

NOTA TÉCNICA

AVALIAÇÃO DO RECURSO EÓLICO OFFSHORE

**Bases de Dados Disponíveis e
Clusterização de Regiões**

AGOSTO DE 2026



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



■ Colaboradores

NOTA TÉCNICA EPE/DEE/SGR/073/2026

Coordenação Geral

Reinaldo da Cruz Garcia

Coordenação Executiva

Gustavo Pires da Ponte

Caio Monteiro Leocadio

Coordenação Técnica

Charles Egberto Guedes Vonnegut Vieira de Mello

Equipe Técnica

Amanda Jorge Vinhoza de Carvalho Silva

Paula Monteiro Pereira

Rafael Pinho Furtado

Marina Paiva Browning (Estagiária)



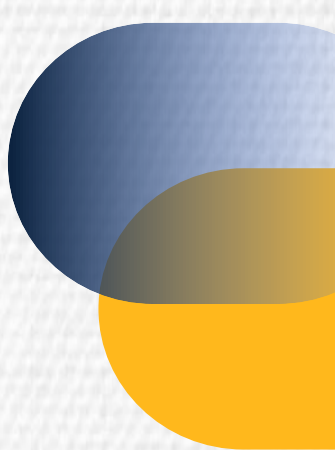
Two large, concentric orange arcs are positioned in the top left corner of the page, partially cut off by the edge.

VALOR PÚBLICO

A EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE TEM POR FINALIDADE PRESTAR SERVIÇOS AO MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME) NA ÁREA DE ESTUDOS E PESQUISAS DESTINADAS A SUBSIDIAR O PLANEJAMENTO DO SETOR ENERGÉTICO, COBRINDO ENERGIA ELÉTRICA, PETRÓLEO E GÁS NATURAL E SEUS DERIVADOS E BIOCOMBUSTÍVEIS. SOMOS UMA EMPRESA PÚBLICA FEDERAL, DEPENDENTE DO ORÇAMENTO GERAL DA UNIÃO.

A EPE TEM A MISSÃO DE REALIZAR ESTUDOS E PESQUISAS DE ALTA QUALIDADE PARA SUBSIDIAR O PLANEJAMENTO, AS POLÍTICAS PÚBLICAS E O DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO DO BRASIL, VISANDO GARANTIR A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E A COMPETITIVIDADE DO SETOR ENERGÉTICO. O FOMENTO DE NOVAS FONTES DE GERAÇÃO A PARTIR DA REDUÇÃO DE ASSIMETRIAS DE INFORMAÇÕES SE ALINHA AO OBJETIVO DE PERMITIR A COMPETITIVIDADE E GARANTIR A DISPONIBILIDADE DE RECURSOS ENERGÉTICOS DIVERSOS QUE PERMITAM O FORNECIMENTO SEGURO E COM RAZOABILIDADE DE CUSTOS AO PAÍS.

NESTA NOTA TÉCNICA, A EPE REALIZA A CARACTERIZAÇÃO DAS BASES DE DADOS DE RECURSO EÓLICO OFFSHORE DISPONÍVEIS PUBLICAMENTE E DE MANEIRA SISTEMÁTICA, A AGREGAÇÃO DE REGIÕES GEOGRÁFICAS DE ACORDO COM DADOS DE VENTO CONSIDERADO, DETALHANDO AS REGIÕES DE ACORDO COM SEU RECURSO EÓLICO. TAIS DADOS SÃO RELEVANTES PARA O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO E SETORIAL DA FONTE EÓLICA OFFSHORE E PODERÃO SER UTILIZADOS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS DE RECURSOS DE VENTO PARA AS ÁREAS DE OFFSHORE E SETOR ELÉTRICO NACIONAL.

In the bottom right corner, there are two overlapping rounded shapes. The top one is a dark blue semi-circle, and the bottom one is a yellow semi-circle.



Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário-Executivo

Gustavo Cerqueira Ataíde

Secretária de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Mariana Espécie



Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Thiago Ivanoski Teixeira

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Reinaldo da Cruz Garcia

Diretor de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Thiago Guilherme Ferreira Prado (interino)

Diretor de Gestão Corporativa

Carlos Eduardo Cabral Carvalho

<http://www.epe.gov.br>

■ Sumário

1. Introdução	6
2. Dados Utilizados.....	6
2.1. Bases de dados	6
2.1.1. ERA5	7
2.1.2. MERRA-2	8
2.1.3. Global Wind Atlas.....	10
2.1.4. Comparação entre as Bases de Dados	11
3. Clusterização dos Dados	18
4. Resultados da Clusterização	20
4.1. Dados e Agrupamentos	21
4.1.1. Clusters na Região A.....	23
4.1.2. Clusters na Região B.....	26
4.1.3. Clusters na Região C.....	29
4.1.4. Clusters na Região D.....	32
4.1.5. Clusters na Região E	36
4.2. Resumo comparativo dos clusters.....	39
5. Conclusão	44
6. Referências Bibliográficas.....	46

■ Lista de Ilustrações

Figura 1 - Velocidade média do vento - ERA5 – Altura 100 m.....	8
Figura 2- Velocidade média do vento – MERRA-2 – Altura 50 m	9
Figura 3- Metodologia de <i>downscaling</i> do GWA	10
Figura 4- Velocidade média do vento – GWA – Altura 150 m	11
Figura 5- Velocidades médias do vento – Altura 150 m – ERA5, MERRA-2 e GWA	14
Figura 6 – Diferenças das velocidades médias do vento entre modelos – Altura 150 m.....	15
Figura 7- Matriz de Correlação	18
Figura 8 - Cálculo de distâncias pelo método de Ward	19
Figura 9 – Dendrograma das clusterizações dos dados apresentados na Figura 7	20
Figura 10 – Localização dos Clusters na Costa Brasileira	22
Figura 11 – Localização dos Clusters - Região A.....	23
Figura 12 – Rosa dos ventos dos clusters – Região A	23
Figura 13 – Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters - Região A.....	24
Figura 14 - Dia médio e ano médio da velocidade do vento nos clusters - Região A.....	25
Figura 15 – Localização dos Clusters - Região B.....	26
Figura 16 - Rosa dos ventos dos Clusters - Região B.....	26
Figura 17 - Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters - Região B.....	27
Figura 18 - Dia médio e ano médio da velocidade do vento nos clusters - Região B	28
Figura 19 - Localização dos Clusters - Região C.....	29
Figura 20 - Rosa dos ventos dos clusters - Região C	29
Figura 21 - Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters - Região C.....	30
Figura 22 - Dia médio e ano médio da velocidade do vento nos clusters - Região C	30
Figura 23 – Localização dos Clusters - Região D	32
Figura 24 - Rosa dos ventos dos clusters - Região D.....	33
Figura 25 - Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters – Região D	34
Figura 26 - Dia médio e ano médio da velocidade do vento nos clusters - Região D.....	35
Figura 27 – Localização dos Clusters - Região E.....	36
Figura 28 - Rosa dos ventos dos clusters - Região E	36
Figura 29 - Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters - Região E.....	37
Figura 30 - Dia médio e ano médio da velocidade média do vento nos clusters - Região E	38
Figura 31 - Fator de escala e fator de forma da distribuição de Weibull	41
Figura 32 - Velocidade e rosa dos ventos por cluster	42

■ Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resumo das bases de dados.....	12
Tabela 2 – Resultados consolidados por cluster	39
Tabela 3 – Comportamento médio diário e anual por região	40

■ Lista de Quadros

Quadro 1 - Análise dos resultados do modelo ERA5, MERRA-2 e GWA.....	17
--	----

1. Introdução

A fonte eólica offshore vem ganhando cada vez mais notoriedade nas discussões do setor elétrico brasileiro devido ao seu vasto potencial para geração de energia elétrica. No *Roadmap Eólica Offshore Brasil* [1], publicado pela EPE em 2020, o potencial técnico da fonte a 100 m de altura foi estimado em cerca de 700 GW em locais com profundidade até 50 m, e em mais de 900 GW para o limite de profundidade de 100 m.

Apesar dos recentes avanços que endereçam lacuna legal e normativa, outro desafio identificado no *Roadmap* permanece: a necessidade de conferir maior precisão aos dados climatológicos e meteoceanográficos. Essa questão é agravada frente à inexistência de medições de recurso eólico offshore *in-situ* disponíveis publicamente, fato que limita o entendimento da contribuição que a fonte pode agregar ao sistema elétrico brasileiro, por exemplo. Além disso, esse conhecimento se torna ainda mais relevante e urgente diante da possibilidade cessão de áreas para a instalação de projetos, que deve ser informada por uma indicação locacional das áreas mais adequadas, que pode considerar, dentre outros critérios, a perspectiva técnico-econômica e energética.

Diante disso, esta Nota Técnica tem como objetivo apresentar uma avaliação do recurso eólico offshore no Brasil, refinando o conhecimento a partir de bases de dados de acesso público, através da análise, agregação e representação dos dados de vento na forma de regiões características do recurso.

Para tal, primeiramente são apresentadas as principais características das bases de dados públicas disponíveis atualmente e a comparação dos resultados obtidos em cada uma delas para, posteriormente, selecionar a base para a análise do recurso eólico offshore com maior detalhamento. Após a seleção, é aplicada uma metodologia de agregação de dados de vento, visando identificar as chamadas regiões características, de acordo com sua localização e comportamentos diário e sazonal do vento no ambiente marinho.

Destaca-se que a metodologia de agregação aqui empregada já foi aplicada pela EPE para a análise do recurso eólico onshore [2], para o qual se dispunha, no entanto, de medições *in-situ*¹.

2. Dados Utilizados

Esta seção apresenta as bases de dados utilizadas neste estudo, detalhando suas principais características e as análises comparativas para seleção da base mais adequada para seguir o procedimento de agregação de dados, conforme o objetivo desta Nota Técnica.

2.1. Bases de dados

Como insumo para as análises preliminares que serão realizadas nesta Nota Técnica, são necessárias informações de vento em toda a região marítima brasileira, que se estende do continente até o limite da Zona Econômica Exclusiva (ZEE). Devido à restrição de dados públicos medidos *in situ* nesta região, o estudo restringiu-se à avaliação comparativa de três bases de dados: ERA5 [3], MERRA-2 [4] e Global Wind Atlas [5]. Essas bases foram escolhidas por serem públicas e amplamente utilizadas em estudos relacionados à energia eólica.

¹ Mais informações em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/divulgacaoAMA/>

As bases ERA5 e MERRA-2 são produtos de reanálise atmosférica, que é uma metodologia que combina observações climáticas provenientes de distintas fontes (como satélites, boias e estações meteorológicas) com modelos numéricos de previsão, visando gerar séries históricas de longo prazo de diversas variáveis climáticas [6]. Já o Global Wind Atlas utiliza dados de reanálise como entrada e aplica um processo de *downscaling* para a obtenção de dados de vento de alta resolução espacial. As características das bases são detalhadas a seguir.

2.1.1. ERA5

O ERA5 é uma base de dados de reanálise atmosférica produzida pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (latitude x longitude) e que possui dados desde 1940 até o presente, com resolução horária. Dentre as variáveis disponíveis no modelo ERA5, foram utilizadas as componentes do vento a 10 m e 100 m de altura (*10m u-component of wind*, *10m v-component of wind*, *100m u-component of wind* e *100m v-component of wind*), sendo 100 metros a maior altura disponível no ERA5 para dados de vento próximos à superfície [3].

A partir dessas variáveis, as velocidades e direções do vento foram calculadas, respectivamente, pelas Equações 1 e 2 [7]:

$$|V| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$\phi = \left[180 + \text{atan2}(u, v) \frac{180}{\pi} \right] \quad (2)$$

Onde: V é a velocidade do vento (m/s); ϕ é a direção do vento ($^\circ$); v é a componente meridional do vento, positiva em direção norte (m/s); u é a componente zonal do vento, positiva em direção leste (m/s).

A Figura 1 apresenta a velocidade média do vento na costa brasileira a partir dos dados do ERA5 a uma altura de 100 metros. O cálculo da velocidade média de cada ponto foi realizado para um período dez anos (2008-2017).

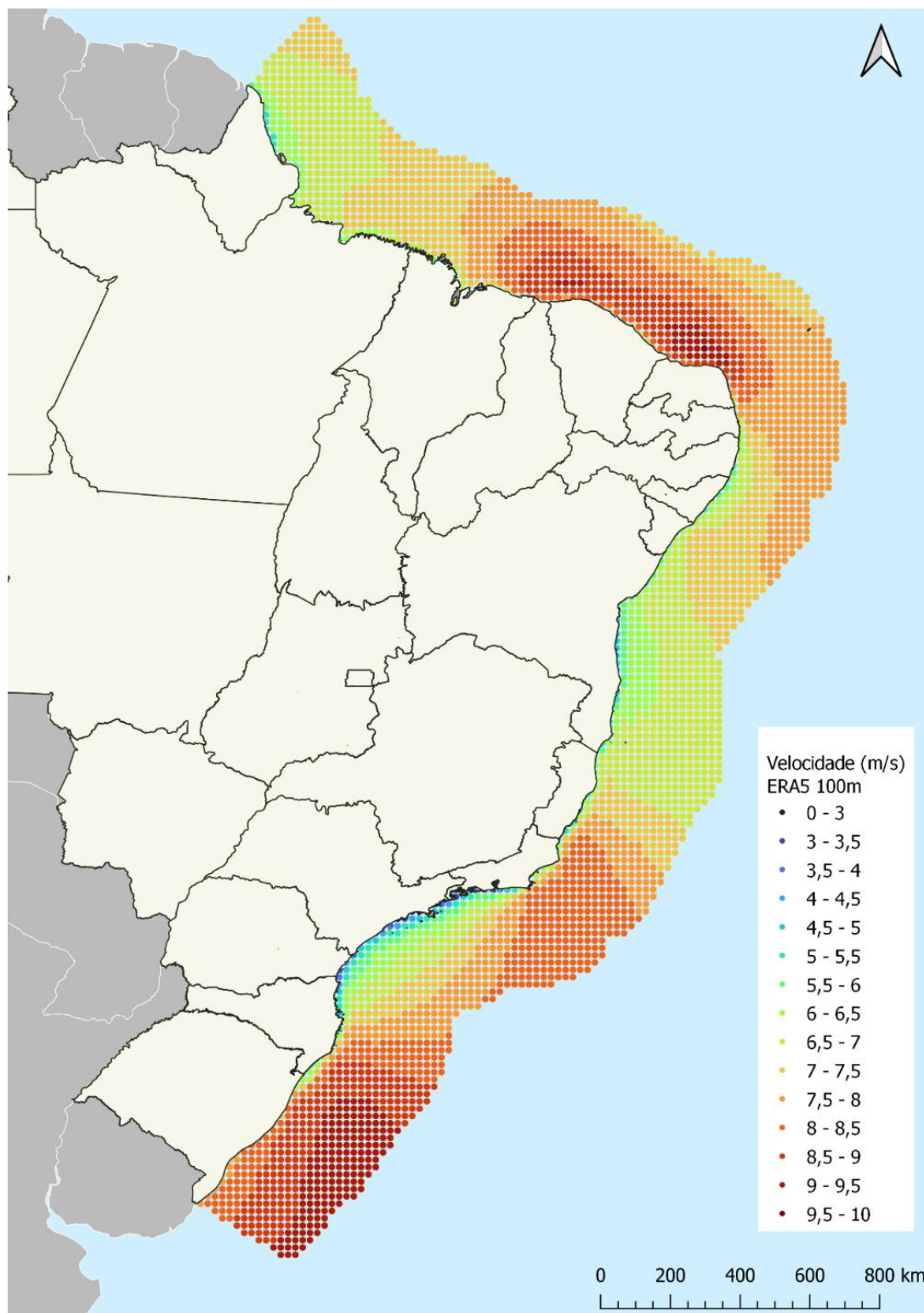


Figura 1 - Velocidade média do vento - ERA5 – Altura 100 m.
Elaboração própria a partir de [3]

2.1.2. MERRA-2

O MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2*), é uma reanálise atmosférica produzida pelo *NASA's Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO) [8]. Essa base de dados disponibiliza informações de longo prazo, com cobertura a partir de 1980. O MERRA-2 possui resolução espacial de $0,625^\circ$ em longitude por $0,5^\circ$ em latitude, com resolução temporal horária.

Os dados do MERRA-2 utilizados neste estudo foram obtidos a partir do produto M2T1NXSLV (2d,1-Hourly, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4) [9]. Dentre as variáveis disponíveis nesse produto, foram utilizadas as componentes do vento a 10 m e 50 m de altura (*10-meter_eastward_wind*, *10-northward_wind*, *50-meter_eastward_wind* e *50-northward_wind*), sendo 50 metros a maior altura disponível. A partir dessas variáveis, a velocidade e direção do vento foram obtidas pelas Equações 1 e 2.

A Figura 2 apresenta a velocidade média do vento na costa brasileira a partir dos dados do MERRA-2 a uma altura de 50 metros. O cálculo da velocidade média de cada ponto foi realizado para um período dez anos (2008-2017).

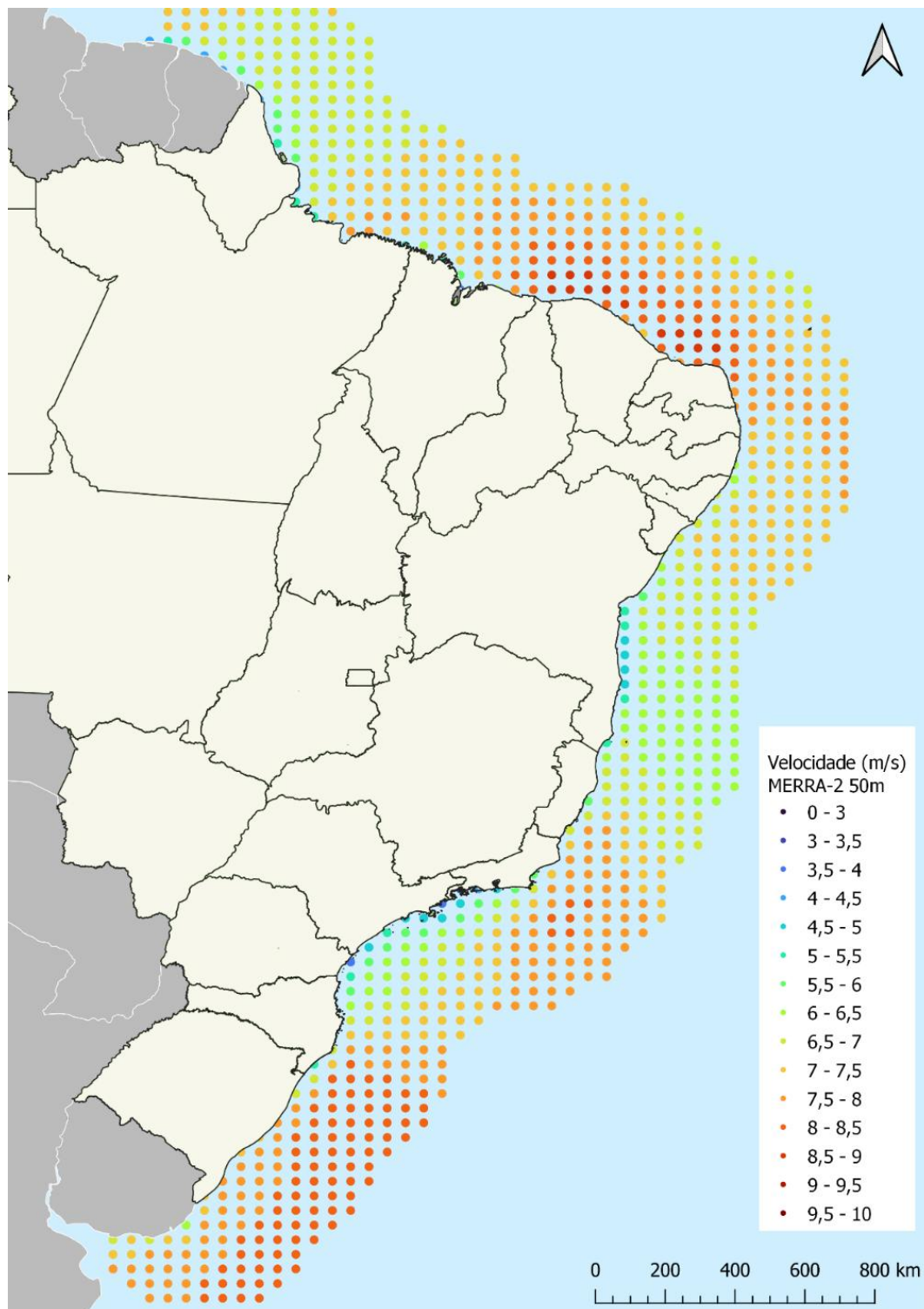


Figura 2- Velocidade média do vento – MERRA-2 – Altura 50 m
Elaboração própria a partir de [4]

2.1.3. Global Wind Atlas

O Global Wind Atlas (GWA) é uma ferramenta desenvolvida pela *Technical University of Denmark* (DTU) em parceria com o Banco Mundial, a partir do programa ESMAP, que disponibiliza mapas com as médias da velocidade do vento com alta resolução, incorporada a um sistema SIG (Sistema de Informação Geográfica), que também permite o *download* das informações para uso local [10]. Em junho de 2025, o modelo apresentou sua quarta versão (GWA 4.0), após atualizações diversas, desde seu lançamento original em outubro de 2015.

O Global Wind Atlas utiliza como base informações de outras bases públicas, como dados de reanálise e, para a sua elaboração é realizado o procedimento de *downscaling*, que visa reduzir a escala dos dados de origem, obtendo resoluções espaciais mais detalhadas. A Figura 3 apresenta o esquema da metodologia de *downscaling* aplicada no GWA [10] sobre os dados provenientes da base ERA5. Os dados de reanálise do ERA5 são reprocessados no modelo de previsão atmosférica WRF (*Weather Research and Forecasting*) utilizando uma malha com espaçamento de 3 km. Em seguida, aplica-se um processo de generalização, no qual os efeitos com escala semelhante àquela representada no modelo de microescala são removidos dos resultados do modelo de mesoescala, evitando dupla contagem desses efeitos. Posteriormente, os dados atmosféricos generalizados são utilizados como condições de entrada para o modelo de microescala WASP, que utiliza uma escala espacial de $0,0025^\circ$ (aproximadamente 250m) [10].

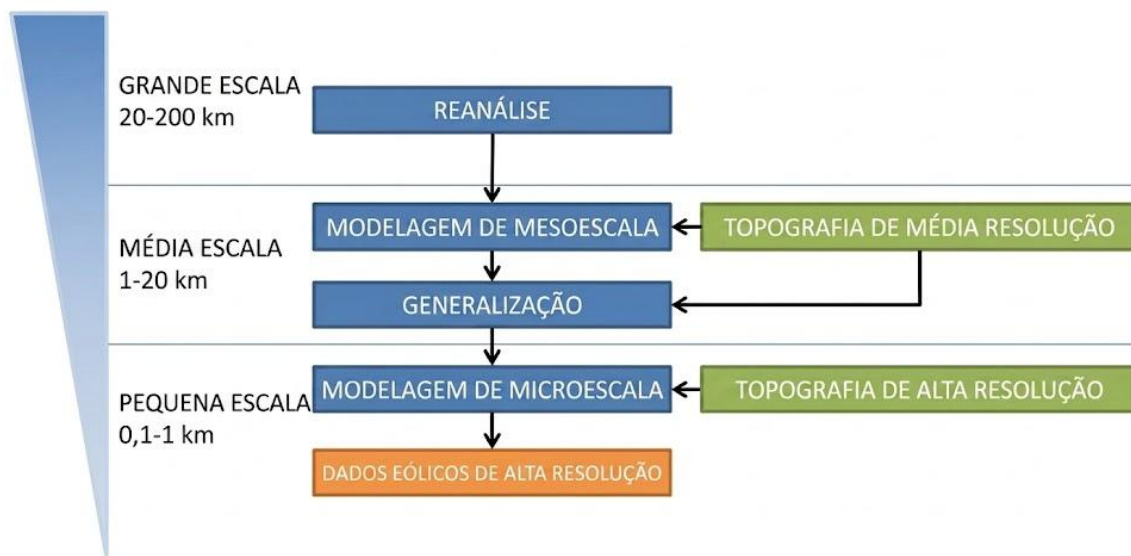


Figura 3- Metodologia de *downscaling* do GWA

Os dados do GWA compreendem o período entre 2008 e 2017. A modelagem do vento é realizada em 5 alturas distintas (10 m, 50 m, 100 m, 150 m e 200 m) e inclui locais com até 200 km de distância das linhas costeiras dos países.

A Figura 4 apresenta a velocidade média do vento a 150 metros de altura obtida a partir do GWA para a costa brasileira.

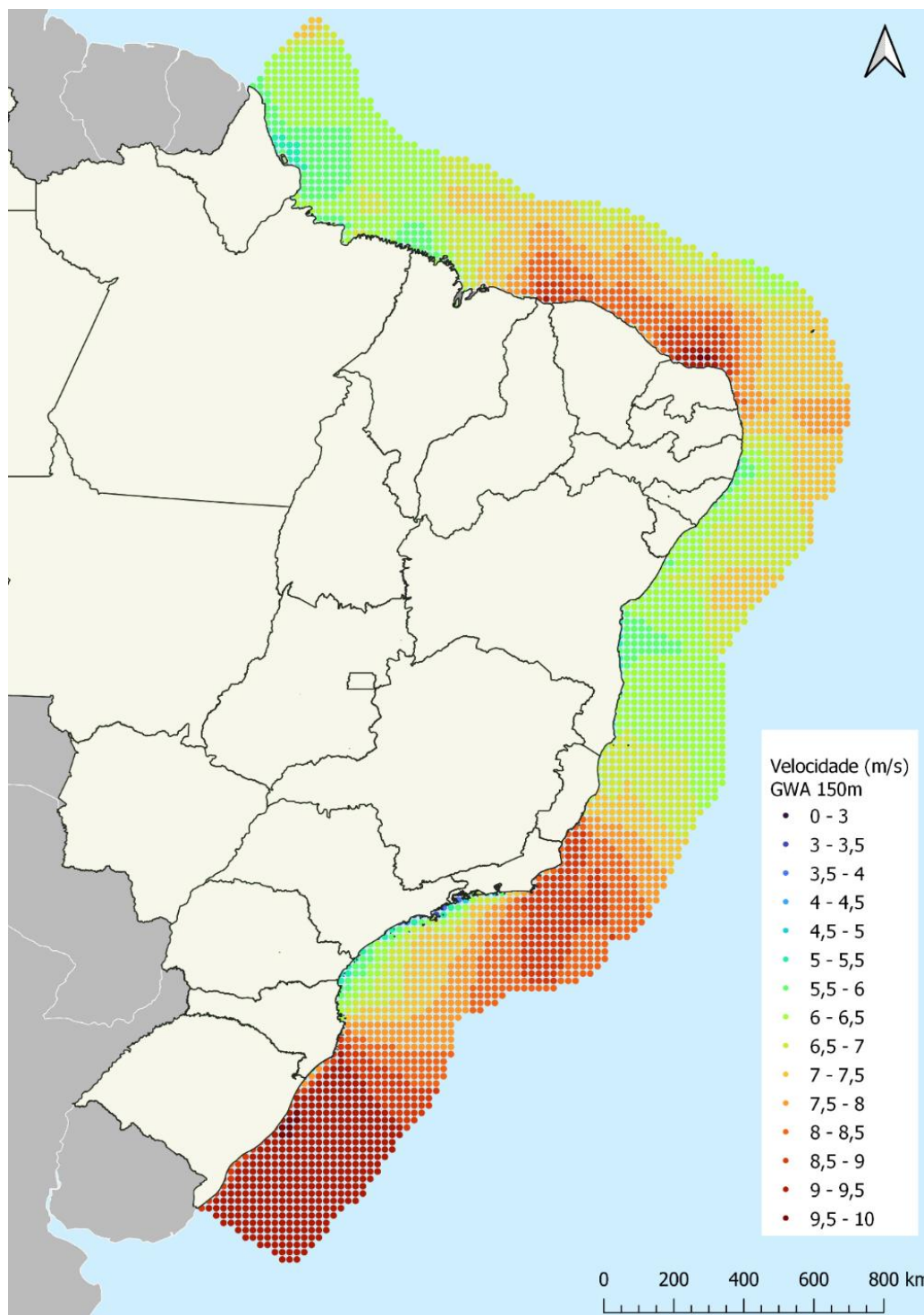


Figura 4- Velocidade média do vento – GWA – Altura 150 m
Elaboração própria a partir de [5]

2.1.4. Comparação entre as Bases de Dados

A Tabela 1 - Resumo das bases de dados consolida as principais características das bases de dados avaliadas neste estudo, a fim de subsidiar o entendimento a respeito da aplicabilidade de cada uma delas e eventuais tratamentos exigidos para comparar os dados entre si.

Os dados de reanálise do ERA5 possuem resolução espacial de $(0,25^\circ \times 0,25^\circ)$ e resolução temporal horária, com disponibilidade desde 1940 até o presente, fornecendo informações do vento tipicamente nas alturas de 10 m e 100 m.

O MERRA-2, por sua vez, é uma reanálise que apresenta resolução espacial mais grosseira ($0,625^\circ \times 0,5^\circ$), também com dados horários disponíveis entre 1980 e o presente, com informações de vento em 10m e 50m.

Já o GWA, pela sua maior resolução espacial, é um produto voltado mais especificamente à avaliação do potencial eólico, disponibilizando dados médios de velocidade do vento a partir das informações do período de 2008 a 2017, em múltiplas alturas (10, 50, 100, 150 e 200 m) e resolução espacial ($0,0025^\circ \times 0,0025^\circ$), resultante da combinação de dados de reanálise, modelagem de mesoescala, generalização e modelagem de microescala.

Tabela 1 - Resumo das bases de dados

Base	Alturas disponíveis (m)	Resolução espacial ($\text{long}^\circ \times \text{lat}^\circ$)	Resolução temporal	Disponibilidade dos dados
ERA5	10, 100	0,25 x 0,25	Horária	1940 - presente
MERRA-2	10, 50	0,625 x 0,5	Horária	1980 - presente
GWA	10, 50, 100, 150, 200	0,0025 x 0,0025	Média (2008-2017)	-

Diante disso, conclui-se que ERA5 e MERRA-2 são mais apropriadas para análises temporais de longo prazo, uma vez que fornecem séries temporais horárias. O GWA destaca-se pela sua alta resolução espacial, sendo seu uso recomendado na fase de avaliação preliminar do recurso eólico ou em estudos que demandem alta resolução espacial.

Foi então realizada a avaliação comparativa das velocidades médias do vento na costa brasileira entre as três bases indicadas. Conforme informado nas subseções anteriores, foram obtidas as médias de velocidades para as bases ERA5 e MERRA-2, a partir dos dados do período entre 2008 e 2017, coincidente ao período utilizado nas simulações do GWA.

A fim de apresentar resultados alinhados com o cenário atual de eólica offshore e com aplicabilidade para estudos futuros, foi determinada a altura de 150 m como referência, sendo compatível com a altura do eixo do rotor de uma turbina semelhante às utilizadas atualmente em outros países. Desta forma, foram utilizados os dados nesta altura do GWA e extrapoladas as velocidades para as demais bases de dados.

A extrapolação vertical da velocidade do vento para 150 metros foi realizada a partir da lei de potência [11], apresentada na Equação 3.

$$V(z) = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (3)$$

Onde: $V(z)$ é a velocidade (m/s) na altura de interesse z (m); V_{ref} é a velocidade de vento conhecida na altura z_{ref} (m); α é o expoente de cisalhamento do vento.

O expoente de cisalhamento do vento (α) é estimado a partir da Equação 4. Para o seu cálculo, são necessárias velocidades do vento em duas alturas distintas. Assim para o ERA5, o valor de α é obtido considerando $z_2=100\text{m}$ e $z_1=10\text{m}$ e para o MERRA-2 $z_2=50\text{m}$ e $z_1=10\text{m}$.

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right)}{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)} \quad (4)$$

Além da extrapolação vertical, as velocidades médias do MERRA-2 foram interpoladas para a grade espacial do ERA5 (0,25° x 0,25°), a partir do método de interpolação espacial IDW - *Inverse Distance Weighting*. O IDW assume que as observações mais próximas ao ponto de interesse exercem maior influência na estimativa do que observações mais distantes [12]. A interpolação foi realizada com a função *idw()* da biblioteca *gstat*, disponível em linguagem R.

No IDW, a estimativa do valor da variável Z no ponto de interpolação s_0 é dada pela Equação 5 [13].

$$\hat{Z}(s_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w(s_i) Z(s_i)}{\sum_{i=1}^n w(s_i)} \quad (5)$$

Os pesos atribuídos a cada observação são calculados em função da distância entre o ponto amostrado e o ponto de interpolação, conforme a Equação 6.

$$w(s_i) = \|s_i - s_0\|^{-p} \quad (6)$$

Onde: $\hat{Z}(s_0)$ é o valor estimado da variável de interesse no ponto de interpolação s_0 ; $Z(s_i)$ é o valor observado da variável no ponto s_i ; $w(s_i)$ é o peso associado ao valor observado no ponto s_i ; p é o expoente de potência do método IDW (como padrão é considerado $p=2$); n é o número de pontos considerados no processo de interpolação.

2.1.4.1. Resultados da comparação

Esta seção apresenta os resultados da comparação entre as bases de dados consideradas neste estudo. A Figura 5 apresenta os resultados das velocidades médias a 150 m de altura para cada base de dados.

Observa-se que, para as três bases, podem ser identificados **3 hotspots de potencial eólico offshore** no Brasil, ou seja, regiões que apresentam maiores faixas de velocidades médias: áreas desde o Maranhão até o Rio Grande do Norte, entre Espírito Santo e Rio de Janeiro; e entre Santa Catarina e Rio Grande Sul.

Enquanto o GWA indica áreas de velocidade média baixa, abaixo de 6,5 m/s a 150 m de altura, o ERA5 e o MERRA-2 apontam grandes manchas com velocidade média acima de 7,0 m/s, que já poderiam ser consideradas adequadas para a geração eólica offshore em avaliações de potencial.

No entanto, também podem ser observadas algumas divergências entre os resultados, sendo a mais pronunciada na região que abrange o litoral entre Maranhão e Amapá.

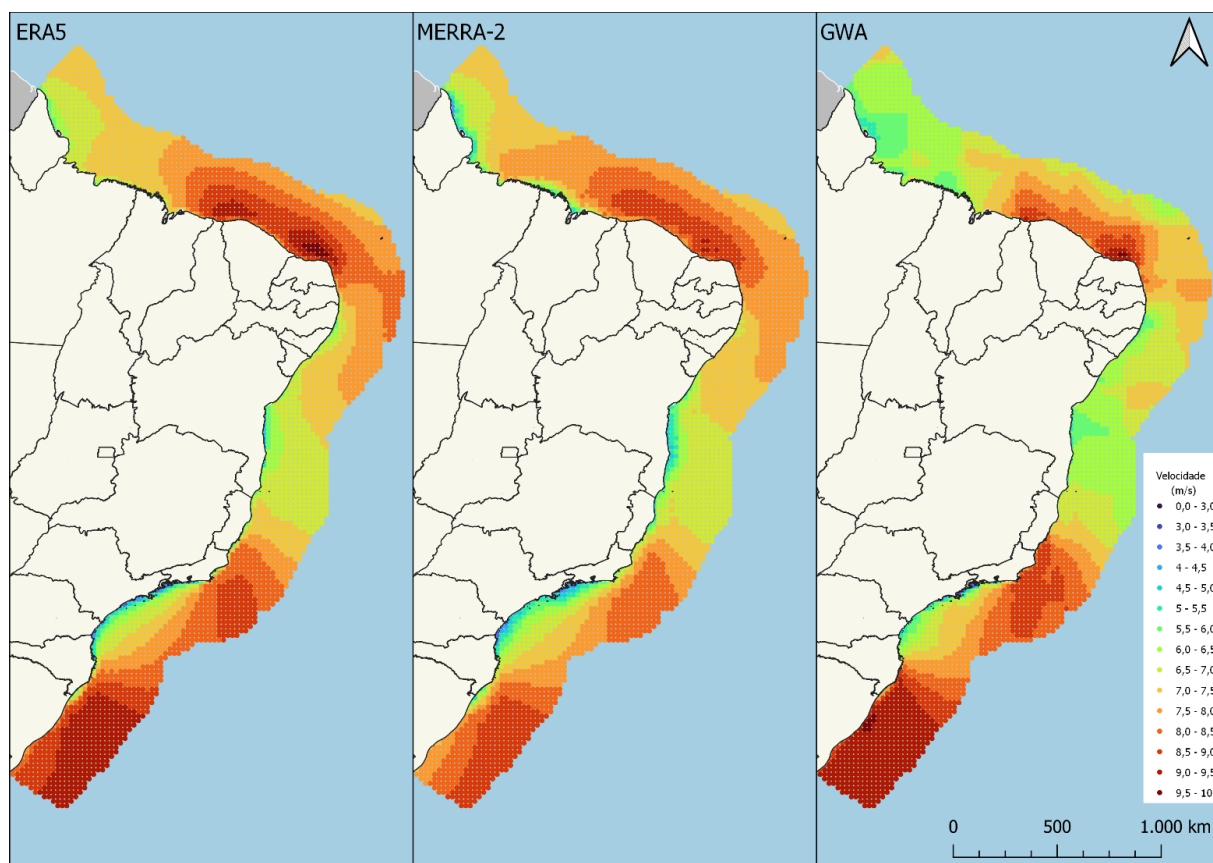


Figura 5- Velocidades médias do vento – Altura 150 m – ERA5, MERRA-2 e GWA

Para a região Nordeste, observa-se que há um consenso nos resultados de que a região do litoral norte dos estados do Piauí, Maranhão e Rio Grande do Norte apresentam as velocidades médias mais elevadas.

O litoral norte do estado do Rio Grande do Norte recebe destaque nas três bases, apresentando pontos de velocidade média acima de 8,5 m/s. Como particularidade do modelo GWA, esses pontos de alta velocidade estão concentrados mais próximos à costa. No ERA5, os pontos cobrem uma área maior do que nos outros modelos, enquanto no MERRA-2, estão dispostos de forma mais dispersa. Adicionalmente, o ponto de maior velocidade do MERRA-2 é inferior aos observados nas demais bases. No litoral norte do estado do Piauí também há a presença de pontos de alta velocidade, entre 9,0 m/s e 9,5 m/s, mais perceptível nos dados do ERA5.

No litoral leste do Rio Grande do Norte e nos estados da Paraíba, Pernambuco, Sergipe e Alagoas (porção leste do Nordeste), nota-se que tanto o ERA5 quanto o MERRA-2 apresentam velocidades médias superiores ao GWA. Além disso, as velocidades médias mais elevadas são observadas mais distantes do continente no GWA em comparação com as demais bases.

As velocidades médias começam a diminuir entre os estados de Pernambuco e Bahia. Essa tendência ocorre de maneira mais acentuada segundo os dados do GWA, com velocidades médias abaixo de 7,0m/s, enquanto para ERA5 e MERRA-2, as velocidades médias ficam entre 7,0 e 7,5 m/s próximo ao continente e até 8,0 m/s no limite da ZEE.

Na região Sudeste, segundo as três bases, as velocidades voltam a se intensificar a partir da costa do Espírito Santo e em direção ao Rio de Janeiro. Pelos resultados apresentados, o recurso tende a aumentar com o afastamento da costa.

Segundo o ERA5 e o GWA, as velocidades médias atingem a faixa de 8,5 a 9,0 m/s, enquanto o MERRA-2 indica que as maiores velocidades estão na faixa de 8,0 a 8,5 m/s e concentradas mais

distantes da costa. O GWA, indica que as maiores velocidades se estendem por uma área extensa, inclusive próxima ao continente, entre o sul do Espírito Santo e a porção central do Rio de Janeiro.

O litoral da região Sul recebe destaque nas três bases, atingindo velocidades médias altas – acima de 8,5 m/s – em grandes porções do litoral sul de Santa Catarina até o sul do Rio Grande do Sul. O GWA apresenta uma área ao norte do Rio Grande do Sul que atinge velocidades acima de 9,5 m/s.

Assim como no Sudeste, ERA5 e MERRA-2 apontam que as velocidades aumentam com a distância da costa. De qualquer forma, nas três bases, quase a totalidade do litoral do Rio Grande do Sul apresenta velocidades médias acima de 7,5 m/s.

As menores velocidades médias do Brasil se encontram no litoral dos estados do Amapá, Bahia, São Paulo e Paraná; principalmente próximo ao continente, segundo as 3 bases analisadas.

Os mapas de diferenças de velocidades médias entre os modelos, apresentados na Figura 6, foram calculados a partir da subtração direta dos valores obtidos anteriormente, conferindo robustez aos pontos destacados na análise individual.

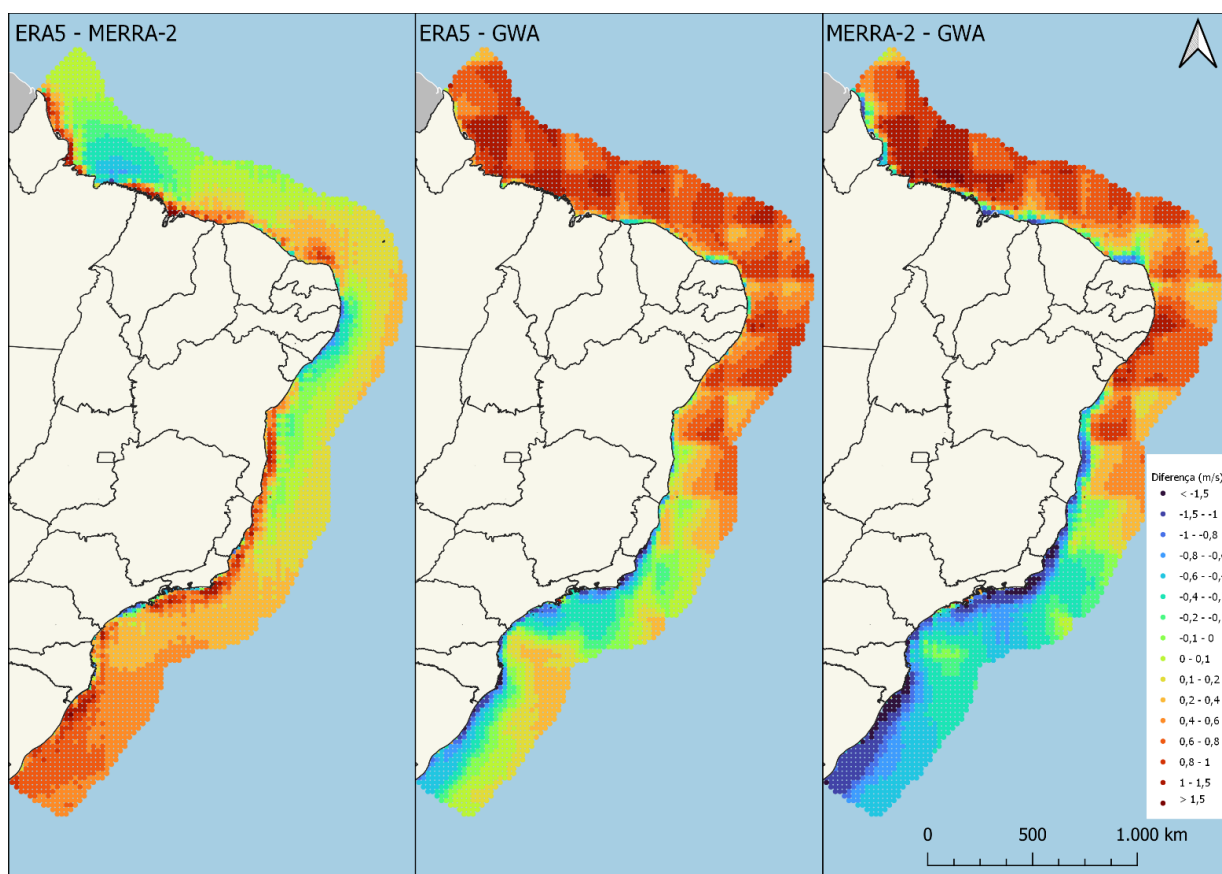


Figura 6 – Diferenças das velocidades médias do vento entre modelos – Altura 150 m

A escala das diferenças de velocidades médias entre (-1,5 m/s) e (+1,5 m/s) evidencia a alternância de magnitude entre os modelos nas diferentes regiões da costa brasileira.

Por meio dessa visualização é possível perceber as discrepâncias observadas entre os resultados do GWA em comparação ao ERA5 e MERRA-2 para todo o Brasil. No Nordeste, ERA5 e MERRA-2 são mais otimistas que GWA. Já no Sudeste e Sul, principalmente mais próximo à costa, a situação se inverte.

As diferenças entre ERA5 e MERRA-2 são menos expressivas, com uma tendência predominante do ERA5 apontar um recurso maior do que o MERRA-2, principalmente na região Sul.

O Quadro 1 consolida as observações nas regiões que apresentam as maiores faixas de velocidade.

Quadro 1 - Análise dos resultados dos modelos ERA5, MERRA-2 e GWA.

Região	ERA5	MERRA-2	GWA
Nordeste (MA-RN)	Velocidades entre 7,5 m/s e 10,0 m/s. As maiores velocidades ocorrem entre 40 km e 90 km da costa do RN.	Velocidades entre 7,0 m/s e 9,0 m/s; com ocorrências pontuais de velocidades no intervalo 9,0-9,5 m/s entre 40 km e 100 km da costa do RN.	Velocidades entre 7,0 m/s e 10,0 m/s. A área com velocidades superiores a 8,0 m/s possui extensão espacial reduzida em comparação às outras bases. As maiores velocidades são observadas a 40 km da costa do RN.
Sudeste (ES-RJ)	Velocidades entre 6,5 m/s e 9,0 m/s. A área com as maiores velocidades, entre 8,5-9,0 m/s, ocorre a partir de 60 km da costa do RJ, estendendo-se para leste até o limite da área analisada.	Mantém um padrão semelhante ao ERA5, porém com velocidades mais baixas, entre 6,0 m/s e 8,5 m/s.	Velocidades entre 6,5 m/s e 9,0 m/s. Observa-se uma ampliação da área com velocidades na faixa 8,5-9,0 m/s em relação ao ERA5. Essa área estende-se até a fronteira entre ES e RJ e aproxima-se da costa, iniciando a cerca de 20 km.
Sul (SC-RS)	Velocidades entre 7,5 m/s e 9,5 m/s no sul de SC e no sul do RS. Velocidades tendem a aumentar com o afastamento da costa, atingindo a faixa 9,0-9,5 m/s a partir de 90 km da costa do SC e 50 km da costa do RS.	Comportamento similar ao ERA5, entretanto as maiores velocidades estão na faixa 8,5-9,0 m/s e ocorrem a partir de 100 km da costa do SC e RS.	Velocidades na faixa 8,0 m/s e 10,0 m/s no sul de SC e no sul do RS. A faixa de velocidade 9,0-9,5 m/s ocupa uma área maior em relação ao ERA5 e MERRA-2, começando a partir de 10 km da costa do SC e 20 km da costa sul do RS. Apresenta área ao norte da costa do RS com velocidades acima de 9,5 m/s.

2.1.4.2. Escolha da Base para Utilização na Agregação de Dados

Além de velocidades médias apresentadas nos mapas acima expostos, é igualmente importante considerar os padrões de comportamento ao longo do tempo, na avaliação do recurso eólico para o aproveitamento de potencial energético.

Considerando a importância de uma avaliação acurada dos padrões de vento, a partir de séries temporais horárias, a utilização do GWA se mostrou inadequada. Apesar de ser a base com a maior resolução espacial, ela fornece apenas valores médios, limitando o nível de detalhamento da avaliação.

Sendo assim, a escolha da base mais adequada para uso na metodologia de agregação e avaliação de comportamento do vento *offshore* ficou restrita ao ERA5 e MERRA-2, que disponibilizam os dados como séries horárias de longo prazo. Cada uma destas bases representa um conjunto de modelos e premissas diverso, que pode se adequar melhor para condições específicas e contextos próprios; e demanda medições locais para avaliação das incertezas nas estimativas.

Diante disso, a decisão da base mais adequada ao objetivo do presente estudo se baseou no critério de resolução espacial mais refinada, sendo escolhida a base ERA5 para o estudo de clusterização apresentado a seguir.

3. Clusterização dos Dados

Para fins de análise dos dados de velocidade do vento na costa brasileira, foram utilizados os dados da base ERA5 juntamente com uma técnica de agregação de dados (clusterização), de forma a identificar áreas com variações sazonais e diárias, ou seja, com comportamentos parecidos. A agregação dos dados foi realizada a partir do método de Ward [14], que é um método de clusterização hierárquica.

Destaca-se que a metodologia de agregação aqui empregada já foi aplicada pela EPE para a análise do recurso eólico *onshore*, cujos resultados foram detalhados em Nota Técnica específica [2].

Objetivando a definição de uma quantidade razoável de clusters eólicos para performar uma análise detalhada e considerando o potencial explorável da fonte com a tecnologia existente, a área de estudo foi recortada pelo critério de profundidade máxima de instalação de parques eólicos offshore, sendo eliminadas as regiões com batimetria superiores a 1000 m de profundidade.

Neste estudo, foi utilizado o período de 2008 até 2017 com os valores de velocidade do vento extrapolados para altura de 150 m. Além disso, as séries temporais do ERA5 foram transformadas em anos típicos, os quais são obtidos pela média dos valores de cada hora ao longo do ano.

Após a definição de cada ano típico e com o objetivo de caracterizar regiões de acordo com o comportamento temporal dos dados, foi calculada a matriz de correlação entre os anos típicos de cada um dos vértices do ERA5, garantindo que as variações das velocidades fossem o parâmetro a ser considerado na análise.

O resultado da matriz de correlação possui índices entre (-1) e (1) para cada combinação de pontos do ERA5. Uma correlação de valor (1) indica uma correlação positiva perfeita, nesse caso, quando a velocidade em um ponto aumenta, a no outro ponto aumenta na mesma proporção. Já uma correlação de (-1) indica uma correlação negativa perfeita, indicando que quando a velocidade em um ponto aumenta, a velocidade no outro reduz na mesma proporção. Correlações nulas indicam dados que não apresentam qualquer tipo de variação conjunta [15].

A Figura 7 mostra um exemplo desse procedimento, onde cada quadrado apresenta, a partir da escala de cores, um valor de correlação obtido entre o ponto no eixo vertical e outro no eixo horizontal.

Verifica-se que entre os objetos A, B e C há uma alta correlação, enquanto os objetos D e E apresentam baixa correlação entre si.

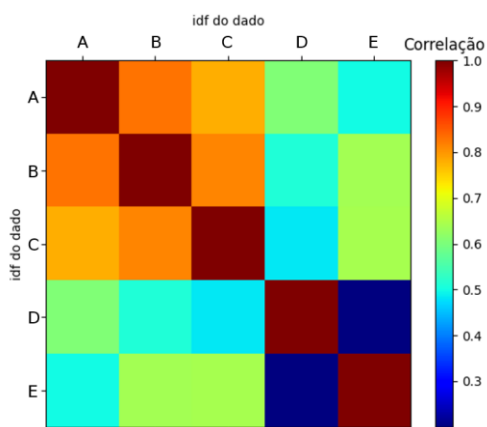


Figura 7- Matriz de Correlação

Os resultados da matriz de correlação são agregados pelo método de Ward. Nesse método, o objetivo é realizar a unificação de dois clusters a partir da minimização do incremento da variância das distâncias dos objetos com relação aos centroides [16].

Na Figura 8 é apresentado um exemplo desse método. No primeiro esquema (a), são calculadas as variâncias intragrupo (Equação 7) dos objetos pertencentes aos três clusters (α , β , γ) em relação ao centroide. Essa métrica é fundamental no método de Ward, pois o critério de agrupamento baseia-se na escolha da fusão de clusters que provoque o menor aumento possível da variância em cada cluster, garantindo grupos internamente mais homogêneos.

$$Var_C = \sum_{i \in C} (P_i - \bar{P}_C)^2 \quad (7)$$

Onde: Var_C é a variância intragrupo do Cluster C; P_i é a posição do objeto i pertencente ao cluster C; P_C a posição do centroide do cluster C.

Após o cálculo das variâncias intragrupo, o método identifica três opções de agregação a partir da união dois a dois destes conjuntos, que possuem novos centroides com os objetos de ambos os conjuntos originais. As variâncias dos novos centroides são calculadas e o que apresentar o menor incremento de variância é selecionado. No esquema (b) da Figura 8, o menor incremento é obtido na união dos clusters α e β , que tem a distância dos objetos até o cluster final apresentado com linhas pontilhadas. Ao fim desta iteração serão obtidos dois clusters, um formado pela união do α e β e outro composto pelo γ .

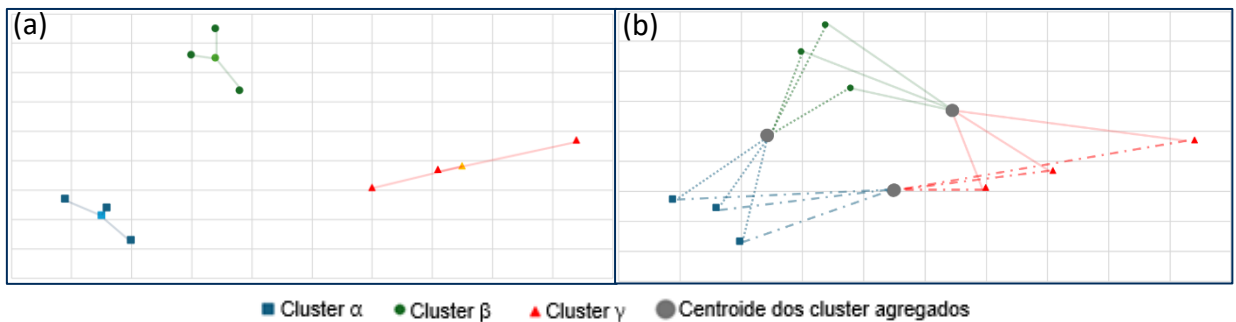


Figura 8 - Cálculo de distâncias pelo método de Ward

Essa operação é realizada sequencialmente, agregando os clusters a partir dos menores incrementos de variância intragrupo, até o momento que seja obtido como resultado apenas um cluster. O resultado deste procedimento também pode ser observado a partir de um Dendrograma, que apresenta no eixo x, os objetos a serem agregados e, no eixo y, a distância de Ward (incremento da variância intragrupo). Ao agregar dois objetos, uma linha horizontal, com o valor da distância do novo cluster, conecta duas linhas verticais, que indicam os dados agregados no processo. Aplicando o método de Ward aos dados apresentados na Figura 7, obtém-se o dendrograma apresentado na Figura 9.

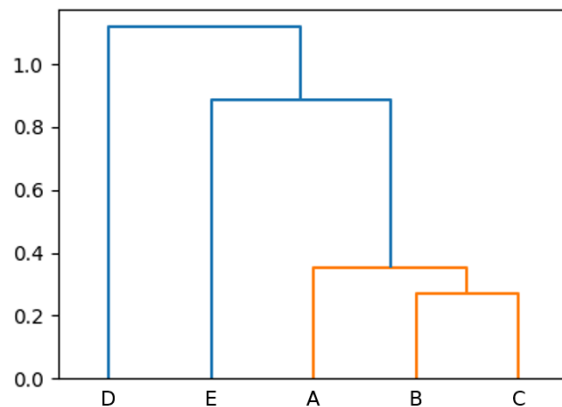


Figura 9 – Dendrograma das clusterizações dos dados apresentados na Figura 7

A partir da observação do Dendrograma, é possível identificar que: apesar da alta correlação entre os objetos A e B, as menores distâncias de Ward foram obtidas entre o objeto B e C, resultando na primeira agregação observada, seguido pela agregação dos objetos A, E e D ao agrupamento.

Ressalta-se que o método de clusterização apresentado não indica um número ideal de clusters, sendo uma escolha do usuário a definição do(s) ponto(s) ótimo(s) de distância a serem considerados. No caso dos dados de velocidade do ERA5, foram realizadas análises visuais individualizadas dos “ramos” do dendrograma para determinar o número ideal de clusters.

A próxima seção apresenta os resultados obtidos após o processo de clusterização dos dados.

4. Resultados da Clusterização

Concluído o processo de clusterização dos pontos, foram obtidos 20 agrupamentos (clusters) para o recurso eólico offshore no Brasil. As análises foram feitas a partir de séries horárias do ERA 5 entre 2008 e 2017 e com dados extrapolados para 150 m de altura. É importante ressaltar que as informações de cada cluster representam um comportamento típico do conjunto de pontos daquele cluster, mas não necessariamente representam as características específicas de cada ponto.

Cada um dos clusters é detalhado através de mapas e gráficos com as seguintes informações: identificação e localização do cluster, rosa dos ventos com distribuição da direção do vento, histograma com as frequências de ocorrência por faixa de velocidade e distribuição de Weibull, além dos gráficos com o dia médio e ano médio de cada cluster.

As rosas dos ventos dos clusters permitem analisar simultaneamente a distribuição das direções e da intensidade da velocidade do vento. Cada diagrama está dividido em 16 setores angulares (intervalos de 22,5°), que indicam a direção do vento, enquanto as cores representam as faixas de velocidade, variando de 0 a 14 m/s.

Os histogramas permitem a visualização da frequência de ocorrências (% da série temporal) das velocidades do vento dentro de intervalos de 0,5 m/s. A distribuição de Weibull é uma distribuição biparamétrica muito utilizada na análise de recurso eólico, dado que a frequência de ocorrência de faixas de velocidade do vento de uma localidade tende a seguir essa distribuição de probabilidades. Sendo assim, as duas análises são complementares.

Para analisar a distribuição de Weibull, dois parâmetros são levados em conta. O fator de escala (λ) está relacionado à média da velocidade do vento, sendo que quanto maior o fator de escala, maior é a velocidade média do vento. O fator de forma (k) está relacionado ao formato da curva de distribuição de probabilidades. Valores baixos (entre 1 e 2) de k estão associados a ventos com maior variabilidade, enquanto valores mais elevados (>3) indicam ventos bastante constantes e concentrados em torno da média [17].

A função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull é dada pela Equação 8, onde: V é a velocidade do vento (m/s); λ é o fator de escala (m/s); k é o fator de forma (adimensional).

$$f(V) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{V}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{\lambda}\right)^k\right] \quad (8)$$

A função de distribuição acumulada de Weibull é dada pela Equação 9, onde $F(V)$ representa a probabilidade de velocidade do vento ser menor ou igual a V .

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{\lambda}\right)^k\right] \quad (9)$$

A distribuição de probabilidade acumulada explicita quanto do total de ocorrências ficou abaixo ou acima de determinadas velocidades. É relevante, então, analisar a porcentagem de ocorrências abaixo ou acima de uma velocidade de referência, por exemplo: menor que 6,0 m/s e maior que 9,0 m/s, limites considerados para análises da qualidade do recurso eólico offshore nesta Nota.

Por fim, os perfis diário e anual da velocidade do vento apresentam a variação da velocidade média horária e mensal ao longo do tempo. A área sombreada em torno das curvas representa o desvio padrão dos perfis dos pontos pertencentes a cada cluster. Ou seja, quanto maior a área sombreada, maior é a variabilidade entre os comportamentos diário e anual dos pontos de um mesmo cluster.

Para as análises das subseções a seguir, os clusters foram agrupados em Regiões conforme proximidade geográfica.

4.1. Dados e Agrupamentos

A Figura 10 mostra os 20 agrupamentos (clusters) com comportamentos eólicos similares, na costa brasileira obtidos a partir do procedimento de clusterização.

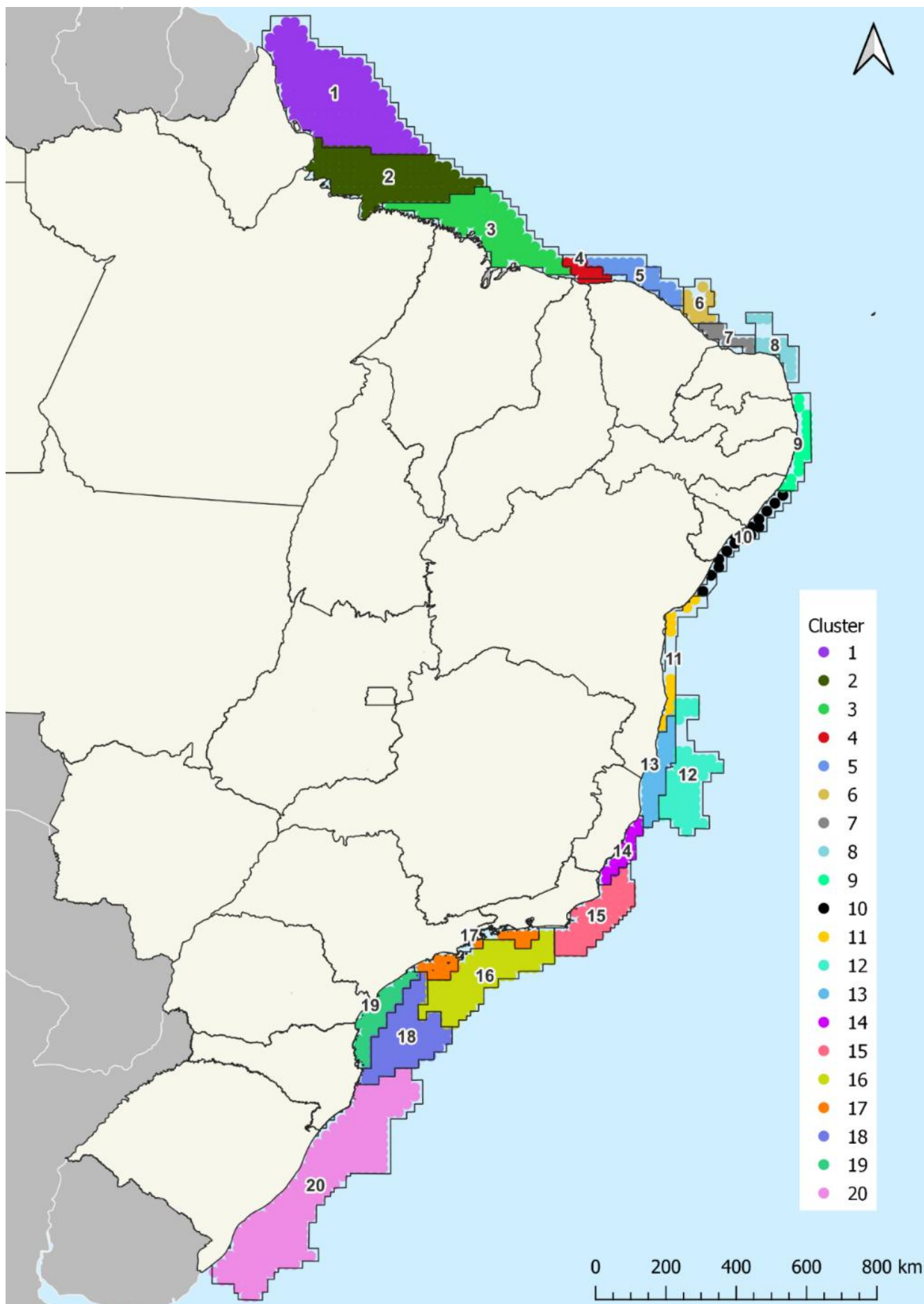


Figura 10 – Localização dos Clusters na Costa Brasileira

4.1.1. Clusters na Região A

A Figura 11 apresenta a localização dos clusters 1, 2 e 3, que representam a **Região A** e encontram-se localizados no litoral dos estados do Amapá, Pará e Maranhão, em regiões até 315 km da costa brasileira.

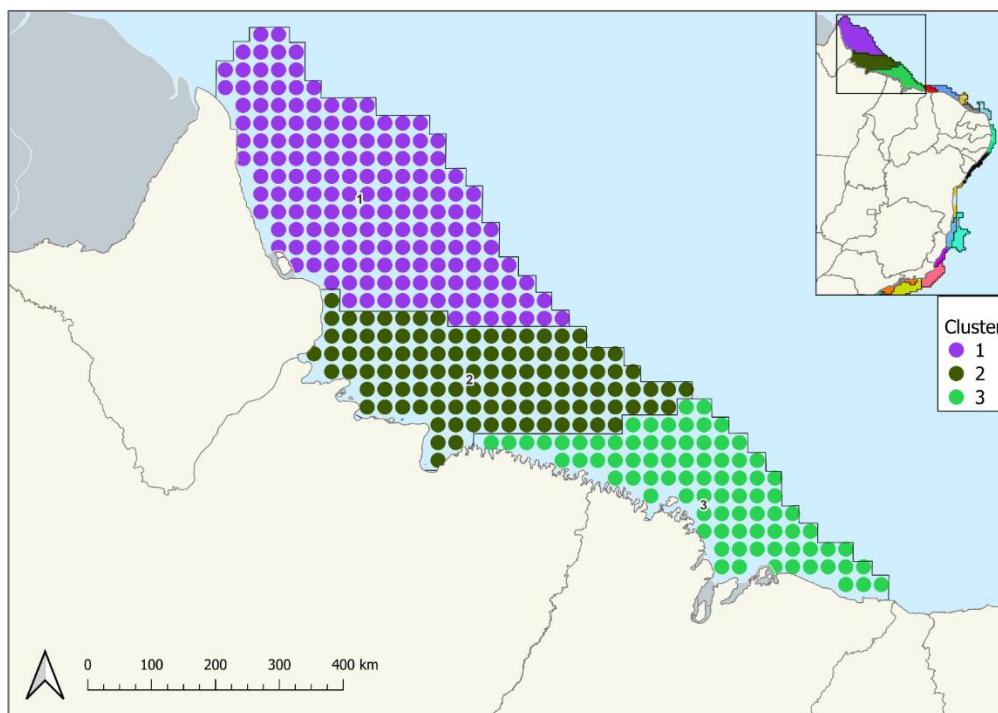


Figura 11 – Localização dos Clusters - Região A

A Figura 12 apresenta as rosas dos ventos dos clusters da **Região A**. De modo geral, em todos os clusters da **Região A**, observa-se predominância das **direções entre o setor leste (E) e nordeste (NE)**.

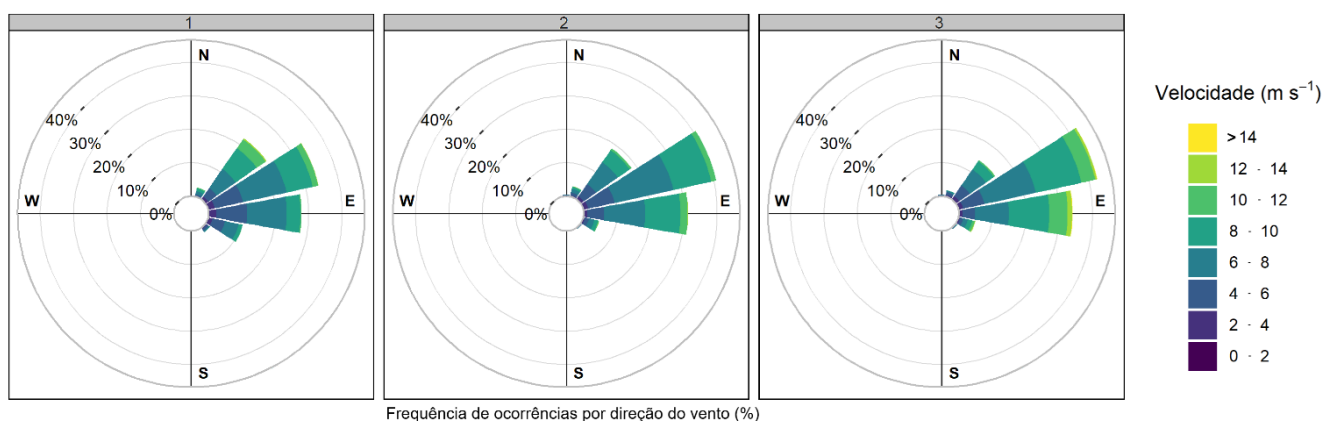


Figura 12 – Rosa dos ventos dos clusters – Região A

Figura 13 apresenta o histograma (gráfico de barras) de cada cluster com o respectivo ajuste da distribuição de frequências de Weibull (linha sólida azul) e a distribuição acumulada (linha sólida vermelha). A Figura 13 também apresenta os parâmetros de Weibull (k e λ) e a velocidade média ($\bar{v}$) dos pontos do cluster. De modo geral, verifica-se que as **velocidades na faixa de 6,0 a 8,0 m/s são as mais frequentes** nos três clusters da **Região A**.

Observa-se, a partir da distribuição acumulada, que o **Cluster 3 apresenta a menor frequência de ventos de baixa intensidade ($V \leq 6$ m/s)**, da região com 30% dos dados nesta faixa. Os Clusters 1 e 2 apresentam **proporções maiores de ventos de baixa intensidade**, com 40% e 35%, respectivamente. Além disso, o **Cluster 3 possui a maior ocorrência de ventos mais intensos ($V \geq 9$ m/s)**, cobrindo aproximadamente 20% dos dados, enquanto os Clusters 1 e 2 apresentam valores inferiores, próximos de 10%.

Os parâmetros de Weibull, como explicado no início da seção 4, fornecem informações relevantes à análise. No Cluster 3, devido ao maior fator de escala (λ), a **velocidade média ($\bar{v}$) da distribuição de frequências é a maior da Região A**, chegando a 7,62 m/s. Todos os clusters apresentam valores considerados altos para o fator de forma (k), com destaque para o Cluster 2, que apresenta os ventos mais uniformes da Região A.

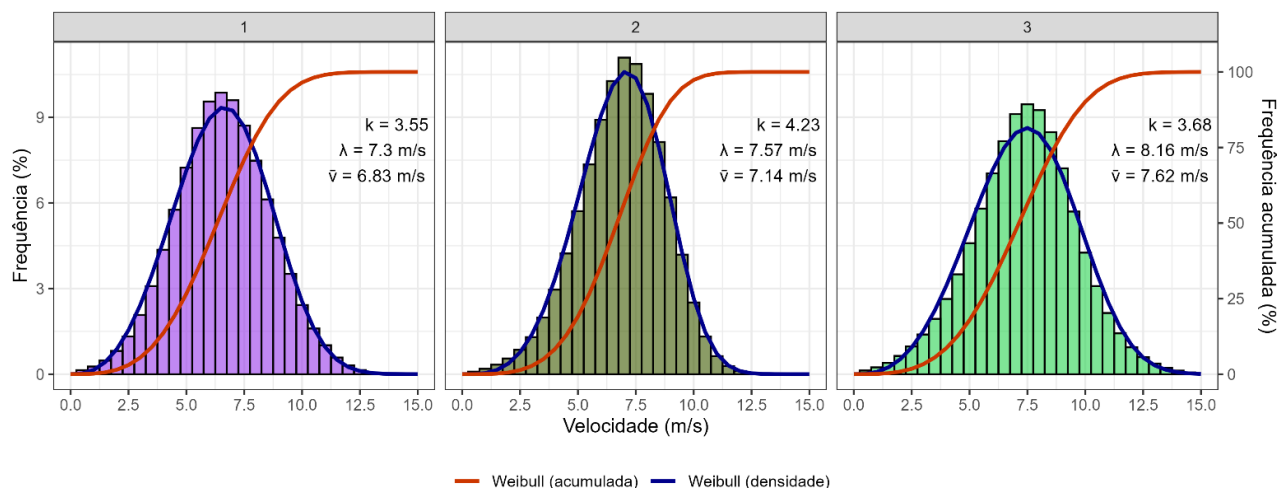


Figura 13 – Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters - Região A

A Figura 14 apresenta os dias e anos médios de cada cluster. A linha sólida representa a velocidade média dos pontos contidos no cluster, para cada recorte temporal, e a faixa sombreada representa o desvio-padrão.

Do ponto de vista do dia médio, os 3 clusters da **Região A** apresentam comportamento semelhante, com **velocidades mais altas ao entardecer, noite e durante a madrugada**, e **velocidades mais baixas em torno das 15 horas**.

Em relação ao perfil anual, os **Clusters 2 e 3** possuem um comportamento semelhante, atingindo as **maiores velocidades entre os meses de agosto e outubro**, com destaque para o mês de setembro, em que as velocidades atingem 8,0 m/s no Cluster 2 e 9,5 m/s no Cluster 3, sendo o valor máximo para a **Região A**. O **vale dos perfis ocorre entre março e junho**, de modo geral, variando entre a faixa de 6,0 a 7,0 m/s para ambos os clusters.

O Cluster 1, entretanto, possui uma sazonalidade diferenciada, tendo o **pico do perfil entre janeiro e março, com destaque para o mês fevereiro**, em que a velocidade atinge 8,5 m/s. Já os meses de **menores velocidades do vento são de maio a novembro**, quando a velocidade não ultrapassa 6,5 m/s.

O desvio-padrão, representado pelas áreas sombreadas, informa a variabilidade dos pontos de cada cluster em torno da velocidade média do cluster. De modo geral, o Cluster 3 apresenta as maiores variações da **Região A**, tanto para o perfil diário, quanto para o anual. Já o Cluster 2 é o mais bem comportado, indicando que os pontos agregados possuem um recurso bastante similar entre si.

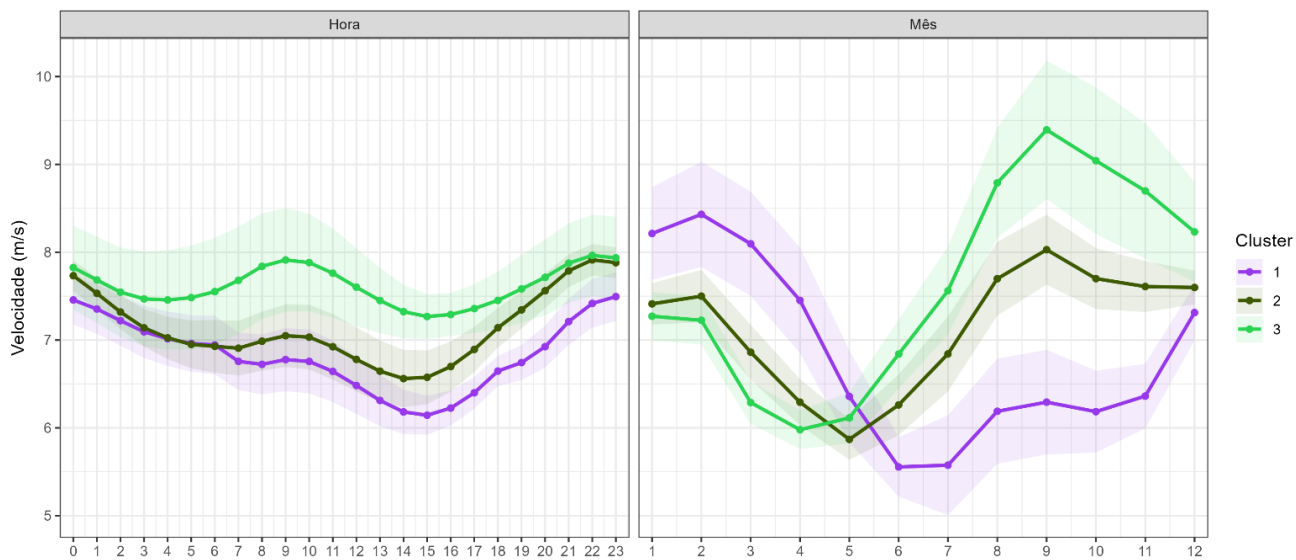


Figura 14 - Dia médio e ano médio da velocidade do vento nos clusters - Região A

4.1.2. Clusters na Região B

Os 5 clusters da **Região B** (clusters 4 a 8) encontram-se localizados na costa da região Nordeste voltada para Norte, entre os estados do Piauí e Rio Grande do Norte e até 120 km da costa brasileira Figura 15.

Ressalta-se que as áreas sem indicação de pontos referem-se aos locais onde a batimetria indica profundidade maior que 1000 m e foram descartadas do estudo, conforme indicado no item 3.

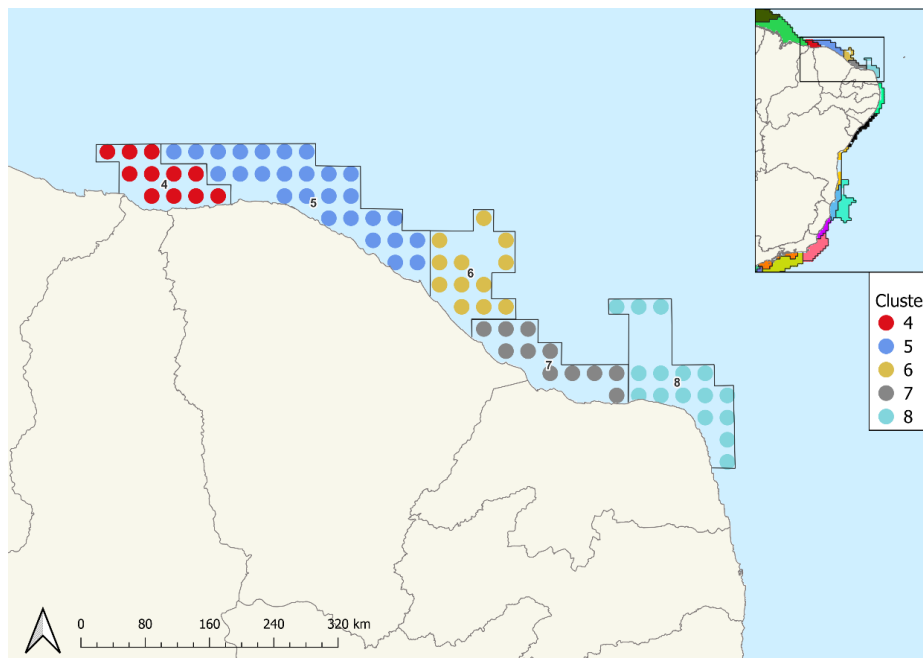


Figura 15 – Localização dos Clusters - Região B

Conforme a Figura 16 - Rosa dos ventos dos Clusters - Região B, o vento predominante nos clusters da **Região B** varia, majoritariamente, entre as **direções NE, E e SE**, virando a SE, à medida que os clusters se localizam mais a Leste no mapa, em direção à curva do continente. De qualquer forma, dentro de cada cluster da **Região B**, a **direção do recurso não varia significativamente**.

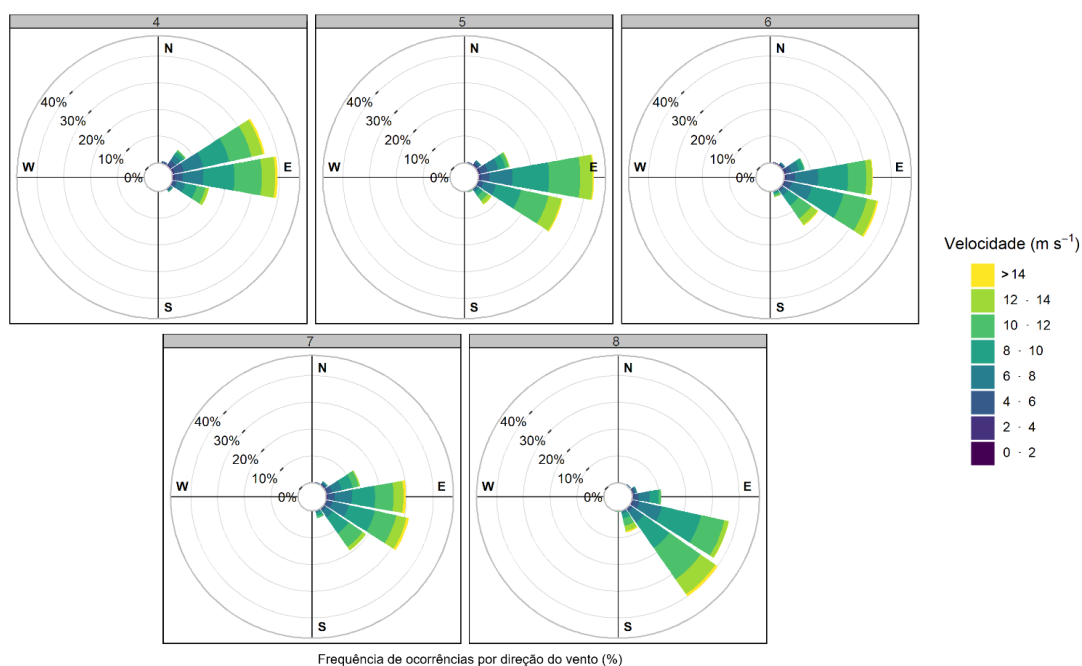


Figura 16 - Rosa dos ventos dos Clusters - Região B

Na Figura 17 observa-se que **os ventos de maior probabilidade de ocorrência na Região B estão na faixa entre 8,0 e 10,0 m/s** para todos os clusters. E a probabilidade de permanência nessa faixa de velocidades é ainda mais alta nos Clusters 7 e 8, que estão localizados mais ao leste, no litoral do Rio Grande do Norte.

Assim como a Região A, a **Região B se destaca pelos ventos muito constantes**, em especial nos Clusters 7 e 8, indicado pelos altos valores encontrados para o fator de forma (k) de Weibull.

Os cinco clusters da região têm probabilidade acumulada de **40% de frequência para ventos mais intensos ($V \geq 9$ m/s)**, com destaque para o Cluster 8 com 46%. Os Clusters 4 e 6 apresentam a maior probabilidade acumulada de ventos com intensidade menor ou igual a 6 m/s, com 20% de frequência.

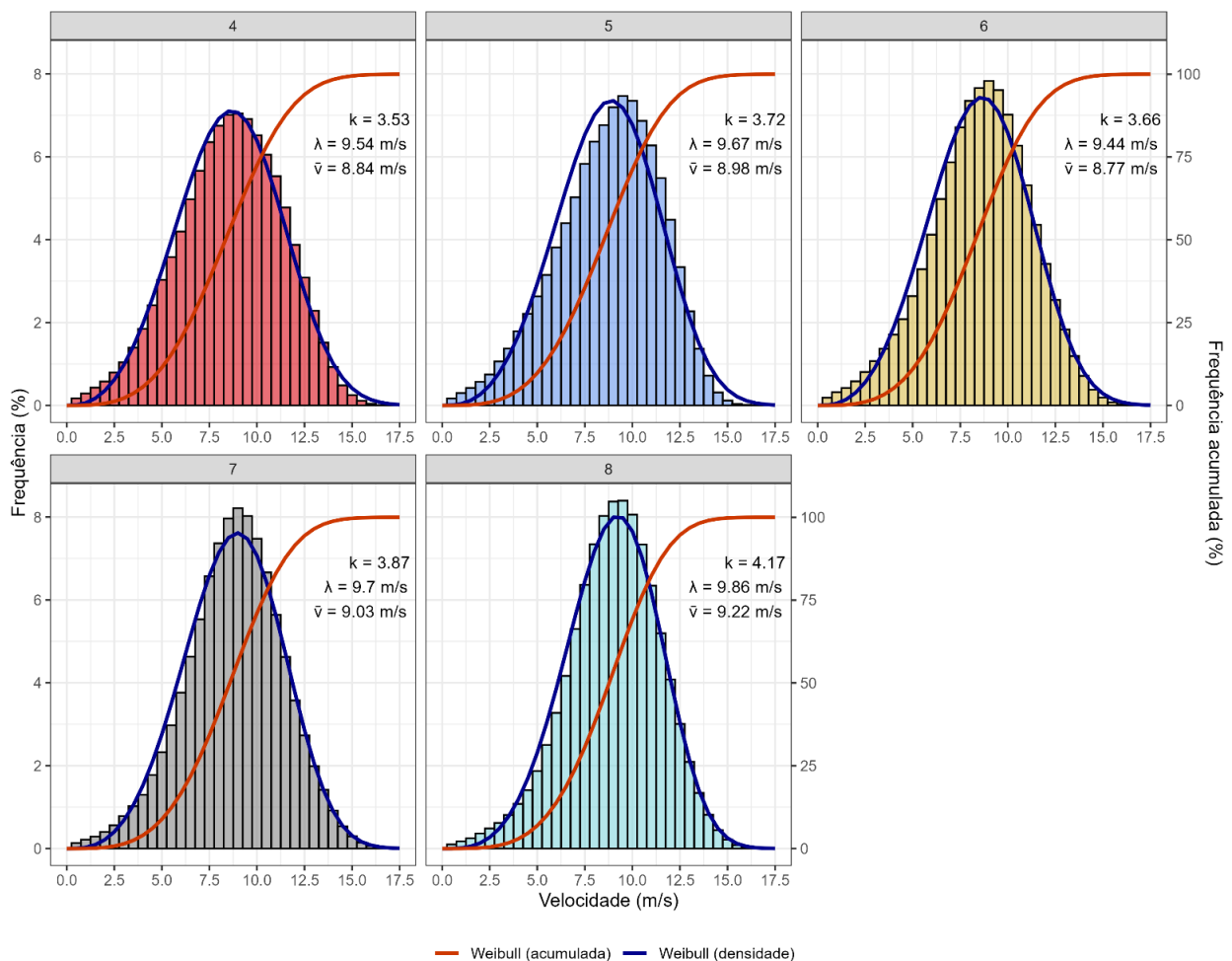


Figura 17 - Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters - Região B

Observa-se na Figura 18 que **todos os clusters da Região B apresentam as maiores velocidades no período da noite e madrugada**, com maior ou menor variação. A maior variação diária de magnitude da velocidade ocorre nos Clusters 4, 6 e 7, com destaque para a grande amplitude vista no Cluster 7, que atinge valores máximos da ordem de 10,5 m/s próximo das 21 horas e mínimos; da ordem de 7,5 m/s; próximo das 13 horas. Os ventos dos Clusters 5 e 8 têm comportamentos parecidos entre si, com pouca variação intradiária da velocidade.

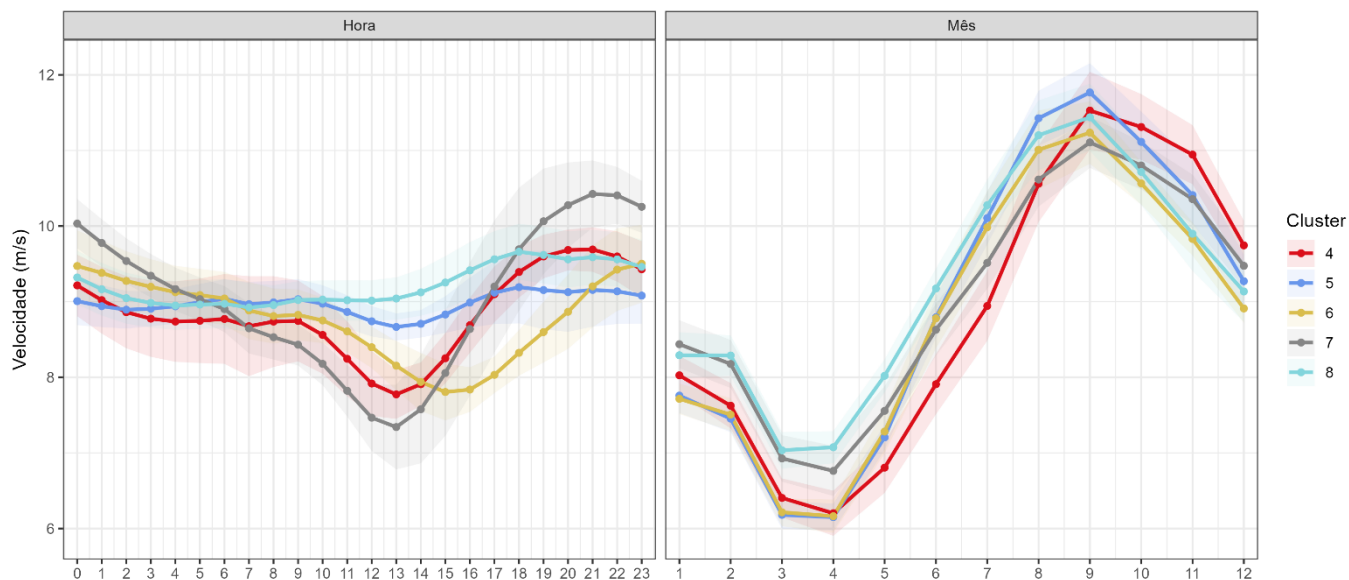


Figura 18 - Dia médio e ano médio da velocidade do vento nos clusters - Região B

Em relação à variação sazonal, todos os clusters da **Região B** possuem comportamento semelhante e muito bem definido, com as **menores velocidades ocorrendo no primeiro trimestre do ano**, especialmente em março e abril, e as **maiores velocidades entre agosto e outubro**, com pico no mês de setembro.

4.1.3. Clusters na Região C

Os clusters da **Região C** encontram-se localizados até 46 km de distância, e ao longo da costa dos estados da Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e parte da Bahia (Figura 19).



Figura 19 - Localização dos Clusters - Região C

Na **Região C**, não há um padrão bem definido de direção principal do vento entre os clusters (Figura 20). No **Cluster 9**, que é o mais próximo do Cluster 8 da Região B, há um comportamento similar, **com predominância de ventos SE**. Já para os **Clusters 10 e 11**, a **direção do vento é mais variável**, mudando de N a S, com permanência maior de ventos de SE e SEE, que diminui conforme a localização do cluster altera para o sul da **Região C**.

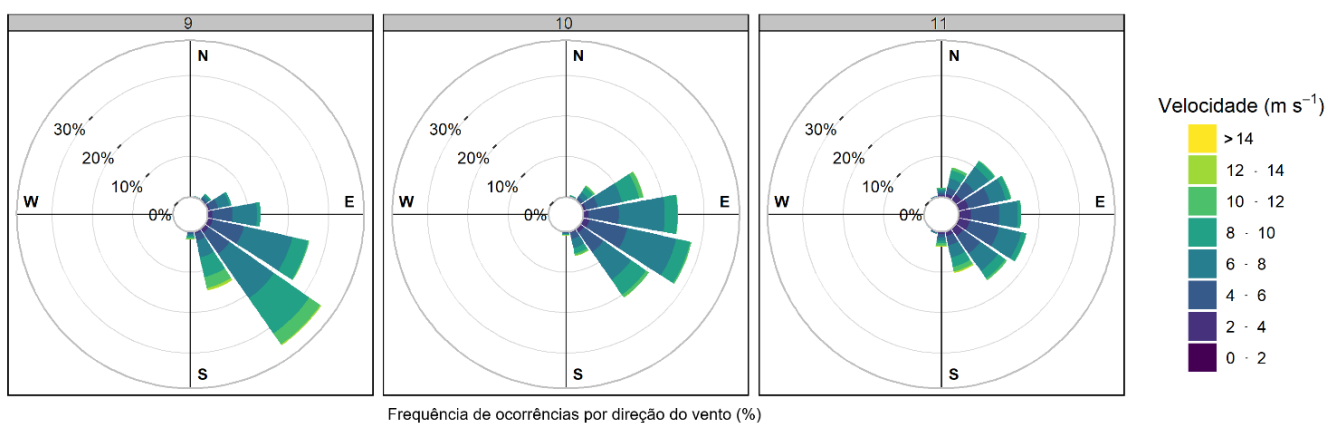


Figura 20 - Rosa dos ventos dos clusters - Região C

Observa-se nos histogramas da Figura 21 que na **Região C**, as **velocidades com maior frequência de ocorrência estão entre 5,0 m/s e 7,5 m/s**.

Na **Região C**, o Cluster 9 apresenta a **maior frequência acumulada de ventos com velocidades superiores a 9,0 m/s**, atingindo cerca de 12%. Já os Clusters 10 e 11 possuem aproximadamente 7% de probabilidade acumulada para ventos acima de 9,0 m/s.

Quanto às velocidades inferiores a 6,0 m/s, o Cluster 11 possui a maior probabilidade acumulada, com 60%, enquanto os Clusters 9 e 10 apresentam valores próximos de 40%.

Os Clusters 9 e 10 possuem os **ventos mais constantes** e com as **maiores velocidades médias** da **Região C**, o que é indicado pelos altos valores ($k > 3,5$) encontrados para o fator de forma de Weibull e do fator de escala (λ), respectivamente. Já no Cluster 11, há um espalhamento maior de frequências de ocorrência em torno da média, indicado pelo menor valor de k .

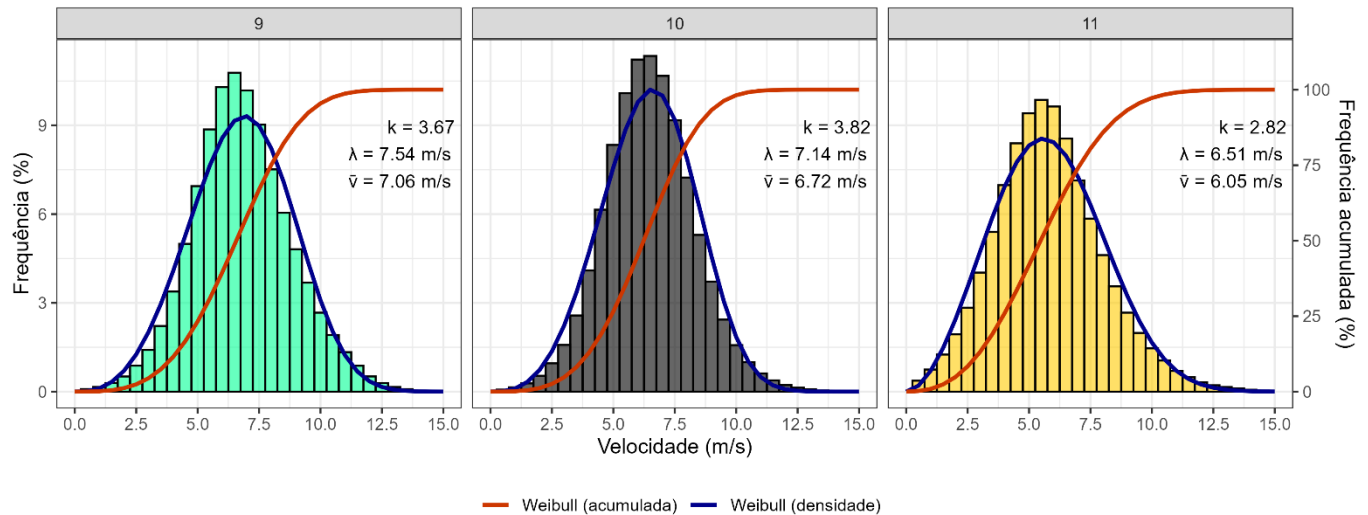


Figura 21 - Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters - Região C

Em relação à velocidade ao longo do dia, o Cluster 11, localizado na costa da Bahia, apresenta maior variabilidade e menores valores em relação aos demais, com **valor mínimo próximo de 5,5 m/s às 8 horas e máximo da ordem de 7,0 m/s no período noturno**. Os demais clusters apresentam menor variabilidade durante o dia e velocidades médias entre 6,5 m/s e 7,5 m/s (Figura 22).

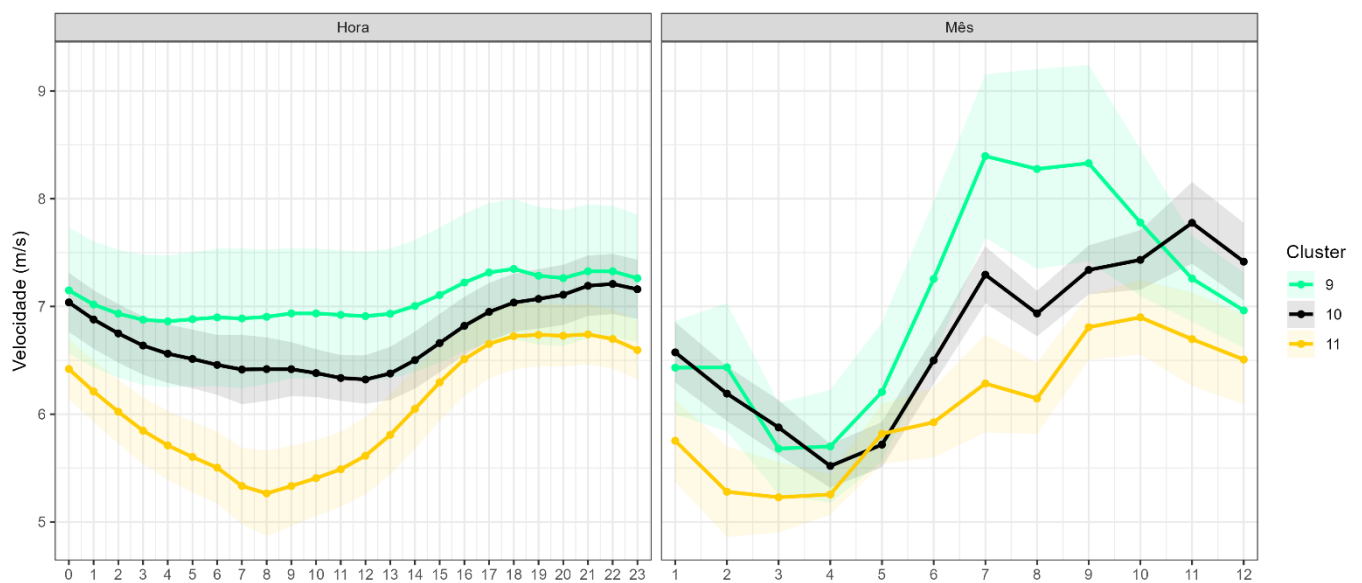


Figura 22 - Dia médio e ano médio da velocidade do vento nos clusters - Região C

No perfil anual, observa-se os **ápices de velocidade no segundo semestre para todos os clusters**. O Cluster 9 apresenta os maiores valores de velocidade entre os **meses de julho a setembro**, atingindo velocidades próximas de 8,5 m/s. Já nos Clusters 10 e 11, as velocidades permanecem altas durante todo o segundo semestre, porém com velocidades máximas menores que no Cluster 9.

4.1.4. Clusters na Região D

Os Clusters da **Região D** estão localizados entre o sul da Bahia e o norte do estado de São Paulo, e distantes até 215 km da costa (Figura 23). Os Clusters 13 e 17 representam pontos mais próximos ao continente em relação aos Clusters 12 e 16, respectivamente, indicando que a costa pode influenciar no comportamento dos ventos nessa região.

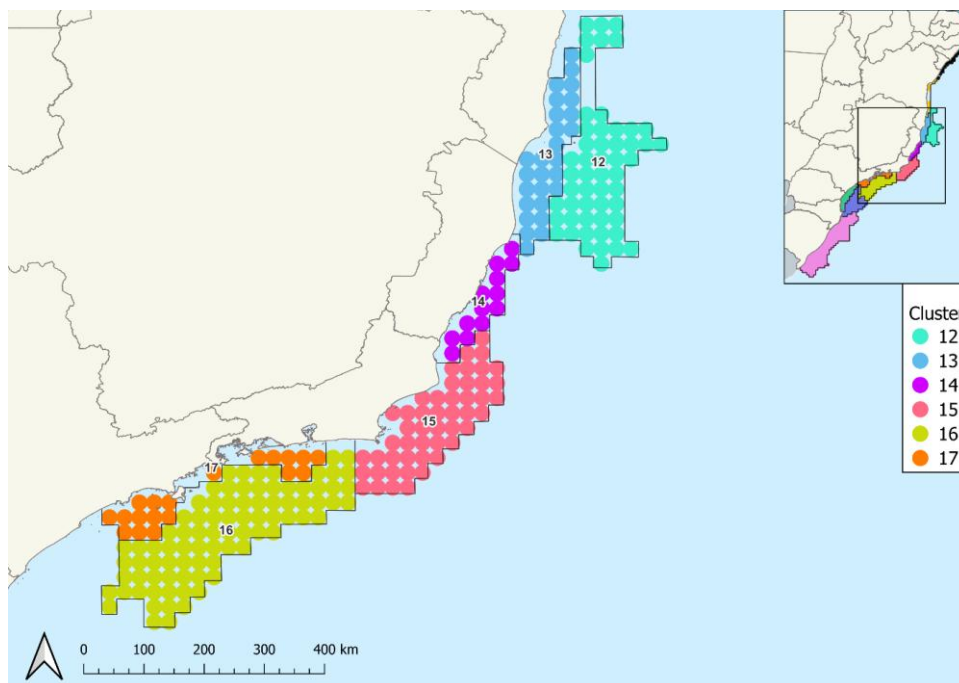


Figura 23 – Localização dos Clusters - Região D

Na **Região D** não há um padrão bem definido de direção principal do vento entre os clusters (Figura 24). Nos Clusters 12 e 13, que estão localizados entre Bahia e Espírito Santo, as direções **variam entre N e S, com maior permanência no setor NE.**

Nos Clusters 14 a 17, essa tendência se mantém, mas com uma **ocorrência maior de ventos entre NNE a NEE**, variando também para E (leste) e outras direções, conforme os clusters se aproximam do sul da **Região D**.

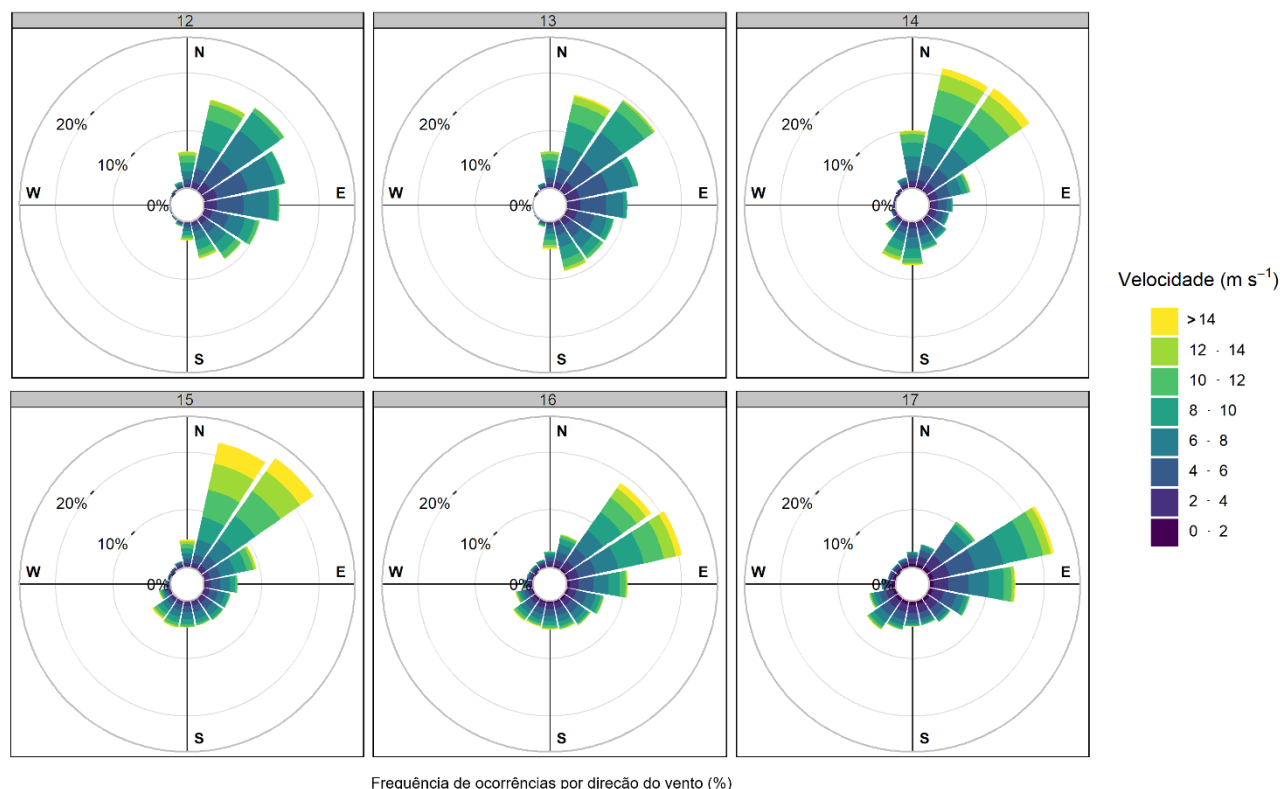


Figura 24 - Rosa dos ventos dos clusters - Região D

A Figura 25 indica que as **velocidades mais frequentes na Região D tendem a ficar entre 3,5 e 8,5 m/s**, a depender do cluster. Além disso, os clusters da **Região D possuem ventos mais variáveis do que os apresentados nas regiões anteriores**, fato indicado por fatores de forma de Weibull com valores menores ($k < 3$). Essa tendência se evidencia conforme os clusters se direcionam para o sul da **Região D**.

Pode-se observar que **os ventos são mais constantes nos Clusters 12 e 13**, enquanto os outros clusters da região apresentam uma curva de distribuição mais achatada, com uma faixa de velocidades médias mais ampla.

O **Cluster 17, que tem pontos bem próximos à costa, apresenta as velocidades mais baixas** da Região D, com uma curva de distribuição de frequências concentrada à esquerda do gráfico e velocidade média de 5,69 m/s.

O **Cluster 15 possui a velocidade média mais alta na Região D** ($\bar{v} = 8,33$ m/s) e a **maior probabilidade acumulada para a ocorrência de velocidades acima de 9,0 m/s**, correspondendo a 36%. Já os Clusters 14 e 16 apresentam, respectivamente, 26% e 23% de probabilidade acumulada de velocidades acima de 9 m/s. Nos demais Clusters da Região D, a probabilidade de ventos acima de 9 m/s é inferior a 20%.

O **Cluster 15 também apresenta a menor probabilidade acumulada de velocidades abaixo de 6 m/s** da Região D, com 34%. Nos demais Clusters, essa probabilidade é de aproximadamente 45%, com exceção do Cluster 17, que apresenta probabilidade acumulada de 64%.

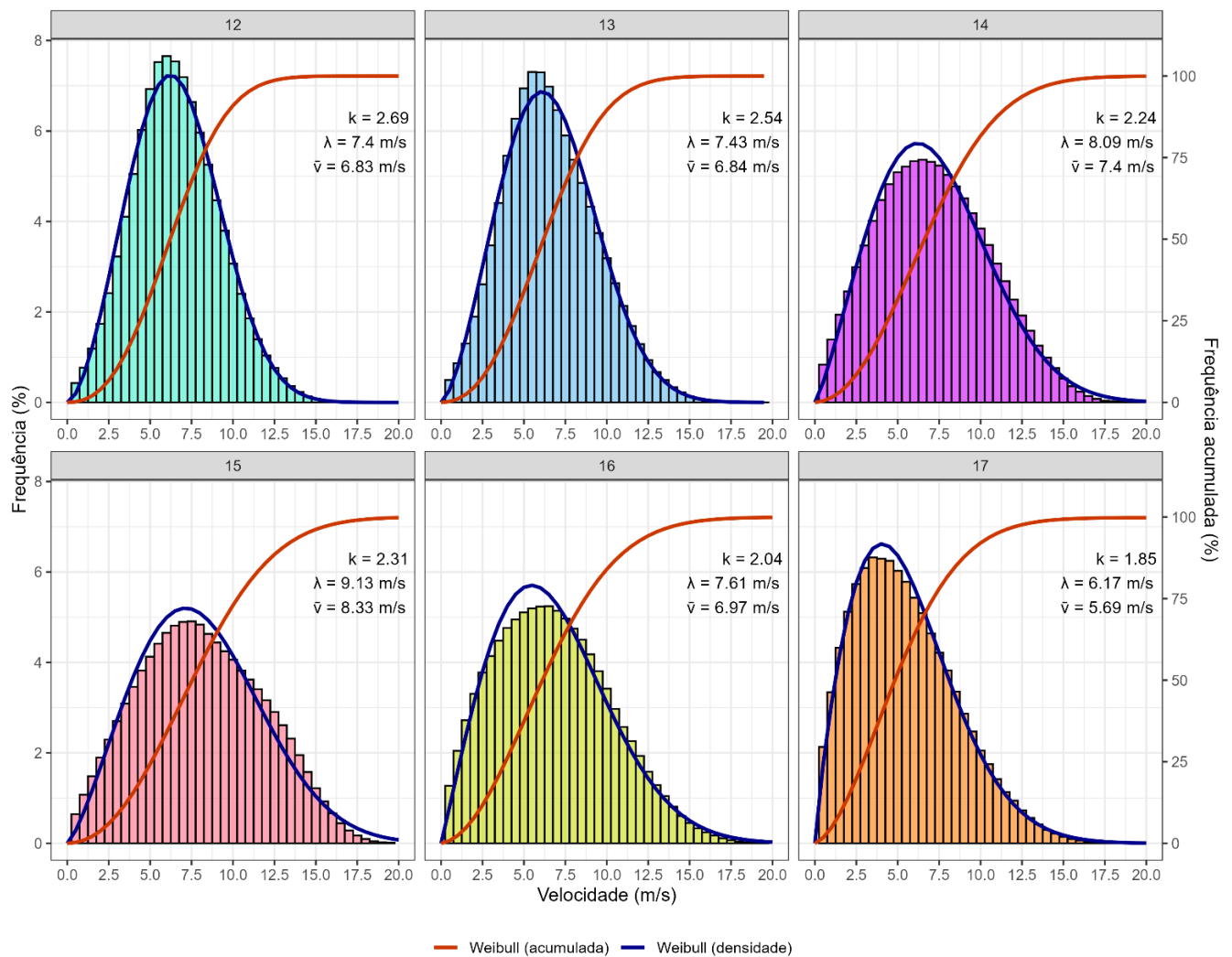


Figura 25 - Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters – Região D

Na Figura 26, é possível observar pelo perfil diário que **todos os clusters da Região D apresentam as maiores velocidades no período da noite e madrugada**, com maior ou menor variação. Os Clusters 15 e 14, localizados entre Espírito Santo e Rio de Janeiro, são os que atingem as maiores velocidades ao longo de um dia médio, tendo o Cluster 15 um comportamento intradiário mais estável e o Cluster 14, uma maior amplitude.

Os Clusters 12, 15 e 16 possuem comportamento bastante parecido, porém no Cluster 15 o patamar de velocidades é o mais alto da **Região D**, estando na faixa entre 8,0 e 9,0 m/s. Os Clusters 13, 14 e 17, que são os mais próximos à costa, também possuem comportamento intradiário semelhante, com amplitude grande, velocidades mínimas na parte da manhã, aumentando na parte da tarde. Nos Clusters 14 e 17, verifica-se **picos de velocidades máximas entre 15 horas e 19 horas** e grandes valores de desvio-padrão. Entretanto, no Cluster 17 as velocidades tendem a ficar abaixo de 7,0 m/s, enquanto variam de 7,0 a 8,5 m/s no Cluster 14.

O perfil anual da Figura 26 mostra **maiores velocidades a partir do segundo semestre, para todos os clusters**, com destaque para o período entre **agosto e outubro**, variando somente a magnitude das velocidades.

Para os **Clusters 14 e 15**, as altas velocidades perduram até **janeiro e fevereiro**, com uma sazonalidade bem-marcada e amplitude intra-anual relevante. Para todos os clusters, **os meses de menores velocidades são entre março e maio**.

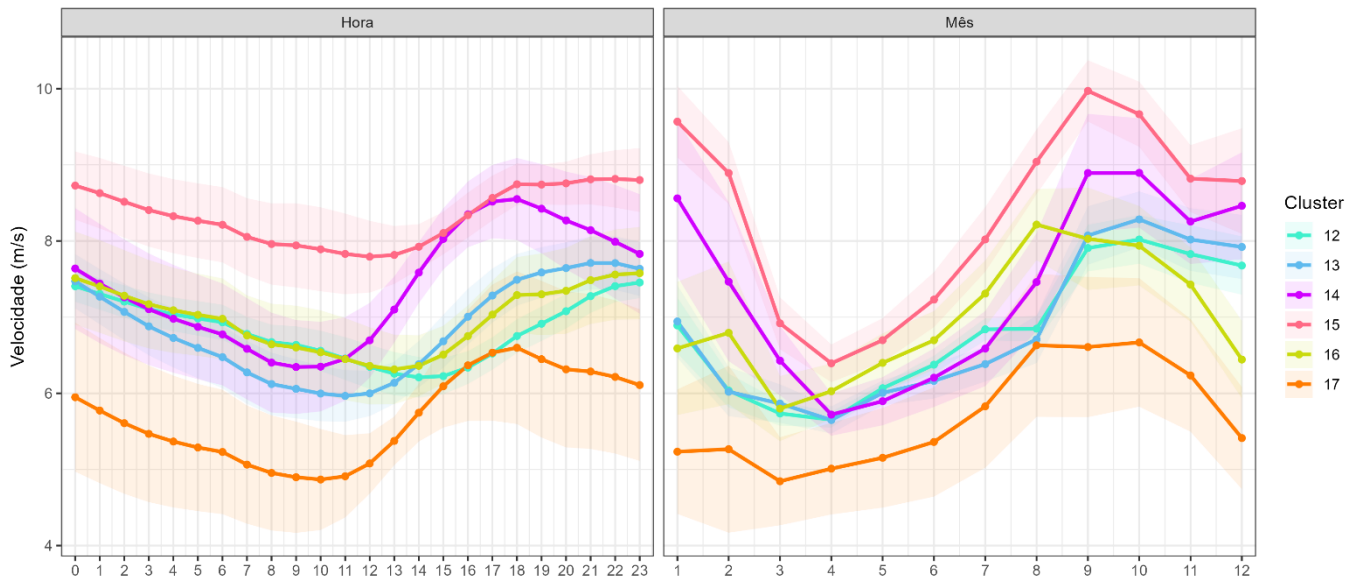


Figura 26 - Dia médio e ano médio da velocidade do vento nos clusters - Região D

4.1.5. Clusters na Região E

Os Clusters da **Região E** estão localizados em regiões até 270 km da costa, entre o sul do estado de São Paulo e o sul do Rio Grande do Sul, sendo que o Cluster 20 se estende na maior parte da região (Figura 27).

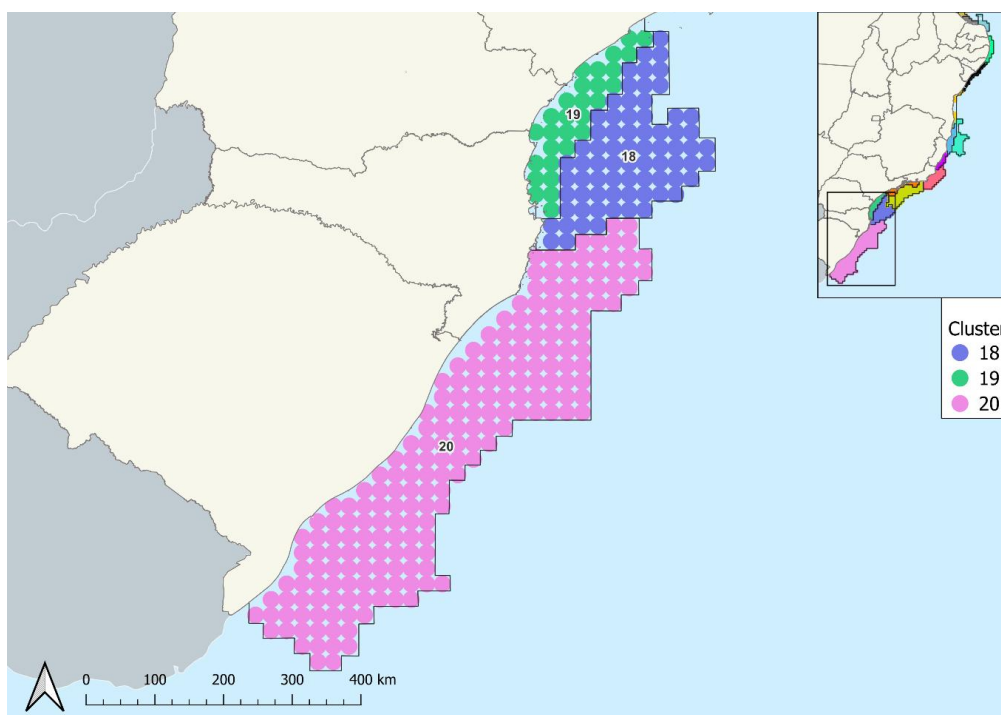


Figura 27 – Localização dos Clusters - Região E

A Região E apresenta **direções de vento bem variáveis e com ocorrências significativas em vários setores**, especialmente entre as direções NE e S (Figura 28). Os ventos de maior velocidade média ocorrem no setor S nos Clusters 18 e 19, apesar de não serem os mais frequentes. Já no Cluster 20, há maior frequência de ocorrência das maiores velocidades tanto com direção de SSO quanto NNE e NE. Em resumo, a **Região E apresenta a maior variabilidade de direção de ventos do Brasil**.

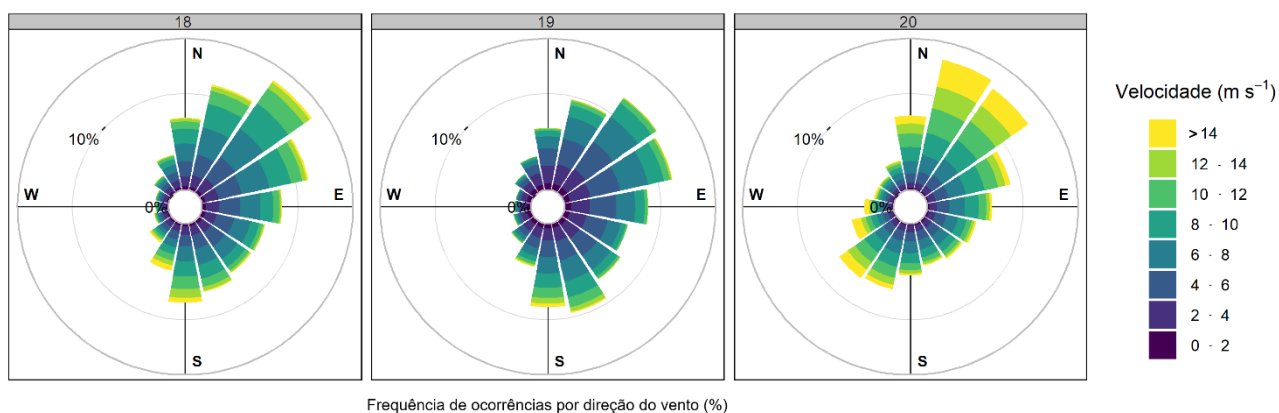


Figura 28 - Rosa dos ventos dos clusters - Região E

Assim como na Região D, os clusters da Região E apresentam **curvas de distribuição de frequências mais concentradas em velocidades baixas** e fatores de forma de Weibull (k) com valor próximo a 2 (Figura 29).

Os **Clusters 18 e 19 possuem velocidades mais frequentes da ordem de 4,0 a 7,5 m/s**, e valores mais concentrados ao redor da média. Já no **Cluster 20, os ventos mais frequentes variam entre 6,5 e 8,5 m/s**.

A probabilidade de ocorrência de velocidades mais altas é maior no Cluster 20 que nos outros clusters da Região E, com **probabilidade acumulada de 40% para velocidades acima de 9,0 m/s**. Para os Clusters 18 e 19 esse valor é de apenas 22% e 11%, respectivamente. O **Cluster 19 possui a maior probabilidade acumulada de ocorrência de velocidades abaixo de 6,0 m/s**, representando até 65% das ocorrências.

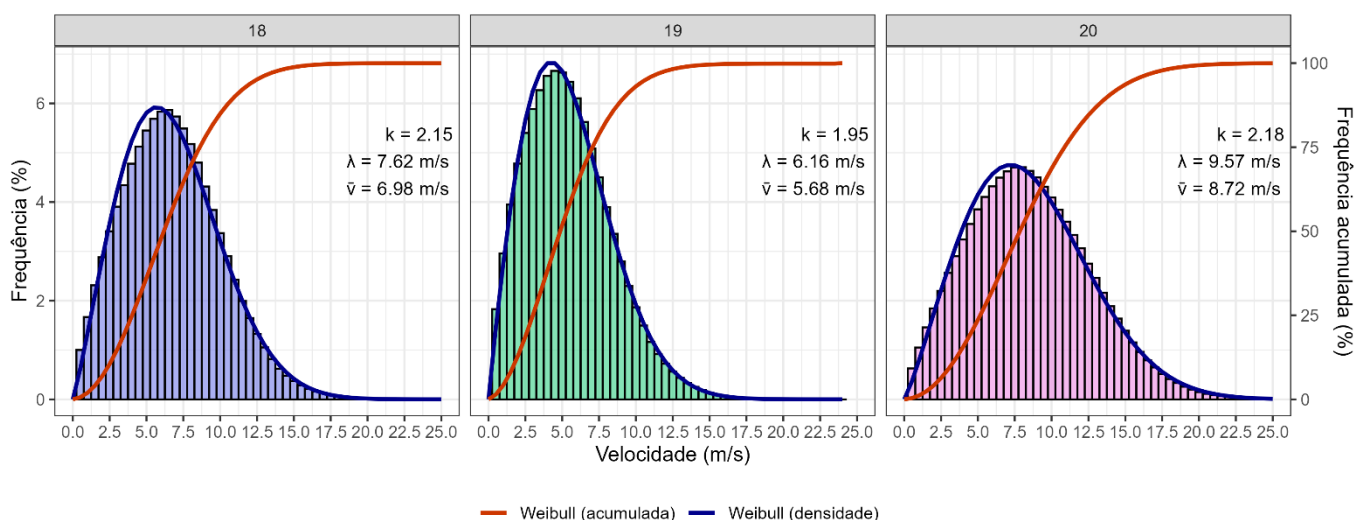


Figura 29 - Histograma e curva de distribuição de Weibull dos clusters - Região E

A Figura 30 confirma que o Cluster 20 possui as maiores velocidades da **Região E, inclusive sob a perspectiva do dia médio e do ano médio**, seguido pelos Cluster 18 e 19.

As velocidades dos Clusters 20 e 18 variam muito pouco ao longo do dia (cerca de 1 m/s), aumentando ligeiramente ao longo da noite e da madrugada. O Cluster 19 segue essa tendência, mas com amplitudes um pouco maiores.

Na análise do comportamento anual, percebe-se que há sazonalidade bem definida para os Clusters 20 e 18, com maiores **velocidades ocorrendo entre julho e novembro, com destaque para o mês de agosto**, e as menores velocidades entre **fevereiro e abril**. No Cluster 19, a tendência é a mesma, mas com variabilidade intra-anual menor.

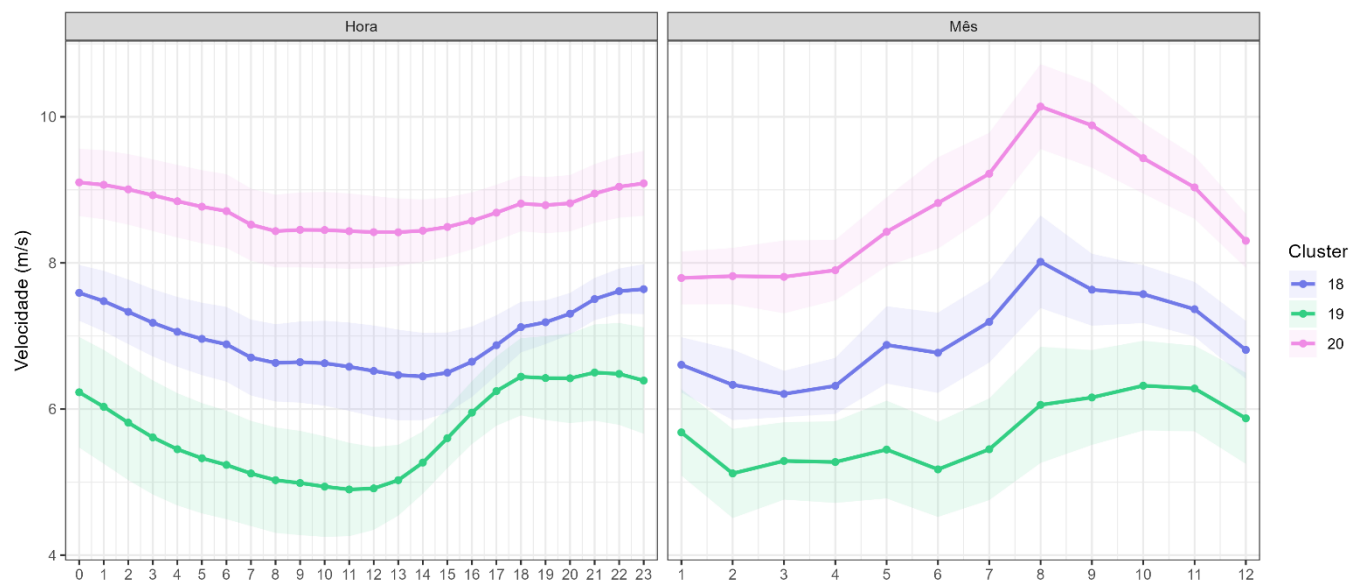


Figura 30 - Dia médio e ano médio da velocidade média do vento nos clusters - Região E

4.2. Resumo comparativo dos clusters

Esta subseção traz os resultados principais das análises dos clusters, visando avaliar, de forma conjunta e consolidada, de que maneira o comportamento do recurso eólico offshore varia entre as diferentes regiões do Brasil.

A Tabela 2 – apresenta as principais características do recurso eólico offshore de cada cluster por região, resumindo as análises realizadas nas subseções anteriores e incluindo informações novas, como a quantidade de pontos que formam o cluster e a variação entre o valor mínimo e o máximo das velocidades médias dos pontos de um mesmo cluster. Além disso, ressalta a probabilidade acumulada de haver velocidades menores que 6,0 m/s e maiores que 9,0 m/s em um cluster.

Em negrito na Tabela 2 – , são destacados **os clusters com maiores velocidades médias ($\bar{v} \geq 8,0$ m/s)**, sendo: os clusters da **Região B** (localizada entre o PI e o RN), o **Cluster 15** (localizado no RJ) e o **Cluster 20** (localizado entre SC e RS). Esses clusters serão avaliados com maior detalhe ao final desta subseção.

Em termos da frequência de ocorrência de diferentes faixas de velocidade, os ventos tendem a ser **mais constantes no Norte e Nordeste do país**, fato indicado por maiores fatores de forma (k) da distribuição de Weibull. **As direções dos ventos também são mais constantes nessas regiões.** Já no **Sudeste e Sul do Brasil**, o vento tende a ser **mais variável, tanto em velocidade quanto em direção.**

Tabela 2 – Resultados consolidados por cluster

Região	Cluster	Nº de pontos	$\bar{v}_{\text{mínimo}}^1$ (m/s)	$\bar{v}_{\text{máximo}}^1$ (m/s)	$\bar{v}_{\text{cluster}}$ (m/s)	Fator de escala (m/s)	Fator de forma	Probab. $v \leq 6$ (%)	Probab. $v \geq 9$ (%)	Direções predominantes (freq. $\geq 20\%$)
A	1	168	5,67	7,21	6,83	7,30	3,55	43,8	9,8	NE, ENE, E
	2	110	6,31	7,52	7,14	7,57	4,23	35,8	9,6	ENE, E
	3	84	6,66	8,84	7,62	8,16	3,68	31,2	20,5	ENE, E
B	4	11	8,24	9,18	8,84	9,54	3,53	20,2	40,7	ENE, E
	5	27	8,32	9,28	8,98	9,67	3,72	17,9	42,8	E, ESE
	6	12	8,28	9,08	8,77	9,44	3,66	19,8	39,5	E, ESE
	7	11	8,51	9,49	9,03	9,70	3,87	16,7	43,5	E, ESE
	8	16	8,64	9,63	9,22	9,86	4,17	13,9	46,5	ESE, SE
C	9	14	6,14	8,10	7,06	7,54	3,67	39,5	12,0	ESE, SE
	10	15	6,40	7,15	6,72	7,14	3,82	45,2	6,7	E, ESE, SE
	11	12	5,48	6,53	6,05	6,51	2,82	58,9	16,2	-
D	12	53	6,35	7,16	6,83	7,40	2,69	47,0	17,5	-
	13	27	6,21	7,29	6,84	7,43	2,54	47,5	26,0	-
	14	13	6,38	8,15	7,4	8,09	2,24	43,0	26,0	NNE, NE
	15	49	6,50	8,59	8,33	9,13	2,31	34,1	35,7	NNE, NE
	16	84	5,27	8,10	6,97	7,61	2,04	48,7	22,6	NE
	17	19	4,31	6,85	5,69	6,17	1,85	63,9	12,3	ENE
E	18	73	5,63	7,83	6,98	7,62	2,15	47,9	21,9	-
	19	29	4,04	6,70	5,68	6,16	1,95	64,1	11,2	-
	20	211	6,55	9,35	8,72	9,57	2,18	32,6	39,6	-

¹ $\bar{v}_{\text{mínimo}}$ e $\bar{v}_{\text{máximo}}$ representam a menor e a maior velocidade média dentre os pontos de cada cluster.

A Tabela 3 resume as análises de perfil de comportamento diário e anual por região. Em relação aos perfis anuais de velocidade do vento, em geral, **os ventos são mais fortes na costa do Brasil no segundo semestre do ano**, tendência que pode se estender ao **início do ano também em algumas regiões**.

Para o comportamento diário, não há uma unanimidade de perfil em todas as regiões, mas pode-se indicar **uma tendência de ventos mais fortes a partir do início da noite e até o início da manhã** para diversos clusters analisados.

Tabela 3 – Comportamento médio diário e anual por região

Região	Perfil do dia médio	Perfil do ano médio
A	Velocidades mais altas pela manhã e início da noite.	Maiores velocidades entre janeiro e março no Cluster 1 e entre agosto e outubro nos Clusters 2 e 3.
B	Velocidades mais altas a noite e de madrugada nos Clusters 4, 6 e 7; e pouca amplitude intradiária nos Clusters 5 e 8.	Sazonalidade bem definida, com maiores velocidades entre agosto e outubro em todos os Clusters.
C	Velocidades mais altas no período da noite com pouca variabilidade.	Maiores velocidades no segundo semestre, picos variam de julho (Cluster 9) a novembro (Cluster 10).
D	Velocidades mais altas no início da noite e ao longo da madrugada, com pico entre 15hs e 19hs no Cluster 14.	Maiores velocidades entre agosto e outubro em todos os clusters; e que perduram até janeiro e fevereiro nos Clusters 14 e 15.
E	Pouca variação de velocidades médias nos Clusters 18 e 20, e sempre acima de 6,0 m/s.	Maiores velocidades entre julho e novembro, principalmente em agosto nos Clusters 18 e 20, e sempre acima de 6,0 m/s.

A Figura 31 mostra os fatores de escala e forma da distribuição de Weibull mapeados para todos clusters do Brasil. O **fator de escala de Weibull**, que está relacionado à velocidade média dos pontos, **varia de 4,3 a 10,3 no Brasil**, e é maior nos Clusters 4 a 8 (Região B), no Cluster 15 (Região D) e no Cluster 20 (Região E), já destacados anteriormente.

Em relação ao **fator de forma de Weibull**, os valores encontrados **variam entre 1,7 e 5,0 na área analisada da costa do Brasil**. Os valores mais altos ($k \geq 3,5$) são observados nas Regiões Norte e Nordeste do país, indicando **ventos mais constantes e distribuídos próximos da média**. Já nas regiões Sul e Sudeste, são observados menores fatores de forma, variando entre 1,7 e 2,6, indicando **ventos com maior variabilidade, em termos de velocidade**.

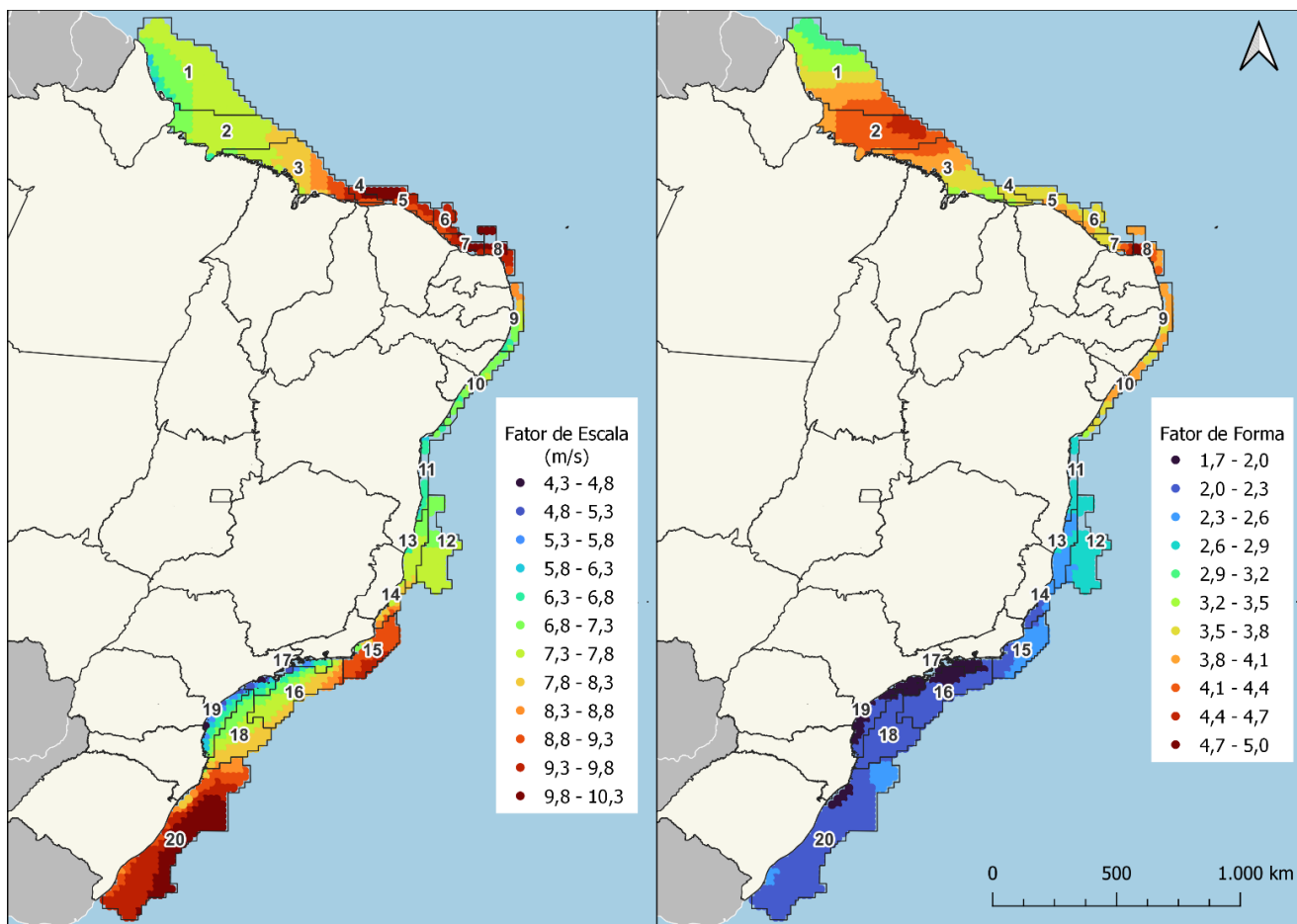


Figura 31 - Fator de escala e fator de forma da distribuição de Weibull

Por fim, a Figura 32 consolida as informações de velocidade média estimada para cada um dos pontos que foram agregados em clusters e a rosa dos ventos de cada cluster, permitindo a análise conjunta de toda a região offshore do Brasil.

Nas regiões **Norte e Nordeste**, as direções predominantes do vento se concentram em poucas faixas, variando majoritariamente, **entre NE e SE**, dependendo da localização do cluster e **não variando muito dentro de um mesmo cluster**. Conforme os pontos se localizam mais ao sul do Brasil, os ventos tendem a **variar mais em termos de direção**. Na região Sul, não é observado um padrão claro de distribuição de direção, com probabilidade de **ocorrência de todas as direções de vento dentro de um mesmo cluster**.

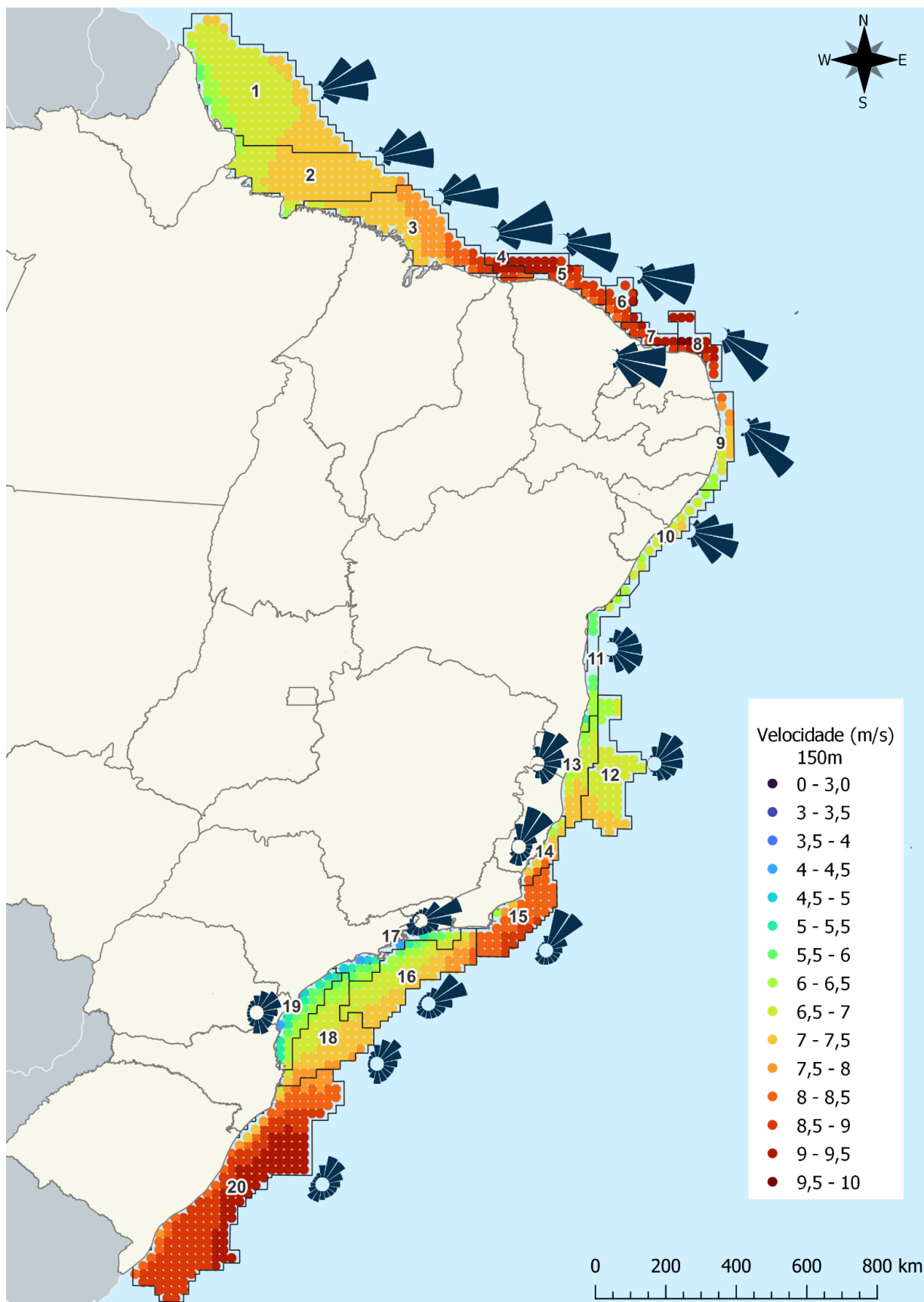


Figura 32 - Velocidade e rosa dos ventos por cluster

De maneira geral, verifica-se que o Brasil possui **3 hotspots de áreas com as maiores velocidades médias do vento**, englobando faixas **acima dos 7,0 m/s**. Observa-se que as maiores velocidades médias são compatíveis com os maiores fatores de escala da distribuição de Weibull da Figura 31. Como discutido ao longo desta Nota Técnica, apesar das 3 bases de dados avaliadas apresentarem diferenças de velocidade, todas indicam a presença dos 3 **hotspots** identificados.

A 1ª área de *hotspot* é composta pelos Clusters 4 a 8 (Região B) e se localiza entre os estados do Piauí e Rio Grande do Norte. Além de incluir os pontos de maiores velocidades médias observadas, essa área se destaca também pela **alta probabilidade de apresentar ventos mais constantes, tanto em termos de velocidade quanto de direção**, indicando uma maior previsibilidade do recurso eólico offshore. Além disso, é uma região de **sazonalidade bem definida e com grande amplitude**, atingindo velocidades médias da ordem de 11,0 m/s entre agosto e outubro e diminuindo até cerca de 6,0 m/s entre março e maio.

A 2ª área de destaque é o **Cluster 15 (Região D), no litoral nordeste do Rio de Janeiro**. Além dos ventos fortes, há uma tendência de **ventos predominantes na direção NE**. Os ventos são **mais dispersos em termos de frequência de ocorrência de faixas de velocidades**, mas possuem **pouca variabilidade intra-diária**. A velocidade média mensal varia entre 7,0 m/s entre março e junho e 10,0 m/s de julho até fevereiro.

A 3ª área de *hotspot* é o **Cluster 20 (Região E), que fica entre o sul de Santa Catarina e todo o Rio Grande do Sul**. As velocidades médias nessa área ficam majoritariamente entre 8,0 e 9,5 m/s, aumentando com a distância da costa. Entretanto, esse é o *hotspot* que apresenta **a maior probabilidade de ocorrências de faixas de velocidades mais afastadas da média** do cluster resultando em um **recurso mais disperso** e indicando probabilidades de dados de mais difícil previsão, **tanto em termos de velocidades quanto de direções do vento**. Por outro lado, seu **perfil diário médio de velocidades é um dos que apresenta maior constância** dentre os clusters analisados. Esta área possui ventos mais fortes entre julho e novembro e mais fracos entre janeiro e abril, também **com fraca sazonalidade**, variando apenas cerca de 2,0 m/s ao longo do ano médio.

Diante do apresentado, verifica-se que cada *hotspot* tem características distintas de sazonalidade, variabilidade, velocidade média e abrangência que agregam diferentes vantagens de sua exploração e contribuições o sistema elétrico.

5. Conclusão

Este estudo teve como objetivo analisar o comportamento do recurso eólico offshore do Brasil a partir de bases de dados públicas disponíveis e da identificação dos pontos da costa brasileira que possuem comportamentos semelhantes para uma avaliação regionalizada.

Primeiramente, foi apresentada uma análise comparativa entre as velocidades médias do vento de três bases de dados amplamente utilizadas em estudos de energia eólica: ERA5, MERRA-2 e GWA. Foram observadas algumas discrepâncias entre os modelos: no Nordeste o ERA5 e o MERRA-2 tendem a apresentar valores de velocidades maiores que o GWA; no Sul e Sudeste a situação se inverte, com o GWA apresentando valores mais elevados. As diferenças entre ERA5 e MERRA-2 são em geral pouco expressivas, com uma tendência predominante do ERA5 apontar um recurso maior do que o MERRA-2, principalmente na região Sul. Considerando as semelhanças dos dados médios de ambas as bases, foi identificada a vantagem do ERA5 em relação ao MERRA-2, que é a resolução espacial mais refinada.

Não é possível afirmar qual base é mais aderente à realidade do Brasil, tendo em vista que medições anemométricas *in situ* em áreas offshore são escassas. Considerando tais incertezas, observam-se aplicações diferentes para os tipos de dados disponíveis: ERA5 e MERRA-2 são mais apropriados para análises temporais e de longo prazo, uma vez que fornecem séries temporais horárias com grande extensão enquanto o GWA se destaca pela sua alta resolução espacial, sendo seu uso recomendado na fase de avaliação preliminar do recurso eólico ou em estudos que demandem maior resolução espacial.

Por esses motivos, para realizar a avaliação dos comportamentos sazonais das regiões a partir da clusterização dos dados, a base ERA5 foi selecionada. O algoritmo utilizado no processo de clusterização foi o método de Ward, aplicado a partir da matriz de correlação entre os pontos do ERA5. A clusterização tem como objetivo identificar comportamentos similares, ou seja, neste estudo, pontos com velocidade média distinta entre si podem ser agregados, desde que os dados variem de forma semelhante ao longo das horas e dos meses.

Finalizada a clusterização, foram identificados 20 agrupamentos (clusters) com sazonalidades próprias. Esse fato indica que, além da velocidade média de cada ponto, os perfis diário e anual do recurso eólico offshore também variam espacialmente, até mesmo entre clusters na mesma região.

De modo geral, verifica-se uma tendência no Brasil de ocorrência de ventos mais fortes no segundo semestre do ano. Com relação à distribuição diária, é comum observar as velocidades mínimas ao longo do período diurno, majoritariamente no início da tarde. Mesmo com similaridades, observa-se que cada cluster apresenta sazonalidades e amplitudes próprias, que variam sensivelmente entre regiões. Os resultados reforçam possíveis complementariedades da fonte entre localidades diferentes e com outros recursos energéticos.

As análises também mostraram como a direção do vento muda com a geografia da costa brasileira. Em grande parte da costa o vento tende a ser paralelo à costa, porém na região Nordeste do Brasil, que sofre influência dos ventos alísios, os pontos da costa tendem a apresentar direção de vento extremamente constante no tempo para um mesmo cluster, e majoritariamente variando de NE a SE para toda a região. Conforme os pontos se localizam mais ao sul do Brasil, as direções se tornam cada vez mais variáveis dentro dos clusters.

Destaca-se que o Brasil possui **3 hotspots de áreas com as maiores velocidades médias do vento**, englobando faixas de **velocidade média entre 7,0 m/s e 10,0 m/s**, dada a base de dados analisada neste estudo. Essas áreas de *hotspots* estão localizados no Nordeste, entre Piauí e Rio Grande do Norte, no Sudeste no litoral do Rio de Janeiro e no Sul do país entre o sul de Santa Catarina e o Rio Grande do Sul.

Entretanto, as características do recurso eólico diferem entre essas regiões. Os clusters do Nordeste destacam-se por ventos mais constantes e por direções predominantes bem evidentes. Por outro lado, o cluster do Rio Grande do Sul destaca-se pela menor variabilidade sazonal da velocidade e o cluster do Rio de Janeiro pelas altas velocidades nos meses de janeiro e fevereiro, por exemplo.

Sendo assim, fica claro que cada região apresenta características próprias que alteram a contribuição que a exploração do recurso eólico offshore para geração elétrica poderá agregar ao SIN. Para se aprofundar nessa avaliação, é de grande relevância compreender, primeiramente, o recurso eólico offshore tanto em termos de velocidade média, mas também a sua variabilidade temporal de longo prazo, o comportamento diário e anual e as direções predominantes.

A análise realizada teve como objetivo consolidar as informações disponíveis e iniciar o preenchimento de lacunas de conhecimento sobre recurso eólico offshore no Brasil, indicando a importância na elaboração de novos estudos a respeito da contribuição desta fonte para o setor elétrico brasileiro. A EPE ressalta que os dados de reanálise podem conter grandes incertezas e não se responsabiliza pelo uso inadequado das informações contidas no estudo. Diante disso, fica clara a importância de acesso a dados de medições *in-situ* para validação das bases de dados aqui empregadas e complementação da análise do recurso eólico offshore do Brasil em estudos futuros e no escopo do desenvolvimento de projetos.

6. Referências Bibliográficas

- [1] Empresa de Pesquisa Energética, “Roadmap Eólica Offshore Brasil,” 2020. [Online]. Available: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE-versao_R2.pdf.
- [2] EPE, “Metodologia de Agregação de dados anemométricos,” 08 08 2025. [Online]. Available: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-901/NT_EPE_DEE_SGR_051_2025_R0.pdf. [Acesso em 01 07 2026].
- [3] Copernicus Climate Change Service, “ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present,” 2023. [Online]. Available: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. [Acesso em 17 04 2026].
- [4] GMAO, Global Modeling and Assimilation Office, “Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2,” 2015. [Online]. [Acesso em 17 04 2026].
- [5] DTU; WORLD BANK GROUP, “Global Wind Atlas,” 17 04 2026. [Online]. Available: <https://globalwindatlas.info/en/about/introduction>.
- [6] ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, “Reanalysis Fact Sheet,” 2023. [Online]. Available: https://www.ecmwf.int/sites/default/files/2023-08/Fact%20sheet%20-%20Reanalysis%20-v3_1.pdf?27827. [Acesso em 17 04 2026].
- [7] ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, “ERA5: How to calculate wind speed and wind direction from u and v components of the wind?,” [Online]. Available: <https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=133262398>. [Acesso em 22 04 2026].
- [8] GMAO, Global Modeling and Assimilation Office, NASA, 05 11 2025. [Online]. Available: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/>. [Acesso em 24 04 2026].
- [9] GMAO, Global Modeling and Assimilation Office, “MERRA-2 tavg1_2d_slv_Nx: 2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation,Single-Level Diagnostics V5.12.4,” [Online]. Available: <https://doi.org/10.5067/VJAFPLI1CSIV>. [Acesso em 24 04 2026].
- [10] GWA, “Global Wind Atlas,” DTU/World Bank Group, [Online]. Available: <https://globalwindatlas.info/en/>. [Acesso em 27 04 2026].
- [11] D. S. Christopher Jung, “The role of the power law exponent in wind energy assessment: A global analysis,” *International Journal of Energy Research*, 2021.
- [12] ESRI, “How IDW works,” [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm>. [Acesso em 27 04 2026].
- [13] Humboldt-Universität zu Berlin, “Quantitative Methods for Geographers: Spatial interpolation in R,” 2024. [Online]. Available: https://eol.pages.cms.hu-berlin.de/gcg_quantitative-methods/Lab14_Kriging.html#:~:text=The%20corresponding%20gstat%20function%20is%20idw%28%29.%20The%20function,regression%20models.%20So%2C%20here%20we%20predict%20zinc%20%28response%29.. [Acesso em 27 04 2026].

- [14] Pauli Virtanen et al., "Scipy.cluster.hierarchy.ward," [Online]. Available: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.cluster.hierarchy.ward.html>. [Acesso em 11 06 2025].
- [15] Newcastle University, "Types of Correlation," [Online]. Available: <https://www.ncl.ac.uk/webtemplate/ask-assets/external/maths-resources/statistics/regression-and-correlation/types-of-correlation.html>. [Acesso em 11 Junho 2025].
- [16] F. L. P. Murtagh, "Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward's Criterion?," em *Journal of Classification*, Springer Nature, 2014, pp. 274-295.
- [17] Homer Energy, "Weibull Distribution," [Online]. Available: https://homerenergy.com/products/pro/docs/latest/weibull_distribution.html. [Acesso em 29 05 2026].
- [18] ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, "ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present," [Online]. Available: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. [Acesso em 24 04 2026].