



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/08.07.03.04-TDI

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA

Vitor Galazzo de Paiva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Milton Kampel, e Rosio
Del Pilar Camayo Maita, aprovada
em 30 de julho de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TQ5SHS>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/08.07.03.04-TDI

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA

Vitor Galazzo de Paiva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Milton Kampel, e Rosio
Del Pilar Camayo Maita, aprovada
em 30 de julho de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TQ5SHS>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Paiva, Vitor Galazzo de.

P161e Estimativa do potencial de geração de energia eólica offshore na margem continental brasileira / Vitor Galazzo de Paiva. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxx + 120 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/08.07.03.04-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Milton Kampel, e Rosio Del Pilar Camayo Maita.

1. Energia eólica offshore. 2. Vento na superfície do mar. 3. ASCAT. 4. CCMP. 5. Margem continental brasileira. I.Título.

CDU 621.548(261.56)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

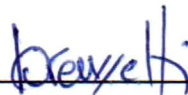
Aluno (a): **Vítor Galazzo de Paiva**

Título: "ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

Sensoriamento Remoto

Dr. João Antonio Lorenzetti

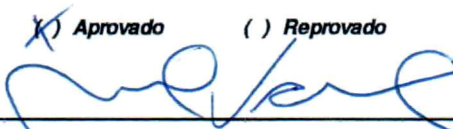


Presidente / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Milton Kampel



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Rosio Del Pilar Camayo Maita

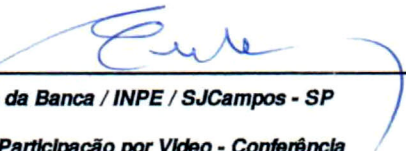


Orientador(a) / CPTEC/INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Enio Bueno Pereira

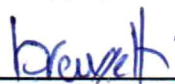


Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Felipe Mendonça Pimenta



Convidado(a) / UFSC/CFH / Florianópolis - SC

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 30 de Julho de 2019

“É necessário sempre acreditar que o sonho é possível, Que o céu é o limite e você, ”truta“, é imbatível”.

EDI ROCK
em “A Vida é Desafio - Racionais MCs”, 2002

*Com amor, à minha mãezinha **Cida**, dedico*

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me sustentado e me dado forças para chegar até aqui.

Aos meus pais, especialmente à minha mãe, por todo o amor e os sacrifícios realizados que permitiram alcançar este momento.

Ao Dr. Milton Kappel por depositar sua confiança em mim para este trabalho e, juntamente à Dra. Rosio Camayo, pela orientação e pelos ensinamentos ao longo deste processo.

Aos Dr. João Lorenzetti, Dr. Felipe Pimenta e Dr. Enio Bueno pelas sugestões e avaliação deste trabalho.

Ao Dr. André Rodrigues pelos conselhos bastante construtivos.

Ao Capitão-Tenete Tobias Ferreira e à Primeiro-Tenente Patrícia Puhl pela disponibilidade, atenção e ajuda com os dados do Programa Nacional de Boias.

Ao Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil, ao Centro de Previsão do Tempo e Clima - INPE, ao *Pacific Marine Environmental Laboratory*, à *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*, à *Royal Netherlands Meteorological Institute*, ao *European Centre for Medium Range Weather Forecasts*, à *Remote Sensing Systems* e ao *National Centre for Environmental Prediction* pelos dados utilizados neste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de pesquisa concedida.

Finalmente, aos amigos da Família Impeanos (Caio, Mateus, Rebeca e Rogerio) e aos companheiros do grupo A Vida é Fuzzy pela parceria e risadas durante esse trajeto. Um abraço meus queridos.

RESUMO

Seis diferentes bases de dados de vento na superfície do mar (VSM), incluindo estimativas por satélite, simulações de modelo numérico, reanálise e um produto integrado, foram comparadas estatisticamente com medidas obtidas por anemômetros instalados em quinze boias fundeadas na margem continental brasileira e Oceano Atlântico Tropical Ocidental visando determinar a base de dados que melhor representa o campo de ventos nestas regiões. Os produtos de VSM derivados do Advanced Scatterometer (ASCAT-A e -B) no período 2011-2017 apresentaram as menores diferenças em relação aos dados in situ ($RMSE < 1,27 \text{ m.s}^{-1}$, viés $\pm 0,30 \text{ m.s}^{-1}$ e $R > 0,85$) e foram utilizados para avaliar o potencial de geração de energia eólica offshore na região de estudo. O produto Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) também apresentou um bom desempenho na comparação estatística com os dados in situ ($RMSE < 1,56 \text{ m.s}^{-1}$, viés $\pm 0,37 \text{ m.s}^{-1}$ e $R > 0,82$) e por apresentar a maior cobertura temporal (1988–2017) foi utilizado no cálculo de climatologias anual e sazonais e na análise de variabilidade do VSM. Uma alta variabilidade anual (50 %) foi observada na região entre o Embaiamento Sul Brasileiro (South Brazil Bight) e o norte da Argentina (23°S–45°S), associada à passagem de sistemas frontais e ciclôgenese. Uma variabilidade interanual relativamente mais alta (18 %) foi observada entre 5°N–5°S durante o outono, associada à migração interanual da Zona de Convergência Intertropical. As regiões que se mostraram mais propícias ao aproveitamento da energia eólica estão situadas entre o leste do Pará e a divisa entre RN-PB, entre o Cabo de Santa Marta Grande e a Lagoa dos Patos e entre o sul do ES e Cabo Frio. O potencial anual de geração de energia eólica *offshore* para regiões com até 100 m de profundidade ao longo da margem continental brasileira foi estimado em 946 GW.

Palavras-chave: Energia eólica *offshore*. Vento na superfície do mar. ASCAT. CCMP. Margem continental brasileira.

ESTIMATE OF OFFSHORE WIND ENERGY PRODUCTION IN THE BRAZILIAN CONTINENTAL MARGIN

ABSTRACT

Six different surface ocean wind (VSM in Portuguese) datasets, including scatterometer estimates, numerical modelling simulations, reanalysis and an integrated product, were compared statistically with in-situ measurements obtained by anemometers installed in fifteen buoys moored on the Brazilian continental margin and the Western Tropical Atlantic in order to determine which dataset best represents near wind field in these regions. The VSM products derived from the Advanced Scatterometer (ASCAT-A and -B) in the period 2011-2017 presented the smallest differences from the in-situ data (RMSE $< 1,27 \text{ m.s}^{-1}$, bias $\pm 0,30 \text{ m.s}^{-1}$ e $R > 0,85$) and were used to evaluate the offshore wind energy potential in the study region. The Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) product also performed well in the statistical comparison with the in-situ data (RMSE $< 1,56 \text{ m.s}^{-1}$, viés $\pm 0,37 \text{ m.s}^{-1}$ e $R > 0,82$) and due to its longer temporal coverage (1988-2017), was used in the calculation of annual and seasonal climatology and in the analysis of VSM variability. A high annual variability (50 %) was observed in the region between South Brazil Bight and northern Argentina (23°S-45°S), associated with the passage of frontal systems and cyclogenesis. Relatively higher interannual variability (18 %) was observed between 5°N-5°S during the autumn, associated to the inter-annual migration of the Intertropical Convergence Zone. The regions with high wind energy potential are located between the east of Pará and the border between Rio Grande do Norte and Paraíba, between Cabo de Santa Marta Grande and Lagoa dos Patos, and between the south of Espírito Santo and Cabo Frio. The annual offshore wind energy potential for regions with up to 100 m depth along the Brazilian continental margin was estimated at 946 GW.

Keywords: Offshore wind energy. Ocean winds. ASCAT. CCMP. Brazilian continental margin.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>	
2.1	Modelo de circulação meridional da atmosfera, contendo os ventos em superfície e as áreas de alta (representadas por A) e de baixa (representadas por B) pressão. A espessura da troposfera é exagerada.	6
2.2	Localização da ZCIT com base em dados médios mensais de precipitação (mm) entre 1979 a 2008.	8
2.3	Cobertura da ASAS com base em médias climatológicas mensais (1979–2015) de altura geopotencial escalonada (gpm) a 850 hPa.	9
2.4	Médias anuais de passagem de frentes frias (1979-2000).	10
2.5	Regiões favoráveis à ciclogênese no Atlântico Sul-Sudoeste. A escala de cores refere-se à densidade ciclogénica anual (10^{-4} km^{-2}).	11
2.6	Circulação oceânica na região da margem continental brasileira (CSE = Corrente Sul Equatorial, CNB = Corrente Norte do Brasil, FCB = Frente da Corrente do Brasil, FSA = Frente Subatártica, FST = Frente Subtropical, ERG = Elevação Rio Grande).	12
2.7	Representação esquemática do espalhamento Bragg na superfície do mar. Interação das ondas superficiais com comprimento de onda (λ_W) igual a metade da área projetada do comprimento de onda (λ) da radiação incidente (setas maiores) em uma determinada angulação de incidência (θ). Setas menores representam o retroespalhamento.	19
2.8	Características dos escaterômetros lançados a partir do SASS/Seasat, incluindo frequência de operação, padrão de observação, ângulo de incidência, resolução espacial, faixa de cobertura, cobertura diária e data de operação.	21
2.9	Design conceitual do sensor SeaWinds. Antena rotativa de 1 metro de diâmetro com velocidade angular de 18 rpm. O ângulo de incidência do feixe interno é de 47° e do feixe externo é de 55° . Para a porção cinza escuro de faixa de varredura os ventos são determinados por quatro visadas. Na porção cinza claro o vento é determinado por duas visadas. A largura total da faixa de cobertura é de 1800 km.	22
2.10	Geometria de visada ASCAT para a menor altura da órbita (822 km). . .	23
2.11	Curva de potência hipotética de uma turbina eólica, destacando as velocidades mínima, nominal e máxima de operação.	27

3.1	Mapa da área de estudo compreendida entre 10°N–45°S e 20°O–65°O, apresentando a localização das boias fundeadas dos programas PIRATA e PNBOIA.	29
3.2	Cobertura temporal dos dados utilizados na produção do produto de VSM integrado <i>Cross-Calibrated Multi-Platform</i> (CCMP). a) Sensores orbitais passivos (vermelho) e ativos (verde); b) Boias dos programas <i>Tropical Moored Buoy</i> (TAO), <i>Triangle Trans-Ocean Buoy Network</i> (TRITON), <i>Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction</i> (RAMA), <i>Prediction and Research Moored Array in the Atlantic</i> (PIRATA) e <i>Marine Environmental Data Section Canada</i> (MEDS); c) Reanálise ERA-Interim	34
3.3	Curva de potência da turbina Siemens SWT 150-6MW	40
4.1	Histogramas polares das séries temporais dos vetores de ventos para as boias dos programas PIRATA e PNBOIA. Direções de acordo com a convenção meteorológica.	42
4.2	Diagramas de Taylor para as comparações estatísticas simultâneas do conjunto CC entre os produtos CCMP, BRAMS, ERA5 e ASCAT-A (a, b), ou ASCAT-B (c, d) ou ASCAT-CDR (e, f).	44
4.3	Diagramas de Taylor para as comparações estatísticas simultâneas do conjunto OC entre os produtos CCMP, BRAMS, ERA5 e ASCAT-A (a, b), ou ASCAT-B (c, d) ou ASCAT-CDR (e, f).	45
4.4	Diagramas de Taylor para as comparações estatísticas simultâneas do conjunto CT entre os produtos CCMP, BRAMS, ERA5 e ASCAT-A (a, b), ou ASCAT-B (c, d) ou ASCAT-CDR (e, f).	46
4.5	Climatologias (a) anual e (b,c,d,e) sazonais do campo de vento estimado pelo produto de VSM CCMP (1988–2017).	55
4.6	Índice de Variabilidade Média Anual (VMA) da velocidade do vento estimada do produto de VSM CCMP (1988–2017) para as escalas de tempo (a) anual e (b,c,d,e) sazonais.	59
4.7	Índice de Variabilidade Inter-Anual (VMA) da velocidade do vento estimada do produto de VSM CCMP (1988–2017) para as escalas de tempo (a) anual e (b,c,d,e) sazonais.	61
4.8	Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B.	63
4.9	Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 100 m acima do nível do mar.	65

4.10	Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal a 100 m acima do nível do mar.	67
4.11	Mapas de distribuição espacial de potência média (a) anual e (b-e) sazonal gerada considerando a utilização da turbina Siemens SWT 150-6MW para cada ponto de grade.	69
4.12	Valores médios anuais e sazonais de \bar{U}_{10} (a), \bar{U}_{100} (b), \bar{D}_{100} (c) e \bar{P}_{SWT} (d) calculadas a partir de dados de vento na superfície do mar VSM ASCAT-A e ASCAT-B (2011-2017) extraídos de 147 pontos ao longo da costa, com uma distancia média de ≈ 50 km da costa, espaçamento medio de ≈ 50 km entre si e, a maioria, em profundidades ≤ 50 m (e).	72
A.1	Histogramas polares da série de ventos da boia 8N38W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	94
A.2	Histogramas polares da série de ventos da boia 4N23W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	95
A.3	Histogramas polares da série de ventos da boia 4N38W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	96
A.4	Histogramas polares da série de ventos da boia 0N23W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	97
A.5	Histogramas polares da série de ventos da boia 0N35W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	98

A.6	Histogramas polares da série de ventos da boia 8S30W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	99
A.7	Histogramas polares da série de ventos da boia 14S32W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	100
A.8	Histogramas polares da série de ventos da boia 19S34W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	101
A.9	Histogramas polares da série de ventos da boia 4N23W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	102
A.10	Histogramas polares da série de ventos da boia Recife casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	103
A.11	Histogramas polares da série de ventos da boia Porto Seguro casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	104
A.12	Histogramas polares da série de ventos da boia Cabo Frio 2 casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	105

A.13	Histogramas polares da série de ventos da boia Santos casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	106
A.14	Histogramas polares da série de ventos da boia Itajaí casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	107
A.15	Histogramas polares da série de ventos da boia Rio Grande casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.	108
B.1	Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 80 m acima do nível do mar.	110
B.2	Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 100 m acima do nível do mar.	111
B.3	Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 125 m acima do nível do mar.	112
B.4	Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 150 m acima do nível do mar.	113
B.5	Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 200 m acima do nível do mar.	114
C.1	Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 80 m acima do nível do mar.	116
C.2	Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 100 m acima do nível do mar.	117

C.3	Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 125 m acima do nível do mar.	118
C.4	Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 150 m acima do nível do mar.	119
C.5	Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 200 m acima do nível do mar.	120

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Lista dos satélites lançados com escaterômetros a bordo, contendo a frequência de operação do sensor e datas de lançamento e de término de operação.	20
3.1 Nomenclatura, localização e cobertura temporal dos dados das boias mantidas pelos programas PIRATA e PNBOIA	30
3.2 Especificidades técnicas da turbina Siemens SWT 150-6MW.	39
4.1 Valores médios (\pm desvios-padrão) da velocidade e direção, máximos e mínimos da velocidade dos dados de vento medidos nas boias fundeadas dos programas PIRATA e PNBOIA. As direções médias em graus estão apresentadas de acordo com a convenção oceanográfica.	41
4.2 Resultados das comparações estatísticas dos dados de vento adquiridos simultaneamente pelas boias e produtos VSM para o conjunto Completo de dados (CC), Oceânico (OC) e Costeiro (CT). RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson, σ_{boia} é o desvio-padrão referente às boias, σ_{VSM} é o desvio-padrão referente ao produto de VSM e N é o número de observações. Os menores RMSE e viés, os maiores R e os σ_{VSM} mais próximos de σ_{boia} estão em negrito.	47
4.3 Resultados das comparações estatísticas de todos os dados de vento disponíveis das boias par-a-par com cada um dos produtos VSM para o conjunto Oceânico (OC). RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson, σ_{boia} é o desvio-padrão referente às boias, σ_{VSM} é o desvio-padrão referente ao produto de VSM e N é o número de observações. Os menores RMSE e viés, os maiores R e os σ_{VSM} mais próximos de σ_{boia} estão em negrito (— = não há pares).	48
4.4 Resultados das comparações estatísticas de todos os dados de vento disponíveis das boias par-a-par com cada um dos produtos VSM para o conjunto Costeiro (CT). RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson, σ_{boia} é o desvio-padrão referente às boias, σ_{VSM} é o desvio-padrão referente ao produto de VSM e N é o número de observações. Os menores RMSE e viés, os maiores R e os σ_{VSM} mais próximos de σ_{boia} estão em negrito (— = não há pares).	49

4.5	Valores médios para os resultados das comparações estatísticas de todos os dados de vento disponíveis das boias par-a-par com cada um dos produtos VSM para os grupos CC, OC e CT. RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson, σ_{boia} é o desvio-padrão referente às boias, σ_{VSM} é o desvio-padrão referente ao produto de VSM e N é o número total de observações. O viés médio representa a média dos valores absolutos.	50
4.6	Resultados das comparações estatísticas dentro dos intervalos de velocidade (3–6, 6–9, 9–12, > 12 m.s ⁻¹) de todos os dados de vento disponíveis das boias par-a-par com cada um dos produtos VSM para o grupo OC. Os melhores resultados estão em negrito. (RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson)	51
4.7	Potencial de geração de energia eólica para diferentes períodos e regiões da plataforma continental.	71
4.8	Potencial de geração de energia eólica para diferentes períodos e regiões da plataforma continental.	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	–	Advanced Land Observing Satellite
AMI	–	Advanced Microwave Instrument
AMSR	–	Advanced Microwave Scanning Radiometer
ASCAT	–	Advanced Scatterometer
ASAS	–	Alta Subtropical do Atlântico Sul
AFOV	–	Área do campo de visada
ATLAS	–	Autonomous Temperature Line Acquisition System
BRAMS	–	Brazilian Regional Atmospheric Modeling System
CMOD7	–	C-band model 7
COSMO-SkyMed	–	COntstellatIon of small Satellites for the Mediterranean basin Observation -
CHN	–	Centro de Hidrografia da Marinha
CPTEC	–	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CFOSAT	–	Chinese-French Oceanography Satellite
CBM	–	Confluência Brasil-Malvinas
CC	–	Conjunto de dados in situ completo
CT	–	Conjunto de dados in situ costeiro
OC	–	Conjunto de dados in situ oceânico
CCB	–	Corrente Costeira do Brasil
CNB	–	Corrente Norte do Brasil
CSE	–	Corrente Sul Equatorial
CB	–	Corrente do Brasil
CCMP	–	Cross-Calibrated Multi-Platform
DMSP	–	Defense Meteorological Satellite Program
ENOS	–	El Niño Oscilação Sul
ENVISAT	–	Environmental Satellite
SCAT	–	Escaterômetro chinês
ERA5	–	ECMWF ReAnalysis 5
ERA-Interim	–	ECMWF ReAnalysis Interim
ECMWF	–	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EUMETSAT	–	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
ERS-2	–	European Remote-Sensing Satellites
ERS-1	–	European Remote-sensing Satellite
ESA	–	European Space Agency
GMF	–	Função de Modelo Geofísico
GFO	–	GEOSat-Follow-On
GEOSat	–	Geodetic Satellite
IEA	–	International Energy Agency
ISS	–	International Space Station
JAXA	–	Japan Aerospace Explo- ration Agency
ADEOS	–	Japanese Advanced Earth Observing Satellite

JERS	– Japanese Earth Remote Sensing satellite
Jason	– Joint Altimetry Satellite Oceanography Network
JJA	– junho, julho e agosto
MAM	– março, abril, maio
MetOP	– MÉTéorologie OPérationnelle (MetOP)
MAV	– Método de Análise Variacional
JPL	– NASA Jet Propulsion Laboratory
NSCAT	– NASA Scatterometer
NASA-MERRA	– NASA-Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
NASA	– National Aeronautics Space Administration
NCEP-CFSR	– National Centers for Environ- mental Prediction-Climate Forecast System
NDBC	– National Data Buoy Centre
NOAA	– National Oceanic and Atmospheric Administration
NASDA	– National Space Development Agency
NRL	– Naval Research Laboratory
NOMAD	– Navy Oceanographic Meteorological Automated Device
Seasat	– Ocean Dynamics Satellite (Seasat)
OSCAT	– OceanSat Scatterometer
PMEL	– Pacific Marine Environmental Laboratory
PIRATA	– Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic
HY	– Plataforma Hai Yang
PNBOIA	– Programa Nacional de Boias
PROINFA	– Programa de Incentivo de Fontes Alternativas de Energia
RADARSAT	– Radar Satellite
SAR	– Radar de abertura sintética
RapidScat	– Rapid Scatterometer
RAMS	– Regional Atmospheric Modeling System
OceanSat	– Satellite for the Ocean
SARAL	– Satellite with ARgos and ALtika
ScatSat	– Scatterometer Satellite
SASS	– Seasat-A Scatterometer System
NRCS	– Seção Transversal Normalizada de Radar
SON	– setembro, outubro, novembro
SSM/I	– Special Sensor Microwave Imager
SSMIS	– Special Sensor Microwave Imager/Sounder
SO	– Sudoeste
TRITON	– TRiangle Trans-Ocean buoy Network
TMI	– TRMM Microwave Radiometer
TWh	– TeraWatts Hora
TanDEM-X	– TerraSAR-X Add-oN for Digital Elevation Measurement
TOPEX-Poseidon	– Topography Experiment - Positioning, Ocean, Solid Earth, Ice Dynamics, (
TAO	– Tropical Atmosphere Ocean

- TRMM – Tropical Rainfall Measuring Mission
- VMA – Variabilidade Média Anual
- VIA – Variabilidade interanual
- VSM – Vento na Superfície do Mar
- WRF – Weather Research and Forecasting Model
- ZCIT – Zona de Convergência Intertropical
- ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Tropical

LISTA DE SÍMBOLOS

g	– Aceleração da gravidade
z_c	– altura da rugosidade aerodinâmica da superfície do mar
z_0	– altura da rugosidade da superfície do mar
z_s	– altura da rugosidade de uma superfície suavizada
H_S	– altura significativa de onda
A_r	– área da região de interesse
A_{FOV}	– área do campo de visada
A_t	– área ocupada por uma turbina
C_D	– coeficiente de arraste
C_{DN}	– coeficiente de arraste em uma estratificação neutra
K	– constante de von Karman
$P_w(U)$	– curva de potência
D	– densidade de potência
\bar{D}	– densidade de potência média
G_0	– direcionalidade da antena (ganho)
R_0	– distância entre sensor e o objeto (range)
$e_{dir}(U, \phi_R)$	– emissividade anisotrópica
e	– emissividade da superfície
$e_0(S, T)$	– emissividade da superfície especular
$e_{iso}(U, F)$	– emissividade isotrópica
F	– fração da área observada coberta por espuma
GHz	– Giga Hertz
kg	– quilograma
m	– metro
a	– parâmetro de Charnock
H	– Polarização plano-horizontal
V	– Polarização plano-vertical
$\bar{P}_{w,a}$	– potencial de geração de energia eólica
P_w	– potência de um aerogerador
P_{SWT}	– potência gerada pela turbina Siemens SWT 150-6MW
S	– salinidade da água do mar
s	– segundo
T	– temperatura
U	– velocidade do vento
\bar{U}	– velocidade do vento média
ν	– viscosidade cinemática
W	– Watt
Ω	– Ângulo sólido
ϕ_R	– ângulo azimutal relativo de visada
ϕ	– ângulo de visada azimutal de um radiômetro

θ	–	ângulos de incidência
λ	–	comprimento de onda
ρ	–	densidade do ar
ϕ_W	–	direção do vento
Φ_R	–	fluxo radiante retornado
Φ_T	–	fluxo radiante transmitido
λ_W	–	ondas de superfície
σ_0	–	Seção Transversal Normalizada de Radar
τ	–	tensão de cisalhamento do vento
u_*	–	velocidade de fricção
\approx	–	aproximadamente

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Circulação geral da atmosfera	5
2.2 Sistemas atmosféricos atuantes na margem continental brasileira	7
2.3 Circulação oceânica superficial sobre a margem continental brasileira	10
2.4 Medições do vento sobre a superfície do mar	12
2.4.1 Medidas <i>in situ</i>	12
2.4.2 Medições por Satélite	14
2.4.2.1 Rastreamento de nuvens	14
2.4.2.2 Sensores passivos de micro-ondas	15
2.4.2.3 Escaterômetros	17
2.4.2.4 Radares altímetros	24
2.4.2.5 Radares de abertura sintética	25
2.5 Mensuração do potencial geração de energia eólica <i>offshore</i>	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Bases de Dados	30
3.1.1 Dados de vento <i>in situ</i>	30
3.1.2 Escaterômetro	31
3.1.3 Modelo de previsão numérico BRAMS	32
3.1.4 Reanálise ERA5	33
3.1.5 Dados integrados CCMP	33
3.1.6 Batimetria ETOPO	34
3.2 Comparações estatísticas dos dados de vento	34
3.3 Caracterização da variabilidade dos campos de vento superficial	36
3.4 Extrapolação dos ventos para diferentes alturas de aerogeradores	37
3.5 Potencial eólico	39
4 RESSULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Dados de vento <i>in situ</i>	41
4.2 Comparações estatísticas dos dados de vento	43

4.3	Variabilidade espaço-temporal	54
4.3.1	Climatologias	54
4.3.2	Índices de variabilidade	57
4.4	Potencial Eólico <i>offshore</i> da margem continental brasileira	62
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	ANEXO A - HISTOGRAMAS POLARES DOS DADOS DOS PRODUTOS VSM CASADOS PAR-A-PAR COM OS DADOS DAS BOIAS	93
	ANEXO B - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA INTENSIDADE MÉDIA DOS VENTOS PARA DIFERENTES ALTURAS	109
	ANEXO C - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE DENSIDADE DE POTÊNCIA MÉDIA	115

1 INTRODUÇÃO

O crescimento expressivo da demanda energética mundial e do impacto ambiental associado à geração de energia pelo grande uso de combustíveis fósseis torna cada vez mais essencial o desenvolvimento da geração de energia por meio de fontes renováveis. Segundo a empresa de consultoria energética [Enerdata \(2019\)](#), o consumo mundial de energia elétrica para o ano de 2018 foi de 22.964 TWh, valor este que é 42,6% e 19,3% maior em relação aos anos 2000 e 2010, respectivamente. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA), cerca de 67% das fontes energéticas utilizadas na produção de energia elétrica em escala mundial ainda são baseadas em combustíveis fósseis, contribuindo com a liberação de 32,3 Gt de CO₂ para a atmosfera no ano de 2016 ([IEA, 2018](#)).

Dentre os tipos de geração de energias renováveis destacam-se principalmente as energias solar, hidráulica e eólica. No Brasil, a geração de energia solar ainda é pouco desenvolvida, integrando 0,01% da capacidade de geração de energia do país ([EPE, 2019](#)). A energia hidráulica representa 64% do total produzido no Brasil. Entretanto, a construção de novas usinas hidroelétricas pode provocar severos impactos ambientais devido ao desmatamento e inundação de grandes áreas ([EPE, 2019](#)). Por sua vez, a geração de energia eólica tem se mostrado como uma alternativa de produção de energia renovável, gerando impactos ambientais menos agressivos ao meio ambiente ([SAIDUR et al., 2011](#); [JABER, 2013](#)).

Em 2016, a produção brasileira de energia eólica foi 5,8% do total produzido no Brasil ([EPE, 2018](#)), sendo que na região Nordeste, a geração de energia eólica já representa mais de 60% do total ([OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, 2017](#)). [Amarante et al. \(2001\)](#), através de um conjunto integrado de modelos de simulação atmosférica, foram os primeiros a quantificar o potencial eólico do território continental brasileiro na forma de um atlas, estimando-o em 143,5 GW. Desde então, políticas de incentivo foram criadas para promover a implementação de projetos de geração de energia eólica, principalmente através do Programa de Incentivo de Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), iniciado em 2002.

Até o momento, a produção atual de energia eólica brasileira advém apenas de parques eólicos construídos em áreas continentais. A implementação de turbinas eólicas em áreas oceânicas (*offshore*), apresenta, relativamente, maiores custos de instalação do que em áreas continentais ([PRYOR; BARTHELMIE, 2001](#)). Porém, possuem vantagens, como por exemplo, a não ocupação de áreas de elevado interesse comercial e turístico na zona costeira e uma maior eficiência energética. Esta eficiência pode

ser associada à sua instalação em áreas marítimas onde os ventos atingem maiores velocidades e apresentam menores flutuações devido à ausência de barreiras físicas como o relevo, edificações ou mesmo da vegetação (PRYOR; BARTHELMIE, 2001).

A determinação das melhores regiões marinhas para a instalação de turbinas eólicas demanda um bom conhecimento sobre a magnitude e variabilidade espaço-temporal dos campos de vento na região de interesse. A aquisição de informações por sensoriamento remoto para a caracterização espaço-temporal dos campos de vento em extensas áreas oceânicas tem se mostrado cada vez mais útil. Os sensores orbitais, como os escaterômetros, fornecem dados de velocidade e direção do vento na superfície do mar com resoluções espaciais e temporais adequadas para diversas aplicações e estudos atmosféricos e oceânicos (MARTIN, 2014). Estes dados também já foram utilizados para inferir sobre o potencial eólico offshore (HASAGER et al., 2006; LIU et al., 2008; PIMENTA et al., 2008, entre outros).

Hasager et al. (2006) quantificaram o potencial eólico no Mar do Norte, nas proximidades da Dinamarca, utilizando dados de radar de abertura sintética - SAR (do inglês, *Synthetic Aperture Radar*) do satélite *European Remote-sensing Satellite* (ERS) 1 e 2 e do escaterômetro SeaWinds/QuikSCAT. Os dados orbitais foram comparados com dados de vento medidos in situ em uma torre anemométrica e com simulações numéricas. Os autores ressaltaram as vantagens de se usar os dados SAR em escala local, para regiões geográficas pouco extensas, devido à alta resolução espacial deste tipo de sensor (30 m para o ERS) e considerando a faixa de cobertura relativamente pequena da passada do satélite (100 km para o ERS). Os autores também destacaram o potencial uso de dados de escaterômetros em áreas de maiores dimensões geográficas, em escala de bacia oceânica, pois apesar da resolução espacial relativamente menor (12,5–25 km do SeaWinds/QuikScat), cobrem grandes áreas oceânicas com maior resolução temporal (quase diária).

Liu et al. (2008) analisaram o potencial de geração de energia eólica do oceano global utilizando dados SeaWinds/QuikSCAT. Os autores afirmaram que a distribuição dos recursos eólicos mundiais acompanha a circulação atmosférica de larga escala. Também foi ressaltado o alto potencial eólico nas regiões dos ventos alísios, faixas de tempestade de médias latitudes e monções.

Pimenta et al. (2008) estimaram o potencial eólico offshore de uma porção da margem continental Sul e Sudeste do Brasil, delimitada entre a costa e a isóbata de 100 m. Dados QuikSCAT foram comparados com observações meteorológicas obtidas por anemômetro instalado em uma plataforma de petróleo da Petrobras e em uma

boia meteo-oceanográfica da Marinha do Brasil. Os autores estimaram um potencial de geração de aproximadamente 215 GW para a região de estudo.

Ortiz e Kampel (2011), utilizando dados QuikSCAT, analisaram o potencial geração de energia eólica *offshore* de toda a margem continental brasileira, delimitada entre a costa e a isóbata de 100 m. Os autores estimaram um potencial de ≈ 600 GW, o que equivale a quatro vezes a capacidade nacional de geração energética em 2011. No entanto, os autores não validaram os dados de vento orbitais com medições in situ ou simulações numéricas.

O mais recente Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (ELETROBRAS, 2017), apresenta mapas temáticos da velocidade do vento para diversas alturas, entre 30 e 200 m. Foram utilizados dados de simulação numérica gerados pelo modelo atmosférico Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS), somente para o ano de 2013, comparados com dados de estações meteorológicas. Entretanto, aquele Atlas não forneceu informações sobre a densidade de potência, por exemplo, para as regiões marinhas.

Mesmo considerando o papel relevante dos radares escaterômetros para medir ou estimar os vetores de vento sobre a superfície do oceano em escala regional e global, seus produtos devem ser validados regionalmente. Erros de medição na velocidade do vento superiores a 1% resultam em erros de cerca de 3% na estimativa da produção média de energia (MIKKELSEN, 2010).

Diversos autores avaliaram a acurácia e precisão dos produtos de vento sobre o oceano gerados a partir de dados de escaterômetros de diferentes missões, comparando com medições in situ, geralmente obtidas por boias oceanográficas fundeadas (BENTAMY et al., 1996; GRABER et al., 1996; FREILICH; DUNBAR, 1999; EBUCHI et al., 2002; BAPTISTA, 2003; BENTAMY et al., 2008; SUDHA; RAO, 2013, entre outros). De modo geral, esses autores observaram boa concordância (erro médio quadrático, viés e correlações) entre os produtos das missões analisadas e as medições in situ.

Desta forma, para contribuir com o entendimento sobre os campos de vento na margem continental brasileira, auxiliando na tomada de decisão para a instalação de turbinas eólicas *offshore*, há necessidade de se realizar um estudo que contemple a região de interesse como um todo. O conjunto de dados utilizado deve ser adequado para caracterizar a variabilidade espacial e temporal dos campos de vento, bem como, estimar o potencial eólico *offshore*. Diante do que foi até aqui exposto, define-se a seguir, o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1 Objetivo

Estimar o potencial eólico *offshore* da margem continental brasileira.

Objetivos específicos:

- Validar diferentes bases de dados de vento na superfície do mar geradas por meio de escaterômetro, reanálise, modelo numérico e integrada para a região de estudo em relação a medidas in situ, visando encontrar a que melhor representa o campo de vento sobre a região.
- Analisar a variabilidade espacial e temporal do campo de vento na superfície do mar na região de estudo em escala anual e interanual.
- Identificar áreas favoráveis ao aproveitamento da energia eólica por meio da distribuição espacial da velocidade dos ventos, da densidade de potência e da potência passível de ser gerada para cada ponto de grade ao longo da área de estudo.
- Calcular o potencial de geração de energia eólica *offshore* para regiões da margem continental brasileira com até 200 m de profundidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Circulação geral da atmosfera

Desde os estudos pioneiros de Edmond Halley em 1676 e George Hadley em 1735, os cientistas buscaram explicar por que os ventos da superfície sopram de leste em latitudes abaixo dos trópicos e de oeste em latitudes médias, e por que os ventos alísios são tão estáveis de um dia para o outro em relação aos ventos de oeste em média latitudes. Tais questões são fundamentais para uma compreensão da circulação geral atmosférica; isto é, as propriedades estatísticas de movimentos atmosféricos de larga escala num contexto global (WALLACE; HOBBS, 2006).

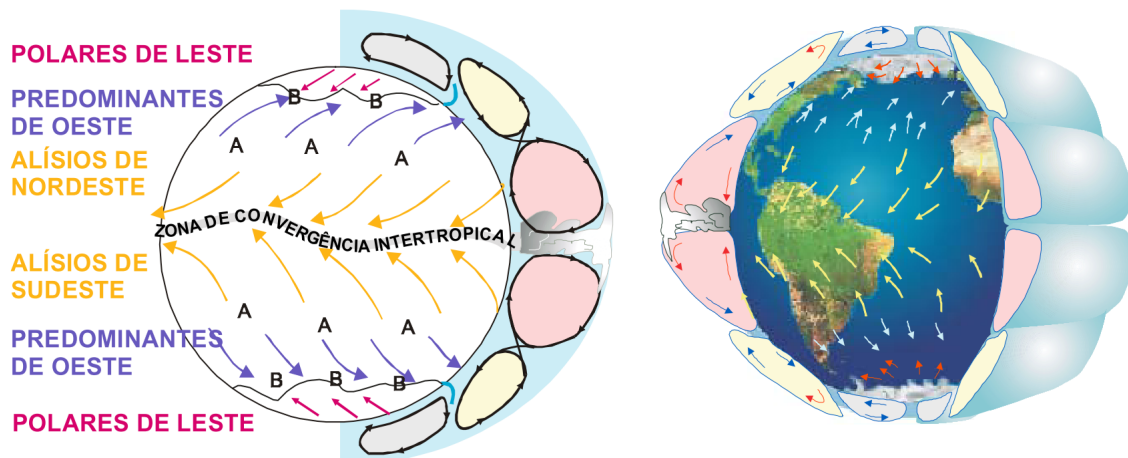
O movimento da atmosfera acontece em diferentes escalas de espaço e de tempo. Turbilhões convectivos ocorrem com diâmetro da ordem de centímetros e duração de segundos, até configurações sinóticas quase-permanentes com diâmetro de milhares de quilômetros. Todas essas escalas de movimento envolvem transformações de energia (interna, potencial, ou cinética) (VAREJÃO, 2005).

Hadley, em seu ensaio sobre a circulação atmosférica em 1735, se restringe aos trópicos, acreditando na existência de duas células de circulação meridional, uma em cada hemisfério, ao tentar explicar os ventos chamados de alísios sobre a superfície da zona tropical. Desde então foram propostos esquemas de circulação na tentativa de aperfeiçoar esta concepção inicial. Em 1856, foi proposto pelo professor secundário William Ferrel a existência de três células de circulação em cada hemisfério. Ferrel tentava justificar assim o comportamento dos ventos observados em médias e altas latitudes, considerando também, a força defletora gerada pelo movimento de rotação da Terra estabelecido por Coriolis. Após o primeiro modelo conceitual, Ferrel apresentou novas versões e outras foram sendo apresentadas por diferentes autores como Bjerknes em 1921, 1933 e 1937, Bergeron em 1928 Rossby, em 1941 (VAREJÃO, 2005). Lorenz e Lorenz (1967) faz uma exaustiva análise de cada um destes modelos.

O modelo conceitual de Rossby é apresentado por Varejão (2005), o qual assume que a pressão à superfície do globo é distribuída zonalmente, havendo faixas alternadas de baixa e de alta pressão aproximadamente simétricas ao equador térmico (Figura 2.1). Neste modelo conceitual são apresentadas três células de circulação meridional: a Célula de Hadley, a qual tem seu ramo ascendente nas proximidades do equador e o ramo descendente a cerca de 30° de latitude; a Célula de Ferrel, a qual tem seu ramo descendente em torno de 30° e ramo ascendente a cerca de 60° de latitude; e a

Célula Polar, a qual tem seu ramo ascendente em torno de 60° de latitude e o ramo descendente sobre os entornos dos polos de cada hemisfério.

Figura 2.1 - Modelo de circulação meridional da atmosfera, contendo os ventos em superfície e as áreas de alta (representadas por A) e de baixa (representadas por B) pressão. A espessura da troposfera é exagerada.



Fonte: Adaptado de Varejão (2005).

De acordo com este modelo conceitual, para a zona equatorial de baixa pressão, atribuída à maior incidência de radiação solar e ascendência do ar quente, há a convergência dos ventos oriundos dos cinturões subtropicais de alta pressão impulsionados pela força do gradiente de pressão e defletidos pela força de Coriolis. Os ramos inferiores das células de Hadley justificam, portanto, a ocorrência dos ventos alísios, vindos de nordeste no Hemisfério Norte e de sudeste no Hemisfério Sul, os quais têm uma presença marcante sobre os oceanos, onde a influência da superfície é mínima pela baixa rugosidade (VAREJÃO, 2005).

A faixa de encontro dos alísios de ambos os hemisférios é conhecida como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A posição média da ZCIT ao redor do globo terrestre se dá em torno de 5°N, estando aproximadamente sobreposta ao equador térmico, o que é atribuído à maior área continental contida no Hemisfério Norte, proporcionando uma maior transferência de calor para a atmosfera. A ZCIT se caracteriza por uma acentuada instabilidade atmosférica que favorece o desenvolvimento de intensas correntes ascendentes, formando assim grandes nuvens convectivas, e conseqüentemente, precipitação abundante (MELO et al., 2009).

Em altos níveis acima da ZCIT na alta troposfera, há uma zona de alta pressão devido aos movimentos ascendentes da superfície onde ocorre divergência dos ventos em direção aos polos. Ao se afastar da ZCIT, o ar ganha velocidade fluindo sem atrito com a superfície. Com o aumento da força de Coriolis, proporcional ao aumento do valor absoluto da latitude e da velocidade, os ventos adquirem uma forte componente de oeste, os quais contribuem com o jato subtropical semipermanente ao atingirem a alta troposfera subtropical (VAREJÃO, 2005).

Os ramos descendentes das células de Hadley e de Ferrel seriam os anticiclones semipermanentes subtropicais, os quais estão bem estabelecidos sobre os oceanos de cada hemisfério em torno de 30°S, formando o que seria um cinturão de altas pressões que quase circunda o planeta no modelo conceitual apresentado por Varejão (2005). A partir da zona de alta pressão provocada pela subsidência ocorre a divergência em superfície. Com o equilíbrio entre a força do gradiente de pressão e a força de Coriolis se tem o balanço geostrófico, e assim, os ventos que seriam o ramo inferior da Célula de Ferrel chegam a latitudes próximas de 50° ou 60° com uma forte componente zonal de oeste, os predominantes de oeste (*westerlies*) (VAREJÃO, 2005).

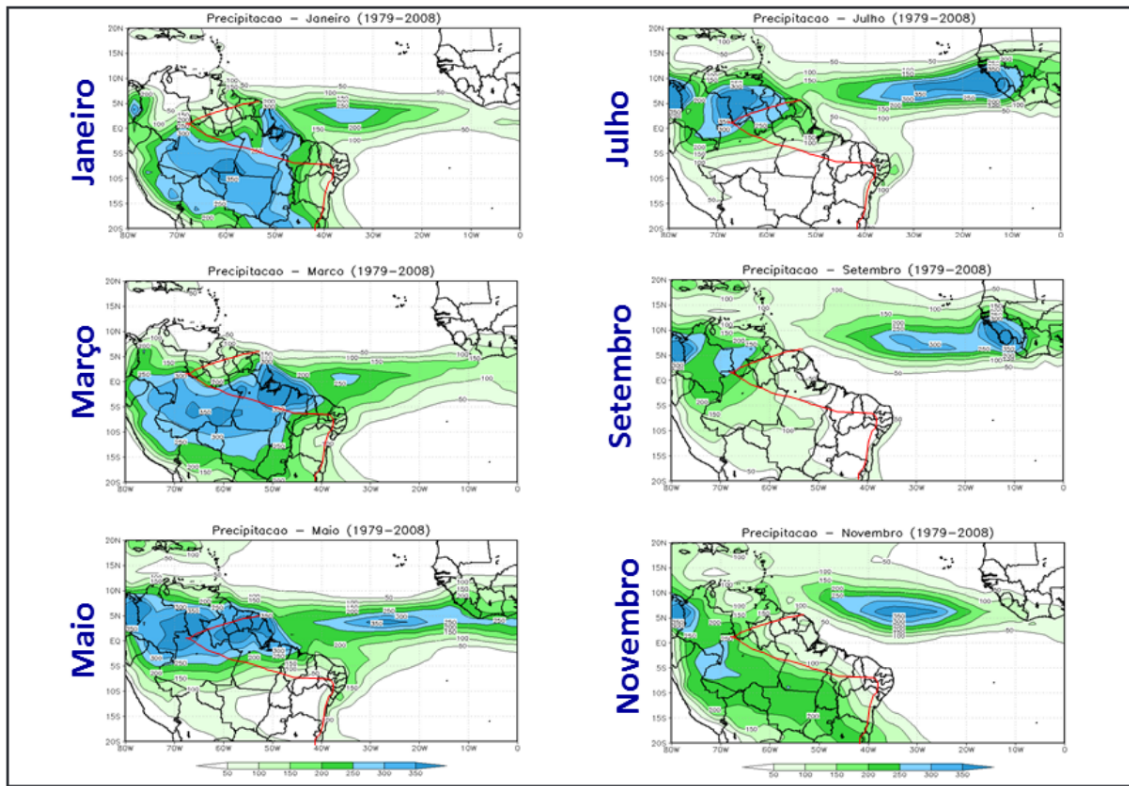
Os ventos predominantes de oeste, ao convergirem com os ventos polares de leste formam uma zona frontal, conhecida genericamente como "frente polar". Esta região frontal não é propriamente uma zona contínua de baixas pressões à superfície. O ar frio oriundo da região circumpolar depara-se com o ar quente proveniente dos subtropicais, favorecendo a formação de núcleos ciclônicos conhecidos como ciclones extratropicais, os quais são isolados, migratórios e estão associados à intensos movimentos verticais ascendentes, alta nebulosidade e precipitação abundante (VAREJÃO, 2005).

2.2 Sistemas atmosféricos atuantes na margem continental brasileira

Sobre a região do Atlântico Tropical, em anos considerados normais, a ZCIT, associada à zona de confluência dos alísios de nordeste e de sudeste, migra sazonalmente de sua posição mais ao norte, em torno de 14°N durante agosto-setembro, para sua posição mais ao sul, a cerca de 2°S durante março-abril (Figura 2.2) (UVO, 1989; MELO et al., 2009). A posição latitudinal da ZCIT tem forte impacto na precipitação da região Nordeste (HASTENRATH; HELLER, 1977; CITEAU et al., 1988; UVO et al., 1998, entre outros).

O anticiclone semipermanente sobre o Atlântico Sul é chamado de Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). A ASAS alcança sua posição mais ao norte e à

Figura 2.2 - Localização da ZCIT com base em dados médios mensais de precipitação (mm) entre 1979 a 2008.



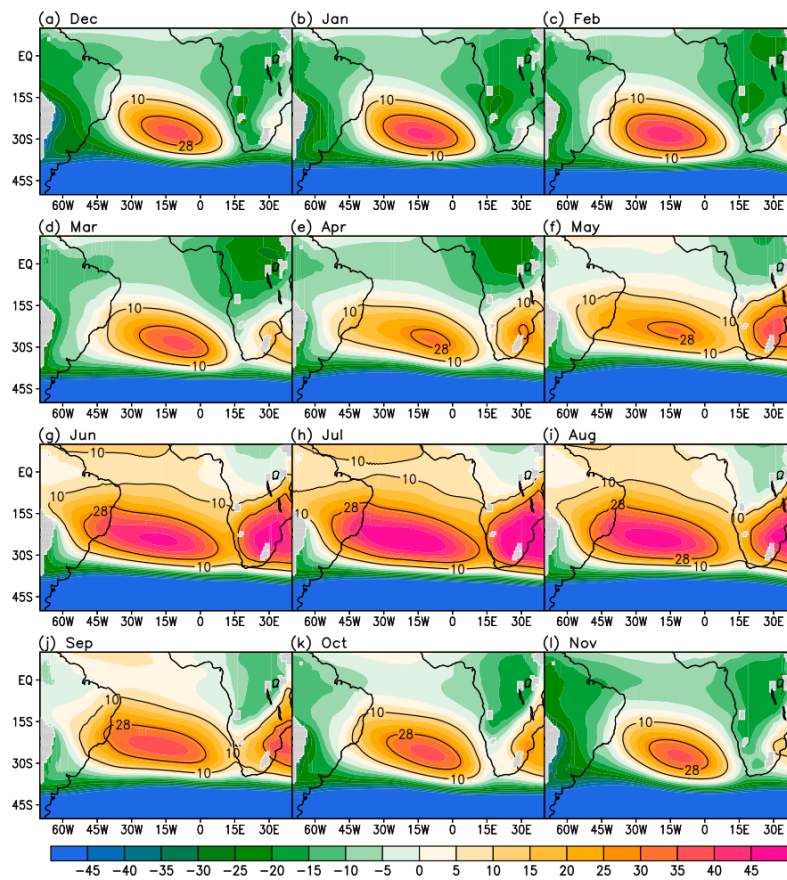
Fonte: Adaptado de Reboita et al. (2010).

oeste durante os meses de inverno, apresentando também uma maior intensidade e extensão zonal (Figura 2.3g-i). No final do verão a ASAS fica mais ao sul e ao centro da bacia oceânica, apresentando uma maior extensão meridional (Figura 2.3c) (HASTENRATH, 1991; MÄCHEL et al., 1998; RODWELL; HOSKINS, 2001; SEAGER et al., 2003; SUN et al., 2017). A ASAS contribui com ventos de nordeste para a margem continental brasileira que são mais constantes durante a primavera e verão.

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é caracterizada como uma banda de nebulosidade e chuvas com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde a Amazônia até o sudeste do Brasil, principalmente durante o verão, e frequentemente, sobre o Atlântico Subtropical (CARVALHO; JONES, 2009). A ZCAS forma-se ao longo do jato subtropical, estando a leste de um cavado semipermanente situado a sudeste da banda de convecção associada a monção tropical (KODAMA, 1992).

Associados à oscilações de meso-escala, os sistemas frontais deslocam-se junto à ciclo-

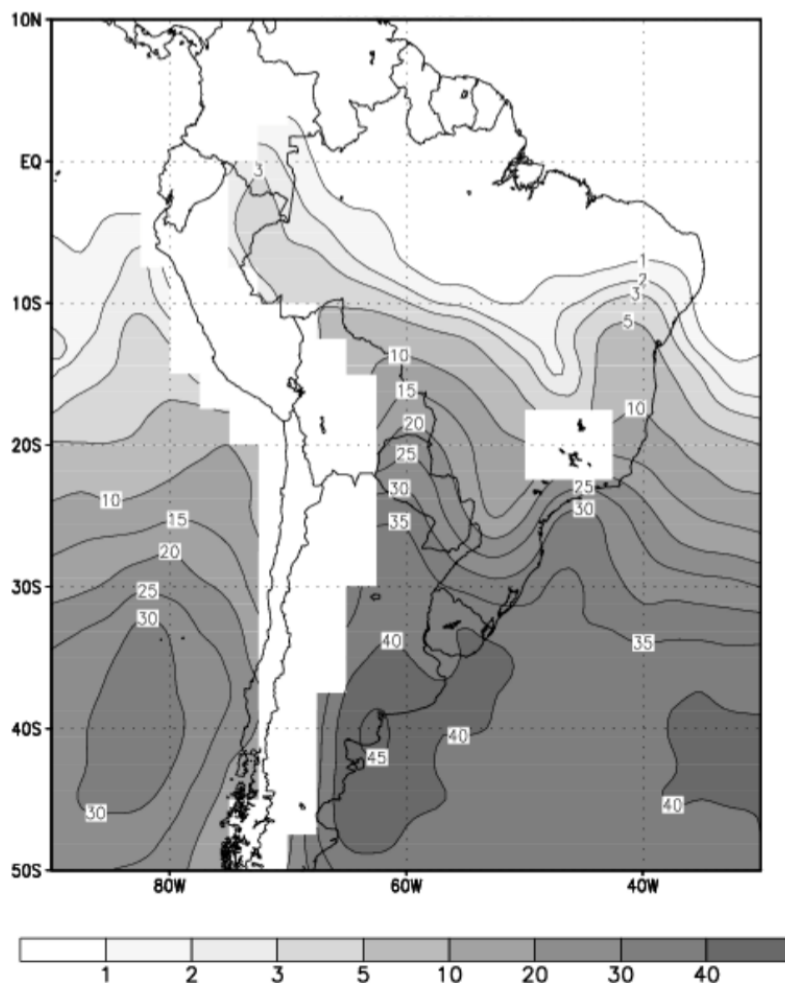
Figura 2.3 - Cobertura da ASAS com base em médias climatológicas mensais (1979–2015) de altura geopotencial escalonada (gpm) a 850 hPa.



Fonte: Adaptado de Sun et al. (2017).

nes e anticiclones pós-frontais, alterando os campos de pressão atmosférica, de vento, e de outras variáveis atmosféricas no decorrer de sua trajetória (WALLACE; HOBBS, 2006). Entre 30°S e 50°S, concentram-se as zonas de maior ocorrência de frentes frias sobre o Atlântico Sul-Sudoeste, principalmente nas zonas costeiras da Argentina e Uruguai (Figura 2.4) (CAVALCANTI; KOUSKY, 2003; CAVALCANTI; KOUSKY,). A costa sul-sudeste do Brasil e a região entre o extremo sul do Brasil e a costa da Argentina são regiões favoráveis à formação de ciclones (Figura 2.2) (NECCO, 1982a; NECCO, 1982b; GAN; RAO, 1991; SINCLAIR, 1994; SINCLAIR, 1995; HOSKINS et al., 2005; REBOITA, 2008). Estes sistemas causam ventos fortes, precipitação e diminuição da temperatura.

Figura 2.4 - Médias anuais de passagem de frentes frias (1979-2000).

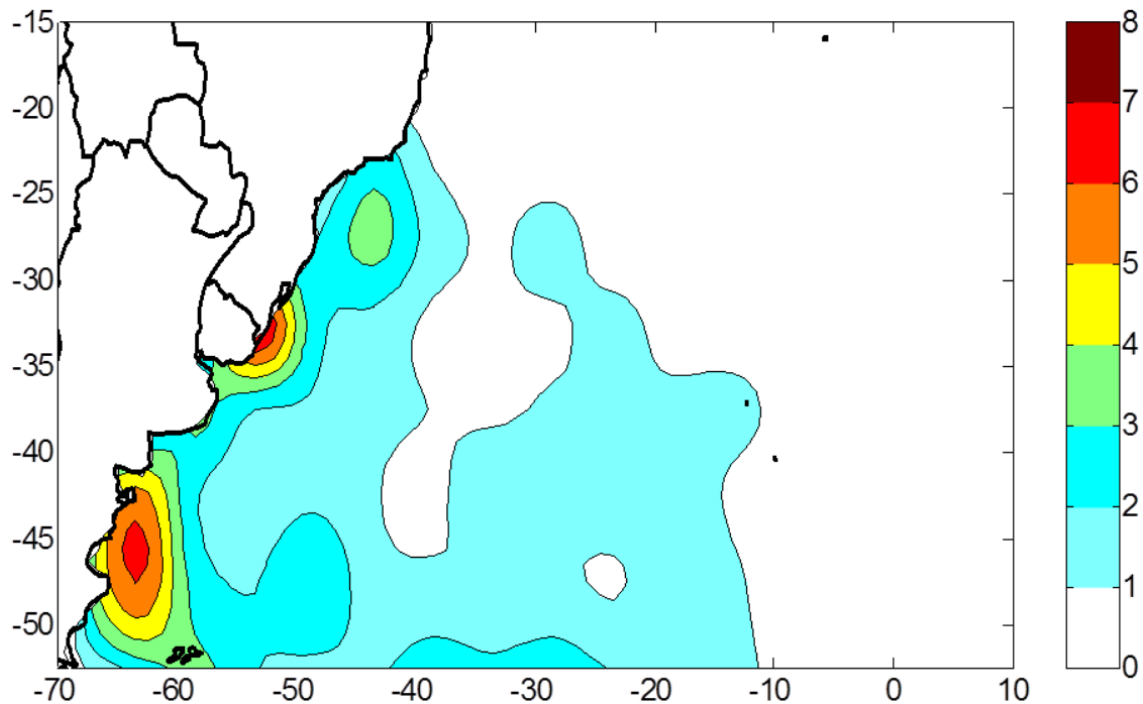


Fonte: Adaptado de Cavalcanti e Kousky (2003).

2.3 Circulação oceânica superficial sobre a margem continental brasileira

A circulação oceânica ao longo da margem continental brasileira é composta principalmente pelas correntes geradas na bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE), a qual compõe a parte norte do Giro Subtropical do Atlântico Sul, sendo alimentada pela Corrente de Benguela (PETERSON; STRAMMA, 1991). No ramo norte da bifurcação da CSE ao encontrar o Cabo de São Roque, dá origem à Corrente Norte do Brasil (CNB). O ramo sul, a partir de 10°S dá origem à Corrente do Brasil (CB) (Figura 2.6). A CNB é a mais forte das duas e flui para o hemisfério norte e é responsável por águas do sul do Atlântico para o norte. A CB, em comparação com as outras correntes de contorno oeste ao redor do globo, é relativamente menos intensa

Figura 2.5 - Regiões favoráveis à ciclogênese no Atlântico Sul-Sudoeste. A escala de cores refere-se à densidade ciclogênica anual (10^{-4} km^{-2}).

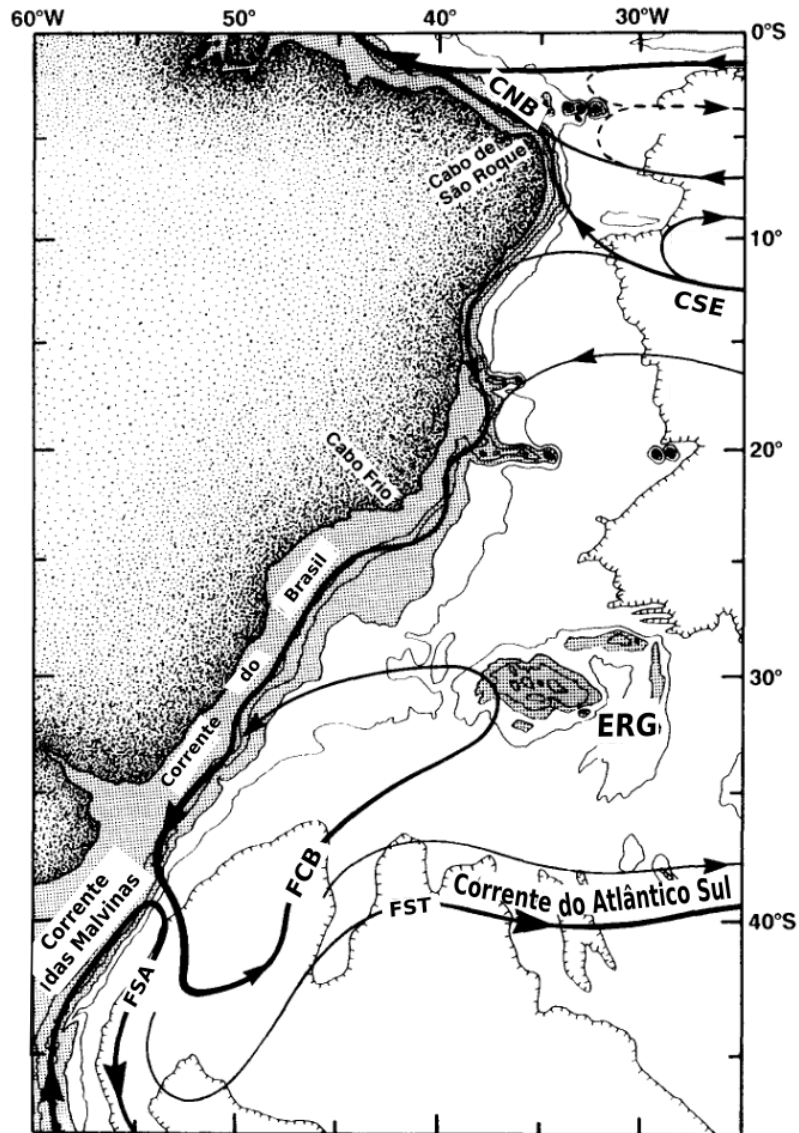


Fonte: Adaptado de Reboita (2008).

e transporta águas quentes e salinas do Atlântico Tropical até encontrar-se com a Corrente das Malvinas, que transporta águas frias e menos salinas, em torno de 38°S (OLSON et al., 1988).

Em regiões costeiras, os ventos alísios dominam a circulação da região tropical ao norte, enquanto ao sul, a circulação tem uma grande variação sazonal conforme o regime de ventos (LIMA et al., 1996). Devido a presença de ventos de SO com maior frequência durante os meses de outono e inverno, há o desenvolvimento de uma corrente costeira que flui paralelamente à costa, denominada como Corrente Costeira do Brasil – CCB (SOUZA; ROBINSON, 2004). Esta corrente transporta águas subantárticas diluídas com águas oriundas da drenagem continental do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos (PIOLA et al., 2000; PIOLA et al., 2008; MÖLLER et al., 2008). Registro da chegada de águas da pluma do Rio da Prata já foram observadas em latitudes de até 23°S (CAMPOS et al., 1996).

Figura 2.6 - Circulação oceânica na região da margem continental brasileira (CSE = Corrente Sul Equatorial, CNB = Corrente Norte do Brasil, FCB = Frente da Corrente do Brasil, FSA = Frente Subatártica, FST = Frente Subtropical, ERG = Elevação Rio Grande).



Fonte: Adaptado de Peterson e Stramma (1991).

2.4 Medições do vento sobre a superfície do mar

2.4.1 Medidas *in situ*

Medições do vento sobre a superfície do mar realizadas diretamente *in situ* podem ser obtidas através de anemômetros instalados tanto em boias fundeadas quanto

em navios ou outras plataformas flutuantes. Os primeiros registros de observações de ventos oceânicos foram providas por navios de oportunidade (COLIN; GARZOLI, 1987). A partir destes dados foi possível descrever a variabilidade sazonal do vento sobre o Atlântico Tropical (BUNKER, 1976; HASTENRATH; LAMB, 1977; HELLERMAN, 1980)

A operação relativamente mais recente de boias fundeadas teve seu início na década de 1940 com o requerimento do *United States Coast and Geodetic Survey* para a instalação de uma boia com telemetria de dados de correntes de maré via rádio. A Marinha dos Estados Unidos desenvolveu uma boia com casco em formato de barco, com 6 metros de comprimento, a qual media a velocidade e direção do vento, temperatura do ar e da água e pressão atmosférica. A transmissão dos dados era feita via Código Morse. Cerca de 20 destas boias foram produzidas e denominadas como *Navy Oceanographic Meteorological Automated Device* (NOMAD) (SOREIDE et al., 2001).

Tendo em vista o alto custo das boias NOMAD, iniciativas para a construção de boias menores foram incentivadas. No final da década de 1950 foram desenvolvidas boias em formato toroidal de menor custo pelo *Woods Hole Oceanographic Institute* (WHOI) com cerca de 2,5 m de diâmetro (SOREIDE et al., 2001). No início da década de 1980 foi desenvolvido o *Autonomous Temperature Line Acquisition System* (ATLAS) pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL) usando flutuadores do tipo toroidal. Além da velocidade e direção do vento, as boias ATLAS também foram equipadas com sensores de pluviosidade, umidade relativa, temperatura do ar, irradiância solar, salinidade, velocidade e direção das correntes e temperatura da água em diversas profundidades.

No final da década de 1980 foi iniciado o programa *Tropical Atmosphere Ocean* (TAO), com o fundeio de um arranjo de boias no oceano Pacífico Equatorial mantido pelo PMEL e pelo *National Data Buoy Centre* (NDBC). Estas boias estão operacionais até os dias de hoje, com o intuito principal de prever o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) (MCPHADEN et al., 1998). Posteriormente, no final da década de 1990 e início dos anos 2000, houve a integração do Programa TAO e *TRIangle Trans-Ocean buoy Network* (TRITON) da *Japan Marine Science and Technology Center*, complementando a rede de boias a oeste de 156°O (<http://www.jamstec.go.jp/jamstec/TRITON>).

Uma rede de boias fundeadas foi também implementada no oceano Atlântico Tro-

pical através do programa *Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA). O PIRATA (hoje chamado de *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*) foi suportado inicialmente pela parceria entre França (*Office de Recherche Scientifique et Technique Outre Mer*, hoje chamado *Institut de Recherche Pour le Développement*), Brasil (INPE e Marinha) e Estados Unidos (NOAA/PMEL). As primeiras boias PIRATA foram fundeadas no fim de 1997 (SERVAIN et al., 1998). No Brasil, o Programa Nacional de Boias (PNBOIA), administrado pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHN), conta atualmente com boias fundeadas ao longo da plataforma continental basileira, além de boias de deriva lançadas no Atlântico Sudoeste. Mais informações sobre o PNBOIA podem ser encontrados online em <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia>.

2.4.2 Medições por Satélite

A representação espacial de medidas quantitativas do vento na superfície do mar por meio de grades regulares em que cada célula contém um vetor do vento, é comumente chamada de campo de vento. Os sensores orbitais capazes de realizar a aquisição de informações sobre o campo de vento na superfície do mar podem ser passivos ou ativos. Os sensores passivos registram a energia eletromagnética emitida ou refletida pela superfície do mar. Os sensores ativos emitem pulsos de energia eletromagnética, podendo assim, extrair informações tanto pela diferença de intensidade entre os sinais emitido e retornado ao sensor quanto através do tempo comparar a intensidade do sinal retornado ao sensor com o sinal emitido.

2.4.2.1 Rastreamento de nuvens

O rastreamento de nuvens é um método pioneiro da estimativa de ventos por satélite. Conhecido como *cloud-track* ou *cloud-drift*, este método geralmente utiliza dados obtidos por satélites geostacionários (KIDDER et al., 1995). A diferença vetorial da localização das nuvens em imagens sucessivas dividida pelo intervalo de tempo entre as imagens fornece uma estimativa do vetor vento relativo à altitude de movimentação das nuvens.

Hubert e Thomasell (1979) apresentaram uma revisão dos métodos de rastreamento de nuvens que podem ser manuais ou automatizados. No método manual, as nuvens a serem rastreadas são selecionadas individualmente pelo analista, que demarca o centro das nuvens visualmente. A partir do deslocamento do centro das nuvens calculam-se os vetores de vento através de algoritmos de navegação. No método automático, a seleção de nuvens individuais é computacionalmente desfavorável em

relação à seleção de uma área com nuvens contidas, e assim os vetores são estimados a partir da movimentação média das nuvens na área selecionada utilizando o método de correlação cruzada (LEESE et al., 1971; SMITH; PHILLIPS, 1972; PHILLIPS et al., 1972).

Não obstante, nem todas as nuvens se movem passivamente com o vento. Outra questão refere-se a nuvens de grande extensão vertical e de tempestade, como cumulonimbus, que podem evaporar ou crescer em direções independentes da direção do vento. Nuvens formadas orograficamente, nuvens associadas com ondas de gravidade e nuvens de bordas de sistemas frontais também devem ser observadas com cuidado (KIDDER et al., 1995).

2.4.2.2 Sensores passivos de micro-ondas

A geração de ondas pelo vento afeta a emissividade da superfície (MARTIN, 2014). Cox e Munk (1954) explicam que, devido a inclinação e a amplitude das ondas terem uma angulação azimutal distribuída ao longo da direção do vento, a dependência da emissividade em relação ao vento é dividida em duas partes: um termo isotrópico, o qual depende apenas da velocidade do vento (U); e um termo anisotrópico, dependente tanto do vento quanto do ângulo azimutal relativo de visada ϕ_R . Para um ângulo de visada azimutal ϕ de um radiômetro e uma direção do vento ϕ_W , ϕ_R é definido como:

$$\phi_R = \phi_W - \phi \quad (2.1)$$

onde $\phi_R = 0$ na direção de origem do vento (*upwind*).

Para uma superfície oceânica plana onde $U = 0$, a emissividade é função da temperatura e da salinidade, de forma que a dependência máxima da temperatura ocorre em 6 GHz e da salinidade em 14 GHz (MEISSNER; WENTZ, 2004). Conforme a ocorrência da adição de ondas, rugosidade e espuma, forçadas pela intensificação de U , a radiação de micro-ondas emitida é alterada gerando mudanças na emissividade em ambos os modos de dependência de U , isotrópico e anisotrópico.

Segundo Meissner et al. (2011), a emissividade da superfície (e) pode ser representada pela soma de três termos:

$$e = e_0(S, T) + \Delta e_{iso}(U, F) + \Delta e_{dir}(U, \phi_R) \quad (2.2)$$

O primeiro termo se refere à emissividade da superfície especular $e_0(S, T)$, a qual é uma função da temperatura (T), da salinidade (S) e da frequência de observação

(MEISSNER; WENTZ, 2002). A emissividade isotrópica $\Delta e_{iso}(U, F)$ é o segundo termo, sendo função de U e da extensão da fração da área observada coberta por espuma (F , do inglês *foam*). O terceiro termo é a emissividade anisotrópica $e_{dir}(U, \phi_R)$, a qual é dependente de U e ϕ_R .

Considerando que as distribuições das ondas capilares e gravitacionais geradas pelo vento variam simetricamente com o ângulo do azimute em relação à direção do vento, a emissividade da superfície varia com o ângulo do azimute e com os quatro parâmetros de Stokes (MARTIN, 2014). As polarizações vertical (V) e horizontal (H) da radiação recebida pelas antenas dos sensores de micro-ondas referem-se aos dois primeiros parâmetros de Stokes. O terceiro e o quarto parâmetros de Stokes são a parte real e imaginária da correlação entre as polarizações V e H, respectivamente. Portanto, através de um único ϕ , a direção do vento só pode ser estimada considerando os quatro parâmetros de Stokes (MARTIN, 2014). Um sensor passivo de micro-ondas com esta capacidade é o WindSat a bordo da plataforma orbital Coriolis (GAISER et al., 2004).

Com o primeiro sensor *Special Sensor Microwave Imager* (SSM/I) a bordo da plataforma orbital *Defense Meteorological Satellite Program F08* (DMSP F08) lançado em julho de 1987, tornou-se possível estimar a velocidade dos ventos da superfície oceânica global a partir de um instrumento de micro-ondas passivo (HOLLINGER et al., 1990). O SSM/I mede a energia de micro-ondas nos canais de 19,35, 22,24, 37,0 e 85 GHz. O SSM/I foi instalado em vários satélites: F10 (novembro de 1990), F11 (dezembro de 1991), F12 (agosto de 1994), F13 (março de 1995), F14 (abril de 1997) e F15 (janeiro de 2000). No presente, apenas o SSM/I F15 continua a funcionar em órbita porém não é mais utilizado para estudos climáticos. O *Special Sensor Microwave Imager/Sounder* (SSMIS) é a próxima geração do SSM/I. O primeiro instrumento SSMIS foi lançado a bordo do DMSP F16 em novembro de 2005. Três instrumentos subsequentes do SSMIS (F17, F18 e F19) foram lançados com sucesso em 2006, 2009 e 2014, respectivamente. O SSMIS é também um sistema de radiometria passiva de micro-ondas realizando medições em 24 frequências discretas de 19 a 183 GHz (KUNKEE et al., 2008). Mais informações sobre as missões SSM/I e SSMIS podem ser encontradas em <http://www.remss.com/missions/ssmi/>.

A missão *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) é uma missão em conjunto da *National Aeronautics Space Administration* (NASA) e da *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) que levou a bordo o TRMM Microwave Radiometer (TMI). O TMI foi lançado em novembro de 1997 e parou de coletar dados em abril de 2015

(<http://pmm.nasa.gov/trmm/mission-end>).

Os radiômetros *Advanced Microwave Scanning Radiometer* operou em três satélites: AMSR-J (dezembro de 2002), AMSR-E (maio de 2002) e AMSR2 (maio de 2012). O instrumento AMSR-J parou de funcionar em outubro de 2003. O AMSR-E é uma versão modificada do AMSR-J como um radiômetro passivo de micro-ondas de doze canais e seis frequências (6,9, 10,7, 18,7, 23,8, 36,5 e 89 GHz). O instrumento AMSR-E parou de funcionar em 4 de outubro de 2011. O AMSR2, lançado a bordo da plataforma JAXA *Global Change Observation Mission - W1* (GCOM-W1) em maio de 2012 mede a energia de micro-ondas em múltiplas frequências, variando de 6,9 a 89 GHz (IMAOKA et al., 2012).

O WindSat a bordo da missão Coriolis foi lançado em 6 de janeiro de 2003, e seu principal objetivo foi demonstrar as capacidades de um radiômetro totalmente polarimétrico para medir o vetor de vento da superfície oceânica a partir do espaço. O WindSat opera em 5 frequências: 6,8, 10,7, 18,7, 23,8 e 37,0 GHz. As medições nos canais de 10,7, 18,7 e 37,0 GHz são totalmente polarimétricas e podem ser usadas para recuperar a direção do vento (GAISER et al., 2004). Informações mais detalhadas podem ser encontradas no site da NRL WindSat (www.nrl.navy.mil/WindSat).

2.4.2.3 Escaterômetros

Os escaterômetros são sensores ativos que transmitem pulsos de energia direcional com comprimento de onda (λ) dentro da faixa das micro-ondas. As ondas emitidas por tais sensores são plano-polarizadas, sendo transmitidas e recebidas nos planos horizontal (H) e vertical (V). A captura do sinal que retorna ao sensor é feita a partir da propriedade chamada Seção Transversal Normalizada de Radar (NRCS, do inglês *Normalized Radar Cross Section*), geralmente simbolizada por σ_0 , sendo função da razão entre os fluxos de energia emitido e retroespalhado e das características do sensor. σ_0 é dado por:

$$\sigma_0 = \left(\frac{\Phi_R}{\Phi_T} \right) (R_0^4 (4\pi)^3) \left(\frac{1}{\lambda^2 G_0^2 \Delta A_{FOV}} \right) \quad (2.3)$$

onde:

Φ_R é o fluxo radiante retornado;

Φ_T é o fluxo radiante transmitido;

R_0 é a distância entre sensor e o objeto (*range*);

G_0 é a direcionalidade da antena (ganho), dado por $4\pi/\Omega$, sendo Ω o ângulo

sólido; e

A_{FOV} é a área do campo de visada (*Field of View* – FOV).

Os escaterômetros utilizados para o registro de vetores de vento trabalham realizando mais de uma visada sobre a mesma área na superfície do mar com diferentes ângulos azimutais ϕ , diferentes polarizações do sinal e ângulos de incidência (θ) superiores à 15° - 20° (MARTIN, 2014). Tais características são interessantes para avaliar a rugosidade da superfície do oceano, neste caso, as ondas capilares ou quase capilares geradas pelo vento. Os pulsos emitidos com $\theta > 15^\circ$ não apresentam reflexão especular do sinal, que por sua vez apresentam um retroespalhamento em direção à antena do sensor, denominado como espalhamento Bragg (MARTIN, 2014).

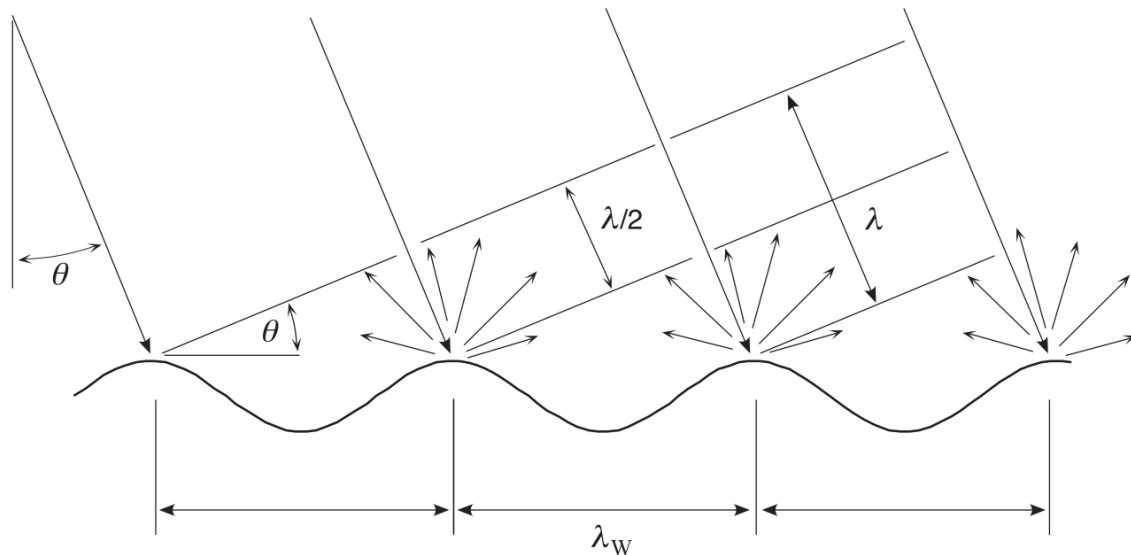
O espalhamento Bragg ocorre quando há uma semelhança entre os comprimentos de onda da radiação incidente e das ondas na superfície do mar. Mais especificamente, o espalhamento Bragg ocorre se o comprimento de onda referente às ondas de superfície (λ_W) for igual a metade da área projetada na superfície do λ do sinal emitido (Figura 2.7, Equação 2.4), ou seja:

$$\lambda_W = \frac{\lambda}{2\text{sen}\theta} \quad (2.4)$$

Se a Equação 2.4 for satisfeita, então a energia refletida para a antena a partir de duas cristas de ondas adjacentes estará em fase, caracterizando um processo de ressonância. Isto quer dizer que as radiações incoerentemente retransmitidas das ondas aumentam de forma coerente na antena, explicando o forte retorno observado para $\theta > 15^\circ$ (MARTIN, 2014). Sabendo que o vento gera um espectro contínuo de ondas curtas na superfície do mar, ondas favoráveis ao processo de ressonância relativo ao espalhamento de Bragg geralmente estão presentes. Conforme o aumento da velocidade do vento e o subsequente aumento da rugosidade da superfície, há uma intensificação de Φ_R promovendo um aumento dos valores de σ_0 (MARTIN, 2014).

A determinação dos vetores de vento com base nas mensurações de σ_0 , para diferentes azimutes e polarizações, requer conhecimento sobre a relação funcional entre σ_0 e os ventos próximos da superfície. Esta relação é denominada como Função de Modelo Geofísico (GMF, do inglês *Geophysical Model Function*) (MARTIN, 2014). A forma mais geral da GMF se dá a partir de σ_0 como função da polaridade (P), do ângulo de incidência (θ), de U e de ϕ_R . Com isso, a comparação da GMF para cada medição de σ_0 em diferentes azimutes e polarizações, permite estimar a velocidade e direção do vento. Devido a dependência de σ_0 , as GMF são específicas para o λ do pulso radar (MARTIN, 2014).

Figura 2.7 - Representação esquemática do espalhamento Bragg na superfície do mar. Interação das ondas superficiais com comprimento de onda (λ_W) igual a metade da área projetada do comprimento de onda (λ) da radiação incidente (setas maiores) em uma determinada angulação de incidência (θ). Setas menores representam o retroespalhamento.



Fonte: [Martin \(2014\)](#).

Históricamente, os escaterômetros da NASA operam dentro da banda Ku, em torno de 14 GHz ($\lambda \approx 2$ cm), enquanto os escaterômetros europeus operam na banda C (5,3 GHz, $\lambda \approx 5,6$ cm). A vantagem da banda C é que, nessa frequência, a transmissividade atmosférica é praticamente igual a 1, enquanto na banda Ku é próxima de 1. Contudo, devido às ondas capilares de gravidade serem mais responsivas a banda Ku, os escaterômetros que utilizam esta banda têm uma sensibilidade maior às mudanças na velocidade do vento, em relação aos que operam na banda C. A desvantagem da banda Ku é que o comprimento de onda mais curto tem uma resposta maior ao impacto das gotas de chuva na superfície do mar, mascarando o efeito da rugosidade gerada pelo vento. A Tabela 2.1 lista as missões passadas e presentes que lançaram sensores escaterômetros a bordo de plataformas orbitais, bem como a frequência de operação e o tempo de funcionamento.

A primeira missão a colocar um escaterômetro em órbita foi a *Ocean Dynamics Satellite* (Seasat) da NASA, com lançamento em junho de 1978, levando a bordo o *Seasat-A Scatterometer System* (SASS). O Seasat esteve em operação por 105 dias. O SASS foi arquitetado para escanear a superfície utilizando 4 antenas e emitindo

Tabela 2.1 - Lista dos satélites lançados com escaterômetros a bordo, contendo a frequência de operação do sensor e datas de lançamento e de término de operação.






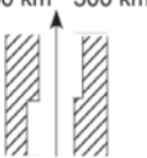
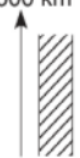
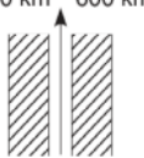
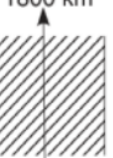
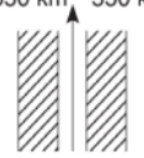
Satélite	Agência	Instrumento	Frequência	Data de Lançamento	Data Final/Estado
Seasat	NASA	SASS	14,6 GHz	jun-1978	out-1978
ERS-1	ESA	AMI	5,3 GHz	jul-1991	jun-1996
ERS-2	ESA	AMI	5,3 GHz	abr-1995	jan-2001
ADEOS-1	NASA/NASDA	NSCAT	14 GHz	ago-1996	jun-1997
QuikSCAT	NASA	SeaWinds-1	13,4 GHz	jun-1999	nov-2009
ADEOS-2	NASA/NASDA	SeaWinds-2	13,4 GHz	dez-2002	out-2003
MetOP-A	ESA	ASCAT-A	5,3 GHz	out-2006	ativo
Oceansat-2	India	OSCAT	13,52 GHz	set-2009	fev-2014
HY-2A	China	SCAT	13,256 GHz	ago-2011	ativo
MetOP-B	ESA	ASCAT-B	5,3 GHz	set-2012	ativo
ISS	NASA/JPL	RapidScat	13,4 GHz	set-2014	ago-2016
ScatSat-1	India	OSCAT	13,52 GHz	set-2016	ativo
CFOSAT	China/França	SCAT	13,256 GHz	out-2018	ativo
MetOP-C	ESA	ASCAT-C	5,3 GHz	nov-2018	ativo

Fonte: Adaptado de [Martin \(2014\)](#).

pulsos de micro-ondas em 14,6 GHz (Figura 2.8) ([JONES et al., 1982](#)). A *European Space Agency* (ESA), por sua vez, lançou o Advanced Microwave Instrument (AMI) a bordo das plataformas orbitais *European Remote-Sensing Satellites* ERS-1 (1991–1996) e ERS-2 (1995–2001). O AMI operava em 5,3 GHz por meio de 3 antenas disposta a direita de sua trajetória, com uma faixa de cobertura (*swath*) em ângulos entre 20° e 50° ([ATTEMA, 1991](#); [FRANCIS et al., 1995](#)). O NASA *Scatterometer* (NSCAT) foi o segundo escaterômetro da NASA em parceria com a *National Space Development Agency* (NASDA) ao lançar o *Japanese Advanced Earth Observing Satellite-1* (ADEOS-1) em 1996, apresentando duas antenas a mais que seu antecessor e uma melhor resolução espacial (Figura 2.8) ([NADERI et al., 1991](#)).

O escaterômetro SeaWinds, lançado a bordo da plataforma orbital a ele dedicada QuikSCAT pela NASA, esteve em operação entre 1999 e 2009. O sensor consiste de uma antena parabólica rotativa (18 rotações por minuto - rpm) de 1 m de diâmetro com 2 geradores de feixes cônicos (*pencil beams*) de 13,4 GHz em diferentes θ ([FORE et al., 2014](#)). O feixe interno opera na polarização HH com θ de 47°. O feixe externo opera em VV com θ de 55° (Figura 2.9). Cada feixe tem um FOV com diâmetro de ≈ 25 km. A largura do *swath* é de 1800 km dividida em duas partes, como observado na Figura 2.9. Nas áreas em cinza escuro os ventos são determinados a partir de

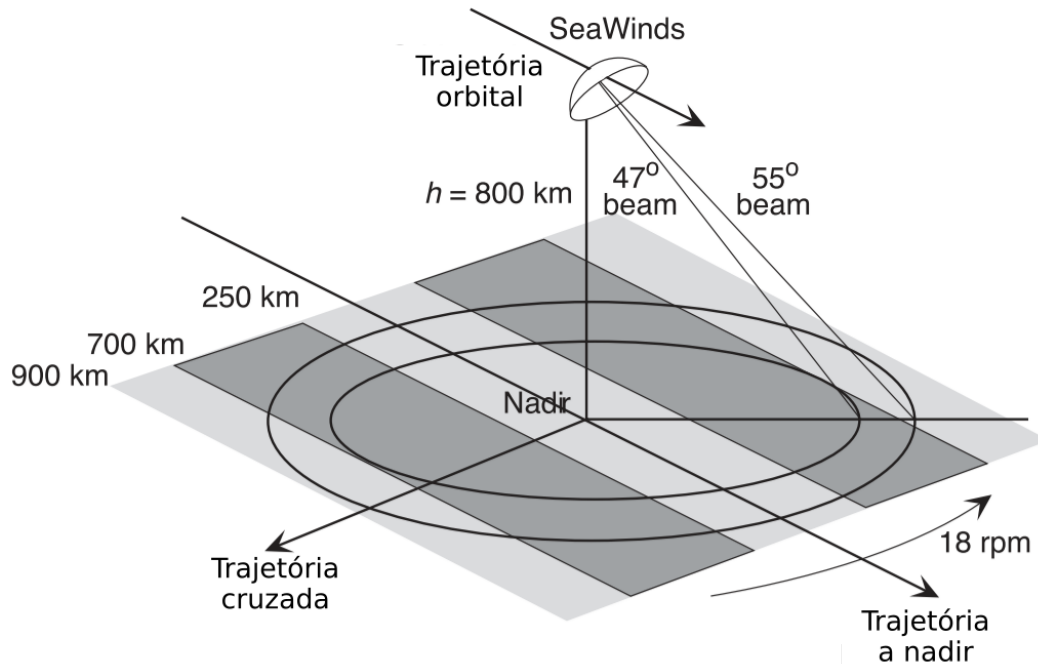
Figura 2.8 - Características dos escaterômetros lançados a partir do SASS/Seasat, incluindo frequência de operação, padrão de observação, ângulo de incidência, resolução espacial, faixa de cobertura, cobertura diária e data de operação.

Instrumento	SASS	AMI (ERS-1, -2)	NSCAT	SeaWinds	ASCAT
Frequência	14.6 GHz	5.3 GHz	13.995 GHz	13.402 GHz	5.3 GHz
Padrão de observação					
Ângulo de Incidência	22°–55°	20°–50°	20°–50°	47°–55°	25°–65°
Resolução Espacial	50 km	50 km	25 km	12.5, 25 km	12.5, 25 km
Faixa de Cobertura (Swath)					
Cobertura diária	Variable	41%	77%	93%	80% (estimado)
Data de operação	1978	1991–2001	1996–97	1999–09, 2002–03	2006– ; 2012–

Fonte: Adaptado de Martin (2014).

quatro visadas, sendo duas do feixe interno e duas do feixe externo. Na parte em cinza claro apenas duas visadas são possíveis. As atualizações mais recentes da GMF para o SeaWinds podem ser encontrados em Fore et al. (2014).

Figura 2.9 - Design conceitual do sensor SeaWinds. Antena rotativa de 1 metro de diâmetro com velocidade angular de 18 rpm. O ângulo de incidência do feixe interno é de 47° e do feixe externo é de 55° . Para a porção cinza escuro de faixa de varredura os ventos são determinados por quatro visadas. Na porção cinza claro o vento é determinado por duas visadas. A largura total da faixa de cobertura é de 1800 km.



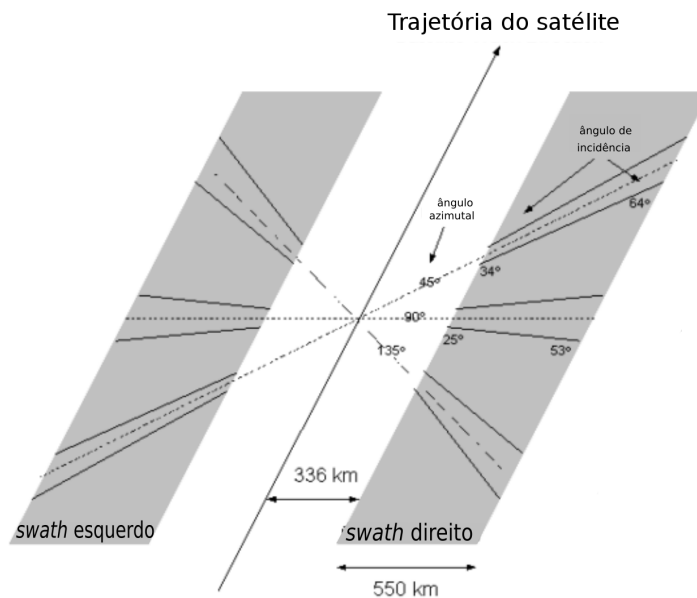
Fonte: Adaptado de [Martin \(2014\)](#).

Desde o SeaWinds, outras agências adotaram o mesmo princípio de operação, utilizando a banda Ku e antenas rotativas em seus escaterômetros, apresentando ajustes para as diferentes altitudes dos sensores ([MARTIN, 2014](#)). Podem ser citados os escaterômetros indiano *OceanSat Scatterometer* (OSCAT) lançado a bordo do *Satellite for the Ocean - 2* (OceanSat-2) em 2009 e do *Scatterometer Satellite - 1* (ScatSat-1) em 2016 e, o chinês SCAT (*Scatterometer*) lançado a bordo da plataforma Hai Yang - 2A (HY-2A) em 2011 e do *Chinese-French Oceanography Satellite* (CFOSAT) em 2018. A NASA *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) foi responsável pelo *Rapid Scatterometer* (RapidScat), que esteve em operação entre 2014 e 2016, a bordo da *International Space Station* (ISS), a qual é fruto da parceria com Rússia, Japão, Europa e Canadá.

A ESA deu início à missão *MÉTéorologie OPérationnelle* (MetOP) em 2006, lançando o *Advanced Scatterometer* (ASCAT) a bordo da plataforma MetOP-A, e na sequência, nas plataformas MetOP-B e MetOP-C, em 2012 e 2018, respectivamente.

O sensor ASCAT opera com dois conjuntos de três antenas retangulares do tipo *fan-beam*, dispostas com os ângulos azimutais de 45° , 90° e 135° emitindo pulsos de micro-ondas em 5,3 GHz na polarização V e captando o pulso de retorno na mesma polarização. Cada conjunto de antenas apresenta uma faixa de varredura (*swath*) de 550 km separadas da trajetória sub-orbital do satélite ≈ 336 km (considerando a altura mínima da órbita de 822 km). O ângulo de incidência varia de 25° a 65° . Para cada faixa, três antenas iluminam a superfície do mar em três diferentes ângulos azimutais, medindo o sinal retroespalhado (Figura 2.10). A *C-band model 7* (CMOD7) é a GMF mais recente utilizada para os escaterômetros que operam na banda C (STOFFELEN et al., 2017). Os produtos de vento ASCAT gerados com aplicação da CMOD7 apresentam desvios-padrão em relação a simulações numéricas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) iguais a 1,16 m/s e $14,7^\circ$ (STOFFELEN et al., 2017). A *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) fornece informações mais detalhadas em EUMETSAT (2015).

Figura 2.10 - Geometria de visada ASCAT para a menor altura da órbita (822 km).



Fonte: Adaptado de EUMETSAT (2015).

A intensidade dos vetores do vento estimadas por escaterômetros é relativa à in-

tensidade do vento medida a 10 m acima do nível do mar para uma estabilidade atmosférica neutra, isto é, na ausência de estratificação atmosférica (BOURASSA et al., 2010). Ainda que a velocidade do vento estimada por escaterômetros se refira a uma condição de estabilidade neutra, as diferenças observadas em relação a medidas *in situ* são relativamente pequenas (MARTIN, 2014). No entanto, a acurácia das estimativas do vento por escaterômetros em situação de ventos fracos ou fortes ($< 2 \text{ m.s}^{-1}$ ou $> 20 \text{ m.s}^{-1}$) pode ser comprometida (ZENG; BROWN, 1998). Em baixas velocidades isto pode estar associado à relação sinal-ruído do sensor (ANDERSON et al., 2012) e ao efeito causado por correntes oceânicas que podem enviesar os ventos derivados pela GMF em relação a medidas *in situ* (ZENG; BROWN, 1998). Em condições de altas velocidades do vento, as comparações das estimativas obtidas com o uso de escaterômetros em relação a medidas obtidas em boias fundeadas podem sofrer influência do efeito de inclinação da boia. Neste caso, aumenta a dificuldade de inferir informação precisa sobre a altura do anemômetro em relação à superfície do mar (ZENG; BROWN, 1998).

2.4.2.4 Radares altímetros

Os radares altímetros são sensores ativos de micro-ondas com visada nadir. Pela medição do tempo de percurso do pulso emitido e refletido pela superfície do mar, informações sobre o nível médio do mar podem ser obtidas depois de aplicadas correções referentes a atenuações atmosféricas e determinação precisa da órbita do satélite. Entre os fatores que afetam o sinal de retorno dos radares altímetros há a influência das ondas geradas pelo vento, causando espalhamento do sinal. A reflexão do sinal emitido e, portanto σ_0 , são inversamente proporcionais à velocidade do vento (ABDALLA, 2014).

Embora se observe uma boa correlação entre σ_0 e a velocidade do vento na superfície do mar, alguns estudos mostram que na presença de *swell* o retroespalhamento do radar pode depender também do estado do mar (MONALDO; DOBSON, 1989; GLAZMAN; PILORZ, 1990; GLAZMAN; GREYSUKH, 1993; LEFEVRE et al., 1994; HWANG et al., 1998; GOURRION et al., 2002). A maioria dos autores utiliza a altura de onda significativa (H_S), obtida rotineiramente por radares altímetros, como medida do estado do mar (ABDALLA, 2014). Gourrion et al. (2002) realizaram um extenso estudo sobre a estimativa da velocidade do vento por radares altímetros e a influência do estado do mar. Estes autores mostraram que a relação entre o retroespalhamento do altímetro TOPEX/Posseidon com a velocidade do vento superficial a 10 m estimada pelo escaterômetro NSCAT variava com relação à H_S .

Os radares altímetros estão em atividade desde 1978 com o lançamento do Seasat e os subsequentes *Geodetic Satellite* (GEOSat), ERS-1, ERS-2, *Topography Experiment - Positioning, Ocean, Solid Earth, Ice Dynamics, Orbital Navigator* (TOPEX-Poseidon), GEOSat-Follow-On (GFO), *Environmental Satellite* (ENVISAT), *Joint Altimetry Satellite Oceanography Network - 1* (Jason-1), Jason-2, Cryosat-2, SARAL, Jason-3, Sentinel-3A, Sentinel-3B e CFOSat. Os altímetros modernos geralmente operam em dupla frequência para estimar também a influência da atmosfera. A frequência primária geralmente está dentro da banda Ku (ERS-1, ERS-2, ENVISAT, série Jason e Sentinel-3). A exceção, o SARAL opera na banda Ka com um λ de cerca de 0,8 cm. A frequência secundária geralmente se dá na banda C (TOPEX-Poseidon, série Jason e Sentinel-3). O ENVISAT utilizava a banda S, $\lambda \approx 9$ cm, como frequência secundária.

2.4.2.5 Radares de abertura sintética

Os radares de abertura sintética são sensores ativos de microondas com princípios físicos de operação similares aos dos escaterômetros. No entanto, as antenas SAR são compostas de muitos elementos transmissores/receptores distribuídos no que é chamado de matriz faseada ativa (JORDAN, 1980; LUSCOMBE et al., 1993; RIENDEAU; GRENIER, 2007), dando uma característica de imageador a estes sensores. As antenas de abertura sintética tem dimensão típica de 10 metros dispostas no sentido da trajetória (*along-track*) e 2 m no sentido perpendicular à trajetória (*cross-track*). O imageamento lateral à trajetória da plataforma é realizado com ângulos de incidência entre 20° e 50°, para evitar a reflexão especular e favorecer o espalhamento Bragg (MARTIN, 2014).

Devido à sintetização da abertura da antena, os imageadores SAR têm a capacidade de operar em uma variedade de modos, podendo alcançar uma resolução espacial na ordem de metros. Com isso, a precisão das medições em regiões marinhas costeiras é muito boa, não sofrendo ruídos devido à proximidade com continente (MARTIN, 2014). Entretanto, a faixa de imageamento SAR é relativamente reduzida, resultando em cenas com menores dimensões para analisar processos meteo-oceanográficos que podem ser de grande escala espacial. Estudos que utilizam dados SAR costumavam ser mais onerosos, considerando que muitos produtos SAR não eram (e ainda não são) de acesso gratuito.

O primeiro SAR a ser lançado esteve a bordo da plataforma orbital Seasat. Após o Seasat como precursor, sensores SAR foram lançados a bordo do ERS-1, *Japanese Earth Remote Sensing satellite* (JERS-1), ERS-2, *Radar Satellite 1* (RADARSAT-1),

ENVISAT, Advanced Land Observing Satellite (ALOS), RADARSAT-2, TerraSAR-X, TerraSAR-X *Add-on for Digital Elevation Measurement (TanDEM-X)*, *Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation - SkyMed* (COSMO-SkyMed) e série Sentinel-1. Lançado recentemente em junho de 2019, a RADARSAT *Constellation Mission* (RCM) é composta por três satélites e opera na banda C (ZHANG et al., 2019).

2.5 Mensuração do potencial geração de energia eólica *offshore*

A grandeza conhecida como densidade de potência (D) representa a quantidade de energia cinética contida pelo vento por unidade de tempo e por unidade área. Tal grandeza é essencial para se estimar o potencial de geração de energia eólica, bem como, as áreas mais propícias ao aproveitamento da energia do vento. A densidade de potência não depende de especificidades técnicas de aerogeradores (MANWELL et al., 2009).

A taxa de fluxo de massa do vento (dm/dt) que atravessa a área (A) dos rotores de uma turbina é função da densidade do ar (ρ) e da velocidade do vento U ($m.s^{-1}$), dada por:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \text{ (kg.s}^{-1}\text{)} \quad (2.5)$$

Considerando a energia cinética do fluxo, a potência do aerogerador (P) é dada por:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho AU^3 \text{ (W)} \quad (2.6)$$

Dessa forma, a energia cinética do vento por unidade de área, referida aqui como densidade de potência, é expressa por:

$$D = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \text{ (W.m}^{-2}\text{)} \quad (2.7)$$

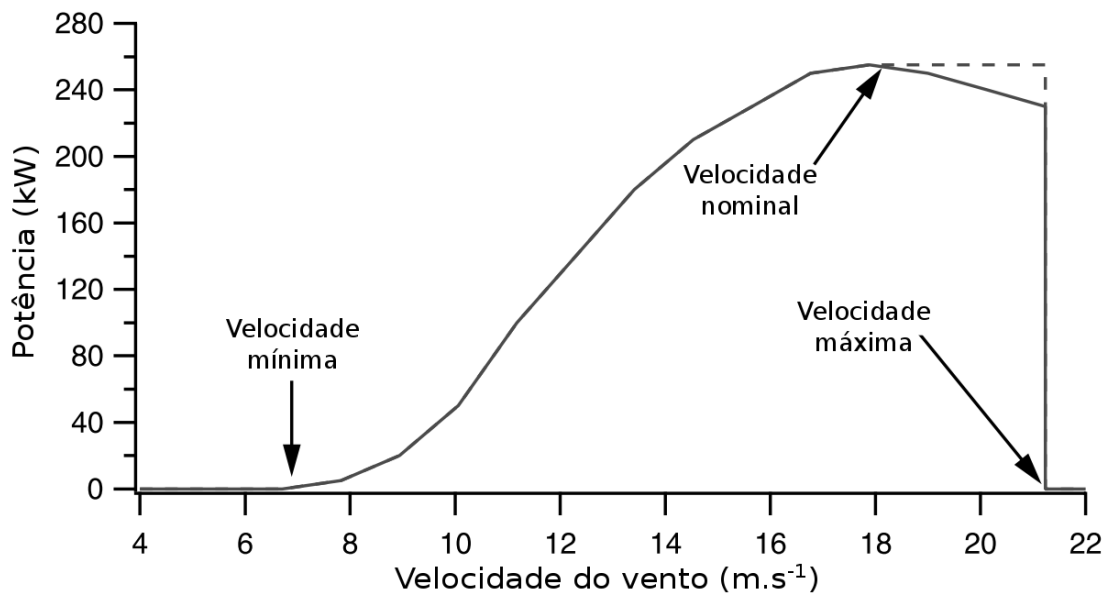
A densidade de potência é diretamente proporcional à densidade do ar ($1,18 \text{ kg.m}^{-3}$, considerando uma temperatura média de 25° C) e ao cubo da velocidade do vento.

Segundo Manwell et al. (2010), áreas consideradas adequadas à produção de energia eólica apresentam uma densidade de potência anual média superior à 200 W.m^{-2} .

No entanto, este valor mínimo pode variar de acordo com a altura do aerogerador. Áreas que apresentam D superiores à 400 W.m^{-2} são consideradas ideais, enquanto que, as que apresentam D superiores à 700 W.m^{-2} são consideradas excelentes para a geração de energia eólica.

Na prática, a potência de um aerogerador, P_w , ao considerar a potência gerada pelos ventos ao atravessar a área do rotor (Equação 2.6) e as especificidades técnicas da turbina, pode ser representada pela curva de potência – $P_w(U)$. A $P_w(U)$ exprime a potência gerada por uma turbina em função da velocidade do vento, ilustrando as velocidades mínima, nominal e máxima de operação do aerogerador (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Curva de potência hipotética de uma turbina eólica, destacando as velocidades mínima, nominal e máxima de operação.



Fonte: Adaptado de Manwell et al. (2009).

Supondo uma série temporal de N observações de velocidade do vento (U_t) num intervalo de tempo, a densidade de potência média (\bar{D}) e a potência média gerada por uma turbina eólica (\bar{P}_w) podem ser estimadas através das seguintes equações:

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1}{2} \rho U_t^3 \quad (2.8)$$

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N P_w(U_t) \quad (2.9)$$

Para se estimar o potencial de geração de energia eólica sobre uma determinada região, [Silva et al. \(2016\)](#) propõem uma metodologia que consiste da estimativa do valor médio de \bar{P}_w para a área de interesse ($\bar{P}_{w,a}$), multiplicado pelo número de turbinas que podem ser instaladas sobre a área. Para se obter o número de turbinas que podem ser instaladas em determinada área é preciso determinar a distância entre elas. [Manwell et al. \(2009\)](#) sugere um espaçamento de dez vezes o diâmetro do rotor na direção predominante do vento e de cinco vezes o diâmetro do rotor no sentido perpendicular a direção predominante do vento, minimizando assim as perdas de energia cinética do vento entre turbinas.

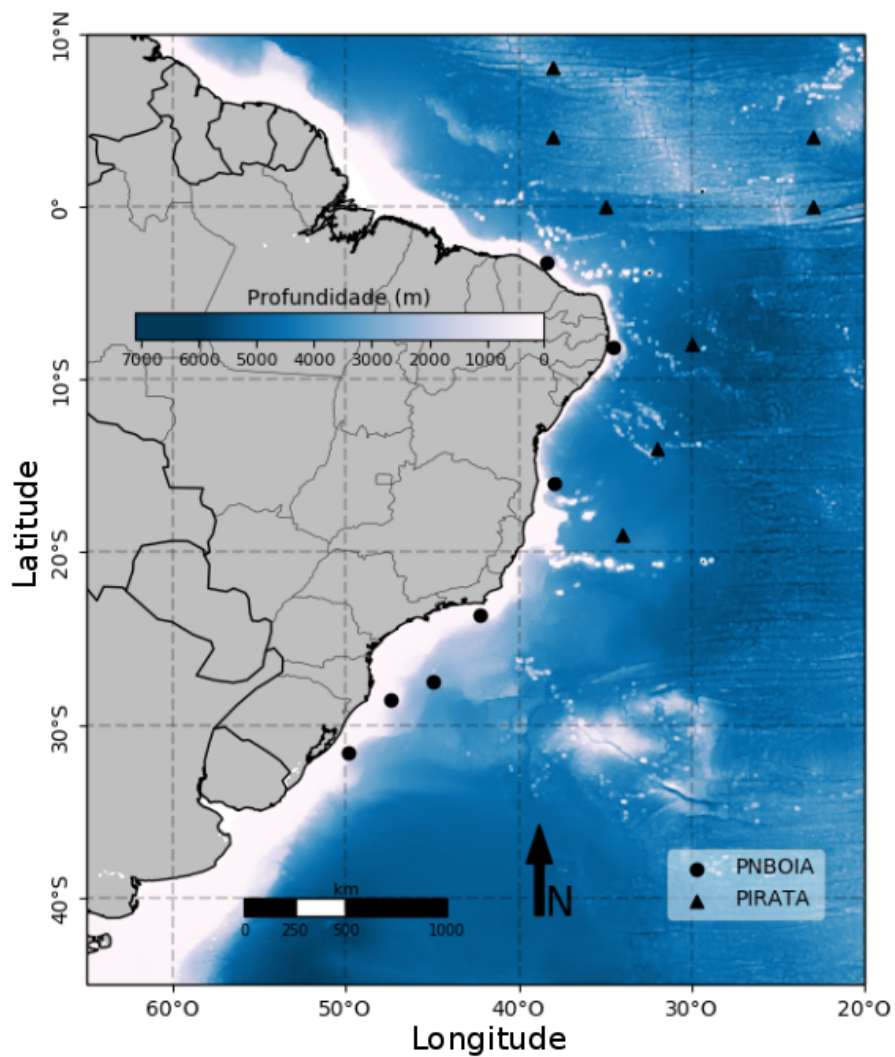
Conhecendo-se a área ocupada por cada turbina, por meio do espaçamento entre elas, e assim, ou número ou a densidade de turbinas por unidade de área (D_t), a área da região de interesse (A_r) e o valor de $\bar{P}_{w,a}$ o potencial de geração de energia eólica (P) pode ser expresso como:

$$P = \bar{P}_{SWT,a} A_r D_t \quad (2.10)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo do presente trabalho está inserida entre as coordenadas 10°N–45°S e 20°O–65°O (Figura 3.1). Neste trabalho, foram utilizados dados de vento medidos por anemômetros em boias fundeadas, estimados por satélite, simulações de previsão numérica, reanálise e de uma base de dados integrada, como descrito a seguir.

Figura 3.1 - Mapa da área de estudo compreendida entre 10°N–45°S e 20°O–65°O, apresentando a localização das boias fundeadas dos programas PIRATA e PN-BOIA.



Fonte: Próprio Autor.

3.1 Bases de Dados

3.1.1 Dados de vento *in situ*

Séries temporais de dados de vento *in situ* medidos por anemômetros instalados em 15 (quinze) boias oceanográficas fundeadas na margem continental brasileira e em regiões de oceano profundo foram obtidas do Programa Nacional de Boias (PN-BOIA) e do projeto *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA). A Tabela 3.1 apresenta o nome aqui dado a cada boia, a localização geográfica (Lat-Lon) e o mês e ano de início e término das séries temporais adquiridas. A localização geográfica das boias também é mostrada na Figura 3.1.

Tabela 3.1 - Nomenclatura, localização e cobertura temporal dos dados das boias mantidas pelos programas PIRATA e PNBOIA

Programa	Boias	Localização	Início	Término
PIRATA	8N38W	8°N 38°O	01-1998	11-2014
	4N23W	4°N 23°O	06-2006	03-2017
	4N38W	4°N 38°O	03-2000	10-2013
	0N23W	0°N 23°O	03-1999	03-2016
	0N35W	0°N 35°O	01-1998	10-2015
	8S30W	8°S 30°O	08-2005	12-2015
	14S32W	14°S 32°O	08-2005	01-2016
	19S34W	19°S 34°O	09-2005	08-2014
PNBOIA	Fortaleza	3.21°S 38.40°O	11-2016	12-2017
	Recife	8.15°S 34.56°O	09-2012	04-2016
	Porto Seguro	15.99°S 37.94°O	07-2012	12-2016
	Cabo Frio 2	23.63°S 42.20°O	07-2016	07-2017
	Santos	27.50°S 44.93°O	04-2011	08-2017
	Itajaí	28.50°S 47.39°O	04-2009	11-2018
	Rio Grande	31.57°S 49.86°O	04-2009	01-2017

PIRATA

Foram obtidos dados de 8 (oito) boias PIRATA localizadas na área de estudo (Figura 3.1, Tabela 3.1) em profundidades entre 1.500 e 6.000 m. As boias são equipadas com um anemômetro mecânico R.M. Young, modelo 05103 (<http://www.youngusa.com/products/11/5.html>) ou com um anemômetro ultrassônico Gill WindSonic (<http://gillinstruments.com/data/datasheets/>

[windsonic-1405-027-iss6.pdf](#)), instalados a 4 m da linha d'água. A mensuração da direção do vento destas boias conta também com medições de uma bússula Sparton SP3004D (<https://sparton.com/>) ou uma bússula fluxgate E.G. & G., modelo 63764, ou KVH LP101-5 (<https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/sensor-specifications>). Dados com resolução temporal de 10 minutos, contendo medições desde 1997, são disponibilizados pelo PMEL no endereço da Internet <https://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdell/>. Após a obtenção dos dados de vento das boias PIRATA citadas acima, a velocidade do vento medida nas boias foi extrapolada para a altura de 10 m de acordo com a metodologia proposta por Smith (1988) (mais detalhes podem ser encontrados na Seção 3.4).

PNBOIA

As 7 (sete) boias do PNBOIA utilizadas neste trabalho estão fundeadas nas proximidades da quebra da plataforma continental, sobre a isóbata de 200m (Figura 3.1, Tabela 3.1). Os dados PNBOIA, mantidos pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHN), foram acessados no endereço da Internet <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa> (último acesso em 11/2018). As séries temporais de dados de vento são fornecidas com resolução temporal horária. A cobertura temporal dos dados acessados vai de 04/2009 a 11/2018 (última data de acesso). As boias contêm 2 anemômetros, sendo um mecânico instalado a 4,7 m da linha d'água e outro sensor ultrassônico instalado a 3,7 m. Mais informações sobre os sensores de cada boia podem ser encontradas no mesmo endereço da Internet de acesso aos dados. A velocidade do vento já é disponibilizada para a altura de 10 m seguindo a metodologia proposta por Liu et al. (1979).

3.1.2 Escaterômetro

Os dados de vento na superfície do mar (VSM) estimados por escaterômetros orbitais e utilizados neste trabalho são derivados do sensor ASCAT, instalado a bordo dos satélites MetOP. Os satélites MetOP-A e MetOP-B estão operacionais desde outubro de 2006 e setembro de 2012, respectivamente, até o presente. Os dados do ASCAT a bordo da plataforma MetOP-C, lançada em novembro de 2018, começaram a ser disponibilizados a partir de 27 de fevereiro de 2019, ainda em fase de testes e não foram utilizados no presente trabalho.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos da EUMETSAT *Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility* (OSI SAF) através do *Royal Netherlands Meteorological Institute*. Três produtos de VSM ASCAT foram obtidos para este estudo:

(i) MetOP-A em nível 2 de processamento (L2), com 12,5 km de resolução espacial, do período 08/2010–10/2018 (ASCAT-A, disponível em: http://projects.knmi.nl/scatterometer/ascat_osi_co_prod/ascat_app.cgi); (ii) MetOP-B, em nível de processamento L2, resolução espacial de 12,5 km, período 10/2012–10/2018 (ASCAT-B, disponível em: http://projects.knmi.nl/scatterometer/ascat_b_osi_co_prod/ascat_app.cgi); (iii) MetOP-A Wind Data Record, nível de processamento L2, resolução espacial de 12,5 km, período 01/2007–03/2014 (ASCAT-CDR, disponível em: http://projects.knmi.nl/scatterometer/ascat_cdr/).

Os produtos ASCAT-A e -B foram processados através da função do modelo geofísico GMF CMOD-5n (HERSBACH et al., 2005) até setembro de 2018. A partir de então, a função GMF CMOD-7 (STOFFELEN et al., 2017) passou a ser utilizada (VERHOEF, comunicação pessoal). O produto ASCAT-CDR é fruto do reprocessamento dos dados ASCAT-A utilizando a GMF CMOD-7 mais recente. Os três produtos, independentemente da GMF utilizada, são otimizados para regiões costeiras (VERHOEF et al., 2012), contendo dados de vento a 10 m acima do nível do mar em grades *along-track* (ao longo da trajetória do satélite) com resolução espacial de 12,5 km, provenientes de 14 ciclos orbitais por dia. Mais informações podem ser encontradas na Seção 2.4.2.3.

3.1.3 Modelo de previsão numérico BRAMS

O Sistema Regional de Modelagem Atmosférica Brasileiro (BRAMS, do inglês *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*) é um sistema de simulação numérica projetado para previsão e pesquisa atmosférica desde escalas regionais até escalas hemisféricas. Baseado no *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), desenvolvido originalmente na *Colorado State University*, o BRAMS era até recentemente, desenvolvido e mantido pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE, pela Universidade de São Paulo e por outras instituições no Brasil e no exterior. O código computacional do BRAMS é um software livre de licença pública geral (CC-GPL). Mais informações sobre o BRAMS podem ser encontradas em <http://brams.cptec.inpe.br/>.

As simulações do BRAMS utilizadas neste trabalho foram fornecidas pelo CPTEC, contendo dados de vento a 10 m em grades com resolução espacial de 5 km e resolução temporal horária. A área de abrangência está compreendida entre 7,6°N - 37,3°S e 62,5°O - 29,6°O. Foram disponibilizados dados referentes aos anos de 2013 a 2015.

3.1.4 Reanálise ERA5

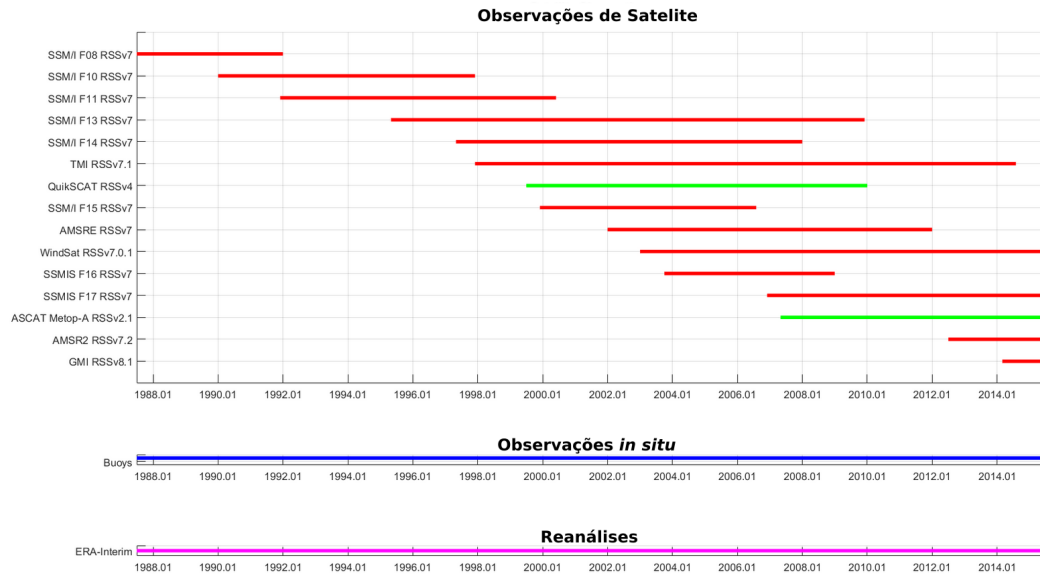
O produto ECMWF *ReAnalysis* ERA5 é desenvolvido pelo *Copernicus Climate Change Service*, implementado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e disponibilizado no endereço da Internet: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era5>. Os dados de reanálise são produzidos pela combinação de previsões numéricas de curto prazo com dados observacionais. O ERA5 é produzido usando a assimilação de dados em quatro dimensões da atmosfera e superfície por meio do *Integrated Forecast System* da ECMWF com 137 níveis verticais em coordenadas sigma (que usam a pressão atmosférica na superfície como referência) em grades com 31 km de resolução para os níveis atmosféricos.

Os dados são disponibilizados com frequência temporal horária para diversas variáveis atmosféricas, incluindo as componentes zonal e meridional do vento e temperatura do ar para a altura de 10 m utilizadas neste trabalho. Os dados foram disponibilizados em julho de 2017, para o período de 01/2000 até 12/2017. Este período deverá ser ampliado oportunamente, cobrindo de 1950 até o presente (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era5>, acesso em junho 2017).

3.1.5 Dados integrados CCMP

O *Cross-Calibrated Multi-Platform* (CCMP) é um produto de VSM considerado de nível 3 de processamento (L3) que utiliza dados de vento estimados por satélites, dados medidos *in situ* por boias oceanográficas e simulações de modelo de previsão numérica. A primeira versão do CCMP, descrita em [Atlas et al. \(2011\)](#), foi descontinuada em 2012. A segunda versão do CCMP, utilizada neste trabalho, está descrita em [Wentz et al. \(2015\)](#). Esta base de dados utiliza o Método de Análise Variacional (MAV) para preencher os pontos de grade com ausência de dados ([ATLAS et al., 1996](#); [HOFFMAN, 1982](#); [HOFFMAN, 1984](#)). O MAV gera uma grade de vento em superfície, minimizando uma função objetiva, a qual mede o desajuste dos dados de vento *in situ* e de satélite sobrepostos à base de fundo, considerada como estimativa inicial (ERA *Interim*) ([ATLAS et al., 1996](#)). A Figura 3.2 apresenta a cobertura temporal das diferentes fontes de dados utilizadas para compor o produto CCMP. Os dados de vento a 10 m do produto CCMP são disponibilizados em grades regulares com resolução espacial de 25 km e resolução temporal de seis horas.

Figura 3.2 - Cobertura temporal dos dados utilizados na produção do produto de VSM integrado *Cross-Calibrated Multi-Platform* (CCMP). a) Sensores orbitais passivos (vermelho) e ativos (verde); b) Boias dos programas *Tropical Moored Buoy* (TAO), *Triangle Trans-Ocean Buoy Network* (TRITON), *Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction* (RAMA), *Prediction and Research Moored Array in the Atlantic* (PIRATA) e *Marine Environmental Data Section Canada* (MEDS); c) Reanálise ERA-Interim



Fonte: Adaptado de Wentz et al. (2015).

3.1.6 Batimetria ETOPO

Os dados batimétricos utilizados no presente trabalho fazem parte da base de dados ETOPO1 da *National Centers for Environmental Prediction*. O ETOPO1 é um modelo global de relevo da superfície da Terra que integra a topografia terrestre e a batimetria oceânica, com resolução espacial de um minuto de grau (≈ 2 km), construído a partir de conjuntos de dados globais e regionais.

3.2 Comparações estatísticas dos dados de vento

As séries temporais de dados de vento medidos *in situ* nas boias fundeadas foram consideradas como valor de referência nas comparações estatísticas com as demais bases de dados (ASCAT-A, ASCAT-B, ASCAT-CDR, ERA5, CCMP e BRAMS). As comparações foram feitas considerando-se as coordenadas geográficas das boias e os respectivos pontos de grade ou pixel das demais bases de dados. Foi considerado

um intervalo temporal de 30 (ou 5) minutos em torno do horário de medição do dado *in situ*.

Os dados *in situ* foram separados em três conjuntos – Costeiro (CT), Oceânico (OC) e Completo (CC) com o intuito de se analisar em maior detalhe a qualidade dos produtos de VSM em regiões mais próximas ou distantes da costa. O conjunto Costeiro é composto pelas boias PNBOIA que estão fundeadas em pontos próximos à quebra da plataforma continental brasileira. As boias PIRATA compõem o conjunto Oceânico uma vez que estão fundeadas em regiões relativamente mais profundas e distantes da costa. O conjunto Completo se refere aos dados de todas as boias.

Para a comparação dos dados foi considerado um intervalo de 30 minutos em torno do horário de medição do dado *in situ* pelas boias PNBOIA e de 5 minutos, no caso das boias PIRATA, considerando as respectivas resoluções temporais de registro dos dados *in situ* (horária ou 10 minutos, respectivamente).

Duas abordagens foram realizadas para a comparação dos dados priorizando diferentes critérios. A primeira abordagem comparou somente dados que foram obtidos simultaneamente pelas cinco fontes de dados – boias, ASCAT (dentro da margem de tolerância), BRAMS, ERA5 e CCMP. Uma segunda abordagem comparou todos os dados disponíveis das boias par-a-par com cada uma das demais bases de dados separadamente – ASCAT, BRAMS, ERA5 e CCMP.

Em todos os casos, as comparações foram baseadas nas seguintes métricas estatísticas: raiz do erro médio quadrático (RMSE, do inglês *root mean square error*), viés ou *bias*, coeficiente de correlação de Pierson (R) e desvio-padrão (σ), de acordo com as seguintes equações:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_{e,t} - x_{r,t})^2} \quad (3.1)$$

$$viés = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_{e,t} - x_{r,t}) \quad (3.2)$$

$$R = \frac{\sum_{t=1}^N (x_{e,t} - \bar{x}_e)(x_{r,t} - \bar{x}_r)}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (x_{e,t} - \bar{x}_e)^2} \cdot \sqrt{\sum_{t=1}^N (x_{r,t} - \bar{x}_r)^2}} \quad (3.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \quad (3.4)$$

onde x se refere aos valores de velocidade ou direção do vento no instante de tempo t , r se refere aos dados *in situ* utilizados como referência, e se refere aos dados estimados por satélite.

Na comparação de dados simultâneos foram gerados Diagramas de Taylor (TAYLOR, 2001) para melhor visualização dos resultados. Cabe mencionar que para a comparação de dados simultâneos os dados ASCAT-A, ASCAT-B e ASCAT-CDR são considerados separadamente, devido à dificuldade de casá-los no tempo. Na comparação par-a-par foram gerados histogramas polares (*wind roses*). Os dados das boias são identificados pelo nome da boia PNBOIA ou lat-lon das boias PIRATA, assim como adotado pelos respectivos programas de monitoramento.

3.3 Caracterização da variabilidade dos campos de vento superficial

Estas análises foram realizadas utilizando-se a base de dados CCMP por ser a de maior representatividade temporal (1988 – 2017). Foram calculadas climatologias anuais e sazonais, considerando-se as seguintes estações do ano: Verão = dezembro, janeiro, fevereiro (DJF), Outono = março, abril, maio (MAM), Inverno = junho, julho, agosto (JJA), Primavera = setembro, outubro, novembro (SON).

Foram calculados dois índices de variabilidade: a Variabilidade Anual Média (VAM) e a Variabilidade Inter-Anual (VIA) (STOPA et al., 2013; SOUKISSIAN et al., 2015; SOUKISSIAN et al., 2017). O índice VAM é calculado pela média dos desvios padrões normalizados pelas médias de cada ano da série temporal (Equação 3.5). O índice VIA é calculado como o desvio padrão entre as médias anuais normalizado pela média global da série temporal (Equação 3.6).

$$VAM = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(X_{jk} - \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{jk} \right) \right)^2} \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{jk} \right)^{-1} = \overline{\left(\frac{\sigma_j}{\bar{X}_j} \right)} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
VIA &= \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{jk} \right) - \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{jk} \right) \right) \right]^2} \left(\frac{1}{nm} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{jk} \right)^{-1} \\
&= \frac{\sigma_{\bar{X}_j}}{\bar{X}}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

onde X indica os valores da série temporal da velocidade do vento para um período com m anos e com n medições cada, j e k se referem a cada ano e cada medição, respectivamente. σ é o desvio padrão.

3.4 Extrapolação dos ventos para diferentes alturas de aerogeradores

Para a estimativa do potencial de geração de energia de uma turbina eólica considera-se a velocidade do vento na altura do eixo da turbina. A extrapolação dos ventos para as alturas de 80, 100, 125, 150 e 200 m foi realizada de acordo com o método de [Smith \(1988\)](#), considerando a estabilidade atmosférica como neutra. O perfil do vento sobre o mar depende da rugosidade aerodinâmica da superfície e do gradiente vertical de densidade ou estratificação do ar, de modo que o fator de ajuste da velocidade do vento não é simplesmente uma função da altura ([SMITH, 1988](#)).

O coeficiente de arraste (C_D) é uma medida adimensional para quantificar a resistência de um fluido em contato com outro, neste caso do ar sobre a água, determinado por:

$$C_D = \tau / \rho U_z^2 \tag{3.7}$$

onde τ é a tensão de cisalhamento do vento, ρ é a densidade do ar (adotado o valor de $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$ como constante) e U_z é a velocidade do vento em uma determinada altura de referência z , neste caso $z = 10 \text{ m}$. No entanto, ao se considerar uma estabilidade atmosférica neutra é preciso considerar também a rugosidade da superfície. A altura da rugosidade aerodinâmica da superfície do mar (z_c) se deve principalmente às ondas capilares geradas e mantidas por τ . [Smith \(1988\)](#), baseia-se na equação de [Charnock \(1955\)](#), expressa por:

$$z_c = au_*^2 / g \tag{3.8}$$

onde a é o parâmetro de Charnock (0,011), g é a gravidade (9,8 m.s⁻¹) e u_* é a velocidade de fricção, definida como:

$$u_* = \tau/\rho \quad (3.9)$$

A altura da rugosidade de uma superfície suave (z_s) (BUSINGER, 1973), desconsiderando o efeito das ondas capilares, depende da viscosidade do ar e de u_* :

$$z_s = 0,11v/u_* \quad (3.10)$$

A viscosidade cinemática (v), de acordo com Andreas (1989), é definida por:

$$v = 1,326.10^{-5}(1 + 6,542.10^{-3}T_{a,z} + 8,301.10^{-6}T_{a,z}^2 - 4,84.10^{-9}T_{a,z}^3) \quad (3.11)$$

onde $T_{a,z}$ é a temperatura do ar na altura de referência. A base de dados de temperatura do ar a 10 m utilizada é a do produto de reanálise ERA5 (Seção 3.1.4).

Dessa forma, o C_D em uma estratificação neutra (C_{DN}) é obtido utilizando a soma das alturas de rugosidade:

$$z_0 = z_c + z_s \quad (3.12)$$

$$C_{DN} = [K/\ln(z/z_0)]^2 \quad (3.13)$$

onde $K = 0,4$ é a constante de von Karman. Seguindo as Equações (3.7), (3.9) e (3.13) o perfil logarítmico do vento neutro é determinado por:

$$U = (u_*/K) \ln(z/z_0) \quad (3.14)$$

As bases de dados de velocidade do vento dos produtos VSM ASCAT-A e ASCAT-B foram selecionadas para a extrapolação e, subsequentemente, para o cálculo de densidade de potência.

3.5 Potencial eólico

A partir dos dados de velocidade do vento extrapolados para as alturas de 80, 100, 125, 150 e 200 m, foi calculada a densidade de potência média (\bar{D}) anual e sazonal (DJF, MAM, JJA, SON) de acordo com a Equação 2.8 (Seção 2.5).

Para a estimativa do potencial eólico foi considerado o uso de turbinas Siemens SWT 150-6MW (Tabela 3.2). A curva de potência ($P_w(U)$) deste modelo de turbina não é de domínio público. Esta informação deve ser solicitada formalmente aos fabricantes das turbinas que podem ou não disponibilizá-la em cada caso. Neste trabalho os valores da $P_w(U)$ foram adaptados de Barnaby et al. (2012), a qual está apresentada na Figura 3.3. O cálculo da potência média P_w para cada ponto de grade considerando o uso da turbina Siemens SWT 150-6MW foi realizado de acordo com a Equação 2.9 (Seção 2.5).

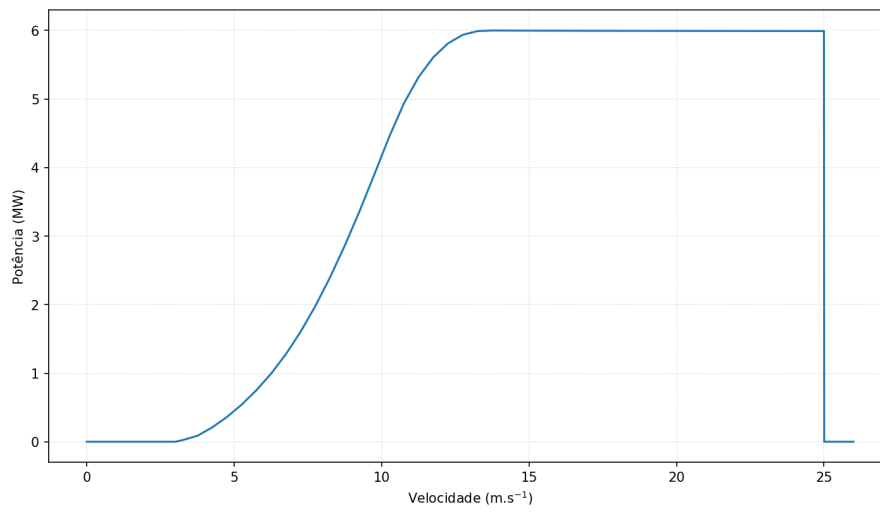
Tabela 3.2 - Especificidades técnicas da turbina Siemens SWT 150-6MW.

Potência nominal	6 MW
Diâmetro do rotor	150 m
Área varrida pelo rotor	17860 m ²
Altura do eixo do rotor	100 m
Velocidade mínima de funcionamento	3 m.s ⁻¹
Velocidade máxima de funcionamento	25 m.s ⁻¹

Duas abordagens de estimativa do potencial de geração de energia eólica *offshore* (P) foram realizadas para regiões da margem continental brasileira com profundidades de até 50, 100, 150 e 200 m. A primeira abordagem foi realizada seguindo a metodologia de Silva et al. (2016), descrita na Seção 2.5. A segunda abordagem consiste da geração de uma grade de pontos relativos à posição de instalação das turbinas. O espaçamento utilizado para geração da grade foi de 750 e 1.500 m, equivalentes a 5 ou 10 vezes o diâmetro da turbina nos eixos zonal e meridional, respectivamente, como sugerido por Manwell et al. (2009). Para os pontos da grade que estiveram contidos nas geometrias das áreas de interesse, foram recuperados os valores de P_w e somados, como expresso na Equação 3.15.

$$P = \sum_{i=1}^N \bar{P}_{SWT,i} \quad (3.15)$$

Figura 3.3 - Curva de potência da turbina Siemens SWT 150-6MW



Fonte: Próprio Autor.

onde i representa cada turbina e N o número total de turbinas instaladas em cada região.

4 RESSULTADOS E DISCUSSÃO

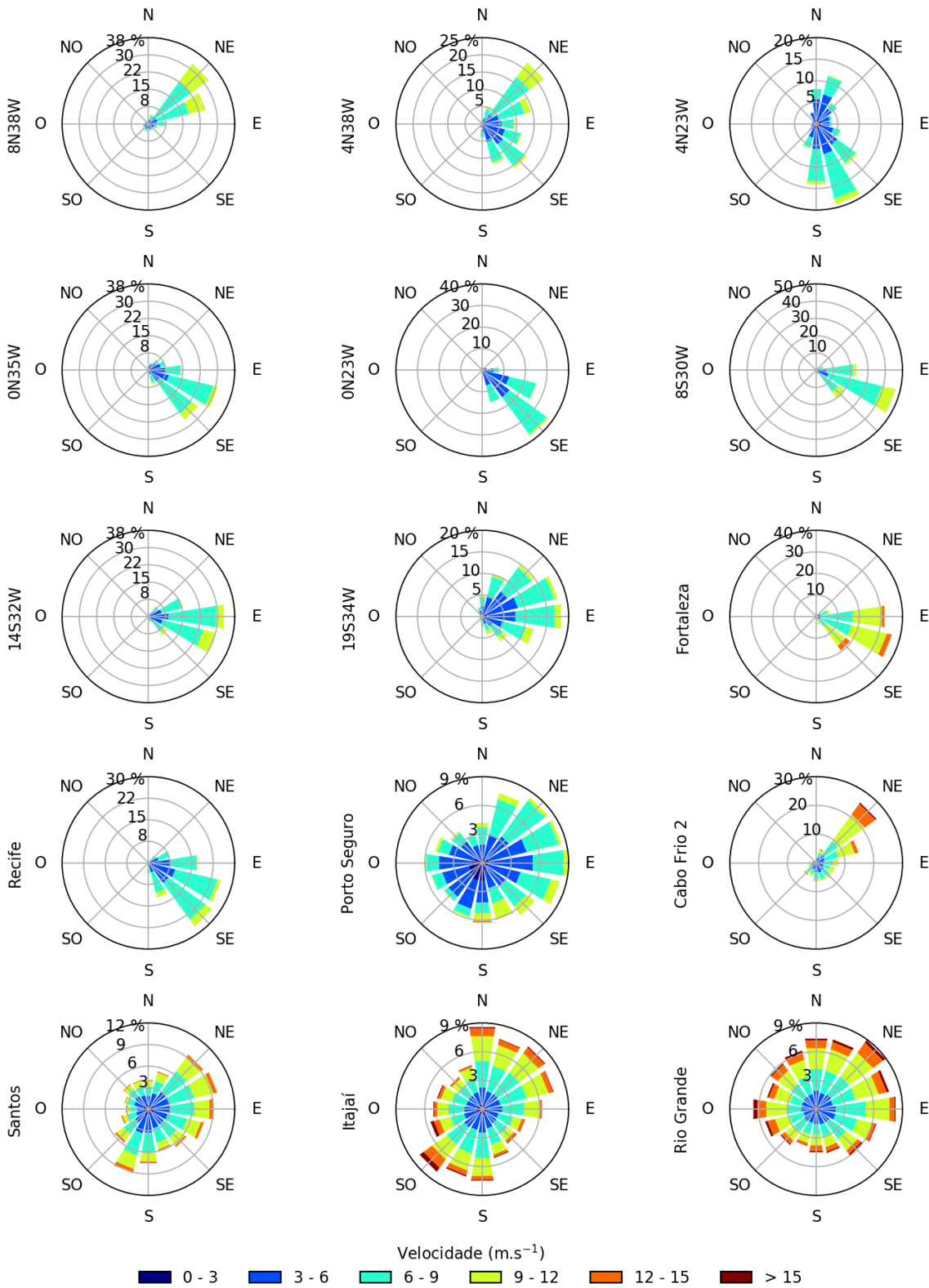
4.1 Dados de vento *in situ*

Com relação às boias do programa PIRATA (grupo OC), é possível observar por meio dos respectivos histogramas polares pouca variação dos quadrantes de incidência do vento, com exceção das boias fundeadas na zona de oscilação norte-sul da ZCIT (HASTENRATH; LAMB, 1977; CITEAU et al., 1988) (Figura 4.1). A boia mais a norte (8N38W) apresenta ventos dominantes de NE e as boias 4N23W e 4N38W apresentam duas direções predominantes de ventos NNE – SSE e NE – SE, respectivamente. Estas boias também apresentam desvios-padrão da direção relativamente altos em relação às demais, entre $52,6^\circ$ e $82,1^\circ$ (Tabela 4.1). As boias 0N35W e 08S30W apresentam ventos dominantes de ESE e a boia 0N23W de SE. As boias 14S32W e 19S34W apresentam ventos dominantes de E-SE e E-NE, respectivamente.

Tabela 4.1 - Valores médios (\pm desvios-padrão) da velocidade e direção, máximos e mínimos da velocidade dos dados de vento medidos nas boias fundeadas dos programas PIRATA e PNBOIA. As direções médias em graus estão apresentadas de acordo com a convenção oceanográfica.

Programa	Boias	Média		Máximo	Mínimo
		Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Vel. (m.s ⁻¹)
PIRATA	8N38W	6,78 \pm 2,60	244 \pm 60,0	20,6	0,00
	4N23W	5,38 \pm 2,17	307 \pm 82,1	32,3	0,00
	4N38W	6,31 \pm 2,21	274 \pm 52,6	17,9	0,00
	0N23W	5,67 \pm 1,89	306 \pm 35,5	19,0	0,00
	0N35W	6,27 \pm 2,07	288 \pm 38,2	17,1	0,00
	8S30W	7,36 \pm 1,70	290 \pm 20,5	16,3	0,00
	14S32W	6,92 \pm 1,90	276 \pm 28,1	17,1	0,00
	19S34W	6,15 \pm 2,17	254 \pm 52,3	16,5	0,00
PNBOIA	Fortaleza	8,91 \pm 2,19	287 \pm 23,1	16,0	0,43
	Recife	6,53 \pm 1,76	298 \pm 33,3	47,4	0,11
	Porto Seguro	5,53 \pm 2,42	280 \pm 111	16,1	0,11
	Cabo Frio 2	7,52 \pm 3,19	264 \pm 75,0	16,3	0,11
	Santos	6,88 \pm 3,07	290 \pm 102	20,1	0,11
	Itajaí	7,68 \pm 3,41	242 \pm 146	36,3	0,11
	Rio Grande	8,34 \pm 3,58	218 \pm 113	48,9	0,11

Figura 4.1 - Histogramas polares das séries temporais dos vetores de ventos para as boias dos programas PIRATA e PNBOIA. Direções de acordo com a convenção meteorológica.



Fonte: Próprio Autor.

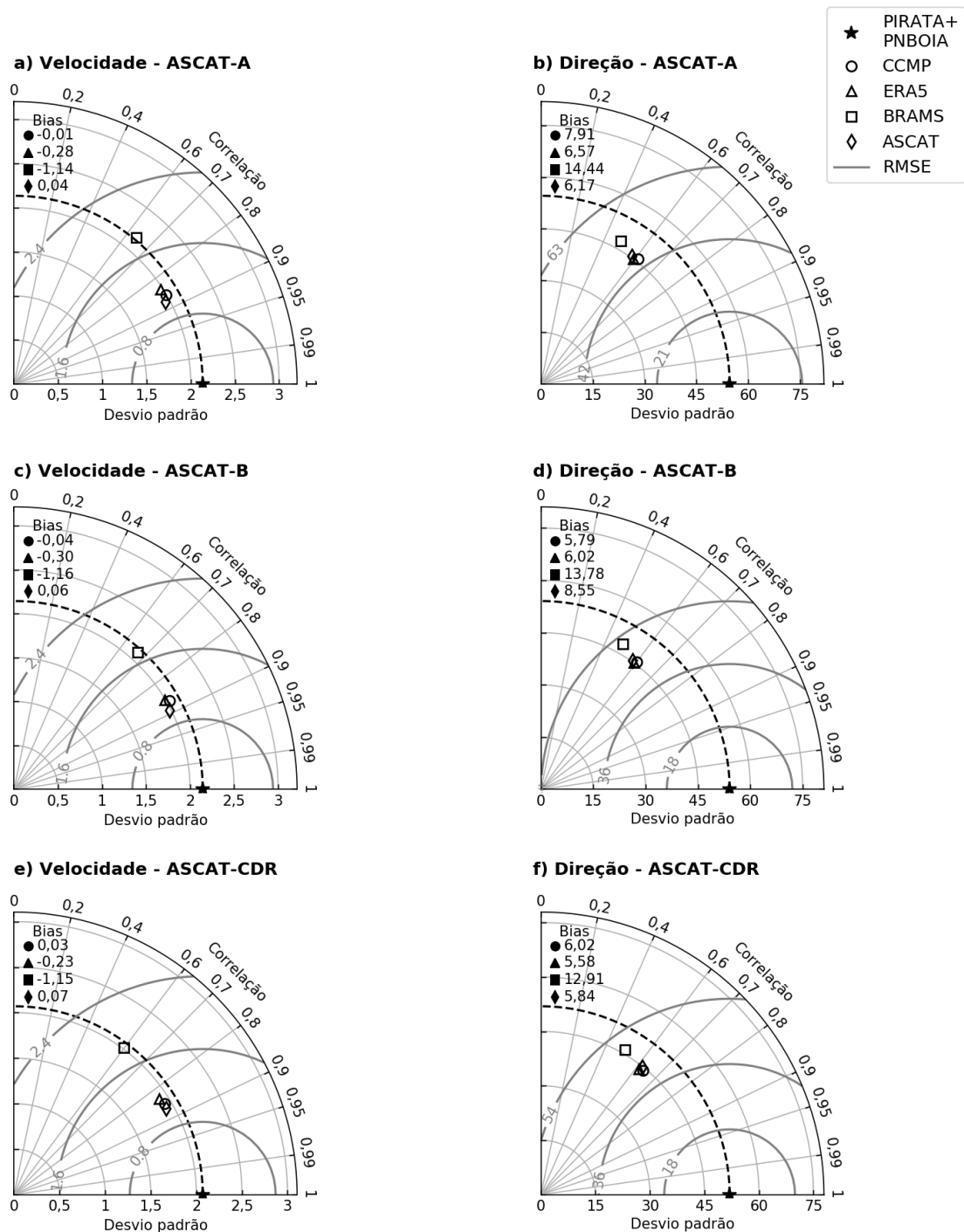
Com relação às boias do PNBOIA (grupo CT), verifica-se que as maiores velocidades médias foram observadas nas boias Fortaleza ($8,91 \text{ m.s}^{-1}$) e Rio Grande ($8,34 \text{ m.s}^{-1}$), seguidas por Itajaí ($7,68 \text{ m.s}^{-1}$) e Cabo Frio 2 ($7,52 \text{ m.s}^{-1}$) (Tabela 4.1). As boias Fortaleza, Recife e Cabo Frio 2 apresentam padrões menos variáveis de direção do vento, com dominância nos quadrantes SE-E e NE, respectivamente (Figura 4.1). Contudo, para a boia Cabo Frio 2 o desvio padrão da média da direção foi de $75,0^\circ$, enquanto que para Fortaleza e Recife os desvios-padrão verificados foram menores, $23,1^\circ$ e $33,3^\circ$, respectivamente (Tabela 4.1).

4.2 Comparações estatísticas dos dados de vento

Os resultados dos três conjuntos de dados analisados de forma simultânea, CC, OC e CT, não divergiram muito com relação às velocidades (Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, Tabela 4.2). Para o conjunto completo de dados, os valores de RMSE, variaram entre $0,98$ e $2,16 \text{ m.s}^{-1}$, considerando todos os produtos de VSM. Comparando os conjuntos Costeiro e Oceânico, observam-se valores de RMSE um pouco menores para OC ($0,91$ para OC e $1,02$ para CT nos melhores casos, respectivamente). Em todos os casos, os maiores valores de RMSE foram obtidos para o produto BRAMS. Para CC, o viés variou entre $\pm 0,30 \text{ m.s}^{-1}$, com exceção das comparações com o produto BRAMS (entre $-1,16$ e $-1,14 \text{ m.s}^{-1}$). Para o conjunto OC, o viés variou entre $\pm 0,19 \text{ m.s}^{-1}$, com exceção do BRAMS (entre $-1,45$ e $-1,40 \text{ m.s}^{-1}$). Para o conjunto CT, o viés variou entre $-0,18$ e $-0,25 \text{ m.s}^{-1}$ para os produtos ASCAT e CCMP e entre $-0,70$ e $-0,48 \text{ m.s}^{-1}$ para os produtos BRAMS e ERA5. As maiores correlações foram obtidas para os produtos ASCAT nos grupos CC e CT ou CCMP no conjunto OC ($R > 0,87$).

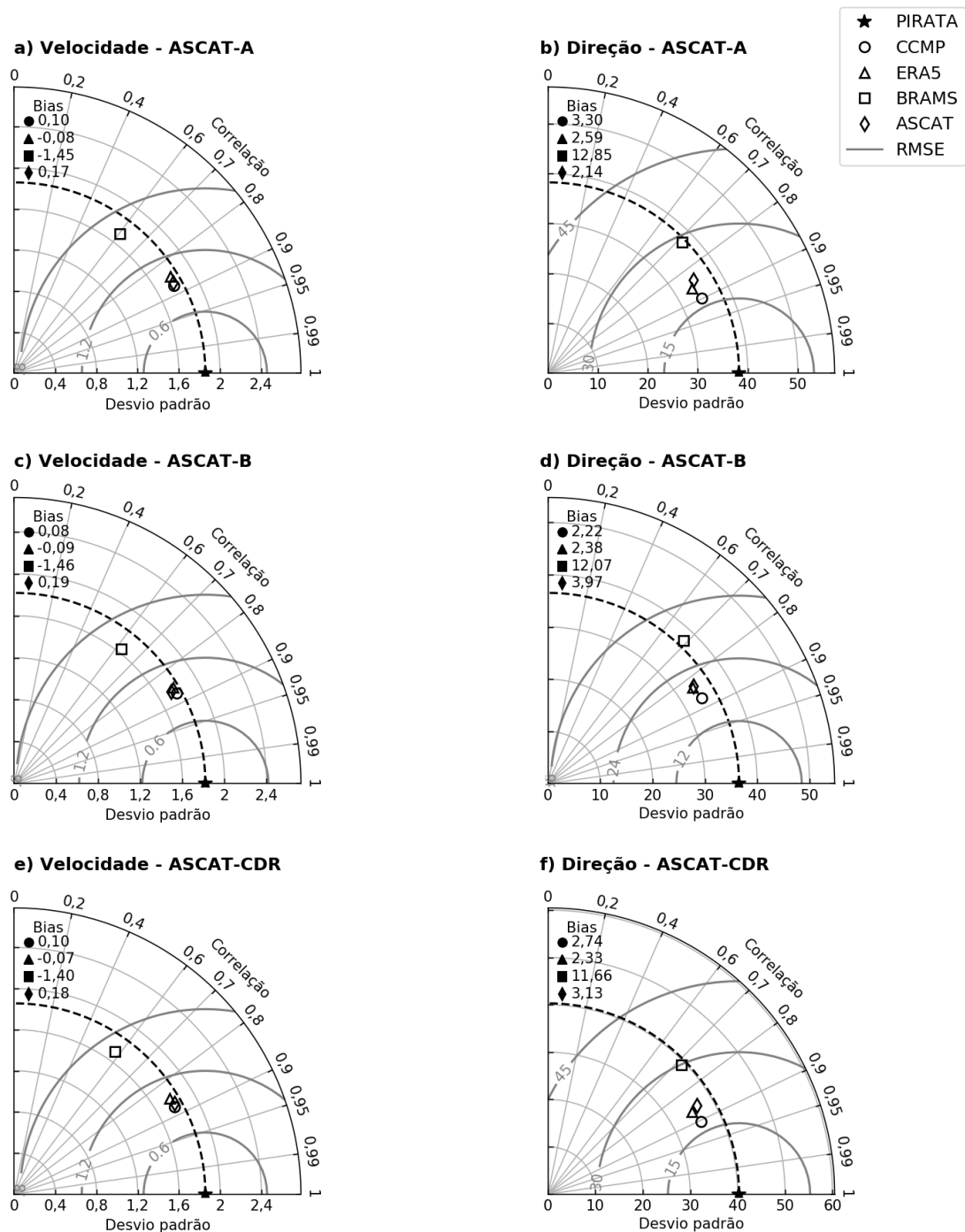
De modo geral, foram observadas diferenças relativamente maiores em relação às direções, especialmente para o conjunto costeiro. Os melhores resultados foram obtidos para o conjunto OC com valores de RMSE $< 55,6^\circ$, viés $< 3,97^\circ$ e correlações $> 0,83$, com exceção do produto BRAMS (RMSE = $61,0^\circ$, viés = $11,7^\circ$, $R = 0,62$, nos melhores casos). Para o conjunto completo de dados, os valores de RMSE e viés variaram entre $87,7^\circ$ e $98,6^\circ$ e $5,58^\circ$ e $14,4^\circ$, respectivamente. As melhores correlações ($R > 0,60$) foram obtidas para o produto CCMP, nos três subconjuntos. Entretanto, para o conjunto CT, foram obtidos valores de RMSE $> 133^\circ$, viés entre $12,6^\circ$ e $17,7^\circ$ e baixas correlações ($< 0,35$).

Figura 4.2 - Diagramas de Taylor para as comparações estatísticas simultâneas do conjunto CC entre os produtos CCMP, BRAMS, ERA5 e ASCAT-A (a, b), ou ASCAT-B (c, d) ou ASCAT-CDR (e, f).



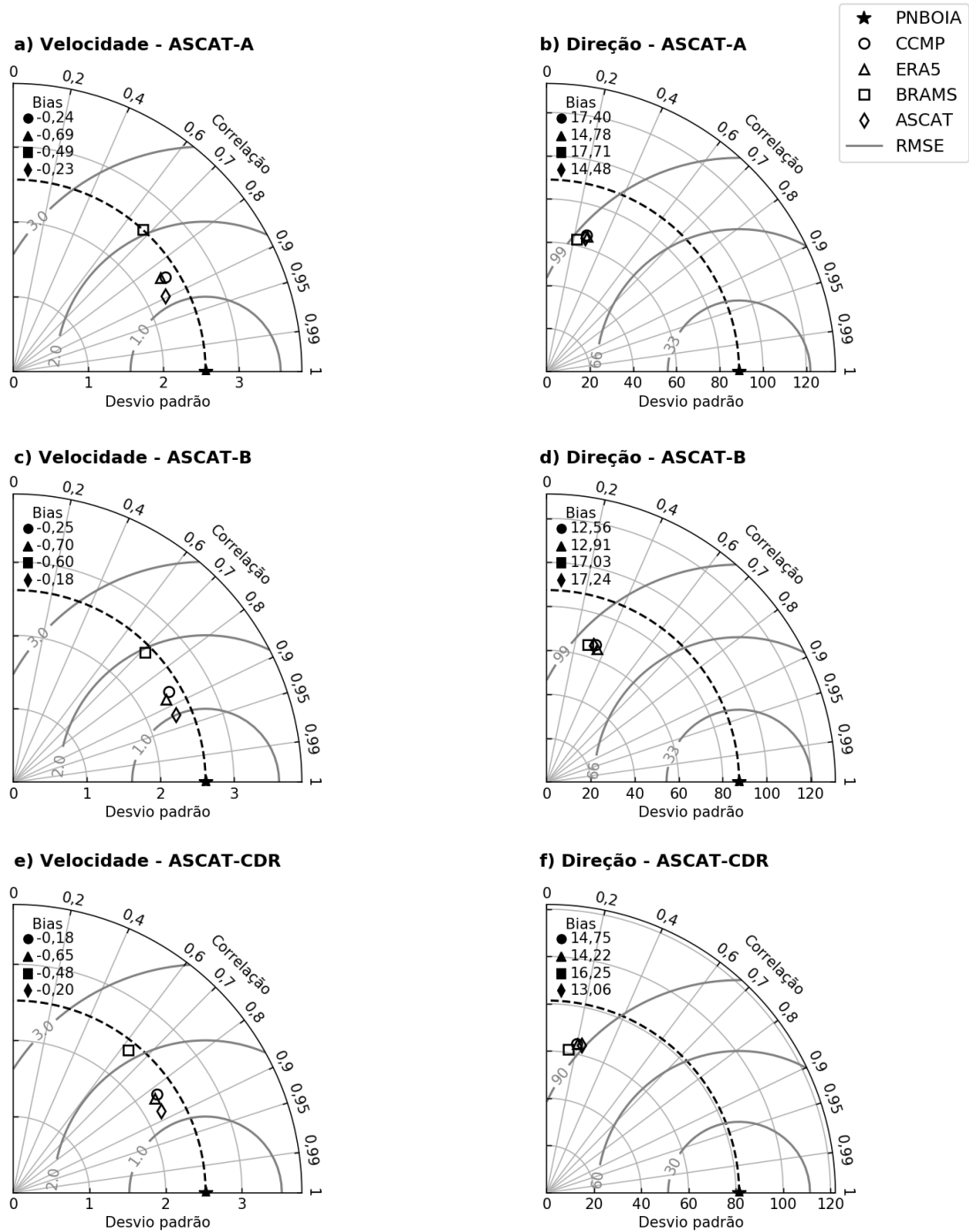
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.3 - Diagramas de Taylor para as comparações estatísticas simultâneas do conjunto OC entre os produtos CCMP, BRAMS, ERA5 e ASCAT-A (a, b), ou ASCAT-B (c, d) ou ASCAT-CDR (e, f).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.4 - Diagramas de Taylor para as comparações estatísticas simultâneas do conjunto CT entre os produtos CCMP, BRAMS, ERA5 e ASCAT-A (a, b), ou ASCAT-B (c, d) ou ASCAT-CDR (e, f).



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4.2 - Resultados das comparações estatísticas dos dados de vento adquiridos simultaneamente pelas boias e produtos VSM para o conjunto Completo de dados (CC), Oceânico (OC) e Costeiro (CT). RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson, σ_{boia} é o desvio-padrão referente às boias, σ_{VSM} é o desvio-padrão referente ao produto de VSM e N é o número de observações. Os menores RMSE e viés, os maiores R e os σ_{VSM} mais próximos de σ_{boia} estão em negrito.

Conjuntos	Produtos VSM	RMSE		viés		R		σ_{boia}		σ_{VSM}		N
		Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	
CC	ASCAT-A	1,03	93,7	0,04	6,17	0,88	0,58	2,14	54,6	1,95	45,5	3809
	BRAMS	2,15	98,6	-1,14	14,4	0,64	0,49	2,14	54,6	2,16	47,4	
	CCMP	1,09	94,3	-0,01	7,91	0,86	0,61	2,14	54,6	2,00	45,9	
	ERA5	1,21	91,8	-0,28	6,57	0,84	0,59	2,14	54,6	1,98	45,1	
	ASCAT-B	0,98	95,9	0,06	8,55	0,89	0,58	2,14	54,1	1,98	45,4	2818
	BRAMS	2,08	98,5	-1,16	13,8	0,67	0,49	2,14	54,1	2,10	47,9	
	CCMP	1,08	88,4	-0,04	5,79	0,87	0,60	2,14	54,1	2,03	45,7	
	ERA5	1,15	87,7	-0,30	6,02	0,86	0,59	2,14	54,1	1,99	45,0	
	ASCAT-CDR	1,03	94,5	0,07	5,84	0,87	0,62	2,07	51,9	1,92	44,9	2489
	BRAMS	2,16	94,7	-1,15	12,9	0,60	0,50	2,07	51,9	2,01	46,2	
	CCMP	1,08	90,8	0,03	6,02	0,86	0,63	2,07	51,9	1,93	44,3	
	ERA5	1,18	90,9	-0,23	5,58	0,83	0,61	2,07	51,9	1,91	43,8	
OC	ASCAT-A	0,95	43,2	0,17	2,14	0,87	0,84	1,86	38,3	1,78	34,5	2564
	BRAMS	2,15	67,3	-1,45	12,9	0,60	0,72	1,86	38,3	1,71	37,6	
	CCMP	0,91	43,6	0,10	3,30	0,88	0,90	1,86	38,3	1,77	34,3	
	ERA5	1,00	43,5	-0,08	2,59	0,85	0,86	1,86	38,3	1,78	33,5	
	ASCAT-B	0,95	55,6	0,19	3,97	0,86	0,83	1,82	36,5	1,73	33,5	1845
	BRAMS	2,10	71,6	-1,46	12,1	0,62	0,69	1,82	36,5	1,64	37,7	
	CCMP	0,91	43,4	0,08	2,22	0,87	0,87	1,82	36,5	1,77	33,6	
	ERA5	0,97	49,2	-0,09	2,38	0,86	0,83	1,82	36,5	1,77	33,2	
	ASCAT-CDR	0,95	46,8	0,18	3,13	0,87	0,86	1,86	40,3	1,79	36,5	1810
	BRAMS	2,16	61,0	-1,40	11,7	0,58	0,72	1,86	40,3	1,70	39,2	
	CCMP	0,91	32,1	0,10	2,74	0,88	0,90	1,86	40,3	1,77	35,7	
	ERA5	1,00	34,6	-0,07	2,33	0,85	0,87	1,86	40,3	1,77	35,0	
CT	ASCAT-A	1,17	151	-0,23	14,5	0,89	0,27	2,56	88,9	2,26	64,5	1245
	BRAMS	2,13	143	-0,49	17,7	0,67	0,22	2,56	88,9	2,56	62,8	
	CCMP	1,39	152	-0,24	17,4	0,85	0,28	2,56	88,9	2,38	66,0	
	ERA5	1,56	147	-0,69	14,8	0,84	0,29	2,56	88,9	2,32	65,3	
	ASCAT-B	1,02	144	-0,18	17,2	0,92	0,32	2,62	87,4	2,39	65,6	973
	BRAMS	2,04	135	-0,60	17,0	0,71	0,28	2,62	87,4	2,52	65,3	
	CCMP	1,35	138	-0,25	12,6	0,87	0,33	2,62	87,4	2,45	66,2	
	ERA5	1,43	133	-0,70	12,9	0,88	0,35	2,62	87,4	2,36	65,0	
	ASCAT-CDR	1,23	163	-0,20	13,1	0,88	0,23	2,52	81,4	2,22	64,3	679
	BRAMS	2,18	151	-0,48	16,3	0,63	0,15	2,52	81,4	2,40	61,2	
	CCMP	1,45	165	-0,18	14,7	0,82	0,20	2,52	81,4	2,28	64,2	
	ERA5	1,55	164	-0,65	14,2	0,83	0,20	2,52	81,4	2,23	64,2	

Com relação às velocidades comparadas par-a-par para o conjunto Oceânico, os menores valores de RMSE para com cada boia variaram entre 0,77 (ASCAT-A) e 1,13 (ASCAT-B)m.s⁻¹ (Tabela 4.3). Os valores de viés obtidos variaram entre -0,73 e 0,43 m.s⁻¹, a exceção do produto BRAMS entre -2,89 e -0,44 m.s⁻¹. Os coeficientes de correlação variaram entre 0,61 (BRAMS) e 0,92 (ASCAT-A). Em relação às direções, os menores valores de RMSE variaram entre 13,7° e 93,5°, referentes aos produtos ASCAT-A, ASCAT-B e CCMP. Os valores de viés obtidos variam entre -6,95° e 25,6°, a exceção de uma ocorrência isolada referente ao ASCAT-B para a boia 8N38W. Os coeficientes de correlação variaram entre 0,57 (BRAMS) e 0,92 (CCMP). De modo geral, os menores valores de RMSE e viés e os maiores valores de R, tanto para velocidade como direção, foram obtidos para os produtos ASCAT e CCMP.

Tabela 4.3 - Resultados das comparações estatísticas de todos os dados de vento disponíveis das boias par-a-par com cada um dos produtos VSM para o conjunto Oceânico (OC). RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson, σ_{boia} é o desvio-padrão referente às boias, σ_{VSM} é o desvio-padrão referente ao produto de VSM e N é o número de observações. Os menores RMSE e viés, os maiores R e os σ_{VSM} mais próximos de σ_{boia} estão em negrito (— = não há pares).

Boias	Produtos VSM	RMSE		viés		R		σ_{boia}		σ_{VSM}		N
		Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	
8n38w	ASCAT-A	0,95	120	0,13	17,5	0,92	0,70	2,38	55,8	2,29	49,8	210
	ASCAT-B	1,21	209	0,43	60,7	0,85	0,77	2,15	87,8	1,83	73,4	58
	ASCAT-CDR	1,04	61,3	0,14	5,70	0,89	0,78	2,25	53,0	2,12	50,0	935
	BRAMS	3,30	103	-2,89	17,4	0,87	0,82	2,73	61,4	1,53	55,1	4649
	CCMP	1,08	71,4	0,05	5,42	0,91	0,81	2,59	59,9	2,47	54,6	15936
	ERA5	1,47	85,5	-0,16	9,99	0,84	0,68	2,61	60,9	2,57	55,5	84682
4n23w	ASCAT-A	0,90	95,7	0,09	10,8	0,87	0,89	1,80	77,5	1,55	74,4	1555
	ASCAT-B	0,93	93,5	0,15	10,0	0,86	0,90	1,81	78,2	1,58	74,2	1067
	ASCAT-CDR	0,91	98,8	-0,004	11,3	0,87	0,90	1,83	75,8	1,52	75,1	1596
	BRAMS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CCMP	1,08	117	-0,10	16,7	0,87	0,89	2,16	81,9	1,99	76,7	14912
	ERA5	1,61	128	-0,73	21,3	0,76	0,84	2,16	82,1	1,86	69,1	89474
4n38w	ASCAT-A	0,84	48,1	0,10	-6,95	0,89	0,90	1,88	46,3	1,71	44,0	536
	ASCAT-B	1,14	48,4	0,38	-6,94	0,86	0,87	2,06	47,3	1,91	42,3	245
	ASCAT-CDR	0,92	47,3	-0,06	-1,20	0,89	0,91	1,99	50,4	1,72	47,4	1455
	BRAMS	2,06	70,0	-1,17	-1,86	0,61	0,82	2,07	51,3	1,70	49,6	15373
	CCMP	1,02	50,2	0,06	1,71	0,89	0,92	2,21	52,6	1,96	47,0	16821
	ERA5	1,48	55,7	-0,28	1,11	0,76	0,86	2,21	52,6	1,87	42,9	100937
0n23w	ASCAT-A	0,77	37,7	-0,33	-0,41	0,88	0,72	1,44	27,2	1,32	25,8	976
	ASCAT-B	0,79	22,8	-0,24	-2,84	0,87	0,71	1,51	27,3	1,37	26,2	597
	ASCAT-CDR	0,88	46,4	-0,37	2,69	0,86	0,76	1,54	31,5	1,36	28,9	1364
	BRAMS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CCMP	0,81	47,8	-0,12	4,11	0,91	0,83	1,90	35,5	1,78	32,0	18121
	ERA5	1,18	53,2	-0,34	2,29	0,81	0,66	1,89	35,3	1,78	29,2	104938
0n35w	ASCAT-A	0,80	30,8	0,06	4,15	0,89	0,77	1,79	32,1	1,64	29,4	1243
	ASCAT-B	0,81	31,3	0,02	-0,37	0,89	0,85	1,81	29,8	1,61	26,4	704
	ASCAT-CDR	0,82	53,4	-0,06	8,95	0,90	0,79	1,85	35,7	1,67	34,2	1451
	BRAMS	2,29	71,0	-1,60	3,80	0,61	0,57	1,98	35,0	1,69	42,8	31539
	CCMP	0,88	27,9	-0,04	1,00	0,90	0,88	2,06	38,2	1,88	33,9	20712
	ERA5	1,23	37,0	-0,18	3,55	0,81	0,76	2,06	38,0	1,83	31,4	114258
8s30w	ASCAT-A	0,90	16,8	0,03	1,25	0,83	0,62	1,57	19,8	1,52	16,0	1371
	ASCAT-B	0,91	14,0	0,10	2,88	0,82	0,68	1,55	17,8	1,49	15,6	813
	ASCAT-CDR	0,88	15,8	-0,02	0,38	0,86	0,65	1,66	19,4	1,64	15,7	1885
	BRAMS	2,27	13,9	-2,06	4,46	0,80	0,72	1,59	18,2	1,05	12,8	34416
	CCMP	0,86	13,7	0,06	0,35	0,86	0,81	1,70	20,7	1,57	15,1	14481
	ERA5	0,98	16,0	-0,03	0,31	0,82	0,71	1,70	20,5	1,55	14,6	86890
14s32w	ASCAT-A	1,05	18,8	0,08	-2,62	0,81	0,73	1,63	25,8	1,71	22,5	968
	ASCAT-B	1,05	19,5	0,18	-3,58	0,83	0,72	1,71	27,8	1,79	22,4	677
	ASCAT-CDR	1,07	34,3	-0,02	2,51	0,81	0,81	1,72	24,4	1,74	22,4	1303
	BRAMS	1,68	47,2	-1,06	19,5	0,73	0,61	1,85	27,5	1,69	26,9	29183
	CCMP	1,01	29,9	0,08	-0,40	0,86	0,84	1,91	27,9	1,90	24,5	11193
	ERA5	1,07	28,8	-0,07	-1,00	0,84	0,80	1,90	28,1	1,82	24,6	67196
19s34w	ASCAT-A	1,25	39,5	0,25	7,11	0,80	0,85	2,02	47,6	1,86	41,1	1114
	ASCAT-B	1,13	75,4	0,26	16,3	0,82	0,83	1,86	43,5	1,75	41,8	502
	ASCAT-CDR	1,25	57,7	0,15	7,67	0,80	0,88	2,04	48,9	1,88	44,7	1873
	BRAMS	1,60	76,6	-0,44	25,6	0,71	0,75	2,06	48,8	1,95	44,7	23074
	CCMP	1,20	56,9	0,19	6,25	0,85	0,91	2,18	52,4	2,10	47,9	12418
	ERA5	1,22	62,8	-0,09	7,32	0,83	0,88	2,17	52,3	2,04	48,7	74507

Com relação às velocidades comparadas par-a-par para o conjunto Costeiro, os menores valores de RMSE para com cada boia variaram entre 0,78 (ASCAT-A) e 1,09 m.s⁻¹ (ASCAT-B). Os valores de viés obtidos variaram entre -1,21 (ERA5) e -0,003 m.s⁻¹ (ASCAT-B) e R entre 0,51 (BRAMS) e 0,96 (ASCAT-A e ASCAT-B) (Tabela 4.4). Os coeficientes de correlação médios variaram entre 0,66 (BRAMS) e 0,91 (ASCAT-B) (Tabela 4.5). Em relação às direções, os menores valores de RMSE vari-

Tabela 4.4 - Resultados das comparações estatísticas de todos os dados de vento disponíveis das boias par-a-par com cada um dos produtos VSM para o conjunto Costeiro (CT). RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson, σ_{boia} é o desvio-padrão referente às boias, σ_{VSM} é o desvio-padrão referente ao produto de VSM e N é o número de observações. Os menores RMSE e viés, os maiores R e os σ_{VSM} mais próximos de σ_{boia} estão em negrito (— = não há pares).

Boias	Produtos VSM	RMSE		viés		R		σ_{boia}		σ_{VSM}		N
		Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	
Fortaleza	ASCAT-A	0,91	46,3	-0,68	0,74	0,96	0,93	2,13	25,7	2,02	26,4	265
	ASCAT-B	0,93	12,7	-0,68	-2,81	0,95	0,94	2,07	26,2	2,02	27,1	263
	ASCAT-CDR	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	BRAMS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CCMP	1,45	31,8	-0,96	-2,47	0,87	0,72	2,18	22,8	1,90	22,2	1521
	ERA5	1,63	23,6	-1,21	-0,22	0,87	0,81	2,19	23,1	2,02	22,4	9125
Recife	ASCAT-A	1,51	18,6	-0,37	-6,68	0,65	0,87	1,91	31,4	1,30	23,7	352
	ASCAT-B	1,01	54,1	-0,30	0,21	0,79	0,79	1,55	33,2	1,32	25,4	347
	ASCAT-CDR	1,21	52,2	-0,36	-4,99	0,64	0,83	1,44	34,2	1,23	25,8	198
	BRAMS	1,74	35,8	-0,72	11,8	0,51	0,69	1,78	33,1	1,35	23,9	19868
	CCMP	1,47	23,7	-0,51	-4,32	0,61	0,76	1,71	33,3	1,29	23,7	3712
	ERA5	1,49	35,0	-0,48	-1,04	0,62	0,78	1,76	33,3	1,32	24,8	21222
Porto Seguro	ASCAT-A	1,14	25,8	-0,17	-0,13	0,83	0,87	1,99	50,1	1,81	44,8	490
	ASCAT-B	1,04	67,0	-0,21	3,86	0,85	0,89	1,92	50,5	1,70	45,6	390
	ASCAT-CDR	1,34	28,1	-0,07	-8,87	0,75	0,88	1,96	50,2	1,84	47,7	271
	BRAMS	1,72	43,0	-0,38	-2,60	0,66	0,84	2,14	51,6	1,88	43,0	9456
	CCMP	1,31	52,5	-0,10	-0,71	0,82	0,87	2,23	52,5	2,14	47,6	2625
	ERA5	1,40	47,7	-0,48	-0,63	0,81	0,89	2,22	52,1	1,97	47,1	15479
Cabo Frio 2	ASCAT-A	0,78	109	-0,06	-1,42	0,96	0,79	2,87	73,2	2,68	65,3	239
	ASCAT-B	0,83	114	-0,10	3,97	0,96	0,70	2,97	70,2	2,75	63,9	247
	ASCAT-CDR	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	BRAMS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CCMP	1,48	100	-0,21	-5,30	0,89	0,68	3,17	75,2	2,81	68,7	1356
	ERA5	1,56	115	-0,78	3,22	0,90	0,74	3,19	75,0	2,90	72,4	7775
Santos	ASCAT-A	1,06	134	-0,32	-4,39	0,92	0,33	2,63	97,5	2,38	67,1	1384
	ASCAT-B	1,01	137	-0,38	-9,08	0,93	0,30	2,55	94,4	2,33	67,2	1044
	ASCAT-CDR	1,01	146	-0,14	-3,72	0,93	0,17	2,73	106	2,42	67,6	619
	BRAMS	2,27	150	-0,20	-9,82	0,71	0,15	3,08	103	2,88	62,5	28910
	CCMP	1,65	149	-0,26	5,52	0,85	0,33	3,08	102	2,82	74,3	7964
	ERA5	1,71	142	-0,78	1,27	0,87	0,34	3,07	102	2,72	72,5	47802
Itajaí	ASCAT-A	1,09	183	-0,40	47,1	0,94	0,60	2,87	107	2,55	93,6	1314
	ASCAT-B	1,09	155	-0,41	49,0	0,94	0,80	2,85	95,9	2,58	94,8	856
	ASCAT-CDR	1,13	174	-0,33	22,5	0,93	0,30	3,02	125	2,71	97,0	638
	BRAMS	2,51	165	-0,88	25,4	0,70	0,23	3,20	132	2,85	80,8	16992
	CCMP	1,69	173	-0,35	41,8	0,86	0,58	3,25	116	2,96	99,6	6550
	ERA5	1,84	168	-0,95	42,8	0,87	0,58	3,24	115	2,91	96,1	38822
Rio Grande	ASCAT-A	1,43	188	-0,10	77,5	0,91	0,67	3,36	101	3,10	94,8	685
	ASCAT-B	0,94	210	-0,003	92,6	0,96	0,69	3,18	98,9	3,06	98,5	652
	ASCAT-CDR	1,59	91,9	-0,04	5,36	0,86	0,78	3,04	94,8	3,00	91,0	170
	BRAMS	2,61	216	-0,61	100	0,73	0,74	3,45	95,6	3,43	85,2	12773
	CCMP	1,87	192	-0,22	71,5	0,85	0,62	3,51	104	3,29	101	4185
	ERA5	1,78	188	-0,68	71,5	0,88	0,67	3,48	102	3,24	98,3	23683

aram entre 12,7° (ASCAT-B) e 155° (ASCAT-B). Os valores de viés variaram entre -9,82° e 100°. Os coeficientes de correlação variaram entre 0,58 e 0,94, a exceção do BRAMS (<0,66) e das comparações para com a boia de Santos (< 0,34) (Tabela 4.4). Os menores valores de RMSE e viés para velocidade foram obtidos para os produtos ASCAT. Em relação às direções, os menores valores de RMSE também foram obtidos para os produtos ASCAT, a exceção da boia Cabo Frio 2, sendo que os menores valores de viés oscilaram entre os produtos ASCAT e ERA5. Os menores valores médios de RMSE e viés, tanto para a velocidade quanto para direção, estiveram distribuídos entre os produtos ASCAT-B e ASCAT-CDR (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Valores médios para os resultados das comparações estatísticas de todos os dados de vento disponíveis das boias par-a-par com cada um dos produtos VSM para os grupos CC, OC e CT. RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson, σ_{boia} é o desvio-padrão referente às boias, σ_{VSM} é o desvio-padrão referente ao produto de VSM e N é o número total de observações. O viés médio representa a média dos valores absolutos.

Conjuntos	Produtos VSM	RMSE		viés		R		σ_{boia}		σ_{VSM}		N total
		Vel.(m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (m.s ⁻¹)	Dir. (°)	
CC	ASCAT-A	1,02	74,3	0,21	12,6	0,87	0,75	2,15	54,6	1,96	47,9	12702
	ASCAT-B	0,99	84,4	0,25	17,7	0,88	0,76	2,10	55,3	1,94	49,8	8462
	ASCAT-CDR	1,08	69,9	0,14	6,61	0,85	0,73	2,08	57,8	1,91	49,8	13492
	BRAMS	2,19	90,2	1,09	20,2	0,70	0,63	2,36	59,8	2,00	47,9	226233
	CCMP	1,26	75,9	0,22	11,2	0,85	0,76	2,39	58,5	2,19	51,3	149682
	ERA5	1,44	79,2	0,48	11,2	0,82	0,73	2,39	58,2	2,16	50,0	873426
OC	ASCAT-A	0,93	50,9	0,13	6,35	0,86	0,77	1,81	41,5	1,70	37,9	7973
	ASCAT-B	1,00	64,4	0,22	13,0	0,85	0,79	1,81	44,9	1,67	40,3	4663
	ASCAT-CDR	0,97	51,9	0,10	5,06	0,86	0,81	1,86	42,4	1,71	39,8	11596
	BRAMS	2,20	63,7	1,54	12,1	0,72	0,72	2,05	40,3	1,60	38,6	138234
	CCMP	0,99	51,9	0,09	4,49	0,88	0,86	2,09	46,2	1,96	41,5	121769
	ERA5	1,28	58,4	0,23	5,86	0,81	0,77	2,09	46,2	1,92	39,5	709518
CT	ASCAT-A	1,13	100	0,30	19,7	0,88	0,72	2,54	69,5	2,26	59,4	4729
	ASCAT-B	0,98	107	0,30	23,1	0,91	0,73	2,44	67,1	2,25	60,4	3799
	ASCAT-CDR	1,26	98,8	0,19	9,09	0,82	0,59	2,44	82,3	2,24	65,8	1896
	BRAMS	2,17	122	0,56	30,0	0,66	0,53	2,73	83,3	2,48	59,0	87999
	CCMP	1,56	103	0,37	18,8	0,82	0,65	2,73	72,5	2,46	62,5	27913
	ERA5	1,63	102	0,77	17,2	0,83	0,69	2,74	71,9	2,44	62,0	163908

Os menores valores médios de RMSE e viés, tanto para velocidade como direção, bem como as maiores correlações para as direções, foram obtidos para as comparações do conjunto OC. No entanto, os maiores valores médios de R para a velocidade foram observados para o conjunto CT (Tabela 4.5). Para os conjuntos CC e CT, os produtos ASCAT-B e ASCAT-CDR apresentaram um melhor desempenho estatístico. Similarmente ao observado para as comparações de dados simultâneos, os maiores valores de RMSE e viés e menores valores de R foram obtidos para o produto BRAMS, considerando todos os conjuntos de dados.

Quando comparados os conjuntos de dados por intervalos de velocidade (Tabela 4.6), a partir de 3 m.s⁻¹, observou-se um aumento dos valores de RMSE e viés das velocidades para os intervalos com velocidades acima de 9 m.s⁻¹, independentemente do conjunto de dados analisado. As correlações para as velocidades do conjunto OC foram maiores dentro dos intervalos intermediários. As baixas correlações para o intervalo de velocidades > 12 m.s⁻¹ para o conjunto OC pode estar relacionada a baixa quantidade de dados para este intervalo nos dados do PIRATA (ver Figura 4.1). Para o conjunto CT, em geral, as correlações aumentam no sentido dos intervalos de maiores velocidades. Os produtos ASCAT apresentam o melhor desempenho para a velocidade em todos os conjuntos de dados e intervalos de velocidade, destacando-se o ASCAT-B. Entre 3 e 6 m.s⁻¹ também se destacam os produtos CCMP e ERA5.

Em relação às direções, o produto ASCAT-CDR apresentou o melhor desempenho

Tabela 4.6 - Resultados das comparações estatísticas dentro dos intervalos de velocidade (3–6, 6–9, 9–12, > 12 m.s⁻¹) de todos os dados de vento disponíveis das boias par-a-par com cada um dos produtos VSM para o grupo OC. Os melhores resultados estão em negrito. (RMSE é o erro médio quadrático, R é o coeficiente de correlação de Pierson)

Conjuntos de Dados	Parâmetro	Prod. VSM	3 – 6 m.s ⁻¹			6 – 9 m.s ⁻¹			9 – 12 m.s ⁻¹			> 12 m.s ⁻¹				
			RMSE	viés	R	RMSE	viés	R	RMSE	viés	R	RMSE	viés	R		
CC	Vel. (m.s ⁻¹)	CCMP	1,02	0,16	0,58	0,94	-0,14	0,62	1,39	-0,68	0,39	2,62	-1,64	0,49		
		ERA5	1,22	-0,07	0,48	1,23	-0,50	0,53	1,75	-1,10	0,34	2,98	-2,13	0,45		
		ASCAT-A	0,97	0,24	0,53	0,85	-0,21	0,66	1,01	-0,51	0,65	2,01	-0,89	0,44		
		ASCAT-B	0,92	0,22	0,56	0,82	-0,18	0,68	1,08	-0,54	0,64	1,15	-0,62	0,81		
		ASCAT-CDR	0,97	0,21	0,52	0,86	-0,21	0,67	1,03	-0,43	0,58	1,76	-0,95	0,58		
		BRAMS	1,65	-0,34	0,25	2,06	-1,46	0,34	2,77	-2,02	0,40	3,69	-2,38	0,25		
	Dir. (°)	CCMP	78,8	6,82	0,85	65,0	4,93	0,89	90,3	9,57	0,82	167	38,9	0,73		
		ERA5	82,6	7,35	0,77	68,2	5,91	0,86	91,7	11,2	0,81	166	39,9	0,72		
		ASCAT-A	94,6	9,05	0,73	84,5	7,67	0,77	112	14,8	0,69	180	48,6	0,72		
		ASCAT-B	99,1	10,7	0,74	83,5	8,26	0,79	131	24,7	0,76	196	58,6	0,79		
		ASCAT-CDR	73,7	5,10	0,79	64,8	3,97	0,84	73,2	2,85	0,75	153	25,5	0,54		
		BRAMS	96,4	12,8	0,48	77,2	10,5	0,58	128	18,7	0,47	194	52,0	0,51		
		OC	Vel. (m.s ⁻¹)	CCMP	0,93	0,15	0,63	0,83	-0,09	0,67	1,20	-0,55	0,35	3,44	-2,66	0,00
				ERA5	1,20	-0,04	0,49	1,17	-0,44	0,55	1,65	-0,94	0,26	4,59	-3,55	-0,19
ASCAT-A	0,93			0,26	0,56	0,81	-0,11	0,68	0,95	-0,28	0,57	2,00	-1,35	0,20		
ASCAT-B	0,92			0,26	0,56	0,76	-0,05	0,70	1,05	-0,27	0,49	2,13	-1,61	0,12		
ASCAT-CDR	0,96			0,21	0,53	0,84	-0,20	0,68	0,97	-0,36	0,56	2,58	-1,81	0,01		
BRAMS	1,51			-0,69	0,33	2,13	-1,74	0,37	3,15	-2,79	0,22	5,30	-4,78	0,02		
Dir. (°)	CCMP		63,1	4,76	0,91	46,9	3,28	0,96	45,9	3,08	0,97	44,5	3,10	0,94		
	ERA5		69,2	5,37	0,82	54,1	4,30	0,93	49,2	4,63	0,95	64,4	6,77	0,84		
	ASCAT-A		59,7	3,24	0,83	50,5	3,82	0,91	36,8	4,62	0,91	19,0	-2,27	0,84		
	ASCAT-B		67,9	4,04	0,84	48,9	3,61	0,92	56,0	6,38	0,89	17,5	7,68	0,94		
	ASCAT-CDR		60,5	4,16	0,85	51,2	4,77	0,93	43,4	4,72	0,95	17,2	-3,76	0,88		
	BRAMS		71,7	12,6	0,62	41,4	9,15	0,78	45,5	9,07	0,85	70,8	13,6	0,59		
	CT		Vel. (m.s ⁻¹)	CCMP	1,45	0,21	0,39	1,40	-0,42	0,47	1,69	-0,94	0,45	2,48	-1,49	0,50
				ERA5	1,35	-0,21	0,43	1,51	-0,85	0,47	1,92	-1,39	0,48	2,69	-1,94	0,50
ASCAT-A		1,06		0,20	0,48	0,92	-0,42	0,66	1,05	-0,65	0,72	2,01	-0,86	0,44		
ASCAT-B		0,91		0,15	0,55	0,90	-0,38	0,67	1,09	-0,64	0,70	1,11	-0,59	0,82		
ASCAT-CDR		1,07		0,23	0,45	1,00	-0,33	0,58	1,23	-0,65	0,64	1,56	-0,79	0,60		
BRAMS		1,86		0,23	0,21	1,90	-0,82	0,33	2,43	-1,43	0,34	3,60	-2,27	0,23		
Dir. (°)		CCMP	135	18,0	0,57	125	14,3	0,60	140	21,8	0,64	178	43,9	0,64		
		ERA5	133	18,0	0,56	120	15,1	0,62	138	23,0	0,65	175	44,1	0,67		
		ASCAT-A	144	21,9	0,52	133	16,6	0,60	139	21,1	0,60	184	50,9	0,70		
		ASCAT-B	137	22,1	0,59	120	15,9	0,68	149	31,1	0,73	199	60,0	0,79		
		ASCAT-CDR	133	11,7	0,44	129	-2,36	0,39	127	-3,04	0,39	166	30,5	-0,01		
		BRAMS	126	13,0	0,32	123	13,5	0,37	166	26,2	0,36	198	53,7	0,47		

das análises de RMSE e viés para o conjunto completo entre todos os intervalos de velocidades. Entretanto, as melhores correlações para os intervalos de velocidade de até 12 m.s⁻¹, dentro do conjunto completo, foram observadas para o produto CCMP (Tabela 4.6). Para o conjunto OC, o produto CCMP apresenta o melhor desempenho nos intervalos intermediários, sendo que, nos intervalos de menores e maiores velocidades os produtos ASCAT apresentam um melhor desempenho (Tabela 4.6). Para o conjunto CT, em todos os intervalos, os menores valores de viés foram observados para o produto ASCAT-CDR, enquanto as maiores correlações foram observadas para o ASCAT-B (Tabela 4.6).

De modo geral, as frequências de ocorrência das velocidades do vento por direção das boias PIRATA (conjunto OC) são muito similares às dos produtos VSM, com exceção do produto BRAMS (ver Anexo A). A mesma concordância também é observada

para as boias Cabo Frio 2 e Fortaleza do conjunto CT (PNBOIA). Maiores diferenças são observadas nas comparações dos produtos VSM com as boias de Santos, Itajaí e Rio Grande. A maior variabilidade das velocidades do vento na região destas boias (Secção 4.3.2) pode ser a causa da menor concordância e o pior desempenho nas comparações estatísticas (Tabela 4.4).

Bentamy et al. (2008) comparou os primeiros oito meses do produto VSM ASCAT-A com dados medidos *in situ* por boias do NDBC, TAO, serviço meteorológico francês Météo-France e inglês UK Met-Office. Utilizando a versão CMOD5 da GMF para estimativa do VSM, aqueles autores encontraram correlações maiores que 0,88, viés menor que $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ e RMSE menor que $1,8 \text{ m.s}^{-1}$. Os valores de R encontrados pelos autores estiveram próximos dos encontrados aqui para os diferentes produtos ASCAT ($> 0,85$ em média), enquanto os valores de RMSE e viés aqui observados foram um pouco melhores ($< 1,26 \text{ m.s}^{-1}$ e $< 0,3 \text{ m.s}^{-1}$ em média, respectivamente).

Verhoef et al. (2012) validaram o produto ASCAT-A otimizado para regiões costeiras utilizando dados de velocidade medidos *in situ* por boias localizadas nos oceanos tropicais e ao longo das costas da América do Norte e Europa. Os autores obtiveram valores de RMSE de $2,2 \text{ m.s}^{-1}$ e viés de $-0,29 \text{ m.s}^{-1}$ para as boias localizadas a mais de 50 km da costa. Para boias localizadas entre 10 e 50 km da costa, os valores de RMSE e viés foram de $2,3 \text{ m.s}^{-1}$ e $-0,23 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente. No presente estudo foram encontrados RMSE $< 1,43$ e viés entre $-0,68$ e $0,25$ para o ASCAT-A. No relatório de validação do ASCAT-B foram encontrados valores de viés de $0,02 \text{ m.s}^{-1}$ (CMOD5.n) e $0,04 \text{ m.s}^{-1}$ (CMOD7), enquanto no presente estudo, os valores de viés variaram entre $-0,68$ e $0,43 \text{ m.s}^{-1}$. No relatório de validação do ASCAT-CDR foram encontrados valores de viés entre $-0,3$ e $0,2 \text{ m.s}^{-1}$, ao realizar comparações com boias para janelas mensais ao longo do período completo de dados. No presente estudo foram encontrados valores de viés entre $-0,37$ e $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ para o ASCAT-CDR.

Carvalho et al. (2017) comparou os produtos ASCAT-A e ASCAT-B otimizados para regiões costeiras com dados *in situ* medidos por boias fundeadas entre 10 e 65 km da costa, ao longo da Península Ibérica, durante o ano de 2013. O autores encontraram valores de RMSE, viés e coeficientes de determinação (R^2) idênticos para as velocidades estimadas por ambos os produtos VSM, $1,26 \text{ m.s}^{-1}$, $0,42 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,93$, respectivamente. Em relação às direções, os valores de RMSE, viés e R^2 foram $28,31^\circ$, $6,95^\circ$ e $0,78$ para o ASCAT-A e $28,49^\circ$, $7,92^\circ$ e $0,76$ para o ASCAT-B, respectivamente.

Carvalho et al. (op.cit.) compararam os dados medidos simultaneamente por boias, com o produto ASCAT-A, simulações numéricas do modelo *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) e dados de reanálise do *National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis* (NCEP-CFSR) e da *NASA-Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications* (NASA-MERRA). O produto ASCAT-A apresentou melhor desempenho com valores de RMSE e R^2 de $1,42 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,91$, respectivamente, para a velocidade e viés de $3,4^\circ$ para a direção.

Em outra comparação simultânea de dados realizada por Carvalho et al. (op.cit.) com o produto CCMP, foram obtidos valores de RMSE, viés e R^2 iguais a $1,77 \text{ m.s}^{-1}$, $0,34 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,84$, para a velocidade e $33,74^\circ$, $5,50^\circ$ e $0,70$, para a direção, respectivamente.

Remmers et al. (2019) comparou dados de velocidade medidos em quatro boias fundeadas ao longo da plataforma continental irlandesa com os produtos ASCAT-A e ASCAT-B, no período entre 2012 e 2017. Os autores obtiveram valores de RMSE, viés e R^2 de $0,90 \text{ m.s}^{-1}$, $0,09 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,90$, respectivamente.

Os valores de RMSE obtidos no presente trabalho nas comparações dos dados de velocidade do vento foram próximos ou menores do que os citados na literatura. Entretanto, os valores de R aqui encontrados, quando convertidos para R^2 (entre $0,38$ e $0,92$), foram um pouco menores do que os citados por Carvalho et al. (2017) e Remmers et al. (2019).

Payan (2010) observou que o produto ASCAT-A superestimou as velocidades do vento medidas por boias localizadas no hemisfério Norte e subestimou as velocidades medidas no hemisfério Sul. Carvalho et al. (2017) e Remmers et al. (2019) também observaram superestimativas dos valores de velocidade estimados por produtos ASCAT-A e ASCAT-B costeiros nas regiões da Península Ibérica e para a Plataforma Continental Irlandesa, respectivamente. No entanto, Verhoef et al. (2012) observaram que o produto ASCAT-A otimizado para a região costeira subestimou as velocidades medidas por boias localizadas no hemisfério Norte.

De modo geral, foi observado no presente trabalho que os produtos ASCAT-A, ASCAT-B e CCMP superestimaram as velocidades do vento medidas pelas boias do conjunto OC, enquanto que os produtos ASCAT-CDR, BRAMS e ERA subestimaram esses valores (Tabela 4.3). Considerando o conjunto CT, todos os produtos VSM subestimaram as velocidades medidas *in situ* (Tabela 4.4). Com relação às comparações feitas por intervalos de velocidade, quase todos os produtos subesti-

maram as velocidades $> 6 \text{ m.s}^{-1}$ e superestimaram as velocidades entre 3 e 6 m.s^{-1} , com exceção do ERA5 para todos os conjuntos de dados e BRAMS para CC e OC (Tabela 4.6).

4.3 Variabilidade espaço-temporal

4.3.1 Climatologias

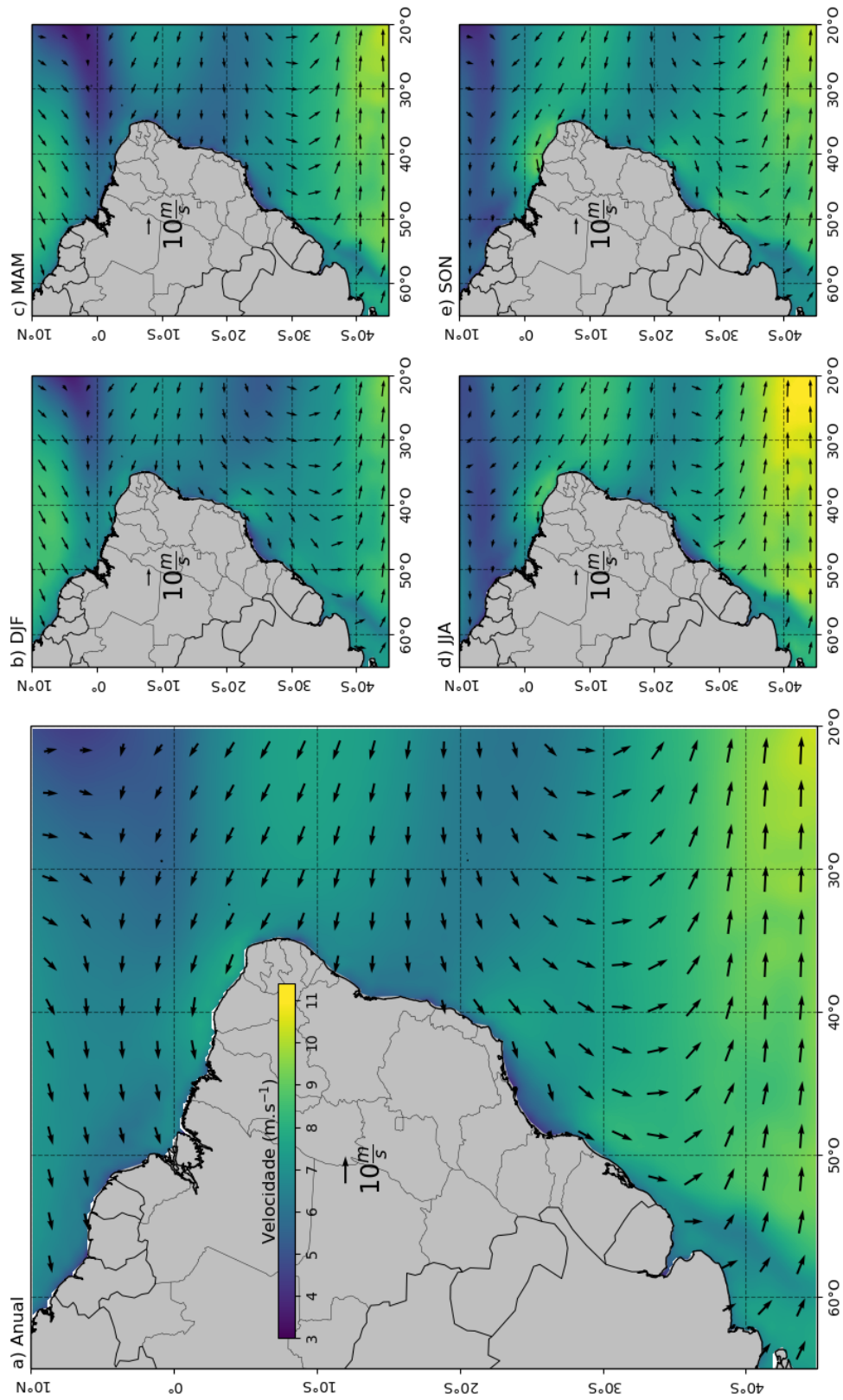
As velocidades médias ao longo das climatologias (1988-2017), anuais e sazonais, variaram entre 3,01 e $11,14 \text{ m.s}^{-1}$. As maiores velocidades foram observadas para os Ventos de Oeste (*Westerlies*, do inglês), a partir de 35°S . As menores velocidades foram encontradas para a região do Embaiamento Sul Brasileiro (SBB, do inglês South Brazilian Bight), entre o Cabo São Tomé (22°S ; 41°O) e o Cabo Santa Marta Grande (28°S ; $48,82^\circ\text{O}$) (CASTRO, 1985). Na primavera (SON), as menores velocidades foram observadas na zona de convergência dos ventos alísios e da ZCIT na região equatorial (HASTENRATH; HELLER, 1977).

Young e Holland (1996) apresentaram uma das primeiras climatologias globais das velocidades do vento e alturas significativas de ondas para o oceano global utilizando dados do sensor altímetro da plataforma GEOSAT. As velocidades obtidas pelos autores para a área de estudo deste trabalho parecem estar de acordo. Cabe mencionar, que aqueles autores apresentaram seus resultados em intervalos de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$. Apesar de não se poder comparar muito bem as velocidades observadas pelos autores foram observados padrões de distribuição das velocidades similares ao presente trabalho.

Baptista (2003) calculou as climatologias sazonais do campo de vento sobre a superfície do Oceano Atlântico Tropical-Sul, utilizando oito anos de dados do sensor *Wind Scatterometer* a bordo dos satélites europeus de sensoriamento remoto ERS-1 e ERS-2. Os padrões de direção do vento foram similares aos obtidos no presente trabalho. Entretanto, Baptista (op.cit.) obteve velocidades $\leq 7,70 \text{ m.s}^{-1}$ somente enquanto no presente trabalho foram obtidas velocidades $\leq 11,14 \text{ m.s}^{-1}$.

Próximo da costa (até $\approx 20 \text{ km}$), as maiores velocidades médias anuais ($6,63 - 7,67 \text{ m.s}^{-1}$) foram obtidas para a região entre Natal (RN) e São Luis do Maranhão (MA), com direção média ESE. Entre o Cabo Santa Marta (SC) e a Lagoa dos Patos (RS), as velocidades médias anuais variam entre $6,35$ e $7,00 \text{ m.s}^{-1}$, com direção NNE-NE. Na região de Cabo Frio (RJ), as velocidades médias anuais chegam a $6,16 \text{ m.s}^{-1}$, com orientação NE e na costa de Alagoas e Sergipe, $6,12 \text{ m.s}^{-1}$ com orientação E-SE.

Figura 4.5 - Climatologias (a) anual e (b,c,d,e) sazonais do campo de vento estimado pelo produto de VSM CCMP (1988-2017).



Fonte: Próprio Autor.

Sazonalmente, a distribuição regional das maiores velocidades médias do vento seguiu o mesmo padrão geral observado para as médias anuais. No inverno (JJA) e primavera (SON), foram obtidas velocidades entre 3,46 - 8,51 m.s⁻¹ e 3,93 - 9,11 m.s⁻¹, respectivamente, com valores máximos na costa do Ceará. Os menores valores (3,11 e 7,25 m.s⁻¹) foram observados no verão (DJF) em regiões mais próximas da costa. No outono (MAM), as velocidades variaram entre 3,34 e 7,41 m.s⁻¹.

A posição da ZCIT pode ser associada à faixa equatorial com baixas velocidades e direção preferencialmente zonal do vento (Figura 4.5). Neste trabalho, a posição média da ZCIT esteve centrada em torno de 4°N, com deslocamento da sua posição central entre 8°N (JJA, Figura 4.5d) e 1°S (MAM, Figura 4.5c), de acordo com o que foi observado por Hastenrath e Heller (1977) e Citeau et al. (1988).

O sistema de alta pressão do Atlântico Sul alcança sua posição mais a noroeste nos meses de inverno (HASTENRATH, 1991) (Figura 4.5d). Mächel et al. (1998) verificaram uma maior intensidade e extensão zonal da ASAS em JJA. Rodwell e Hoskins (2001) e Seager et al. (2003) observaram que neste período ocorre um máximo de pressão atmosférica na superfície do mar associado à maior intensidade da célula de Hadley.

Sun et al. (2017) utilizaram produtos de reanálises (1979-2015) para analisar o ciclo anual da ASAS e sua variabilidade interanual. Esses autores mostraram que o ciclo anual da ASAS possui dois picos distintos em intensidade e tamanho. Esses autores observaram que a ASAS é maior e mais intensa nos meses de inverno quando seu centro está deslocado para o equador e para a porção oeste do Atlântico Sul, assim como apresentado por Mächel et al. (1998) (Figura 4.5d). A ASAS fica mais a sul ou mais no centro da bacia oceânica no final do verão (Figura 4.5b).

Seager et al. (2003) observaram um forte gradiente zonal de TSM formado durante o verão pela advecção de águas frias fluindo de sul para norte na porção leste da bacia oceânica. A interação com o campo de pressão em superfície provoca um deslocamento do centro de alta pressão para a porção central da bacia. Desta forma, a circulação do anticiclone subtropical tende a apresentar uma forma mais circular na primavera e verão do que no outono e inverno (Figura 4.5b-e). Mächel et al. (1998) observaram que a ASAS fica deslocada para leste entre outubro e abril (Figuras 4.5bce).

A região de Confluência Brasil-Malvinas (CBM) é aqui caracterizada por uma faixa com velocidades do vento relativamente mais baixas ($< \approx 6$ m.s⁻¹), entre 60°O-

52°O e a sul de 32°S. Esta que é uma das regiões mais dinamicamente ativas do oceano global (CHELTON et al., 1990; PIOLA et al., 2001), apresenta um gradiente da velocidade do vento preferencialmente zonal, o qual é mais pronunciado em JJA (Figura 4.5).

Wallace et al. (1989) afirma que a temperatura da superfície do mar exerce influência direta na camada limite oceano-atmosfera, favorecendo a instabilidade (estabilidade) vertical da atmosfera sobre águas quentes (frias) e o aumento (diminuição) da intensidade dos ventos. Este "mecanismo dinâmico" foi também observado por diversos autores que estudaram processos de interação oceano-atmosfera na região da CBM (TOKINAGA et al., 2005; PEZZI et al., 2005; PEZZI et al., 2009; CAMARGO et al., 2013).

Com a predominância dos ventos de SO durante o outono e inverno na porção SO da área de estudo, há o desenvolvimento de uma corrente costeira fluindo de sul para norte, paralelamente à costa, também denominada como Corrente Costeira do Brasil - CCB (SOUZA; ROBINSON, 2004). Esta corrente transporta águas subantárticas diluídas com águas oriundas da drenagem continental do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos (PIOLA et al., 2000; PIOLA et al., 2008; MÖLLER et al., 2008) podendo alcançar latitudes de 23°S (CAMPOS et al., 1996). Pezzi et al. (2016) ao verificarem um intenso gradiente de TSM transversal à costa gerado entre o cisalhamento da CCB com a CB, associaram os mesmos processos de interação oceano-atmosfera verificados para a região CBM.

4.3.2 Índices de variabilidade

Os valores obtidos para o índice de Variabilidade Média Anual (VMA) variaram entre 13,01 e 50,46 %, tanto para o ano completo quanto para as estações. Os menores valores (13 a 25 %) são observados na região dos ventos alísios entre 0° e 15°S (Figura 4.6a) ou entre 10°N-20°S, de acordo com as estações do ano (Figura 4.6b-e). Stopa et al. (2013) calcularam o índice VMA para dados de reanálise CFSR (1979–2009) e observaram baixos valores de ≈20% para as regiões dos alísios ao longo do oceano global.

A região entre 10°N-5°S, com variabilidade entre 24 e 46% (Figura 4.6), se sobrepõe à faixa de oscilação norte-sul da ZCIT (HASTENRATH; HELLER, 1977; CITEAU et al., 1988), como observado para as médias climatológicas (Figura 4.5). Stopa et al. (2013) encontraram valores de 40–50% para regiões associadas à ZCIT sobre o oceano global.

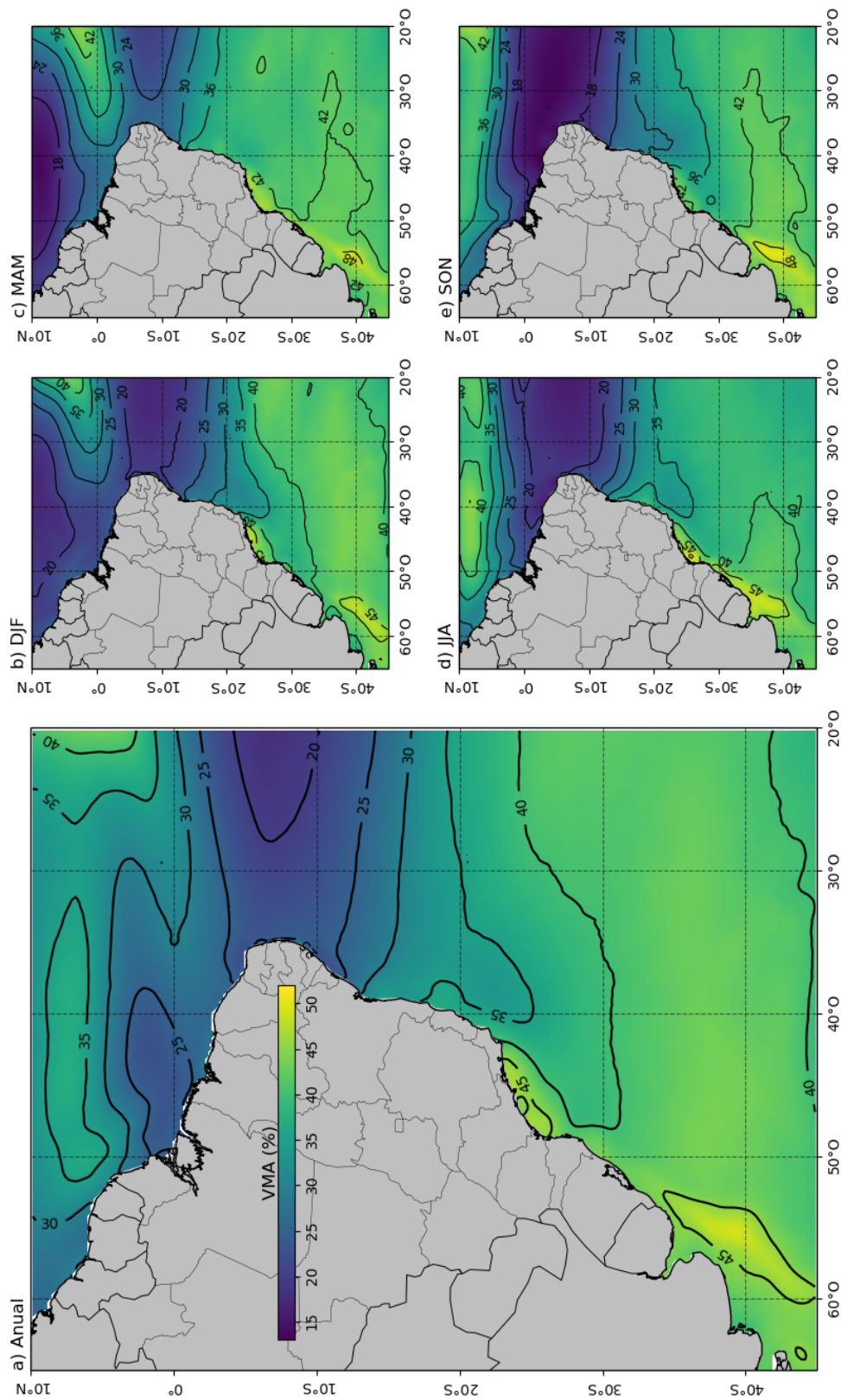
Zonas de relativamente alta variabilidade, com valores de VMA maior que 35%, são observadas a partir de $\approx 20^\circ\text{S}$, associadas à migração sazonal da ASAS (HASTENRATH, 1991; MÄCHEL et al., 1998; SEAGER et al., 2003; SUN et al., 2017) (Figura 4.6). Os Ventos de Oeste, ao se intensificarem e alcançarem latitudes mais baixas de até $\approx 35^\circ\text{S}$ em JJA (Figura 4.5d) contribuem para valores de VMA nessa região entre 40 e 45%. Stopa et al. (2013) encontrou valores de VMA similares aos apresentados no presente trabalho para esta região.

Cavalcanti e Kousky () apresentaram climatologias anual e sazonais da ocorrência de frentes frias sobre a América do Sul e oceanos adjacentes utilizando dados de pressão atmosférica no nível do mar, temperatura em 925 hPa e velocidade do vento em 925 hPa de reanálises do NCEP/National Center for Atmospheric Research (NCAR). Os autores encontraram fortes gradientes de ocorrência de incursão de sistemas frontais em torno de 20°S para a climatologia anual e entre 10°S e 30°S ao longo das estações do ano. Gradientes expressivos dos valores de VMA encontrados aqui, ao sul da região dominada pelos alísios, estão em posições coincidentes com as dos gradientes de incursões de frentes frias observadas por Cavalcanti e Kousky () (Figura 4.6). As regiões com maior ocorrência média de incursões de sistemas frontais, entre 45 e 40 por ano, coincidem com as regiões de maior variabilidade, entre 40 e 52%, nas adjacências da costa norte da Argentina, Uruguai e RS (Figura 4.6).

Além da influência dos sistemas frontais, a região da costa do Uruguai e adjacências é apontada em diversos trabalhos como uma região de forte atividade ciclogênica (NECCO, 1982a; NECCO, 1982b; GAN; RAO, 1991; SINCLAIR, 1994; SINCLAIR, 1995; HOSKINS et al., 2005; REBOITA, 2008). A região próxima a 25°S na SBB também é considerada uma região de atividade ciclogênica, entretanto, de menor intensidade (NECCO, 1982a; NECCO, 1982b; SINCLAIR, 1994; SINCLAIR, 1995; HOSKINS et al., 2005; REBOITA, 2008).

Os valores obtidos para o índice de Variabilidade Inter-Anual (VIA) variaram entre 1,85 e 18,82%, com os menores valores observados para o período anual e os maiores para o MAM (Figura 4.7c). Os valores relativamente altos de VIA associados à posição média da ZCIT aparecem deslocados levemente para sul no outono (Figura 4.7c), sendo os maiores valores observados, e para norte na primavera (Figura 4.7e).

Figura 4.6 - Índice de Variabilidade Média Anual (VMA) da velocidade do vento estimada do produto de VSM CCMP (1988–2017) para as escalas de tempo (a) anual e (b,c,d,e) sazonais.



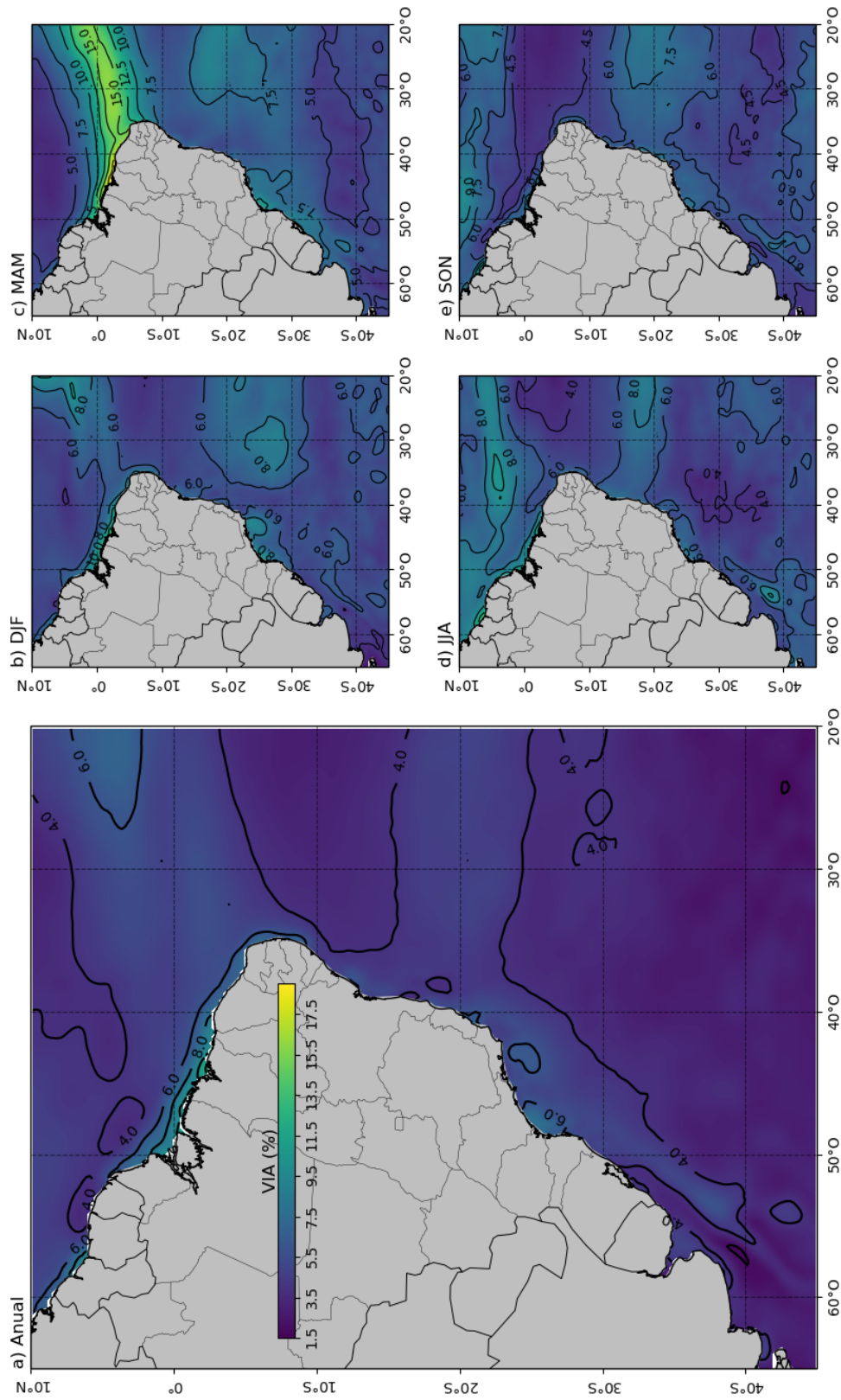
Fonte: Próprio Autor.

Nobre e Shukla (1996) analisaram a variabilidade dos campos de TSM, tensão de cisalhamento do vento e precipitação sobre o Atlântico Tropical e a América do Sul. Os autores verificaram que durante a fase de anomalias positivas do dipolo inter-hemisférico de TSM sobre o Atlântico sul, a ZCIT se posiciona mais a sul, no mês de abril. Este padrão pode ser aqui associado aos valores relativamente altos de VIA observados em MAM (Figura 4.7c). Esses autores demonstraram que as anomalias de TSM podem ser associadas a anomalias da componente meridional do vento em latitudes extra-tropicais no Atlântico Norte. Outros estudos relacionam a variabilidade dos campos de TSM no Atlântico equatorial com o ENOS (NOBRE; SHUKLA, 1996; GIANNINI et al., 2000; SARAVANAN; CHANG, 2000). Por exemplo, Marengo e Hastenrath (1993) e Marengo et al. (1993) observaram que durante a fase de El Niño do ENOS, a ZCIT alcança posições anômalas mais a norte.

Outra região com valores relativamente altos do VIA associada à ASAS pode ser observada em torno de 20S (Figura 4.7a) ou entre 10S-30S (Figuras 4.7b-e). Sun et al. (2017) mostraram que a variabilidade interanual da posição da ASAS é maior na direção zonal, ainda que a na direção meridional também tenha sido significativa no verão. Durante o verão, estes autores associaram a variabilidade inter-anual da ASAS ao Modo Anular Sul (SAM, do inglês *Southern Annular Mode*) e, principalmente, ao ENOS. No inverno, além do ENOS e SAM os autores associaram a variabilidade da ASAS também às Monções Asio-Africanas entre outros mecanismos, como variações nas trajetórias de tempestades no Hemisfério Sul.

Fedorova e Carvalho (2000) verificaram uma maior frequência de frentes frias entre 20S-40S em um ano de El Niño (07/1997-03/1998). Gan e Rao (1991) verificaram uma maior ocorrência de ciclogênese entre 15S-50S e 30O-90O, em anos de El Niño no período 1979-1988. Os valores relativamente altos do VIA observados na região da CBM podem ser associados com as fases negativas do ENOS.

Figura 4.7 - Índice de Variabilidade Inter-Anual (VIA) da velocidade do vento estimado do produto de VSM CCMP (1988–2017) para as escalas de tempo (a) anual e (b,c,d,e) sazonais.



Fonte: Próprio Autor.

4.4 Potencial Eólico *offshore* da margem continental brasileira

A distribuição espacial das velocidades médias anuais e sazonais a 10 m (\bar{U}_{10}) calculadas a partir de dados do ASCAT-A e ASCAT-B (2011–2017) (Figura 4.8) apresenta um padrão similar ao das climatologias anuais e sazonais CCMP (Figura 4.5). Os valores de \bar{U}_{10} variaram entre 3,02 e 11,42 m.s⁻¹. As velocidades médias extrapoladas para 100 m (\bar{U}_{100}) variaram entre 4,07 e 13,81 m.s⁻¹ (Figura 4.9). A densidade de potência a 100 m (\bar{D}_{100}) variou entre 41,3 e 1610 W.m⁻² (Figura 4.10). A potência média calculada considerando-se o uso do aerogerador Siemens SWT 150-6MW para cada ponto de grade (\bar{P}_{SWT}) variou entre 0.18 e 6 MW ou muito próximo dos limites de geração deste aerogerador (Figura 4.11).

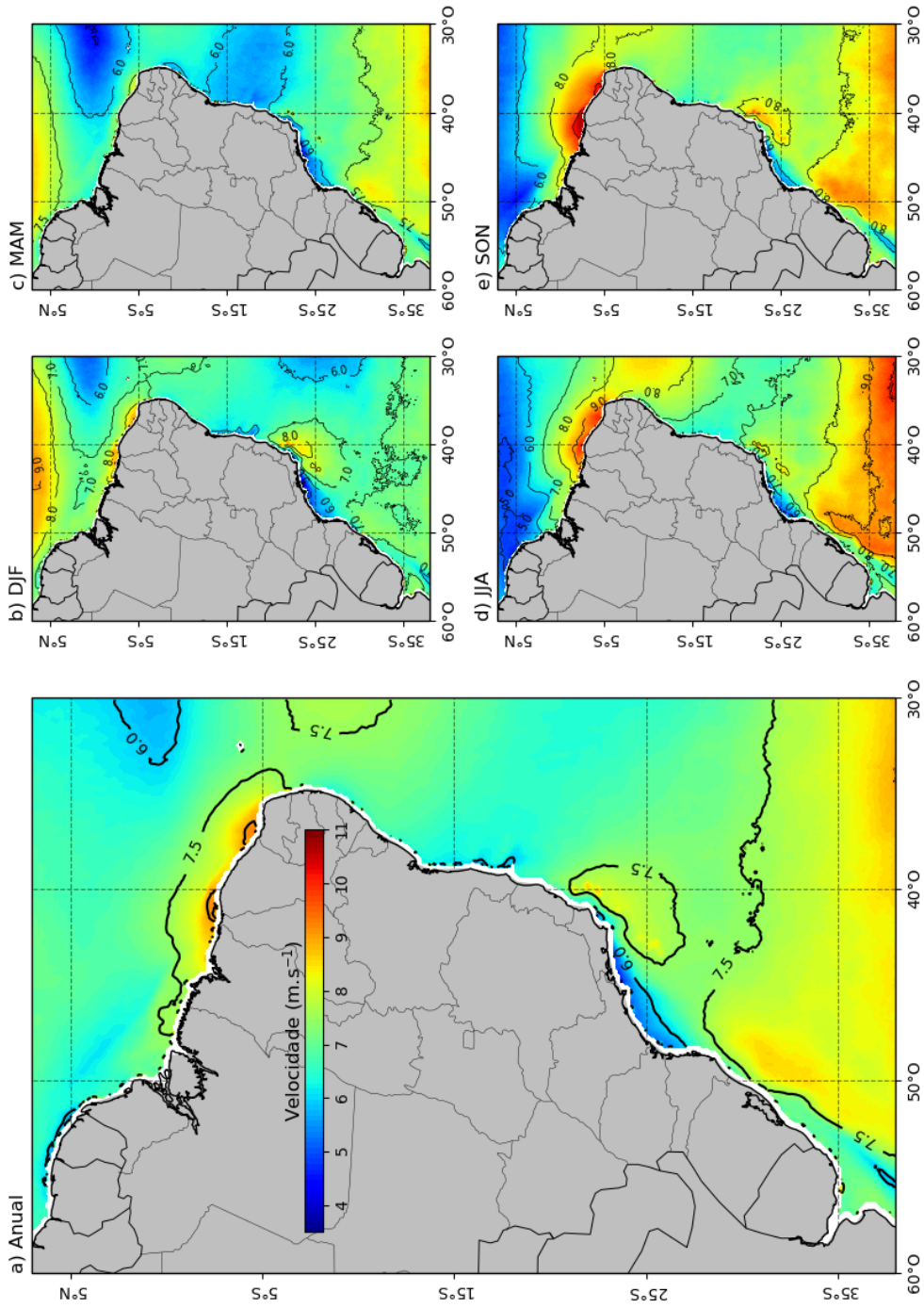
A partir dos mapas de distribuição espacial de \bar{U}_{10} , \bar{U}_{100} , \bar{D}_{100} e \bar{P}_{SWT} é possível observar 3 regiões sobre a plataforma continental brasileira que se destacam. Em ordem do maior potencial para o menor, estas regiões estão situadas entre o leste do Pará e a divisa de RN–PB (Região *A*), entre o Cabo de Santa Marta Grande e Lagoa dos Patos (Região *B*) e entre o sul ES e Cabo Frio (Região *C*).

A Região *A* apresentou as maiores velocidades médias anuais (7,5–9,6 m.s⁻¹ a 10 m e 9,1–11,6 m.s⁻¹ a 100 m), \bar{D}_{100} (461–956 W.m⁻²) e \bar{P}_{SWT} (3,21–5,41 MW) (Figuras 4.8a, 4.9a, 4.10a e 4.11a). Em SON, as maiores velocidades (\bar{U}_{10} 8,3–11,4 m.s⁻¹ e \bar{U}_{100} 9,5–13,8 m.s⁻¹), densidades de potência (\bar{D}_{100} 525–1610 W.m⁻²) e \bar{P}_{SWT} (3,65–6,00 MW) também são observadas nesta mesma região (Figuras 4.8e, 4.9e, 4.10e e 4.11e, respectivamente). Durante SON esta região está sobre direta influência dos ventos alísios de sudeste. Entretanto, em MAM, quando a ZCIT alcança sua posição mais ao sul, são observados os menores valores de velocidade média, densidade de potência e \bar{P}_{SWT} na mesma região. Entre o CE e RN e em pequenas áreas isoladas da plataforma continental do MA ainda são observados valores de $\bar{U}_{10} \approx 7,5$ m.s⁻¹, $\bar{U}_{100} \approx 9$ m.s⁻¹, $\bar{D}_{100} \approx 447$ W.m⁻² e $\bar{P}_{SWT} \approx 3,10$ MW (Figuras 4.8c, 4.9c, 4.10c e 4.11c).

Os mapas de distribuição espacial das velocidades médias extrapoladas para 80, 100, 125, 150 e 200 m são apresentados no Anexo B e os mapas de distribuição das densidades de potência nessas mesmas alturas constam no Anexo C.

Ortiz e Kampel (2011), utilizando dados de VSM QuikSCAT (1999–2009), calcularam as velocidades médias e a densidade de potência média para a altura de 80 m (\bar{U}_{80} e \bar{D}_{80} , respectivamente) ao longo da margem continental brasileira. Para a Região *A* os autores observaram valores de \bar{U}_{80} entre 9.5 e 10.5 m.s⁻¹ e \bar{D}_{80} entre

Figura 4.8 - Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B.



Fonte: Próprio Autor.

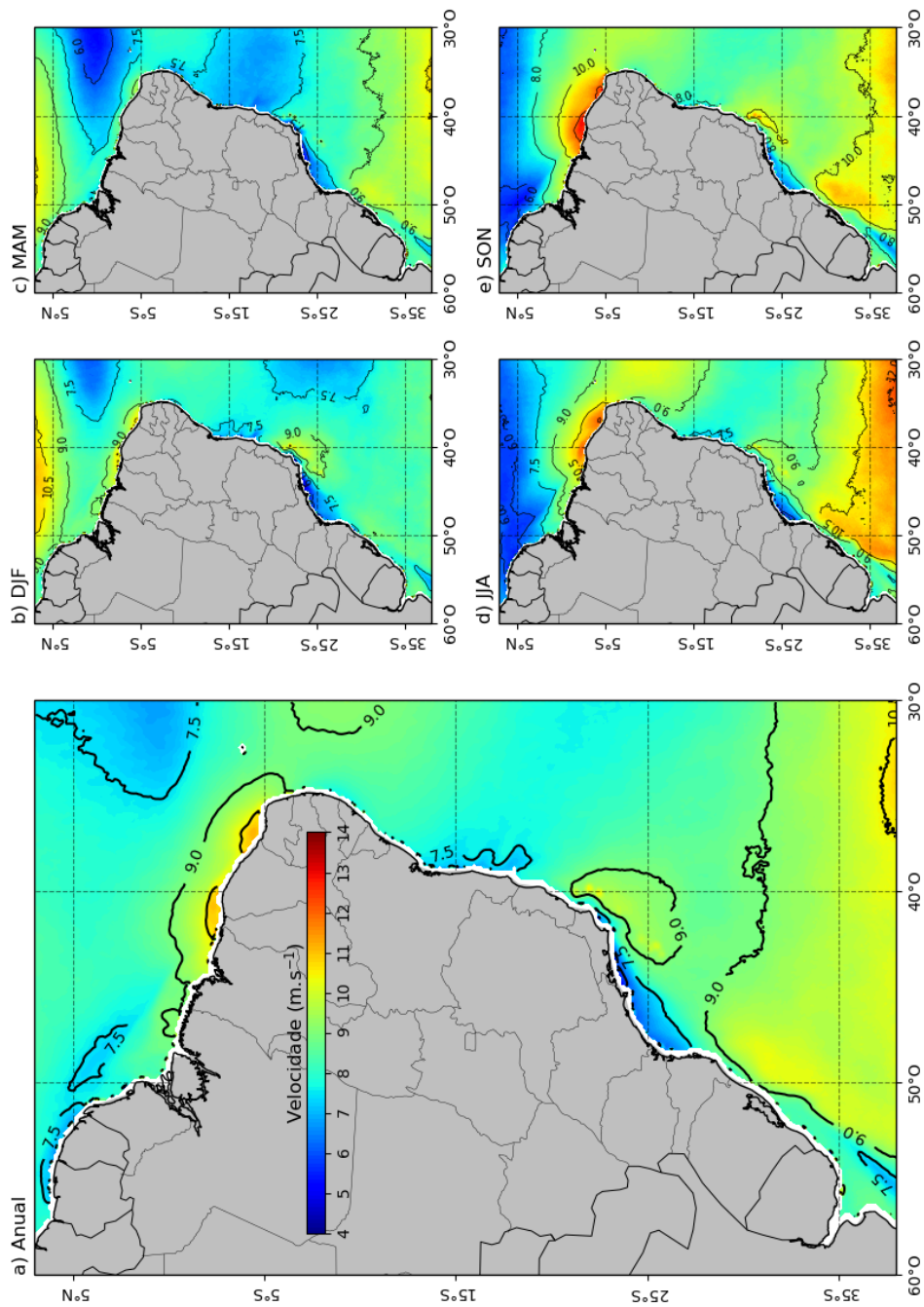
600 e 700 W.m^{-2} , próximos aos valores calculados no presente trabalho (ver Figuras B.1 e C.1). Entretanto, diferenças podem ser notadas nas regiões da divisa entre CE-RN e entre o leste do MA e oeste do CE, onde D_{80} é $> 800 \text{ W.m}^{-2}$ (Figura C.1). Ainda que esses autores tenham utilizado uma diferente base dados para um período anterior ao considerado no presente estudo, as diferenças observadas podem estar associadas ao uso de diferentes métodos de extrapolação do vento em altitude (Garvine e Kempton (2008) vs. Smith (1988)) e à interpolação dos dados até muito próximo da costa realizada por Ortiz e Kampel (2011).

Nunes (2012) estimou as velocidades médias do vento e a densidade de potência média a 100 m de altura utilizando o produto VSM *Blended Sea Winds* - BSW, o qual é composto por dados de VSM de diferentes plataformas orbitais, para a margem continental da região Nordeste brasileira entre 1998 e 2010. O autor observou $\bar{U}_{100} > 8 \text{ m.s}^{-1}$ e \bar{D}_{100} entre ≈ 400 e 500 W.m^{-2} para a Região A. Mas, de modo geral, Nunes (2012) apresentou valores menores que os obtidos no presente trabalho ($\bar{U}_{100} = 9,1\text{--}11,6 \text{ m.s}^{-1}$ e $\bar{D}_{100} = 600\text{--}956 \text{ W.m}^{-2}$; Figuras 4.9 e 4.10). As diferenças observadas entre Nunes (2012) e o presente trabalho podem estar associadas à diferente base de dados e período analisado. Essas diferenças também podem estar associadas ao diferente método de extrapolação do vento utilizado por esse autor que considera um valor fixo para a altura da rugosidade de superfície $z_0 = 0,0002 \text{ m}$ ao aplicar a lei do perfil logarítmico do vento. No presente trabalho, z_0 varia conforme a tensão de cisalhamento do vento, densidade e viscosidade do ar (SMITH, 1988).

Souza et al. (2014) avaliaram o potencial médio sazonal de geração de energia eólica *offshore* da margem continental das regiões Norte e Nordeste, até o estado de Sergipe. Foi utilizado o produto VSM BSW no período 1987-2011. Segundo esses autores, a região Nordeste foi a que apresentou maiores velocidades médias do vento com $\bar{U}_{100} > 9,50 \text{ m.s}^{-1}$ no inverno e primavera, $> 8,00 \text{ m.s}^{-1}$ no verão e $> 7,50 \text{ m.s}^{-1}$ no outono. No inverno e primavera, foram obtidos valores de \bar{D}_{100} entre 600 e 800 W.m^{-2} . Mas, de modo geral, esses autores apresentaram valores menores aos obtidos no presente trabalho. Essas diferenças podem ser associadas ao método de extrapolação do vento que foi o mesmo utilizado por Nunes (2012). Contudo, Souza et al. (2014) ainda obtiveram valores de $\bar{D}_{100} \approx 600 \text{ W.m}^{-2}$ na costa do Amapá, no verão e outono, maiores do que os obtidos no presente estudo ($\leq 450 \text{ W.m}^{-2}$, Figura 4.10b,c).

Lima et al. (2015) estimaram os recursos eólicos *offshore* para o estado do do CE por meio de simulações do modelo numérico de previsão RAMS. Foram analisados

Figura 4.9 - Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 100 m acima do nível do mar.



Fonte: Próprio Autor.

os períodos 1997-1998 de forte El Niño, 2007-2008 de forte La Niña e 2001-2002 com o ENOS em fase neutra. Na estação seca, entre setembro e outubro, os autores observaram $\bar{U}_{100} \approx 8\text{-}10 \text{ m.s}^{-1}$ e $\bar{D}_{100} < 720 \text{ W.m}^{-2}$ no período de El-Niño, $\bar{U}_{100} \approx 10\text{-}14 \text{ m.s}^{-1}$ e $\bar{D}_{100} \approx 720\text{-}1440 \text{ W.m}^{-2}$ no período de La Niña, e $\bar{U}_{100} > 8 \text{ m.s}^{-1}$ e $\bar{D}_{100} \approx 720\text{-}1080 \text{ W.m}^{-2}$ na fase neutra. Na estação chuvosa, entre março e abril, os valores de \bar{D}_{100} não ultrapassaram 360 W.m^{-2} .

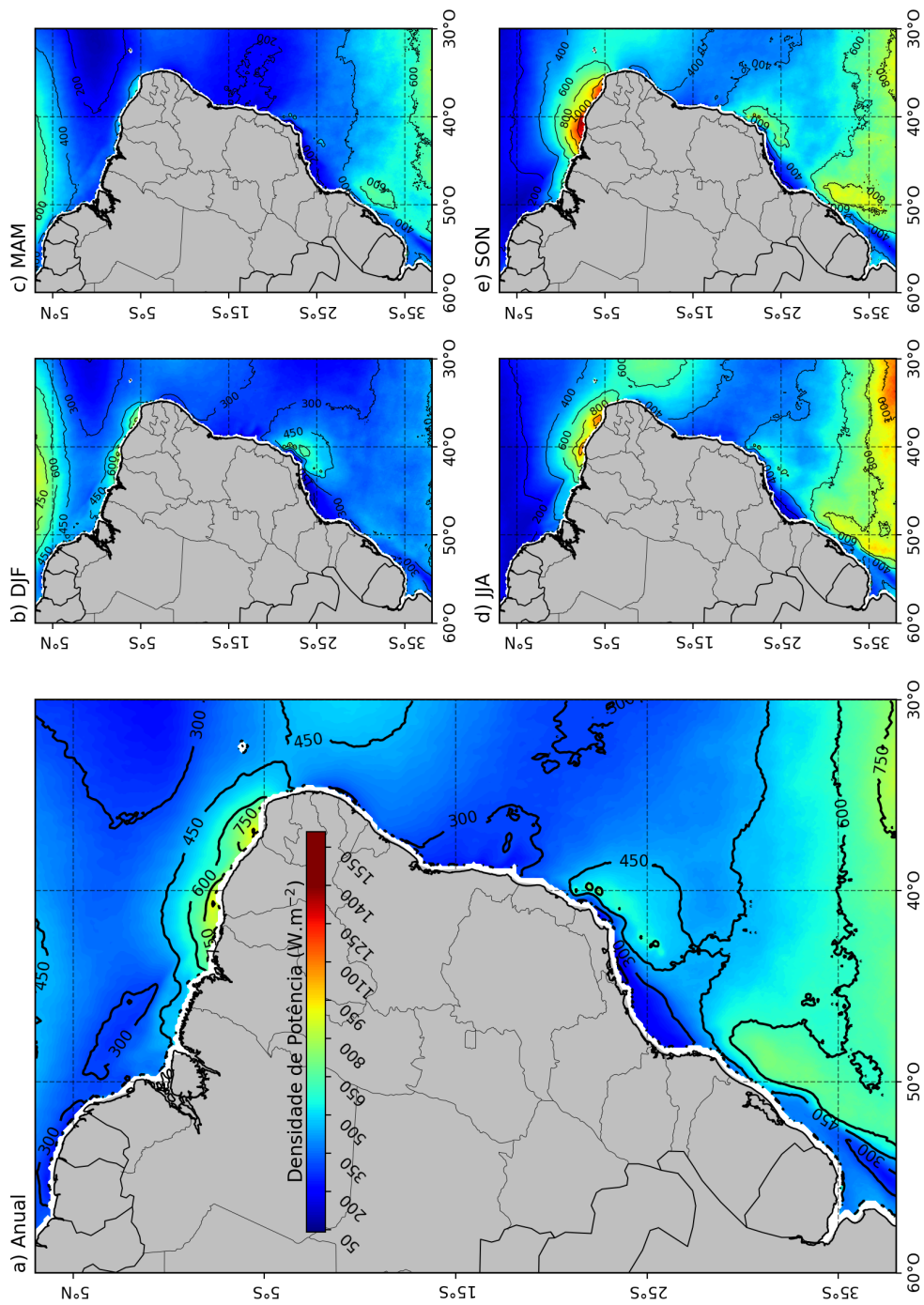
Os maiores valores de \bar{U}_{100} e \bar{D}_{100} apresentados por Lima et al. (2015) foram obtidos em período de forte La Niña. Ainda assim, foram menores que os valores obtidos no presente trabalho que se baseou em dados de VSM médios referentes a um período de sete anos, podendo assim, mascarar eventos extremos. Lima et al. (2015) compararam os resultados das simulações numéricas RAMS com medições de vento realizadas em torres meteorológicas localizadas no continente. No presente trabalho, as comparações das simulações BRAMS, que é um modelo baseado no RAMS, com medições realizadas em boias oceanográficas foram as que apresentaram o pior desempenho estatístico em relação às outras bases de dados (ver Seção 4.2).

Silva et al. (2016) analisaram a complementariedade do potencial de geração de energia eólica *offshore* e hidráulica do Brasil. Os autores utilizaram a mesma base de dados de vento (BSW, 1989–2009) e o mesmo método de extrapolação para a altura de 100 m que Souza et al. (2014). Naturalmente, os resultados de ambos os trabalhos para a \bar{D}_{100} sobre a Região A foram similares. Os valores de potência para cada ponto de grade observados por Silva et al. (2016) atingem até 5 MW, relativamente menores dos que foram observados no presente trabalho.

A Região B, situada entre o Cabo de Santa Marta Grande e a Lagoa dos Patos, mostrou-se favorável ao aproveitamento da energia eólica (Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11). Os valores médios anuais são: $\bar{U}_{10} = 7,2\text{-}8,3 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{100} = 8,03\text{-}9,9 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} = 376\text{-}594 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} = 2,63\text{-}4,09 \text{ MW}$ (Figuras 4.8a, 4.9a, 4.10a e 4.11a). Os maiores valores são obtidos em SON: $\bar{U}_{10} = 7,5\text{-}9,5 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{100} = 8,1\text{-}11,0 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} = 326\text{-}815 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} = 2,28\text{-}4,98 \text{ MW}$ (Figuras 4.8e, 4.9e, 4.10e e 4.11e). Os menores valores são obtidos em DJF: $\bar{U}_{10} = 5,9\text{-}7,4 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{100} = 6,9\text{-}8,9 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} = 201\text{-}431 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} = 1,37\text{-}3,02 \text{ MW}$ (Figuras 4.8b, 4.9b, 4.10b e 4.11b).

Pimenta et al. (2008), utilizando dados de VSM QuikSCAT (1999–2007), avaliaram o potencial de geração de energia eólica *offshore* para as regiões Sudeste e Sul do Brasil. Esses autores estimaram valores de $\bar{U}_{80} (> 7,4 \text{ m.s}^{-1})$ similares aos obtidos no presente trabalho ($> 7,2 \text{ m.s}^{-1}$, Figura 4.8a) para a Região B. Entretanto, os

Figura 4.10 - Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal a 100 m acima do nível do mar.



Fonte: Próprio Autor.

autores estimaram valores de $\bar{U}_{80} > 8,6 \text{ m.s}^{-1}$ e $\bar{D}_{80} \approx 600 \text{ W.m}^{-2}$ que são maiores que os obtidos neste trabalho ($7,8 \text{ m.s}^{-1}$ e 450 W.m^{-2} , ver Figuras B.1, C.1).

Ortiz e Kampel (2011) observaram $\bar{U}_{80} > 9 \text{ m.s}^{-1}$ e $\bar{D}_{80} > 600 \text{ W.m}^{-2}$ similares ou um pouco maiores que os observados por Pimenta et al. (2008). Ambos os trabalhos utilizaram a mesma base de dados. Entretanto, Pimenta et al. (2008) utilizaram um valor fixo de $z_0 = 0,0002 \text{ m}$ para a extrapolação do vento, enquanto Ortiz e Kampel (2011) seguiram a metodologia de Garvine e Kempton (2008) e interpolaram as velocidades para regiões muito próximas à costa. Em relação ao presente trabalho, as diferenças podem estar associadas ao uso de diferentes bases de dados.

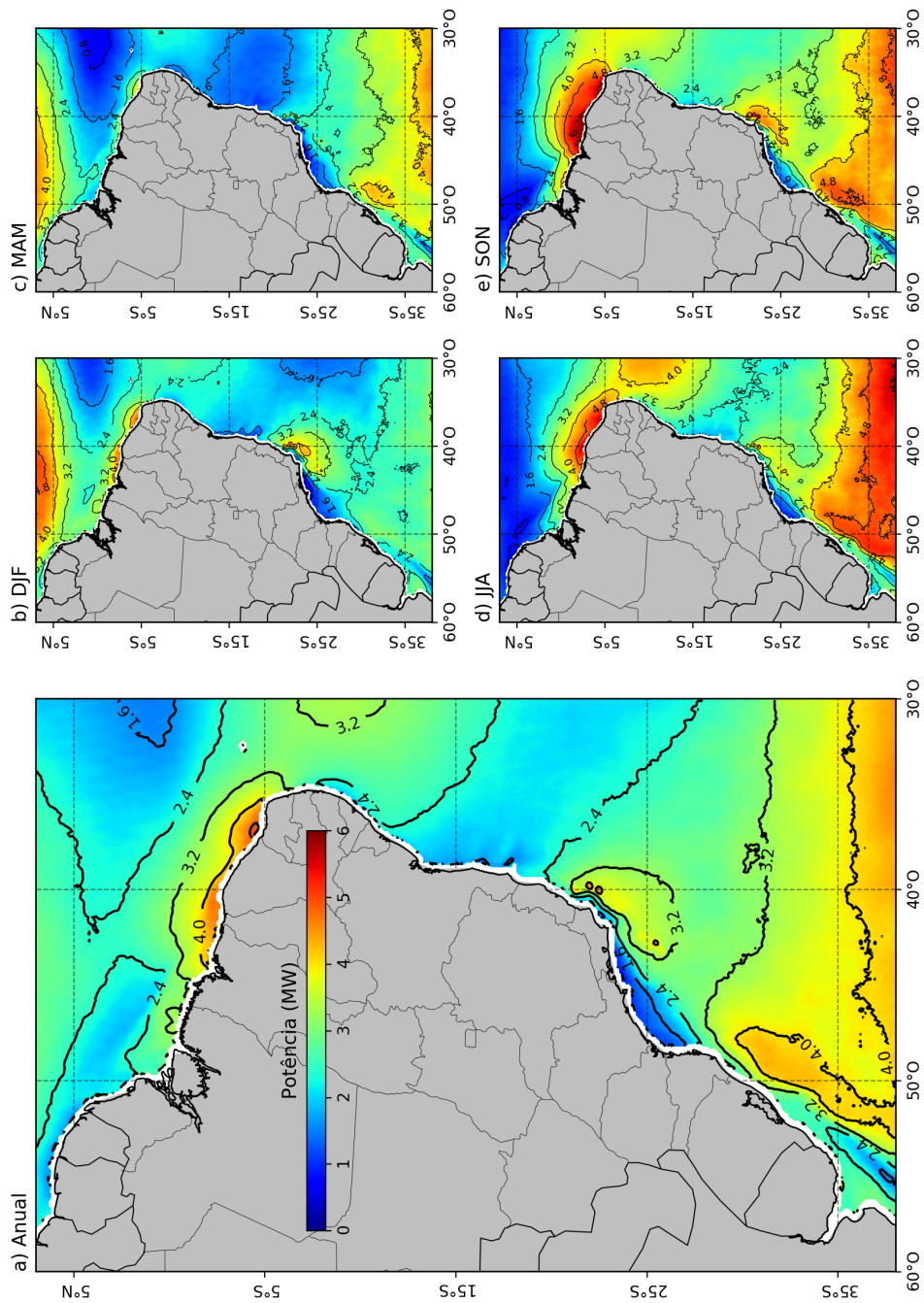
Silva et al. (2016) observaram valores de $\bar{D}_{100} \approx 900 \text{ W.m}^{-2}$ e e distribuição espacial de potência média para a Região B entre 3 e $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ durante inverno e primavera. No verão, os autores observaram valores de $\bar{D}_{100} \approx 600 \text{ W.m}^{-2}$ e e potência média de $\approx 3 \text{ MW}$. Os valores médios observados de \bar{D}_{100} e potência média para cada ponto de grade são relativamente maiores que os observados no presente trabalho, $\bar{D}_{100} = 326\text{--}815 \text{ W.m}^{-2}$ em SON e $\bar{D}_{100} = 201\text{--}431 \text{ W.m}^{-2}$ em DJF (Figura 4.10).

Corrêa (2018) utilizou simulações da circulação atmosférica do WRF (1979–2010) a 90 m acima do nível do mar para avaliar o potencial eólico *offshore* de SC. Para o sul de SC, essa autora observou velocidades médias entre 8 e 9 m.s^{-1} durante verão e inverno e entre 9 e 10 m.s^{-1} durante inverno e primavera. A autora observou valores de densidade de potência média entre 550 e 700 W.m^{-2} em regiões com profundidade $< 20 \text{ m}$, atingindo 920 W.m^{-2} durante o inverno sobre a profundidade de $\approx 50 \text{ m}$ nos entornos do Cabo de Santa Marta Grande.

A Região C, situada entre o sul de ES e Cabo Frio ($20,5^\circ\text{S}$ e 24°S), apresentou um bom potencial de geração de energia eólica, valores médios anuais de $\bar{U}_{10} = 5,6\text{--}8,0 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{100} = 6,7\text{--}9,5 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} = 184\text{--}525 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} = 1,25\text{--}3,62 \text{ MW}$ (Figuras 4.8a, 4.9a, 4.10a e 4.11a). Os maiores valores são observados em SON: $\bar{U}_{10} = 6,1\text{--}8,7 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{100} = 7,18\text{--}10,3 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} = 226\text{--}669 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} = 1,56\text{--}4,52 \text{ MW}$, (Figuras 4.8e, 4.9e, 4.10e e 4.11e, respectivamente). Os menores valores são observados em MAM: $\bar{U}_{100} = 5,0\text{--}7,0 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{10} = 5,8\text{--}8,3 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} = 119\text{--}350 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} = 0,77\text{--}2,45 \text{ MW}$ (Figuras 4.8c, 4.9c, 4.10c e 4.11c).

Pimenta et al. (2008) observaram valores de velocidades médias anuais de $\bar{U}_{80} \approx 8,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\bar{D}_{80} \approx 450 \text{ W.m}^{-2}$ sobre a região da margem continental próxima à cidade de Vitória, ES, similares aos observados por Ortiz e Kampel (2011). No presente

Figura 4.11 - Mapas de distribuição espacial de potência média (a) anual e (b-e) sazonal gerada considerando a utilização da turbina Siemens SWT 150-6MW para cada ponto de grade.



Fonte: Próprio Autor.

trabalho foram obtidos valores relativamente menores com $\bar{U}_{80} \approx 8 \text{ m.s}^{-1}$ e $\bar{D}_{80} \approx 400 \text{ W.m}^{-2}$, nas proximidades de Vitória (Figuras B.1 e C.1). Ainda nas proximidades de Vitória, Silva et al. (2016) observaram valores de $\bar{D}_{100} \approx 450 \text{ W.m}^{-2}$ para o outono e $\bar{D}_{100} \approx 750 \text{ W.m}^{-2}$ para a primavera. No presente trabalho os valores observados foram relativamente menores, $\bar{D}_{100} = 119\text{--}350$ no outono e $\bar{D}_{100} = 226\text{--}669$ na primavera (Figura 4.10).

Em geral, no presente trabalho a Região A mostrou um potencial de geração de energia eólica maior em relação aos demais trabalhos citados. Entretanto, para a Região B e Região C o potencial eólico aqui observado foi menor em relação aos demais trabalhos citados.

Pereira et al. (2013) estudaram o efeito das mudanças climáticas globais sobre a densidade de potência das regiões Norte-Nordeste e sul do Brasil, partindo de simulações de circulação atmosférica utilizando o modelo de previsão numérico Eta (1962–1990) com simulações do *Hadley Centre Coupled Model 3* (2070–2100) para o cenário futuro A1B do *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Este cenário prevê um aumento balanceado de emissões de gases do efeito estufa. Esses autores observaram uma tendência de crescimento de \bar{D} sobre a Região A, podendo chegar perto de 100 % entre MA e RN durante MAM. Entretanto, foi observado uma tendência de redução de \bar{D} ao sul de PE e em especial para o sul da BA, chegando a 50 % em MAM. Para região Sul, em especial sobre a Região B, esses autores observaram uma tendência suave de crescimento de $\bar{D} \approx 10 \%$.

Para observar o comportamento de \bar{U}_{10} , \bar{U}_{100} , \bar{D}_{100} e \bar{P}_{SWT} nas proximidades da costa foram selecionados 147 pontos com uma distância média de $\approx 50 \text{ km}$ da costa, espaçamento médio de $\approx 50 \text{ km}$ entre si e a maioria em profundidades $\leq 50 \text{ m}$ (Figura 4.12e), para os quais foram recuperados os valores apresentados nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

De modo geral, os maiores valores médios são observados em SON: $\bar{U}_{10} \approx 11 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{100} \approx 13 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} \approx 1300 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} \approx 6 \text{ MW}$ entre CE-PI e $\bar{U}_{10} \approx 8 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{100} \approx 10 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} \approx 600 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} \approx 4 \text{ MW}$, no sul do ES e entre o Cabo de Santa Marta Grande e a Lagoa dos Patos (Figura 4.12a-d). Entre aproximadamente 5°S e 10°S , os maiores valores são observados em JJA: $\bar{U}_{10} \approx 7,0\text{--}9,0 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{100} \approx 8,5\text{--}11,0 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} \approx 350\text{--}750 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} \approx 2,7\text{--}4,5 \text{ MW}$ (Figura 4.12a-d). Entre o AP e os limites norte da área de estudo os maiores valores são observados em DJF e MAM: $\bar{U}_{10} \approx 7\text{--}8 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{U}_{100} \approx 8\text{--}9 \text{ m.s}^{-1}$, $\bar{D}_{100} \approx 300\text{--}500 \text{ W.m}^{-2}$ e $\bar{P}_{SWT} \approx 2,25\text{--}3 \text{ MW}$ (Figura 4.12a-d)

As maiores diferenças sazonais são observadas entre SON e MAM nas regiões Norte e Nordeste: $> 2 \text{ m.s}^{-1}$ para \bar{U}_{10} , $> 3 \text{ m.s}^{-1}$ para \bar{U}_{100} , $> 600 \text{ W.m}^{-2}$ para \bar{D}_{100} e $> 2 \text{ MW}$ para \bar{P}_{SWT} (Figura 4.12a-d). Por exemplo, entre o sul do ES e o Cabo de São Tomé, as diferenças entre SON e MAM são de 2 m.s^{-1} para \bar{U}_{10} e \bar{U}_{100} , 300 W.m^{-2} para \bar{D}_{100} e $1,5 \text{ MW}$ para \bar{P}_{SWT} . Entre o Cabo de Santa Marta Grande e o norte do RS, as diferenças entre SON e DJF são similares ou até um pouco menores (Figura 4.12a-d).

Como mencionado na Seção 3.5 dos Materiais e Métodos, foram utilizadas duas abordagens para a estimativa do potencial eólico *offshore* com base em dados ASCAT e na simulação do uso da turbina Siemens SWT 150-6MW. Na primeira abordagem utilizando a Equação 2.10, foram obtidos valores mínimos de 738 GW em MAM, até 50 m de profundidade e máximos de 1710 GW em SON, até 200 m (Tabela 4.7). Na segunda abordagem utilizando a Equação 3.15, foram obtidos valores entre 500 GW em MAM, até 50 m e 1328 GW em SON, até 200 m de profundidade (Tabela 4.8).

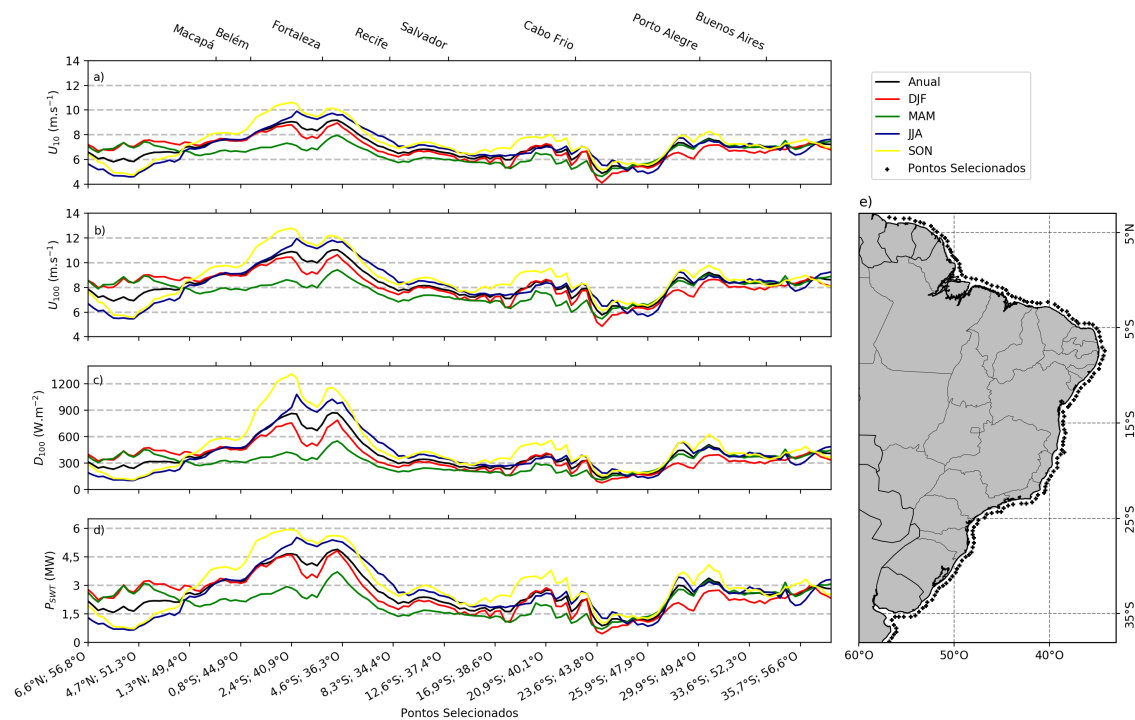
Tabela 4.7 - Potencial de geração de energia eólica para diferentes períodos e regiões da plataforma continental.

	até 50m	até 100m	até 150m	até 200m
Área (km ²)	353.071	474.898	542.426	568.427
N. Turbinas	313.840	422.132	482.156	505.268
Anual (GW)	972	1.251	1.382	1.441
DJF (GW)	957	1.206	1.311	1.362
MAM (GW)	738	957	1.065	1.110
JJA (GW)	1.015	1.317	1.471	1.537
SON (GW)	1.154	1.487	1.639	1.710

Cabe mencionar que os dados ASCAT não estão disponíveis em áreas muito próximas da costa, ou até $\approx 20 \text{ km}$ de distância (VERHOEF; STOFFELEN, 2013). Em regiões onde a plataforma continental é mais estreita esta falta de disponibilidade de dados em profundidades $< 200 \text{ m}$ é relevante para a representatividade dos valores estimados.

Pimenta et al. (2008) estimaram um potencial de geração de energia eólica *offshore* equivalente a 217 GW até 100 m de profundidade, entre Florianópolis (SC) e o

Figura 4.12 - Valores médios anuais e sazonais de \bar{U}_{10} (a), \bar{U}_{100} (b), \bar{D}_{100} (c) e \bar{P}_{SWT} (d) calculadas a partir de dados de vento na superfície do mar VSM ASCAT-A e ASCAT-B (2011-2017) extraídos de 147 pontos ao longo da costa, com uma distancia média de ≈ 50 km da costa, espaçamento medio de ≈ 50 km entre si e, a maioria, em profundidades ≤ 50 m (e).



Fonte: Próprio Autor.

extremo sul do Brasil. Ortiz e Kampel (2011) estimaram um potencial de 606 GW para a margem continental brasileira até 100 m de profundidade. Ambos os trabalhos utilizaram basicamente, a mesma abordagem metodológica (Equação 2.10), com a instalação de turbinas com eixo do rotor a 80 m da superfície do mar, potência nominal de 5 MW.

Silva et al. (2016) estimou o potencial eólico *offshore* para a margem continental brasileira até 50 m de profundidade em ≈ 1.340 GW, utilizando a Equação 2.10. No presente trabalho, o potencial eólica anual estimado até 50 m de profundidade, utilizando a Equação 2.10, foi de 972 GW (Tabela 4.7), apresentando uma diferença para com Silva et al. (2016) em mais de 300 GW.

Na primeira abordagem (Equação 2.10), o valor de potência média anual estimada até 50 m de profundidade (972 GW, Tabela 4.7) supera em mais de 6 vezes os 163 GW de potência instalada no Brasil em 2018 (EPE, 2019). Se considerarmos a faixa

Tabela 4.8 - Potencial de geração de energia eólica para diferentes períodos e regiões da plataforma continental.

	até 50 m	até 100 m	até 150 m	até 200 m
Área (km ²)	353.071	474.898	542.426	568.427
N. Turbinas	219.830	346.289	415.756	443.886
Anual (GW)	644	946	1.118	1.193
DJF (GW)	648	952	1.100	1.165
MAM (GW)	500	797	956	1.026
JJA (GW)	624	904	1.083	1.163
SON (GW)	737	1.050	1.244	1.329

até 100 m, a potência média anual estimada (1.251 GW, Tabela 4.7) supera em ≈ 8 vezes aquela potência instalada. Considerando a segunda abordagem (Equação 3.15), os valores de potência média anual estimados superam aquela potência instalada em ≈ 4 vezes (644 GW, Tabela 4.8), até 50 m e em ≈ 6 vezes (946 GW, Tabela 4.8), até 100 m de profundidade, respectivamente.

É importante ressaltar que no presente trabalho não foram excluídas as áreas protegidas de Unidades de Conservação, áreas com intenso tráfego marítimo ou que possam apresentar uma geologia desfavorável à instalação das turbinas. Isto quer dizer que os números apresentados devem ser vistos como superestimativas, uma vez que considerando-se todas as restrições, o potencial de geração de energia eólica deverá ser menor.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, dados de vento na superfície do mar estimados por satélite, simulados por modelo numérico, derivados de reanálise e de um produto integrado foram comparados estatisticamente com dados medidos em boias oceanográficas na margem continental brasileira. Os resultados obtidos mostram que os dados do escaterômetro ASCAT otimizados para regiões costeiras e com resolução espacial de 12,5 km são os que conseguem representar melhor o campo de vento medido in situ, com menor RMSE ($< 1,27 \text{ m.s}^{-1}$), viés ($\pm 0,30 \text{ m.s}^{-1}$) e maior correlação ($> 0,85$) em relação aos demais produtos comparados.

Os dados ASCAT foram então utilizados para estimar o potencial de geração de energia eólica offshore na região de interesse. Três regiões com alto potencial eólico foram identificadas: (i) entre o leste do Pará a divisa entre RN-PB (\bar{D}_{100} anual $> 461\text{--}956 \text{ W.m}^2$), (II) entre o Cabo de Santa Marta Grande e a Lagoa dos Patos (\bar{D}_{100} anual $> 376\text{--}594 \text{ W.m}^2$), (III) entre o sul do ES e Cabo Frio (\bar{D}_{100} anual $> 184\text{--}525 \text{ W.m}^2$). Nessas regiões são observados valores de densidade de potência média anual $> 400 \text{ W.m}^{-2}$, o que pode ser considerado como condição ideal para a geração de energia eólica [Manwell et al. \(2009\)](#). A primavera (SON) é a estação com ventos mais intensos e, conseqüentemente, com maior potencial de geração de energia nessas três regiões.

Utilizando uma abordagem metodológica mais clássica, como a empregada por [Pimenta et al. \(2008\)](#) e [Ortiz e Kampel \(2011\)](#), estima-se um potencial anual de geração de energia eólica *offshore* na margem continental brasileira de 1.251 GW, até a profundidade de 100 m. Este valor equivale a 8 vezes a potência de 163 GW instalada no Brasil em 2018 ([EPE, 2019](#)).

Utilizando uma nova abordagem proposta no presente trabalho, estima-se um potencial anual relativamente menor (946 GW), ainda assim equivalente a 6 vezes a potência nacional instalada em 2017. De toda forma, ambas as estimativas devem ser analisadas com restrição por não considerarem a exclusão de áreas protegidas em Unidades de Conservação, áreas com intenso tráfego marítimo ou que possam apresentar características geológicas e geotécnicas desfavoráveis à instalação das estruturas de sustentação das turbinas.

O produto CCMP também apresentou uma boa comparação estatística com as medidas de vento in situ (RMSE $< 1,56 \text{ m.s}^{-1}$, $\pm 0,37 \text{ m.s}^{-1}$ e $R > 0,82$). Considerando sua alta resolução temporal (6 horas) e extensão da série temporal (30 anos), foi

utilizado para gerar uma climatologia e para analisar a variabilidade dos campos de vento na região de estudo. Os dados climatológicos representaram bem os principais sistemas atmosféricos atuantes na região. Os índices VMA e VIA calculados se mostraram úteis na identificação das zonas de maior ou menor variabilidades. As regiões de maior variabilidade anual da velocidade do vento ($VMA \geq 50\%$) estão situadas entre a plataforma continental interna da SBB e o extremo sul da região de estudo. A norte da SBB, a variabilidade anual diminui ($VMA < 23\%$). De modo geral, a variabilidade inter-anual é baixa ($VIA < 8\%$), enquanto a variabilidade inter-sazonal é relativamente maior ($VIA \approx 17,8$ em MAM).

Ainda que se possa ter associado a distribuição dos valores de VMA e VIA calculados a sistemas atmosféricos característicos da região de estudo descritos na literatura, deve-se mencionar que o uso em trabalhos futuros de outros métodos de filtragem, análise espectral ou funções ortogonais empíricas, p.ex., podem contribuir para um melhor entendimento dos processos que modulam a variabilidade do vento.

Trabalhos futuros devem ainda, delimitar as áreas mais viáveis para a instalação dos parques eólicos. O ajuste de funções de densidade de probabilidade, como a que utiliza a distribuição estatística de Weibull, pode ser útil para determinar os intervalos de velocidade do vento com maiores probabilidades de ocorrência e tempo de atividade dos aerogeradores. Considerar uma estabilidade atmosférica realística ao invés de uma estabilidade neutra, como adotado no presente trabalho para a extrapolação vertical da velocidade do vento pode melhorar a acurácia das estimativas de velocidade em alturas típicas das turbinas eólicas. Este tipo de abordagem metodológica pode melhorar a qualidade das estimativas de potencial eólico.

A simulação do campo de ventos com uso de modelos numéricos de previsão constitui um método alternativo para evitar a extrapolação em altitude do vento em superfície. Carvalho et al. (2017) apresentaram boas comparações estatísticas entre simulações numéricas do modelo WRF e dados medidos em boias fundeadas na Península Ibérica.

Recentemente, em agosto de 2018, foi lançado o satélite Atmospheric Dynamics Mission Aeolus (ADM-Aeolus), levando a bordo o sensor Atmospheric LAsER Doppler INstrument (ALADIN). Este sensor orbital é capaz de medir o perfil de velocidade do vento com resolução vertical de até 250 m (KANITZ et al., 2019). Seria interessante validar os dados gerados por esta missão na região da margem continental brasileira e analisar como estas informações podem ser úteis na estimativa do potencial eólico e no monitoramento futuro dos parques eólicos (PÁDUA,).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, S. **Active techniques for wind and wave observations: radar altimeter**. ECMWF: Use of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction, 8–12 September, 2014. Disponível em: <<https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2015/7618-active-techniques-wind-and-wave-observations-radar-altimeter.pdf>>. 24
- AMARANTE, O. A.; BROWER, M.; ZACK, J.; Sá, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. [S.l.]: Ministerio de Minas e Energia e Eletrobras, 2001. 1
- ANDERSON, C.; BONEKAMP, H.; DUFF, C.; FIGA-SALDANA, J.; WILSON, J. Analysis of ascat ocean backscatter measurement noise. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 7, p. 2449–2457, 2012. 24
- ANDREAS, E. **Thermal and size evolution of sea spray droplets**. [S.l.: s.n.], 1989. 38
- ATLAS, R.; HOFFMAN, R.; BLOOM, S.; JUSEM, J.; ARDIZZONE, J. A multiyear global surface wind velocity dataset using ssm/i wind observations. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 5, p. 869–882, 1996. 33
- ATLAS, R.; HOFFMAN, R. N.; ARDIZZONE, J.; LEIDNER, S. M.; JUSEM, J. C.; SMITH, D. K.; GOMBOS, D.; ATLAS, R.; HOFFMAN, R. N.; ARDIZZONE, J.; LEIDNER, S. M.; JUSEM, J. C.; SMITH, D. K.; GOMBOS, D. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 92, n. 2, p. 157–174, feb 2011. ISSN 0003-0007. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010BAMS2946.1>>. 33
- ATTEMA, E. P. The active microwave instrument on-board the ers-1 satellite. **Proceedings of the IEEE**, v. 79, n. 6, p. 791–799, 1991. 20
- BAPTISTA, M. C. **Uma análise do campo de vento de superfície sobre o oceano atlântico tropical e sul usando dados do escaterômetro do ERS**. 131 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003. 3, 54

BARNABY, J.; CAMPBELL, S.; CLYDE, T.; CROWLEY, S.; DRYMONAKOS, A.; FISHER, B.; FORD, F.; GYAN, J.; GORDON, B.; HAYES, K.; KERR, H.; MACKENZIE, S.; NEWTON, H.; OLIVIER, E.; RAFFERTY, S.; ROBERTS, A.; ROSATO, G.; RUDD, E.; RUNDLE, M.; TAJUDEEN, O.; WELLARD, J.; WHEAL, R.; LANSCHOT, T. v. **Offshore renewable energy for guernsey: a short to medium term strategic plan**. [s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.guernseyrenewableenergy.com/documents/managed/Offshore%20Renewable%20Energy%20for%20Guernsey.pdf>>. 39

BENTAMY, A.; CROIZE-FILLON, D.; PERIGAUD, C. Characterization of ascat measurements based on buoy and quikscat wind vector observations. **Ocean Science**, v. 4, n. 4, p. 265–274, 2008. 3, 52

BENTAMY, A.; QUILFEN, Y.; GOHIN, F.; GRIMA, N.; LENAOUR, M.; SERVAIN, J. Determination and validation of average wind fields from ers-1 scatterometer measurements. **Global Atmosphere and Ocean System**, v. 4, p. 1–29, 1996. 3

BOURASSA, M. A.; GILLE, S. T.; JACKSON, D. L.; ROBERTS, J. B.; WICK, G. A. Ocean winds and turbulent air-sea fluxes inferred from remote sensing. **Oceanography**, v. 23, n. 4, p. 36–51, 2010. 24

BUNKER, A. F. Computations of surface energy flux and annual air–sea interaction cycles of the north atlantic ocean. **Monthly Weather Review**, v. 104, n. 9, p. 1122–1140, 1976. 13

BUSINGER, J. A. Turbulence transfer in the atmospheric surface layer. In: AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. **Workshop on micrometeorology**. [S.l.], 1973. p. 67–100. 38

CAMARGO, R. de; TODESCO, E.; PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B. de. Modulation mechanisms of marine atmospheric boundary layer at the Brazil-Malvinas Confluence region. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 12, p. 6266–6280, jun 2013. ISSN 2169897X. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/jgrd.50492>>. 57

CAMPOS, E. J. D.; LORENZZETTI, J. A.; STEVENSON, M. R.; STECH, J. L.; SOUZA, R. B. d. Penetration of waters from the Brazil-Malvinas confluence region along the south american continental shelf up to 23 s. **Academia Brasileira de Ciências**, v. 68, p. 49–58, 1996. 11, 57

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. S. Offshore winds and wind energy production estimates derived from ASCAT, OSCAT, numerical weather prediction models and buoys – a comparative study for the Iberian Peninsula Atlantic coast. **Renewable Energy**, v. 102, p. 433–444, 2017. ISSN 18790682. 52, 53

CARVALHO, L. d.; JONES, C. Zona de Convergência do Atlântico Sul. In: CAVALCANTI, I.; FERREIRA, N.; SILVA, M. da; DIAS, M. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2009. cap. 6, p. 95–109. 8

CASTRO, B. M. **Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter**. Tese (Doutorado em Filosofia) — University of Miami, Coral Gables, 1985. 54

CAVALCANTI, I.; KOUSKY, V. Frentes frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I.; FERREIRA, N.; SILVA, M. da; DIAS, M. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. [S.l.]: Oficina de Textos. 9, 58

_____. Climatology of south american cold fronts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 7., Wellington, New Zealand. **Proceedings of the Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography**. [S.l.], 2003. 9, 10

CHARNOCK, H. Wind stress on a water surface. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 81, n. 350, p. 639–640, 1955. 37

CHELTON, D. B.; SCHLAX, M. G.; WITTER, D. L.; RICHMAN, J. G. Geosat altimeter observations of the surface circulation of the southern ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 95, n. C10, p. 17877–17903, 1990. 57

CITEAU, J.; BERGÈS, J.-C.; DEMARCQ, H.; MAHÉ, G. The watch of ITCZ migrations over the tropical atlantic ocean as an indicator in drought forecast over the sahelian area. **Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter**, n. 45, p. 1–3, 1988. Disponível em: <<http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:39726>>. 7, 41, 56, 57

COLIN, C.; GARZOLI, S. L. In situ wind measurements and the ocean response in the equatorial atlantic during the programme francais ocean et climat dans l'atlantique equatorial and seasonal response of the atlantic ocean experiment. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 92, n. C4, p. 3741–3750, 1987.

13

CORRÊA, A. G. **Climatologia dos ventos e potencial eólico offshore de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. 68

COX, C.; MUNK, W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter. **Journal Materials Research**, v. 13, p. 198–227, 1954. 15

EBUCHI, N.; GRABER, H. C.; CARUSO, M. J. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 12, p. 2049–2062, 2002. ISSN 07390572. 3

ELETROBRAS. **Atlas do potencial eólico brasileiro - simulações 2013**.

[s.n.], 2017. 52 p. Disponível em:

<<http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=27089&indexSearch=ID{%}5Cnfiles/658/online.html>>.

3

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2018 no ano base de 2017**. 2018. 249 p. Disponível em:

<<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>>.

1

_____. **Balanco energético nacional**. 2019. Disponível em:

<<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>.

1, 72, 75

ENERDATA. **Global Energy Statistical Yearbook**. Enerdata, 2019.

Disponível em: <<https://yearbook.enerdata.net/>>. 1

EUMETSAT. ASCAT Product Guide. **ASCAT Products Overview**, p. 22–42,

2015. Disponível em: <<http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/eps-pg/ASCAT/ASCAT-PG-4ProdOverview.htm>>.

23

FEDOROVA, N.; CARVALHO, M. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño. parte ii: zonas frontais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 2, p. 57–72, 2000. 60

FORE, A. G.; STILES, B. W.; CHAU, A. H.; WILLIAMS, B. A.; DUNBAR, R. S.; RODRÍGUEZ, E. Point-wise wind retrieval and ambiguity removal

improvements for the quikscat climatological data set. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 51–59, 2014. 20, 21

FRANCIS, C.; GRAF, G.; EDWARDS, P.; MCCRAIG, M.; MCCARTHY, C.; LEFEBVRE, A.; PIEPER, B.; POUVREAU, P.-Y.; WALL, R.; WESCHLER, F. The ers-2 spacecraft and its payload. **Esa Bulletin**, v. 83, 1995. 20

FREILICH, M. H.; DUNBAR, R. S. The accuracy of the NSCAT 1 vector winds: comparisons with national data buoy center buoys. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C5, p. 11231–11246, 1999. 3

GAISER, P. W. et al. The windsat spaceborne polarimetric microwave radiometer: Sensor description and early orbit performance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 11, p. 2347–2361, 2004. 16, 17

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293–1302, may 1991. ISSN 0027-0644. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493\(2011\)119<1293:3ASCOSA>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493(2011)119<1293:3ASCOSA>2.0.CO;2)>. 9, 58, 60

GARVINE, R. W.; KEMPTON, W. Assessing the wind field over the continental shelf as a resource for electric power. **Journal of Marine Research**, v. 66, p. 751–773, 2008. ISSN 0022-2402. 64, 68

GIANNINI, A.; KUSHNIR, Y.; CANE, M. A. Interannual variability of caribbean rainfall, ENSO, and the Atlantic Ocean. **Journal of Climate**, v. 13, n. 2, p. 297–311, 2000. 60

GLAZMAN, R. E.; GREYSUKH, A. Satellite altimeter measurements of surface wind. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 98, n. C2, p. 2475–2483, 1993. 24

GLAZMAN, R. E.; PILORZ, S. H. Effects of sea maturity on satellite altimeter measurements. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 95, n. C3, p. 2857–2870, 1990. 24

GOURRION, J.; VANDEMARK, D.; BAILEY, S.; CHAPRON, B.; GOMMENDINGER, G.; CHALLENGOR, P.; SROKOSZ, M. A two-parameter wind speed algorithm for ku-band altimeters. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 12, p. 2030–2048, 2002. 24

GRABER, H. C.; EBUCHI, N.; VAKKAYIL, R. Evaluation of ERS-1 scatterometer winds with ocean buoy observations. In: OCEANS CONFERENCE. **Proceedings of the OCEANS CONFERENCE**. [S.l.]: IEEE, 1996. v. 3, p. 1157–1165. 3

HASAGER, C. B.; BARTHELMIE, R. J.; CHRISTIANSEN, M. B.; NIELSEN, M.; PRYOR, S. Quantifying offshore wind resources from satellite wind maps: study area the north sea. **Wind Energy**, v. 9, n. 1-2, p. 63–74, 2006. 2

HASTENRATH, S. **Climate dynamics of the tropics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1991. 8, 56, 58

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77–92, jan 1977. ISSN 00359009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qj.49710343505>>. 7, 54, 56, 57

HASTENRATH, S.; LAMB, P. J. **Climatic atlas of the tropical Atlantic and eastern Pacific Oceans**. [S.l.]: University of Wisconsin Press, 1977. 13, 41

HELLERMAN, S. Charts of the variability of the wind stress over the tropical atlantic. In: SIEDLER, G.; WOODS, J. D.; DUING, W. (Ed.). **Oceanography and surface layer meteorology in the B/C scale**. [S.l.]: Elsevier, 1980. p. 63–75. 13

HERSBACH, H.; STOFFELEN, A.; HAAN, S. The improved C-band geophysical model function CMOD5. **European Space Agency, (Special Publication) ESA SP**, v. 112, n. 572, p. 863–870, 2005. ISSN 03796566. 32

HOFFMAN, R. N. Ssm wind ambiguity removal by direct minimization. **Monthly Weather Review**, v. 110, n. 5, p. 434–445, 1982. 33

_____. Ssm wind ambiguity removal by direct minimization. part ii: use of smoothness and dynamical constraints. **Monthly weather review**, v. 112, n. 9, p. 1829–1852, 1984. 33

HOLLINGER, J. P.; PEIRCE, J. L.; POE, G. A. Ssm/i instrument evaluation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 5, p. 781–790, 1990. 16

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I.; HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. **Journal of Climate**, v. 18,

n. 20, p. 4108–4129, oct 2005. ISSN 0894-8755. Disponível em:
<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI3570.1>>. 9, 58

HUBERT, L. F.; THOMASELL, A. **Error characteristics of satellite-derived winds**. Washington: NOAA, 1979. 14

HWANG, P. A.; TEAGUE, W. J.; JACOBS, G. A.; WANG, D. W. A statistical comparison of wind speed, wave height, and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the gulf of mexico region. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 103, n. C5, p. 10451–10468, 1998. 24

IMAOKA, K.; MAEDA, T.; KACHI, M.; KASAHARA, M.; ITO, N.; NAKAGAWA, K. Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1. In: EARTH OBSERVING MISSIONS AND SENSORS: DEVELOPMENT, IMPLEMENTATION, AND CHARACTERIZATION II. **Proceedings of the SPIE**. [S.l.]: International Society for Optics and Photonics, 2012. v. 8528, p. 852815. 17

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Key world energy statistics**. 2018. 1

JABER, S. Environmental impacts of wind energy. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 1, n. 3, p. 251–254, 2013. 1

JONES, W. L.; SCHROEDER, L. C.; BOGGS, D. H.; BRACALENTE, E. M.; BROWN, R. A.; DOME, G. J.; PIERSON, W. J.; WENTZ, F. J. The seasat-a satellite scatterometer: the geophysical evaluation of remotely sensed wind vectors over the ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 87, n. C5, p. 3297–3317, 1982. 20

JORDAN, R. L. The seasat-a synthetic aperture radar system. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 5, n. 2, p. 154–164, 1980. 25

KANITZ, T.; LOCHARD, J.; MARSHALL, J.; MCGOLDRICK, P.; LECRENIER, O.; BRAVETTI, P.; REITEBUCH, O.; RENNIE, M.; WERNHAM, D.; ELFVING, A. Aeolus first light: first glimpse. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPTICS—ICSO. **Proceedings of the SPIE**. [S.l.]: International Society for Optics and Photonics, 2019. v. 11180, p. 111801R. 76

KIDDER, S. Q.; KIDDER, R. M.; HAAR, T. H. V. **Satellite meteorology: an introduction**. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 1995. 14, 15

KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the baiu frontal zone, the spcz, and the sacz) part i: characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, n. 4, p. 813–836, 1992. 8

KUNKEE, D. B.; POE, G. A.; BOUCHER, D. J.; SWADLEY, S. D.; HONG, Y.; WESSEL, J. E.; ULIANA, E. A. Design and evaluation of the first special sensor microwave imager/sounder. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 4, p. 863–883, 2008. 16

LEESE, J. A.; NOVAK, C. S.; CLARK, B. B. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. **Journal of Applied Meteorology**, v. 10, n. 1, p. 118–132, 1971. 15

LEFEVRE, J.; BARCKICKE, J.; MENARD, Y. A significant wave height dependent function for topex/poseidon wind speed retrieval. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 99, n. C12, p. 25035–25049, 1994. 24

LIMA, D. K. S.; LEÃO, R. P. S.; SANTOS, A. C. S. dos; MELO, F. D. C. de; COUTO, V. M.; NORONHA, A. W. T. de; OLIVEIRA, D. S. Estimating the offshore wind resources of the State of Ceará in Brazil. **Renewable Energy**, v. 83, p. 203–221, 2015. ISSN 18790682. 64, 66

LIMA, I. D.; GARCIA, C. A.; MÖLLER, O. O. Ocean surface processes on the southern brazilian shelf: characterization and seasonal variability. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 10, p. 1307–1317, 1996. 11

LIU, W. T.; KATSAROS, K. B.; BUSINGER, J. A. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 36, n. 9, p. 1722–1735, 1979. 31

LIU, W. T.; TANG, W.; XIE, X. Wind power distribution over the ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 13, 2008. ISSN 00948276. 2

LORENZ, E. N.; LORENZ, F. N. **The nature and theory of the general circulation of the atmosphere**. [S.l.]: World Meteorological Organization Geneva, 1967. 5

LUSCOMBE, A.; FERGUSON, I.; SHEPHERD, N.; ZIMCIK, D.; NARAIN, P. The radarsat synthetic aperture radar development. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, p. 298–310, 1993. 25

MÄCHEL, H.; KAPALA, A.; FLOHN, H. Behaviour of the centres of action above the atlantic since 1881. part i: characteristics of seasonal and interannual variability. **International Journal of Climatology**, v. 18, n. 1, p. 1–22, 1998. 8, 56, 58

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: theory, design and application**. [s.n.], 2009. ISSN 14320932. ISBN 9781119994367. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781119994367>>. 26, 27, 28, 39, 75

MARENGO, J. A.; DRUYAN, L. M.; HASTENRATH, S. Observational and modelling studies of amazonia interannual climate variability. **Climatic Change**, v. 23, n. 3, p. 267–286, 1993. 60

MARENGO, J. A.; HASTENRATH, S. Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin. **Journal of Climate**, v. 6, n. 4, p. 617–627, 1993. 60

MARTIN, S. **An introduction to ocean remote sensing**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014. 1–512 p. 2, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25

MCPHADEN, M. J. et al. The tropical ocean-global atmosphere observing system: a decade of progress. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 103, n. C7, p. 14169–14240, 1998. 13

MEISSNER, T.; WENTZ, F. An updated analysis of the ocean surface wind direction signal in passive microwave brightness temperatures. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 6, p. 1230–1240, 2002. 16

MEISSNER, T.; WENTZ, F.; DRAPER, D. **GMI calibration algorithm and analysis theoretical basis document, version F**. [S.l.: s.n.], 2011. 311 p. 15

MEISSNER, T.; WENTZ, F. J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. **IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing**, v. 42, n. 9, p. 1836–1849, 2004. 15

MELO, A. d.; CAVALCANTI, I. d. A.; SOUZA, P. Zona de convergência intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I.; FERREIRA, N.; SILVA, M. da; DIAS, M. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2009. cap. 9, p. 25–41. 6, 7

MIKKELSEN, T. Remote sensing of wind. **Remote sensing for wind energy**, p. 7–20, 2010. 3

- MÖLLER, O. O.; PIOLA, A. R.; FREITAS, A. C.; CAMPOS, E. J. D. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 13, p. 1607–1624, jul 2008. ISSN 0278-4343. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434308000988>>. 11, 57
- MONALDO, F.; DOBSON, E. On using significant wave height and radar cross section to improve radar altimeter measurements of wind speed. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 94, n. C9, p. 12699–12701, 1989. 24
- NADERI, F. M.; FREILICH, M. H.; LONG, D. Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean-an overview of the nscat scatterometer system. **Proceedings of the IEEE**, v. 79, n. 6, p. 850–866, 1991. 20
- NECCO, G. Comportamiento de vortices ciclonicos en el area sudamericana durante el fgge: ciclogensis. **Meteorologica**, v. 13, n. 1, p. 7–20, 1982. 9, 58
- _____. Comportamiento de vórtices ciclónicos en el área sudamericana durante el fgge: trayectorias y desarrollos. **Meteorologica**, v. 13, n. 1, p. 21–34, 1982. 9, 58
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical atlantic and south america. **Journal of Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464–2479, 1996. 60
- NUNES, H. M. P. **Avaliação do potencial eólico ao largo da costa nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) — Universidade de Brasília, 2012. 64
- OLSON, D. B.; PODESTÁ, G. P.; EVANS, R. H.; BROWN, O. B. Temporal variations in the separation of brazil and malvinas currents. **Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers**, v. 35, n. 12, p. 1971–1990, 1988. 11
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20170905-recordegeracaoeolica.aspx>>. 1
- ORTIZ, G.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do brasil. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA. **Anais V do Simpósio Brasileiro de Oceanografia**. Santos, SP, 2011. 3, 62, 64, 68, 72, 75
- PÁDUA, M. B. Estudo da indução eletromagnética na caracterização de estruturas profundas sob a borda sul do cráton de são francisco. São José dos Campos, p. 2004. 162. (INPE-12565-TDI/1004). 76

PAYAN, C. Improvements in the use of scatterometer winds in the operational nwp system at meteo france. In: INTERNATIONAL WINDS WORKSHOP. **Proceedings of the International Winds Workshop**. Tokyo, Japan, 2010. p. 22–26. 53

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; CRUZ, E. I.; LYRA, A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107–110, 2013. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811200064X>>. 70

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991. 10, 12

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B.; DOURADO, M. S.; GARCIA, C. A. E.; MATA, M. M.; SILVA-DIAS, M. A. F. Ocean-atmosphere in situ observations at the Brazil-Malvinas Confluence region. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 22, nov 2005. ISSN 00948276. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL023866>>. 57

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B.; FARIAS, P. C.; ACEVEDO, O.; MILLER, A. J. Air-sea interaction at the Southern Brazilian Continental Shelf: in situ observations. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 121, n. 9, p. 6671–6695, sep 2016. ISSN 21699275. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2016JC011774>>. 57

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B. de; ACEVEDO, O.; WAINER, I.; MATA, M. M.; GARCIA, C. A. E.; CAMARGO, R. de. Multiyear measurements of the oceanic and atmospheric boundary layers at the Brazil-Malvinas confluence region. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. D19, p. D19103, oct 2009. ISSN 0148-0227. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2008JD011379>>. 57

PHILLIPS, D. R.; SMITH, E. A.; SUOMI, V. E. Comments on “an automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. **Journal of Applied Meteorology**, v. 11, n. 4, p. 752–754, 1972. 15

PIMENTA, F.; KEMPTON, W.; GARVINE, R. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of Southeastern Brazil. **Renewable Energy**, v. 33, n. 11, p. 2375–2387, 2008. ISSN 09601481. 2, 66, 68, 71, 75

- PIOLA, A.; MATANO, R.; STEELE, J.; THORPE, S.; TUREKIAN, K. **Brazil and Falklands (Malvinas) currents**. London: Academic Press, 2001. 57
- PIOLA, A. R.; CAMPOS, E. J.; MÖLLER, O. O.; CHARO, M.; MARTINEZ, C. Subtropical shelf front off eastern South America. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 105, n. C3, p. 6565–6578, 2000. 11, 57
- PIOLA, A. R.; MÖLLER, O. O.; GUERRERO, R. A.; CAMPOS, E. J. D. Variability of the subtropical shelf front off eastern South America: winter 2003 and summer 2004. **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 13, p. 1639–1648, jul 2008. ISSN 0278-4343. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434308001003?via%3Dihub>>. 11, 57
- PRYOR, S.; BARTHELMIE, R. Comparison of potential power production at on-and offshore sites. **Wind Energy**, v. 4, n. 4, p. 173–181, 2001. 1, 2
- REBOITA, M. **Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação climática e experimentos de sensibilidade**. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 9, 11, 58
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, 2010. 8
- REMMERS, T.; CAWKWELL, F.; DESMOND, C.; MURPHY, J.; POLITI, E. The potential of Advanced Scatterometer (ASCAT) 12.5 km coastal observations for offshore wind farm site selection in Irish waters. **Energies**, v. 12, n. 2, p. 206, jan 2019. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/12/2/206>>. 53
- RIENDEAU, S.; GRENIER, C. RADARSAT-2 antenna. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2007. **Proceedings of the IEEE Aerospace Conference**. [S.l.]: IEEE, 2007. p. 1–9. 25
- RODWELL, M. J.; HOSKINS, B. J. Subtropical anticyclones and summer monsoons. **Journal of Climate**, v. 14, n. 15, p. 3192–3211, 2001. 8, 56
- SAIDUR, R.; RAHIM, N.; ISLAM, M.; SOLANGI, K. Environmental impact of wind energy. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 5, p. 2423–2430, 2011. 1

- SARAVANAN, R.; CHANG, P. Interaction between tropical Atlantic variability and El Niño–Southern oscillation. **Journal of Climate**, v. 13, n. 13, p. 2177–2194, 2000. 60
- SEAGER, R.; MURTUGUDDE, R.; NAIK, N.; CLEMENT, A.; GORDON, N.; MILLER, J. Air–sea interaction and the seasonal cycle of the subtropical anticyclones. **Journal of Climate**, v. 16, n. 12, p. 1948–1966, 2003. 8, 56, 58
- SERVAIN, J.; BUSALACCHI, A. J.; MCPHADEN, M. J.; MOURA, A. D.; REVERDIN, G.; VIANNA, M.; ZEBIAK, S. E. A pilot research moored array in the tropical atlantic (PIRATA). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 10, p. 2019–2032, 1998. 14
- SILVA, A. R.; PIMENTA, F. M.; ASSIREU, A. T.; SPYRIDES, M. H. C. Complementarity of brazil's hydro and offshore wind power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 413–427, 2016. 28, 39, 66, 68, 70, 72
- SINCLAIR, M. R. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 10, p. 2239–2256, oct 1994. ISSN 0027-0644. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281994%29122%3C2239%3AAOCCFT%3E2.0.CO%3B2>>. 9, 58
- _____. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 6, p. 1601–1619, jun 1995. ISSN 0027-0644. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281995%29123%3C1601%3AACOCFT%3E2.0.CO%3B2>>. 9, 58
- SMITH, E. A.; PHILLIPS, D. R. Automated cloud tracking using precisely aligned digital ats pictures. **IEEE Transactions on Computers**, v. 100, n. 7, p. 715–729, 1972. 15
- SMITH, S. D. Coefficients for sea surface wind stress, heat-flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. C12, p. 15467–15472, 1988. Disponível em: <<x:%5Cdocument%5Cjournal%5Cpapers%5Csmith%5Cjgr%5C1988.pdf>>. 31, 37, 64
- SOREIDE, N.; WOODY, C.; HOLT, S. Overview of ocean based buoys and drifters: Present applications and future needs. In: **IEEE OCEANS, 4.**, 2001. **Proceedings of the IEEE Oceans Conference**. [S.l.], 2001. p. 2470–2472. 13

SOUKISSIAN, T.; AXAOPOULOS, P.; KARATHANASI, F. Offshore wind power in the Mediterranean Sea using Blended Sea Winds. In: **IEEE OCEANS**, 2015. **Proceedings of the IEEE Oceans Conference**. Genova, 2015. ISBN 9781479987368. 36

SOUKISSIAN, T.; PAPADOPOULOS, A.; SKRIMIZEAS, P.; KARATHANASI, F.; AXAOPOULOS, P.; AVGOUSTOGLU, E.; KYRIAKIDOU, H.; TSALIS, C.; VOUDOURI, A.; GOFA, F.; KATSAFADOS, P. Assessment of offshore wind power potential in the Aegean and Ionian Seas based on high-resolution hindcast model results. **AIMS Energy**, v. 5, n. 2, p. 268–289, 2017. ISSN 2333-8334.

Disponível em:

<<http://www.aimspress.com/article/10.3934/energy.2017.2.268>>. 36

SOUZA, A. G. Q. de; PIMENTA, F. M.; SILVA, A. R.; MELO, E. C. S.; SILVA, M. P. da; IANNIRUBERTO, M.; NUNES, H. M. P. North and Northeast Brazil offshore wind power. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA. **Anais do XIII Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica**. [S.l.], 2014. p. 159–163. 64, 66

SOUZA, R. B. d.; ROBINSON, I. S. Lagrangian and satellite observations of the brazilian coastal current. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 2, p. 241–262, 2004. 11, 57

STOFFELEN, A.; VERSPEEK, J. A.; VOGELZANG, J.; VERHOEF, A. The cmod7 geophysical model function for ascats and ers wind retrievals. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, IEEE, v. 10, n. 5, p. 2123–2134, 2017. 23, 32

STOPA, J. E.; CHEUNG, K. F.; TOLMAN, H. L.; CHAWLA, A. Patterns and cycles in the Climate Forecast System Reanalysis wind and wave data. **Ocean Modelling**, v. 70, p. 207–220, 2013. ISSN 14635003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.10.005>>. 36, 57, 58

SUDHA, A.; RAO, C. P. Comparison of Oceansat-2 scatterometer winds with buoy observations over the Indian Ocean and the Pacific Ocean. **Remote Sensing Letters**, v. 4, n. 2, p. 171–179, 2013. 3

SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K.; SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K. The South Atlantic Subtropical High: climatology and interannual variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279–3296, may 2017. ISSN 0894-8755. Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-16-0705.1>>. 8, 9, 56, 58, 60

TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 106, n. D7, p. 7183–7192, 2001. 36

TOKINAGA, H.; TANIMOTO, Y.; XIE, S.-P.; TOKINAGA, H.; TANIMOTO, Y.; XIE, S.-P. SST-induced surface wind variations over the Brazil–Malvinas Confluence: satellite and in situ observations. **Journal of Climate**, v. 18, n. 17, p. 3470–3482, sep 2005. ISSN 0894-8755. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI3485.1>>. 57

UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationships between tropical pacific and atlantic sst and northeast brazil monthly precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, n. 4, p. 551–562, 1998. 7

UVO, C. R. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989. 7

VAREJÃO, M. **Meteorologia e climatologia**. Recife: Versão Digital, 2005. 463 p. 5, 6, 7

VERHOEF, A.; PORTABELLA, M.; STOFFELEN, A. High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 7, p. 2481–2487, 2012. ISSN 01962892. 32, 52, 53

VERHOEF, A.; STOFFELEN, A. **ASCAT coastal winds validation report**. [S.l.]: Ocean and Sea Ice SAF Technical Note SAF/OSI/CDOP/KNMI/TEC/RP/176 on Product OSI-104, Version 1. 5, KNMI, 2013. 71

WALLACE, J.; HOBBS, P. **Atmospheric Science**. [S.l.: s.n.], 2006. 1–505 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796. 5, 9

WENTZ, F.; SCOTT, J.; HOFFMAN, R.; LEIDNER, M.; ATLAS, R.; ARDIZZONE, J. **Remote Sensing Systems Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) 6-hourly ocean vector wind analysis product on 0.25 deg grid, Version 2.0**. Santa Rosa, CA, 2015. Disponível em:

<<http://www.remss.com/measurements/ccmp/>>. Acesso em: 01 julho 2018. 33, 34

YOUNG, I.; HOLLAND, G. **Atlas of the oceans: wind and wave climate**. [S.l.]: Pergamon, 1996. 54

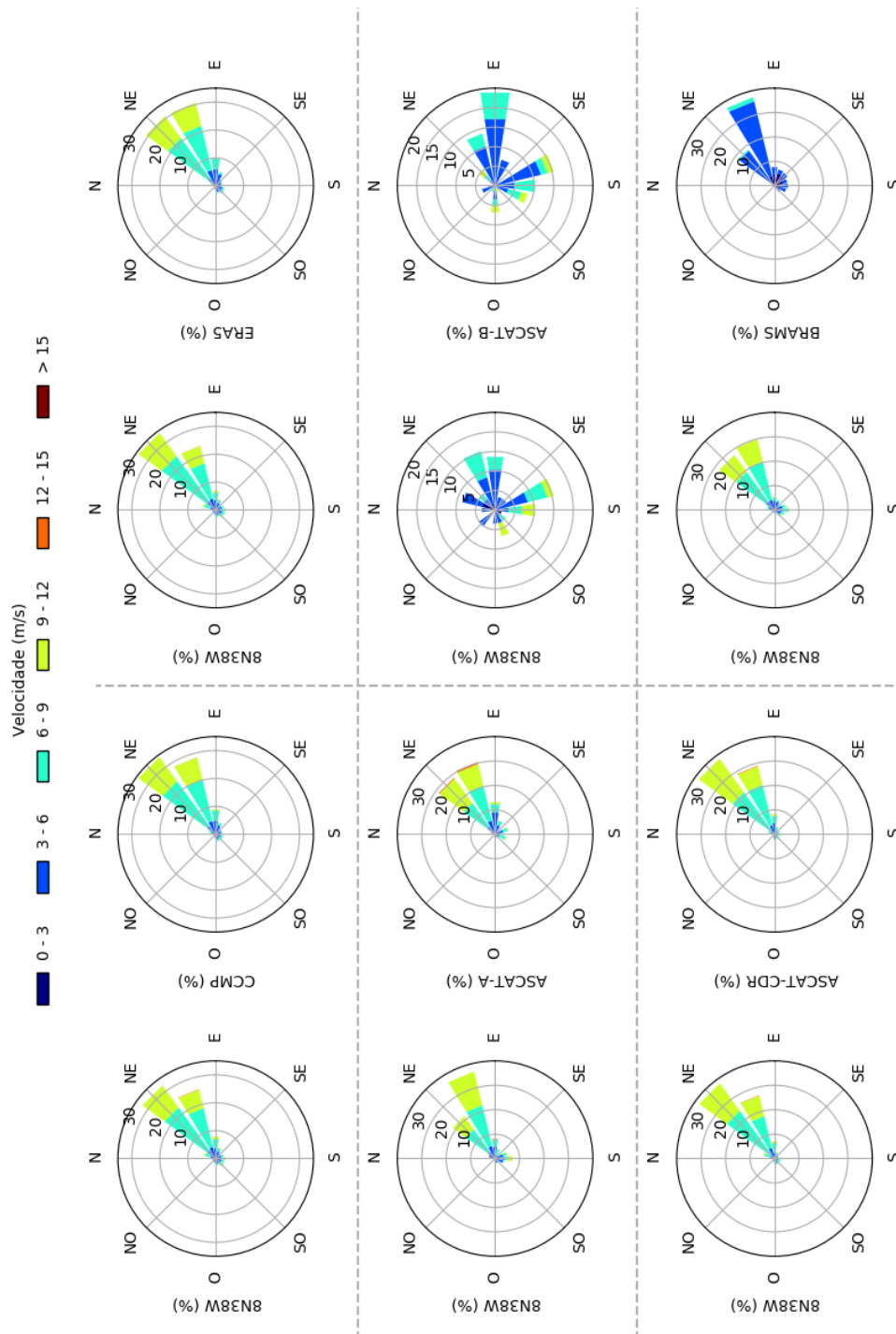
ZENG, L.; BROWN, R. A. Scatterometer observations at high wind speeds. **Journal of Applied Meteorology**, v. 37, n. 11, p. 1412–1420, 1998. 24

ZHANG, G.; ZHANG, B.; PERRIE, W.; HE, Y.; LI, H.; FANG, H.; KHURSHID, S.; WARNER, K. C-band right-circular polarization ocean wind retrieval. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 2019. 26

ANEXO A - HISTOGRAMAS POLARES DOS DADOS DOS PRODUTOS VSM CASADOS PAR-A-PAR COM OS DADOS DAS BOIAS

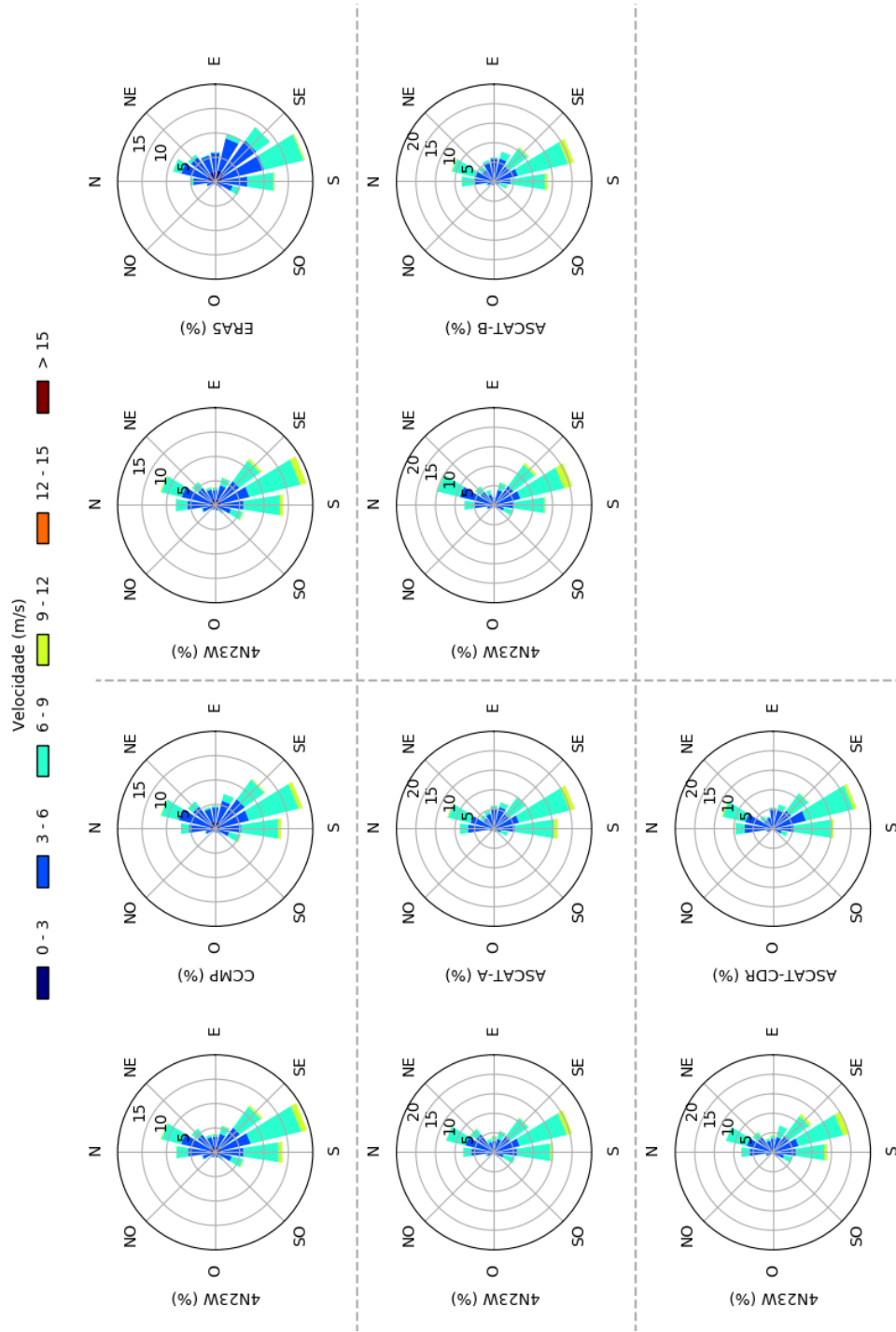
Neste Anexo são apresentados os histogramas polares das séries de vento medidas nas boias fundeadas casadas par-a-par com as séries do ponto de grade dos produtos VSM que contém as respectivas localizações das boias. As figuras estão apresentadas a partir da página seguinte para se estenderem pela página inteira.

Figura A.1 - Histogramas polares da série de ventos da boia 8N38W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



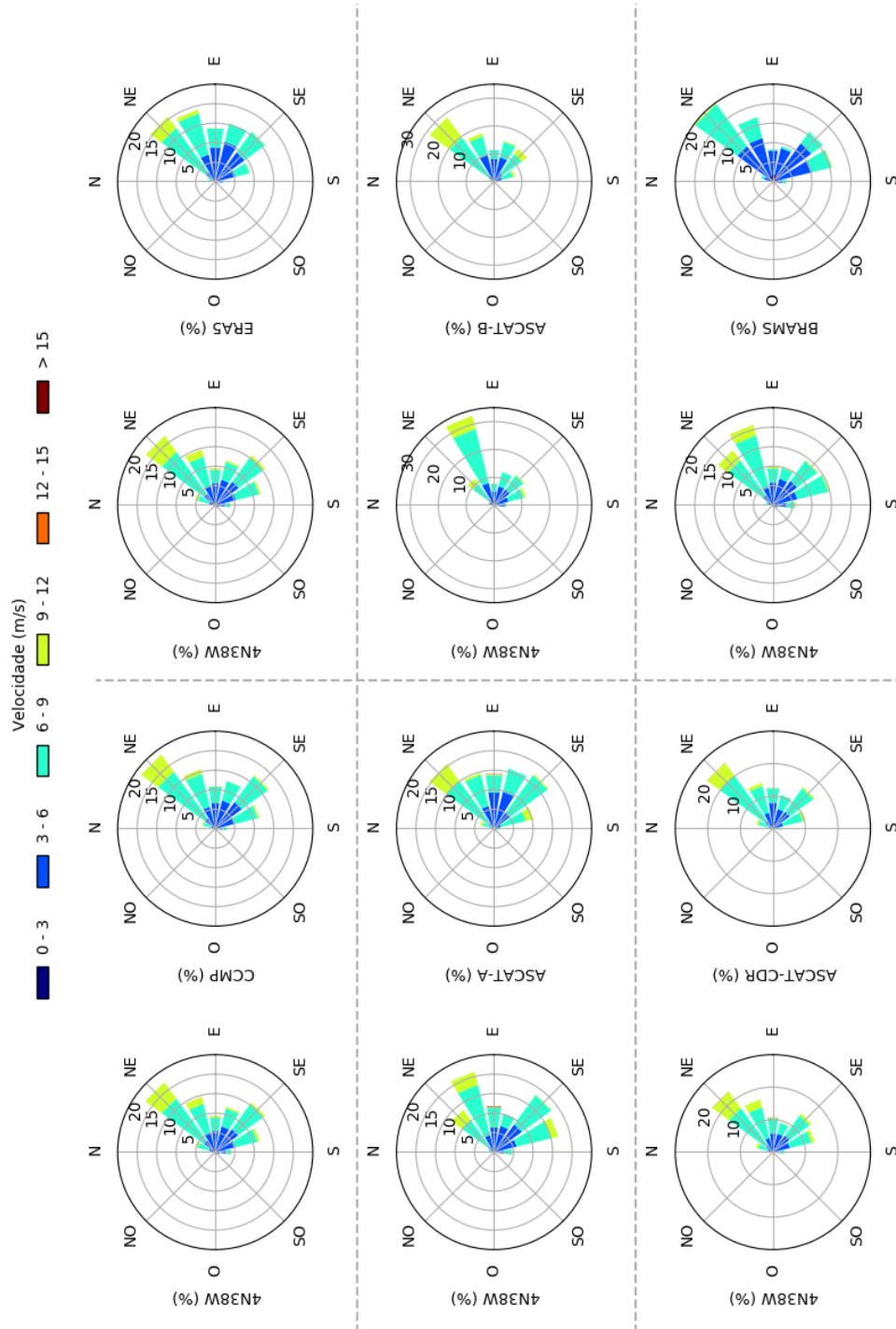
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.2 - Histogramas polares da série de ventos da boia 4N23W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



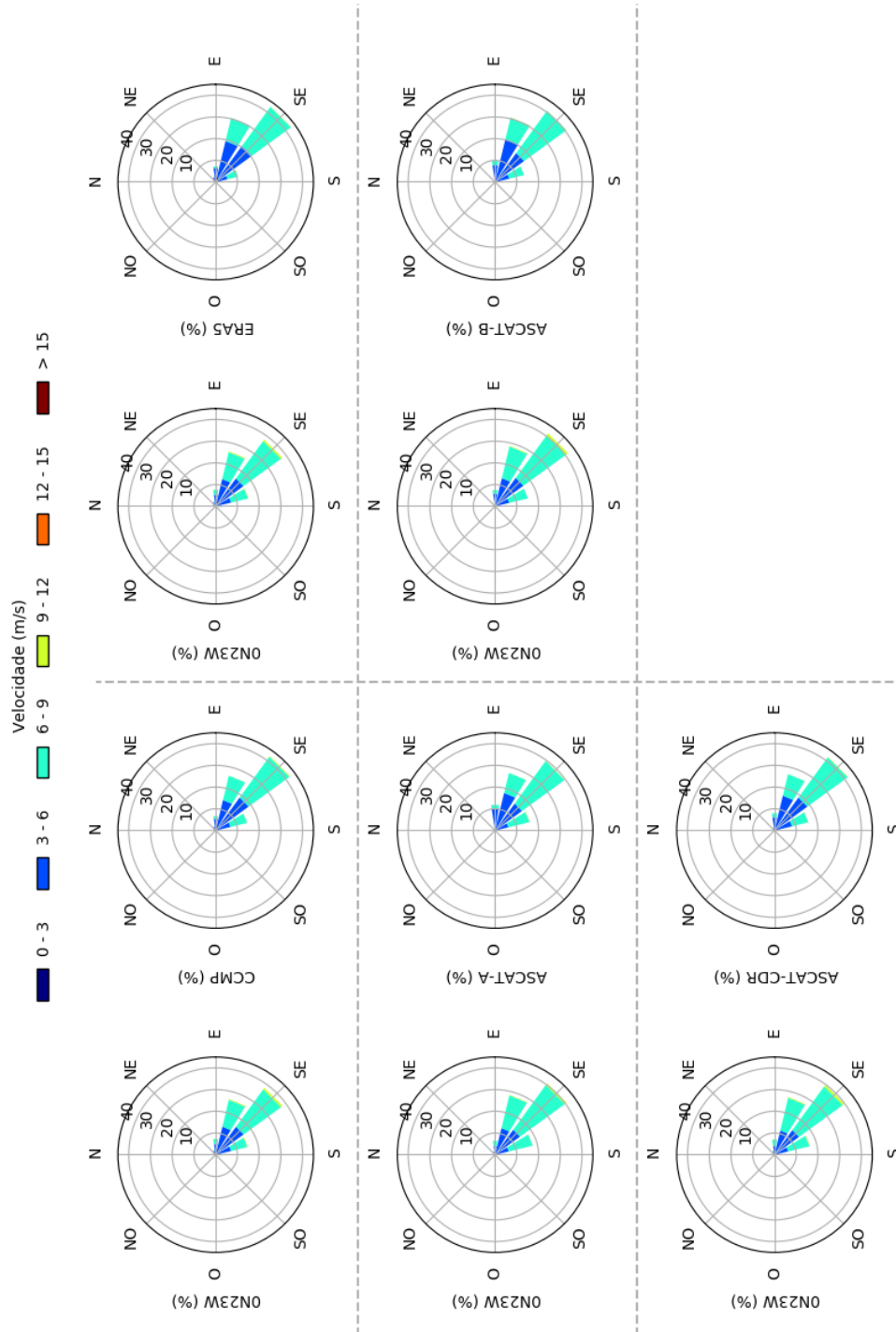
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.3 - Histogramas polares da série de ventos da boia 4N38W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



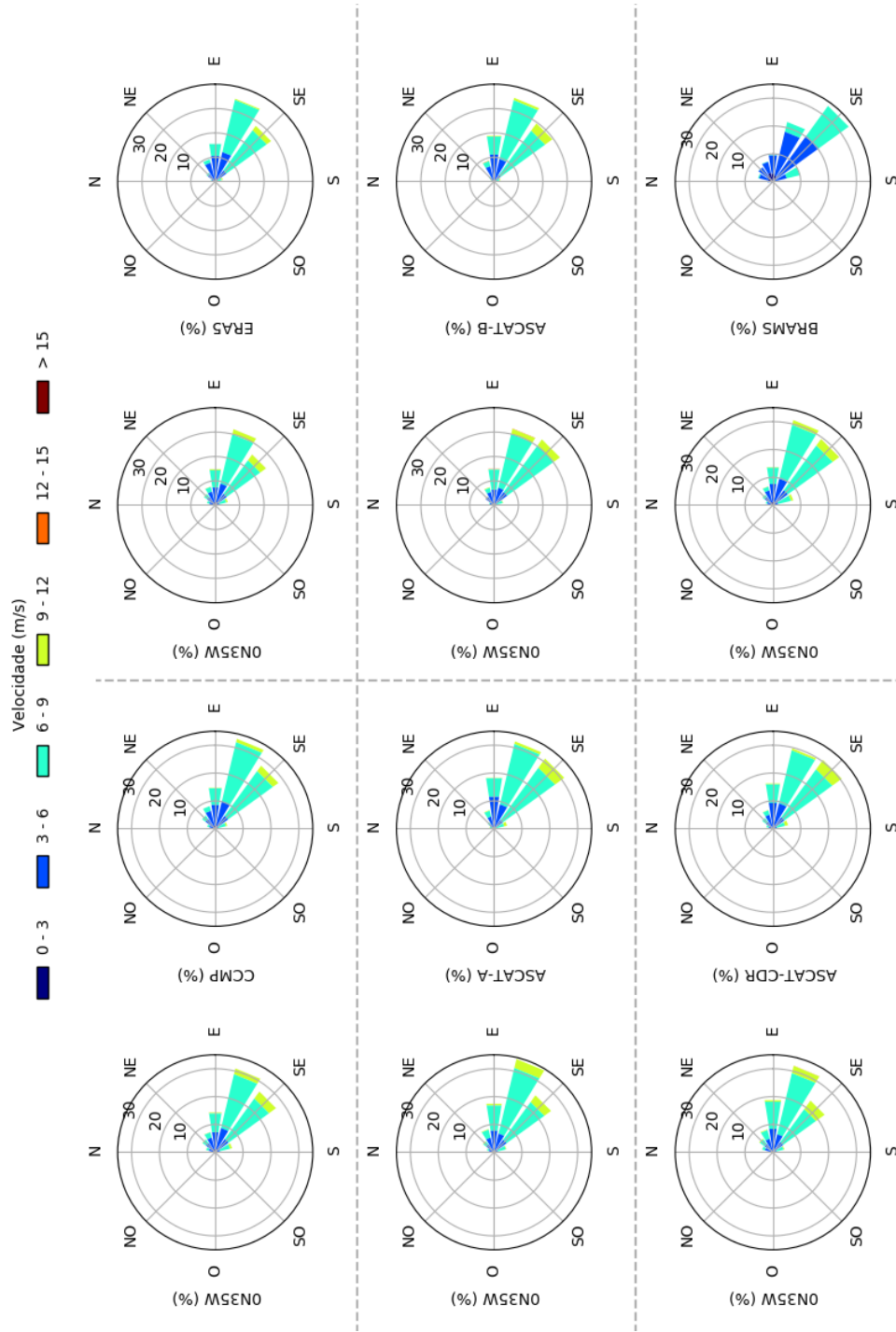
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.4 - Histogramas polares da série de ventos da boia 0N23W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



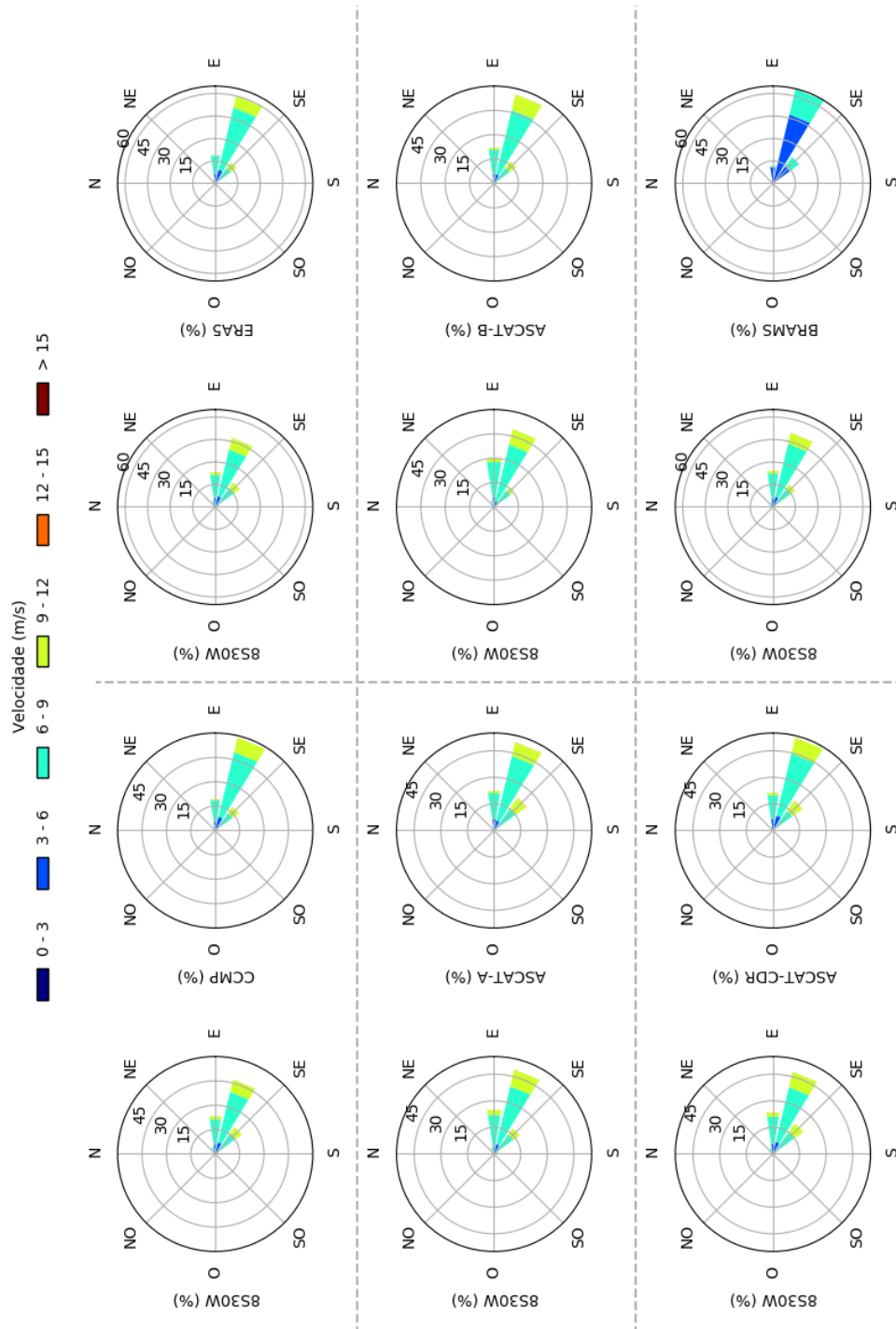
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.5 - Histogramas polares da série de ventos da boia 0N35W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



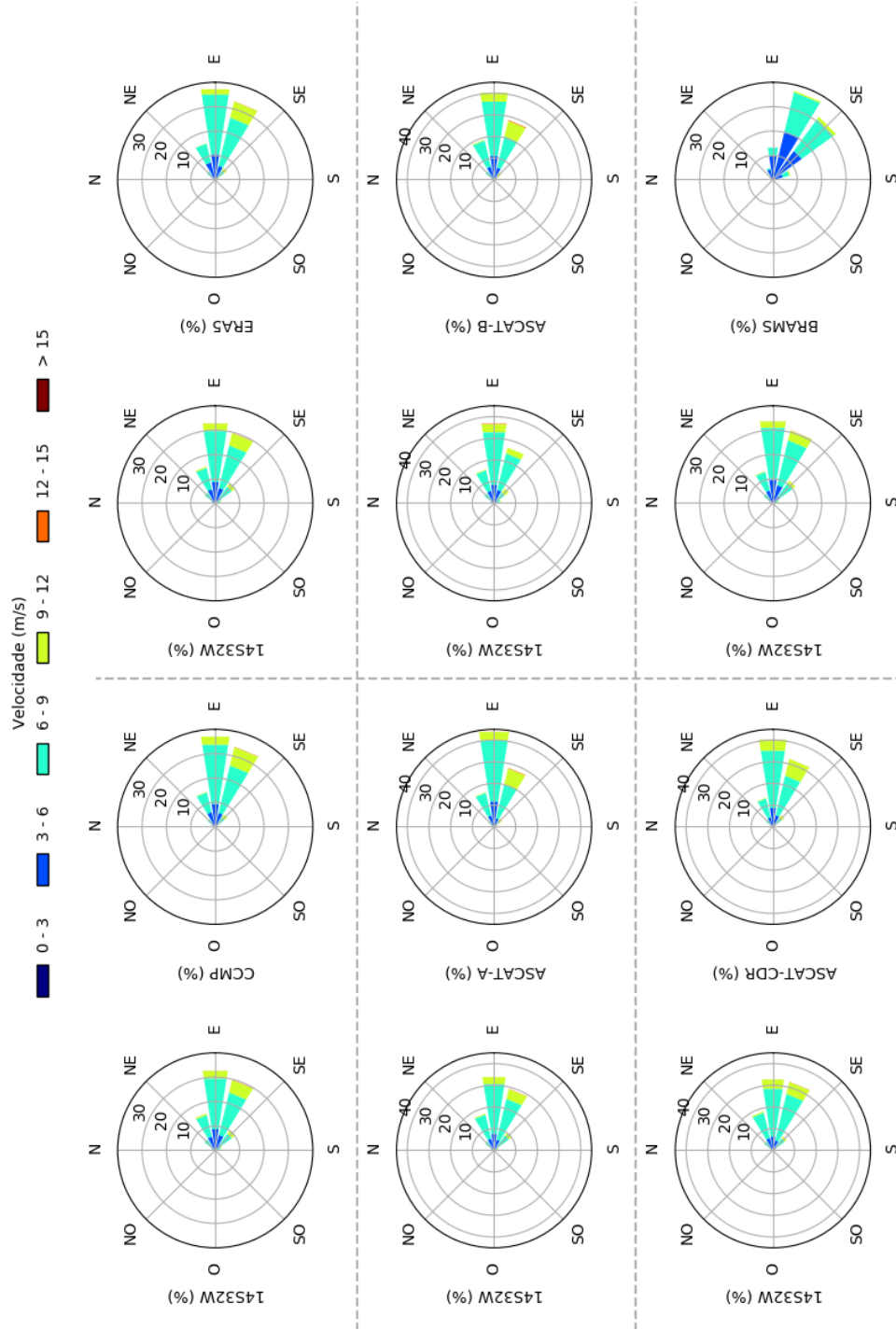
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.6 - Histogramas polares da série de ventos da boia 8S30W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



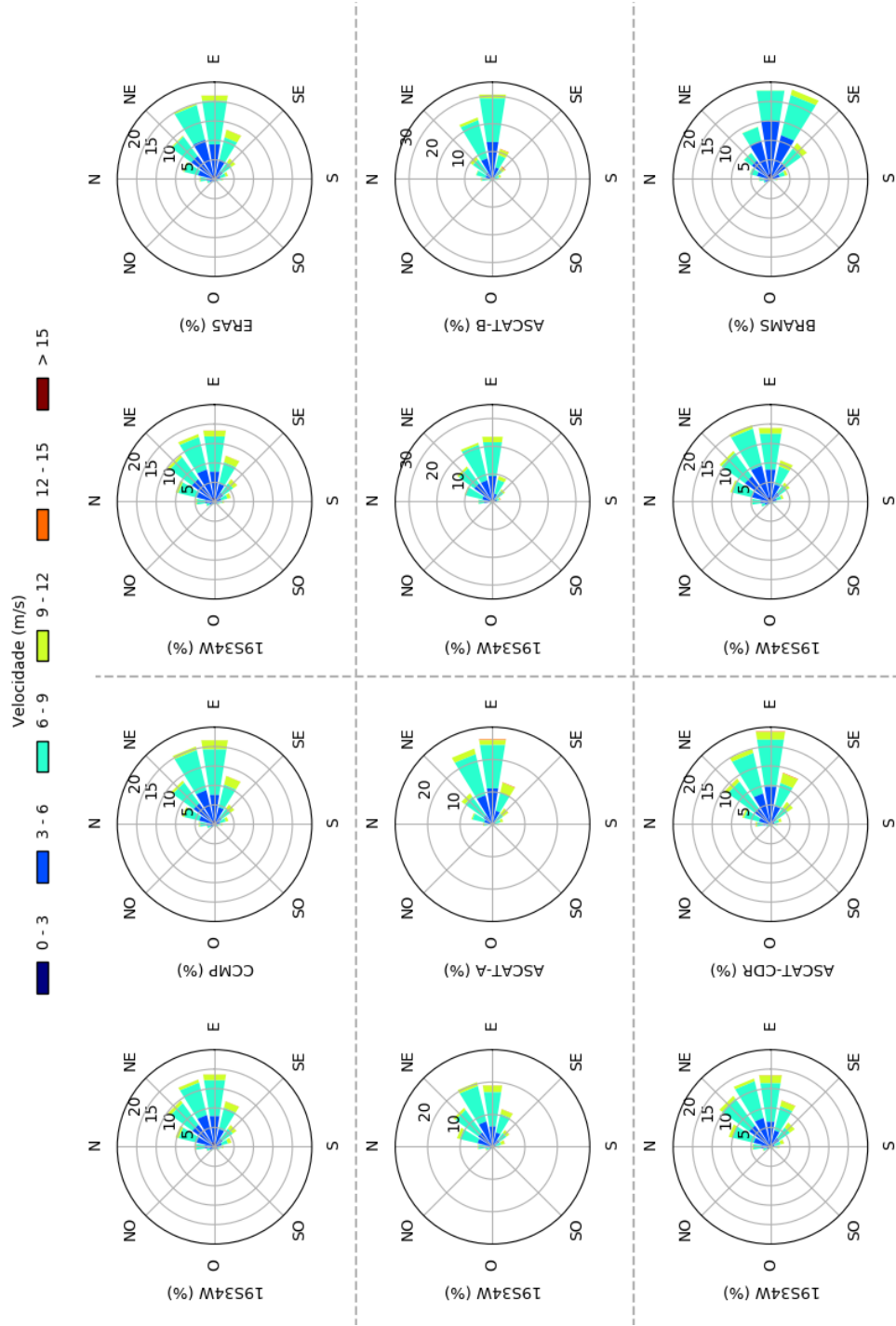
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.7 - Histogramas polares da série de ventos da boia 14S32W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



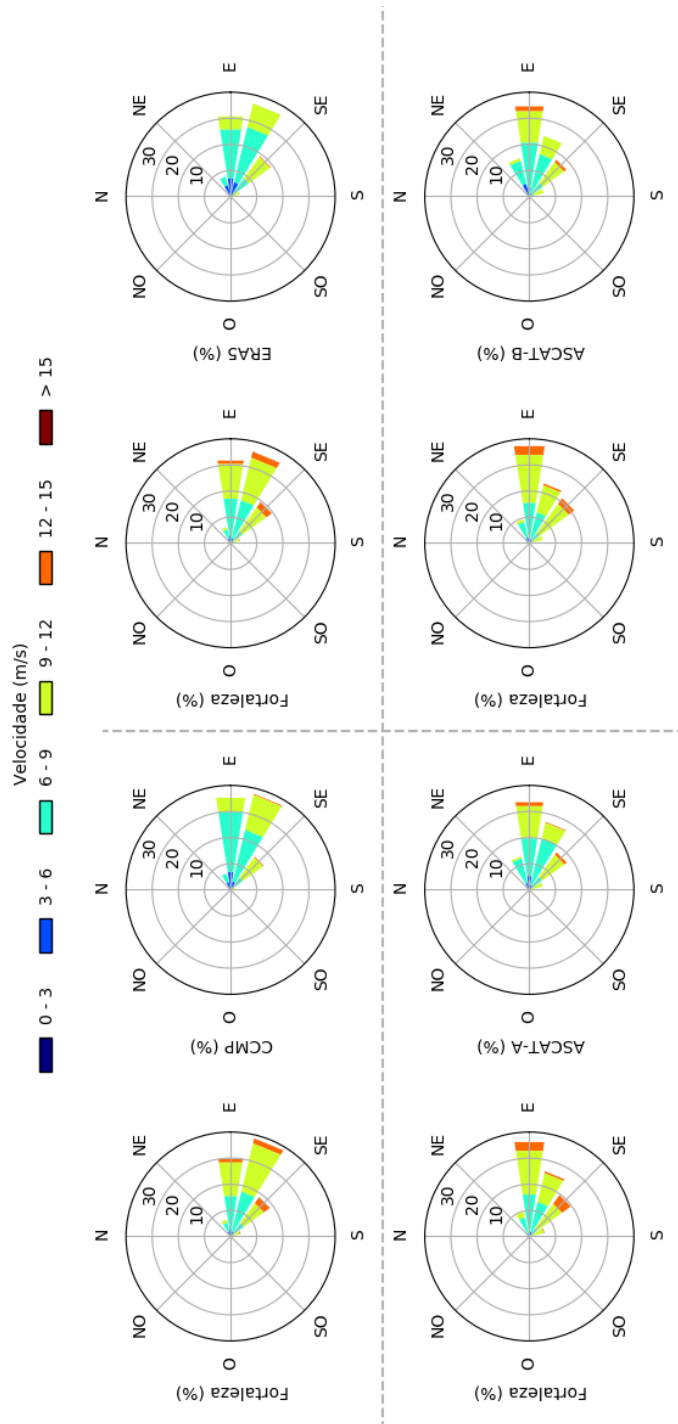
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.8 - Histogramas polares da série de ventos da boia 19S34W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



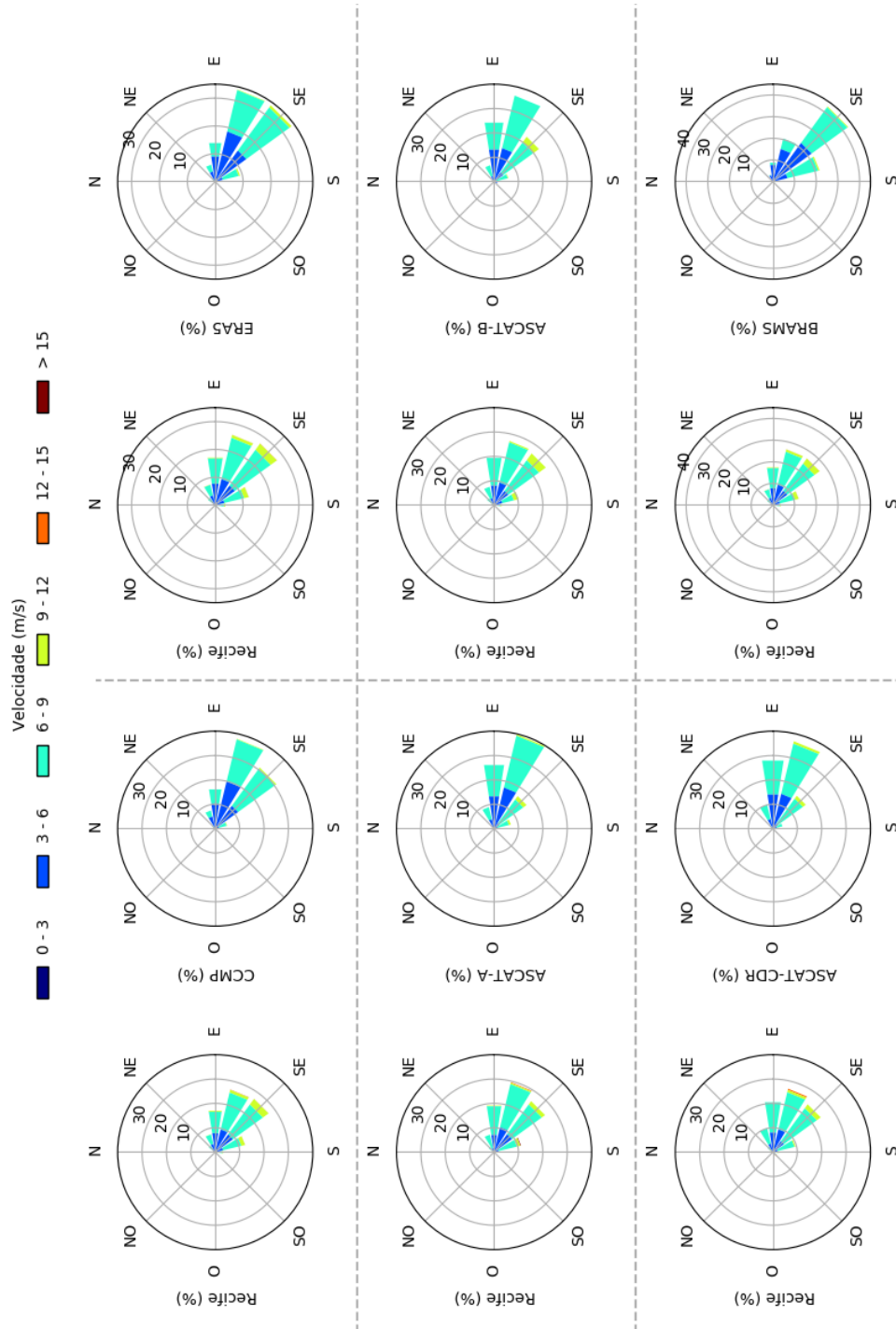
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.9 - Histogramas polares da série de ventos da boia 4N23W casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



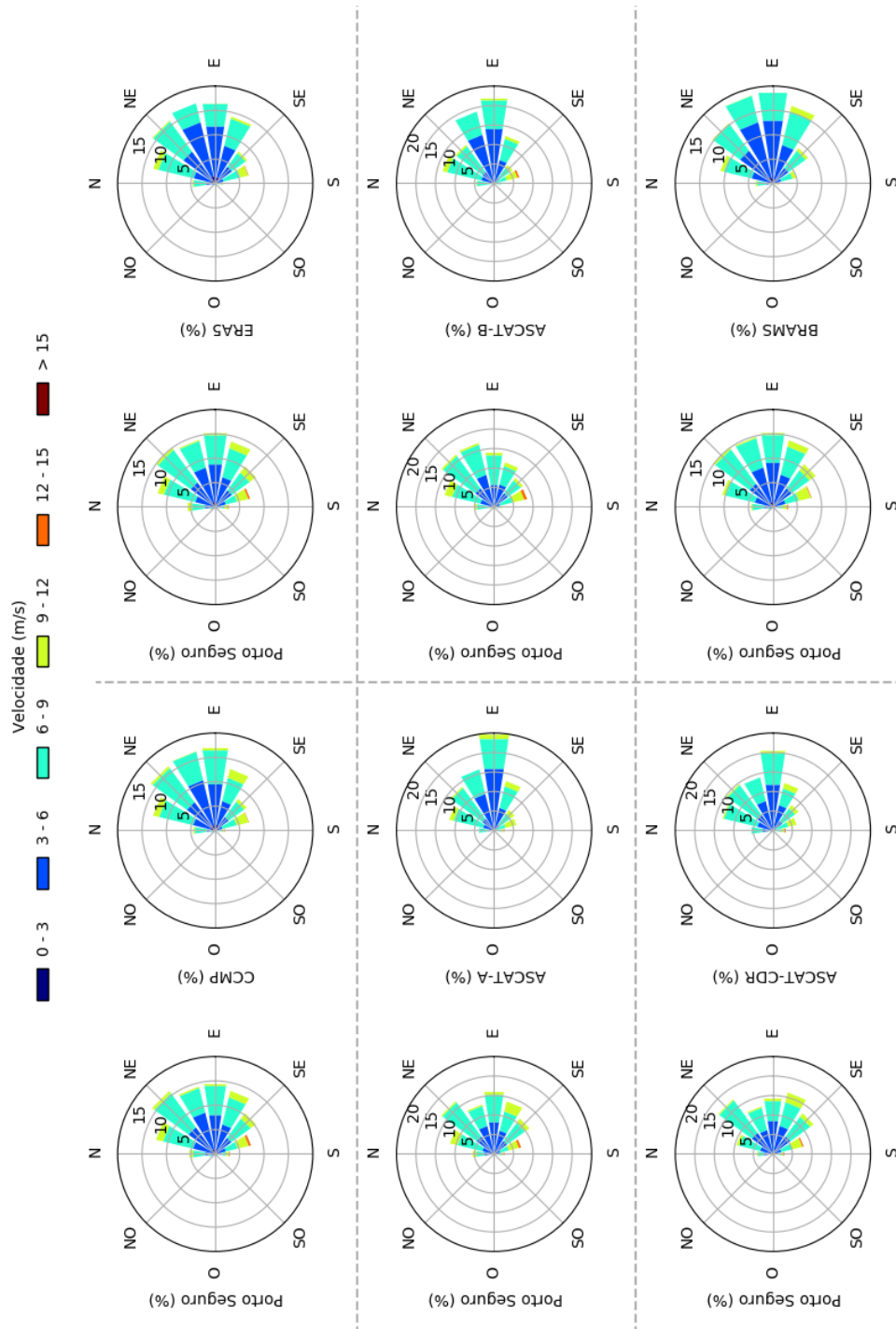
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.10 - Histogramas polares da série de ventos da boia Recife casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



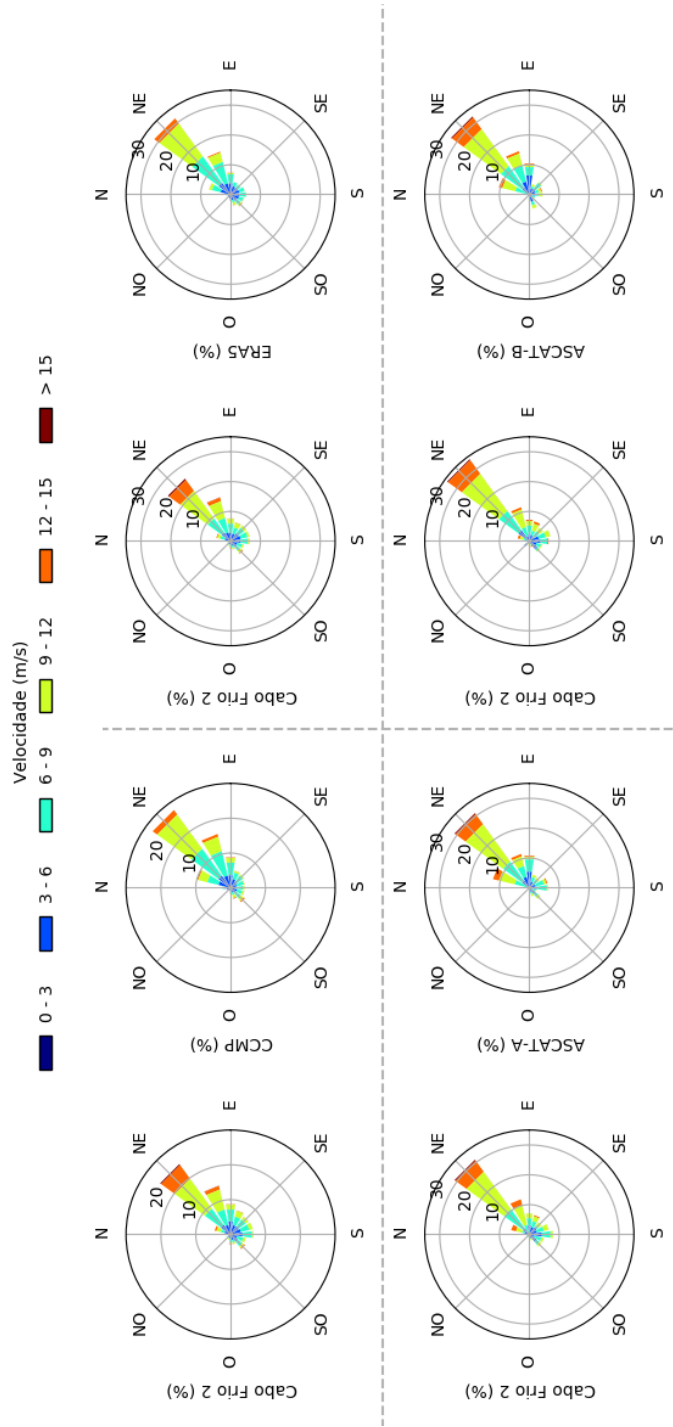
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.11 - Histogramas polares da série de ventos da boia Porto Seguro casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



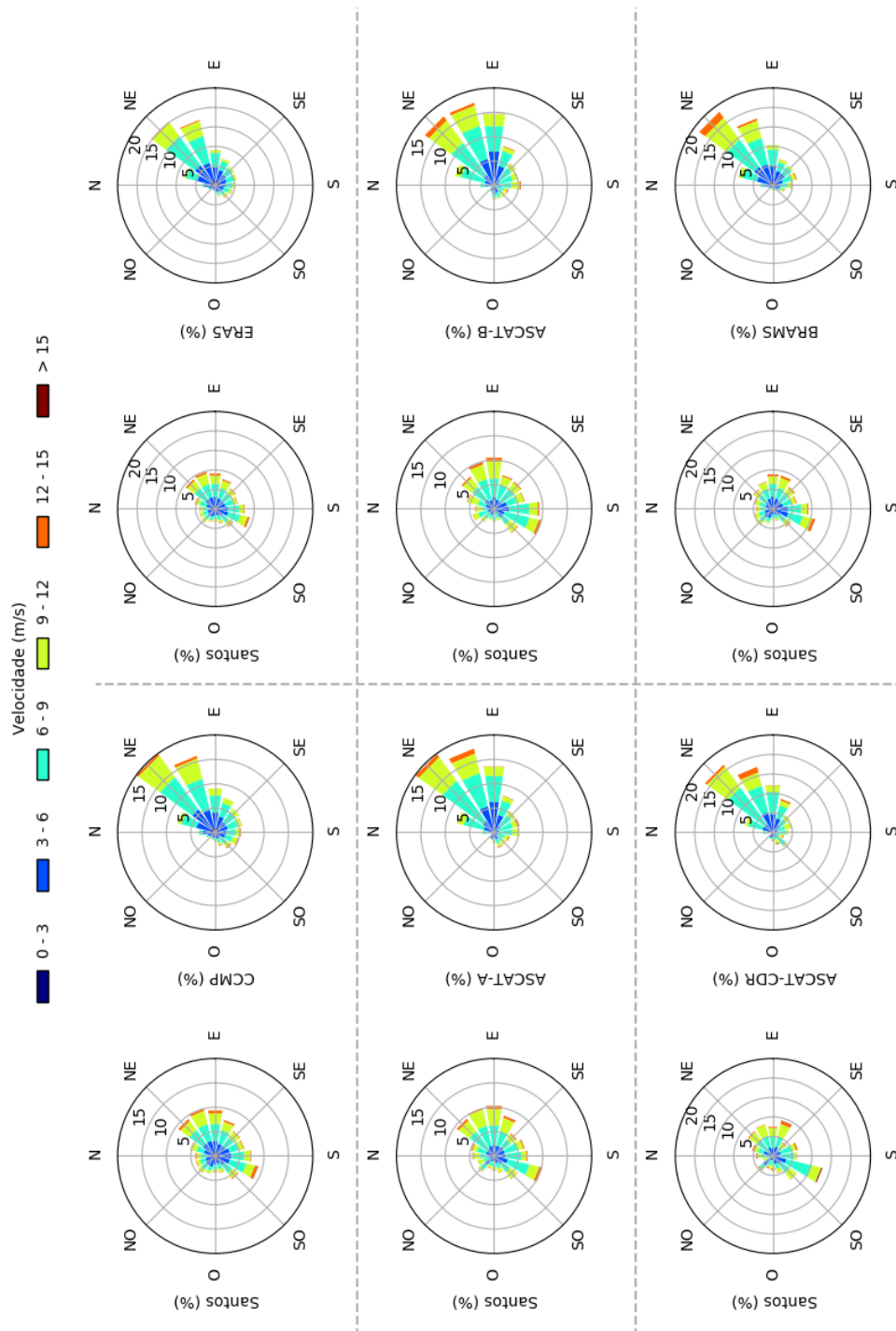
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.12 - Histogramas polares da série de ventos da boia Cabo Frio 2 casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



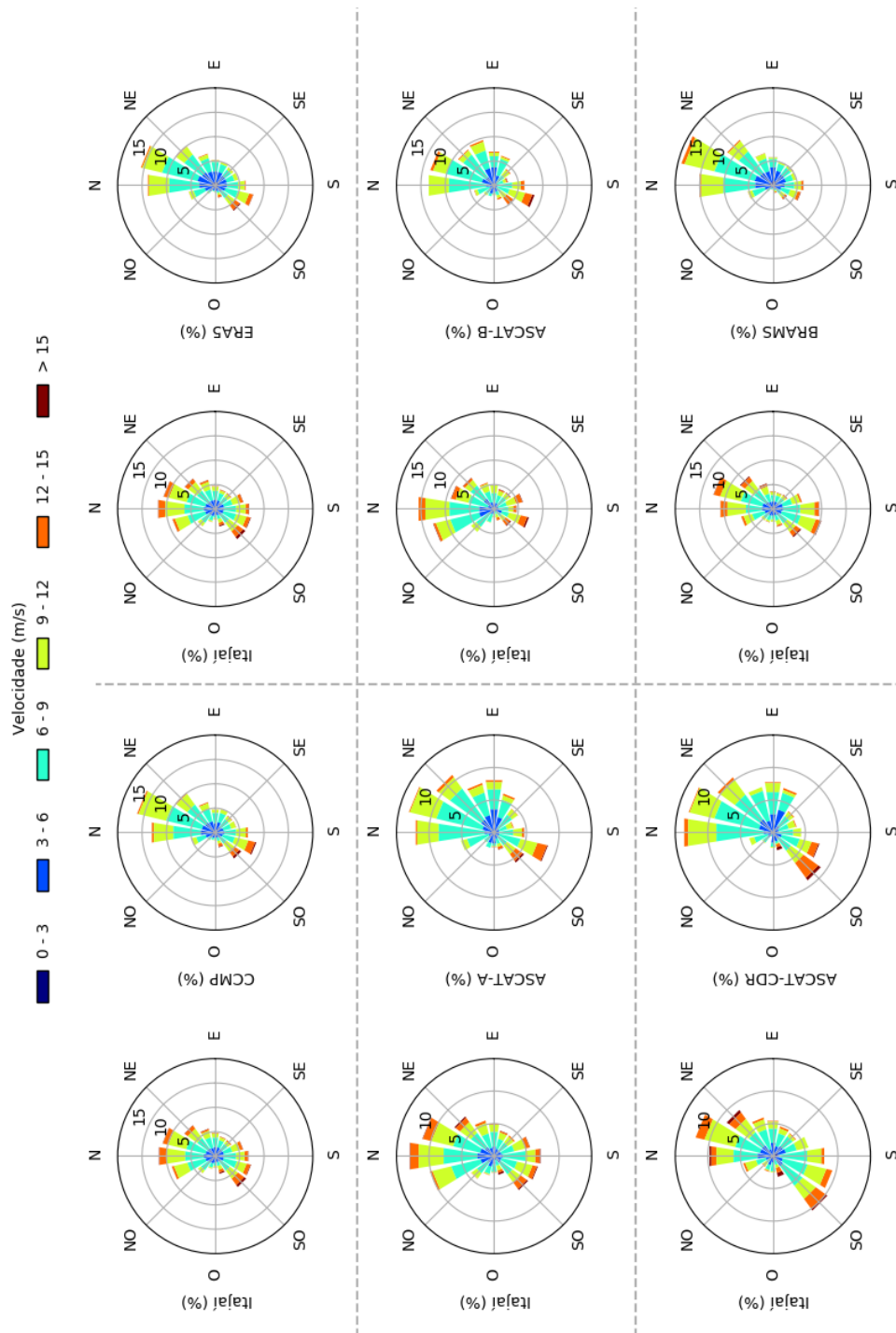
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.13 - Histogramas polares da série de ventos da boia Santos casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



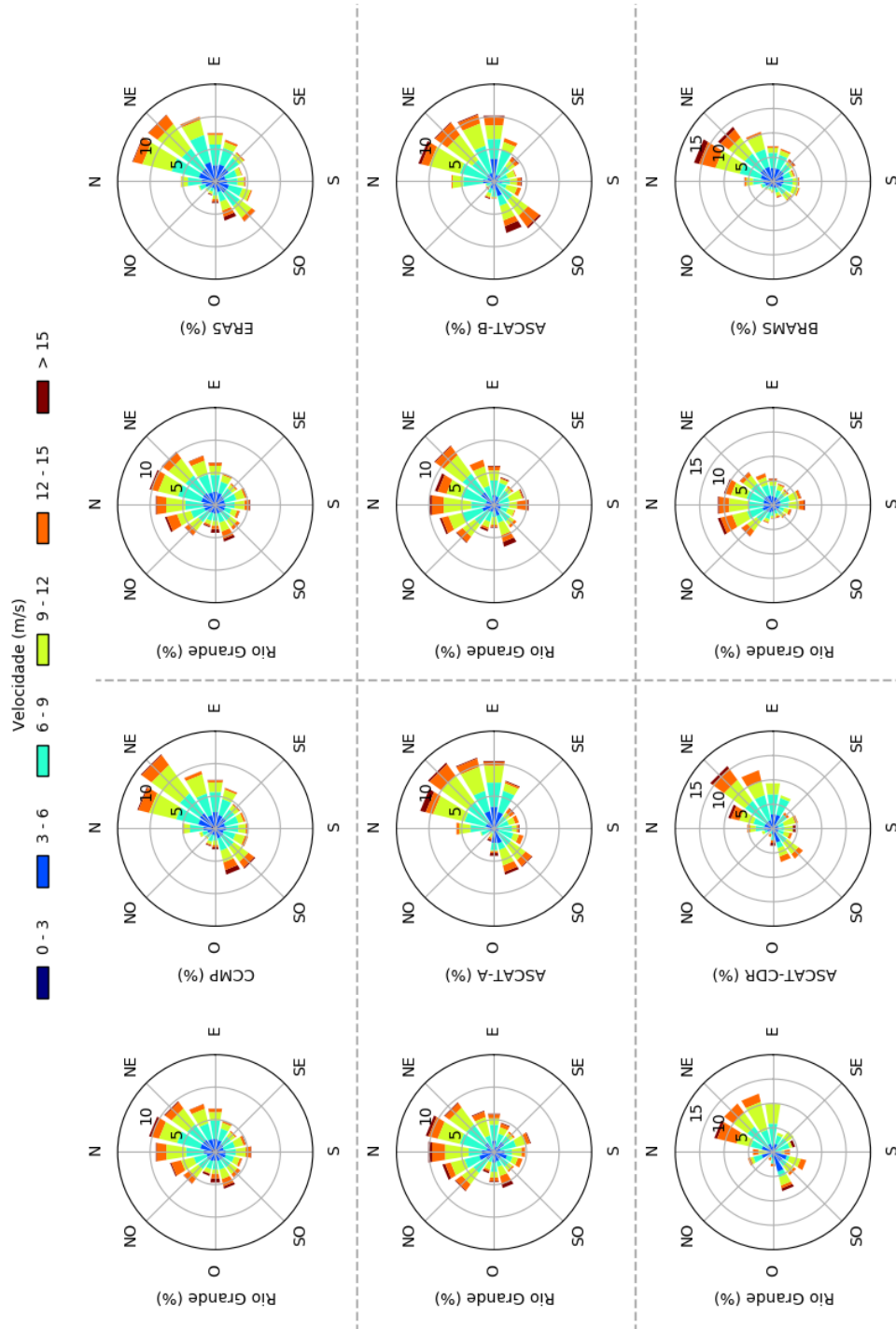
Fonte: Próprio Autor.

Figura A.14 - Histogramas polares da série de ventos da boia Itajaí casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.



Fonte: Próprio Autor.

Figura A.15 - Histogramas polares da série de ventos da boia Rio Grande casada par-a-par com as séries dos produtos CCMP (superior esquerda), ERA5 (superior direita), ASCAT-A (centro esquerda), ASCAT-B (centro direita), ASCAT-CDR (inferior esquerda) e BRAMS (inferior direita). As porções em branco simbolizam que não há pares entre as séries.

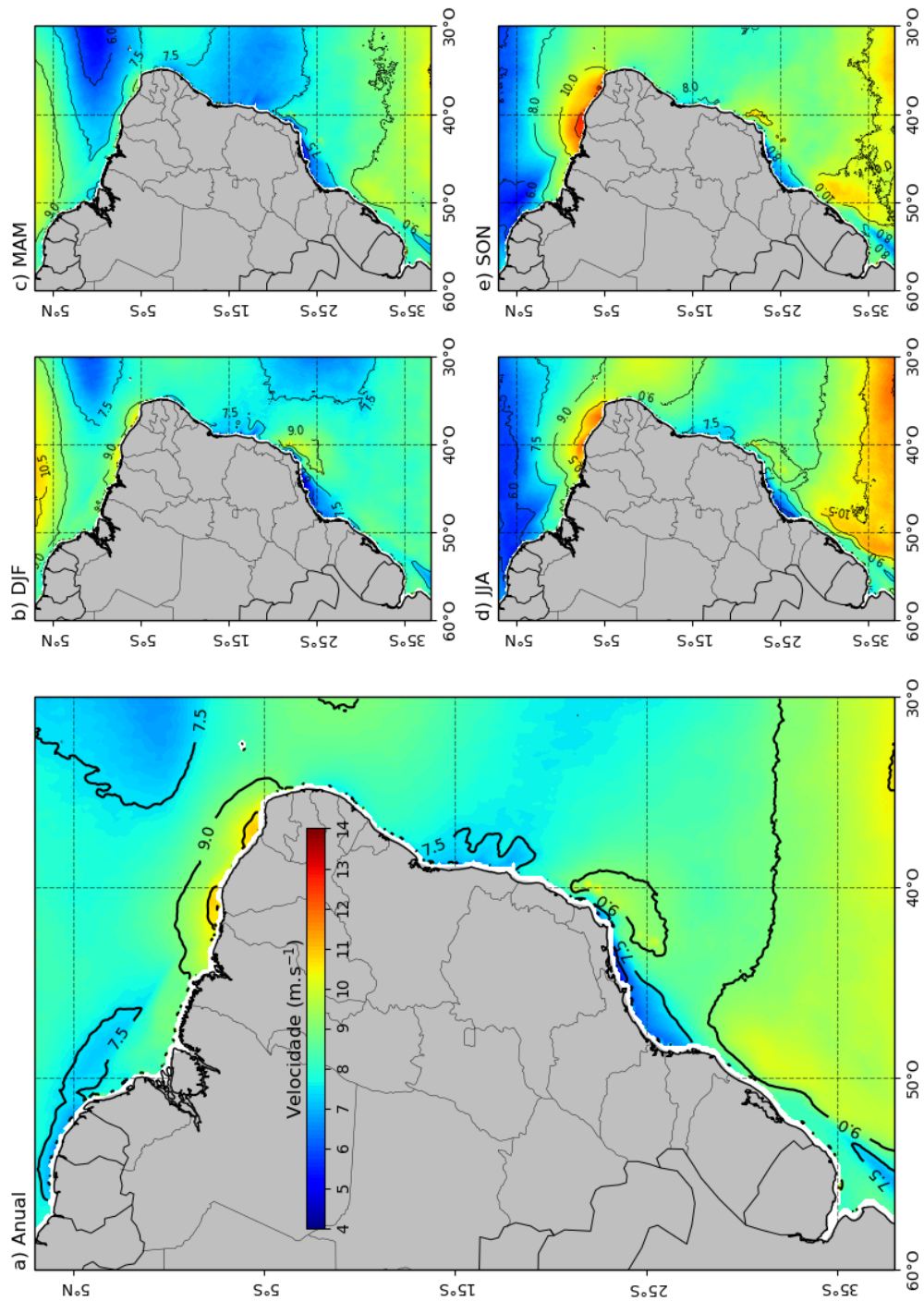


Fonte: Próprio Autor.

ANEXO B - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA INTENSIDADE MÉDIA DOS VENTOS PARA DIFERENTES ALTURAS

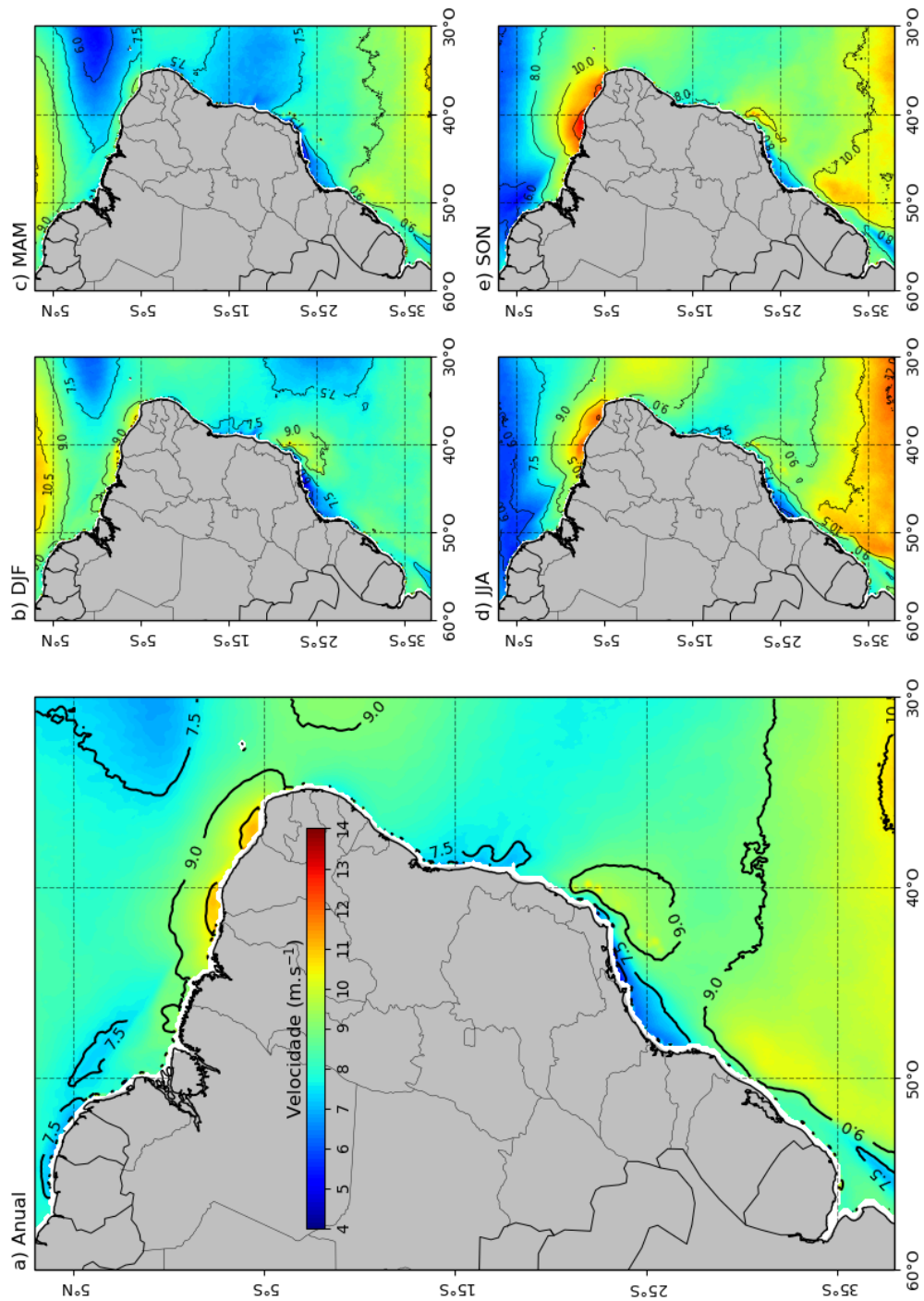
Neste Anexo são apresentados os mapas de distribuição das velocidades médias anual e sazonais dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para as alturas de 80, 100, 125, 150 e 200 m acima do nível do mar. As figuras estão apresentadas a partir da página seguinte para se estenderem pela página inteira.

Figura B.1 - Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 80 m acima do nível do mar.



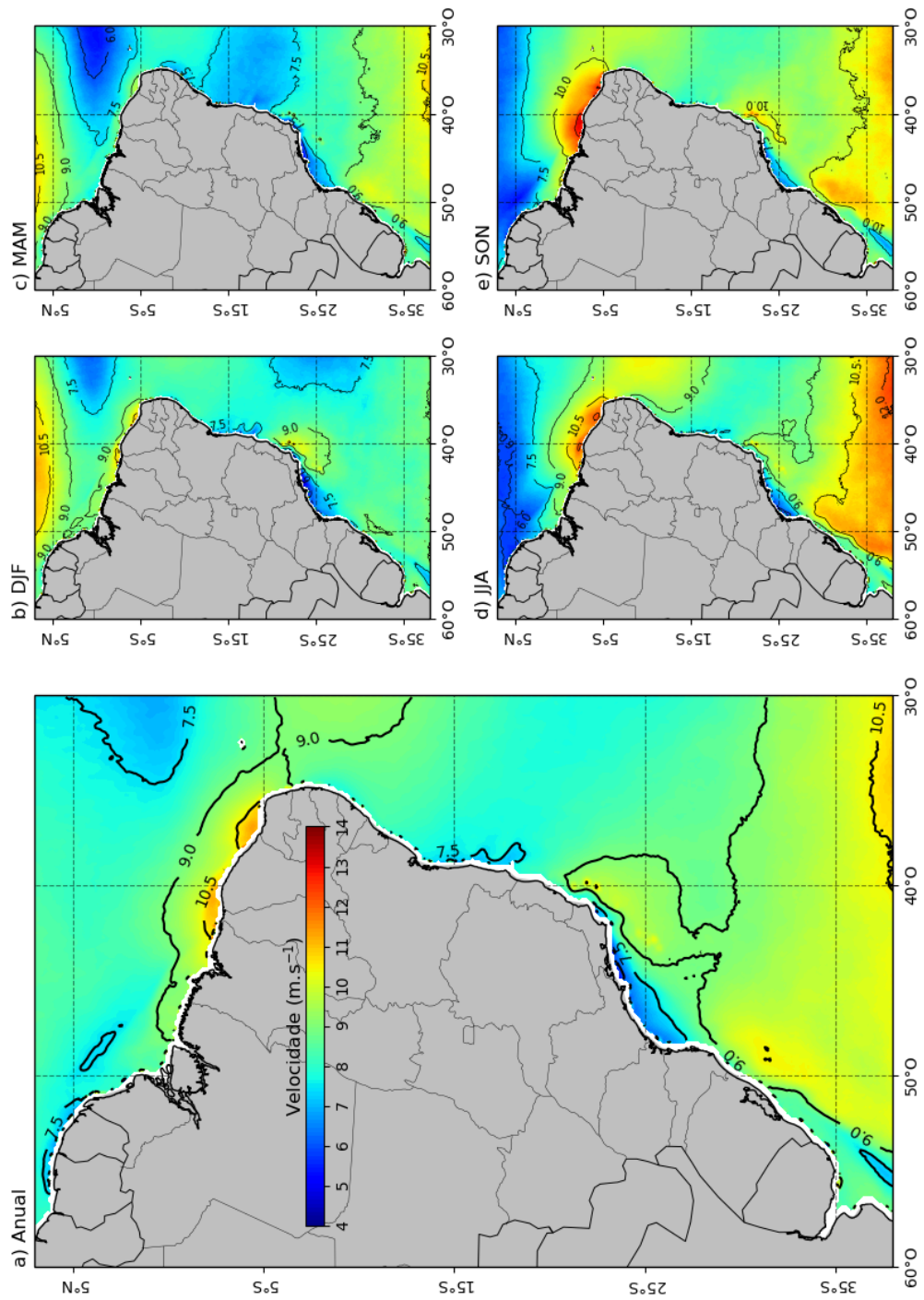
Fonte: Próprio Autor.

Figura B.2 - Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 100 m acima do nível do mar.



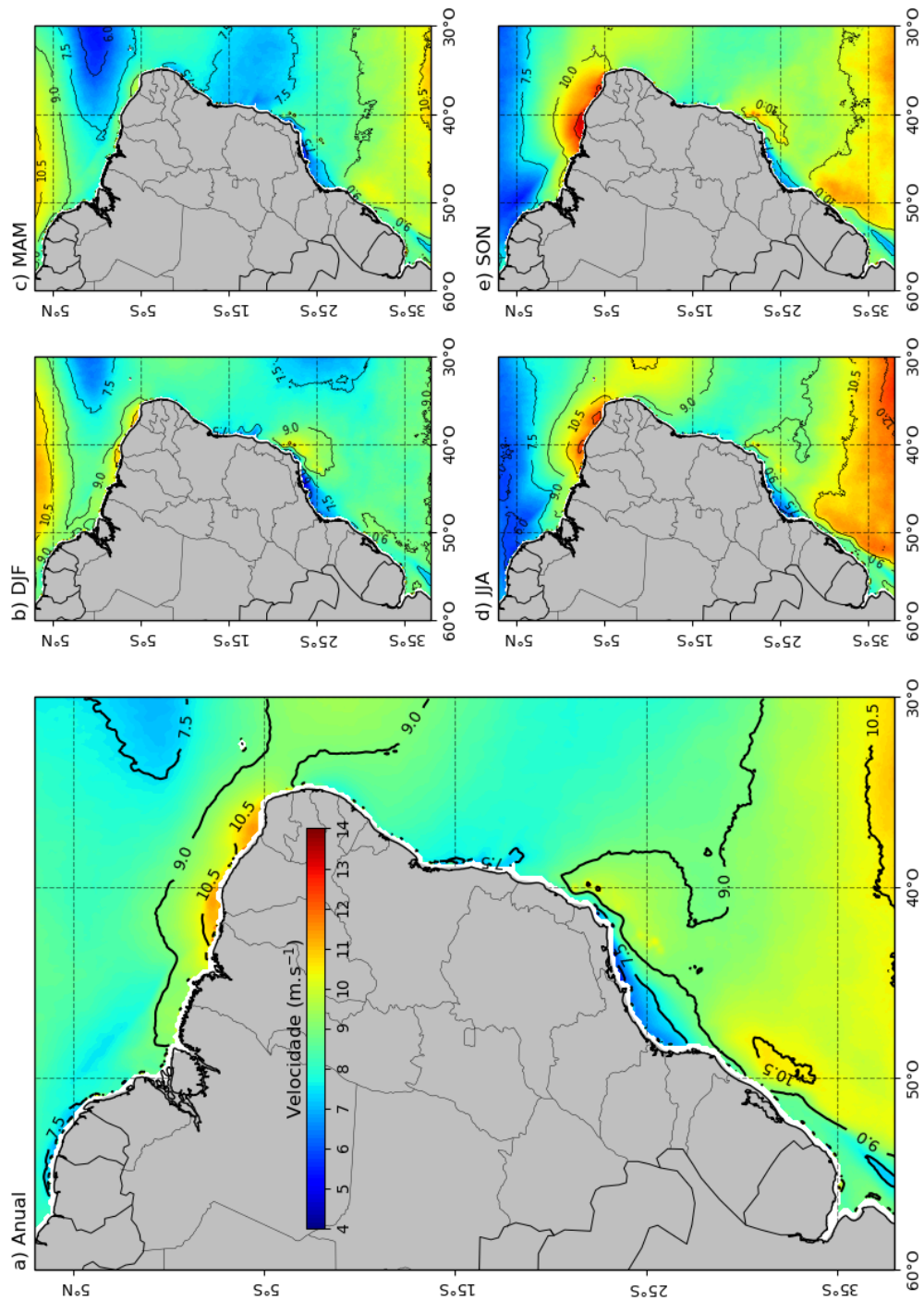
Fonte: Próprio Autor.

Figura B.3 - Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 125 m acima do nível do mar.



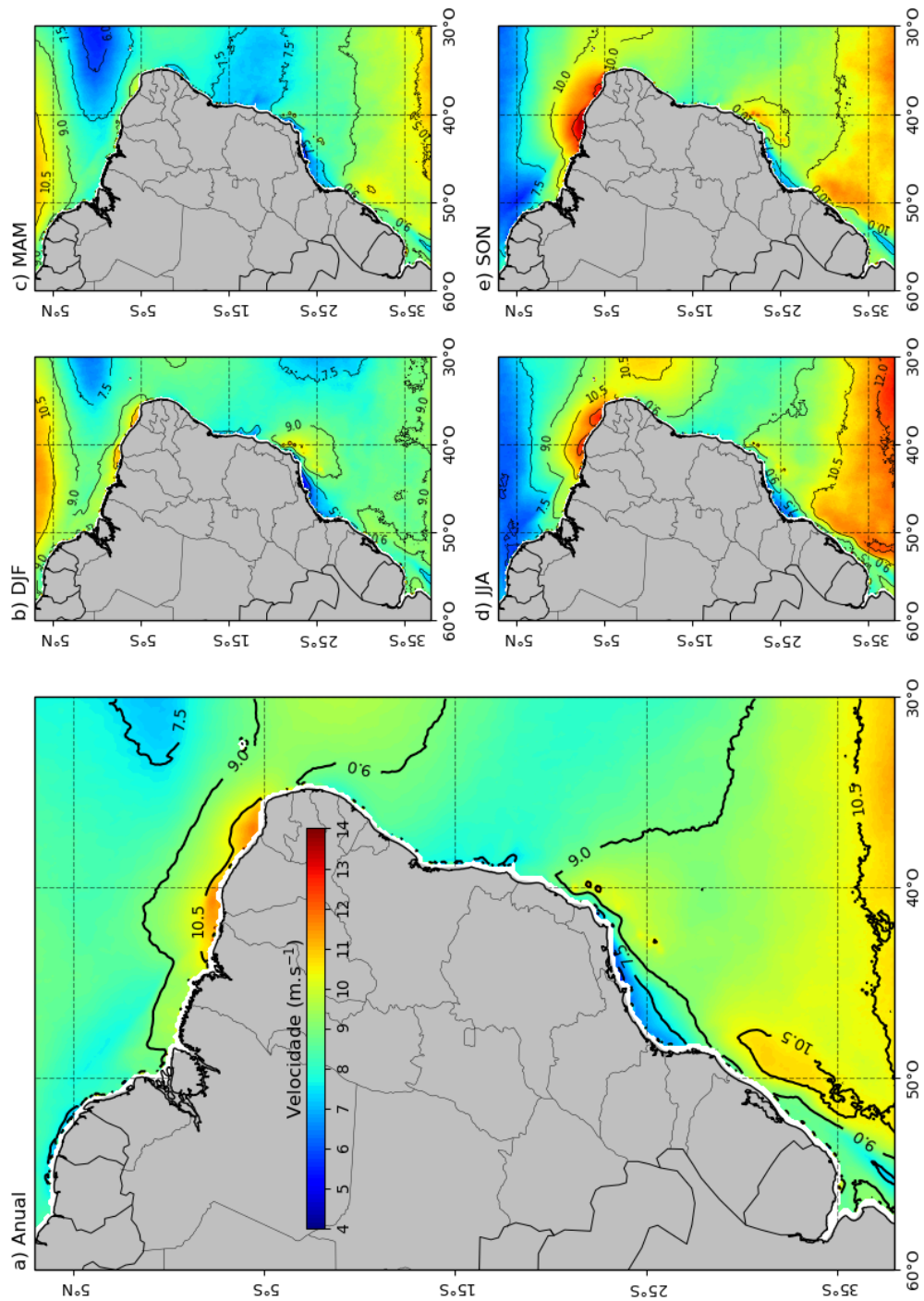
Fonte: Próprio Autor.

Figura B.4 - Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 150 m acima do nível do mar.



Fonte: Próprio Autor.

Figura B.5 - Mapas de distribuição espacial das médias (a) anual e (b-e) sazonal dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 200 m acima do nível do mar.

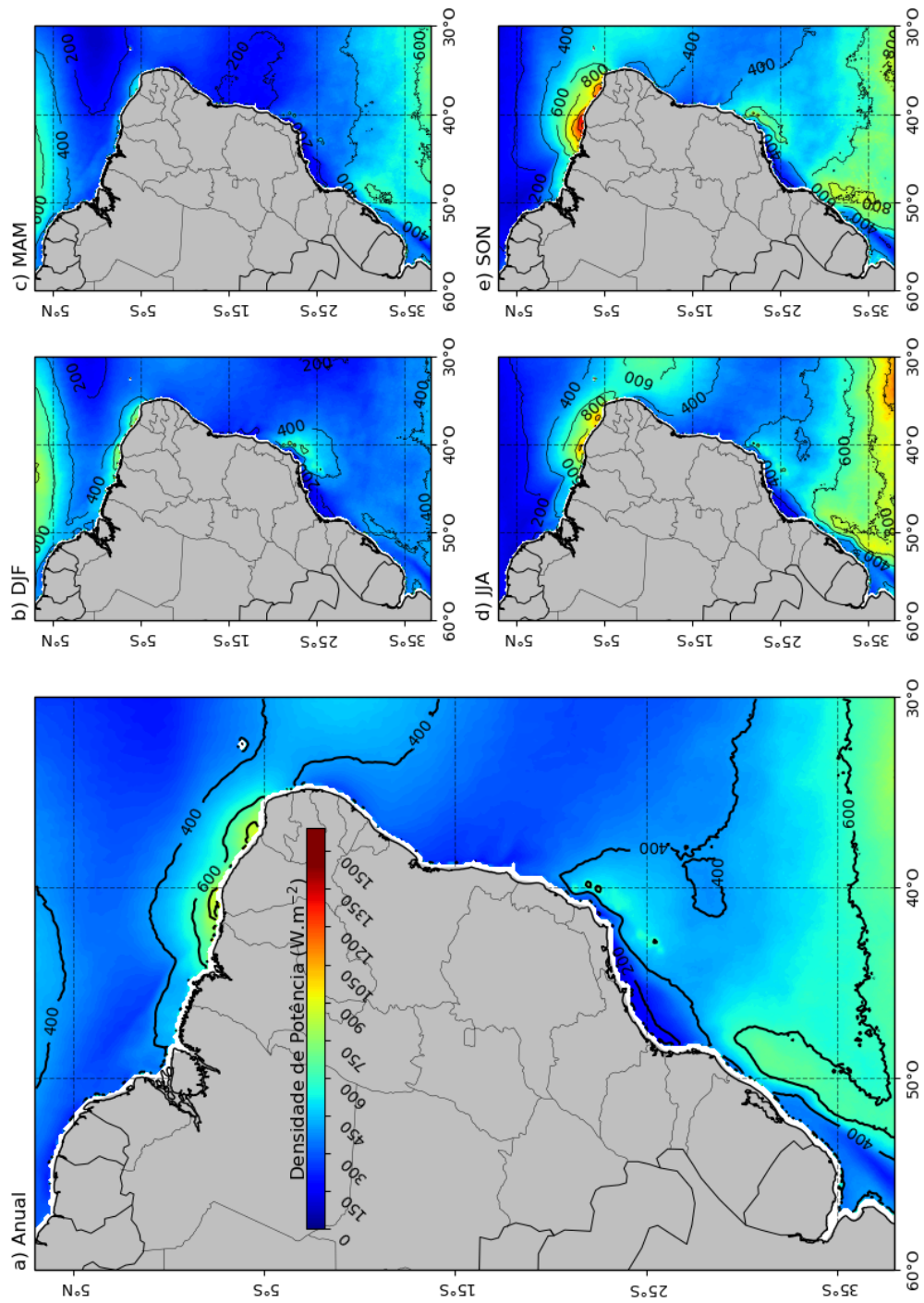


Fonte: Próprio Autor.

ANEXO C - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE DENSIDADE DE POTÊNCIA MÉDIA

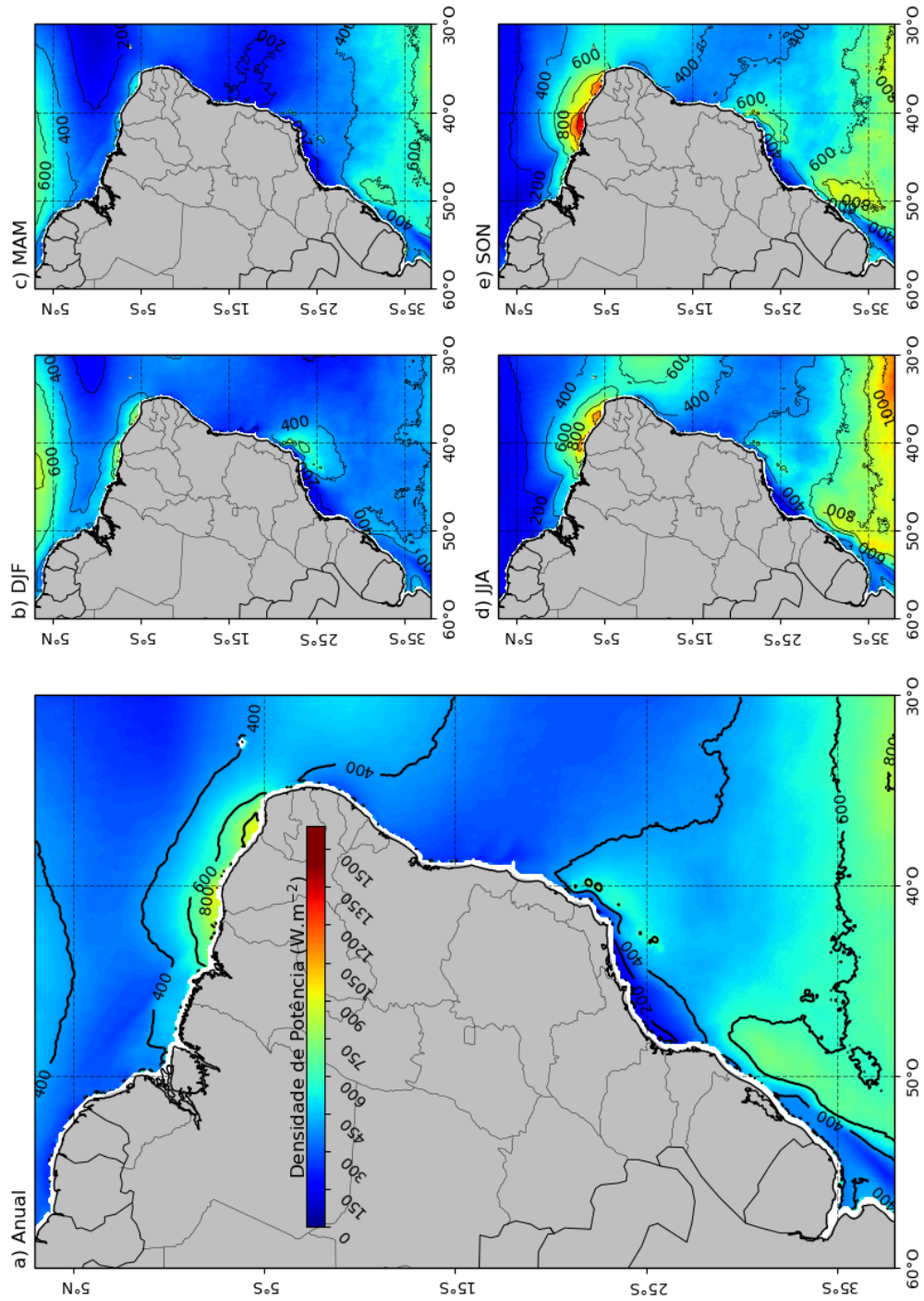
Neste Anexo são apresentados os mapas de distribuição das densidades de potência médias anual e sazonais calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para as alturas de 80, 100, 125, 150 e 200 m acima do nível do mar. As figuras estão apresentadas a partir da página seguinte para se estenderem pela página inteira.

Figura C.1 - Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 80 m acima do nível do mar.



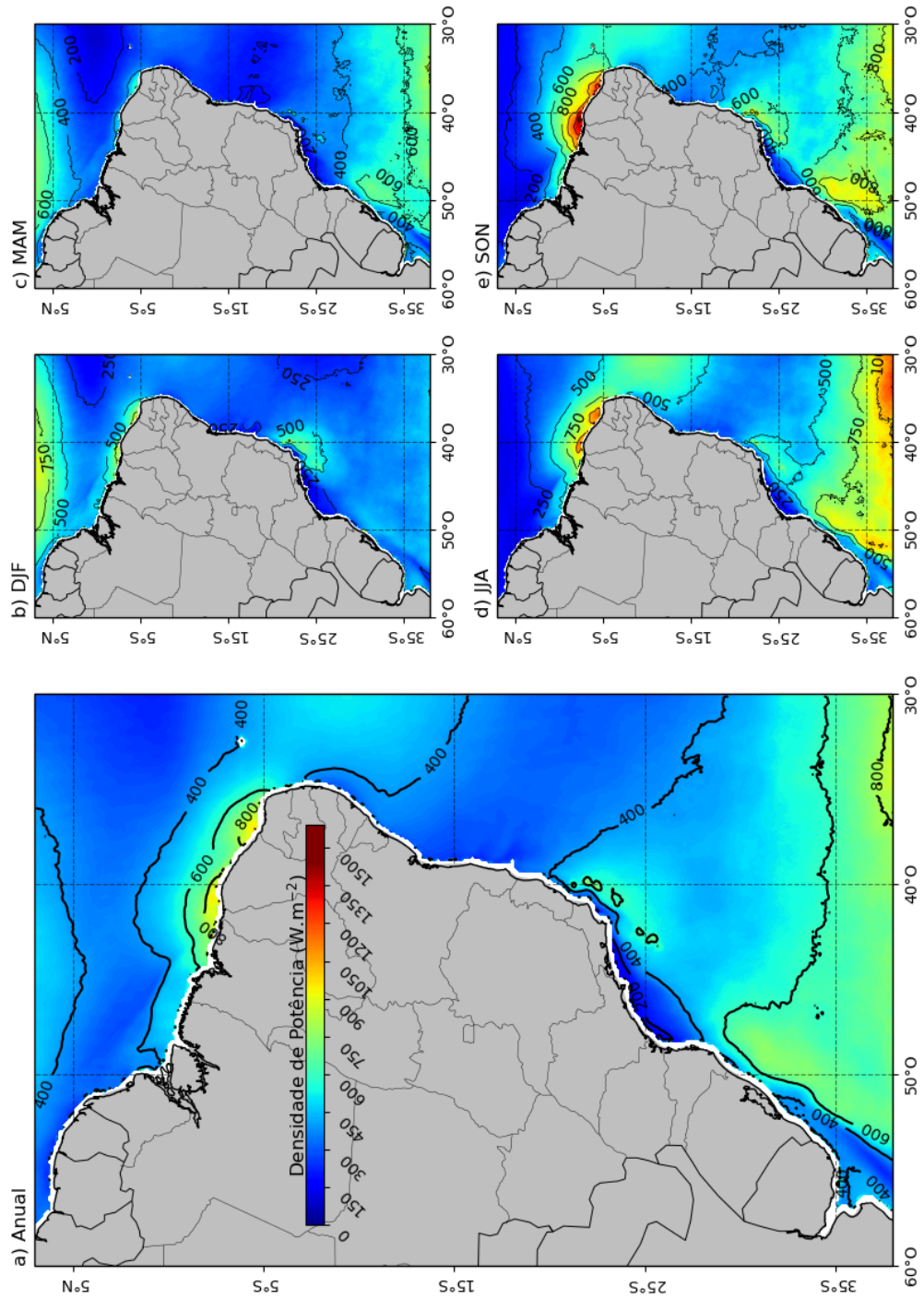
Fonte: Próprio Autor.

Figura C.2 - Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 100 m acima do nível do mar.



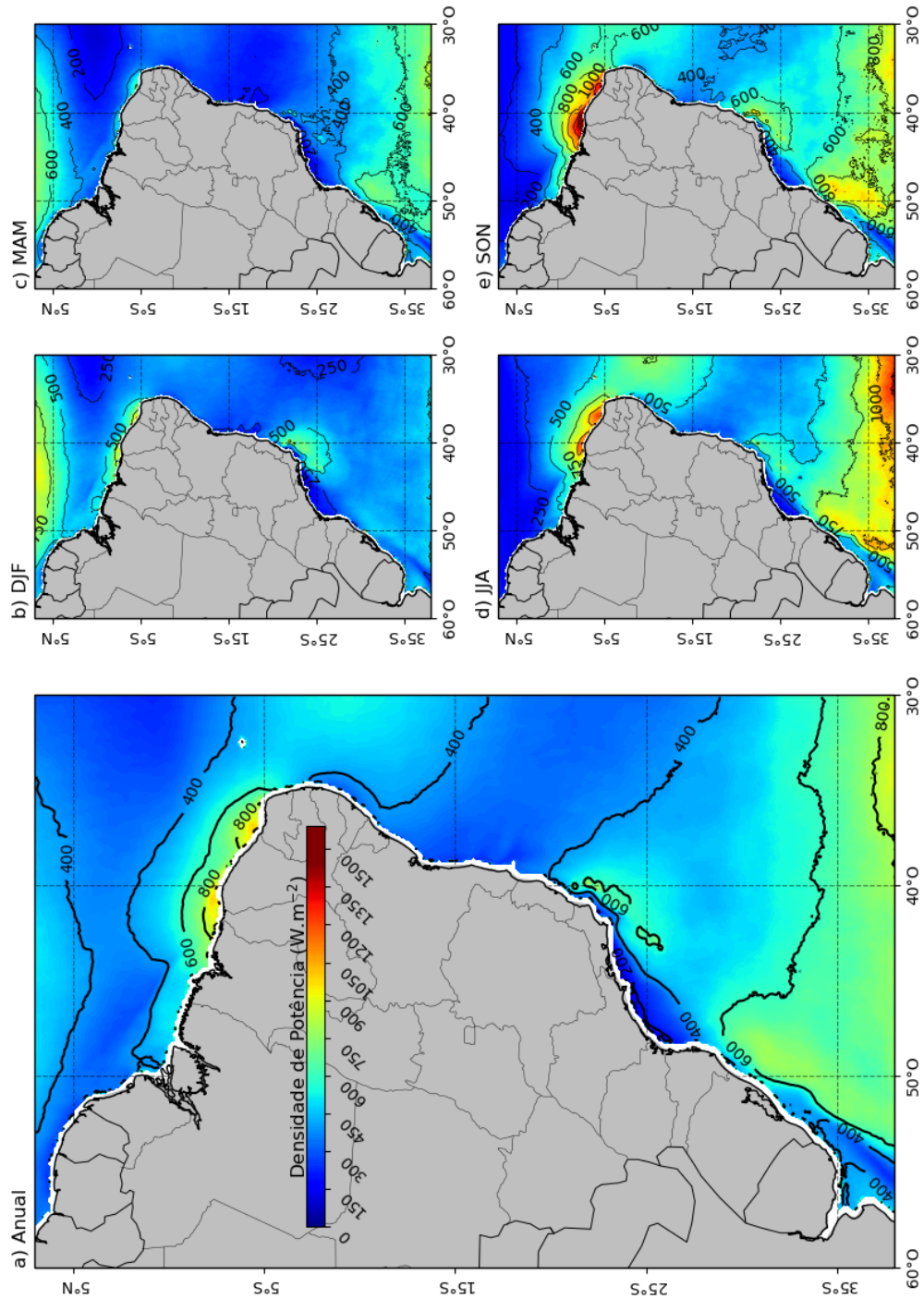
Fonte: Próprio Autor.

Figura C.3 - Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 125 m acima do nível do mar.



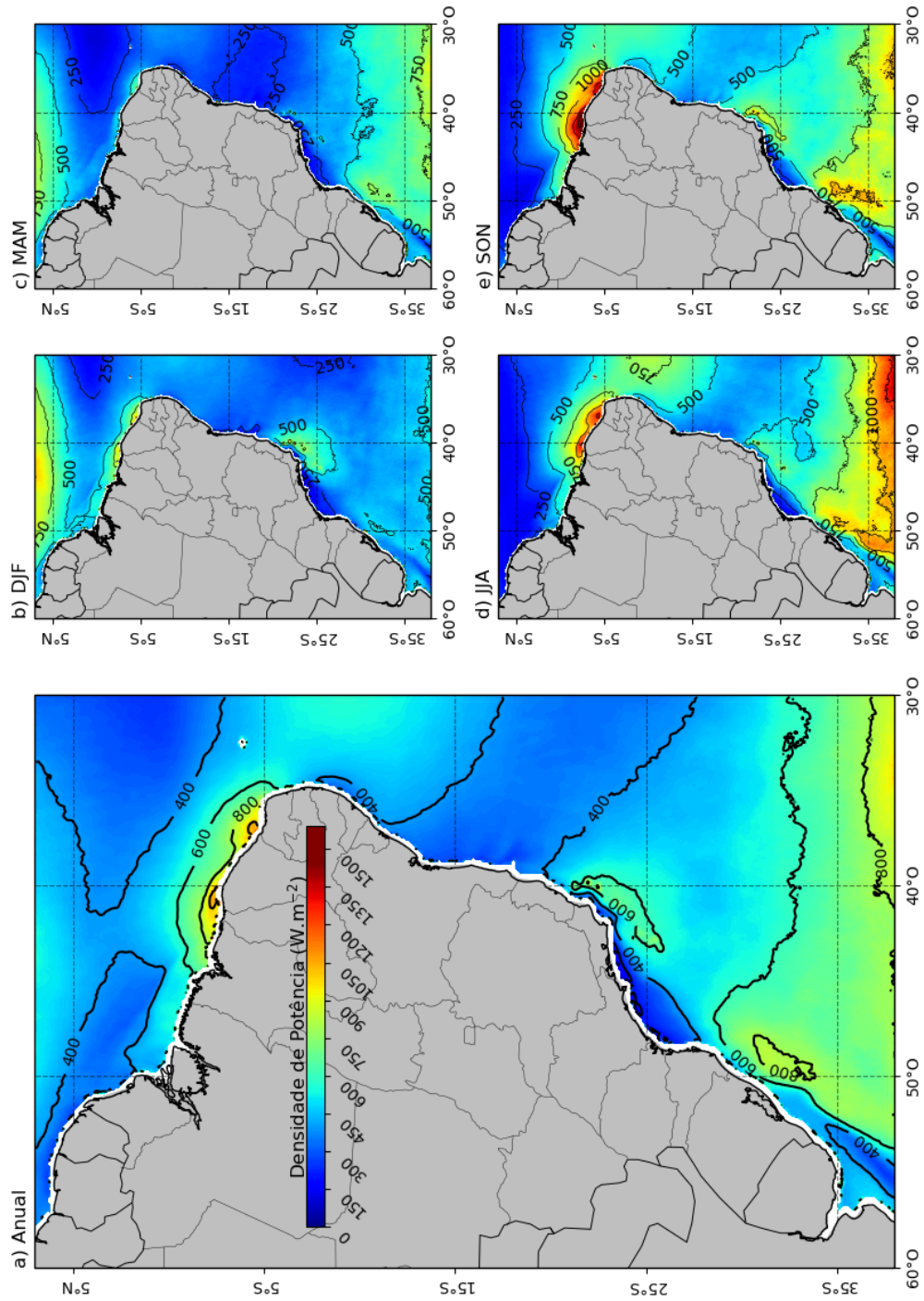
Fonte: Próprio Autor.

Figura C.4 - Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 150 m acima do nível do mar.



Fonte: Próprio Autor.

Figura C.5 - Mapas de distribuição espacial de densidade de potência média (a) anual e (b-e) sazonal calculadas por meio dos dados de VSM dos produtos ASCAT-A e ASCAT-B extrapolados para 200 m acima do nível do mar.



Fonte: Próprio Autor.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.