar a velocidade e a direção do vento em todo o país, para as alturas de 30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200 metros. Tal escolha foi baseada tanto no fato deste modelo ser o resultado da consolidação de várias adaptações do modelo Rams (*Regional Atmospheric Modeling System*) para as condições climáticas brasileiras, quanto na existência de um grande número de meteorologistas que o utilizam para previsão do tempo em todo o Brasil. Como o modelo Brams apresenta melhores resultados para simulações realizadas com base numa grade de 5 km x 5 km, escolheu-se esta resolução para a elaboração do presente Atlas.

O caráter inovador da utilização do modelo Brams exclusivamente para previsão da velocidade e da direção do vento em todo o território nacional trouxe diversos desafios ao longo do projeto. Para a obtenção de um ano típico, que representasse informações médias de um período e não de um ano específico, decidiu-se que seriam simulados os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. A partir dos dados simulados e, posteriormente, ajustados com dados medidos, seria, então, obtido o ano típico para o período dos quatro anos mencionados. Uma grande preocupação ao longo da elaboração do presente Atlas foi a questão da comparação dos resultados das simulações geradas pelo modelo Brams com dados efetivamente medidos. Apesar da vasta rede climatológica distribuída por todo o Brasil, disponibilizada pelo Inpe¹, os melhores dados para comparação e ajuste dos resultados das simulações obtidas com o modelo Brams são aqueles provenientes de estações anemométricas específicas para empreendimentos eólicos. Uma das grandes vantagens de se utilizar estes dados está nas alturas de medição, que coincidem com as alturas dos

¹ A base de dados meteorológicos do Inpe, é formada por dados de estações meteorológicas convencionais e automáticas do INMET e de outras instituições, dados de aeroportos (METAR) do DECEA, relatórios climatológicos do INMET e do DECEA, estudos acadêmicos e agrícolas para locais específicos e campos de dados interpolados obtidos a partir de todas as observações disponíveis na base de dados do CPTEC.

aerogeradores disponíveis comercialmente no Brasil. Através do apoio do MCTI e da Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 12 empreendedores autorizaram o uso de informações anemométricas oriundas de 39 parques eólicos e relativas ao período dos anos simulados. As autorizações concedidas para o uso de dados anemométricos provenientes de parques eólicos em operação no Brasil, considerados de alta qualidade, possibilitaram ajustes importantes com relação aos resultados simulados nas principais áreas de comprovado potencial.

Tendo em vista a complexidade do projeto decorrente do uso inovador do modelo Brams, os problemas de ordem técnica, que foram resolvidos ao longo de sua execução, e a data de encerramento do Convênio com a Finep, só foi possível realizar a simulação e o ajuste dos dados referentes ao ano de 2013. Adicionalmente aos problemas já mencionados, a simulação, usando o modelo Brams, para todo o território nacional, é altamente intensiva no uso de recursos computacionais. Uma vez que o supercomputador do Inpe, assim como os profissionais que o operam, atendem diversas demandas (entre elas, as previsões diárias do tempo), a disponibilidade para realizar as simulações destinadas à elaboração de um Atlas Eólico não é ilimitada, o que trouxe algumas restrições na velocidade de execução do trabalho.

As simulações com o modelo Brams referentes ao ano de 2013, a comparação dos resultados obtidos com dados medidos e a subsequente realização de ajustes constituem marcos significativos do trabalho de elaboração do presente Atlas Eólico. Após a conclusão destas etapas, foram produzidos mapas temáticos relativos às médias anuais, obtidas a partir de simulações para o ano de 2013. Adicionalmente, tornou-se possível, para a sociedade, a consulta web das informações em ambiente georreferenciado. São disponibilizados, tanto neste documento quanto nos seguintes mapas temáticos:

- Velocidade média anual para a altura de 30 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 50 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 80 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 100 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 120 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 150 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 200 metros;
- Fator de escala de Weibull para a altura de 100 metros;
- Fator de forma de Weibull para a altura de 100 metros;
- Densidade de potência para a altura de 100 metros;
- Massa específica do ar para a altura de 100 metros;
- Rosa dos ventos anual - frequências x direção;
- Regime diurno anual;
- Rugosidade.

O ambiente *web* de consulta aos dados foi desenvolvido de forma a fornecer aos usuários a possibilidade, não somente, de visualização das informações de cada mapa temático, mas também de fazer comparações entre dois temas distintos, além de outras funcionalidades de mapas disponíveis em um ambiente georreferenciado. Por meio de um único *click*, é possível obter todas as informações contidas nos mapas temáticos, tanto para um ponto específico, quanto para uma região previamente definida. O presente Atlas disponibiliza, de forma inédita, toda a base de dados consolidados e georreferenciados em ambiente web para livre consulta.

Nesta publicação são apresentadas as metodologias desenvolvidas para a elaboração dos ajustes dos resultados obtidos com o modelo Brams, para a avaliação estatística do resultado final e para as interpolações necessárias à confecção dos mapas temáticos. Também é descrita a metodologia utilizada para a estimativa do potencial eólico brasileiro, considerando as restrições que impedem a instalação de parques eólicos (áreas de proteção ambiental,

florestas, rios etc.). A consolidação das simulações para o ano de 2013, apresentada, nesta publicação, através dos mapas temáticos e da consulta web, representa um importante marco para a elaboração de um Atlas Eólico que consistirá de um período maior de anos simulados.

Para dar continuidade ao desenvolvimento do presente trabalho, visando à obtenção do ano típico, pretende-se realizar o ajuste e a validação estatística dos resultados para os anos de 2012, 2014 e 2015 (cujas simulações com o modelo Brams já estão concluídas) nos mesmos moldes do que foi efetuado para o ano de 2013. Adicionalmente, pretende-se realizar simulações em resolução de microescala em sítios com elevado potencial para abrigar parques eólicos.

2 Metodologia

O mapeamento do potencial eólico para todo o território brasileiro foi realizado a partir do modelo numérico de mesoescala Brams (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*), com resolução horizontal de 5 km x 5 km e uma rede de medições anemométricas utilizada para ajuste dos resultados.

Nesta seção serão apresentadas as metodologias utilizadas para ajuste dos resultados de mesoescala. Também serão descritos os dados anemométricos utilizados no ajuste e validação dos resultados além dos cálculos necessários para elaboração dos diversos mapas temáticos, tais como os de velocidade e direção do vento em diversas alturas, fator de forma e escala da distribuição de Weibull, regime diurno etc.

2.1 O modelo Brams

O modelo utilizado neste trabalho foi o Brams que trata-se de um modelo numérico para previsão numérica de tempo e clima (PNTC) desenvolvido pelo INPE a partir de um modelo desenvolvido na década de 80 na Universidade Estadual do Colorado, o Rams (*Regional Atmospheric Modeling System*), que é uma ferramenta flexível e de código aberto para modelagem e previsão de fenômenos atmosféricos. O Rams tem como base um conjunto de equações não hidrostáticas e compressíveis e de dois modelos de mesoescala hidrostáticos (PILKE, et al., 1992).

O modelo Brams é constantemente aprimorado (FREITAS, et al., 2017), incluindo funcionalidades e modificações com objetivo de melhorar a representação numérica de processos físicos fundamentais sobre regiões tropicais e subtropicais. O modelo matemático, conforme apresentado na Figura 1, possui um conjunto de parametrizações físicas apropriadas para simular processos iterativos entre atmosfera e superfície, envolvendo turbulência, convecção, radiação e microfísica de nuvens. O modelo Brams é acoplado ao CCATT (*Coupled Aerosol and Tracer Transport model*), que é um modelo de transporte a transformação química de gases e aerossóis e integrado ao JULES (*Joint UK Land Environment Simulator*) (MOREIRA, et al., 2013).

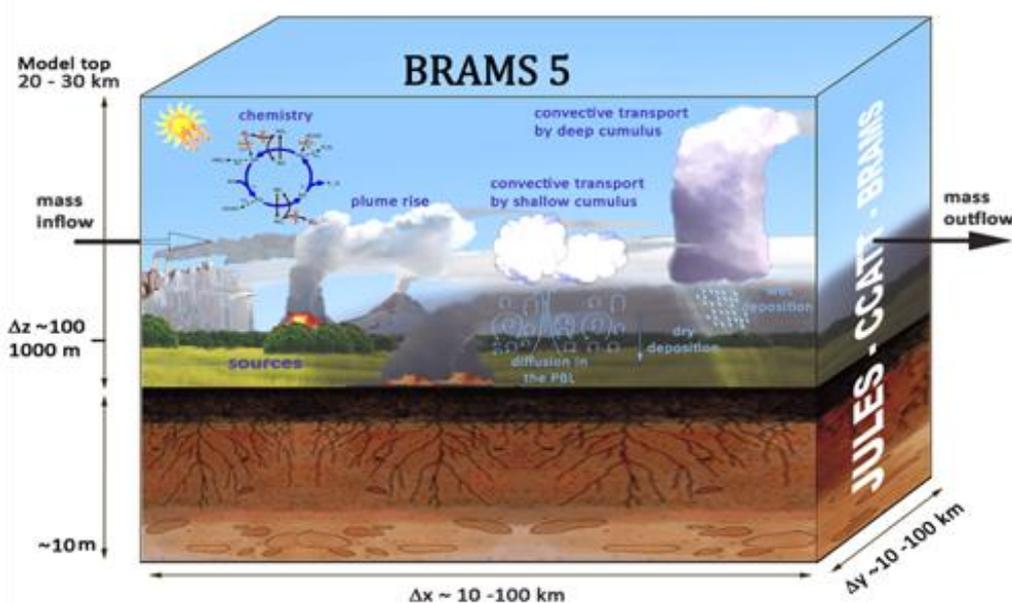


Figura 1 - Representação esquemática do modelo Brams (FREITAS, et al., 2017)

O Brams constitui hoje o modelo do CPTEC/Inpe que possui o melhor conjunto de parametrizações e de funcionalidades de maior desempenho, com indicadores quantitativos de destreza igual ou superior a modelos de outros centros internacionais (FREITAS, et al., 2017).

Para o trabalho do novo Atlas foi desenvolvida uma versão especial do Brams a fim de estimar, com todos os detalhes possíveis para uma grade com 5 km de resolução, a intensidade e direção do vento em diferentes alturas para todo o território nacional. O modelo Brams do CPTEC/Inpe pode ser executado com maior resolução espacial, mas optou-se pela mesma grade de 5 km já utilizada nas versões operacionais sendo utilizadas para gerar a previsão de tempo para o Brasil pois a mudança da resolução poderia exigir a recalibração de alguns parâmetros internos do modelo.

A resolução temporal dos resultados é horária, o que permite uma avaliação do comportamento das variáveis meteorológicas ao longo do dia (ciclo diurno), e para não extrapolar excessivamente o volume de dados, apenas um subconjunto dos dados de saída do modelo foi armazenado. Foram selecionadas algumas variáveis de superfície, que também foram disponibilizadas para as alturas “nativas” do modelo de 32,2 m, 80,5 m, 120,1 m, 160,0 m, 200,0 m e 240,0 metros. Outra modificação importante nesta versão do Brams foi a geração da rosa dos ventos no pós-processamento do modelo, obtido a partir da direção do vento de cada *timestep* do modelo, gerando uma “rosa dos ventos” para cada horário de saída.

As condições iniciais (CI) escolhidas para alimentar o modelo Brams são provenientes da base de reanálise ERA-Interim do ECMWF² (o Centro de Previsão de Tempo de Médio Prazo da Comunidade Europeia). O mesmo conjunto de dados foi utilizado para gerar as condições de contorno para cada seis horas. Alimentado por estes dados o modelo foi executado às 00z horas para todos os dias de 2013. O esquema de execução do modelo gera as saídas horárias para as próximas 36 horas, a seguir as primeiras 12 horas de integração são descartadas e as previsões para a janela das 13 até as 36 horas de integração são armazenadas. Dessa forma descartam-se os dados que são afetados pelos efeitos indesejáveis da inicialização do modelo, o tempo necessário para os resultados entrarem no estado estacionário, o chamado *Spin-up* do modelo.

São estes dados horários previstos com antecedência entre 13 e 36 horas que formam a base de dados numéricos utilizados no projeto. As duas principais vantagens deste conjunto sobre as reanálises do ERA-Interim são a resolução temporal de 1 hora e a resolução espacial de 5 Km. A principal desvantagem é a acurácia dos dados, que corresponderão à acurácia das previsões de 12 a 36 horas do modelo Brams.

O domínio de execução do modelo numérico foi dividido em duas partes, a fim de economizar tempo de processamento no supercomputador. Uma parte foi executada com a resolução de 5 km, englobando toda a região do Brasil onde pode existir potencial de energia eólica, e outra parte, compreendendo a Amazônia ocidental, onde sabemos que não existe potencial de energia eólica, foi gerada com 15 km de resolução horizontal. Posteriormente as duas partes foram reunidas para gerar um campo único, a fim de fazer o ajuste estatístico e gerar os produtos numéricos derivados. Os limites do domínio da área de 5 km vão de 62,44 a 29,56 graus de longitude oeste, e de 37,27 graus de latitude sul até 7,59 graus de latitude norte. O domínio da área de 15 km vai de 80,56 a 48,41 graus de longitude oeste e de 22,53 graus de latitude sul a 14,54 graus de latitude norte (Figura 2). Na concatenação das duas áreas para gerar o campo único, a área de 5 km prevaleceu sobre a de 15 km onde houve a sobreposição, de forma que o limite final entre as duas áreas ficou ao longo da longitude de 62,44 oeste.

² European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

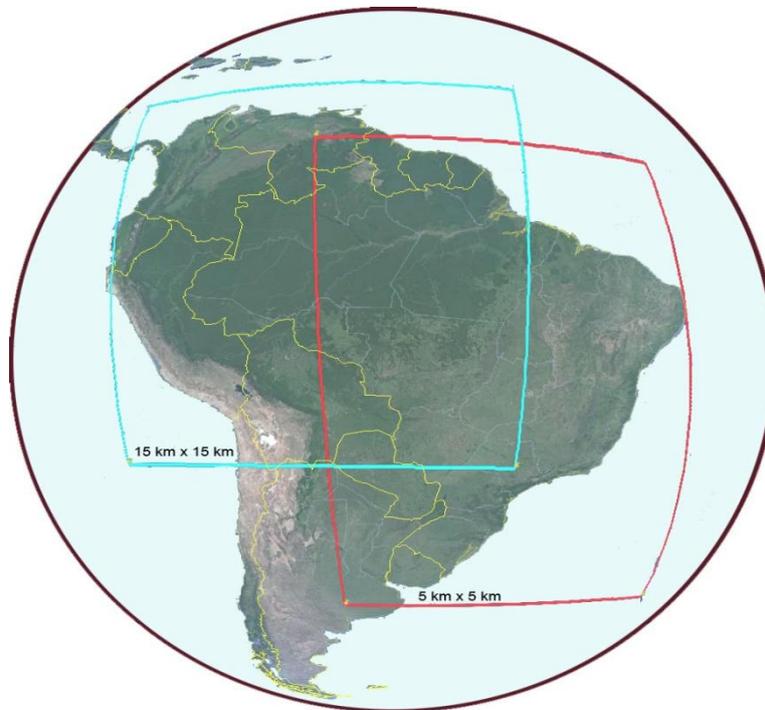


Figura 2 - Áreas de diferentes resoluções do Brams

2.2 Dados anemométricos

Apesar de todos os avanços e desenvolvimentos recentes dos modelos numéricos de previsão de tempo e clima, os resultados atuais ainda possuem um razoável grau de imprecisão e incertezas. Uma vez que os modelos numéricos (incluindo o modelo Brams utilizado neste trabalho) representam uma simplificação de um sistema real (Figura 3) e que as imperfeições da modelagem ocorrem do conhecimento incompleto dos processos físicos, da formulação matemática simplificada dos processos modelados, assim como dos processos que ocorrem em escalas que não podem ser representados na solução numérica adotada, faz-se necessário ajustar (ou calibrar) os resultados dos modelos numéricos tornando-os, assim, uma base de dados mais coerente com as condições observadas em campo e, conseqüentemente, um produto de melhor resultado para os usuários finais.

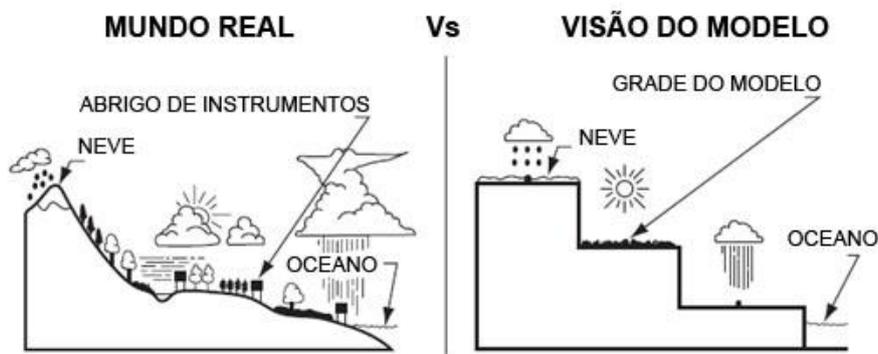


Figura 3 - Ilustração das diferenças entre o "mundo real" e a representação matemática dos modelos numéricos (KARL, et al., 1989)

Uma vez que é necessário obter um número significativo de dados anemométricos para validação dos resultados do modelo Brams, foram utilizadas informações provenientes de estações climatológicas espalhadas por todo o Brasil.

pertencentes ao Inpe, ao Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia), ao DECEA/ICEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo/Instituto de Controle do Espaço Aéreo) entre outras instituições. Vale ressaltar que uma parte importante do acervo de ambas as instituições apresentou séries históricas de boa qualidade, que mostraram-se adequadas para ajuste dos resultados simulados. Os dados utilizados para gerar o campo de ajustes foram obtidos através do banco de dados observados do CPTEC/Inpe, que inclui informações de diversas fontes, tais como:

- Dados de estações sinóticas convencionais e estações automáticas do Inmet³;
- Dados de aeroportos e aeródromos (a maior parte do DECEA/ICEA⁴);
- Dados da rede de estações da Marinha do Brasil;
- Dados de outras redes regionais (PCDs do Inpe, Funceme, ANA, Cemig etc.)

Adicionalmente, uma vez que a finalidade do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro é disponibilizar informações com o objetivo de identificar sítios promissores para implantação de parques eólicos de geração de energia elétrica em todo o território nacional, o ajuste dos resultados do modelo Brams teriam contar com séries históricas de alta qualidade destinada para este fim. Neste sentido, o Cepel, através do apoio do então MCTI e da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, obteve a autorização de 12 empreendedores para utilização de dados anemométricos provenientes de 39 parques eólicos em operação espalhados em todo o Brasil. Naquela oportunidade foi autorizada a utilização de médias mensais da velocidade do vento medidas na altura dos aerogeradores instalados. As autorizações foram concedidas para uso das médias mensais da velocidade e direção do vento exclusivamente para ajuste das simulações do modelo Brams referentes aos anos de 2013 a 2015.

Por questões de ordem prática, num primeiro momento foram selecionados um conjunto de dados de aeroportos distribuídos por todos os estados brasileiros, com preferência para aeroportos internacionais, por possuírem dados de melhor qualidade e maior cobertura temporal. Estes dados foram extraídos do sistema de processamento do CPTEC/Inpe e consolidados em médias mensais. Vale citar que, diferentemente dos dados medidos em parques eólicos, cuja altura de medição é próxima a 100 m (altura dos modelos de aerogeradores comercializados atualmente), a altura padrão das medições nas estações sinóticas é de 10 m.

Após um controle de qualidade realizado pelo Cepel nos dados de mais de 300 estações que compõem o banco de dados observados do CPTEC/Inpe (conforme apresentado acima), foram selecionadas 99 estações representativas em todo o território nacional para aferição e ajuste dos resultados da simulação do Brams para o ano de 2013.

2.3 Metodologia de ajuste

Uma vez que dados simulados através de um modelo numérico de previsão de clima apresentam, para cada ponto, desvios sistemáticos⁵, faz-se necessário identificá-los e corrigi-los através de informações providas de medições em campo de forma que haja maior aderência entre as previsões apresentadas pelo modelo e as condições observadas.

O método de ajuste aplicado no Atlas assume que a comparação dos dados observados em estações meteorológicas ou anemométricas com os respectivos dados simulados fornecerá uma indicação da intensidade e do sinal destes desvios sistemáticos, que dessa forma poderão ser mensurados e removidos.

³ Instituto Nacional de Meteorologia

⁴ Departamento de Controle do Espaço Aéreo/Instituto de Controle do Espaço Aéreo

⁵ Desvios sistemáticos ou erros sistemáticos são devidos a causas identificáveis e podem, em princípio, ser eliminados. Erros desse tipo resultam em valores que são sistematicamente mais altos ou mais baixos em relação a um valor esperado. Um exemplo deste tipo de desvio pode ser observado nas medições realizadas em equipamentos descalibrados.

O método da correção do viés médio, utilizado neste trabalho, é largamente utilizado em meteorologia numérica, com diversos exemplos de aplicação no Brasil nas áreas de agricultura (AVILA, et al. 2009), meteorologia (AVILA, et al. 2008) e recursos hídricos (ONS, 2013).

A priori, a aplicabilidade do método de remoção de viés é válida para os pontos onde existem dados locais para as comparações. Mas é preciso estender o método de ajuste para as localidades onde estas observações não existem, visto que a rede de estações de medida no Brasil é relativamente esparsa.

De forma mais detalhada, o trabalho de ajustar os resultados do modelo Brams foi dividido nas seguintes etapas:

- Avaliação dos dados observados;
- Elaboração do campo de ajuste;
- Validação dos resultados.

2.3.1 Avaliação dos dados observados

Conforme já citado, foram utilizados dados provenientes de estações anemométricas de parques eólicos em operação e de estações sinóticas⁶ de aeroportos para realização dos ajustes necessários dos resultados do modelo Brams. Tendo em vista que os resultados apresentados neste trabalho são baseados nas simulações realizadas para o ano de 2013, todo o conjunto de dados utilizados para ajuste dos resultados simulados também foram medidos no mesmo período.

Uma vez que a autorização para uso dos dados anemométricos provenientes de parques eólicos era restrita ao fornecimento de médias mensais da velocidade e direção do vento na altura referente aos aerogeradores instalados, e que não foi possível realizar investigações mais profundas através de séries horárias (o que tornaria possível a comparação, por exemplo, do regime diurno simulado com o observado), a aplicação das referidas médias para fins de ajuste dos resultados do Brams foi realizada de forma direta.

A qualidade e a disponibilidade dos demais dados obtidos de estações meteorológicas, anemométricas e climatológicas foram os principais limitantes para utilização de uma quantidade maior de estações para ajuste. Conforme já mencionado na seção 1.2, todas as estações previamente escolhidas passaram por uma avaliação de qualidade onde os principais critérios utilizados para o descarte de dados medidos foram:

- Comportamento temporal anômalo (como dados repetidos ou que variam muito rapidamente)
- Coerência com dados de estações próximas,
- Desvios significativos em relação aos dados climatológicos disponíveis para a região⁷,
- Falta de representatividade regional (como estações instaladas em praias, isto é, numa zona limítrofe entre duas regiões muito distintas),
- Insuficiência de dados.

Num primeiro momento, foi selecionado um conjunto de dados de aeroportos distribuídos por todos os Estados brasileiros, com preferência para aeroportos internacionais, por possuírem dados de melhor qualidade e maior cobertura temporal. Posteriormente, outros aeroportos foram incluídos no processo de ajustes. Todos os dados foram extraídos do sistema de processamento do CPTEC/Inpe que possibilitaram o cálculo da velocidade média anual para cada estação.

⁶ Estações sinóticas têm por objetivo fornecer dados para previsão do tempo. As medições realizadas nas estações sinóticas incluem direção e velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, pressão atmosférica, incidência de nuvens e geadas. As leituras são realizadas, na maioria dos casos, de forma manual e sempre três vezes ao dia: às 9, 15 e 21 horas.

⁷ Estes desvios significativos também foram identificados através de inspeção visual do campo de interpolação. Este recurso, apesar de ser um critério subjetivo, permitiu identificar e eliminar rapidamente dados impróprios para o ajuste final dos dados simulados.

Através da localização geográfica de cada aeroporto e das estações anemométricas provenientes dos parques eólicos, foi possível a extração dos dados originalmente simulados pelo modelo Brams e a obtenção da velocidade média anual correspondente. O valor da velocidade média anual estimada pelo modelo não utilizou somente a informação do ponto correspondente ao valor medido. O valor utilizado para as comparações e ajustes foi a média de nove pontos do modelo em torno dos locais com dados observados. Isto é, ao invés de se utilizar o valor da grade de 5 km, utilizou-se o valor médio de uma grade de 15 km conforme apresentado na Figura 4. O motivo desta escolha está relacionado às questões de representatividade temporal entre valores medidos no solo de forma instantânea e valores numéricos médios para a grade do modelo numérico. A coerência entre valores observados e simulados aumenta quando utilizamos estas médias, assim como a relação entre sinal e ruído⁸.

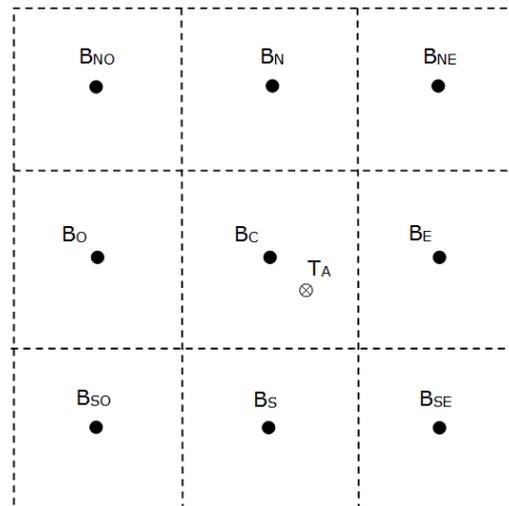


Figura 4 - Esquemática da grade do modelo Brams mostrando os pontos de referência para as simulações no entorno da localização do ponto de observação

Uma vez que grande parte dos dados utilizados para ajuste dos resultados é proveniente de aeroportos, cuja medição da velocidade do vento é realizada a 10 metros de altura, todos os dados das estações selecionadas foram comparados com as Normais Climatológicas do Inmet e a Climatologia da Força Aérea Brasileira⁹ além da utilização de estações meteorológicas próximas aos aeroportos. Os valores observados em aeroportos foram considerados consistentes para os casos em que, quando comparado com as normais climatológicas e estações próximas, mostraram coerência dentro de um limite de 10%. Uma avaliação mais detalhada era realizada somente nos casos em que os valores observados, as climatologias e o modelo numérico mostraram discrepâncias acima desse limite. Após a avaliação de consistência, foi aplicada uma correção nos dados simulados (quando pertinente) com base nos dados observados utilizando, somente, o conjunto de informações que mostrou-se com maior consistência.

⁸ Esta técnica foi utilizada por Móser e Raschke (1983) que optaram por comparar as médias obtidas dos piranômetros com os valores médios obtidos com o satélite, somente após ponderar estes últimos em função da distância entre cada setor da imagem e o setor onde se localizava o piranômetro de validação. No estudo realizado, uma imagem de satélite com (5 x 6) células foi utilizada para validação através dos dados de uma estação solarimétrica próxima. Já os autores de Cess et al. (1995), que dispunham de vários piranômetros distribuídos pelo setor de validação, optaram por comparar o valor médio obtido de onze piranômetros da rede com os valores fornecidos pelo satélite para o setor.

⁹ A Organização Meteorológica Mundial (OMM) define Normais como “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas” e padrões climatológicos normais como “médias de dados climatológicos calculadas para períodos consecutivos de 30 anos. No caso de estações para as quais a mais recente Normal Climatológica não esteja disponível, seja porque a estação não esteve em operação durante o período de 30 anos ou por outra razão qualquer, Normais Provisórias podem ser calculadas. Normais Provisórias são médias de curto período, baseadas em observações que se estendam sobre um período mínimo de 10 anos (INMET,2017).

2.3.2 Elaboração de campos de ajustes

A partir das médias anuais de cada estação (anemométricas provenientes de parques eólicos e aeroportos) e as médias dos nove valores de grade do modelo Brams associados a cada estação, foi gerada uma tabela com a razão entre dados medidos e simulados para composição do campo de ajustes.

A fim de não forçar correções importantes em áreas muito distantes dos dados observados, onde a sua representatividade é menor, o método de correção assume que o desvio sistemático calculado para um ponto vai variar de forma inversamente proporcional à distância. Dessa forma, a não ser que existam dados observados numa distância *próxima* de acordo com as definições dos parâmetros da interpolação, os resultados numéricos serão corrigidos de forma cada vez menos intensa, prevalecendo os valores numéricos originais para os locais muito distantes dos locais com dados observados.

Assim, a partir da razão entre os dados medidos e simulados para as localidades selecionadas, foi gerado um campo interpolado para todo o território Brasileiro, na mesma grade do modelo. Durante a elaboração do campo de ajustes, concluiu-se que o mesmo pode ser aplicado para todas as alturas simuladas do modelo. As avaliações realizadas mostraram que não há uma interdependência entre desvios e altura, isto é, os desvios sistemáticos do modelo são dominados por fatores climáticos e geográficos. Assim, concluiu-se que é desnecessário gerar um campo de ajuste para cada altura de interesse apesar das diferenças de alturas de medição dos dados observados (dez metros em aeroportos e valores entre 80 e 100m de altura em estações anemométricas de parques eólicos). Basta aplicar o mesmo campo de ajuste (que engloba as informações de todas as estações em qualquer altura) para ajustar a velocidade em cada altura.

2.3.3 Validação e avaliação estatística dos resultados

A validação dos resultados do ajuste consistiu na comparação dos valores ajustados com dados e informações disponíveis que não foram utilizados para gerar o campo de ajuste. Além de utilizar dados provenientes de estações meteorológicas convencionais e automáticas do Inmet e de outras instituições, dados de aeroportos do DECEA/ICEA, relatórios climatológicos do Inmet e do DECEA/ICEA e de campos interpolados, obtidos a partir de todas as observações disponíveis na base de dados do CPTEC para 2013, também foram utilizados dados provenientes de radiossondagens do Inmet e do DECEA/ICEA e dados do mapa do potencial eólico publicado pelo Cepel em 2001.

As discrepâncias detectadas foram analisadas e correções aplicadas sempre que necessário, seja com a inclusão de novos dados para refinar o fator de ajuste em áreas problemáticas, seja com as exclusões de medições que se mostraram problemáticas ou sem representatividade das condições regionais.

Foram geradas seis versões do campo de ajuste, cada uma com melhorias implementadas progressivamente sobre resultados dos ajustes de versões anteriores. À medida que os campos ajustados foram gerados, os dados foram repassados para a equipe do Cepel, que fez verificações à parte e calculou a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e outros índices estatísticos (o relatório completo da avaliação estatística encontra-se no Anexo I). Estas avaliações estatísticas utilizaram dados de estações meteorológicas situadas em aeroportos disponíveis nos arquivos do CPTEC/Inpe, assim como dados de estações anemométricas da base de dados do Cepel (Figura 5).

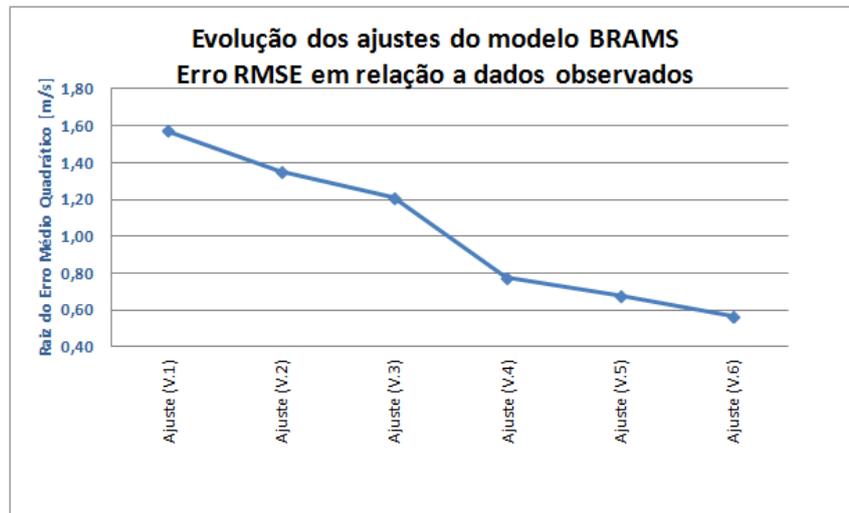


Figura 5 - Redução do erro RMSE observado com progressão dos ajustes aplicados nos resultados do modelo

A metodologia dos testes estatísticos se baseou na comparação dos campos ajustados do modelo com as medidas de estações selecionadas para formar um grupo de controle, que não foram utilizadas para ajustar os campos do modelo. Do conjunto de dados disponíveis, cerca de 15% foram separados para formar um grupo de controle. Das 99 estações meteorológicas de aeroportos, 84 tiveram seus dados utilizados para o ajuste e 15 tiveram SUS dados utilizados para formar o grupo de controle. Das 39 estações anemométricas de parques eólicos, 29 tiveram seus dados utilizados para o ajuste e 10 tiveram seus dados para compor o grupo de controle.

Os resultados obtidos ao longo do processamento das várias versões de ajuste mostraram uma melhora significativa da última versão. Obteve-se uma média de erro absoluto (MAE) de 0,44 m/s e um RMSE de 0,57 m/s, que são valores compatíveis com as variabilidades de medições anemométricas teoricamente calculadas pela norma IEC 61400-12-1 *Power performance measurements of electricity producing wind turbines* ou determinadas experimentalmente (NEIVA et al., 2016).

3 Mapas temáticos

Após todo o processamento de ajuste e consolidação dos resultados do modelo Brams em médias anuais, foi possível a confecção de diversos mapas temáticos a partir dos valores processados nas alturas nativas do modelo. Toda a metodologia de cálculo de interpolação dos dados de velocidade para as alturas de 30m, 50m, 80m, 100m, 120m, 150m e 200m estão no Anexo II.

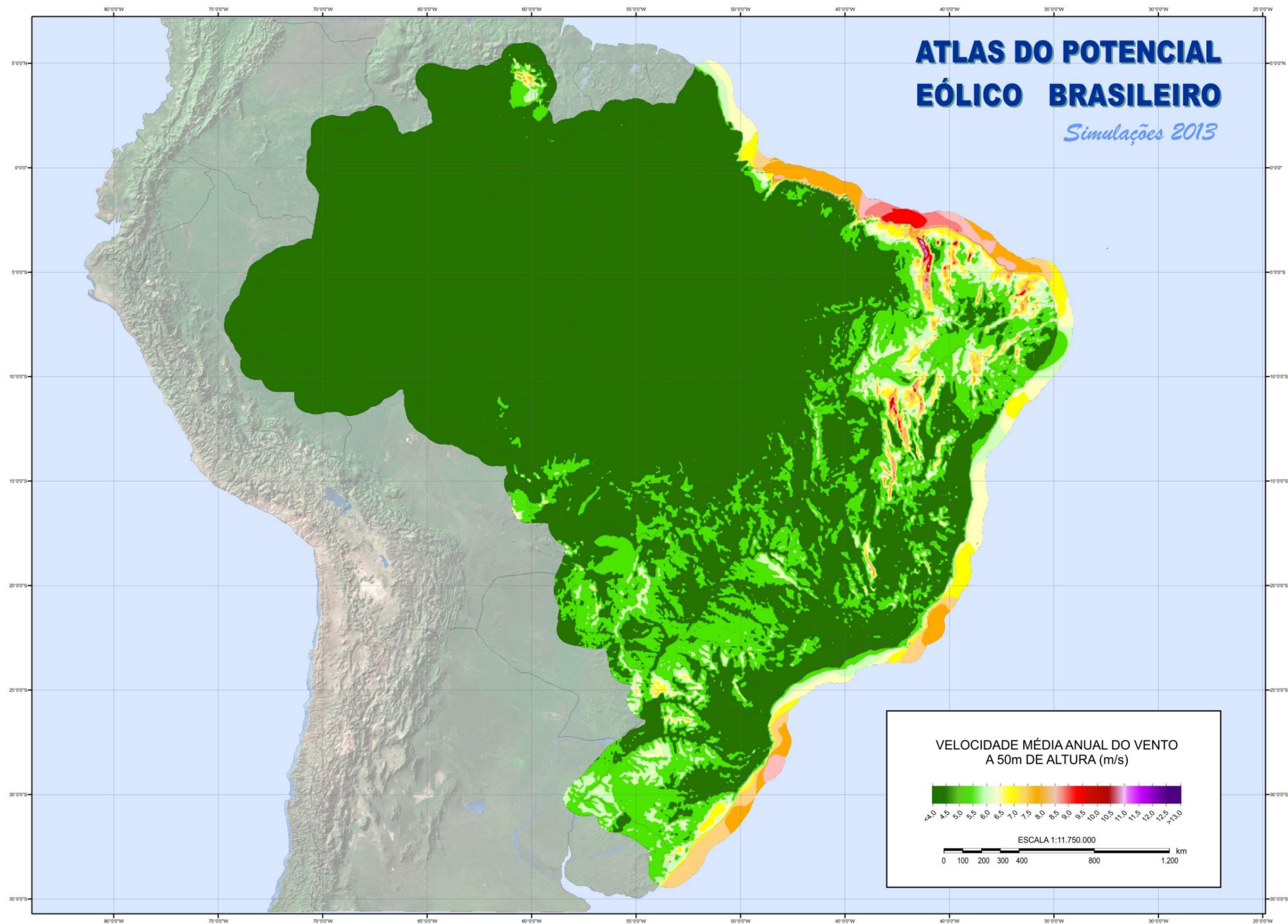
As informações dos mapas temáticos referentes ao potencial eólico *offshore* tratam tão somente dos resultados obtidos nas simulações do modelo Brams para o ano de 2013. Estas informações não foram ajustadas pelo fato de não haver dados medidos em estações anemométricas *offshore* disponíveis para tal.

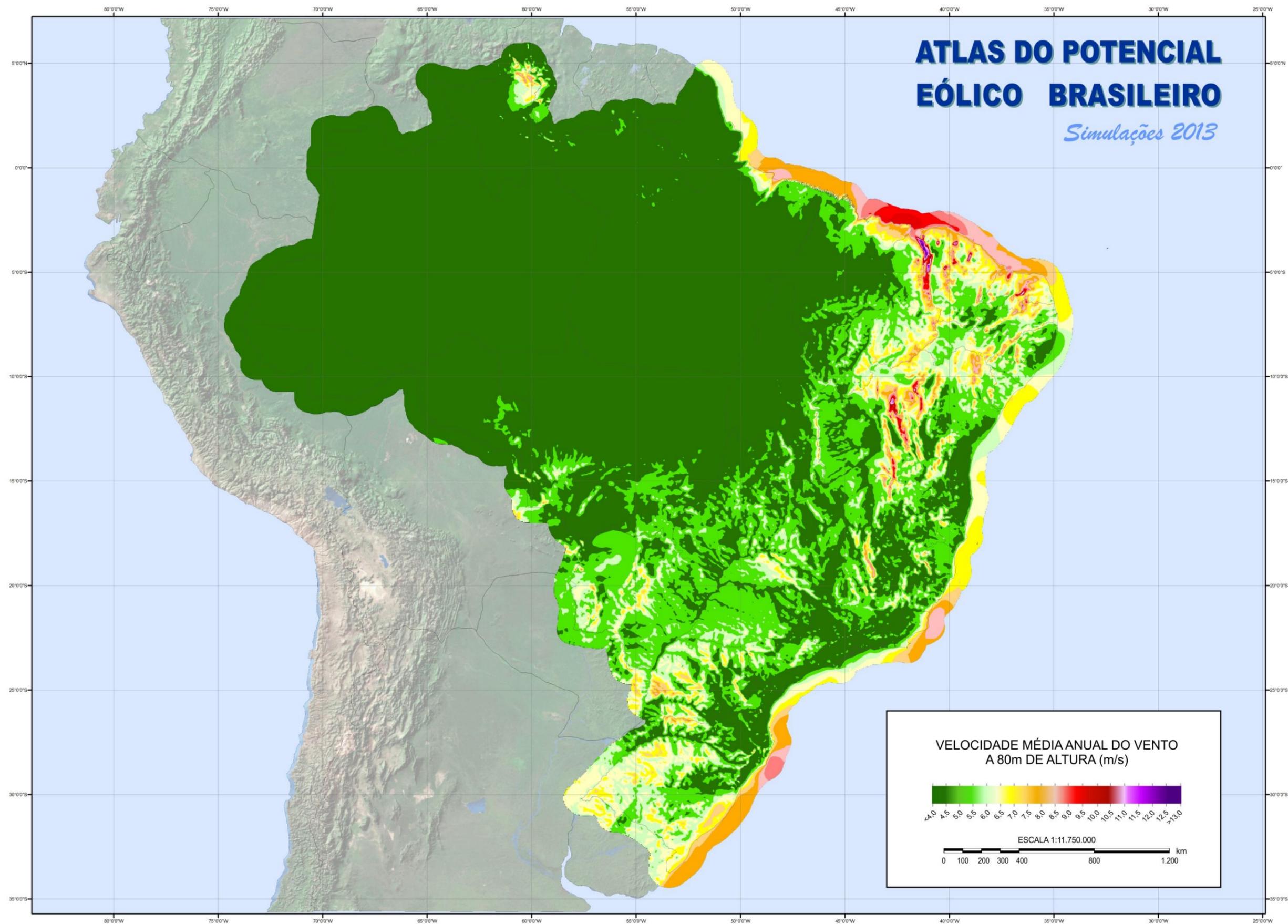
Os mapas temáticos apresentados são:

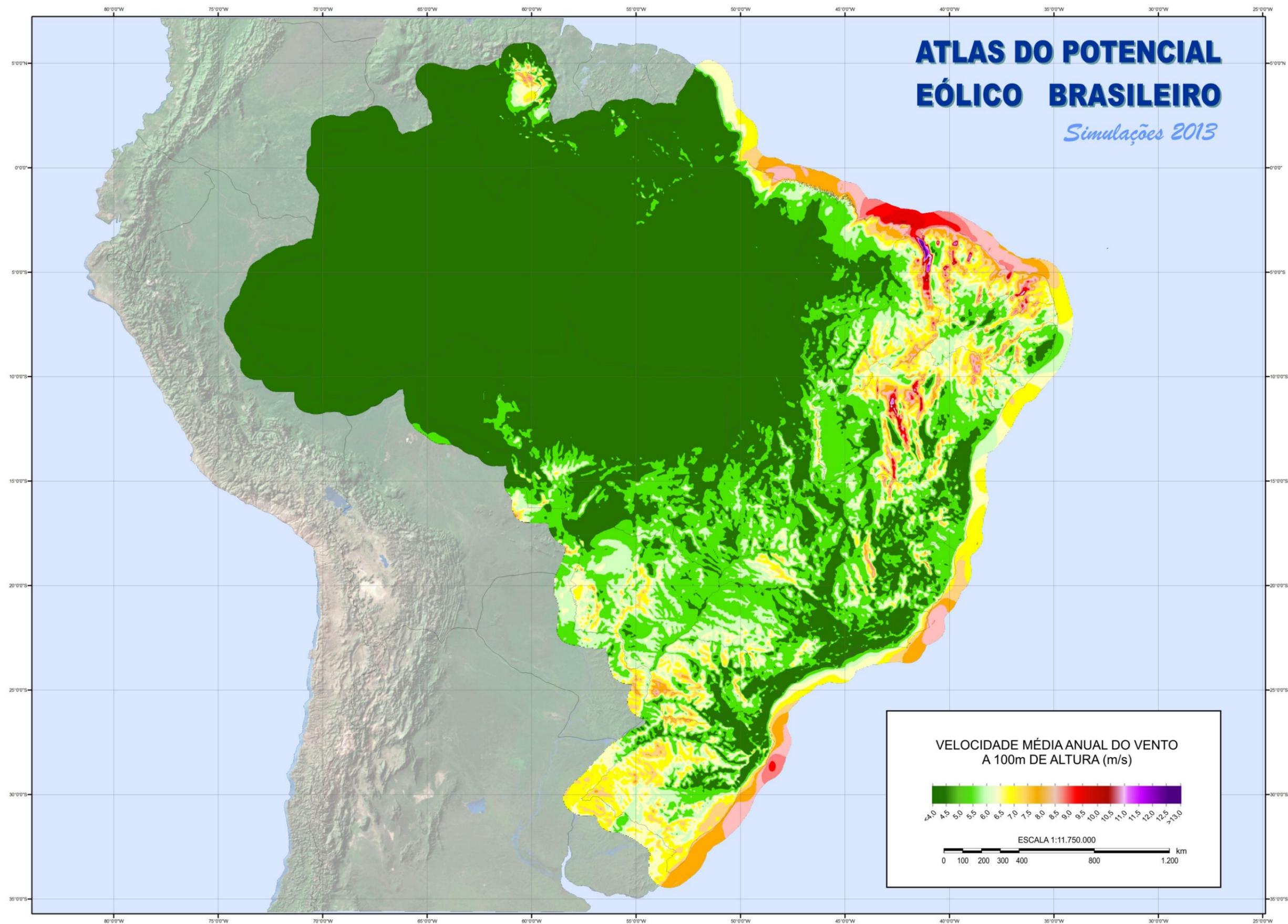
- Velocidade média anual para a altura de 30 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 50 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 80 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 100 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 120 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 150 metros;
- Velocidade média anual para a altura de 200 metros;
- Fator de escala de Weibull para a altura de 100 metros;
- Fator de forma de Weibull para a altura de 100 metros;
- Densidade de potência para a altura de 100 metros;
- Massa específica do ar para a altura de 100 metros;
- Rosa dos ventos anual - frequências x direção;
- Regime diurno anual¹⁰;
- Rugosidade.

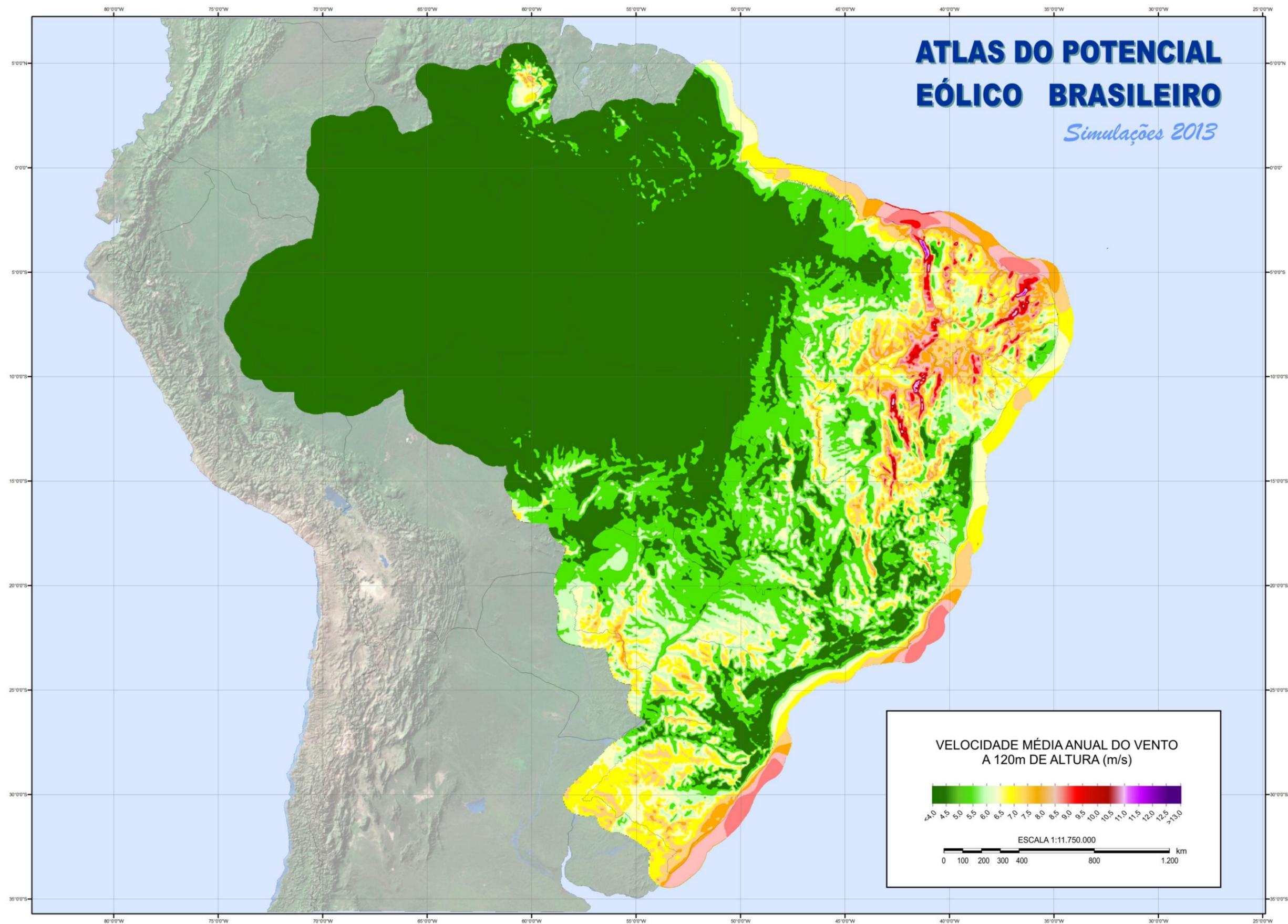
¹⁰ O regime diurno, também denominado dia típico, mostra o comportamento da velocidade do vento ao longo do dia. Cada valor horário é obtido através da média aritmética das velocidades registradas naquela hora ao longo de todo o ano.

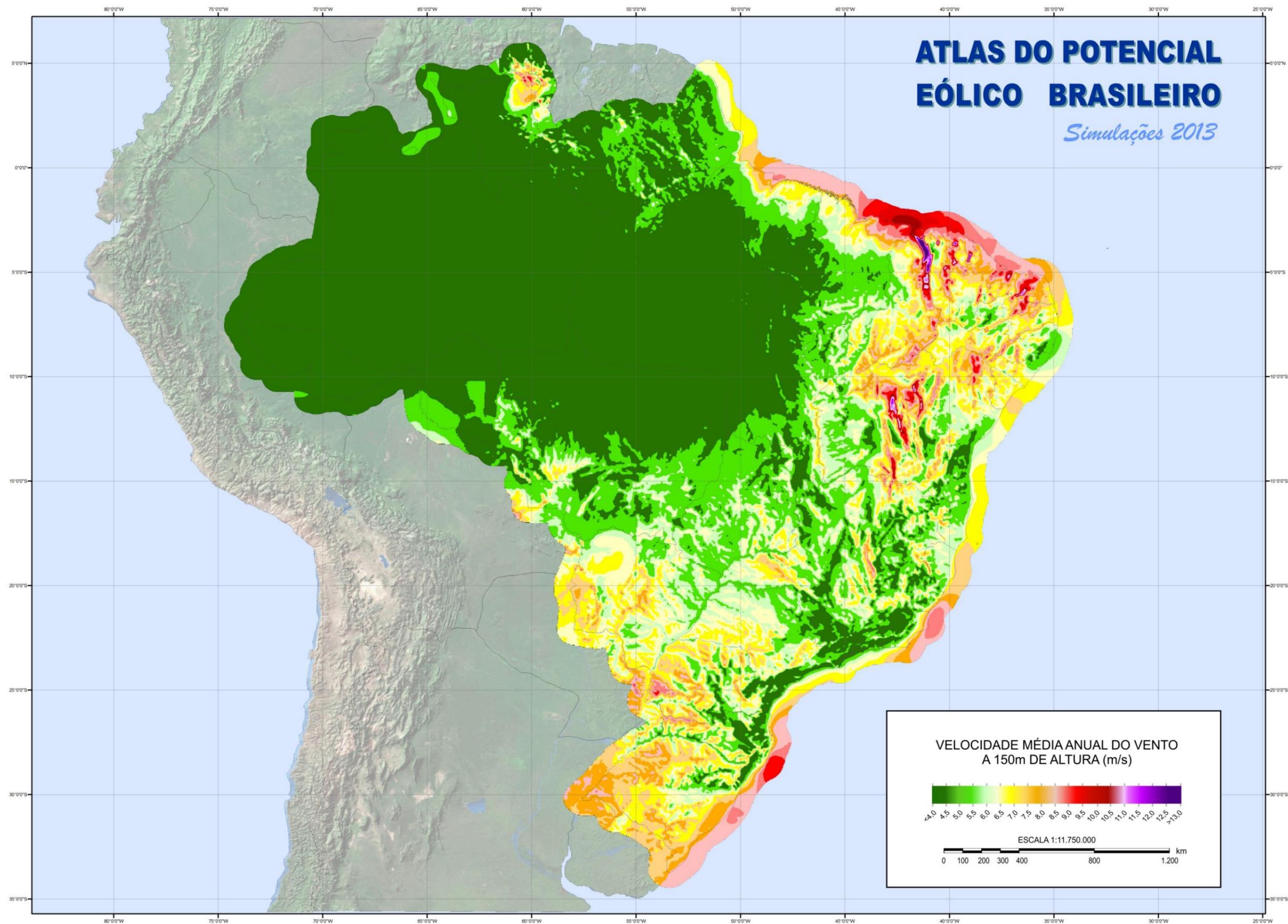


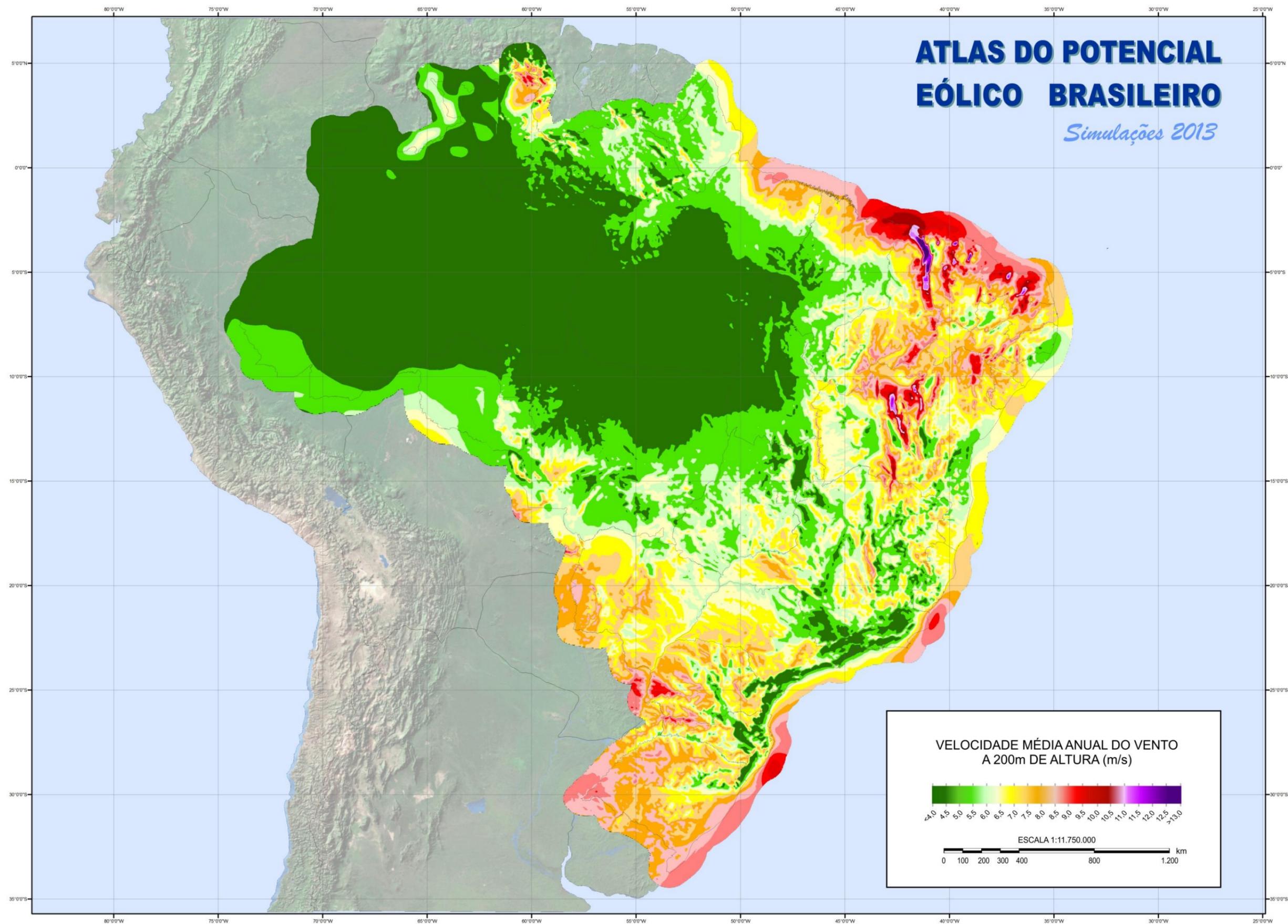


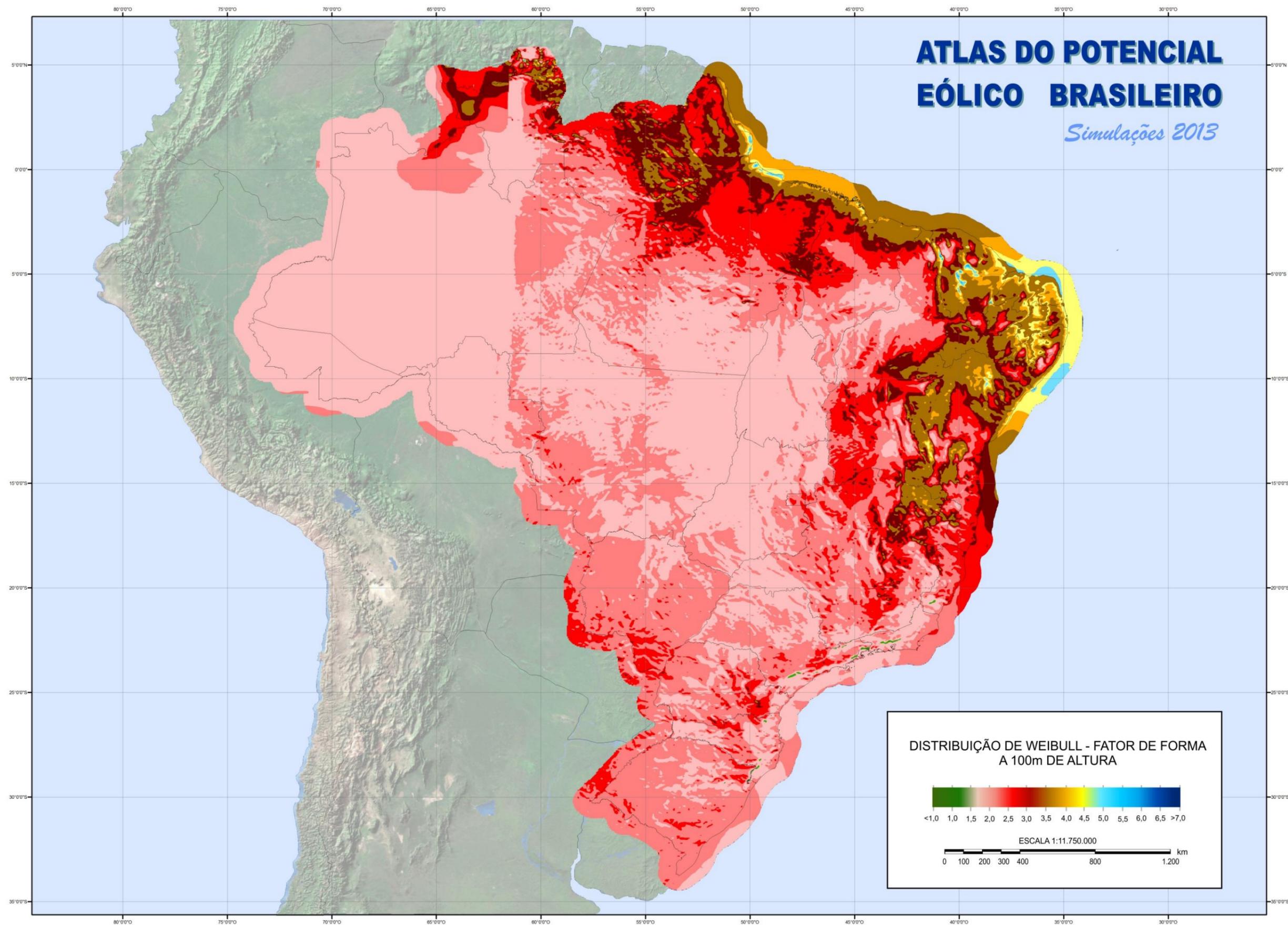


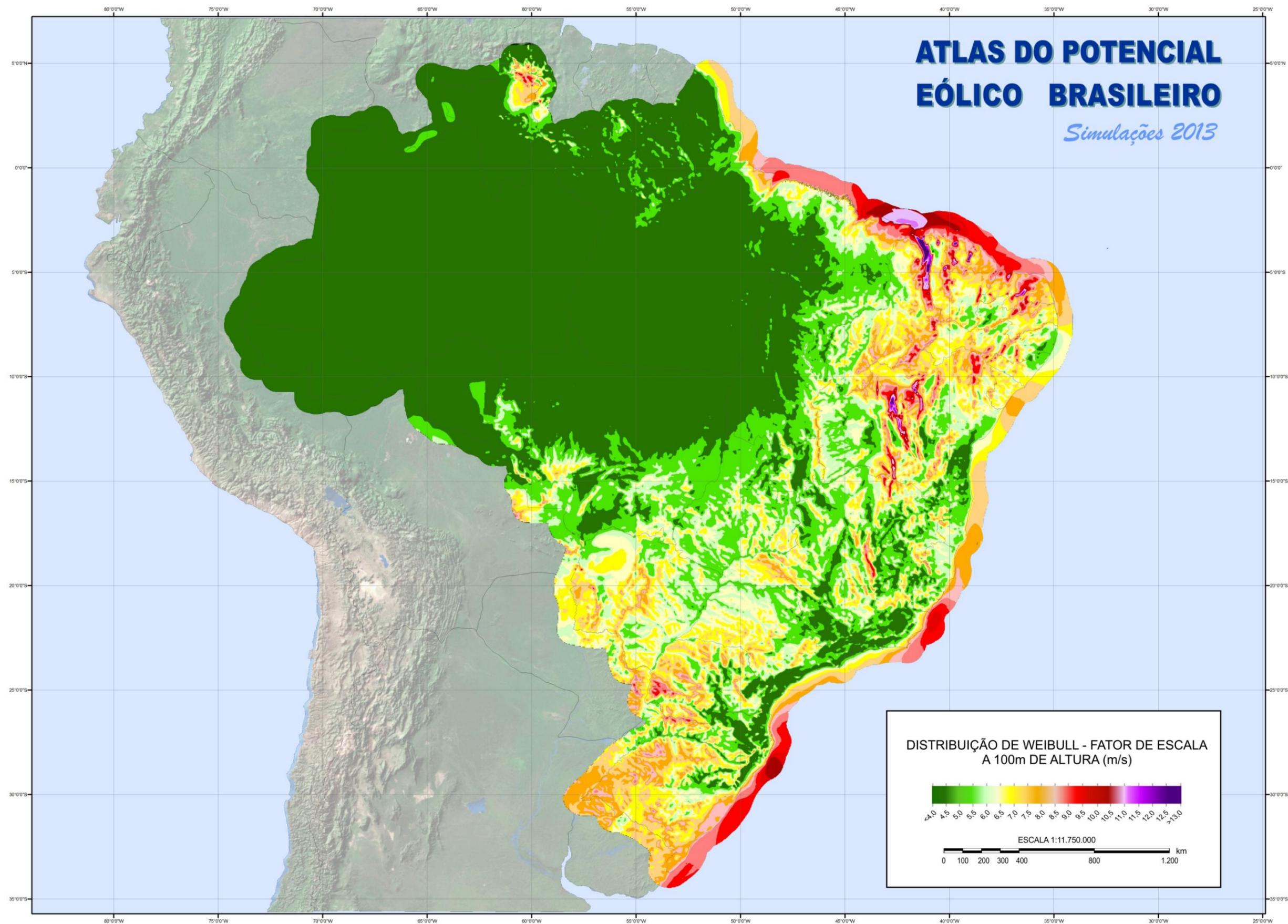
















ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

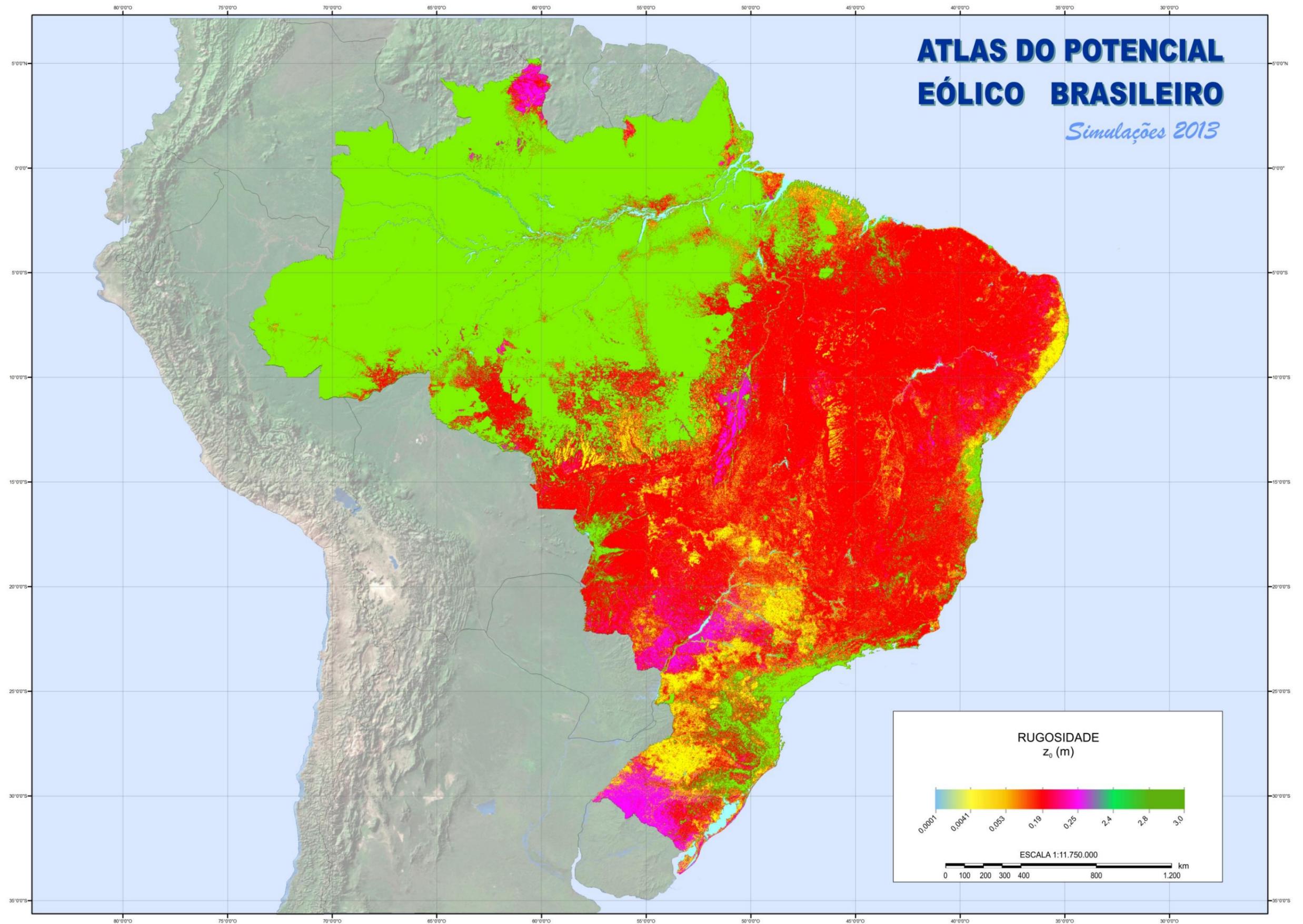
Simulações 2013

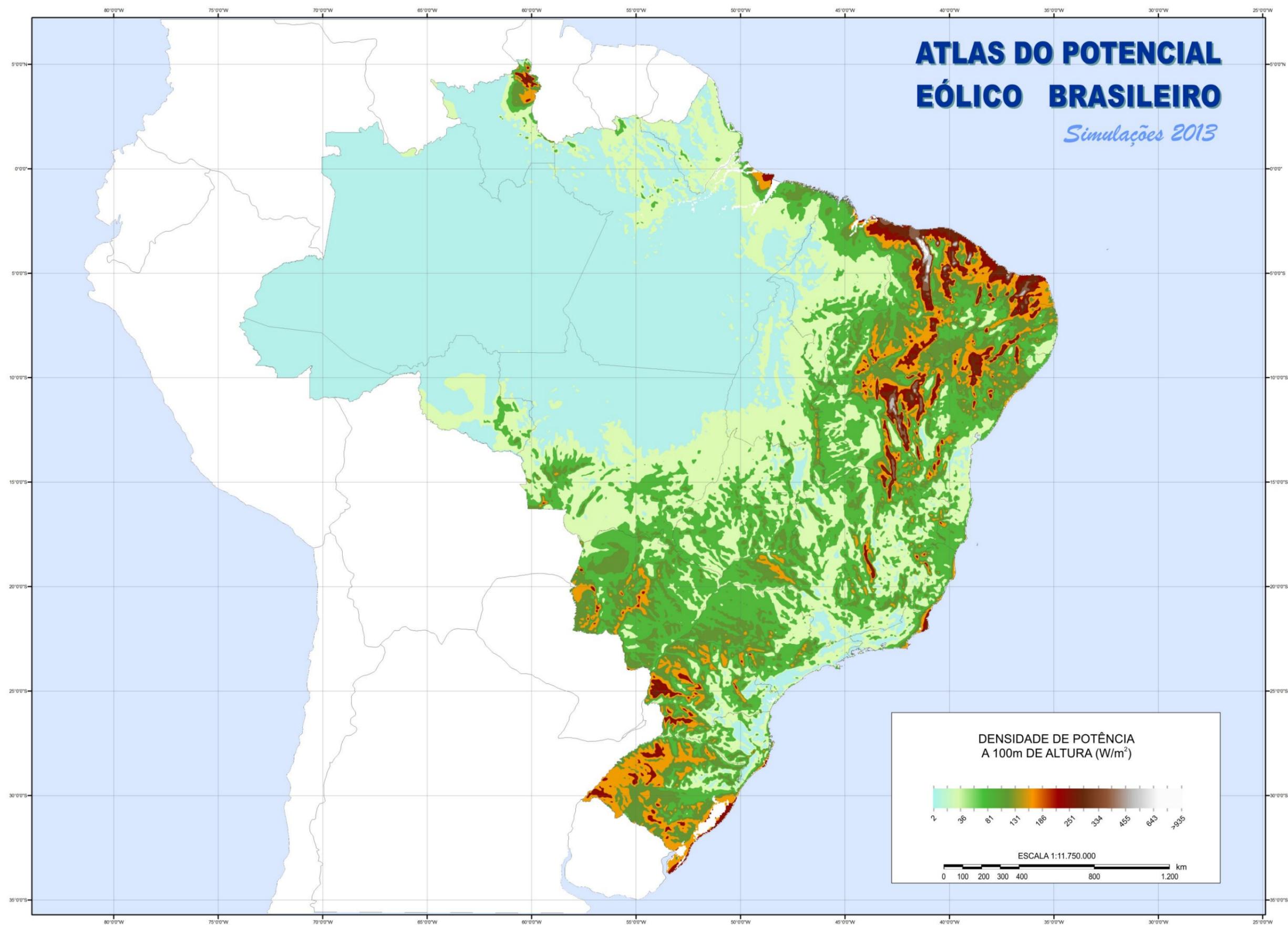
REGIMES DIURNOS - MÉDIAS ANUAIS

VELOCIDADE MÉDIA HORÁRIA
VELOCIDADE MÉDIA ANUAL

ESCALA 1:11.750.000

0 100 200 300 400 800 1.200 km







4 Atlas Online

Todas as informações das simulações realizadas para o ano de 2013 estão disponibilizadas através do sítio na internet criado especialmente para sua divulgação (Figura 6). Através do link www.novoatlaseolico.cepel.br o internauta terá acesso a arquivos *pdf* de toda publicação gerada ao longo do projeto, incluindo todos os mapas temáticos e arquivos no formato *kml* que possibilitarão visualização das diversas informações em plataforma SIG.



Figura 6 - Visualização da apresentação, via *web*, do conteúdo das simulações 2013 do novo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro

Além da descrição do projeto, da metodologia e da disponibilização dos mapas temáticos, o sítio também fornecerá a possibilidade de consulta *online* (Figura 7) de todo o acervo de dados gerado durante as simulações realizadas para elaboração dos mapas temáticos.

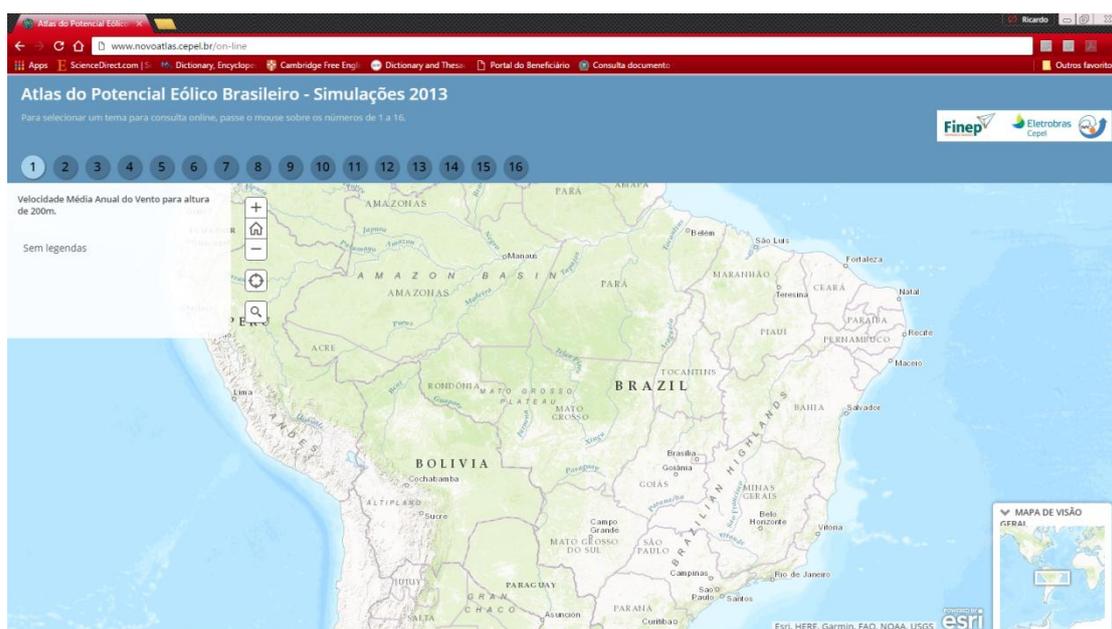


Figura 7 - Tela inicial da consulta *online*

A consulta *online* é iniciada com um mapa em branco onde o usuário deverá escolher uma das opções de mapas para fazer a consulta. É necessário fazer vários *zoom* nas áreas de interesse para que os mapas e as legendas sejam apresentados. Ao clicar em qualquer polígono do mapa, a distribuição da informação ao longo da área selecionada (velocidade média do vento ou os fatores de forma e escala da distribuição de Weibull) será apresentada em uma caixa indicando o tema do mapa escolhido e as informações referentes ao polígono selecionado. Um exemplo de disponibilização das informações para as simulações realizadas para a altura de 200m é apresentado na Figura 8.

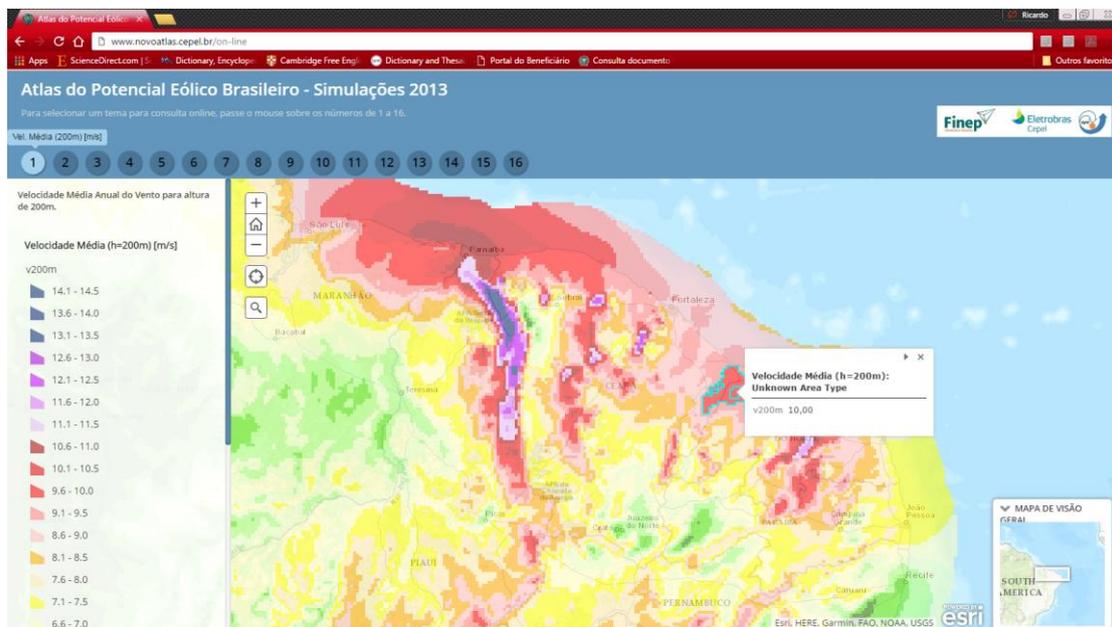


Figura 8 - Exemplo de apresentação das informações no ambiente de consulta *online*

É também possível consultar dois (botões 12, 13 e 14) ou quatro (botão 15) mapas temáticos simultaneamente. A consulta tabular de todas as informações utilizadas para elaborar os mapas temáticos também pode ser feita (botão 16). A Figura 9 mostra a funcionalidade de cada um dos botões.

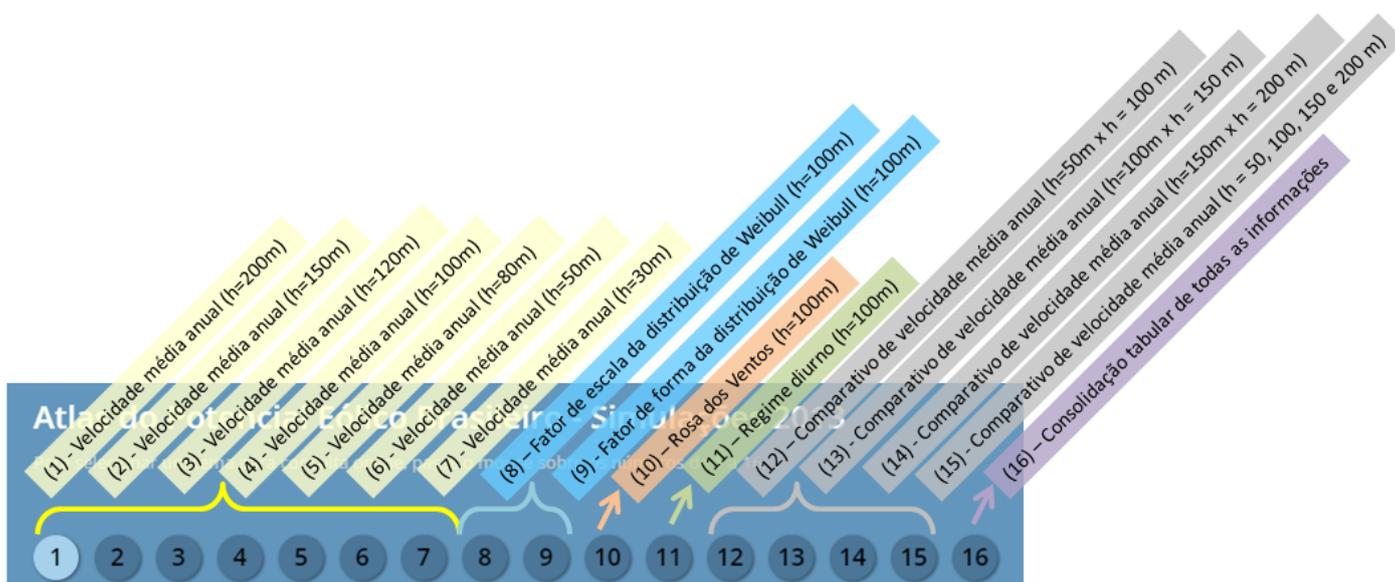


Figura 9 - Organização dos mapas temáticos, consultas comparativas e tabulares para visualização *online*

Diferentemente das consultas *on-line* de velocidade média anual e dos fatores de escala e de forma de Weibull que apresentam polígonos representando a distribuição dos valores para cada um dos temas (incluindo uma legenda indicativa das cores e seus valores), a consulta *online* da rosa dos ventos e do regime diurno apresentam informações referentes a cada ponto de grade (5 km x 5 km). Para que os pontos da grade estejam visíveis, é importante que se faça vários níveis de *zoom in* no mapa. As Figura 10 e Figura 11 mostram exemplo da visualização dos pontos de grade e dos dados tabulares da rosa dos ventos (cada valor dos 16 setores são expressos em %) e também do regime diurno (valores expressos em m/s para cada hora do dia na altura de 100 m).

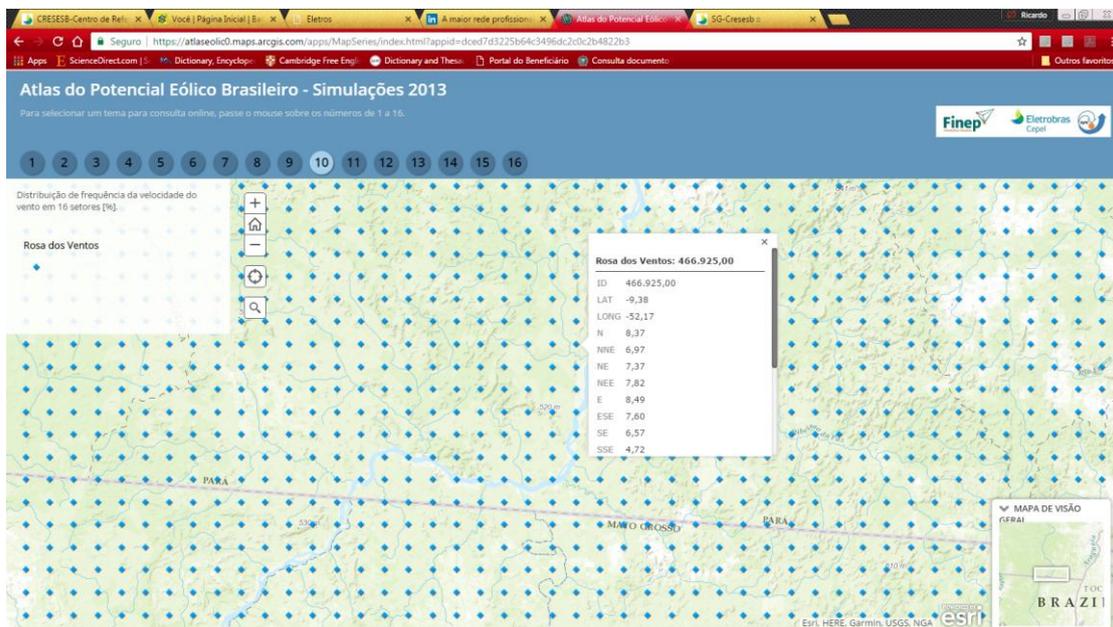


Figura 10 - Exemplo de pontos de grade e da informação tabular da rosa dos ventos

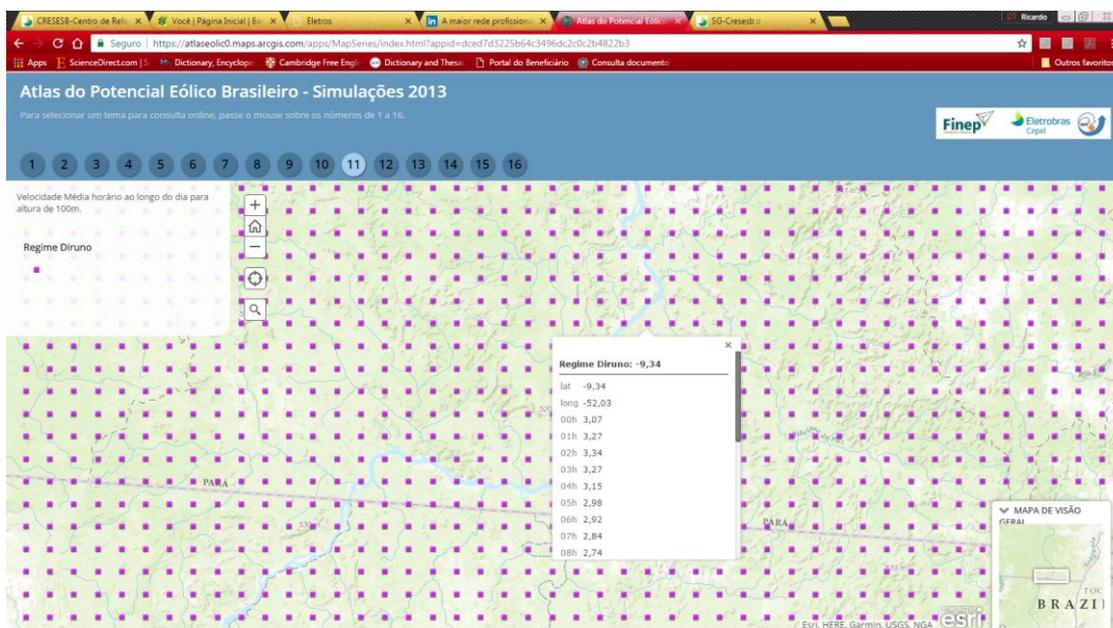


Figura 11 - Exemplo de pontos de grade e da informação tabular do regime diurno

As consultas comparativas possibilitam acessar de dois a quatro mapas temáticos de velocidade média anual para as alturas de 50 m, 100m, 150m e 200m. Conforme apresentado na Figura 12, a área de consulta é dividida em duas regiões, sendo que a área da esquerda apresenta os valores da velocidade na altura menor e a da direita os valores referentes à maior altura. Ao mover a barra central é possível observar a variação da velocidade média anual em alturas diferentes. Ao clicar em qualquer polígono, em qualquer uma das áreas, será apresentado o valor da velocidade média anual distribuído ao longo da área selecionada e a altura de referência. Também é possível fazer consulta simultânea da velocidade média anual para quatro alturas diferentes ao acessar o botão 15, conforme apresentado na Figura 13.

De forma a facilitar o acesso a todo o conjunto de dados simulados para o ano de 2013, a consulta tabular consolidada disponível ao clicar o botão 16 fornece, para cada ponto de grade, todas as informações do acervo de dados conforme apresentado na Figura 14. As informações disponibilizadas, além das coordenadas geográficas do ponto de grade, são:

- Rosa dos Ventos [%]
- Regime Diurno [m/s]
- Fator k da distribuição de Weibull para altura de 100m
- Fator c da distribuição de Weibull para altura de 100m [m/s]
- Velocidade média anual para altura de 30m [m/s]
- Velocidade média anual para altura de 50m [m/s]
- Velocidade média anual para altura de 80m [m/s]
- Velocidade média anual para altura de 100m [m/s]
- Velocidade média anual para altura de 120m [m/s]
- Velocidade média anual para altura de 150m [m/s]
- Velocidade média anual para altura de 200m [m/s]

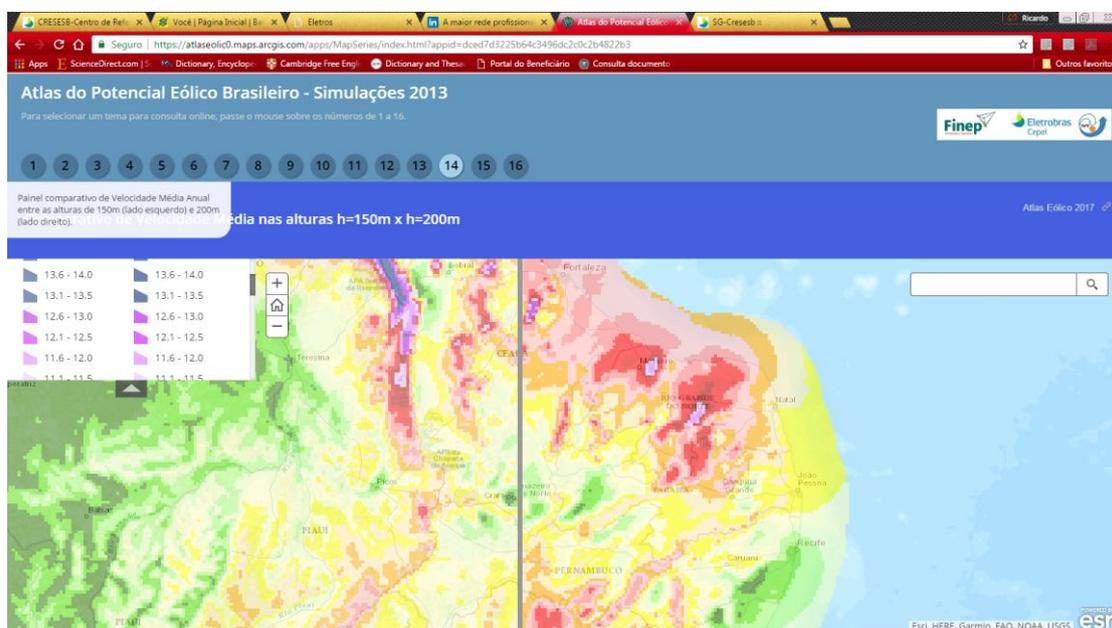


Figura 12 - Consulta comparativa entre mapas temáticos de velocidade média anual em duas alturas distintas

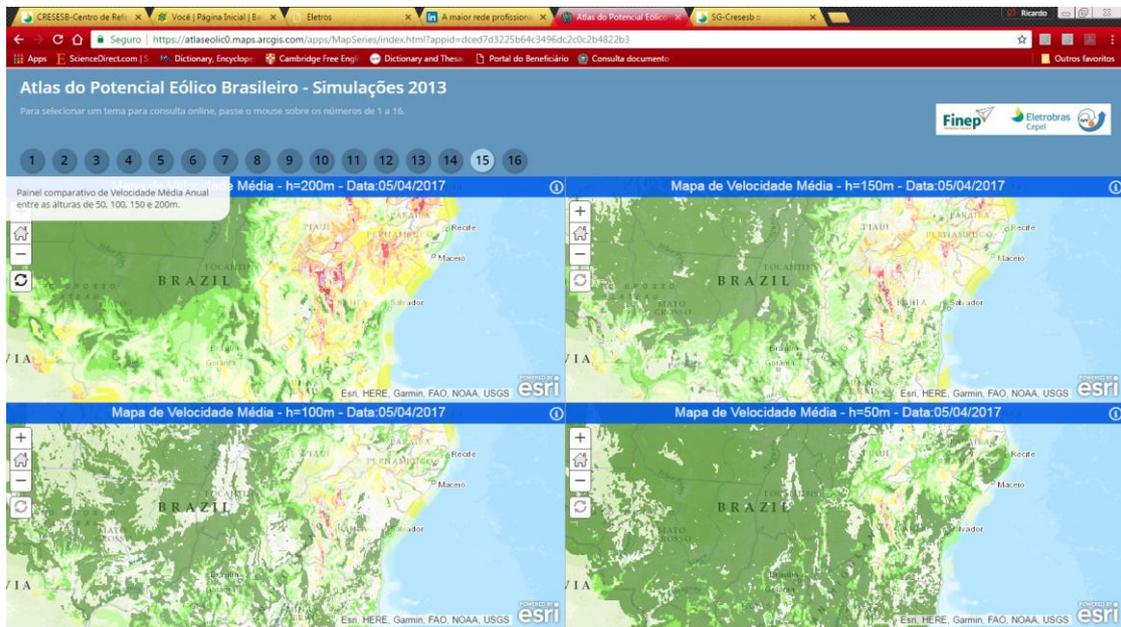


Figura 13 - Consulta comparativa entre mapas temáticos de velocidade média anual em quatro alturas distintas

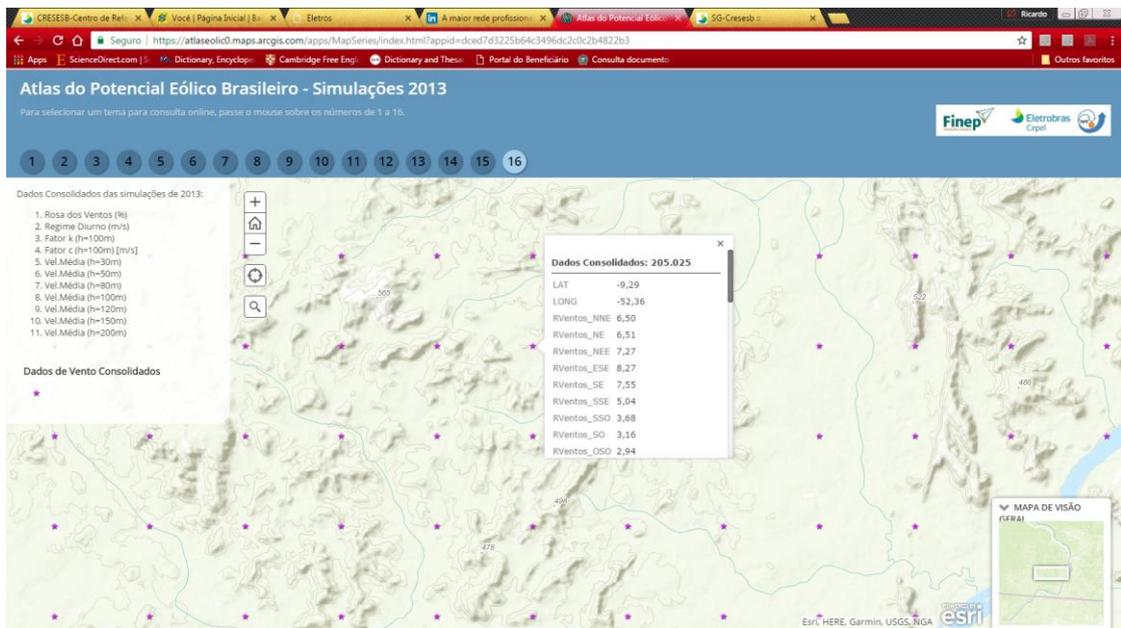


Figura 14 - Consulta tabular de todas as informações dos mapas temáticos

5 Referências Bibliográficas

AVILA, A. M. H.; CARDOSO, A. O.; PINTO, H. S., 2009. **Aplicação da correção estatística na previsão de tempo estendida, para três localidades da Região Sul.** In: XVI CBA, 2009, Belo Horizonte. XVI CBA, 2009.

CESS R.D., M.H. ZHANG, P. MINNIS, L. CORSETTI, (1995). **Absorption of Solar Radiation by Clouds: Observations versus Models**, Science, 267. 27 January.

FREITAS, S. R. et al. 2016. **Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System BRAMS version 5.2 Description of the Model Input Namelist Parameters.** Disponível na internet no link <ftp://ftp.cptec.inpe.br/brams/BRAMS5.2/documentation/namelist-BRAMS-5.2-feb2016.pdf>.

FREITAS, S. R. et al., 2017. **The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas.** Geoscientific Model Development, v. 10, p. 189-222, 2017.

INMET, 2017. Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990. Arquivo disponível na internet pelo link <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>.

KARL T.R., TARPLEY J.D., QUAYLE R.G., DIAZ H.F., ROBLNSON D.A., BRADLEY R.S., 1989. **The recent climate record. what it can and cannot tell us**, Rev Geophys 27:405-430.

MOREIRA, D. S., et al., 2013. **Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): applications to numerical weather forecasting and the CO2 budget in South America.** Geoscientific Model Development, v. 6, p. 1243-1259, 2013.

MÓSER, W. and E. RASCHKE (1983), **Mapping of Global Radiation and of Cloudiness from METEOSAT Image Data**, Meteor. Rundsch., 36, 3341.

NEIVA, A.C.B., RAMOS, D.A., GUEDES, V.G., WALTER, A., e MELO, S.R.F.C., 2016. **Estudo Comparativo Teórico e Experimental da Variabilidade de Dados de Velocidade de Vento em Estações Anemométricas.** Brazil Windpower 2016 Conference and Exhibition – 30/08/2016.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – NOS, 2013. **Aprimoramento da Metodologia de Remoção de Viés da Previsão de Precipitação – Aplicação nas Bacias do Alto Rio Paranaíba e do Baixo Rio Grande.** Nota técnica do Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2013.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L., et al., 1992. **A comprehensive meteorological modeling system - RAMS.** Meteorol. Atmos. Phys., v. 49, pp. 69-91, 1992.

SILVA, M.C.L.; MENDONÇA, A.M.; BONATTI, J.P., 2008. **Determinação das previsões de temperaturas mínimas e máximas a partir do histórico das previsões de tempo por conjunto do CPTEC.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, p. 431-449, 2008.

Anexo I – Avaliação estatística dos resultados obtidos a partir do campo de ajuste

Ao longo do desenvolvimento da fase de comparação entre dados medidos e observados, várias versões de campos de ajuste (ou mapas de ajustes) foram obtidas. Para que houvesse uma comparação quantitativa das diversas versões, adotou-se o uso de ferramentas estatísticas que mostraram uma evolução da taxa de acerto dos resultados do modelo Brams quando comparados com dados medidos. As ferramentas estatísticas utilizadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ferramentas estatísticas utilizadas no estudo

Descrição	Fórmula
<u>Erro médio</u>	$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n}$ <p>Onde: P_i é o valor previsto; O_i o valor observado e n é o número total de observações.</p>
<u>Desvio padrão do erro</u>	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{(n - 1)}}$ <p>Onde: $\varepsilon_i = P_i - O_i$ $\bar{\varepsilon}$ = erro médio</p>
<u>Erro absoluto médio (MAE)</u>	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - O_i }{n}$
<u>Raiz do erro médio quadrático (RMSE)</u>	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$

A visualização dos resultados é realizada através de um histograma de distribuição do erro e também por um gráfico do tipo xy, tendo na abscissa o valor previsto pelo modelo e na ordenada o valor observado. Através dos resultados obtidos também é apresentada a melhor reta obtida pelo método dos mínimos quadrados, que busca correlacionar os pontos observados e medidos. A equação desta reta e o coeficiente de correlação (R^2) também são apresentados no gráfico.

Para cada versão obtida de campo de ajuste, foram realizados estudos estatísticos que avaliaram o histograma do erro, o espalhamento no gráfico xy (incluindo a correlação entre dados observados e previstos), o erro médio, o desvio padrão do erro, o MAE, e o RMSE, sendo, este último, considerado o parâmetro mais rigoroso por aplicar maior peso aos erros de maior magnitude (CHAI, 2014; SAVAGE et al., 2013; MCKEEN, 2005).

A primeira avaliação consistiu na comparação dos resultados do modelo Brams com a climatologia do Inmet. O valor da raiz do erro médio quadrático (RMSE) foi de aproximadamente 1,6 m/s. A redução do valor do RMSE ao longo das várias versões pode ser observada na Figura 1. O melhor valor encontrado para o RMSE foi obtido durante a sexta versão do campo de ajustes, apresentando uma MAE de 0,44 m/s e um RMSE de 0,57 m/s.

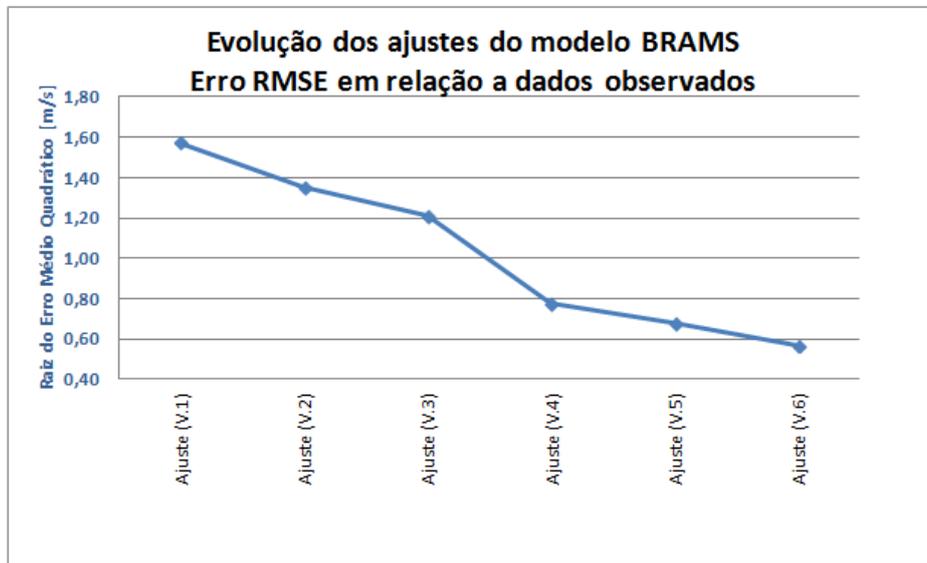


Figura 1 – Redução do erro RMSE observada com progressão dos ajustes do modelo

A última etapa de ajuste (versão 6) analisou valores de velocidades médias anuais previstas pelo modelo e observadas em uma base de dados composta de 138 estações, das quais foi utilizado um conjunto de 84 estações METAR e 29 estações anemométricas para ajuste e um segundo conjunto de 15 estações METAR e 10 estações anemométricas para o controle de qualidade do resultado do ajuste sobre o modelo. As figuras 2 e 3 mostram o espalhamento e o histograma do erro entre valores previstos e observados do conjunto de dados separado para ajuste.

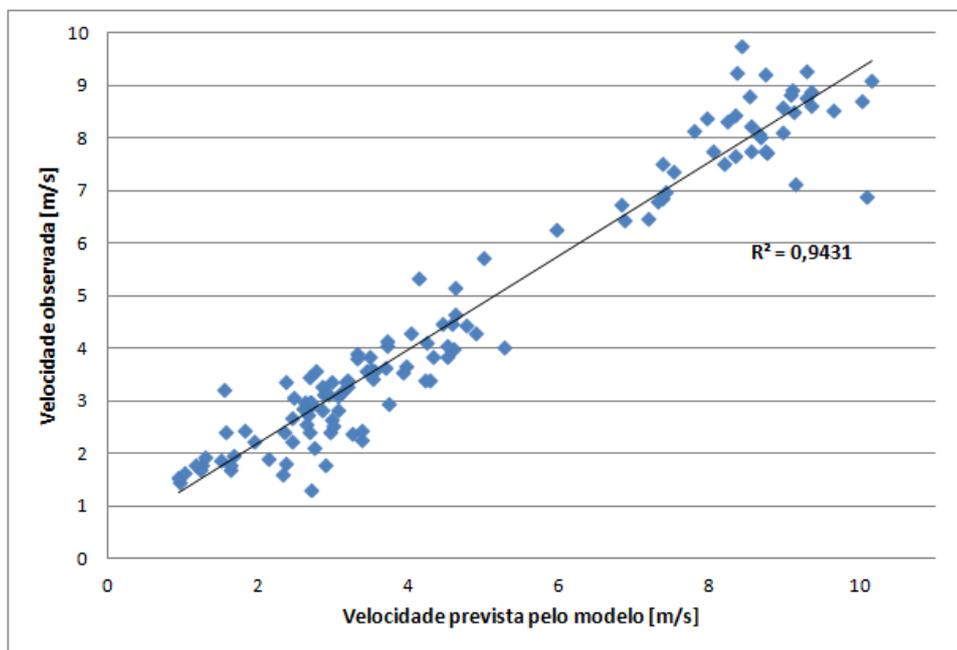


Figura 2 – Dispersão dos dados para realização da versão 6 do ajuste dos dados do modelo Brams

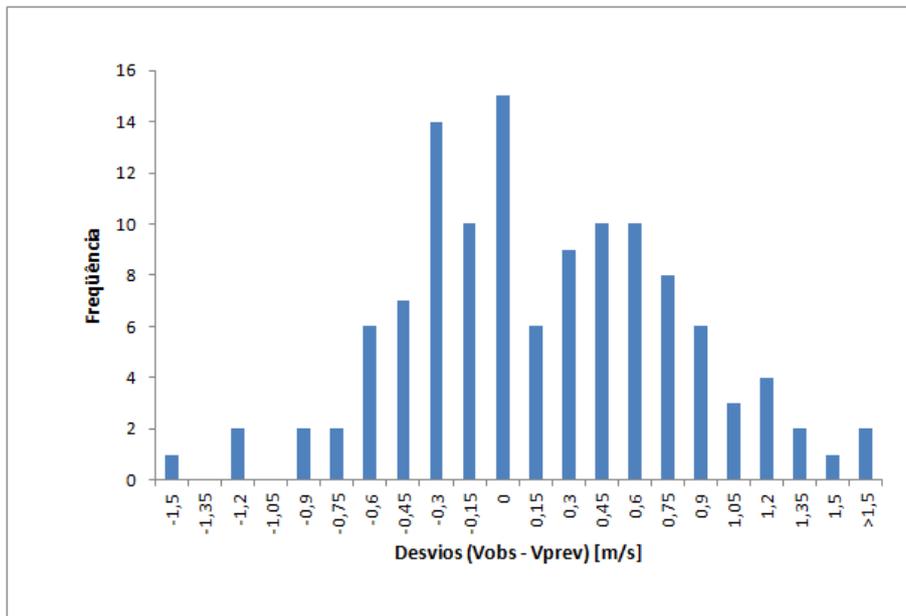


Figura 3 – Histograma da distribuição do erro (*Previsto – Observado*) para os dados do ajuste V6

As figuras 4 e 5 mostram o espalhamento e o histograma do erro entre valores previstos e observados do conjunto de dados separado para o controle de qualidade após o ajuste. A Tabela 2 apresenta diversos parâmetros estatísticos obtidos através da avaliação dos dois conjuntos de dados utilizados na última versão de ajuste.

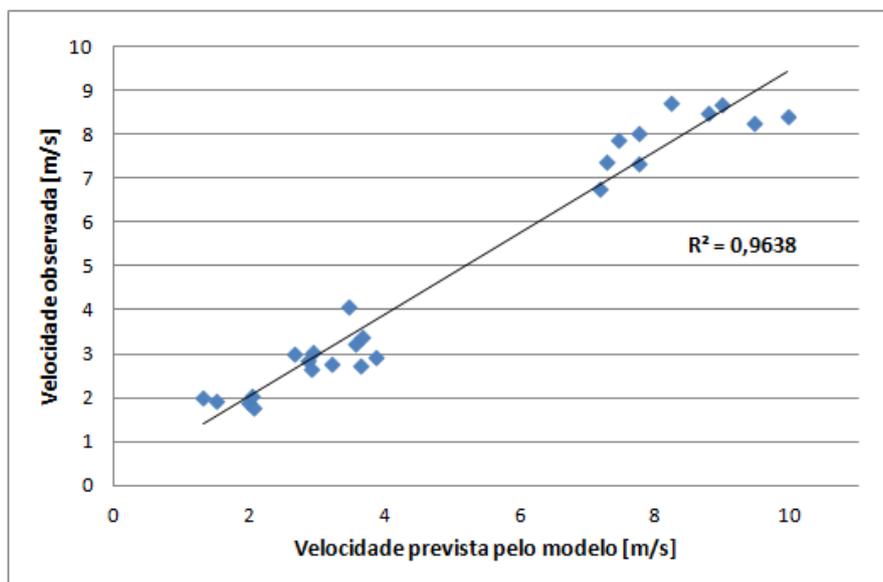


Figura 4 – Dispersão dos dados previstos (após ajuste) e observados para o conjunto utilizado no controle de qualidade.

Tabela 2 – Principais valores estatísticos obtidos na versão 6 de ajuste dos dados simulados

	Comparação dos dados previstos e observados antes do ajuste (versão 6) 113 estações	Controle de qualidade após ajuste (versão 6) 25 estações
Desvio Padrão	0,673	0,559
MAE [m/s]	0,518	0,442
RMSE [m/s]	0,678	0,570
R²	0,943	0,964

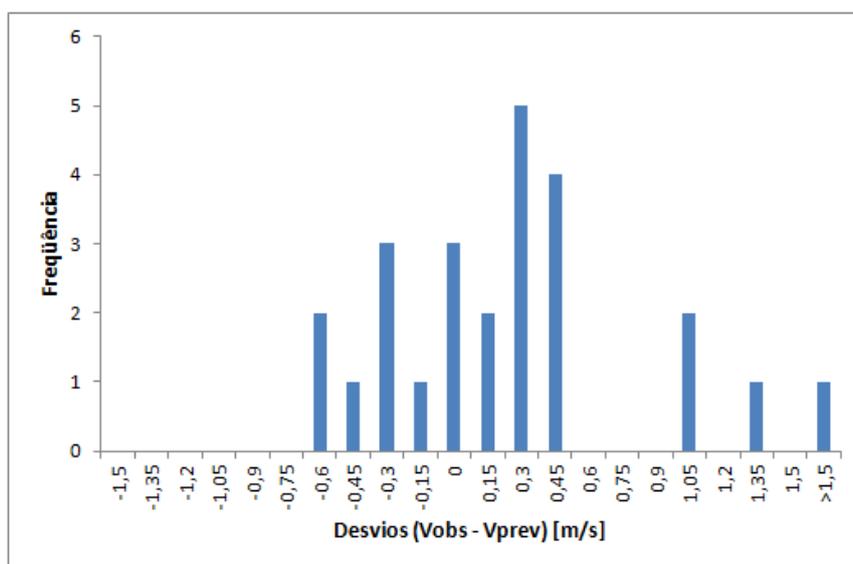


Figura 5 - Histograma da distribuição do erro (*Previsto – Observado*) do controle de qualidade

Conforme apresentado na Figura 1, houve uma melhora no desempenho dos ajustes realizados nos resultados do modelo. A última versão de ajuste apresentou uma média de erro absoluto (MAE) de 0,44 m/s e um RMSE de 0,57 m/s o que representa uma melhoria de 64% do valor de RMSE quando comparado com a primeira versão de ajuste. Os valores alcançados na última versão de ajuste são compatíveis com as variabilidades de medições anemométricas teoricamente calculadas pela norma IEC 61400-12-1 (IEC, 2005) ou mesmo quando determinadas experimentalmente (NEIVA et al., 2016).

Bibliografia

- CHAI, T., e DRAXLER, R.R., 2014. **Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature**, *Geosci. Model Dev.*, 7, 1247–1250, 2014
- IEC, 2005 - Norma IEC 61400-12-1, first edition 2005-12, **Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines**.
- MCKEEN, S. A., WILCZAK, J., GRELL, G., et al, 2005. **Assessment of an ensemble of seven realtime ozone forecasts over eastern North America during the summer of 2004**, *J. Geophys. Res.*, 110, D21307.
- NEIVA, A.C.B., RAMOS, D.A., GUEDES, V.G., WALTER, A., e MELO, S.R.F.C., 2016. **Estudo Comparativo Teórico e Experimental da Variabilidade de Dados de Velocidade de Vento em Estações Anemométricas** – Brazil Windpower 2016 Conference and Exhibition – 30/08/2016 – disponível em: Pasta 1, ID208 (acessado em 14/12/2016): <https://www.dropbox.com/sh/2vux66jiicslyu6/AADIJ2XOXtgLzW35w9lg43ZYa?dl=0>.
- SAVAGE, N. H., AGNEW, P., DAVIS, L. S., ORDÓÑEZ, C., THORPE, R., JOHNSON, C. E., O’CONNOR, F. M., e DALVI, M. 2013. **Air quality modelling using the Met Office Unified Model (AQUM OS24-26): model description and initial evaluation**, *Geosci. Model Dev.*, 6, 353–372.

Anexo II – Interpolação dos resultados do Brams para alturas comerciais

Após o encerramento das simulações do modelo Brams para o ano de 2013, o Cepel solicitou ao Inpe diversos cálculos de pós-processamento para se obter os parâmetros de Weibull e a consolidação dos dados horários no formato de dia típico anual. Além dos dados pós-processados, o Inpe repassou para o Cepel todos o conjunto de dados resultante do modelo (velocidade e direção do vento, desvio padrão da velocidade etc.) nas alturas nativas. Entretanto, a apresentação dos resultados da simulação para o ano de 2013 do novo Atlas do Potencial Eólico do Brasil levaram em consideração as diversas alturas de aerogeradores comerciais, sem coincidir, necessariamente, com aquelas utilizadas no processamento do modelo Brams.

Os resultados das simulações foram obtidos e fornecidos para cinco (5) alturas nativas do modelo. Para fins do projeto do Novo Atlas do Potencial Eólico do Brasil foram definidas seis (6) alturas como mostra a Figura 1.

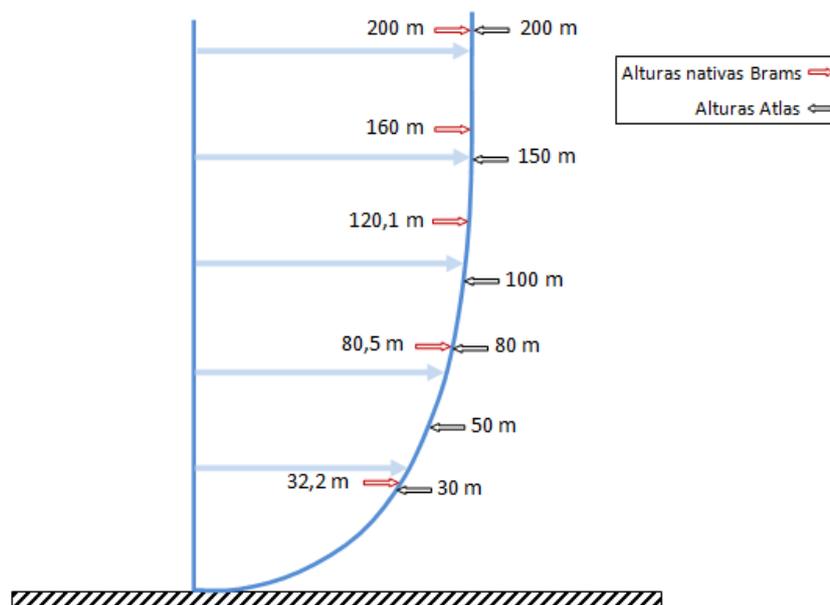


Figura 1. Alturas nativas do Brams e alturas definidas para o Atlas Eólico.

Toda a metodologia apresentada foi aplicada para cada ponto de grade do modelo Brams na resolução de 5 km x 5 km, utilizando ferramentas de álgebra de mapas disponíveis em *softwares* de geoprocessamento. A seguir, são descritas as metodologias utilizadas para elaboração dos mapas temáticos.

Velocidades do vento

Além do fornecimento de arquivos geotiff com informações da velocidade média anual ajustada para todas as alturas nativas do Brams, o Inpe forneceu informações (no mesmo formato de arquivo) da rugosidade utilizada pelo modelo. Para determinar a velocidade nas alturas definidas pelo Atlas, tomando por base os dados nas alturas nativas do modelo, utilizou-se a expressão logarítmica do perfil do vento conforme apresentado abaixo.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$

onde:

- h_1 = altura do solo do ponto 1 [m];
- h_2 = altura do solo do ponto 2 [m];
- v_1 = velocidade no ponto 1 [m/s];
- v_2 = velocidade no ponto 2 [m/s];
- z_0 = comprimento de rugosidade [m]

Para estimar a velocidade de uma altura definida pelo Atlas da qual a altura nativa do Brams encontra-se muito próxima, aplicou-se diretamente a expressão logarítmica. No caso em que a altura definida encontra-se em uma região intermediária entre duas alturas nativas consecutivas, foi usado um valor médio das velocidades calculadas tendo como referência as alturas nativas imediatamente superior e inferior à altura definida pelo Atlas. Os procedimentos utilizados, para cada altura definida pelo Atlas, são descritos a seguir:

Velocidade a 30 m

Para o cálculo da velocidade na altura de 30 m considerou-se a altura nativa de 32,2 m, da forma:

$$v_{30} = v_{32,2} \frac{\ln\left(\frac{30}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{32,2}{z_0}\right)}$$

Velocidade a 50 m

Para o cálculo da velocidade na altura de 50 m consideraram-se as velocidades nas alturas imediatamente inferior e imediatamente superior, 32,2 m e 80,5 m, cada uma das quais calculadas conforme o procedimento mostrado anteriormente:

$$v_{50inf} = v_{32,2} \frac{\ln\left(\frac{50}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{32,2}{z_0}\right)} \quad \text{e} \quad v_{50sup} = v_{80,5} \frac{\ln\left(\frac{50}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)}$$

Os subíndices “inf” e “sup” indicam o cálculo da velocidade de acordo com a altura nativa inferior e superior, respectivamente. A velocidade representativa para a altura de 50 m foi finalmente obtida de acordo com:

$$v_{50} = \frac{v_{50inf} + v_{50sup}}{2}$$

Velocidade a 80 m

Para o cálculo da velocidade na altura de 80 m considerou-se a altura nativa de 80,5 m, da forma:

$$v_{80} = v_{80,5} \frac{\ln\left(\frac{80}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)}$$

Velocidade a 100 m

Para a velocidade na altura de 100 m consideraram-se as alturas nativas de 80,5 m e 120,1 m, utilizando o procedimento já descrito no cálculo da velocidade a 50 m:

$$v_{100inf} = v_{80,5} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)} \quad \text{e} \quad v_{100sup} = v_{120,1} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)}$$

onde a velocidade nessa altura foi obtida finalmente de acordo com:

$$v_{100} = \frac{v_{100inf} + v_{100sup}}{2}$$

Velocidade a 120 m

A altura de 120 m considerada para o Novo Atlas do Potencial Eólico do Brasil é muito próxima da altura nativa de 120,1 m do Brams. Considerando que a diferença obtida com o uso da equação logarítmica situa-se a partir da terceira casa decimal optou-se pelo uso do mesmo valor da simulação para esta altura.

Velocidade a 150 m

Para a velocidade na altura de 150 m consideraram-se as alturas nativas de 120,1 m e 160 m, utilizando o procedimento já descrito no cálculo da velocidade a 50 m:

$$v_{150inf} = v_{120,1} \frac{\ln\left(\frac{150}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)} \quad \text{e} \quad v_{150sup} = v_{160} \frac{\ln\left(\frac{150}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{160}{z_0}\right)}$$

onde a velocidade nessa altura foi obtida finalmente de acordo com:

$$v_{150} = \frac{v_{150inf} + v_{150sup}}{2}$$

Velocidade a 200 m

A altura de 200 m considerada para o Novo Atlas do Potencial Eólico do Brasil coincidia com a altura nativa do Brams. Para tal caso a velocidade na altura de 200 m foi obtida diretamente do resultado da simulação do Brams.

Parâmetros de Weibull

Enquanto as velocidades e direções horárias foram obtidas diretamente das simulações realizadas com o modelo de mesoescala Brams, os parâmetros de Weibull (o parâmetro de forma k e o parâmetro de escala c), que descrevem a variação da velocidade do vento em um determinado local, foram determinados após as simulações do modelo para as alturas nativas de 80,5 m e 120,1 m. Para cada uma das alturas, o Inpe forneceu, também, os valores de desvio padrão necessários para calcular os parâmetros de Weibull conforme descrito a seguir.

A distribuição de Weibull é um modelo estatístico que descreve a variação da velocidade do vento para um determinado local. Ela é uma função biparamétrica e é expressa matematicamente por:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

onde:

$f(v)$ = frequência de ocorrência da velocidade do vento;

v = velocidade do vento (m/s);

k = parâmetro de forma (adimensional);

c = parâmetro de escala (m/s)

O parâmetro de escala c é uma medida para a velocidade característica do vento da distribuição. Ela é proporcional à velocidade média do vento. O parâmetro de forma k especifica a forma da distribuição de Weibull. Um pequeno valor de k significa ventos variáveis, enquanto ventos constantes são caracterizados por um valor grande de k . Este comportamento pode ser verificado na Figura 2, onde se mostra a variabilidade da curva de Weibull para um valor constante de c (7,0 m/s).

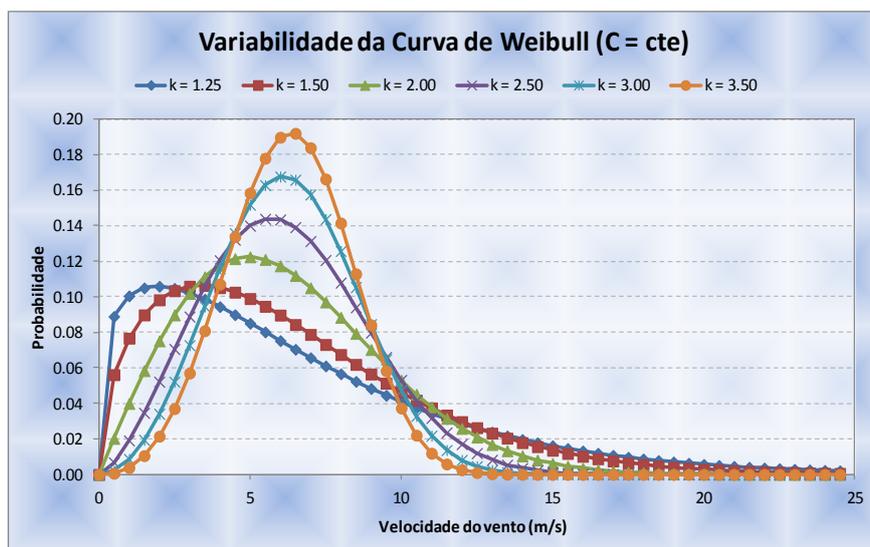


Figura 2. Distribuição da curva de Weibull para diversos valores de k .

O parâmetro de forma k está relacionado com o desvio padrão da amostra de velocidades, uma vez que altos valores de k indicam valores baixos do desvio padrão. Por outro lado, baixos valores de k indicam valores altos do desvio padrão. Para uma série histórica anual, o cálculo dos parâmetros de Weibull para as alturas nativas do Brams foi realizado de acordo com as formulações detalhadas a seguir.

Parâmetro de forma k

Calculado através do método denominado empírico-analítico (CUSTODIO, 2013; BOWEDEN et al. 1983 e JUSTOS et al. 1978):

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1,086}$$

onde:

σ = desvio padrão (m/s);

\bar{v} = velocidade média do vento (m/s).

Uma vez obtido o parâmetro de forma k na altura nativa, procedeu-se ao cálculo do parâmetro de escala c .

Parâmetro de escala c

O parâmetro de escala c é calculado a partir de (CUSTODIO, 2013; BOWEDEN et al. 1983 e JUSTOS et al. 1978):

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

onde:

\bar{v} = velocidade média do vento (m/s);

k = parâmetro de forma;

Γ = função gama.

A função gama é uma função matemática muito utilizada em energia eólica como uma função do fator de forma k de Weibull. A função foi aproximada de acordo com a fórmula de Stirling obtida a partir de uma expansão assintótica (ABRAMOWITZ, 1972):

$$\Gamma(z) \approx \left(\frac{z}{e} \right)^z \sqrt{\frac{2\pi}{z}} \exp\left(\frac{1}{12z} - \frac{1}{360z^3} + \frac{1}{1260z^5} - \frac{1}{1680z^7} + \frac{1}{1188z^9} \right)$$

onde:

Γ = função gama

z = argumento da função.

Assim, no cálculo do parâmetro de escala c , o argumento da função gama passa a ser $z = 1 + 1/k$.

Uma vez calculados os parâmetros de Weibull para as alturas nativas de 80,5 m e 102,1 m, foram adotadas as expressões abaixo para determinar os valores de c e k na altura de 100 m (JUSTUS & MIKHAIL, 1976):

$$k_2 = k_1 \left(\frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_2}{10}\right)} \right)$$

e

$$c_2 = c_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{n_{h_1}} \quad \text{onde} \quad n_{h_1} = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c_1)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}$$

onde:

h_1 = altura do solo do ponto 1 [m];

h_2 = altura do solo do ponto 2 [m];

c_1 = fator de escala em h_1 [m/s];

c_2 = fator de escala em h_2 [m/s];

k_1 = fator de forma em h_1 ;

k_2 = fator de forma em h_2 ;

Assim, para o cálculo do fator de forma k na altura de 100 m consideraram-se as velocidades nas alturas imediatamente inferior e imediatamente superior, 80,5 m e 120,1 m, cada uma das quais calculadas seguindo a metodologia já descrita anteriormente:

$$k_{100\text{inf}} = k_{80,5} \left(\frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{80,5}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{100}{10}\right)} \right) \quad \text{e} \quad k_{100\text{sup}} = k_{120,1} \left(\frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{120,1}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{100}{10}\right)} \right)$$

$$k_{100} = \frac{k_{100\text{inf}} + k_{100\text{sup}}}{2}$$

e

$$c_{100\text{inf}} = c_{80,5} \left(\frac{100}{80,5} \right)^{n_{80,5}} \quad \text{e} \quad c_{100\text{sup}} = c_{120,1} \left(\frac{100}{120,1} \right)^{n_{120,1}}$$

onde:

$$n_{80,5} = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c_{80,5})}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{80,5}{10}\right)} \quad \text{e} \quad n_{120,1} = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c_{120,1})}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{120,1}{10}\right)}$$

e

$$c_{100} = \frac{c_{100\text{inf}} + c_{100\text{sup}}}{2}$$

Perfil diurno

O perfil diurno de velocidades, também denominado dia típico, mostra o comportamento do vento ao longo do dia. Este comportamento ocorre principalmente em função da variação do aquecimento solar da superfície da terra no ciclo de 24 horas. É muito comum os locais apresentarem uma variação diária da velocidade do vento bastante definida, indicando a relação entre a velocidade do vento e a hora do dia. O gráfico da variação diurna da velocidade

do vento mostra a média aritmética de todos os dados medidos para cada hora do dia. Desta forma, essas informações permitem avaliar os períodos de maior probabilidade de disponibilidade de energia para análises de integração energética e controle de geração.

O perfil diurno abrange um determinado período de tempo, que pode ser mensal, anual ou sazonal. Como já exposto, para o cálculo do dia típico levam-se em conta os valores de velocidade horários no período determinado. Assim, no perfil diurno, o valor da velocidade na hora i corresponde à media obtida a partir de todos os valores da hora i contidos no período, de acordo com o procedimento mostrado na Figura 3. Na Figura 4 mostra-se o gráfico do perfil diurno com a velocidade média horária normalizada pela velocidade média do período correspondente.

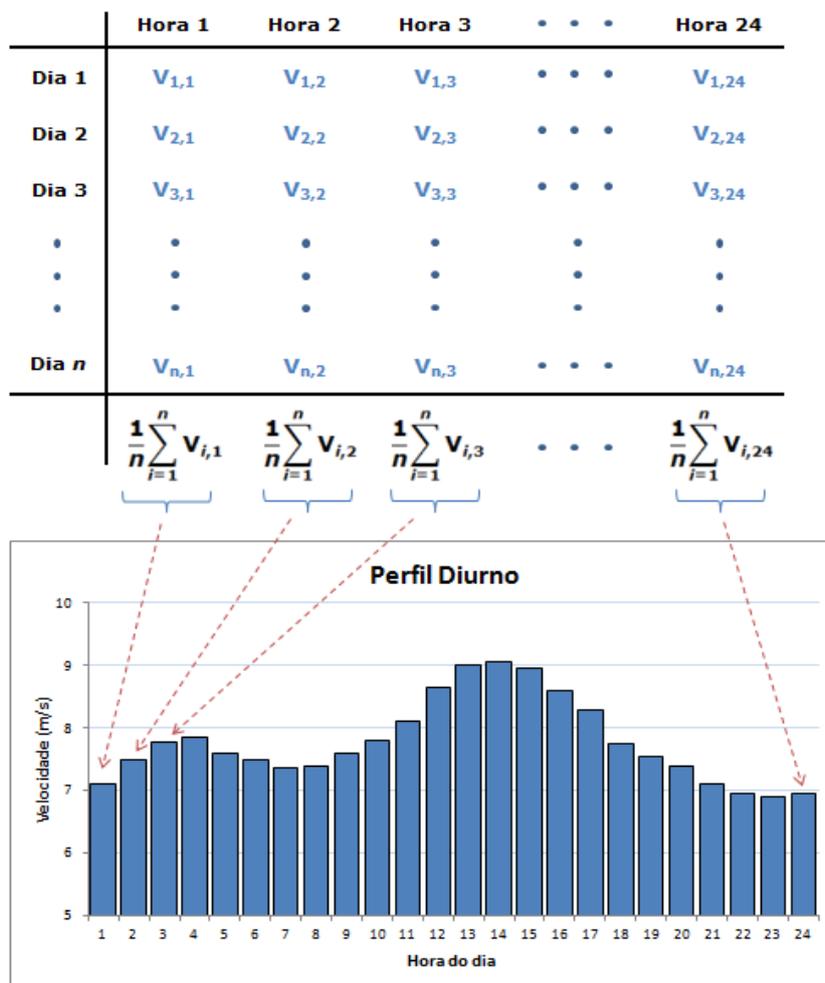


Figura 3. Procedimento para o cálculo do perfil diurno.

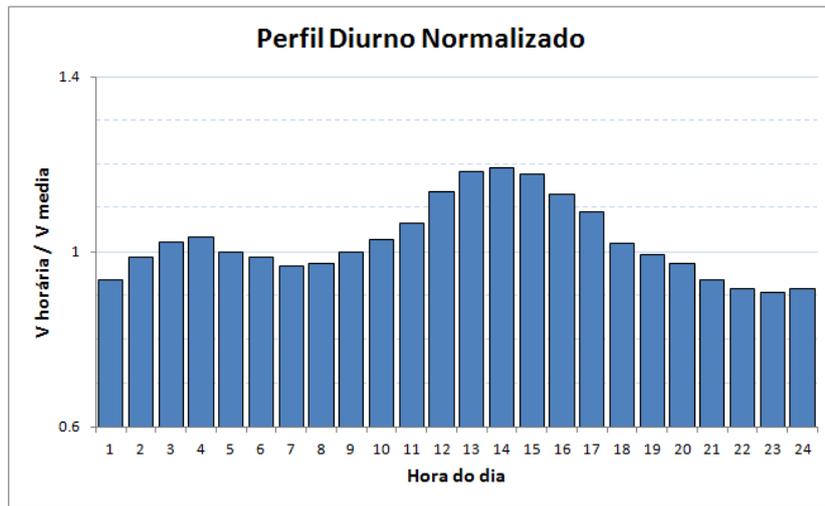


Figura 4. Gráfico do perfil diurno normalizado.

O Inpe, após o ajuste dos resultados simulados, aplicou a metodologia acima para obtenção do perfil diurno para cada altura nativa. Para a obtenção do perfil diurno a 100 m foram utilizados os valores obtidos para as alturas nativas de 80,5 m e 120,1 m. Cada valor da velocidade média horária do perfil na altura nativa foi calculado de acordo com a expressão logarítmica já utilizada anteriormente, conforme esquema apresentado na Figura 5.

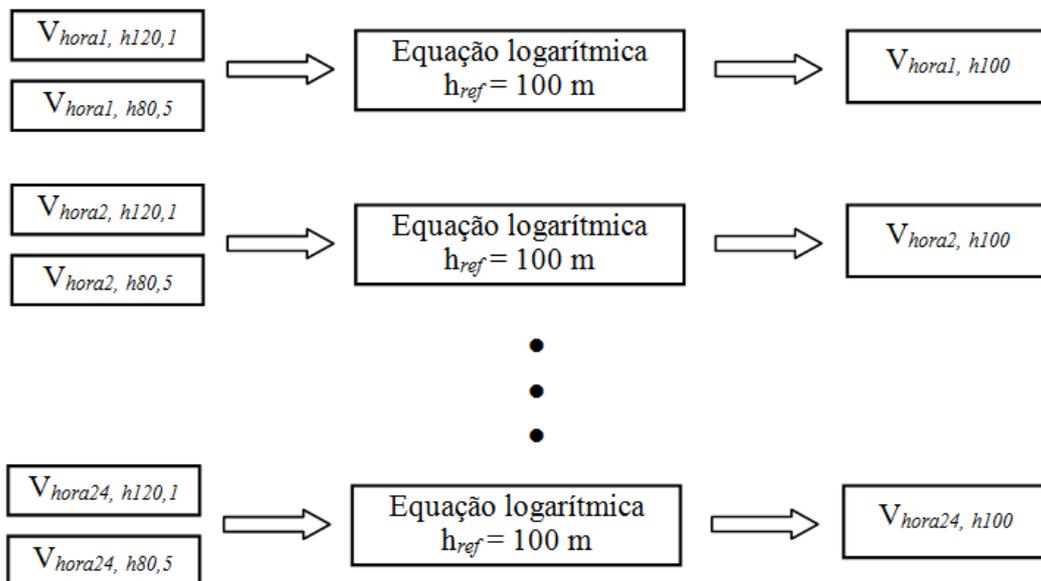


Figura 5. Procedimento para o cálculo do perfil diurno nas alturas

O perfil diurno foi obtido com base nas simulações realizadas para o ano de 2013. A velocidade correspondente à hora 1 considerou as velocidades da hora 1 nas alturas de 80,5 m e 120,1 m na forma:

Hora 1:

$$v_{1,100inf} = v_{1,80,5} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)} \quad e \quad v_{1,100sup} = v_{1,120,1} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)}$$

$$v_{1,100} = \frac{v_{1,100inf} + v_{1,100sup}}{2}$$

Hora 2:

$$v_{2,100inf} = v_{2,80,5} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)} \quad e \quad v_{2,100sup} = v_{2,120,1} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)}$$

$$v_{2,100} = \frac{v_{2,100inf} + v_{2,100sup}}{2}$$

...

...

Hora 24:

$$v_{24,100inf} = v_{24,80,5} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)} \quad e \quad v_{24,100sup} = v_{24,120,1} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)}$$

$$v_{24,100} = \frac{v_{24,100inf} + v_{24,100sup}}{2}$$

Densidade de potência

A densidade de potência foi calculada a partir da massa específica do ar e a velocidade do vento na altura de 100 m. A equação aplicada para o cálculo da densidade de potência (DP), expressa em W/m^2 , é apresentada abaixo (SATHYAJITH M., 2006):

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

onde:

- ρ = massa específica do ar [kg/m^3];
- A = área do rotor [m^2];
- P = potência eólica [W];
- v = velocidade do vento [m/s];

Utilizando os parâmetros de Weibull, a DP também pode ser representada por (SATHYAJITH M., 2006):

$$DP = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

onde:

ρ = massa específica do ar [kg/m^3];
 Γ = função gamma;
 c = fator de escala [m/s];
 k = fator de forma

A massa específica do ar (ρ) é calculada, segundo SATHYAJITH (2006), a partir da elevação do terreno (Z) e da temperatura local (T) conforme mostrada abaixo:

$$\rho = \frac{353,049}{T} \exp \left(-0,034 \frac{(Z + h)}{T} \right)$$

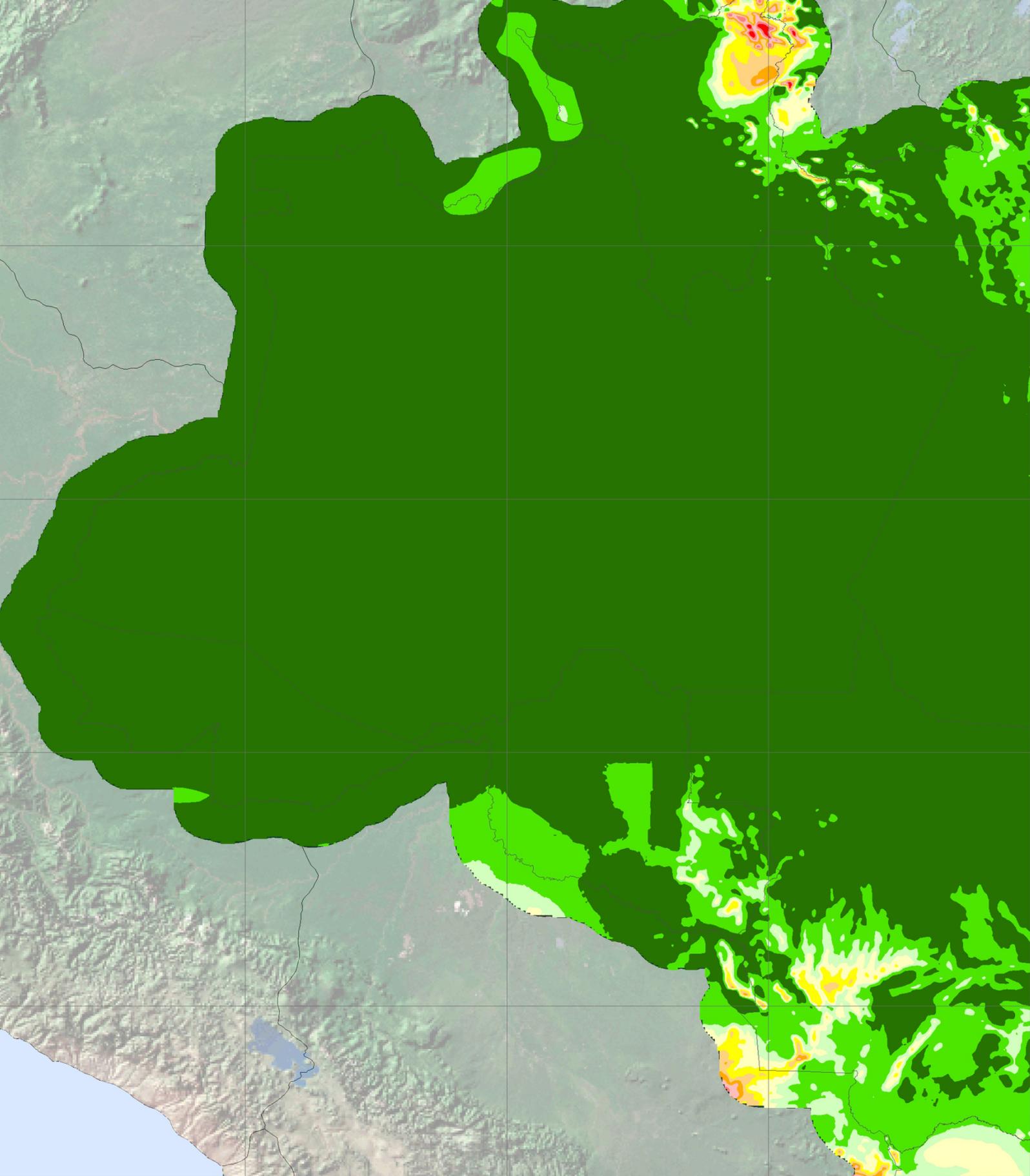
onde:

T = temperatura [K];
 Z = altitude [m];
 h = altura acima do solo¹¹ [m]

Bibliografia

- ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I.A. 1972. **Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables**. Dover Publications, New York (1972).
- BOWEDEN, G.J., BARKER, P.R., SHESTOPAL, V.O., TWIDELL, J.W., 1983. **The Weibull distribution function and wind statistics**. Wind Engineering 7:85-98.
- CUSTÓDIO, R., 2013. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. Synergia Editora Ed.2 ISBN: 9788561325886 Rio de Janeiro.
- JUSTOS, C.G., HARGRAVES, W.R., MIKAIL A., GRABER, D., 1978. **Methods of estimating wind speed frequency distribution**. J Applied Meteorolgy 17: 350-353.
- JUSTUS, C.G. and A. MIKHAIL, 1976. **Height variation of wind speed and wind distributions statistics**. Geophys. Res. Lett., 3261-264. DOI: 10.1029/GL003i005p00261.
- SATHYAJITH M., 2006. **Wind Energy – Fundamentals, Resource Analysis and Economics**. Ed.1 Springer Science ISBN 9783540309055 Berlin.

¹¹ Neste caso, 100 m.



Apoio

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



Financiamento



Realização

