

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**NOÉLE BISSOLI PERINI DE SOUZA**

**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO *ONSHORE* E *OFFSHORE* NO  
ESTADO DA BAHIA UTILIZANDO O MODELO WRF**

**VITÓRIA  
2021**

**NOÉLE BISSOLI PERINI DE SOUZA**

**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO *ONSHORE* E *OFFSHORE* NO  
ESTADO DA BAHIA UTILIZANDO O MODELO WRF**

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Poluição do Ar.

Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira

Co-orientador: Prof. Dr. Erick Giovani Sperandio  
Nascimento

**VITÓRIA**

**2021**

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

B623a Bissoli Perini de Souza, Noéle, 2018-  
Análise do Potencial Eólico onshore e offshore no estado da Bahia utilizando o modelo WRF / Noéle Bissoli Perini de Souza. - 2021.  
175 f. : il.

Orientador: Davidson Martins Moreira.  
Coorientador: Erick Giovani Sperandio Nascimento.  
Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia renovável. 2. Potencial eólico. 3. Simulações. 4. Parametrização. 5. Clima tropical. 6. Persistência do vento. I. Martins Moreira, Davidson. II. Giovani Sperandio Nascimento, Erick. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

# ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO ONSHORE E OFFSHORE NO ESTADO DA BAHIA UTILIZANDO O MODELO WRF

**Noéle Bissoli Perini de Souza**

**Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente



DAVIDSON MARTINS MOREIRA  
Data: 06/11/2021 11:12:56-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Davidson Martins Moreira  
Orientador - PPGEA/CT/UFES

Documento assinado digitalmente



ERICK GIOVANI SPERANDIO NASCIMENTO  
Data: 08/11/2021 14:56:13-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. D

Coorientador – SENAI CIMATEC

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Gisele de Lorena Diniz Chaves  
Examinadora Interna – PPGEN/CEUNES/UFES

Prof. Dr. Bruno Furieri  
Examinador Interno – PPGEA/UFES

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes  
Examinador Externo – UNIPAMPA

Documento assinado digitalmente



ALEX ALISSON BANDEIRA SANTOS  
Data: 08/11/2021 12:20:33-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Alex Alisson Bandeira Santos  
Examinador Externo – SENAI CIMATEC

Documento assinado digitalmente



JOSE VICENTE CARDOSO SANTOS  
Data: 07/11/2021 15:20:44-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

F

Prof. Dr. Jose Vicente Cardoso Santos  
Examinador Externo – UNEB

Elisa Valentim Goulart  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória/ES, 03 de novembro de 2021



Aos meus amados pais, Deomar e  
Dulcemar

Ao meu amor Renard e nossa  
preciosa filha Louise

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por todo o zelo e amparo em cada momento vivido nesses anos de estudo. “Não que sejamos capazes, por nós, de pensar alguma coisa, como de nós mesmos; mas a nossa capacidade vem de Deus” (II Coríntios 3:5).

Ao meu orientador Prof. Dr. Davidson Martins Moreira e meu coorientador Prof. Dr. Erick Giovani Sperandio Nascimento. Obrigada pela dedicação e conhecimentos transmitidos. Minha sincera gratidão pela oportunidade conferida, pelo estímulo e confiança neste período.

Aos Professores Doutores Bruno Furieri, Gisele de Lorena Diniz Chaves, Marcelo Romero de Moraes, Alex Álisson Bandeira Santos e José Vicente Cardoso, pela disponibilidade e participação na banca examinadora dessa tese e contribuição com importantes sugestões e observações.

Ao Inmet e ao Sistema FIEB, pelos dados necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

A equipe do Senai-Cimatec, pelo suporte tecnológico, em especial, Silvano, Rafael Texeira, José Vicente e Anderson.

A todo o corpo docente e administrativo do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo.

Aos colegas da Pós-Graduação, pela convivência e apoio mútuos, em especial, Nadir, Yossimar, Pedro, Yasmin, Kamila, Thiara e Alexandre.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, minhas fontes de inspiração, pelos conselhos e o apoio incondicional em todas as minhas decisões.

Ao meu esposo, por compreender todos os meus momentos, dificuldades e ausências necessárias. Minha eterna gratidão por seu valioso e incasável apoio.

A minha irmã, pela amizade e companheirismo.

À todos os amigos e familiares, pelas orações.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal a elaboração de um mapa eólico *onshore* e *offshore* do estado da Bahia utilizando o modelo de mesoescala WRF com resolução espacial de 3 km e um período de tempo de 5 anos (2015-2020). Inicialmente, para avaliar as melhores parameterizações físicas no modelo, foram feitas simulações com resolução espacial de 1 km para comparação com os dados observacionais de aproximadamente um ano obtidos em torres equipadas com anemômetros nas alturas de 80, 100, 120 e 150 m, estrategicamente posicionadas em três locais distantes um do outro no estado da Bahia (Esplanada, Mucuri e Mucugê). A combinação dos esquemas PBL-YSU com LSM-RUC apresentou os melhores resultados. Após esta análise, foram realizadas simulações do campo de velocidade para um período de 5 anos e os resultados comparados com dados de superfície em 41 estações anemométricas automáticas que cobrem o estado baiano e uma localizada no Arquipélago de Abrolhos. Os resultados mostraram que o período de inverno apresenta maiores valores médios da velocidade do vento para a região *onshore* (9 a 14 m/s), sendo que as regiões mais ao norte e sudoeste do estado se destacam para a geração de energia eólica. No caso *offshore*, a primavera apresenta as maiores médias para a velocidade do vento (7 a 8 m/s), seguida pela estação do verão, destacando-se a costa marítima do extremo sul do estado (7 a 10 m/s). O regime de ventos noturno é mais intenso que o diurno, indicando uma grande complementariedade com a energia solar. Salienta-se que o ano de 2017 teve os maiores valores médios de velocidade do vento da região, sendo considerado um dos anos mais quentes sem a influência do fenômeno El Niño registrado globalmente desde o ano de 1850. Além disto, foi usada a técnica DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) para análise do comportamento de escala nos dados medidos nas estações e nas simulações numéricas. A maioria das regiões apresentaram comportamento persistente para a velocidade do vento, com destaque para aquelas em que além de altos valores nas velocidades médias do vento obtiveram valores do expoente de autossimilaridade elevados dentro da faixa de correlações de longo alcance persistentes, caracterizando-se como excelentes locais em termos de altos valores de energia e persistência do vento.

Palavras-chave: Energia renovável. Potencial eólico. WRF. DFA. Parametrização. Clima tropical. Bahia. Persistência do vento.

## ABSTRACT

This work has as main objective the elaboration of an onshore and offshore wind map of the state of Bahia using the WRF mesoscale model with a spatial resolution of 3 km and a time period of 5 years (2015-2020). Initially, to evaluate the best physical parameterizations in the model, simulations were performed with a spatial resolution of 1 km to compare with observational data of approximately one year obtained in towers equipped with anemometers at heights of 80, 100, 120 and 150 m, strategically positioned in three locations far apart in the state of Bahia (Esplanada, Mucuri and Mucugê). The combination of PBL-YSU and LSM-RUC regimens showed the best results. After this analysis, velocity field simulations were carried out for a period of 5 years and the results compared with surface data from 41 automatic anemometric stations covering the state of Bahia and one located in the Abrolhos Archipelago. The results showed that the winter period presents higher mean values of wind speed for the onshore region (9 to 14 m/s), and the northern and southwestern regions of the state stand out for the generation of wind energy. In the offshore case, spring presents the highest averages for wind speed (7 to 8 m/s), followed by the summer season, highlighting the maritime coast in the extreme south of the state (7 to 10 m/s). The nocturnal wind regime is more intense than the daytime one, indicating a great complementarity with solar energy. It should be noted that the year 2017 had the highest average values of wind speed in the region, being considered one of the warmest years without the influence of the El Niño phenomenon recorded globally since the year 1850. In addition, the DFA (Detrended Fluctuation Analysis) technique was used to analyze the scale behavior of the data measured at the stations and in the numerical simulations. Most regions showed persistent behavior for wind speed, especially those in which, in addition to high values in average wind speeds, they obtained high self-similarity exponent values within the range of persistent long-range correlations, characterized as excellent locations in terms of high values of energy and wind persistence.

Key-words: Renewable energy. Wind potential. WRF. DFA. Parameterization. Tropical weather. Bahia. Wind persistence.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis eta ( $\eta$ ) do ARW.....	26
Figura 2 - Processos físicos do modelo WRF.....	29
Figura 3 - Interações entre parametrizações.....	29
Figura 4 - Procedimentos metodológicos.....	50
Figura 5 - Comparativo de Precipitação Acumulada (mm) da estação de Alagoinhas.....	52
Figura 6 – Comparativo de Precipitação Acumulada (mm) na estação de Ituaçu.....	53
Figura 7 – Comparativo de Precipitação Acumulada (mm) na estação de Caravelas.....	54
Figura 8 - Localização e distribuição de torres anemométricas e os domínios no modelo WRF para os testes nas torres.....	55
Figura 9 - Localização e distribuição das estações automáticas e os domínios no modelo WRF para construção dos mapas eólicos.....	61
Figura 10 – Algoritmo da técnica DFA.....	66
Figura 11 - Comportamento médio horário das velocidades do vento simuladas e observadas.....	69
Figura 12 - Comparação das rosas dos ventos obtidas usando os esquemas YSU e RUC da torre Mucuri com base em observações nas alturas de a) 150, b) 120 e c) 100 m.....	77
Figura 13 - Comparação das rosas dos ventos obtidas usando os esquemas YSU e RUC da torre Esplanada com base em observações nas alturas de a) 150, b) 120 e c) 100 m.....	78
Figura 14 - Comparação das rosas dos ventos obtidas usando os esquemas YSU e RUC da torre Mucugê com base em observações nas alturas de a) 120 e b) 100.....	79
Figura 15 - Perfis verticais da velocidade média mensal do vento medida pela torre Esplanada e simulada usando WRF com os parâmetros do cenário 5 em a) janeiro e b) maio.....	80
Figura 16 - Perfis verticais da velocidade média mensal do vento medida pela torre Mucugê e simulada utilizando WRF com a parametrização do cenário 5 em a) janeiro e b) julho.....	81

Figura 17 - Perfis verticais da velocidade média mensal do vento medida pela torre Mucuri e simulada utilizando WRF com a parametrização do cenário 5 em a) janeiro e b) maio.....	81
Figura 18 - Comportamento médio horário das velocidades do vento simuladas e observadas nas estações de superfície, considerando 24 h por um período de 5 anos.....	89
Figura 19 - Comparação das rosas dos ventos obtidas através das observações e simulações nas estações de Vitória da Conquista, Amargosa, Queimadas, Salvador, Itamaraju e Uaua.....	100
Figura 20 – DFA usando médias horárias em dados medidos e simulados para algumas estações meteorológicas.....	104
Figura 21 – DFA com médias horárias na estação meteorológica de Abrolhos: comparação entre valores medidos e simulados com WRF.....	107
Figura 22 – DFA com comportamento isomórfico de localidades em regiões com declives extremos ou em zonas baixas de planícies.....	109
Figura 23 - Potencial eólico sazonal a 80m de altura.....	112
Figura 24 - Potencial eólico sazonal a 100m de altura.....	113
Figura 25 - Potencial eólico sazonal a 120m de altura.....	114
Figura 26 - Potencial eólico sazonal a 150m de altura.....	114
Figura 27 - Potencial eólico dia a 80, 100, 120 e 150m de altura.....	116
Figura 28 - Potencial eólico noite a 80, 100, 120 e 150m de altura.....	116
Figura 29 - Potencial eólico estação seca a 80, 100, 120 e 150m de altura.....	117
Figura 30 - Potencial eólico estação úmida a 80, 100, 120 e 150m de altura...	118
Figura 31 - Campo de velocidade horizontal com média anual (2016-2019) a 150 m de altura.....	119
Figura 32 - Simulação da velocidade média mensal anual (2016-2019) a 150 m de altura: a) estação ao norte do estado (E19-Irece); b) estação no centro-sul do estado (E5-Bom Jesus da Lapa).....	120
Figura 33 - Potencial eólico (on e <i>offshore</i> ) para o período de 2016-2020 (80, 100, 120 e 150 m de altura) usando WRF (3 km).....	122
Figura 34 - Localização dos 10 pontos com o maior potencial eólico <i>onshore</i> a 150m de altura.....	124
Figura 35 - Localização da APA do Boqueirão da Onça.....	125

Figura 36 - Complexo eólico do Morro do Chapéu.....	126
Figura 37 - Complexo eólico Guirapá.....	127
Figura 38 - Localização dos 10 pontos com o maior potencial eólico <i>offshore</i> a 150m de altura.....	128
Figura 39 – Mapa eólico a 10 m e 150 m com a localização espacial das 42 estações anemométricas .....	132

## LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 - Características dos estudos realizados com o modelo WRF que buscaram analisar o potencial da energia eólica e/ou testar as diversas parametrizações físicas para aplicação em energia eólica 46
- Quadro 2 - Opções físicas indicadas em estudos relacionados à energia eólica. 48
- Quadro 3 - Expoentes de escala (DFA) e suas implicações fenomenológicas.. 65



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações geográficas resumidas das torres.....	52
Tabela 2 - Detalhes dos cenários de testes especificando as opções físicas..	57
Tabela 3 - Opções físicas usadas nas simulações dos 5 anos.....	62
Tabela 4 - Resultados das métricas estat. correspondentes à comparação entre dados de velocidade do vento sim. e obs. na torre Mucuri..	71
Tabela 5 - Resultados das métricas estat. correspondentes à comparação entre dados de velocidade do vento sim. e obs. na torre Esplanada.....	72
Tabela 6 - Resultados das métricas estat. correspondentes à comparação entre dados de velocidade do vento sim. e obs. na torre Mucugê	73
Tabela 7 - Resultado total da pontuação OhitS para cada cenário.....	74
Tabela 8 - Resultados das métricas estatísticas correspondentes à comparação entre dados de direção do vento simulados e observados na torre Mucuri.....	75
Tabela 9 - Resultados das métricas estatísticas correspondentes à comparação entre dados de direção do vento simulados e observados na torre Esplanada.....	75
Tabela 10 - Resultados das métricas estatísticas correspondentes à comparação entre dados de direção do vento simulados e observados na torre Mucugê.....	76
Tabela 11 - Meses representativos para períodos secos e chuvosos para cada torre.....	80
Tabela 12 - Estatísticas de velocidade do vento utilizando YSU e RUC.....	83
Tabela 13 - Resultados das métricas estat. ao comparar os dados sim. e obs. da velocidade do vento para o período chuvoso para a torre de Mucuri.....	85
Tabela 14 - Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados sim. e obs. da velocidade do vento para o período menos chuvoso para a torre de Mucuri.....	86
Tabela 15 - Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados sim. e obs. da velocidade do vento para o período chuvoso para a torre de Esplanada.....	86

Tabela 16 - Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da velocidade do vento para o período menos chuvoso para a torre de Esplanada.....	87
Tabela 17 - Resultados das métricas estat. ao comparar os dados sim. e obs. da velocidade do vento para o período chuvoso para a torre de Mucugê.....	87
Tabela 18 - Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da velocidade do vento para o período menos chuvoso para a torre de Mucugê.....	88
Tabela 19 - Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da velocidade do vento.....	93
Tabela 20 - Ranking OhitS para a velocidade do vento.....	96
Tabela 21 - Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento .....	97
Tabela 22 - Ranking OhitS para a direção do vento.....	99
Tabela 23 – Comparação de expoentes de escala de dados reais e simulados em médias horárias e diárias.....	103
Tabela 24 - Localização dos 10 pontos com maior potencial eólico <i>onshore</i> na Bahia.....	124
Tabela 25 - Localização dos 10 pontos com maior potencial eólico <i>offshore</i> na Bahia.....	123
Tabela 26 – Correlação entre os valores médios da velocidade do vento a 150 m dos cinco simulados de todas as estações e os seus respectivos valores de $\alpha$ dos dados médios horários obtidos pelo anemômetro.....	130

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivo Geral.....	22
1.1.2 Objetivos Específicos.....	22
1.2 ESTRUTURA DA TESE.....	22
<b>2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b> .....	23
2.1 POTENCIAL EÓLICO.....	23
2.2 WRF.....	25
2.3 PARAMETRIZAÇÕES.....	31
2.3.1 Esquemas de PBL.....	31
2.3.2 Parametrizações da Camada de Superfície.....	33
2.3.3 Modelos de Land Surface.....	34
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	37
3.1 OUTRAS PESQUISAS RELACIONADAS COM O TEMA.....	43
3.2 ANÁLISES DOS ESTUDOS LEVANTADOS.....	45
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	50
4.1 ÁREA DE ESTUDO .....	50
4.2 CONFIGURAÇÃO DO MODELO WRF PARA OS TESTES NAS TORRES	54
4.3 COMBINAÇÕES DE ESQUEMAS PBL E LSM.....	56
4.4 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA.....	57
4.5 CONFIGURAÇÃO DO MODELO WRF PARA CONSTRUÇÃO DOS MAPAS EÓLICOS.....	60
4.6 A TÉCNICA DFA.....	62
4.7 ELABORAÇÃO DOS MAPAS EÓLICOS <i>ONSHORE</i> E <i>OFFSHORE</i> DO ESTADO DA BAHIA.....	67
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	68
5.1 RESULTADOS NUMÉRICOS DOS TESTES DE PARAMETRIZAÇÕES DO MODELO WRF.....	68
5.2 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES PARA A CONTRUÇÃO DO MAPA EÓLICO.....	88

5.2.1	Análise Temporal da Velocidade do Vento.....	88
5.2.2	Análise Estatística da Velocidade do Vento.....	92
5.2.3	Análise da Direção do Vento.....	96
5.3	CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE DA VELOCIDADE DO VENTO (DFA).....	102
5.4	MAPAS EÓLICOS <i>ONSHORE</i> E <i>OFFSHORE</i> .....	112
5.5	DFA E MAPA EÓLICO.....	128
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	134
	REFERÊNCIAS.....	137
	APÊNDICES.....	150
	APÊNDICE A – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período chuvoso para a torre de Mucuri.....	151
	APÊNDICE B – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período menos chuvoso para a torre de Mucuri.....	151
	APÊNDICE C – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período chuvoso para a torre de Esplanada.....	152
	APÊNDICE D – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período menos chuvoso para a torre de Esplanada.....	152
	APÊNDICE E – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período chuvoso para a torre de Mucugê.....	153
	APÊNDICE F – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período menos chuvoso para a torre de Mucugê.....	153
	APÊNDICE G – Comparação das rosas dos ventos obtidas através dos dados simulados e observados sobre as coordenadas geográficas das estações do Inmet para o período anual.....	154
	APÊNDICE H – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região <i>onshore</i> e <i>offshore</i> que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2015.....	165
	APÊNDICE I – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região <i>onshore</i> e <i>offshore</i> que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2016.....	166

<b>APÊNDICE J – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região <i>onshore</i> e <i>offshore</i> que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2017.....</b>	<b>168</b>
<b>APÊNDICE K – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região <i>onshore</i> e <i>offshore</i> que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2018.....</b>	<b>170</b>
<b>APÊNDICE L – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região <i>onshore</i> e <i>offshore</i> que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2019.....</b>	<b>172</b>
<b>APÊNDICE M – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região <i>onshore</i> e <i>offshore</i> que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2020.....</b>	<b>174</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia eólica aumentou expressivamente nas últimas décadas e estabeleceu-se como um setor de energia bem consolidado. No entanto, vários desafios permanecem em relação ao seu crescimento e desenvolvimento (DRAPER *et al.*, 2018). Por exemplo, a simulação de fenômenos físicos relevantes precisa ser melhorada para garantir melhores práticas operacionais, permitindo a integração de maiores frações de energia eólica em redes de energia, programação de manutenção em instalações de energia eólica e definição de critérios de projeto para turbinas e instalações da próxima geração. No entanto, a precisão da estimativa é crítica para os operadores de energia eólica, pois melhorias em até  $1 \text{ ms}^{-1}$  na previsão da velocidade do vento podem induzir milhões de dólares em economia devido às severas penalidades financeiras de superestimação e subestimação da produção de energia (MARJANOVIC *et al.*, 2014). Portanto, a escolha das parametrizações físicas e da grade computacional em modelos de previsão numérica do tempo, tal como o modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) que é muito utilizado em problemas de energia eólica, é fundamental para melhorar a representação do campo de velocidades e, conseqüentemente, o potencial de energia eólica na região em análise.

A região Nordeste do Brasil tem o envolvimento natural de ventos alísios permanentes, constantes e em regimes de velocidade muito próximos do ideal para a geração de energia a partir da matriz eólica, gerando a maior proporção de energia eólica do país, respondendo por 84% da produção eólica nacional. Em particular, o estado nordestino da Bahia, localizado nos trópicos, destaca-se como o segundo maior produtor de energia eólica do Brasil e com maior litoral, sendo o estado que recebe mais investimentos em energia eólica (ABEEÓLICA, 2017). Este ambiente favorável para o desenvolvimento da tecnologia de energia eólica levou o Brasil a um extenso processo de conformação do setor de energia, principalmente na produção *onshore*. Concomitante a isto, o país demonstra atualmente um forte interesse em ampliar essa matriz considerando também o seu potencial *offshore*, tendo uma das maiores costas marítimas do mundo e uma plataforma continental não muito profunda. No entanto, é bem conhecido que estimativas de variáveis meteorológicas nos trópicos são desafiantes, pois o clima tropical está sujeito a variações rápidas induzidas pela convecção e por efeitos locais de meso e de macroescala

(HARIPRASAD *et al.*, 2014; SURUSSAVADEE, 2017b). Neste sentido, os ventos nos trópicos são geralmente leves e variáveis e as observações de superfície e camadas superiores da atmosfera necessárias aos modelos meteorológicos também são escassas (SURUSSAVADEE, 2017a). Por essas razões, apesar dos consideráveis investimentos já realizados, a região necessita de estudos mais aprofundados com base em dados medidos e obtidos por meio de modelos numéricos de previsão do tempo com maior escala temporal e resolução espacial para obtenção de melhores estimativas da velocidade do vento. Portanto, a busca por ferramentas que possam avaliar o potencial energético dos ventos e sua dinâmica na região é fundamental.

O modelo de mesoescala WRF (SKAMAROCK *et al.*, 2008) é um modelo de previsão numérica do tempo e tem sido amplamente utilizado na pesquisa e avaliação da produção de energia eólica e solar (ORTEGA *et al.*, 2010; SALVAÇÃO; SOARES, 2018). As parametrizações físicas exigidas pelo modelo podem ser classificadas em várias categorias: camada limite planetária (PBL), modelo de superfície terrestre (LSM – *land surface models*), camada superficial, microfísica, cúmulos e radiação de onda longa e onda curta; cada uma das quais contém múltiplas parametrizações disponíveis para modelagem. As parametrizações físicas são empregadas para descrever processos físicos usando equações simplificadas, a fim de reduzir o número de fatores desconhecidos que influenciam o comportamento atmosférico. Assim, a escolha da parametrização física ótima com base em comparações com dados medidos em diferentes partes do mundo é essencial para maximizar a diversidade de aplicações da energia eólica (KUMAR *et al.*, 2010; MOHAN; BAHATI, 2011; SONI *et al.*, 2014; ISLAM *et al.*, 2015; IMRAN *et al.*, 2017). No entanto, a análise desses esquemas não é trivial e requer múltiplas simulações. Esta é uma tarefa inerentemente desafiadora devido às intensas características convectivas das regiões tropicais, que mudam rapidamente o estado da atmosfera, e a influência das brisas do mar e movimentos locais e de mesoescala (HARIPRASAD *et al.*, 2014; SALVADOR *et al.*, 2016; SURUSSAVADEE, 2017b). Neste contexto, este estudo examina também a eficácia de diferentes combinações de esquemas de PBL e LSM em termos de estimativa da velocidade do vento.

A PBL é parametrizada para representar fluxos verticais dentro causados por transportes turbulentos ao longo da camada limite, e não apenas na camada superficial.

Quando um esquema de PBL é ativado, a difusão vertical explícita é desativada sob a suposição de que o processo é controlado pelo esquema. O modelo WRF oferece vários tipos de parametrização de PBL, cada um dos quais corresponde a uma parametrização distinta dos termos de divergência de fluxo (parte turbulenta) das equações de fluxo atmosférico governantes para capturar as tendências das variáveis induzidas por esses termos. Vários estudos anteriores propuseram esquemas de parametrização de PBL ideais (HARIPRASAD *et al.*, 2014; BANKS; BALDASANO, 2016; BANKS *et al.*, 2016; BOADH *et al.*, 2016; SALVADOR *et al.*, 2016b; AVOLIO *et al.*, 2017; IMRAN *et al.*, 2017; KITAGAWA *et al.*, 2017). Além disso, o modelo WRF fornece certos esquemas de LSM para calcular perfis de temperatura do solo, perfis de temperatura da superfície, perfis de umidade do solo, coberturas de neve e propriedades do dossel. O LSM é utilizado em modelos de previsão devido à importância dos processos de superfície do solo em aplicações de energia eólica. Vários processos importantes da superfície da terra são tratados por esta parametrização, como evapotranspiração da água do dossel, evapotranspiração da neve, escorrências e derretimento da neve, dependendo da complexidade do esquema usado. Além disso, muitos estudos comparativos demonstraram que os modelos meteorológicos são sensíveis à escolha do LSM (PEI *et al.*, 2014; WHARTON *et al.*, 2015; LEE *et al.*, 2016; JAIN *et al.*, 2017; SALAMANCA *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019).

A literatura apresenta alguns estudos que foram desenvolvidos ao redor do mundo utilizando o modelo WRF aplicado à temática de energia eólica. Como exemplos, podem ser citados os seguintes trabalhos: Amjad *et al.* (2015), no Paquistão; Mattar e Borvarán (2016), no Chile; Giannaros *et al.* (2017), na Grécia; Salvação e Soares (2018), na Península Ibérica; Argüeso e Businger (2018), no Havai; e, Tuchtenhagen *et al.* (2020), para a região *offshore* sul do Brasil. Para o caso *offshore*, ressalta-se o trabalho de Mattar e Borvarán (2016), o qual apresenta estimativas do potencial para a costa central do Chile, considerando dados de velocidade do vento de estações de superfície e simulações com o modelo WRF em diferentes alturas para o período de um ano. No caso *onshore*, o trabalho de Giannaros *et al.* (2017) apresenta uma avaliação do modelo WRF considerando o potencial eólico para o período de um ano na Grécia, com uma região de estudo com alta complexidade no terreno, confrontando com dados medidos em estações de superfície. Além destes, Fernández-González *et al.* (2018) fizeram uma avaliação de recursos eólicos sobre terrenos complexos para



a Península Ibérica, mas somente para 15 dias. Linaje *et al.* (2019) estimaram a energia eólica offshore no Chile para 7 meses no ano de 2013. D'Isidoro *et al.* (2020) avaliaram o potencial de energia eólica e fotovoltaica em Lesotho por um período de um ano. Ferrari *et al.* (2020) simularam 38 anos de dados na região do mediterrâneo (offshore), porém com um único domínio e com uma resolução grosseira de 10 km. Kumar *et al.* (2021) avaliaram a produção de energia em um parque eólico offshore na Índia para o período de um mês. Embora existam alguns estudos sobre o potencial eólico na região nordeste do Brasil (JONG *et al.*, 2017; LIMA *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2016), a região da Bahia carece de estudos sobre energia eólica usando modelos de previsão do tempo. Por exemplo, Lima *et al.* (2015) investigaram a utilização do modelo RAMS (sistema regional de modelagem atmosférica), com resolução horizontal de 2 km, para estimar os recursos eólicos offshore no estado do Ceará. Jong *et al.* (2017) utilizaram o modelo WRF com 10 km de resolução horizontal para simular a velocidade do vento para o ano de 2014 calculando a potência eólica em toda a região Nordeste do Brasil. Santos *et al.* (2016) estimaram o potencial eólico de um ano em um município do estado do Ceará e em um município do estado de Pernambuco, ambos na região nordeste, utilizando o WRF (com resolução horizontal de 5 km).

No entanto, é importante salientar que o potencial eólico de uma área é tipicamente avaliado e quantificado utilizando pelo menos um ano de medições para caracterizar realisticamente a climatologia local do vento (CARVALHO *et al.*, 2014a; AMJAD *et al.*, 2015; MATTAR; BORVORÁN, 2016; GIANNAROS *et al.*, 2017; ARGÜESO; BUSINGER, 2018). Além disto, previsões de modelos numéricos como o WRF podem conter erros sistemáticos, especialmente em lugares com topografia complexa (JIMÉNEZ; DUDHIA, 2012), e a precisão das previsões da velocidade do vento na PBL é afetada pela habilidade do modelo em representar os processos físicos nesta região. Este inconveniente é atribuído em parte à falta de representatividade do relevo real no modelo e também da dificuldade de relacionar os processos físicos com o vento em regiões próximas à superfície terrestre. Neste sentido, muitos trabalhos têm avaliado a performance de diferentes esquemas de PBL e LSM no modelo WRF para avaliar qual tem melhor concordância com dados medidos em regiões de interesse para energia eólica (CARVALHO *et al.*, 2014a; SOUZA *et al.*, 2021).

Além do contexto das parametrizações físicas no modelo WRF, os fenômenos naturais com propriedades e dinâmicas comuns que apresentam correlações de longo alcance são constantemente observados em várias áreas do conhecimento, ou seja, sua função de autocorrelação aumenta (ou diminui) conforme uma potência (TSONIS *et al.*, 1999; GLAHN *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2012). Nessa linha, há evidências da presença de duas escalas com comportamento distinto na análise de séries temporais de velocidade do vento (SANTOS *et al.*, 2019, 2021). Este fenômeno tem sido denominado *crossover*, que surge devido a mudanças nas propriedades de correlação do sinal em diferentes escalas temporais ou espaciais. Isso mostra que as correlações de longo alcance podem se manifestar como tendências não estacionárias de movimento lento, bem como ciclos sazonais, enquanto as técnicas tradicionais, como análise espectral e estimadores de Hurst, não são adequadas para fornecer informações sobre possíveis mudanças nos índices de escala (*crossover*) e tendências não estacionárias (SANTOS *et al.*, 2019, 2021). Nesse cenário, alguns trabalhos sobre o comportamento de variáveis meteorológicas, que são ferramentas para o conhecimento do cenário de geração de energia, registram a existência de propriedades de escala temporal na velocidade do vento (SANTOS *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2019, 2021), indicando cenários de comportamento complexo, dissipativo, não linear e dinâmico com a análise de séries temporais com o uso da técnica DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) (BASHANA *et al.*, 2008; LUCENA *et al.*, 2017; SURUSSAVADEE, 2017a, 2017b).

Análises recentes (SANTOS *et al.*, 2019, 2021) de séries temporais de velocidade do vento em dados medidos e simulados pelo modelo de mesoescala WRF em diferentes regiões do estado da Bahia e do Arquipélago de Abrolhos, assim como na costa brasileira, no Oceano Atlântico Sul e na Costa da África, utilizando a técnica DFA, ratificaram a existência de correlações de longo alcance e leis de potência associadas em regiões *onshore* e *offshore*. Isso indicou uma nova propriedade do fenômeno de *crossover* único para o horizonte anual no comportamento horário médio das regiões pesquisadas, em particular sua ausência em regiões *offshore* e seu surgimento à medida que entra no continente (SANTOS *et al.*, 2019, 2021). O trabalho de Santos *et al.* (2019) evidenciou a ausência de *crossover* no sul do estado em uma região *offshore*, gerando possíveis correlações com a dinâmica da camada limite atmosférica marítima (CLAM) e suas, ainda desconhecidas, relações com o continente e sua

própria dinâmica de aparecimento, que até então não dependia da posição geográfica no caso *onshore*. Posteriormente, no trabalho de Santos *et al.* (2021) verificou-se que esta dinâmica está diretamente associada à aproximação ao continente e à sua plataforma continental, com forte correlação do aparecimento do *crossover* à medida que se desloca da região *offshore* para a região *onshore*. No entanto, esses dados analisados corresponderam a um horizonte cronológico de apenas um ano. Assim, este estudo propõe também a utilização da técnica DFA com horizonte de tempo de 5 anos, permitindo analisar as flutuações das séries temporais da velocidade do vento em diferentes escalas, evidenciando suas propriedades de autoafinidade. Isso permite classificar não só o seu comportamento temporal, mas também a sua potência associada, de forma que essas características são muito importantes para a estimativa da energia eólica (SANTOS *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2019, 2021).

Desta forma, o presente estudo é um avanço no conhecimento, tendo como objetivo principal a análise do campo de velocidades *onshore* e *offshore* no estado da Bahia (mapa eólico) considerando um período de 5 anos (agosto de 2015 a julho de 2020) utilizando o modelo de mesoescala WRF, versão 4.0, com uma alta resolução horizontal de 3 km dada a dimensão da região. A região se caracteriza pela influência de secas e sazonalidades das chuvas no comportamento energético na região nordeste do Brasil (RAMOS *et al.*, 2013). Os dados medidos para comparação com as simulações do modelo WRF são provenientes de 41 estações meteorológicas automáticas espalhadas ao redor da região de estudo e também uma estação de superfície localizada no Arquipélago de Abrolhos. Os resultados devem apoiar a comunidade científica com novas pesquisas, além de auxiliar empresas e órgãos governamentais das esferas federal e estadual na atração de investimentos para a produção eólica em larga escala, além de aumentar a produção de energia eólica na Bahia. Basicamente, as principais contribuições deste trabalho são: *i*) uma abordagem comparativa entre dados reais e simulados para avaliação das condições do vento de superfície; *ii*) análise ao longo do tempo das variações espaciais e temporais dos ventos *onshore* e *offshore*; *iii*) distribuições do ciclo anual, sazonal e diário do campo de ventos; *iv*) correlações de longo alcance para avaliação do comportamento de escala nos dados reais e simulados; *v*) geração de um mapa eólico *onshore* e *offshore* em várias alturas representativas de torres comerciais.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é gerar um mapa eólico *onshore* e *offshore* para o estado da Bahia usando o modelo de mesoescala WRF, validado com um período de 5 anos de dados medidos em 42 estações meteorológicas automáticas espalhadas por toda a região de estudo.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que consubstanciam o objetivo geral desta tese de doutorado estão listados abaixo:

- Avaliar a variabilidade nos resultados das parametrizações físicas do modelo em comparação com dados de monitoramento de torres anemométricas em diferentes áreas do domínio;
- Realizar simulações para o período de 5 anos do campo de vento utilizando o modelo WRF para uso na área de energia eólica;
- Avaliar correlações de longo alcance usando o método DFA em séries de velocidade do vento medidas em estações meteorológicas, além dos dados simulados pelo modelo WRF;
- Elaborar mapas eólicos *offshore* e *onshore* do estado da Bahia.

## 1.2 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada em seis capítulos, iniciando-se com esta introdução. No Capítulo 2, são apresentados os conceitos fundamentais referentes ao potencial eólico, em seguida, os conceitos do WRF; depois, descrevem-se as parametrizações, em especial esquemas de PBL e LSM. No capítulo 3 é apresentada a Revisão da Literatura. O capítulo 4 apresenta em detalhes os procedimentos metodológicos utilizados neste estudo. O capítulo 5 analisa os resultados obtidos com as respectivas discussões. Por fim, no Capítulo 6, as conclusões são apresentadas.

## 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo, é apresentada a revisão da literatura dos tópicos de interesse para a compreensão do fenômeno envolvido. O primeiro conceito abordado é sobre o potencial eólico. Posteriormente, o modelo de mesoescala WRF é apresentado. Conclui-se com a apresentação das parametrizações, em especial esquemas de PBL e LSM.

### 2.1 POTENCIAL EÓLICO

O vento é um fenômeno meteorológico formado pelo movimento do ar na atmosfera e é gerado através de fenômenos naturais como, por exemplo, os movimentos de rotação e translação da Terra. Vários fatores podem influenciar a sua formação, tais como, a pressão atmosférica, radiação solar, umidade do ar e evaporação, o que faz com que ele possa ser mais forte (ventania) ou suave (brisa). Vale destacar a sua importância na dispersão dos poluentes e também na geração de energia (energia eólica) (RAMOS *et al.*, 2013).

A energia eólica é fundamentada na geração de eletricidade a partir da energia cinética dos ventos. Sua vantagem é ser uma fonte renovável e limpa, sem emissão de gases de efeito estufa, porém questões ambientais como poluição visual e sonora, e principalmente, a inconstância do vento são argumentos contra a sua aplicação (BURTON *et al.*, 2001). Um dos maiores desafios da geração de energia eólica é sua dependência da volatilidade do vento (GIEBEL *et al.*, 2011). Não obstante o vento apresente uma grande variabilidade espacial e temporal, especialmente nos baixos níveis da atmosfera – em alturas onde comumente são instaladas as turbinas eólicas de um parque eólico –, é importante proceder a rigorosos estudos e avaliações antes de se instalar um parque para fins de produção eólica. Assim sendo, a determinação de locais propícios à instalação de fazendas eólicas depende, dentre outros, da disponibilidade de observações meteorológicas, realizadas com grande resolução espacial e temporal (TUCHTENHAGEN *et al.*, 2014). Desta forma, para aproveitar a energia eólica é necessária uma série de estudos técnicos e lógicos antes do investimento em fazendas eólicas, buscando minimizar possíveis prejuízos futuros

(RAMOS, 2012). Dentre as ferramentas disponíveis ressaltam-se os modelos atmosféricos como forma de prever o comportamento dos ventos.

Existem algumas maneiras de avaliar o potencial eólico de uma determinada localidade. Dentre elas pode-se citar o método de observação direta, que consiste na instalação de torres anemométricas e posterior análise dos dados. Porém, levantar o potencial de um país de dimensões continentais como o Brasil pelos dados anemométricos é praticamente inviável, devido aos custos das torres, da instrumentação, da manutenção e do tempo necessário para concretizar a viabilidade do processo, por isso, as simulações numéricas aparecem como uma importante ferramenta auxiliar no levantamento do potencial eólico (MENDES, 2011). Dentre os métodos de simulações numéricas, encontra-se o modelo de mesoescala WRF, que é um modelo livre com atualizações anuais. Os modelos numéricos de mesoescala dispõem de uma gama de parametrizações que os permitem simular dados cada vez mais próximos aos dados observados, tendo em vista que com a utilização das parametrizações são considerados nas simulações fatores relevantes que interferem na intensificação/desintensificação dos ventos como, por exemplo, os processos térmicos, a topografia, a rugosidade do terreno e os efeitos de brisa, além dos fenômenos de meso e macro escalas (OLIVEIRA, 2013).

Modelos de mesoescala, tal como o WRF, são ferramentas eficientes para prospecção da magnitude do vento. O WRF é utilizado tanto para pesquisas atmosféricas quanto para atividades operacionais de meteorologia. Vários trabalhos já foram realizados com o WRF, em diversas partes do mundo. Contudo, é consensual que a melhor configuração do modelo irá sempre depender da área em estudo, da aplicação e do período do ano. Durante a resolução numérica do modelo matemático, as variáveis recebem valores apenas nos pontos de interseção da grade e o problema é resolvido apenas nestes pontos. Os processos que ocorrem em dimensões menores que o espaçamento de grade são chamados de processos de sub-grade e são resolvidos implicitamente. Os processos que ocorrem em dimensões maiores são resolvidos explicitamente pelo modelo numérico. A modelagem matemática adotada para descrever os processos sub-grade, é chamada parametrização, isto é, um conjunto de equações que relaciona as variáveis sub-grade com as variáveis explícitas do modelo matemático. Em relação às equações do modelo matemático, a dinâmica do

modelo é a parte resolvida explicitamente, enquanto sua física é a parte parametrizada (MENDES, 2011). Uma breve descrição do modelo é apresentada na próxima seção.

## 2.2 WRF

Diversos modelos atmosféricos encontram-se em uso na atualidade, cada um com suas características próprias. O WRF é um modelo atmosférico de mesoescala de código livre e gratuito, criado, desenvolvido e mantido através de um esforço colaborativo entre a *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), a *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), a *Forecast Systems Laboratory* (FSL), a *Air Force Weather Agency* (AFWA), a *Naval Research Laboratory*, a *University of Oklahoma* e a *Federal Aviation Administration* (FAA).

O modelo WRF apresenta três módulos principais: o pré-processamento (WPS), o processamento (ARW) e o pós-processamento. No módulo de pré-processamento (WPS), os dados de inicialização (meteorológicos, geográficos e de ocupação do solo), de malhas horizontais e verticais, de aninhamentos, de tempos, ou seja, todo conjunto de dados de entrada do modelo, é processado e preparado para alimentar o módulo principal do WRF. O módulo principal recebe os dados que foram preparados no módulo de pré-processamento, usando as equações de conservação e parametrizações, efetua o processamento e envia o resultado para o módulo de pós-processamento. Esse módulo, finalmente, fornece o conjunto de valores (mais de 100) espaço-temporais de grandezas escalares e vetoriais como: temperaturas, pressões, umidades, velocidades, altura da CLA, fluxos de calor, precipitação pluviométrica, etc (SANTIAGO, 2015).

O núcleo dinâmico *Advanced Research WRF* (ARW) resolve as equações não hidrostáticas e compressíveis de Euler, conservação de massa e energia. Estas equações são expressas na forma de fluxo, usando variáveis que possuem propriedades conservativas, e são escritas utilizando uma coordenada vertical de pressão hidrostática, denotada pela letra grega  $\eta$  (eta), que acompanha o relevo, definida pela razão (SKAMAROCK *et al.*, 2008):

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{(p_{hs} - p_{ht})} \quad (1)$$

onde:

$p_h$  = componente hidrostática da pressão;

$p_{hs}$  = valor da pressão ao longo da superfície;

$p_{ht}$  = valor da pressão no topo da camada;

Os valores de  $\eta$  variam entre 1, na superfície, e 0, no topo da camada, como mostra a Figura 1.

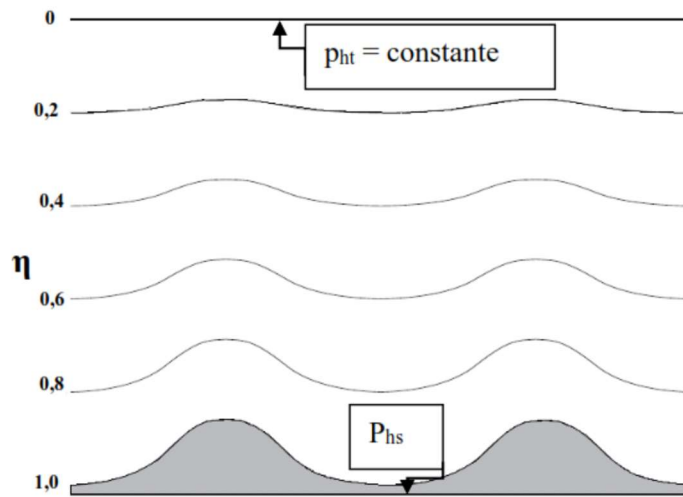


Figura 1 – Níveis eta ( $\eta$ ) do ARW  
Fonte: Skamarock *et al.* (2008).

Os cálculos realizados pelo WRF são feitos por meio de parametrizações considerando a variação física da atmosfera, enquanto a integração das equações é feita utilizando o método Runge-Kutta de terceira ordem para integração temporal e advecção vertical e “upwind” de quinta ordem para advecção horizontal (SALVADOR, 2014). O conjunto de equações utilizadas pelo modelo está relacionado abaixo:

#### Conservação da quantidade de movimento

$$\partial_t U + (\nabla \cdot V_u) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_x) = F_U \quad (2)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot V_v) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_y) = F_V \quad (3)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot V_w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (4)$$



Conservação da energia termodinâmica

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V} \Theta) = F_\Theta \quad (5)$$

Conservação de massa

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (6)$$

Equação geopotencial

$$\partial_t \phi + \mu^{-1} [(\nabla \cdot \mathbf{V} \phi) - gW] = 0 \quad (7)$$

Prognóstico do inverso da densidade

$$\partial_t \phi = \alpha \mu \quad (8)$$

Equação do estado termodinâmico

$$p = p_0 \left( \frac{R_d \theta}{p_0 \alpha} \right)^\gamma \quad (9)$$

onde:

$\mu(x, y)$  representa a massa por unidade de área no interior de uma determinada coluna  $(x, y)$ .

$$\mathbf{V} = \mu \mathbf{v} = (U, V, W)$$

$\mathbf{v} = (u, v, w)$  são as covariantes das velocidades nas duas direções, horizontal e vertical, e  $w$  a contravariante da velocidade vertical.

$$\Theta = \mu \theta$$

$\theta$  = temperatura potencial

$\phi = gz$  (geopotencial)

$p$  = pressão

$p_0$  = pressão de referência (normalmente, 105 Pa)

$\alpha = \frac{1}{\rho}$  = inverso da densidade

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \approx 1,4$$

$R_d$  = constante de Clapeyron para o ar seco

$F_U, F_V, F_W, F_\Theta$  representam os termos das forçantes decorrentes da física do modelo, difusão turbulenta, projeções esféricas e rotação da Terra.

Nas equações, os subscritos  $x$ ,  $y$  e  $\eta$ , denotam diferenciação em relação a cada uma destas variáveis, e:

$$\nabla \cdot \mathbf{V}a = \partial_x(Ua) + \partial_y(Va) + \partial_\eta(\Omega a) \quad (10)$$

sendo  $a$  uma variável genérica e  $\Omega = \mu\dot{\eta}$ .

Processos não resolvidos são considerados nesses modelos com o auxílio de esquemas de parametrização física que aplicam várias suposições e aproximações para simplificar processos não resolvidos. Essas parametrizações incluem tipicamente convecção úmida, turbulência atmosférica, transferência radiativa, microfísica, interação solo e vegetação (CARVALHO *et al.*, 2012).

Para representar os processos físicos que ocorrem na atmosfera faz-se necessário o uso de parametrizações. Os principais fatores que influenciam a dinâmica da atmosfera iniciam-se nas transformações que ocorrem na superfície do planeta (fluxos de calor e umidade, tensões geradas pelas irregularidades superficiais e topografia, dentre outros) e as transformações físicas no núcleo da atmosfera, tais como transporte, umidade, formação de nuvens, precipitação e outros. As parametrizações objetivam traduzir matematicamente todos os processos físicos, por meio de equações específicas, desenvolvidas com base em processos empíricos e semiempíricos, que, depois de implementadas no modelo WRF, têm seus resultados validados por pesquisadores, comparando, para diversas regiões, os valores inferidos pelo modelo, com dados fornecidos por instrumentos que medem os parâmetros atmosféricos (SANTIAGO, 2015).

Parametrizações físicas são maneiras de descrever os processos físicos por meio de equações mais simplificadas de modo a reduzir o número de incógnitas que regem a atmosfera, e, podem ser divididas em diferentes categorias, cada uma contendo várias opções disponíveis de PBL, superfície terrestre, camada superficial, microfísica, parametrização de cumulus e radiação (ondas longas e ondas curtas). Assim, vários trabalhos concentram-se em definir melhores parametrizações físicas, comparando com dados medidos em diversas partes do mundo, para as mais diversas aplicações.

Apesar das inúmeras possibilidades de combinações para a arquitetura do modelo WRF (dimensão dos domínios, razão entre malhas de domínios, dimensões das malhas horizontais e níveis verticais, número de domínios, entre outras), as parametrizações de física têm demonstrado grande influência na acurácia do modelo em representar a estrutura da atmosfera nas diversas regiões do planeta, concentrando nestas parametrizações os maiores esforços nos desenvolvimentos do modelo WRF (SALVADOR, 2014).

Os processos físicos disponíveis no modelo WRF (Figura 2) descrevem os esquemas de microfísica, radiação de ondas longas e curtas, cumulus, camada limite atmosférica, camada limite superficial e camada superficial do solo, os quais estão intrinsicamente relacionados (Figura 3), de forma que a alteração em uma delas pode interferir nas demais.

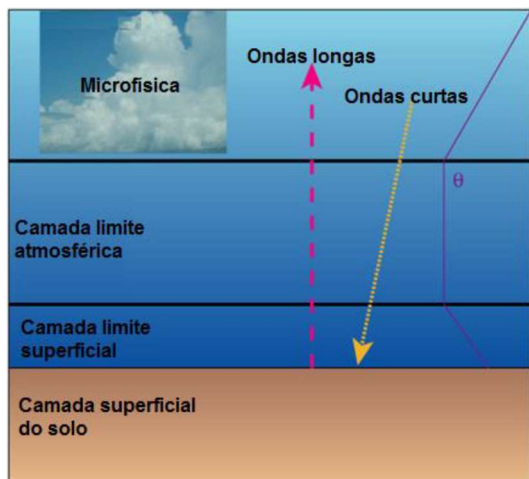


Figura 2 – Processos físicos do modelo WRF  
Fonte: Adaptado de Dudhia (2010).

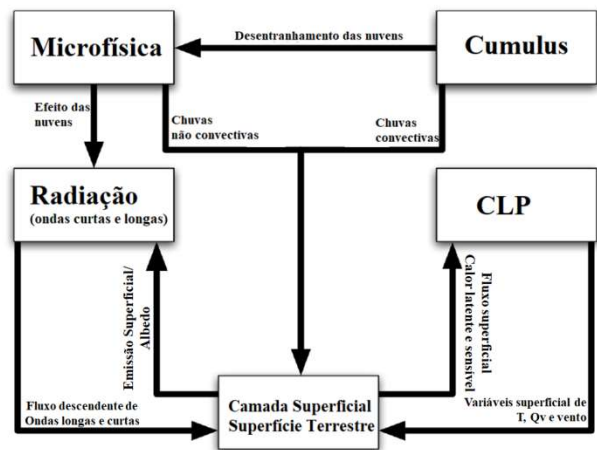


Figura 3 – Interações entre parametrizações  
Fonte: Adaptado de Dudhia (2010).

As informações descritas a seguir, acerca das parametrizações físicas, estão contidas em Skamarock *et al.* (2008).

A parametrização de microfísica resolve os processos explícitos de vapor d'água, chuva, neve, gelo, nuvens e granizo, ao final de cada passo de tempo, como um processo de ajustamento para garantir que o balanço final da saturação seja mais preciso para atualizar a temperatura e a umidade.

A parametrização de cumulus é responsável pelos efeitos de escala de subgrade para nuvens rasas e convectivas e é destinada a representar os fluxos verticais devido aos movimentos ascendentes, descendentes e compensatórios fora das nuvens em escalas não resolvidas pela grade do modelo. Os esquemas de nuvens, cumulus, operam somente em colunas individuais que fornecem perfis verticais de temperatura e umidade. A parametrização de cumulus não deve ser usada em espaçamento de grades menores que 5 km, sendo somente válida para espaçamento de grades maiores que 10 km, onde ela é necessária para a correta liberação do calor latente, em uma escala de tempo realista, nas colunas convectivas.

A parametrização da radiação fornece o aquecimento ou resfriamento da atmosfera devido ao fluxo divergente radiativo e ao balanço de calor na superfície devido às ondas longas e curtas que chegam à superfície. As ondas longas incluem radiação infravermelha ou térmica absorvida ou emitida por gases e pela superfície terrestre. O fluxo radiativo de ondas longas ascendentes provenientes da superfície terrestre é determinado pela emissividade da superfície que depende do uso e ocupação do solo e do perfil de temperatura. As ondas curtas incluem a luz visível e comprimentos de onda que fazem parte do espectro solar. Logo, a única fonte é o Sol, porém incluem processos de absorção, reflexão e espalhamento na atmosfera e nas superfícies. Para a radiação de ondas curtas, o fluxo ascendente é a reflexão devido ao albedo. Dentro da atmosfera, a radiação responde aos modelos de previsão de nuvens e distribuição de vapor de água, bem como a especificação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ozônio ( $\text{O}_3$ ) e, opcionalmente, outras concentrações de gases traços. Todos os esquemas de radiação no WRF são esquemas de coluna (unidimensional), logo cada coluna é tratada de forma independente e os fluxos correspondem a infinitos planos uniformes horizontais, o que é uma boa aproximação se a espessura da camada vertical do modelo for muito menor que o espaçamento da grade horizontal.

A parametrização da camada limite planetária (PBL) definem os fluxos verticais em escalas de subgrade devido aos transportes turbulentos, proporcionando tendências atmosféricas da temperatura, umidade (incluindo as nuvens) e o momentum horizontal em toda a PBL, e não somente na camada superficial. Quando um esquema de PBL é ativado, a difusão vertical explícita é desativada com o pressuposto de que o esquema de PBL controlará esse processo. Os fluxos de superfície são fornecidos

pelos esquemas de camada superficial (CS) e dos LSMs. Os esquemas de PBL determinam os perfis de fluxos, dentro da camada limite convectiva e da camada limite estável. São unidimensionais e assumem que existe uma separação de escalas entre a turbulência de subgrade e a turbulência resolvida.

As parametrizações de camada superficial calculam a velocidade de fricção e os coeficientes de troca, permitindo o cálculo das tensões de cisalhamento nos esquemas de parametrização da PBL e, o cálculo dos fluxos superficiais de calor e umidade nos modelos de superfície de solo. Ao determinar o esquema de PBL a ser utilizado no WRF, é necessário escolher o esquema de CS que se encaixa a ele. Alguns oferecem mais de um esquema de CS a ser escolhido para ser rodado conjuntamente.

As parametrizações de superfície terrestre usam informações atmosféricas fornecidas pelos esquemas da camada superficial, as informações sobre as forçantes radiativas são dadas pelos esquemas de radiação e as forçantes de precipitação são provenientes dos esquemas convectivos e de microfísica. Conjuntamente com informações internas sobre as variáveis e propriedades dos solos, esses modelos são capazes de fornecer fluxos de calor e de umidade para pontos acima do solo e de superfícies congeladas, podendo controlar os diferentes tipos de vegetação, cobertura do solo e predição de cobertura de neve. Os LSM não fornecem tendências, entretanto atualizam as variáveis de estado, que incluem a temperatura de superfície, os perfis de temperatura e de mistura do solo, a cobertura de neve e as propriedades do dossel. Por não haver interação horizontal entre pontos vizinhos nos LSM, estes são considerados modelos de coluna unidimensional para cada ponto de grade do WRF.

## 2.3 PARAMETRIZAÇÕES

### 2.3.1 Esquemas de PBL

Representações precisas dos processos e interações na PBL, via parametrizações do modelo, são importantes para simulações realistas. A parametrização de turbulência visa fazer inferências sobre a variação dos valores dos parâmetros atmosféricos, que

não são resolvidos, em todos os pontos da grade. Neste trabalho, é investigado o desempenho de três esquemas PBL, dois fechamentos não locais de primeira ordem (YSU e ACM2) e um fechamento local (MYJ).

A parametrização YSU é chamada de modelo de fechamento de primeira ordem porque, para expressar o efeito da turbulência nas variáveis principais, não requer uma equação adicional. Para resolver a equação, um termo  $\gamma_c$  é adicionado à camada mista para expressar a difusão turbulenta:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial z} \left[ K_c \left( \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) - \overline{(w'c')}_h \left( \frac{z}{h} \right)^3 \right] \quad (11)$$

onde  $C$  representa calor ou momento,  $K_c$  é o coeficiente de difusividade turbulenta,  $\gamma_c$  é um termo de ajuste para o gradiente local,  $z$  é a altura acima do solo,  $h$  é a altura da PBL e  $\overline{(w'c')}_h$  é o fluxo na camada de inversão (XIE *et al.*, 2012).

A parametrização ACM2 mistura o fechamento local e não local e aborda os fluxos não locais usando uma matriz transitória. A equação governante é:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = f_{conv} Mu C_1 - f_{conv} Md_i C_i + f_{conv} Md_{i+1} C_{i+1} \frac{\Delta z_{i+1}}{\Delta z_i} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_c (1 - f_{conv}) \frac{\partial C_i}{\partial z} \right] \quad (12)$$

onde  $Mu$  é a taxa de mistura convectiva ascendente não local,  $Md_i$  é a taxa de mistura descendente da camada  $i$  para a camada  $i-1$ ,  $C_i$  é o escalar na camada  $i$  e  $\Delta z_i$  é a espessura da camada  $i$ .  $f_{conv}$  controla a contribuição da difusão não local versus a difusão local. Este fator de adequação  $f_{conv}$  é derivado da razão entre o fluxo de calor não local e o fluxo de calor total no topo da camada superficial (0,1h) (HOLTSLAG; BOVILLE, 1993).  $f_{conv}$  aumenta rapidamente de zero para uma atmosfera estável ou neutra e é quase assíntota próximo a 0,5 para uma atmosfera instável.  $f_{conv}$  é definido como:

$$f_{conv} = \left[ 1 + \frac{k^{-2/3}}{0.1a} \left( -\frac{h}{L} \right)^{-1/3} \right]^{-1} \quad (13)$$

onde  $a$  é uma constante definida como 7,2,  $k$  é a constante de von Karman,  $h$  é a altura da PBL e  $L$  é a escala de comprimento de Monin-Obukhov (XIE *et al.*, 2012).

A parametrização MYJ é um esquema de fechamento local, também chamado de esquema de fechamento TKE, pois determina o coeficiente de difusão turbulenta a partir de prognósticos da energia cinética turbulenta (TKE). Fornece os fluxos turbulentos de cada ponto a partir dos valores médios das variáveis atmosféricas (XIE *et al.*, 2012). O modelo expressa a difusividade como:

$$K_c = S_c l e^{1/2} \quad (14)$$

onde  $S_c$  é um coeficiente numérico,  $l$  é a maior escala de comprimento e  $e$  é o TKE.

É importante mencionar que cada um dos três esquemas de PBL desenvolve sua própria técnica para diagnosticar alturas de PBL ( $h$ ), que é usada em outras parametrizações físicas quando necessário. O esquema YSU determina  $h$  como o primeiro nível neutro dado pelo número de Richardson em massa para condições instáveis (HONG *et al.*, 2006). O esquema ACM2 funciona de maneira semelhante, determinando  $h$  como a altura acima do nível onde o número de bulk Richardson excede um valor crítico (PLEIM, 2007). Em contraste, o esquema MYJ determina  $h$  como a altura em que TKE assume valores mínimos.

### 2.3.2 Parametrizações da Camada de Superfície

A formulação precisa da camada superficial desempenha um papel importante na interação entre o solo e a atmosfera para fornecer uma evolução mais precisa da atmosfera para modelos numéricos. A camada de superfície calcula a velocidade de atrito e fornece tensão de superfície para o esquema PBL e coeficientes para o esquema LSM para calcular fluxos de calor e umidade; quando a água está presente na superfície, os fluxos superficiais são calculados no próprio esquema da camada superficial. Um esquema frequentemente usado para calcular fluxos superficiais turbulentos é a teoria de similaridade de Monin-Obukhov (MONIN; OBUKHOV, 1954;

OBUKHOV, 1971), que fornece informações sobre os perfis na camada superficial que são usados para fazer inferências de temperatura e umidade a 2 m e ventos a 10 m, entre outras variáveis. O esquema da camada superficial funciona em combinação com um esquema PBL particular.

Os esquemas YSU e ACM2 podem ser acoplados ao esquema de camada superficial de similaridade MM5 (ZHANG; ANTHES, 1982) para determinar os coeficientes de troca superficial de momento, calor e umidade; os esquemas acoplados usam as funções de estabilidade propostas por Paulson (1970) e consideram quatro esquemas de estabilidade de acordo com Zhang e Anthes (1982). Sobre o oceano, o parâmetro Charnock é usado para relacionar o comprimento da rugosidade à velocidade de fricção e para melhorar os fluxos de calor e umidade na superfície, usa a velocidade convectiva proposta por Beljaars (1994).

O esquema MYJ pode ser acoplado apenas ao esquema de camada de superfície de Eta-similaridade, que também é baseado na teoria de similaridade de Monin-Obukhov e inclui parametrizações de uma subcamada viscosa. Ele calcula os fluxos de superfície usando um método iterativo. Em terra, para temperatura e umidade, os efeitos da subcamada viscosa estão relacionados à variação da altura da rugosidade proposta por Zilitinkevich (1995), enquanto no oceano, a subcamada viscosa é parametrizada de acordo com Janjic (1994). Para casos de camada superficial instável, para evitar singularidades, a correção de Beljaars (1994) é aplicada.

### **2.3.3 Modelos de Land Surface**

Os LSMs usam informações atmosféricas do esquema da camada de superfície, informações de forçamento radiativo do esquema de radiação e forçantes de precipitação dos esquemas microfísicos e convectivos, juntamente com informações sobre a superfície da terra, para gerar fluxos de calor e umidade (WHARTON *et al.*, 2015). O modelo WRF fornece alguns LSMs que calculam os fluxos de calor e umidade sobre a terra. Os LSMs diferem em complexidade e métodos. Para avaliar seu papel nas simulações na Bahia, são utilizados o modelo RUC, esquemas Noah e Noah-MP LSM.



O modelo RUC (SMIRNOVA *et al.*, 1997, 2000) resolve as equações de balanço de energia e umidade na superfície usando um esquema implícito para calcular os fluxos de superfície. Ele resolve uma equação de difusão de calor e a equação de transferência de umidade de Richard, considerando seis camadas de solo e as mudanças de fase da água contida no solo durante os períodos de frio.

O modelo de Noah (CHEN; DUDHIA, 2001) usa uma única equação linear do balanço de energia da superfície para calcular a temperatura do solo considerando a superfície da vegetação do solo. As equações do modelo consideram o tipo de vegetação e a textura do solo. A temperatura e a umidade do solo, bem como a umidade do dossel, são previstas em quatro camadas de solo atingindo 2 m. As três primeiras camadas formam a zona de raiz em áreas não florestadas. Solo raso, fundo “gotejante” (precipitação que infiltra para o fundo da coluna de solo e é perdida no sistema) e dinâmica simples de neve/degelo são vistos como áreas onde o modelo evita complexidade. A vegetação, entretanto, é bem definida usando estimativas mensais de albedo e fração da cobertura vegetal verde com base na classe de vegetação. A profundidade do enraizamento vertical para as culturas também pode mudar de mês para mês. A evapotranspiração pode ser modelada pela equação de Ball-Berry, levando em consideração tanto a física do fluxo da água através do solo e das plantas quanto a fisiologia da fotossíntese. Alternativamente, um esquema Jarvis mais simples baseado apenas no índice de área foliar e na física do fluxo de água através do continuum solo-vegetação-atmosfera pode ser usado. Esses avanços foram implementados para melhorar as parametrizações relacionadas às simulações sazonais e diurnas de fluxos de água, fluxos de energia e variáveis de estado (WHARTON *et al.*, 2015). A umidade do solo é fornecida pela equação de Richard e a temperatura é dada pela equação de difusão térmica. Como no RUC, o efeito da transpiração da planta é considerado, mas a resistência do dossel é semelhante ao esquema de Xiu e Pleim (2001).

Noah-MP é um modelo de superfície terrestre que usa várias opções para os principais processos de interação terra-atmosfera (NIU *et al.*, 2011). Noah-MP contém um dossel de vegetação separado definido por uma parte superior e inferior do dossel, raio da copa e folhas com dimensões, orientação, densidade e propriedades radiométricas prescritas. O modelo Noah-MP pode ser executado prescrevendo a densidade

horizontal e vertical da vegetação usando observações terrestres ou baseadas em satélite. O modelo é capaz de distinguir entre diferentes vias de fotossíntese e define parâmetros específicos da vegetação para a fotossíntese e respiração das plantas.

### 3 REVISAO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos buscaram avaliar o potencial eólico utilizando o modelo WRF, em diferentes regiões tais como, Hawaii (ARGÜESO; BUSINGER, 2018), Chile (MATTAR; BORVARÁN, 2016), Grécia (GIANNAROS *et al.*, 2017), Paquistão (AMJAD *et al.*, 2015), Brasil (TUCHTENHAGEN *et al.*, 2020) e Península Ibérica (SALVAÇÃO; SOARES, 2018).

Argüeso e Businger (2018) avaliaram o potencial eólico de Oahu em alta resolução (1km), durante o período de 2005 a 2014, utilizando o WRF (versão 3.7.1). As parametrizações físicas utilizadas foram: YSU (PBL); WSM6 (microfísica); RRTM (radiação de onda longa); Duhia (radiação de onda curta); BMJ (cumulus); e Noah (LSM). Os resultados das simulações foram comparados com os dados observados da velocidade do vento na altura de 80m. Os pesquisadores perceberam a necessidade de validar o modelo usando dados de geração e velocidade do vento em alturas específicas da turbina eólica. Caso contrário, a validação do modelo pode fornecer informações enganosas devido ao desempenho contrastante do modelo em diferentes alturas. A variável direção do vento não foi explorada neste estudo.

Mattar e Borvarán (2016) realizaram a primeira estimativa do potencial de energia eólica *offshore* da costa centro-sul do Chile, utilizando o modelo WRF (versão 3.6). As simulações do campo de vento foram realizadas em diferentes alturas (20, 30, 40 e 140 m), contudo somente foram confrontadas com os dados observados de 20, 30 e 40m. Os resultados simulados de 140m foram utilizados para o cálculo da energia eólica. O estudo empregou uma resolução espacial de 3 x 3 km para o período entre 1 de fevereiro de 2006 a 31 de janeiro de 2007, utilizando 33 níveis verticais e dados de inicialização de 0,75° de modelos globais. As parametrizações físicas utilizadas foram: WSM3 (microfísica); YSU (PBL); RRTM (radiação de onda longa); Duhia (radiação de onda curta); Monin-Obukhov (SL); e Noah (LSM). As variáveis estudadas foram velocidade e direção do vento. Apesar de subestimar a magnitude da velocidade do vento, possivelmente como resultado de efeitos de microescala, o modelo WRF mostrou grande potencial neste tipo de estudo exploratório sobre energia eólica *offshore* para áreas onde não há grande rede de medições locais. Os autores também destacaram a necessidade de realizar uma análise de sensibilidade

relacionada ao modelo físico do WRF para melhorar as simulações e contribuir para uma melhor compreensão do potencial eólico *offshore*.

Da mesma forma que Mattar e Borvarán (2016), Giannaros *et al.* (2017) também simularam o período de 1 ano (WRF, versão 3.2.1) com foco na simulação do campo eólico, porém este em uma região da Grécia. As opções físicas utilizadas foram: WSM6 (microfísica); MYJ (PBL); RRTM (radiação de onda longa); Duhia (radiação de onda curta); Eta (SL); Noah (LSM); e Kain-Fritsch (cumulus). Um único domínio de modelagem com resolução de 6km foi empregado. O desempenho do modelo foi avaliado a partir da comparação com os dados de medição do vento no solo (10 m). Em uma base sazonal, o modelo teve um desempenho melhor durante a estação quente do que na metade fria do ano, tanto para os locais de medição do continente quanto para as ilhas.

Outro estudo que avaliou o desempenho do modelo WRF pelo período de 1 ano na avaliação de recursos eólicos, foi o de Amjad *et al.* (2015), aplicado em Gharo no Paquistão, utilizando o modelo WRF (versão 3.0). Discussões foram realizadas nas bases anual e sazonal. O estudo contou com dados de anemômetros nas alturas de 10 e 30 m para o ano de 2005. O modelo foi configurado com as seguintes opções físicas: YSU (PBL); RRTM (radiação de onda longa); Duhia (radiação de onda curta); Noah (LSM); e Kain-Fritsch (cumulus). As condições de contorno inicial e lateral foram fornecidas usando a Análise Final do NCEP (FNL) ([www.dss.ucar.edu/datasets/ds083.2](http://www.dss.ucar.edu/datasets/ds083.2)) disponíveis em resolução de grade espacial de  $1 \times 1^\circ$  e resolução temporal de 6 horas, com 24 níveis verticais da superfície a 10 hPa. O modelo foi configurado utilizando dois domínios, sendo o primeiro e o segundo domínio com resolução de 27km e 9km, respectivamente. Dados de velocidade do vento simulados a 60 m foram interpolados, usando a lei da potência, para a altura de 30m. Para as duas estações, as medidas do erro médio de viés (MBE), erro absoluto médio (MAE) e erro quadrático médio da raiz (RMSE) de 30 m de dados interpolados foram encontradas abaixo de 10 m de altura com maior correlação (R). Uma metodologia de correção de viés (ou melhor estimador sistemático fácil - BES) (WONNACOTT; WONNACOTT, 1972) foi implementado posteriormente para remover o viés do modelo, mostrando uma melhoria significativa na redução de MBE, MAE e

RMSE, ou seja, até 99%, 73% e 68% em 10 m de altura e 99%, 51% e 46% em 30 m de altura.

Tuchtenhagen *et al.* (2020) avaliaram a variabilidade do vento e a densidade de potência simuladas pelo WRF na região *offshore* no sul do Brasil, com uma grade com espaçamento de 25 km para o período de 5 anos (2006-2010). O experimento numérico indicou que a velocidade média do vento sazonal simulada foi a mesma (a um nível de significância estatística de 5%) em todos os anos e estações, exceto setembro-outubro-novembro de 2010, sugerindo uma alta confiabilidade do modelo para esse fim. A densidade de potência simulada foi estatisticamente diferente das observações de junho-julho-agosto de 2006 e dezembro-janeiro-fevereiro, março-abril-maio e setembro-outubro-novembro de 2010. Por outro lado, foi o mesmo em todas as estações de 2007, 2008 e 2009. Assim, pode-se considerar que o modelo tem confiabilidade moderada para esta variável. Por fim, os autores concluíram que o modelo WRF pode ser utilizado como ferramenta para avaliar o potencial de geração de energia eólica na região sul do Brasil.

Salvação e Soares (2018) estimaram o potencial eólico *offshore* da costa da Península Ibérica com a densidade energética média anual em 971 W/m<sup>2</sup>, 549 W/m<sup>2</sup> e 398 W/m<sup>2</sup> nas regiões norte, centro e sul, respectivamente. As simulações foram realizadas com o modelo WRF em 9 e 3 km de resolução espacial. Comparações com dados observacionais mostraram que o modelo WRF é uma ferramenta proeficiente de geração eólica, tanto em águas costeiras como em mar aberto, mesmo quando o modelo é executado em uma resolução espacial inferior.

Os estudos acima não levaram em conta as diferentes opções físicas disponíveis no WRF. Para analisar possíveis efeitos nos campos de vento simulados, várias análises sobre a sensibilidade dos dados do vento levam em consideração diferentes configurações físicas, como as feitas por Surussavadee (2017b), Penchah *et al.* (2017), Carvalho *et al.* (2012), Carvalho *et al.* (2014a), Cheng *et al.* (2013), Santos-Allamilos *et al.* (2013), Giannakopoulou e Nhili (2014) e Wharton *et al.* (2015).

Surussavadee (2017b) avaliou nove esquemas de PBL (ACM2, MYJ, MYNN3, QNSE, BOU, UW, GBM, SH e YSU), usando o modelo WRF (versão 3.7.1), para a previsão

de campos de vento no nordeste da Tailândia. As simulações foram realizadas durante três meses do ano de 2012 e encontrou que os esquemas de UW e GBM apresentaram melhor desempenho no prognóstico de velocidade e direção do vento. As simulações foram comparadas com dados observados de duas alturas diferentes (65 m e 90 m), com destaque para a combinação dos esquemas físicos UW-MM5 revisado-Noah, que correspondem a combinação de PBL, camada de superfície e solo, respectivamente. Esta combinação mostrou boa utilidade para velocidades do vento acima de 2 m/s. As resoluções de grade utilizadas foram 15 e 5km para os domínios externo e interno, respectivamente.

Penchah *et al.* (2017) investigaram o potencial eólico do leste do Irã através da avaliação de cinco parametrizações de PBL (ACM2, MYJ, MYNN2, QNSE e YSU). Foram simulados (WRF, versão 3.6) dois meses, dezembro (frio) e julho (quente), de 2007, utilizando três domínios aninhados com 45, 15 e 5 km de resolução, respectivamente. A partir da comparação das simulações com dados observados nas alturas de 10 e 40m, concluíram que MYJ obteve a melhor performance nas simulações de campos de ventos para a estação quente e YSU para a estação fria. No geral, o esquema MYJ pôde ser escolhido como a melhor parametrização uma vez que seu resultado foi próximo do apresentado por YSU na estação fria. Assim, MYJ foi escolhido para conduzir as simulações a longo prazo (um ano de simulação) dos estudos de energia eólica.

Carvalho *et al.* (2012) avaliaram o desempenho do modelo WRF (versão 3.0.1) na simulação de um período de 2 meses do ano de 2008, analisando a velocidade do vento a 60m acima do solo, sob diferentes opções físicas, juntamente com a influência da resolução do domínio e a complexidade do terreno, para uma área de Portugal com características típicas para exploração de energia eólica (velocidade do vento mais elevada e alta complexidade do terreno e topografia – região montanhosa). A simulação foi configurada com três domínios aninhados com resoluções de 90, 18 e 3,6 km. Como o objetivo foi simular o vento próximo a superfície, foram avaliados os esquemas de parametrizações físicas YSU, MYJ e ACM2, referentes à PBL, chegando-se a conclusão de que o conjunto de parametrização composto pelos esquemas físicos MM5-YSU-Noah foram os mais adequados para este local. A fim de validar o modelo, os autores utilizaram três parâmetros estatísticos, o erro quadrático

médio (do inglês, *Root Mean Squared Error* – RMSE), o Bias e o erro de desvio padrão (do inglês, *Standard Deviation Error* – STDE). Uma das principais limitações do modelo é a subestimação da velocidade do vento. À medida que a complexidade do terreno aumenta, também aumenta as dificuldades do modelo em simular com precisão o regime do vento (especialmente a velocidade do vento), sendo que a subestimação é significativamente maior em locais com maior complexidade do terreno. Também foi visto com este teste que as diferenças entre as simulações não são muito significativas quando a resolução horizontal e vertical do domínio de simulação é melhorada. Isso pode ser visto como um sinal de que, abaixo de determinada resolução do domínio, o desempenho do modelo não é significativamente melhorado com o aumento da sua resolução. A direção do vento foi razoavelmente simulada pelo modelo, especialmente em regimes de vento onde há um setor dominante claro, mas na presença de baixas velocidades do vento a caracterização da direção do vento (observada e simulada) é muito subjetiva e levou a maiores desvios entre as simulações e observações.

Carvalho *et al.* (2014a) avaliaram cinco parametrizações (YSU; MYJ; ACM2; QNSE; e MYNN2,5), do modelo WRF (versão 3.4.1), para simulação do vento e sua respectiva estimativa de produção de energia eólica para o ano de 2008. Os resultados das simulações foram comparados com os dados de vento medidos e coletados em cinco bóias de alto mar e em treze estações de medição do vento na costa da Península Ibérica, nas alturas de 3, 60, 61, 81 e 82 m. Dessa forma, para a análise dos resultados foi necessário utilizar os valores médios ponderados (a média para todos os sites ponderados pelo respectivo número de registro de dados) para cada métrica estatística. A parametrização ACM2 apresentou os menores erros quando comparado com os dados de vento observados, ao considerar todos os sítios *onshore* e *offshore* juntos. No entanto, para as instalações *offshore*, a parametrização QNSE produziu as melhores estimativas de produção de energia eólica. As demais opções físicas utilizadas e deixadas inalteradas foram WSM6, KF, Dudhia e RRTM. O modelo foi configurado com 27 níveis verticais e com resolução dos domínios interno e externo de 5 e 25 km, respectivamente. As métricas estatísticas utilizadas para avaliar as simulações foram o erro médio quadrático da raiz (RMSE), o viés, o desvio padrão do erro (STDE) e os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) para a velocidade e

direção do vento. Estas foram analisadas em relação a estações do ano, além do resultado anual.

Cheng *et al.* (2013) exploraram a sensibilidade das previsões de vento do modelo WRF as distintas combinações de parametrizações físicas em um parque eólico no norte do Colorado (USA). Para o caso de inverno, a sensibilidade à representação dos processos da superfície terrestre e da camada limite planetária foi quantificada através dos seguintes conjuntos de esquemas de parametrização: YSU-NOAH; YSU-RUC; MYJ-NOAH; QNSE-NOAH; MYNN-2,5-NOAH; e MYNN-3-NOAH. Os esquemas MYJ e QNSE foram os melhores esquemas de PBL para este caso. Para o caso de verão, sete conjuntos de opções de microfísica e cumulus, respectivamente (Lin-KF; Lin-BMJ; Lin-GD; Morrison-KF; Thompson-KF; WDM6-KF e WSM6-KF) foram testadas. Constatou-se que os experimentos com microfísica mais avançada (ex. Morrison e WDM6) produziram previsões do vento mais precisas. O modelo WRF neste estudo usou uma configuração de grade horizontal de 30, 10 e 3,3 km.

Santos-Allamilos *et al.* (2013) avaliaram 32 configurações físicas usando dois esquemas diferentes para microfísica (Morrison-2M e Thompson), cumulus (Kain-Fritsch e Grell-3D), camada limite planetária (YSU e MYNN), radiação de ondas curtas (Goddard e RRTMG) e ondas longas (RRTM e RRTMG), disponíveis na versão 3.2 do WRF, aplicados à região da Andaluzia (sul da Espanha). As estimativas foram testadas em relação a dados de quatro estações que forneceram dados horários de velocidade e direção do vento, na altura de 40m, em um período de 16 dias do ano de 2005, divididos em 4 períodos para representar as 4 estações do ano – inverno, primavera, verão e outono. A configuração do modelo incluiu três domínios aninhados, com resoluções espaciais de 27, 9 e 3 km. As estatísticas utilizadas para a validação das diferentes configurações do modelo foram o STDE e bias. Verificou-se que a configuração física tem pouco impacto nas estimativas de distribuição da direção do vento. O experimento que utilizou o YSU (PBL), Morrison-2M (microfísica), Grell-3D (cumulus), RRTM (radiação de onda longa) e RRTMG (radiação de onda curta) teve o melhor desempenho.

Giannakopoulou e Nhili (2014) implementaram o modelo WRF (versão 3.4) no Mar do Norte por um período de 5 dias do mês de março de 2005, com o objetivo de testar



quatro esquemas de PBL (MYJ; MYNN-2,5; YSU; e ACM2). Quatro domínios foram construídos com a configuração de grade horizontal de 27, 9, 3 e 1 km, respectivamente. A comparação dos resultados do modelo com outros estudos de modelagem e com dados observados em diferentes alturas, principiando em 34 m até cerca de 100m (a cada 10m), mostrou que o esquema de PBL MYNN-2,5 simulou satisfatoriamente a camada limite atmosférica marinha sobre o Mar do Norte.

Wharton *et al.* (2015) simularam cinco opções de LSM (TD, NLSM, RUC, PX e NOAH-MP) aplicado em alturas de turbinas eólicas no norte de Oklahoma, EUA. No geral, os LSMs mais simples tendem a ter o pior desempenho na estimativa do balanço de energia superficial e, em menor escala, na simulação do cisalhamento do vento. Esses modelos incluíram o modelo de difusão térmica (TD) e o modelo RUC; no entanto, o último modelo teve resultados muito inconsistentes nos três casos. Já as performances de PX, Noah e Noah-MP não eram consistentemente diferentes umas das outras.

### 3.1 OUTRAS PESQUISAS RELACIONADAS COM O TEMA

Assim como Carvalho *et al.* (2012) que além de avaliar as parametrizações físicas, outras pesquisas testaram o desempenho do modelo no que tange outras opções, tais como opções numéricas.

Carvalho *et al.* (2014b) avaliaram e compararam o desempenho do modelo de mesoescala WRF nas estimativas de simulação de vento e energia eólica quando forçado por diferentes condições iniciais e de fronteira: uma reanálise mais antiga, amplamente utilizada (o NCEP-R2) e três conjuntos de dados de reanálises que representam a nova geração deste tipo de dados ERA-Interim, NASA-MERRA e NCEP-CFSR. Devido ao seu uso intensivo em estudos de avaliação de energia eólica, as análises NCEP-GFS e NCEP-FNL também foram utilizadas para conduzir o WRF e seus resultados comparados aos das simulações conduzidas por reanálises. Os autores concluíram que as reanálises de nova geração foram capazes de proporcionar uma considerável melhora na simulação do vento quando comparadas com as

reanálises mais antigas. Entre todos os conjuntos de dados de condições iniciais e de limites testados, a reanálise ERA-Interim é a que provavelmente fornece os dados iniciais e de fronteira mais realistas, fornecendo as melhores estimativas dos regimes locais de vento e da produção potencial de energia eólica. As análises do NCEP-GFS e do NCEP-FNL foram as melhores alternativas ao ERA-Interim, apresentando melhores resultados do que todos os outros conjuntos de dados de reanálise testados e, portanto, podem ser consideradas alternativas válidas ao ERA-Interim.

Surussavadee (2017a) avaliou as previsões de velocidade e direção do vento, por hora, a 65 e 90m acima do solo, para o nordeste da Tailândia. Os campos de vento previstos de 6 a 12h após o tempo inicial foram utilizados para avaliação da precisão do modelo. O modelo foi configurado com dois domínios aninhados, de resolução espacial de 15 e 5km, respectivamente. Os resultados mostraram que a aplicação do *nudging* melhora significativamente a precisão da previsão. As velocidades e as direções previstas do vento concordaram bem com as observações em ambas as altitudes, para velocidades do vento superiores a 2 m/s. O autor declara que o sistema de previsão do vento mostrado no artigo é útil para o planejamento e gerenciamento de energia eólica no nordeste da Tailândia.

Cheng *et al.* (2017) testaram a hipótese de que a previsão do vento a curto prazo (0 a 3hs) pode ser melhorada através da assimilação de dados de observações da velocidade do vento do anemômetro de turbinas eólicas para um sistema de previsão numérica, e descobriram que a assimilação da velocidade do vento pode melhorar a sua previsão a curto prazo reduzindo o erro absoluto médio em 0,5-0,6 m/s (30-40%). O modelo WRF neste estudo usou uma configuração de grade horizontal de 30, 10 e 3,3 km.

No Brasil, Ramos *et al.* (2013) realizaram a previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas. Os resultados mostraram que a qualidade da previsão do vento realizada com o WRF foi bastante satisfatória, principalmente no período seco do interior alagoano. Este estudo contou com torres anemométricas de 50 e 100m de altura. O modelo foi configurado com dois domínios aninhados, de resolução espacial de 20 e 5km, respectivamente. Como dados de entrada de WRF,

utilizaram-se reanálises do NCEP FNL (Final Analysis) com resolução espacial de  $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ .

### 3.2 ANÁLISES DOS ESTUDOS LEVANTADOS

Doravante análise dos estudos levantados nas seções anteriores, os Quadros 1 e 2 puderam ser construídos. O Quadro 1 mostra as características (região, período de estudo, espaçamento da grade, altura dos anemômetros e versão do WRF) dos diferentes estudos realizados com o modelo WRF que buscaram analisar o potencial da energia eólica e/ou testar as diversas parametrizações físicas para aplicação em energia eólica.

<b>Autor</b>	<b>Região</b>	<b>Problema</b>	<b>Período de estudo</b>	<b>Espaçamento da grade (km)</b>	<b>Altura dos anemômetros (m)</b>	<b>Versão WRF</b>
Argüeso e Businger (2018)	EUA	Estimar potencial eólico	10 anos	25:5:1	80	3.7.1
Mattar e Borvorán (2016)	Chile	Estimar potencial eólico	1 ano	27:9:3	20, 30 e 40	3.6
Giannaros <i>et al.</i> (2017)	Grécia	Avaliação do modelo	1 ano	6	N.I	3.2.1
Amjad <i>et al.</i> (2015)	Paquistão	Avaliação do modelo	1 ano	27:9	10 e 30	3.0
Tuchtenhagen <i>et al.</i> (2020)	Brasil	Avaliação do modelo	5 anos (2006-2010)	25	10	N.I
Salvação e Soares (2018)	Península Ibérica	Estimar potencial eólico	10 anos (2004-2013)	9:3	3	N.I
Carvalho <i>et al.</i> (2014a)	Portugal	Testes de parametrizações físicas	1 ano (2008)	25:5	3, 60, 61, 81 e 82	3.4.1
Surussavadee (2017b)	Tailândia	Testes de parametrizações físicas	3 meses de 2012	15:5	65 e 90	3.7.1
Penchah <i>et al.</i> (2017)	Leste do Irã	Testes de parametrizações físicas	2 meses de 2007	45:15:5	10 e 40	3.6
Santos-Allamilos <i>et al.</i> (2013)	Espanha	Testes de parametrizações físicas	16 dias em 2005	27:9:3	40	3.2
Cheng <i>et al.</i> (2013)	EUA	Testes de parametrizações físicas		30:10:3,3		
Carvalho <i>et al.</i> (2012)	Portugal	Testes de parametrizações físicas	2 meses de 2008	90:18:3,6	60	3.0.1
Giannakopoulou e Nhili (2014)	Mar do Norte	Testes de parametrizações físicas	5 dias de 2005	27:9:3:1	34, 41.5, 51.5, 61.5, 71.5, 81.5, 91.5, 104.5	3.4
Wharton <i>et al.</i> (2015)	EUA	Testes de parametrizações físicas	3 períodos de 2 semanas	9:3:1	4, 25, 60	3.4.1

**QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS DOS ESTUDOS REALIZADOS COM O MODELO WRF QUE BUSCARAM ANALISAR O POTENCIAL DA ENERGIA EÓLICA E/OU TESTAR AS DIVERSAS PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS PARA APLICAÇÃO EM ENERGIA EÓLICA**

Fonte: A autora.

Com base no Quadro 1, pode-se inferir que diversos estudos foram desenvolvidos ao redor do mundo utilizando o modelo de mesoescala WRF aplicado à temática de

energia eólica, buscando avaliar se o modelo representa satisfatoriamente o campo eólico, e/ou estimando o potencial eólico da região estudada, e/ou testando as parametrizações físicas do modelo para um melhor desempenho do mesmo na simulação de campo de ventos.

Um dos parâmetros que influenciam fortemente a precisão da representação do terreno no modelo é a resolução do domínio da simulação (CARVALHO *et al.*, 2012). Porém, poucos estudos utilizaram alta resolução. Wharton *et al.* (2015) e Giannakopoulou e Nhili (2014) usaram 1km em seus domínios de interesse porém para um período pequeno de modelagem, semanas e dias, respectivamente. A exceção foi Argüeso e Businger (2018) com espaçamento de grade de 1km para o menor domínio e 10 anos de simulação, porém vale destacar o pequeno tamanho deste domínio, que circunda a ilha de Oahu, Havaí.

É perceptível também a falta de dados observados em altitudes compatíveis às alturas das turbinas eólicas. A maior altura de anemômetro no Quadro 1, verifica-se em Giannakopoulou e Nhili (2014) que testou parametrizações físicas comparando os dados das simulações com dados obtidos de uma torre de 104,5 m. A versão mais recente do WRF utilizada nos estudos analisados foi a 3.7.1 com Argüeso e Businger (2018) e Surussavadee (2017b). Muitos estudos usaram um modelo antigo não suportado, resolução grosseira ou concentraram-se no vento em alturas inferiores a altura do cubo da turbina.

Carvalho *et al.* (2014a) destaca que o potencial de energia eólica de uma área é tipicamente avaliado e quantificado utilizando medições de vento coletadas nessa área e para avaliar o recurso eólico da área, pelo menos um ano de medições de vento precisa ser realizado, para caracterizar realisticamente a climatologia local do vento. Pelo Quadro 1, vê-se que os trabalhos que tiveram como problemática a estimativa do potencial eólico ou a avaliação do modelo WRF para representar bem o campo eólico da região estudada, utilizaram para a comparação com as simulações, no mínimo, 1 ano de dados observados. Porém os estudos que se preocuparam em examinar a sensibilidade física dos modelos, valeram-se de períodos curtos de simulação (dias, semanas ou poucos meses), com exceção de Carvalho *et al.* (2014a) que simulou o período de 1 ano de vento, para analisar a sensibilidade às

parametrizações da camada limite planetária, do modelo WRF e estimar a produção de energia eólica para as áreas *onshore* e *offshore* da Península Ibérica.

O Quadro 2 utiliza os mesmos autores referenciados no Quadro 1 e adiciona outras pesquisas relacionadas com o tema. Neste quadro é evidenciado as opções físicas utilizadas na construção do estudo.

Autor	Opções físicas					
	PBL	LSM	Microfísica	Cumulus	Radiação de onda longa	Radiação de onda curta
Argüeso e Businger (2018)	YSU	Noah	WSM6	BMJ	RRTM	Dudhia
Mattar e Borvorán (2016)	YSU	Noah	WSM3		RRTM	Dudhia
Giannaros <i>et al.</i> (2017)	MYJ	Noah	WSM6	KF	RRTM	Dudhia
Amjad <i>et al.</i> (2015)	YSU	Noah		KF	RRTM	Dudhia
Tuchtenhagen <i>et al.</i> (2020)	YSU	Noah	WSM3	KF	RRTM	Dudhia
Salvação e Soares (2018)	YSU	Noah	WSM6	KF	RRTM	Dudhia
Carvalho <i>et al.</i> (2014a)	ACM2	PX	WSM6	KF	RRTM	Dudhia
Surussavadee (2017b)	UW	Noah				
Penchah <i>et al.</i> (2017)	MYJ	Noah	WSM6	KF	RRTM	Dudhia
Santos-Allamilos <i>et al.</i> (2013)	YSU		Morrison-2M	Grell-3D	RRTM	RRTMG
Cheng <i>et al.</i> (2013)	MYJ	Noah		KF	RRTM	Dudhia
Carvalho <i>et al.</i> (2012)	YSU (inverno) e ACM2 (verão)	Noah (inverno) e PX (verão)	WSM6	KF	RRTM	Dudhia
Giannakopoulou e Nhili (2014)	MYNN-2,5	Noah	Thompson	Grell-3	RRTM	Dudhia
Ramos <i>et al.</i> (2013)	ACM2	Noah	Lin (Purdue)	Grell-Devenyi	RRTM	RRTM
Surussavadee (2017a)	UW		WDM6	BMJ	RRTMG	RRTMG
Gilliam & Pleim (2010)	ACM2 (verão) e YSU (inverno)	PX (verão) e Noah (inverno)				
Wharton <i>et al.</i> (2015)	MYJ	PX, Noah e NOAH-MP	Lin	Kain-Fritsch	CAM	CAM

**QUADRO 2 - OPÇÕES FÍSICAS INDICADAS EM ESTUDOS RELACIONADOS À ENERGIA EÓLICA**  
Fonte: A autora.

Ante o exposto pelo Quadro 2, nota-se que as opções de PBL empregadas nos estudos foram em ordem decrescente de frequência de utilização: YSU (8), MYJ (4), ACM2 (4), UW (2) e MYNN-2,5 (1).

Poucos estudos examinaram especificamente o papel da troca de energia de superfície e a escolha do LSM no cisalhamento do vento no disco do rotor. Esta é uma área potencial para melhoria da previsão do vento, pois vários estudos têm mostrado que as características de cisalhamento do vento são em parte dependentes da estabilidade atmosférica e que o cisalhamento tem impactos significativos na geração de energia da turbina. O modelo de Noah é o mais complexo dos LSMs avaliados. Noah é o produto de uma grande comunidade de pesquisadores combinando iterações anteriores de vários modelos de superfície terrestre (WHARTON *et al.*, 2015). Praticamente todos os estudos na área da energia eólica utilizaram Noah como LSM. Noah aparece em 14 pesquisas do Quadro 2.

## 4 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos foram organizados em conformidade com os objetivos específicos identificados na Figura 4.

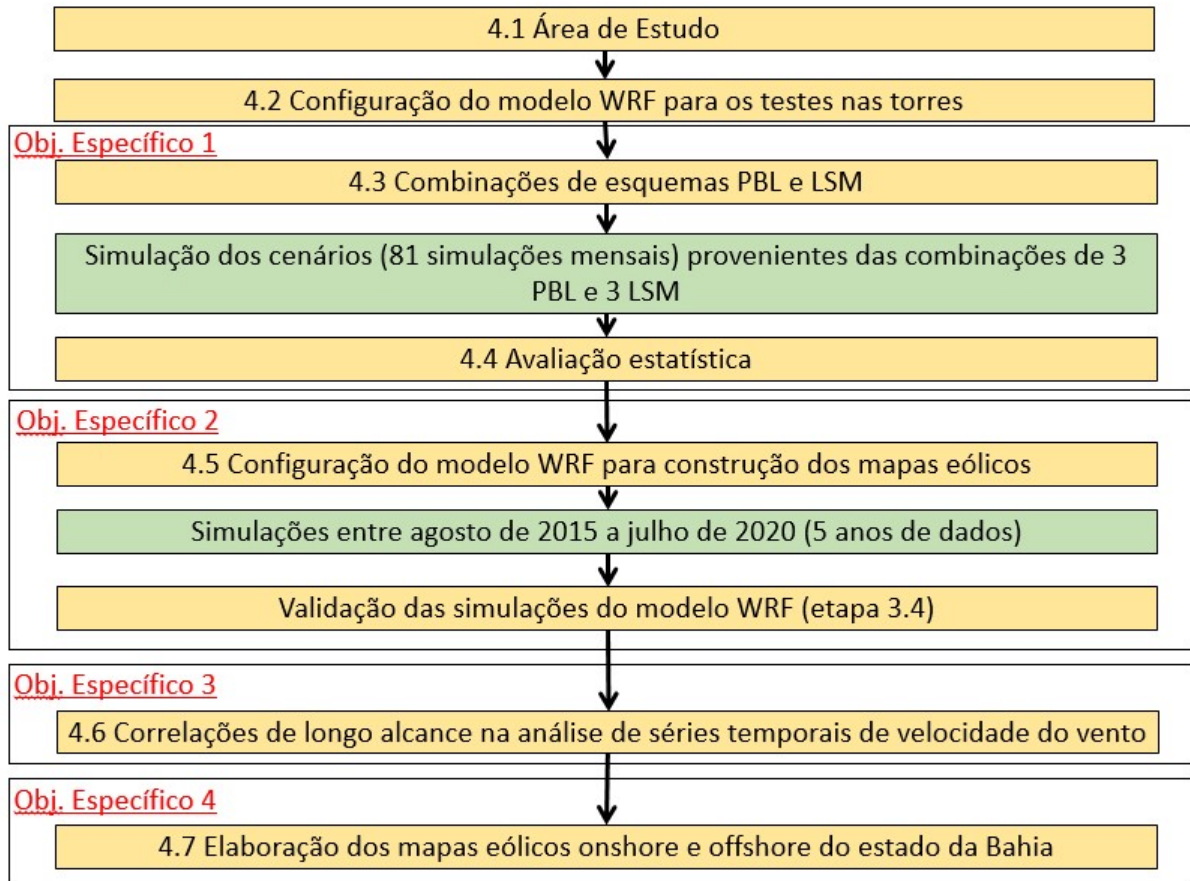


Figura 4 – Procedimentos metodológicos

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo concentra-se no estado da Bahia, localizado na região Nordeste do Brasil, entre os paralelos  $08^{\circ}31'58''S$  e  $18^{\circ}20'55''S$  e os meridianos  $46^{\circ}37'02''W$  e  $37^{\circ}20'28''W$ . O estado da Bahia foi o segundo maior produtor de energia eólica no Brasil no ano de 2017 (7,79 TWh), atrás somente do estado do Rio Grande do Norte (13,24 TWh). Também respondeu pelo segundo maior fator de capacidade média em 2017 (48,5%), atrás do estado do Maranhão (68%) (ABEEÓLICA, 2017). O interior do estado vive os ventos mais intensos concentrados no período de estiagem, ao



contrário das condições do litoral. Observa-se que a direção do vento exibe pouca variação, com a direção leste-oeste sendo predominante. Ventos na direção oposta raramente são registrados e exibem velocidades muito baixas quando o são. O clima predominante é o tropical, com altas temperaturas médias e máximas anuais acima de 30 °C. No sertão, o clima é semi-árido, com precipitações anuais abaixo de 800 mm. O período de chuvas é irregular, com prolongadas estiagens no interior. Na faixa litorânea, a umidade é maior e a precipitação anual acumulada ultrapassa 1600 mm em algumas regiões. Seu relevo é caracterizado por planícies, planaltos e depressões em formas tabulares e planas. Cerca de 90% do território situa-se acima dos 200 m de altitude, com as maiores elevações na região central do estado, ao longo da Serra do Espinhaço e da Chapada Diamantina. Na faixa litorânea, a mais extensa entre os estados brasileiros (1.183 m), predomina o relevo de planícies com altitudes não superiores a 300 m. A área central do Estado é composta por depressões e chapadas. Nestas, as altitudes estão acima dos 1.000 m, como na chapada Diamantina, e podem ultrapassar 1.500 m, como na Serra das Almas e na Serra do Barbado, onde está o ponto culminante do estado (aproximadamente 2.033 m). A planície do rio São Francisco cruza o centro do Estado no sentido sul-norte. A região nordeste do estado caracteriza-se por tabuleiros e depressões do médio-baixo rio São Francisco, com altitudes variando entre 300 e 500 m. No Chapadão Ocidental da Bahia, a oeste da planície do São Francisco, a altitude varia entre 800 e 1.000 m.

O clima no Arquipélago dos Abrolhos é o tropical semiúmido. A temperatura média anual é de 25°C. Abrolhos é um arquipélago costeiro localizado no Oceano Atlântico, a cerca de 65 quilômetros do litoral sul do estado da Bahia. As cinco ilhas do arquipélago são: Ilha de Santa Bárbara (sob controle da Marinha do Brasil, onde está o farol e também a única habitada, com ponto mais alto a 35 m acima do nível do mar), Ilha Siriba, Ilha Redonda, Ilha Sueste e Ilha Guarita. Três delas são áreas intangíveis (Redonda, Guarita e Sueste), ou seja, o desembarque nestas ilhas é proibido. Somente as Ilhas Siriba e Santa Bárbara são abertas à visita e de forma totalmente programada, monitorada e supervisionada pelo ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) e pela Marinha do Brasil, respectivamente.

A geração de energia eólica pode variar em períodos com mais e menos chuvas. Em geral, durante os períodos de maior seca (quando não há muito vento), a produção de

energia eólica sofre uma pequena queda. Durante os períodos de chuva (quando há mais ventos) há uma maior produção de energia. Ramos *et al.* (2013) mostraram a influência da sazonalidade seca e chuvosa no comportamento energético da região Nordeste do Brasil. Assim, as análises correspondentes aos períodos de seca e chuva em cada região são interessantes, pois os locais são muito diferentes entre si em termos de posição geográfica e sazonalidade.

As torres com anemômetros estão localizadas em três locais diferentes: as cidades de Esplanada, Mucuri e Mucugê. A Tabela 1 mostra as informações geográficas resumidas dos locais de medição.

**TABELA 1 - INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS RESUMIDAS DAS TORRES**

Locais de medição	LAT	LON
Torre Esplanada	11° 50'55,22953"S	37°55'44,31164"W
Torre Mucuri	18°1'31,52"S	39°30'51,69"W
Torre Mucugê	13°21'01,92891"S	41°31'53,76975"W

O município de Esplanada está localizado na microrregião do litoral norte da Bahia a uma altitude de 158 m. Sua torre anemométrica está localizada a 40 km do mar. A análise das normais climatológicas (Figura 5) disponíveis para a estação de Alagoinhas (mais próxima à Esplanada) revela que os meses de dezembro, janeiro, fevereiro, setembro e outubro são menos chuvosos, enquanto maio e junho são os meses mais chuvosos da região.

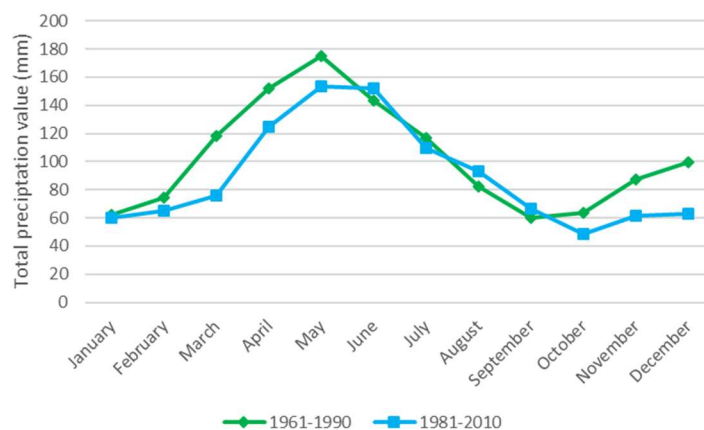


Figura 5 – Comparativo de Precipitação Acumulada (mm) na estação de Alagoinhas

O município de Mucugê está situado a uma altitude de 983 m e é um dos municípios pertencentes à Chapada Diamantina, região central do estado da Bahia, caracterizada por seu relevo montanhoso. A torre anemométrica Mucugê está localizada a aproximadamente 280 km do litoral da Bahia. A análise das normais climatológicas (Figura 6) disponíveis para a estação Ituaçu (mais próxima à Mucugê) revela que os meses de maio, junho, julho, agosto e setembro são relativamente secos, enquanto novembro, dezembro, janeiro e fevereiro são os meses mais chuvosos na região.

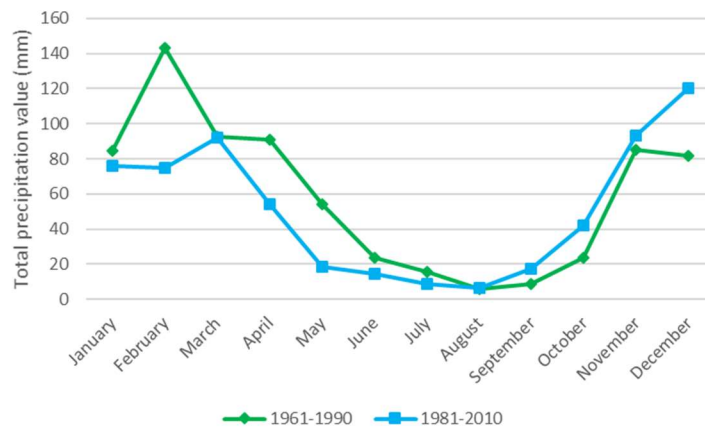


Figura 6 – Comparativo de Precipitação Acumulada (mm) na estação de Ituaçu

Por fim, a cidade de Mucuri está localizada a uma altitude de 7 m acima do nível do mar. A torre anemométrica Mucuri está localizada em uma planície costeira, a uma distância de 340 m do mar. A análise das normais climatológicas (Figura 7) disponíveis para a estação de Caravelas (mais próxima à Mucuri) revela que novembro, dezembro, março, abril e maio são os meses mais chuvosos da região, enquanto janeiro, fevereiro e agosto representam os períodos com mais secos, considerando a normal climatológica mais atual (1981-2010).

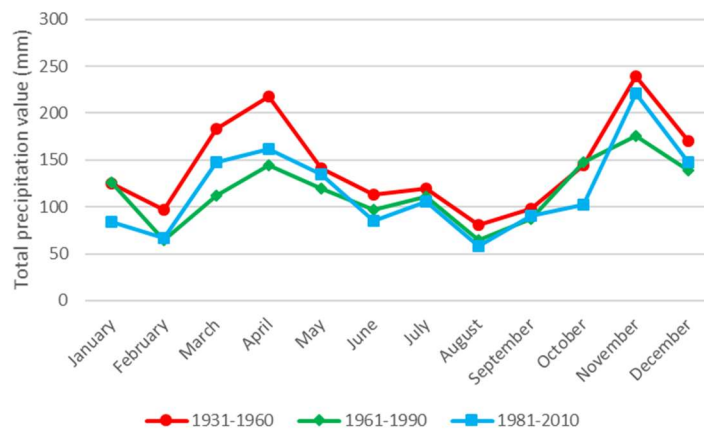


Figura 7 – Comparativo de Precipitação Acumulada (mm) na estação de Caravelas

## 4.2 CONFIGURAÇÃO DO MODELO WRF PARA OS TESTES NAS TORRES

Este estudo foi realizado utilizando o modelo meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF), versão 3.9.1.1 (SKAMAROCK *et al.*, 2008). O modelo WRF foi configurado usando dois domínios aninhados com resolução de grade de 9 e 3 km, respectivamente. Dentro do segundo domínio, que abrange todo o estado da Bahia, foram projetados três domínios com resolução de grade de 1 km, centrados nas três torres anemométricas: Mucugê (Domínio 3), Esplanada (Domínio 4) e Mucuri (Domínio 5). A Figura 8 mostra os locais e a distribuição dos domínios no modelo WRF. Os domínios foram projetados com dimensões horizontais de 223 x 223 e 420 x 420 células de grade correspondentes aos domínios 1 e 2, respectivamente, e 60 x 60 células de grade correspondendo aos domínios 3 a 5. Para a inicialização do WRF, dados do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Final Analysis (FNL), com resolução espacial de 0,25° foram preparados operacionalmente a cada seis horas (NCAR, 2015). Os dados de uso e ocupação do solo foram fornecidos pelo United States Geological Survey (USGS) com uma resolução de 2' correspondendo ao maior domínio e 30'' correspondendo aos demais, que foi disponibilizado para a instalação padrão do modelo WRF (SKAMAROCK *et al.*, 2008). Os ventos simulados foram interpolados para alturas de 80, 100, 120 e 150 m dependendo do perfil vertical do WRF, com base na pressão hidrostática (níveis ETA) (SALVADOR *et al.*, 2016b).

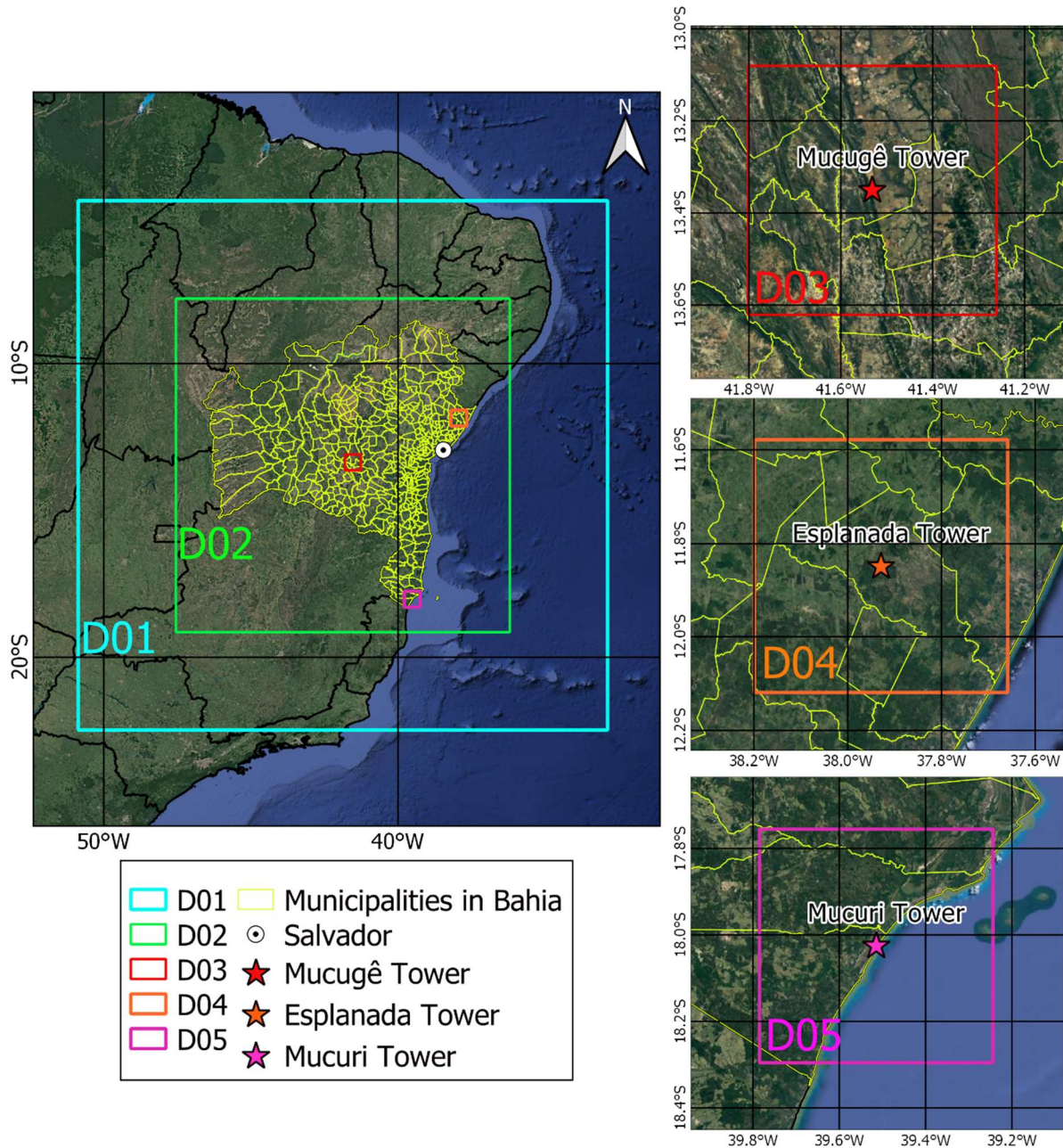


Figura 8 – Localização e distribuição de torres anemométricas e domínios no modelo WRF para os testes nas torres

As simulações foram realizadas durante os meses de dezembro de 2015 e janeiro, fevereiro, maio, junho, julho, setembro e outubro de 2016 (que são os meses que têm uma porcentagem representativa de dados horários observados). Para obter condições iniciais realistas, foi utilizado um spin-up 24 horas, isto é, a simulação para cada mês foi inicializada a partir das 00:00 UTC no último dia do mês anterior. As saídas do WRF foram armazenadas com frequência horária e os principais parâmetros de saída do modelo utilizados foram a velocidade e a direção do vento.

Vale evidenciar que no processo de validação do modelo, o resultado da simulação para o dia 11 de maio de 2016 não foi incluso na análise. A justificativa é atribuída às alterações na resolução dos níveis verticais da estratosfera dos dados sinóticos para este dia – de 27 para 32 níveis.

A aquisição de dados de velocidade do vento foi realizada em três torres de monitoramento nas cidades baianas de Esplanada, Mucuri e Mucugê, como mostrado na Tabela 1. Os respectivos locais geográficos são mostrados na Figura 8. As velocidades do vento são adquiridas por quatro anemômetros localizados em diferentes alturas nas torres meteorológicas. Os anemômetros registram uma medição em cada nível a cada 10 min e registram uma média a cada 60 min. Os dados simulados também foram filtrados de maneira semelhante. Os dados foram adquiridos usando o Elipse E3 Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), que é uma plataforma de SCADA em tempo real para aplicações críticas de missão, sendo uma plataforma SCADA bem estabelecida, oferecendo escalabilidade e constante evolução para vários tipos de aplicações, de interfaces HMI simples a complexos centros operacionais em tempo real. Foi desenvolvida para atender aos requisitos de conectividade atuais e futuros. Todos os dados foram amostrados em uma frequência muito alta (menos de 1 s) e, em seguida, foram calculados os valores médios de hora para os dados monitorados. Dados suspeitos ou ruins (como valores negativos ou uma sequência de 20 ou mais dados de valor igual) foram tratados como dados inválidos, que foram descartados para produzir amostras válidas. Os anemômetros são todos Thies First Class.

Para atendimento do objetivo específico I, serão necessárias as seguintes etapas:

#### 4.3 COMBINAÇÕES DE ESQUEMAS PBL E LSM

As simulações testaram as performances de todos os nove cenários formados pelas várias combinações de três esquemas PBL (MYJ, YSU e ACM2) e três esquemas LSM (Noah Land Surface Model (NLSM), RUC, e Noah-MP (*multi-physics*)), conforme apresentado na Tabela 2. Esses esquemas de parametrização PBL e LSM foram



selecionados, pois são os mais comuns, como nas aplicações de Pei *et al.* (2014), Wharton *et al.* (2015), Lee *et al.* (2016), Salamanca *et al.* (2018) e Liu *et al.* (2019).

Os outros esquemas de parametrização foram mantidos constantes durante as simulações. O esquema de microfísica WRF *Single-Moment 5-class* (WSM5) (HONG *et al.*, 2004) foi escolhido seguindo Kitagawa *et al.* (2017) que estudou a Região Metropolitana de Salvador (RMS), no estado da Bahia, e obteve bons resultados para as variáveis de velocidade e direção do vento. O Modelo de Transferência Rápida Radiativa (RRTM) para radiação de ondas longas e o esquema Dudhia para radiação de ondas curtas foram selecionados devido à sua eficiência e bom desempenho comprovado para estudos de recursos eólicos em várias regiões do mundo (AMJAD *et al.*, 2015; MATTAR; BORVORÁN, 2016; GIANNAROS *et al.*, 2017; ARGÜESO; BUSINGER, 2018). Os processos convectivos foram representados usando o esquema cumulus de Kain-Fritsch no domínio externo, enquanto foi desativado correspondendo aos demais domínios com base no pressuposto de que a maioria da circulação convectiva é explicitamente resolvida. As opções físicas utilizadas são resumidas na Tabela 2, representando os diferentes cenários.

**TABELA 2. DETALHES DOS CENÁRIOS DE TESTES ESPECIFICANDO AS OPÇÕES FÍSICAS**

<b>Cenários</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
PBL	MYJ	MYJ	MYJ	YSU	YSU	YSU	ACM2	ACM2	ACM2
Land surface model	NLSM	RUC	NOAH-MP	NLSM	RUC	NOAH-MP	NLSM	RUC	NOAH-MP
Surface layer	Eta	Eta	Eta	MM5	MM5	MM5	MM5	MM5	MM5
Cumulus	Kain-Fritsch								
Microphysics	WSM5								
Shortwave radiation	Dudhia								
Longwave radiation	RRTM								

#### 4.4 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA

Para comparar as simulações do modelo, observações meteorológicas de velocidade e direção do vento foram utilizadas. A variável velocidade do vento está disponível a 150m, 120m, 100m e 80m da Torre Mucugê (13°21'01,92891"S, 41°31'53,76975"O),

Torre Esplanada (11°50'55.22953"S, 37°55'44,31164"O) e Torre Mucuri (18°01'31.52002"S, 39°30'51.69304"O). A variável direção do vento possui dados observados de 150m, 120m e 100m para a Torre Esplanada e Mucuri, e 120m e 100m para a Torre Mucugê. A localização das torres é mostrada na Figura 8.

O desempenho do modelo foi avaliado utilizando as métricas estatísticas do erro médio (do inglês, *Mean Bias* – MB), Raiz do Erro Quadrático Médio (do inglês, *Root Mean Squared Error* - RMSE), Erro Médio Absoluto (do inglês, *Mean Absolute Gross Error* - MAGE), índice de concordância ( $d_r$ ) e Coeficiente de correlação de Pearson (R) (CARVALHO *et al.*, 2012; CHENG *et al.*, 2013; CARVALHO *et al.*, 2014a; ZEMPILA *et al.*, 2016; GUNWANI e MOHAN, 2017; SURUSSAVADEE, 2017b). Além disso, o fator de 2 (Fac2) (ZUCATELLI *et al.*, 2019) e o desvio padrão (PENCHAH *et al.*, 2017) também foram utilizados. O erro médio, também chamado de viés médio, é dado pela Equação 15:

$$MB = \bar{M} - \bar{O} \quad (15)$$

onde  $\bar{M}$  denota a media modelada e  $\bar{O}$  denota a média observada.

Valores positivos de MB indicam uma superestimação dos dados simulados, enquanto os valores negativos implicam subestimação. Valores positivos/negativos de MB correspondentes à direção do vento modelado exibe um deslocamento no sentido horário/anti-horário em comparação com as observações. A diferença,  $\Delta d$ , entre cada par de direções de vento simuladas e observadas é definida como segue (JIMÉNEZ e DUDHIA, 2013):

$$\text{Se, } d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} \leq |180|:$$

$$\Delta d = d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}}$$

$$\text{Se, } d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} > 180:$$

$$\Delta d = d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} - 360$$

$$\text{Se, } d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} < -180$$

$$\Delta d = d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} + 360$$



O RMSE expressa o erro total do modelo e exibe um valor de zero em casos ideais:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad (16)$$

Em ambos os casos acima mencionados, os valores mais baixos indicam um melhor acordo entre os dados observados e modelados. O MAGE calcula o erro médio absoluto entre valores simulados e observados, expressando a magnitude média dos erros nas simulações.

$$\text{MAGE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \quad (17)$$

Como no caso do RMSE, os valores mais baixos do MAGE indicam maior similaridade entre as séries de dados observadas e modeladas. O  $d_r$  avalia o quão próximo o valor simulado está do observado. A métrica varia de -1 a 1, com o valor “1” que significa acordo perfeito. O termo C é uma constante relativa para a frequência de saída do modelo, que foi atribuído um valor de 2 (WILLMOTT *et al.*, 2012). A variável  $P_i$  corresponde ao valor simulado (“previsto”) para instantâneo ( $i$ ), com  $O_i$  indicando o valor observado ao mesmo tempo que  $i$  e  $\bar{O}$  representa a média dos valores observados.

$$d_r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}, \text{ quando } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \leq c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \quad (18)$$

$$d_r = \frac{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|} - 1, \text{ quando } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| > c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \quad (19)$$

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida de associação linear entre dados modelados e observados. Seu valor é zero em caso de não correlação e a correlação aumenta como o valor do coeficiente se aproxima -1 ou +1. Os valores próximos a +1 implicam correlação positiva entre as duas variáveis, enquanto aqueles próximos a -1 implicam correlação negativa. É definido da seguinte forma:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (20)$$

O Fator de 2 (Fat2) calcula a razão entre os dados simulados ( $M_i$ ) e observados ( $O_i$ ), indicando o percentual de dados que deve estar no range de  $0.5 \leq \frac{M_i}{O_i} \leq 2$ . Obviamente, o valor ótimo é 1.

Para atendimento do objetivo específico II, foram realizadas as seguintes etapas:

#### 4.5 CONFIGURAÇÃO DO MODELO WRF PARA CONSTRUÇÃO DOS MAPAS EÓLICOS

As simulações foram realizadas utilizando a versão 4.0 do modelo WRF. O modelo WRF foi definido com dois domínios aninhados com resolução de grade de 9 e 3 km, respectivamente. A Figura 9 mostra a localização e a distribuição dos domínios no modelo WRF, exibindo as localizações no mapa das 41 estações automáticas (chamadas de E1, E2, ..., E41) que cobrem todo o estado e a estação de superfície no Arquipélago de Abrolhos (E42). Os domínios foram esquematizados com dimensões horizontais de 300x300 e 660x660 células de grade para os domínios 1 e 2, respectivamente.

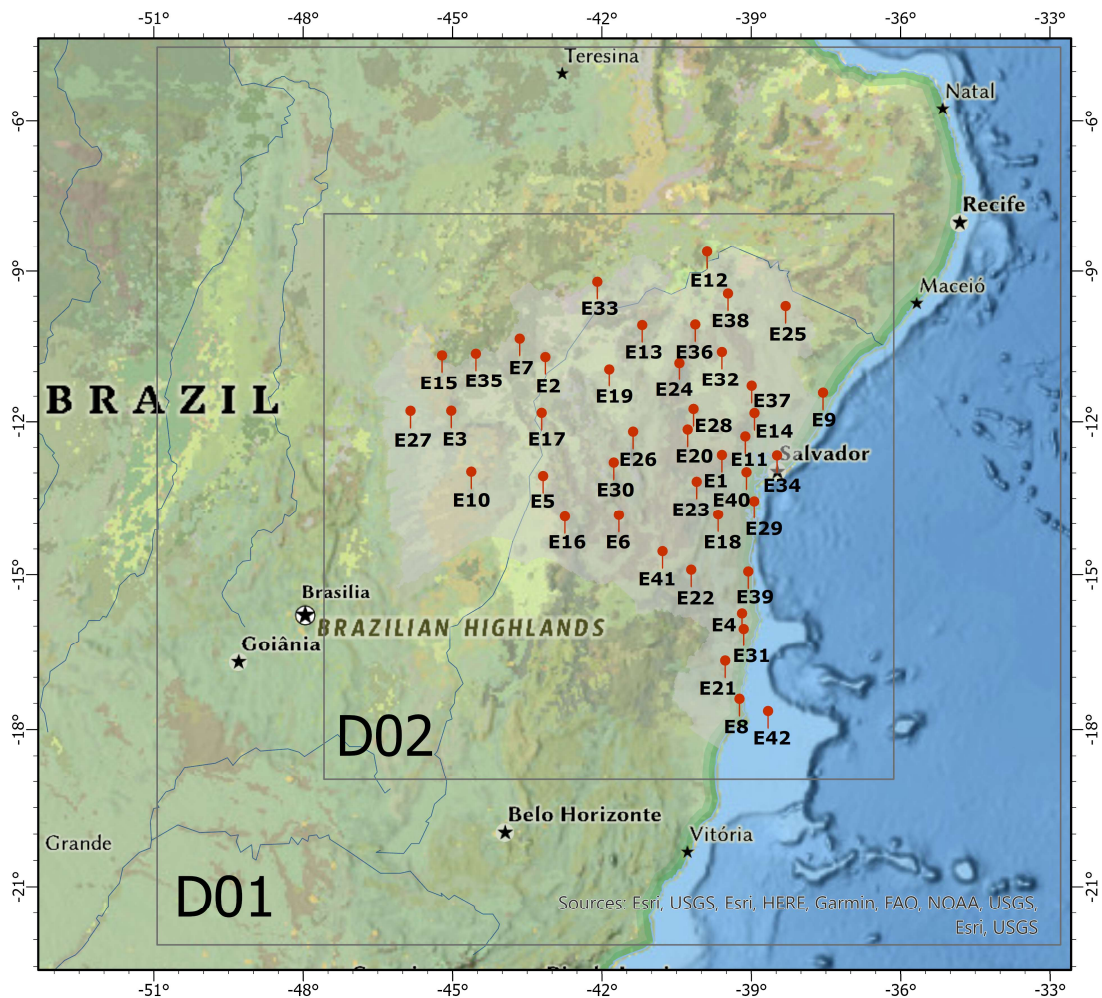


Figura 9 – Localização e distribuição das estações automáticas e os domínios no modelo WRF para construção dos mapas eólicos.

As simulações foram realizadas para um período de 5 anos, entre os meses de agosto de 2015 a julho de 2020. A escolha das parametrizações a serem usadas no modelo WRF são fundamentais para uma boa performance. Entretanto, é importante notar que a melhor parametrização escolhida para uma região e período do ano pode não ter a mesma performance para outra região. Assim, no trabalho de Souza *et al.* (2021) foi previamente realizada uma análise de diferentes parametrizações considerando-se três diferentes regiões no estado da Bahia, com dados de torres com anemômetros em diferentes alturas (80, 100, 120 e 150 m). Este artigo foi fruto dos resultados da primeira parte do presente trabalho de tese. Conforme mostra a Figura 9, a torre T1 está localizada na região sul, a torre T2 está na região nordeste e a torre T3 na região mais central do estado. As parametrizações usadas neste trabalho estão descritas na Tabela 3. As demais configurações seguem o descrito na seção 3.2.

TABELA 3 - OPÇÕES FÍSICAS USADAS NAS SIMULAÇÕES DOS 5 ANOS

Parameterizations	Physical options
PBL	YSU
Land surface model	RUC
Surface layer	MM5
Cumulus	Kain-Fritsch
Microphysics	WSM5
Shortwave radiation	Dudhia
Longwave radiation	RRTM

Os resultados das simulações do período de 5 anos (entre agosto de 2015 a julho de 2020) foram comparados com dados de superfície (10 m de altura) das estações automáticas, bem como do Arquipélago de Abrolhos, no mar.

Para atendimento do objetivo específico III, foi realizada a seguinte etapa:

#### 4.6 A TÉCNICA DFA

A técnica DFA busca estimar a média das flutuações na série em escalas de tempo variável de tamanho determinado e a verificação da sua dependência de escala como uma lei de potência para diferentes valores onde o expoente de Hurst é esta potência associada (SANTOS, 2020).

Proposta por Peng *et al.* (1994) para analisar flutuações sem tendências de sequencias de DNA (ou sequências genéticas), foi utilizada em várias outras áreas do conhecimento para analisar a existência de leis de potência no comportamento de séries temporais de várias outras magnitudes, tais como séries temporais financeiras (LIU *et al.*, 1997), climatologia (IVANOVA; AUSLOOS, 1999), flutuações em canais iônicos (SIWY; AUSLOSS; IVANOVA, 2002), comportamento da temperatura (LUCENA *et al.*, 2017), dinâmica dos batimentos cardíacos dos humanos (ATKINSON, 1981), entre outros (PENG *et al.*, 1994; LIU *et al.*, 1997; BUNDE *et al.*, 2000; CHEN *et al.*, 2007; ORUN; KOÇAK, 2009; JIANG *et al.*, 2009).

Vale ressaltar que a velocidade do vento e outras variáveis meteorológicas não foram analisadas nos casos *onshore* e *offshore* de forma mais abrangente (SANTOS *et al.*,

2019, 2021) na literatura, dada a importância das informações físicas da interação oceano-atmosfera (BRUNT, 1932; STULL, 2012; SALVADOR *et al.*, 2016b).

Trata-se de uma derivação do método denominado FA (Fluctuation Analysis), visto que o DFA elimina a tendência da série temporal em diferentes escalas, analisando especificamente flutuações intrínsecas dos dados. O algoritmo para calcular o DFA integra a série de tempo a ser analisada (com  $N$  amostras). Considera-se uma série temporal ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) da velocidade do vento horária (SANTOS, 2020).

Desta forma, o DFA tem sido uma proposta de modelagem com razoável sucesso e eficácia na sua aplicação, pois permite o registro de resultados preliminares das séries temporais de intensidade, direção e incremento da velocidade do vento. A análise é feita com vistas a identificar se em uma determinada série, ou a sua seqüência de dados, existe ou não correlação entre eles, ou seja, tenta-se detectar um efeito de memória de longa duração ao longo da variável independente da série (SANTOS *et al.*, 2012), neste caso a velocidade do vento que é obtida em função do tempo.

O uso do DFA pressupõe a análise de séries temporais que são definidas como sendo o conjunto de dados que são coletados, geralmente, em intervalos regulares de tempo e que se diferenciam dos dados coletados aleatoriamente devido ao fato de representarem a evolução temporal da seqüência da dinâmica de uma determinada variável específica (KOÇAK, 2009).

Espera-se que a função de flutuação apresente um comportamento do tipo lei de potência de forma que a variação temporal para uma dada série passa a indicar a existência de flutuações não estacionárias, representando um processo multifractal (MANDELBROT, 1983; FEDER, 1988; ADDISON, 1997).

Descrevendo a técnica em suas etapas, tem-se: a primeira etapa do algoritmo DFA promove a integração da série temporal a ser analisada, que é do tipo  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), onde  $N$  é o número de amostras da série; em uma segunda etapa, deve-se construir o perfil de soma desses novos valores normalizados, dividindo essa nova soma por segmentos de comprimento  $s$  não sobrepostos, considerando o fato de que

se não for inteiro, fica um segmento de comprimento menor que  $s$  no final da série (ATKINSON, 1981; PENG *et al.*, 1994; LIU *et al.*, 1997), de modo que:

$$X(i) = \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}) \quad (21)$$

onde  $\bar{x}$  representa a média aritmética de todos os dados. Acontece que se  $N_s$  não for inteiro, um segmento de menor comprimento que permanece no final da série (PHILANDER, 1976; GAN; RAO, 1991). Na próxima etapa, a terceira etapa, a tendência local é determinada utilizando o método de ajuste linear com a técnica dos mínimos quadrados para cada segmento  $v$  e a seguir é calculada a diferença entre a tendência local e o segmento em questão, obtendo-se uma série temporal corrigida, como  $X_s(i) = X(i) - p_v(i)$ , onde  $p_v(i)$  é o ajuste polinomial para cada segmento, de modo que a variância da série corrigida seja calculada para cada segmento, e a raiz quadrada da variância média de todos os segmentos dá a função de flutuação (LIU *et al.*, 1997; SANTOS *et al.*, 2019, 2021), que é dado por:

$$F(s) = \left[ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} F_s^2(v) \right]^{1/2} \quad (22)$$

Se  $n$  é o grau de ajuste polinomial,  $F^{(n)}(s)$  representa a função de flutuação de diferentes ordens de correção. Se a série original tem correlação de longo alcance,  $F^{(n)}(s)$  aumenta com  $s$  de acordo com a lei de potência:

$$F^{(n)}(s) \propto s^\alpha \quad (23)$$

A interpretação dos valores determinados para  $\alpha$ , que é adimensional, representa a existência ou não de auto-semelhança, que quantifica a natureza das correlações das séries temporais, onde: a) valores entre  $0 < \alpha < 0.5$ , indicam comportamento anti-persistente e, desta forma, obtém-se as séries temporais anti-correlacionadas; b) valores de  $\alpha \approx 0.5$ , tem-se o comportamento sem memória e apresenta um passeio aleatório (ruído gaussiano branco, onde não há memória no processo); c) valores

entre  $0.5 < \alpha < 1$ , indicam que a série tem correlação de longo alcance (indicando uma série persistente); d) para  $\alpha \geq 1$ , tem-se os valores altos ou baixos) que são normalmente seguidos por valores altos ou baixos, respectivamente, e é quando tem-se uma dinâmica não estacionária (comportamento subdifusivo) (LIU *et al.*, 1997; SANTOS *et al.*, 2019, 2021).

Em seu trabalho, Santos (2020) ilustrou o que chamou de algoritmo da técnica DFA (Figura 10) e descreveu a natureza das correlações da série temporal e suas implicações e desdobramentos (Quadro 3).

Valores de $\alpha$	Caracterização da Série	Descrição Comportamental	Implicações e Desdobramentos
$0 < \alpha < 0,5$	Comportamento antipersistente.	Valores grandes (pequenos) tendem a serem seguidos por valores pequenos (grandes) e desta forma têm-se as séries temporais anti-correlacionadas.	Valores altos são normalmente seguidos por valores baixos e vice-versa.
$\alpha \cong 0,5$	Comporta-se sem memória e apresenta um passeio aleatório, caracterizando-se como uma série não correlacionada.	Apresenta valor zero para a função de autocorrelação, o que por vezes é denominado de ruído gaussiano branco.	Sinal sem nenhuma correlação. Isso significa que não se pode relacionar o comportamento passado com o comportamento da série no futuro, porque não há memória no processo.
$0,5 < \alpha < 1$	Implica que a série original apresenta correlação de longo alcance.	Valores grandes (pequenos) tendem a serem seguidos por valores grandes (pequenos), ou seja, tem-se a existência de séries temporais correlacionadas de longo alcance, indicando-se uma série persistente.	Valores altos (baixos) são normalmente seguidos por valores altos (baixos).
$\alpha \geq 1$	A dinâmica do sistema é caracterizada por ser não estacionário e a mesma deixa de ser na forma de lei de potência do tipo de inverso da frequência em potência.	Regime transitório ou condições transitórias.	<p>Para <math>\alpha &lt; 3/2</math>, trata-se de um comportamento subdifusivo</p> <p>Para <math>\alpha = 3/2</math> tem-se um comportamento difusivo</p> <p>Para <math>\alpha &gt; 3/2</math> tem-se um sinal superdifusivo.</p> <p>Para outros valores de <math>\alpha \geq 1</math> tem-se outros comportamentos de superdifusividade.</p>

**QUADRO 3 - EXPOENTES DE ESCALA (DFA) E SUAS IMPLICAÇÕES FENOMENOLÓGICAS**

Fonte: Adaptado de Peng *et al.* (1994) *apud* Santos (2020).

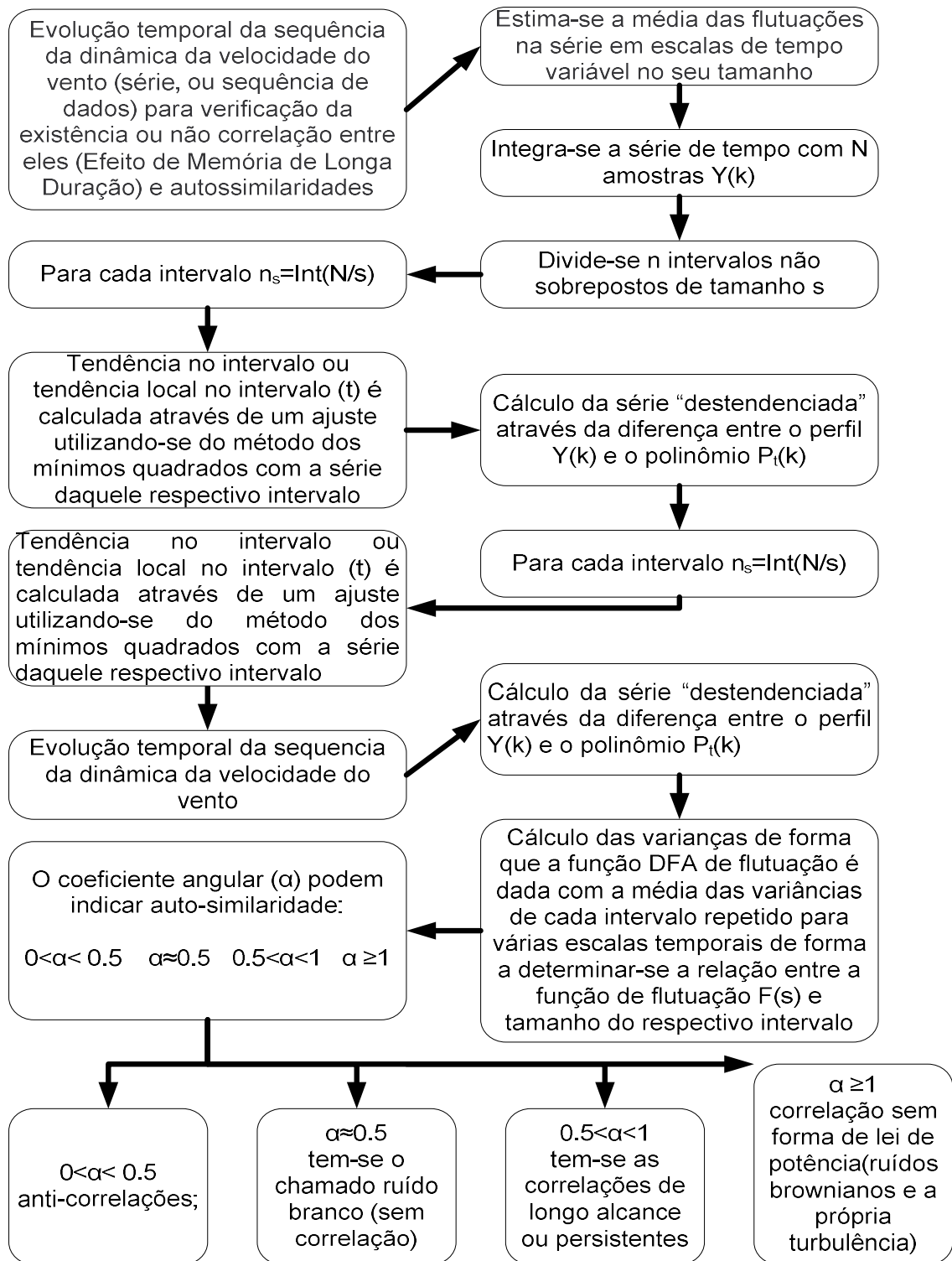


Figura 10 – Algoritmo da técnica DFA  
 Fonte: Santos (2020).



Para atendimento do objetivo específico IV, foi realizada a seguinte etapa:

#### 4.7 ELABORAÇÃO DOS MAPAS EÓLICOS *ONSHORE* E *OFFSHORE* DO ESTADO DA BAHIA

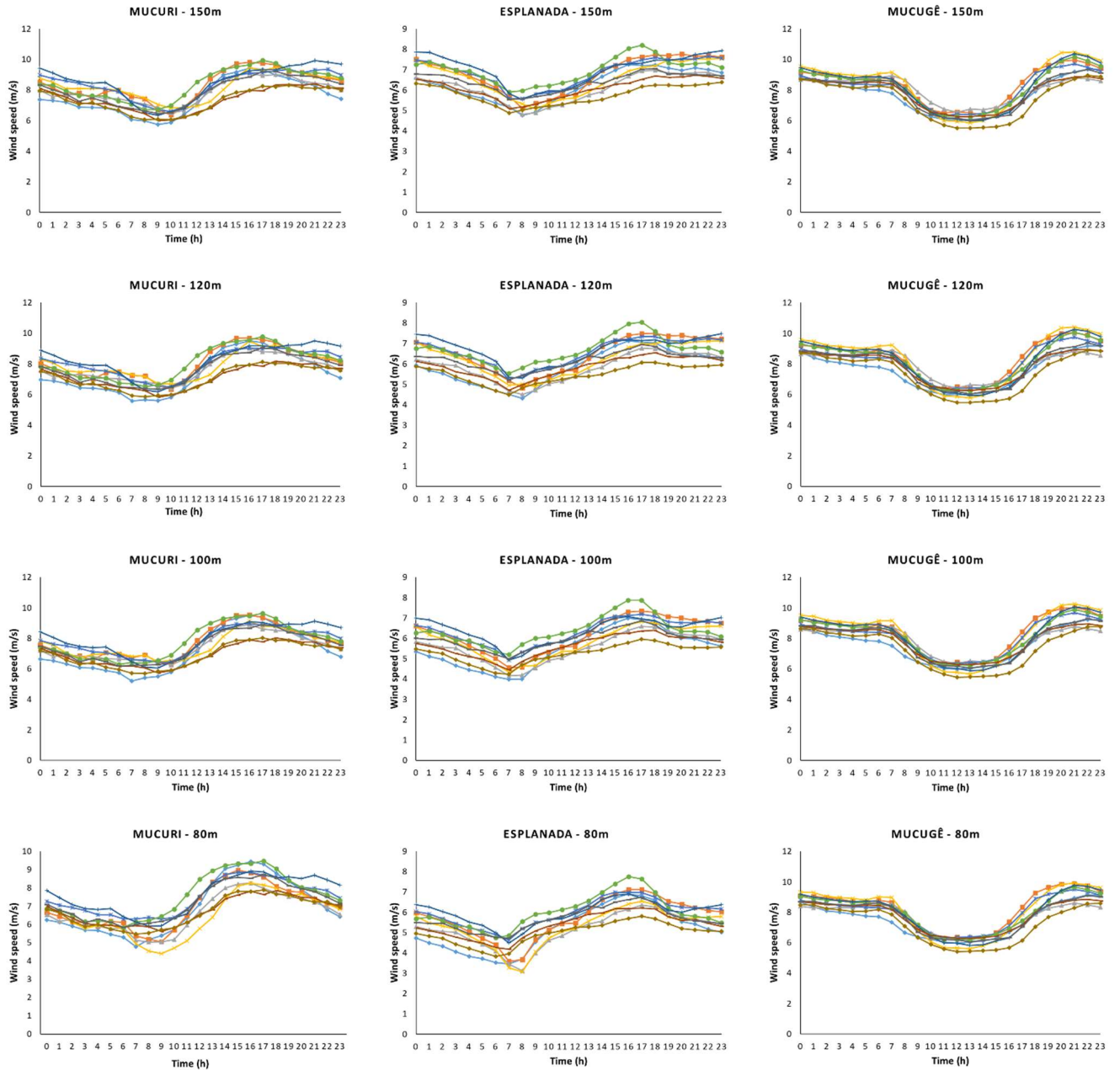
Por fim, após todos os passos percorridos será o produto final deste trabalho a elaboração dos mapas eólicos *onshore* e *offshore* do estado da Bahia, que irá identificar as áreas do estado e da sua costa que possuem elevado potencial eólico. Mapas eólicos foram produzidos correspondendo a sazonalidade (verão, outono, inverno e primavera), aos períodos diurno e noturno, seco e úmido, por ano, por mês e por fim o campo de velocidades horizontal em 80, 100, 120 e 150 m de altura das regiões *onshore* e *offshore* do estado baiano, considerando-se as simulações entre agosto de 2015 a julho de 2020 (5 anos de dados). Nesse pós-processamento foi utilizado Python para a construção dos respectivos mapas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados numéricos obtidos dos testes de parametrizações do modelo WRF ao redor das torres, os resultados das validações das simulações que abrangem todo o estado da Bahia, bem como as correlações de longo alcance da velocidade do vento, e por fim, os resultados dos mapas eólicos elaborado para o estado da Bahia e sua costa.

### 5.1 RESULTADOS NUMÉRICOS DOS TESTES DE PARAMETRIZAÇÕES DO MODELO WRF

A Figura 11 mostra a evolução horária média das velocidades do vento observadas e simuladas em altitudes de 80, 100, 120 e 150 m, nas torres Mucuri, Esplanada e Mucugê, usando as diferentes combinações de PBL e LSM (ver a Tabela 2). Para a construção das médias horárias, foram utilizados todos os registros de dados observados e simulados dos meses estudados.



- Período de simulação de Mucuri: dezembro de 2015, janeiro e maio de 2016
- Período de simulação de Esplanada: dezembro de 2015, janeiro, fevereiro, maio, junho, agosto, setembro e outubro de 2016
- Período de simulação de Mucugê: janeiro, fevereiro, maio, junho, julho, agosto e setembro de 2016

— Obs    — S1    — S2    — S3    — S4    — S5    — S6    — S7    — S8    — S9

Figura 11 – Comportamento médio horário das velocidades do vento simuladas e observadas

É evidente a partir da Figura 11 que os resultados simulados normalmente seguem de perto a tendência da curva dos valores horários médios observados. Em particular, os dados correspondentes a Mucugê apresentam claramente uma maior congruência entre as curvas simuladas e observadas. Verifica-se também que os valores das velocidades médias dos ventos horários variam aproximadamente entre 6 e 10  $\text{ms}^{-1}$  em Mucuri e Mucugê, e entre 3 e 8  $\text{ms}^{-1}$  em Esplanada.

A análise dos gráficos da Figura 11 revela uma tendência globalmente semelhante entre os cenários simulados, indicando que o modelo é capaz de captar o comportamento geral da velocidade do vento, apesar de pequenas diferenças em termos de tempo e magnitude. Para estimar o cenário que corresponde aos melhores desempenhos, a validação foi realizada com base nas avaliações estatísticas. Nesta seção, as métricas estatísticas (MB, RMSE, MAGE, IOA, R, Fac2 e desvio padrão) são analisadas a fim de estimar as discrepâncias entre a velocidade e direção do vento simulada e observada correspondente a cada caso.

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os valores das métricas estatísticas obtidas pela comparação dos dados simulados e observados de velocidade do vento correspondentes às torres Mucuri, Esplanada e Mucugê, respectivamente. Os melhores resultados foram destacados em negrito e, para avaliar os resultados das simulações, foi utilizado o Objective hit Score (OhitS) (PENCHAH *et al.*, 2017). Como mencionado anteriormente, valores baixos são melhores para MB, RMSE e MAGE, e valores altos são melhores para IOA, R e Fac2 em termos de precisão de previsão. No método OhitS, para o desvio padrão (DP), cada uma das parametrizações que apresentar o resultado mais próximo da observação correspondente obtém 8 pontos. A segunda melhor parametrização obtém pontuação 7, e assim por diante, o pior resultado obtém pontuação 0. Para MB, RMSE e MAGE, as parametrizações ganham pontuações de 8 a 0 para mínimo e máximo, respectivamente. Para IOA, R e Fac2, ocorre o oposto.

**TABELA 4 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTAT. CORRESPONDENTES À COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO SIM. E OBS. NA TORRE MUCURI**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	0,846	0,454	0,742	0,854	0,885	1,024	<b>-0,131</b>	0,406	-0,227	
	OhitS	3	5	4	2	1	0	8	6	7	
	RMSE	3,187	3,339	3,629	3,139	<b>2,833</b>	3,170	3,029	2,895	2,951	
	OhitS	2	1	0	4	8	3	5	7	6	
	MAGE	2,261	2,430	2,614	2,256	<b>2,070</b>	2,226	2,289	2,135	2,234	
	OhitS	3	1	0	4	8	6	2	7	5	
	d <sub>r</sub>	0,512	0,475	0,436	0,513	<b>0,553</b>	0,511	0,506	0,539	0,517	
	OhitS	4	1	0	5	8	3	2	7	6	
	R	0,518	0,450	0,378	0,521	<b>0,584</b>	0,512	0,471	0,530	0,472	
	OhitS	5	1	0	6	8	4	2	7	3	
	Fat2	87,8%	85,9%	85,3%	88,7%	<b>89,1%</b>	88,1%	87,1%	88,7%	87,2%	
	OhitS	4	1	0	7	8	5	2	7	3	
	DP	3,413	3,449	3,457	3,440	3,229	3,341	3,161	3,146	<b>2,954</b>	2,849
	OhitS	3	1	0	2	5	4	6	7	8	
120 m	MB	0,781	0,425	0,653	0,747	0,786	0,915	<b>-0,169</b>	0,341	-0,266	
	OhitS	2	5	4	3	1	0	8	6	7	
	RMSE	3,146	3,282	3,559	3,005	<b>2,735</b>	3,071	2,946	2,801	2,866	
	OhitS	2	1	0	4	8	3	5	7	6	
	MAGE	2,258	2,388	2,576	2,192	<b>2,003</b>	2,220	2,238	2,081	2,189	
	OhitS	2	1	0	5	8	4	3	7	6	
	d <sub>r</sub>	0,507	0,478	0,437	0,521	<b>0,563</b>	0,515	0,511	0,545	0,522	
	OhitS	2	1	0	5	8	4	3	7	6	
	R	0,508	0,448	0,372	0,520	<b>0,593</b>	0,506	0,476	0,538	0,482	
	OhitS	5	1	0	6	8	4	2	7	3	
	Fat2	86,9	85,5	84,4	88,4	<b>88,6</b>	87,8	86,0	88,4	86,9	
	OhitS	4	1	0	7	8	5	2	7	4	
	DP	3,308	3,349	3,345	3,230	3,126	3,175	3,025	3,022	<b>2,834</b>	2,859
	OhitS	2	0	1	3	5	4	6	7	8	
100 m	MB	0,649	0,368	0,485	0,668	0,726	0,823	<b>-0,158</b>	0,330	-0,259	
	OhitS	3	5	4	2	1	0	8	6	7	
	RMSE	3,080	3,226	3,460	2,890	<b>2,663</b>	2,976	2,907	2,762	2,829	
	OhitS	2	1	0	5	8	3	4	7	6	
	MAGE	2,222	2,354	2,528	2,133	<b>1,953</b>	2,164	2,215	2,064	2,172	
	OhitS	2	1	0	6	8	5	3	7	4	
	d <sub>r</sub>	0,513	0,484	0,446	0,532	<b>0,572</b>	0,526	0,514	0,547	0,524	
	OhitS	2	1	0	6	8	5	3	7	4	
	R	0,501	0,448	0,367	0,530	<b>0,604</b>	0,511	0,477	0,540	0,485	
	OhitS	4	1	0	6	8	5	2	7	3	
	Fat2	86,0	85,2	83,7	88,5	<b>88,7</b>	87,4	85,8	88,6	86,9	
	OhitS	3	1	0	6	8	5	2	7	4	
	DP	3,203	3,256	3,201	3,089	3,070	3,058	<b>2,947</b>	2,954	2,769	2,866
	OhitS	1	0	2	3	4	5	8	7	6	
80 m	MB	<b>0,071</b>	-0,245	-0,431	0,577	0,667	0,714	-0,142	0,322	-0,251	
	OhitS	8	6	3	2	1	0	7	4	5	
	RMSE	<b>2,540</b>	2,685	2,835	2,767	2,593	2,865	2,858	2,717	2,783	
	OhitS	8	6	1	4	7	0	2	5	3	
	MAGE	1,914	2,058	2,172	2,058	<b>1,913</b>	2,091	2,187	2,043	2,146	
	OhitS	7	5	1	5	8	3	2	6	0	
	d <sub>r</sub>	0,782	0,752	0,710	0,756	<b>0,795</b>	0,738	0,721	0,758	0,721	
	OhitS	7	5	1	5	8	3	0	6	2	
	R	0,585	0,540	0,483	0,547	<b>0,616</b>	0,524	0,483	0,546	0,493	
	OhitS	7	4	1	5	8	3	1	6	2	
	Fat2	87,3	86,7	84,3	88,3	<b>88,7</b>	86,8	85,1	87,5	86,7	
	OhitS	5	3	0	7	8	4	1	6	3	
	DP	2,827	2,808	2,690	2,968	3,029	2,951	<b>2,873</b>	2,894	2,710	2,876
	OhitS	6	5	0	3	2	4	8	7	1	
Sum of scores	108	65	22	128	179	94	107	184	128		

**TABELA 5 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTAT. CORRESPONDENTES À COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO SIM. E OBS. NA TORRE ESPLANADA**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	0,613	-0,160	0,292	0,614	0,730	0,737	-0,171	<b>0,152</b>	-0,506	
	OhitS	3	7	5	2	1	0	6	8	4	
	RMSE	2,007	2,193	1,934	2,098	<b>1,898</b>	2,029	2,151	1,990	2,074	
	OhitS	5	0	7	2	8	4	1	6	3	
	MAGE	1,448	1,679	1,486	1,574	<b>1,453</b>	1,521	1,673	1,491	1,625	
	OhitS	7	0	6	3	8	4	1	5	2	
	d <sub>r</sub>	0,446	0,384	0,455	0,423	<b>0,467</b>	0,442	0,386	0,453	0,404	
	OhitS	5	0	7	3	8	4	1	6	2	
	R	0,492	0,409	0,465	0,509	<b>0,530</b>	0,511	0,398	0,423	0,400	
	OhitS	5	2	4	6	8	7	0	3	1	
	Fat2 (%)	93,9	88,9	93,2	93,1	<b>94,6</b>	94,2	89,6	92,2	90,1	
	OhitS	6	0	5	4	8	7	1	3	2	
	DP	2,133	2,242	1,976	2,245	<b>1,912</b>	2,068	2,154	1,980	1,961	1,708
	OhitS	3	1	6	0	8	4	2	5	7	
120 m	MB	0,721	-0,026	0,378	0,752	0,824	0,831	<b>-0,003</b>	0,319	-0,372	
	OhitS	3	7	4	2	1	0	8	6	5	
	RMSE	2,062	2,174	1,993	2,138	<b>1,934</b>	2,081	2,115	1,992	2,023	
	OhitS	4	0	6	1	8	3	2	7	5	
	MAGE	1,540	1,668	1,535	1,609	<b>1,486</b>	1,576	1,648	1,493	1,586	
	OhitS	5	0	6	2	8	4	1	7	3	
	d <sub>r</sub>	0,434	0,389	0,438	0,411	<b>0,456</b>	0,423	0,396	0,453	0,419	
	OhitS	5	0	6	2	8	4	1	7	3	
	R	0,476	0,400	0,438	0,489	<b>0,520</b>	0,480	0,390	0,408	0,391	
	OhitS	5	2	4	7	8	6	0	3	1	
	Fat2 (%)	92,4	87,5	91,8	91,5	<b>93,2</b>	92,2	88,3	90,7	88,9	
	OhitS	7	0	5	4	8	6	1	3	2	
	DP	2,115	2,208	1,975	2,186	<b>1,877</b>	2,009	2,097	1,917	1,906	1,700
	OhitS	2	0	5	1	8	4	3	6	7	
100 m	MB	0,750	<b>0,049</b>	0,354	0,833	0,882	0,869	0,134	0,456	-0,251	
	OhitS	3	8	5	2	0	1	7	4	6	
	RMSE	2,078	2,139	2,010	2,148	<b>1,954</b>	2,101	2,076	1,989	1,978	
	OhitS	3	1	5	0	8	2	4	6	7	
	MAGE	1,557	1,651	1,547	1,623	1,504	1,598	1,617	<b>1,492</b>	1,551	
	OhitS	4	0	6	1	7	3	2	8	5	
	d <sub>r</sub>	0,436	0,403	0,441	0,413	0,456	0,422	0,416	<b>0,461</b>	0,439	
	OhitS	4	0	6	1	7	3	2	8	5	
	R	0,473	0,404	0,422	0,486	<b>0,527</b>	0,466	0,401	0,416	0,399	
	OhitS	6	2	4	7	8	5	1	3	0	
	Fat2 (%)	90,6	86,1	90,1	89,4	<b>91,4</b>	90,5	87,4	89,6	88,0	
	OhitS	7	0	5	3	8	6	1	4	2	
	DP	2,109	2,161	1,956	2,139	1,877	1,969	2,053	1,878	<b>1,871</b>	1,713
	OhitS	2	0	5	1	7	4	3	6	8	
80 m	MB	0,606	<b>-0,022</b>	0,120	0,829	0,880	0,824	0,202	0,533	-0,184	
	OhitS	3	8	7	1	0	2	5	4	6	
	RMSE	1,990	2,055	<b>1,898</b>	2,092	1,935	2,062	2,033	1,975	1,942	
	OhitS	4	1	8	0	7	2	3	5	6	
	MAGE	1,495	1,593	<b>1,476</b>	1,589	1,489	1,572	1,583	1,488	1,524	
	OhitS	5	0	8	1	6	3	2	7	4	
	IOA	0,482	0,447	0,488	0,449	<b>0,484</b>	0,455	0,451	0,484	0,471	
	OhitS	5	0	8	1	7	3	2	7	4	
	R	0,494	0,433	0,454	0,503	<b>0,554</b>	0,473	0,431	0,446	0,423	
	OhitS	6	2	4	7	8	5	1	3	0	
	Fat2 (%)	88,8	84,9	88,3	87,7	<b>90,0</b>	88,5	86,1	88,5	87,0	
	OhitS	7	0	4	3	8	6	1	6	2	
	DP	2,067	2,081	1,868	2,067	<b>1,891</b>	1,913	2,017	1,859	1,845	1,770
	OhitS	1	0	6	2	5	4	3	7	8	
Sum of scores	125	41	157	69	184	106	65	153	110		

**TABELA 6 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTAT. CORRESPONDENTES À COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO SIM. E OBS. NA TORRE MUCUGÊ**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	0,700	0,364	0,698	0,420	0,519	0,528	<b>0,138</b>	0,159	-0,289	
	OhitS	0	5	1	4	3	2	8	7	6	
	RMSE	2,932	3,237	2,857	2,682	2,567	<b>2,496</b>	2,874	2,781	2,622	
	OhitS	1	0	3	5	7	8	2	4	6	
	MAGE	2,280	2,559	2,229	2,144	2,026	<b>1,943</b>	2,272	2,197	2,088	
	OhitS	2	0	3	5	7	8	1	4	6	
	d <sub>r</sub>	0,450	0,409	0,485	0,505	0,532	<b>0,552</b>	0,476	0,493	0,519	
	OhitS	1	0	3	5	7	8	2	4	6	
	R	0,614	0,519	0,619	0,649	0,650	<b>0,662</b>	0,598	0,609	0,621	
	OhitS	2	0	4	6	7	8	1	3	5	
	Fat2 (%)	88,4	84,1	88,8	89,2	91,5	<b>92,3</b>	86,2	87,4	87,7	
	OhitS	4	0	5	6	7	8	1	2	3	
	DP	3,700	3,650	3,491	3,467	3,275	<b>3,220</b>	3,536	3,448	3,253	2,691
	OhitS	0	1	3	4	6	8	2	5	7	
	120 m	MB	0,857	0,440	0,812	0,581	0,647	0,640	0,311	0,321	<b>-0,169</b>
OhitS		0	5	1	4	2	3	7	6	8	
RMSE		2,915	3,184	2,842	2,654	2,547	<b>2,486</b>	2,829	2,745	2,559	
OhitS		1	0	2	5	7	8	3	4	6	
MAGE		2,255	2,513	2,216	2,113	2,004	<b>1,934</b>	2,229	2,160	2,029	
OhitS		1	0	3	5	7	8	2	4	6	
d <sub>r</sub>		0,440	0,402	0,473	0,498	0,523	<b>0,540</b>	0,470	0,486	0,517	
OhitS		1	0	2	5	7	8	3	4	6	
R		0,600	0,502	0,602	0,639	0,640	<b>0,648</b>	0,558	0,596	0,607	
OhitS		3	0	4	6	7	8	1	2	5	
Fat2 (%)		89,0	84,1	88,6	89,6	91,5	<b>92,4</b>	86,9	88,2	88,6	
OhitS		5	0	4	6	7	8	1	2	4	
DP		3,567	3,523	3,366	3,336	3,158	<b>3,097</b>	3,421	3,328	3,123	2,605
OhitS		0	1	3	4	6	8	2	5	7	
100 m		MB	0,779	0,306	0,692	0,517	0,553	0,517	0,264	<b>0,261</b>	-0,262
	OhitS	0	5	1	4	2	4	6	8	7	
	RMSE	2,864	3,142	2,793	2,620	2,507	<b>2,435</b>	2,811	2,728	2,557	
	OhitS	1	0	3	5	7	8	2	4	6	
	MAGE	2,210	2,473	2,172	2,079	1,963	<b>1,891</b>	2,209	2,143	2,033	
	OhitS	1	0	3	5	7	8	2	4	6	
	d <sub>r</sub>	0,450	0,412	0,483	0,506	0,533	<b>0,550</b>	0,475	0,491	0,517	
	OhitS	1	0	3	5	7	8	2	4	6	
	R	0,584	0,484	0,585	0,624	0,627	<b>0,636</b>	0,572	0,578	0,590	
	OhitS	3	0	4	6	7	8	1	2	5	
	Fat2 (%)	89,4	84,4	88,8	90,1	91,8	<b>92,7</b>	87,3	88,6	89,0	
	OhitS	5	0	3	6	7	8	1	2	4	
	DP	3,449	3,408	3,261	3,222	3,053	<b>2,979</b>	3,323	3,224	3,017	2,607
	OhitS	0	1	3	5	6	8	2	4	7	
	80 m	MB	0,736	<b>0,209</b>	0,582	0,499	0,503	0,417	0,268	0,246	-0,307
OhitS		0	8	1	3	2	4	6	7	5	
RMSE		2,786	3,056	2,703	2,589	2,475	<b>2,376</b>	2,794	2,708	2,547	
OhitS		2	0	4	5	7	8	1	3	6	
MAGE		2,145	2,408	2,099	2,047	1,928	<b>1,843</b>	2,188	2,123	2,025	
OhitS		2	0	4	5	7	8	1	3	6	
d <sub>r</sub>		0,454	0,416	0,491	0,503	0,532	<b>0,553</b>	0,469	0,485	0,509	
OhitS		1	0	4	5	7	8	2	3	6	
R		0,567	0,466	0,568	0,605	0,609	<b>0,620</b>	0,548	0,554	0,566	
OhitS		4	0	5	6	7	8	1	2	3	
Fat2 (%)		89,7	84,9	88,8	90,3	91,5	<b>92,6</b>	87,3	88,7	89,1	
OhitS		5	0	3	6	7	8	1	2	4	
DP		3,285	3,245	3,097	3,093	2,936	<b>2,836</b>	3,204	3,099	2,892	2,557
OhitS		0	1	4	5	6	8	2	3	7	
Sum of scores		46	27	86	141	173	205	66	107	159	

Com base na comparação entre as medidas obtidas nas três torres, a parametrização comum com maior pontuação foi obtida pelo cenário 5 (Cen5) (parametrização YSU e RUC), 184 pontos na Esplanada, 179 pontos em Mucuri e 173 pontos em Mucugê (Tabela 7). Nesse ínterim, o cenário 6 (Cen6) apresentou o melhor desempenho correspondente a Mucugê (parametrização YSU e NOAH-MP). No entanto, os resultados obtidos por este cenário foram tão bons quanto aqueles obtidos pelo cenário 5 em todos os casos. A subestimação da velocidade do vento ocorreu apenas nas simulações realizadas com o ACM2-Noah-MP, para todos os níveis e torres, e com o ACM2-LSM, em todos os níveis para Mucuri e a 120 e 150 m de altura para Esplanada. Tyagi *et al.* (2018) também descobriu que ACM2 subestimou a velocidade do vento, enquanto MYJ e YSU superestimaram.

**TABELA 7 - RESULTADO TOTAL DA PONTUAÇÃO OHITS PARA CADA CENÁRIO**

	Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9
<b>Mucuri</b>	108	65	22	128	179	94	107	<b>184</b>	128
<b>Esplanada</b>	125	41	157	69	<b>184</b>	106	65	153	110
<b>Mucugê</b>	46	27	86	141	173	<b>205</b>	66	107	159
<b>Total</b>	279	133	265	338	<b>536</b>	405	238	444	397

Essas métricas também foram avaliadas correspondendo à variável direção do vento (Tabelas 8, 9 e 10). Correspondendo a Mucugê (Tabela 10), como no caso da velocidade do vento, a combinação do esquema YSU e do esquema de superfície do solo NOAH-MP (Cen6) produziu as melhores estimativas. No entanto, Esplanada e Mucuri exibiram resultados diferentes dos encontrados para velocidade do vento. Correspondendo a Mucuri (Tabela 8), a combinação da parametrização da camada limite atmosférica MYJ e o modelo Noah (Cen1) teve um desempenho geral melhor em comparação com outras combinações. Por fim, correspondendo à Esplanada (Tabela 9), o cenário 3 (Cen3), que compreende a combinação de MYJ e NOAH-MP, obteve um resultado melhor que as demais combinações.



**TABELA 8 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTATÍSTICAS CORRESPONDENTES À COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE DIREÇÃO DO VENTO SIMULADOS E OBSERVADOS NA TORRE MUCURI**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	-16,812	-16,479	-20,984	-17,729	-18,555	-19,786	<b>-16,322</b>	-17,634	-17,031	
	RMSE	<b>40,324</b>	45,069	44,938	43,017	44,811	44,943	44,845	46,096	47,174	
	MAGE	<b>28,493</b>	31,385	31,639	29,550	31,210	31,025	32,309	33,294	33,434	
	d <sub>r</sub>	0,602	0,562	0,603	0,617	<b>0,620</b>	0,613	0,537	0,522	0,526	
	R	0,336	0,311	0,385	0,424	<b>0,432</b>	0,408	0,305	0,273	0,297	
	Fat2	75,47	72,80	71,08	<b>76,26</b>	74,98	75,57	68,21	69,84	70,14	
	DP	85,704	90,235	<b>75,150</b>	86,949	75,373	75,311	98,273	94,406	95,613	75,054
120 m	MB	-18,813	-18,046	-22,766	-19,602	-19,575	-21,112	<b>-18,014</b>	-19,576	-18,341	
	RMSE	<b>41,895</b>	46,677	46,914	44,498	46,299	46,823	46,561	47,526	48,634	
	MAGE	<b>30,373</b>	33,281	33,661	31,583	33,158	33,208	34,259	35,161	35,286	
	d <sub>r</sub>	0,594	0,556	0,597	0,601	<b>0,612</b>	0,606	0,526	0,518	0,505	
	R	0,354	0,328	0,410	0,426	<b>0,453</b>	0,428	0,308	0,286	0,280	
	Fat2	72,70	72,01	69,05	<b>74,14</b>	73,10	74,04	66,73	68,56	68,46	
	DP	86,781	91,371	<b>76,505</b>	90,053	77,467	77,591	99,262	94,397	97,818	75,351
100 m	MB	-15,692	<b>-15,409</b>	-19,088	-16,929	-17,309	-18,108	-16,566	-17,151	-15,753	
	RMSE	<b>41,829</b>	46,098	46,742	44,288	46,332	46,590	45,838	47,348	47,722	
	MAGE	<b>28,928</b>	31,723	32,003	30,146	31,797	31,761	32,724	33,816	33,608	
	d <sub>r</sub>	0,623	0,591	0,628	0,633	<b>0,639</b>	0,630	0,566	0,555	0,555	
	R	0,364	0,334	0,407	0,427	<b>0,437</b>	0,409	0,323	0,288	0,313	
	Fat2	<b>75,19</b>	74,05	71,14	75,04	73,75	75,14	68,62	69,56	70,20	
	DP	<b>89,585</b>	91,999	80,232	90,950	79,611	79,698	100,898	94,865	98,667	81,608

**TABELA 9 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTATÍSTICAS CORRESPONDENTES À COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE DIREÇÃO DO VENTO SIMULADOS E OBSERVADOS NA TORRE ESPLANADA**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	<b>-27,962</b>	-37,766	-39,067	-42,147	-43,896	-44,086	-38,433	-42,153	-38,479	
	RMSE	65,743	57,087	<b>52,271</b>	53,500	54,677	55,686	54,937	55,933	54,921	
	MAGE	54,174	47,913	<b>44,555</b>	46,676	48,110	48,696	46,305	47,806	46,276	
	d <sub>r</sub>	0,305	0,275	<b>0,325</b>	0,298	0,286	0,285	0,296	0,282	0,296	
	R	0,173	0,278	0,582	0,544	0,540	<b>0,584</b>	0,407	0,431	0,419	
	Fat2 (%)	78,00	75,41	78,05	<b>78,83</b>	77,83	77,80	74,73	75,75	75,75	
	DP	40,318	<b>50,908</b>	36,614	36,620	37,355	35,914	46,555	45,829	45,206	66,899
120 m	MB	<b>-11,907</b>	-18,658	-18,605	-22,354	-24,580	-24,536	-18,475	-22,084	-18,681	
	RMSE	64,919	47,956	<b>41,035</b>	41,051	41,663	42,600	44,984	44,558	44,323	
	MAGE	44,207	34,032	<b>29,178</b>	30,199	31,170	31,550	32,788	32,868	32,264	
	d <sub>r</sub>	0,474	0,427	<b>0,488</b>	0,477	0,470	0,471	0,449	0,449	0,457	
	R	0,194	0,241	0,516	0,531	0,529	<b>0,576</b>	0,370	0,417	0,412	
	Fat2 (%)	74,35	72,34	75,80	76,05	<b>76,32</b>	76,16	73,94	74,83	74,90	
	DP	42,327	52,167	38,149	37,929	<b>37,882</b>	36,991	49,200	47,431	46,180	71,700
100 m	MB	-5,535	-25,621	<b>-25,506</b>	-29,144	-31,495	-31,686	-24,774	-29,153	-25,527	
	RMSE	63,515	49,089	<b>42,006</b>	43,075	43,485	44,654	46,992	47,012	46,413	
	MAGE	49,168	37,977	<b>33,027</b>	35,089	36,048	36,597	37,092	37,552	36,626	
	d <sub>r</sub>	0,406	0,314	<b>0,441</b>	0,405	0,385	0,390	0,347	0,345	0,369	
	R	0,116	0,289	0,568	0,554	0,541	<b>0,620</b>	0,395	0,430	0,445	
	Fat2 (%)	91,44	87,79	92,66	92,92	<b>93,03</b>	92,89	89,15	90,34	90,51	
	DP	45,455	55,283	42,011	40,807	<b>39,571</b>	38,797	52,625	51,263	48,965	40,894

**TABELA 10. RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTATÍSTICAS CORRESPONDENTES À COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE DIREÇÃO DO VENTO SIMULADOS E OBSERVADOS NA TORRE DE MUCUGÊ**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
120 m	MB	-0,814	4,642	-2,380	-0,926	-1,814	-1,217	-0,691	<b>-0,386</b>	-0,897	
	RMSE	34,829	40,039	34,945	36,630	36,287	<b>33,828</b>	37,889	36,478	35,595	
	MAGE	19,977	23,373	19,497	20,703	20,359	<b>18,847</b>	21,914	21,190	20,568	
	d <sub>r</sub>	0,503	0,497	0,513	0,490	0,519	<b>0,556</b>	0,458	0,469	0,501	
	R	0,225	0,254	0,256	0,285	<b>0,332</b>	0,326	0,267	0,303	0,306	
	Fat2	86,98	85,79	87,68	86,83	87,80	<b>88,87</b>	85,84	86,04	87,08	
	DP	63,209	<b>59,020</b>	65,587	67,542	66,119	61,430	70,355	72,065	68,246	52,234
100 m	MB	-25,275	<b>-18,261</b>	-26,424	-24,512	-25,326	-25,507	-24,114	-25,336	-24,660	
	RMSE	43,443	44,319	44,583	44,755	45,030	<b>42,972</b>	45,568	44,670	43,970	
	MAGE	33,407	<b>32,421</b>	34,400	33,767	34,480	33,513	33,929	34,126	33,350	
	d <sub>r</sub>	0,311	<b>0,358</b>	0,298	0,306	0,319	0,333	0,289	0,292	0,313	
	R	0,217	0,237	0,240	0,253	<b>0,311</b>	0,296	0,232	0,288	0,272	
	Fat2	85,89	86,11	85,75	86,47	86,35	<b>87,75</b>	85,09	84,83	85,77	
	DP	61,373	57,409	63,821	66,121	64,272	<b>60,466</b>	69,119	70,778	67,119	49,743

Do ponto de vista da energia eólica, a velocidade do vento é uma variável mais importante do que a direção do vento. Isso pode ser atribuído principalmente à existência de um sistema que orienta o rotor do aerogerador na direção do vento e à regulação automática das inclinações das pás para otimizar a incidência do vento. Assim, os resultados obtidos na análise da velocidade do vento são mais pertinentes às simulações com domínio de alta resolução para todo o estado da Bahia, visto que este produz uma grande quantidade de energia eólica. Com base na discussão acima mencionada, seguem-se análises adicionais do desempenho de parametrização da combinação dos esquemas PBL-YSU e LSM-RUC em termos de velocidades do vento.

As Figuras 12, 13 e 14 ilustram as rosas dos ventos obtidas utilizando YSU e RUC (cenário 5) como parametrizações de PBL e LSM, respectivamente, correspondendo às três torres: Mucuri (Figura 12), Esplanada (Figura 13) e Mucugê (Figura 14), com base em todos os dados gerados durante os meses simulados.

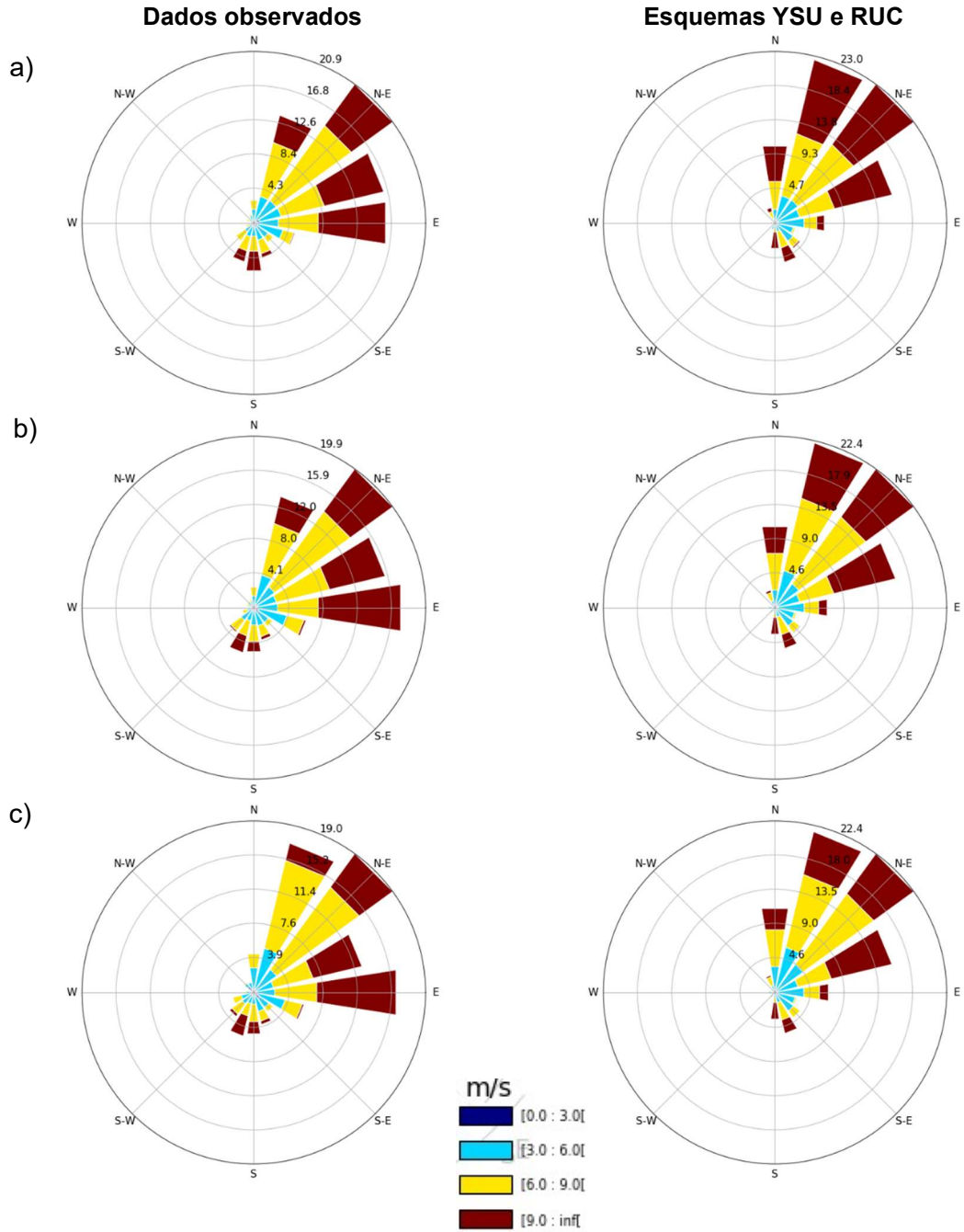


Figura 12 – Comparação das rosas dos ventos obtidas usando os esquemas YSU e RUC da torre Mucuri com base em observações nas alturas de a) 150, b) 120 e c) 100 m

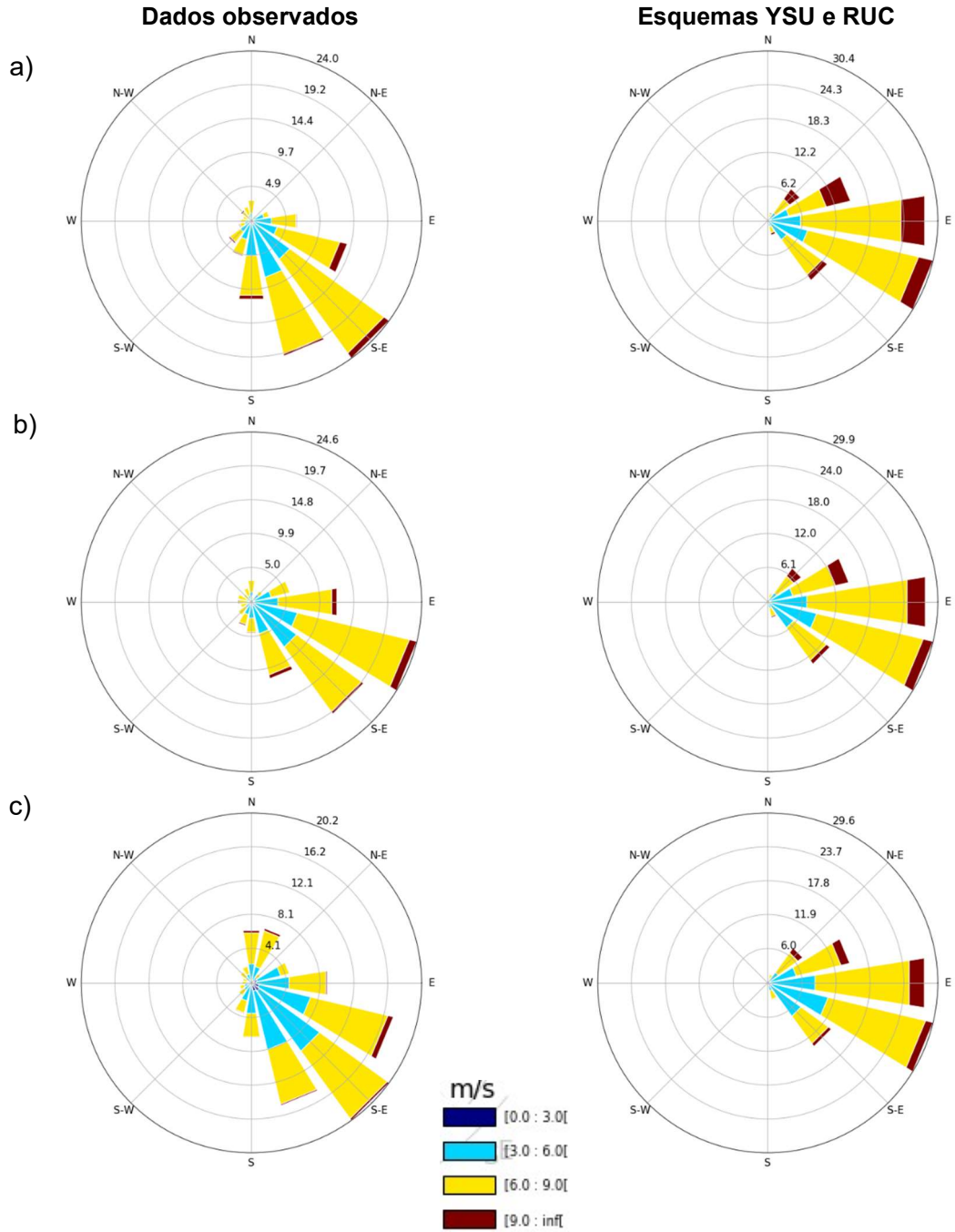


Figura 13 – Comparação das rosas dos ventos obtidas usando os esquemas YSU e RUC da torre Esplanada com base em observações nas alturas de a) 150, b) 120 e c) 100 m

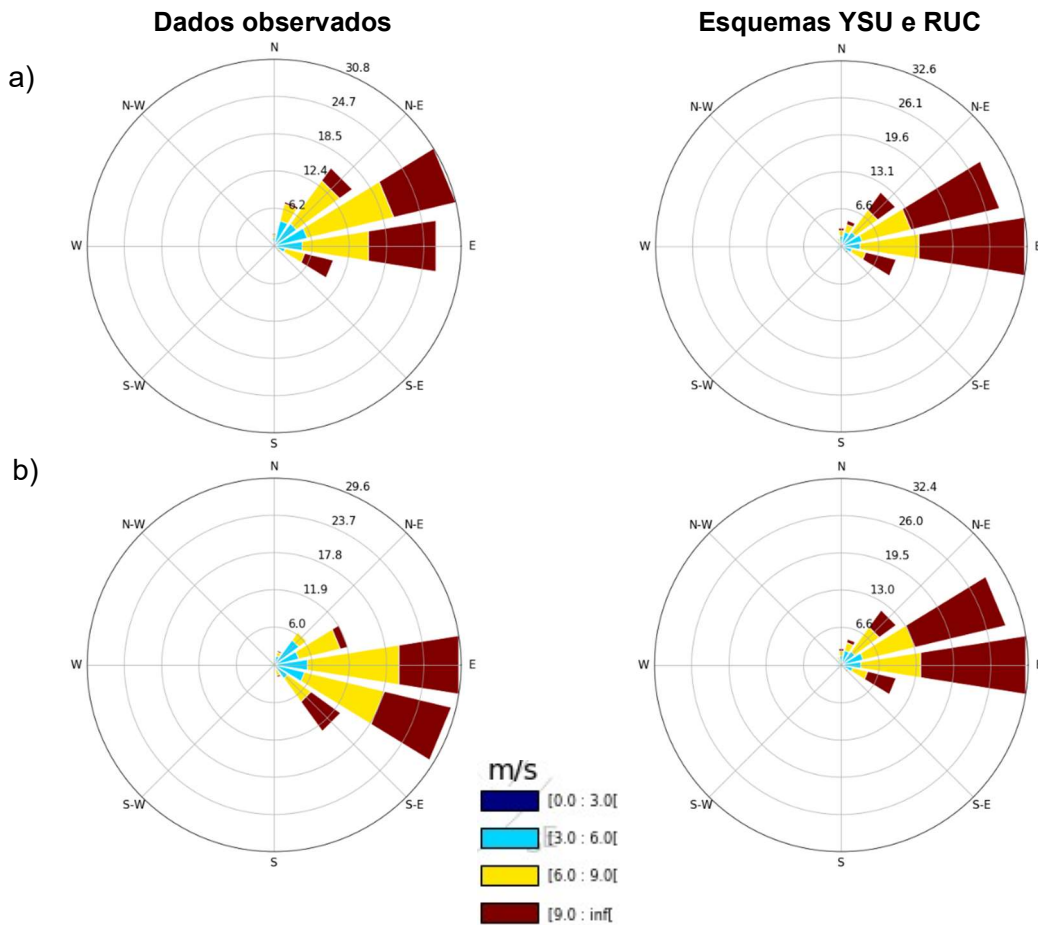


Figura 14 – Comparação das rosas dos ventos obtidas usando os esquemas YSU e RUC da torre Mucugê com base em observações nas alturas de a) 120 e b) 100 m

Fica evidente nos diagramas de rosas dos ventos que as regiões estudadas apresentam alto potencial para geração de energia eólica com valores intermediários e altos de velocidade do vento entre 6 a  $9 \text{ ms}^{-1}$  (amarelo) e acima de  $9 \text{ ms}^{-1}$  (marrom), respectivamente. Também é evidente que a velocidade do vento foi levemente superestimada em todas as três torres. Isso está de acordo com as observações de Giannaros *et al.* (2017), que destacou a tendência do modelo WRF de superestimar a frequência dos ventos fortes; Stucki *et al.* (2016), que relataram que o modelo WRF tende a superestimar os ventos médios; e Carvalho *et al.* (2014a), que também relataram resultados semelhantes.

Como este estudo utiliza dados de torres localizadas em três locais diferentes equipados com anemômetros em alturas variadas (80, 100, 120 e 150 m), suas observações podem ser consideradas representativas em termos de energia eólica. Assim, é interessante comparar esses dados com os perfis verticais de vento obtidos

por meio das simulações. As Figuras 15, 16 e 17 representam os perfis verticais das velocidades médias mensais do vento simuladas usando o cenário 5 (YSU e RUC), para dois meses representativos cada um correspondendo aos períodos seco e chuvoso, em comparação com os dados observados nas torres Esplanada, Mucugê, e Mucuri, respectivamente. A Tabela 11 especifica os dois meses representativos para os períodos de seca e chuva para cada torre.

**TABELA 11 - MESES REPRESENTATIVOS PARA PERÍODOS SECOS E CHUVOSOS PARA CADA TORRE**

	Esplanada	Mucuri	Mucugê
Mês	Maio	Maio	Janeiro
	Janeiro	Janeiro	Julho

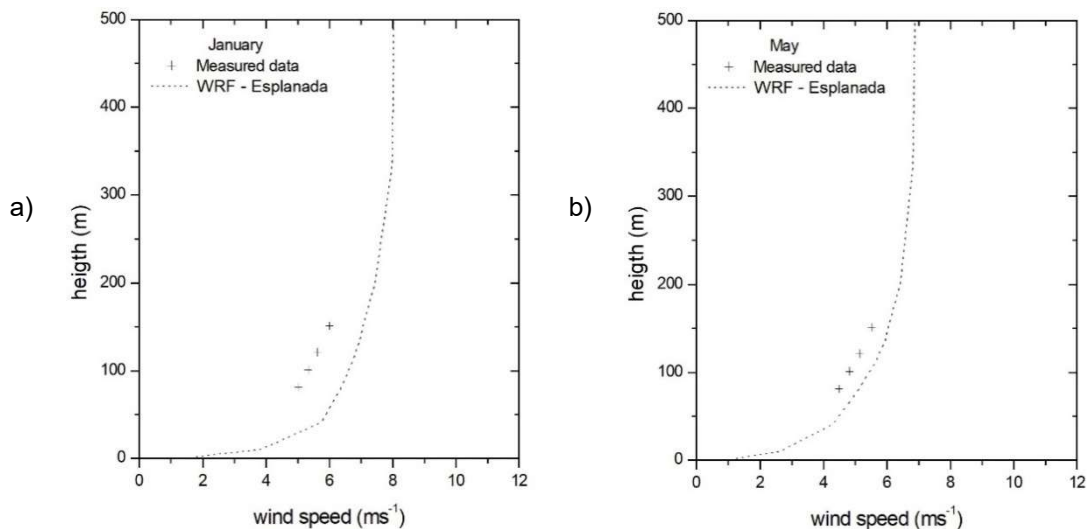


Figura 15 – Perfis verticais da velocidade média mensal do vento medida pela torre Esplanada e simulada usando WRF com os parâmetros do cenário 5 em a) janeiro e b) maio

Observa-se que os dados correspondentes à Esplanada estão bem caracterizados com dois períodos bem distintos e muita chuva durante os meses de maio e junho (ver Figura 6). A velocidade média mensal é superestimada pelo modelo WRF em todas as alturas durante o mês de maio (Figura 15b). Porém, apesar desse fenômeno, a diferença máxima entre os dados simulados e observados é de  $0,64 \text{ ms}^{-1}$ . No período menos chuvoso de janeiro, a diferença observada é de  $1,34 \text{ ms}^{-1}$ . E a tendência de superestimação também é observada (Figura 15a).

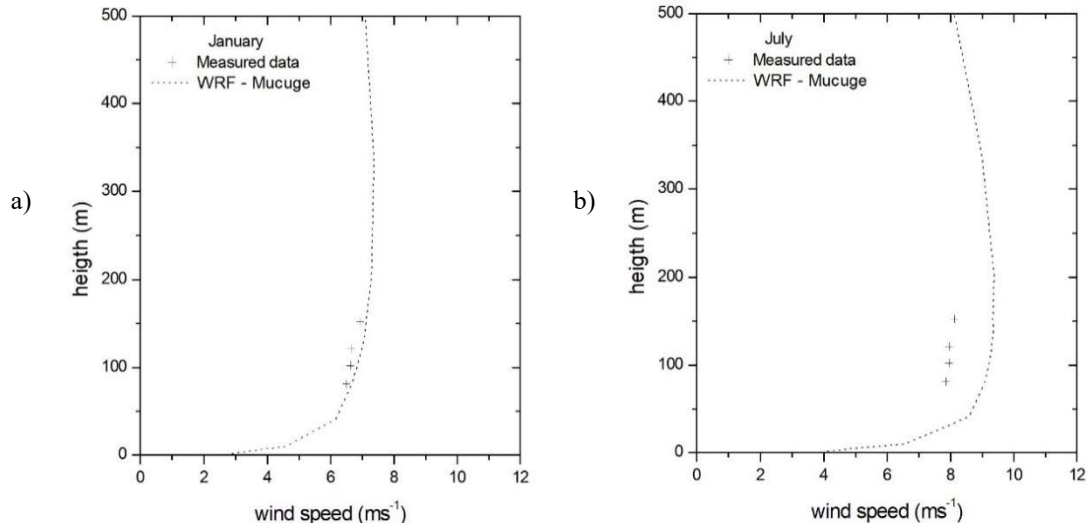


Figura 16 – Perfis verticais da velocidade média mensal do vento medida pela torre Mucugê e simulada utilizando WRF com a parametrização do cenário 5 em a) janeiro e b) julho

Os dados correspondentes a Mucugê (o mais distante do mar) também estão bem caracterizados com dois períodos bem distintos e muito pouca chuva durante os meses de julho e agosto (ver Figura 7). A velocidade média mensal é superestimada pelo modelo WRF em todas as alturas durante o mês de julho, com diferença máxima de  $1,34 \text{ ms}^{-1}$  (Figura 16b). Durante o período mais chuvoso em janeiro, a diferença máxima observada é de  $0,22 \text{ ms}^{-1}$ , mas uma leve tendência de superestimação persiste (Figura 16a).

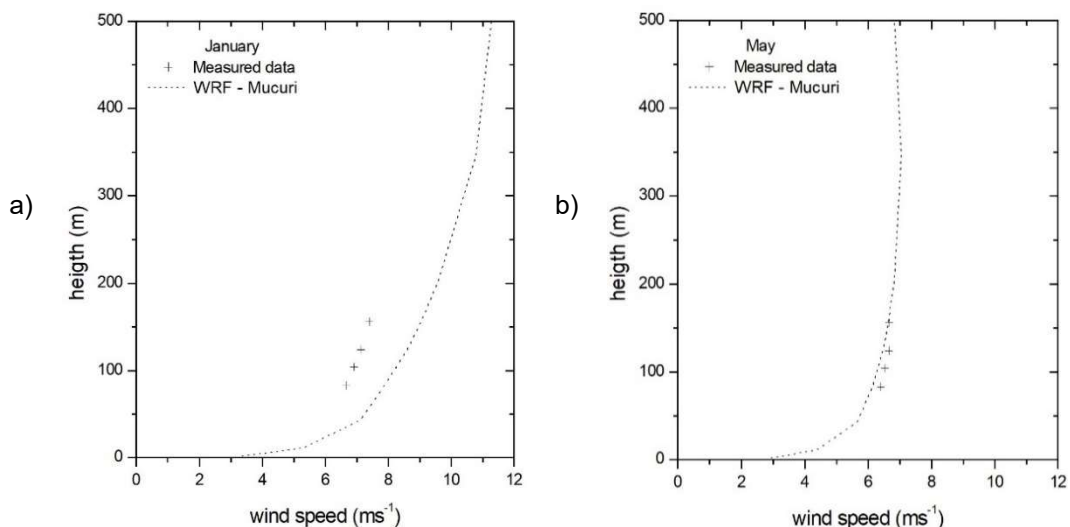


Figura 17 – Perfis verticais da velocidade média mensal do vento medida pela torre Mucuri e simulada utilizando WRF com a parametrização do cenário 5 em a) janeiro e b) maio

Os dados correspondentes a Mucuri (o mais próximo do mar) têm sido uniformes em termos de precipitação anual nas últimas décadas (ver Figura 8). No entanto, os meses de janeiro e fevereiro são representativos da estação seca na região. Nesse período, a velocidade média mensal é superestimada pelo modelo WRF em todas as alturas durante o mês de janeiro, com diferença máxima de  $1,66 \text{ ms}^{-1}$  (Figura 17a). Durante o mês de maio, que é representativo do período chuvoso da região, a diferença máxima observada é de  $0,27 \text{ ms}^{-1}$  (Figura 17b).

Portanto, a consideração apenas dos meses analisados desagregados dos demais revela uma tendência maior de superestimação da velocidade média do vento mensal correspondente ao período de seca.

Tendo identificado a combinação de melhor desempenho para ser o esquema YSU e RUC, a superioridade do seu desempenho pode ser verificada em relação a cada local, em termos de distância do mar (Tabela 12), com base nas estatísticas avaliadas correspondentes a todos os meses simulados. Ao contrário das Tabelas 4, 5 e 6 que comparam 9 cenários, na Tabela 12 as 3 torres são comparadas, portanto, os scores variaram entre 2 e 0. O desvio padrão (DP) foi analisado pela diferença entre o desvio padrão simulado e o desvio padrão observado (difDP).



TABELA 12 - ESTATÍSTICAS DE VELOCIDADE DO VENTO UTILIZANDO YSU E RUC

Altura		Esplanada	Mucuri	Mucugê
150 m	MB	0,730	0,885	<b>0,519</b>
	OhitS	1	0	2
	RMSE	<b>1,898</b>	2,833	2,567
	OhitS	2	0	1
	MAGE	<b>1,453</b>	2,070	2,026
	OhitS	2	0	1
	d <sub>r</sub>	0,467	<b>0,553</b>	0,532
	OhitS	0	2	1
	R	0,530	0,584	<b>0,650</b>
	OhitS	0	1	2
	Fat2	<b>94,6%</b>	89,1%	91,5%
	OhitS	2	0	1
	difDP	<b>0,204</b>	0,379	0,584
	OhitS	0	1	0
120 m	MB	0,824	0,786	<b>0,647</b>
	OhitS	0	1	2
	RMSE	<b>1,934</b>	2,735	2,547
	OhitS	2	0	1
	MAGE	<b>1,486</b>	2,003	2,004
	OhitS	2	1	0
	d <sub>r</sub>	0,456	<b>0,563</b>	0,523
	OhitS	0	2	1
	R	0,520	0,593	<b>0,640</b>
	OhitS	0	1	2
	Fat2	<b>93,2%</b>	88,6%	91,5%
	OhitS	2	0	1
	difDP	<b>0,177</b>	0,267	0,552
	OhitS	2	1	0
100 m	MB	0,882	0,726	<b>0,553</b>
	OhitS	0	1	2
	RMSE	<b>1,954</b>	2,663	2,507
	OhitS	2	0	1
	MAGE	<b>1,504</b>	1,953	1,963
	OhitS	2	1	0
	d <sub>r</sub>	0,456	<b>0,572</b>	0,533
	OhitS	0	2	1
	R	0,527	0,604	<b>0,627</b>
	OhitS	0	1	2
	Fat2	91,4%	88,7%	<b>91,8%</b>
	OhitS	1	0	2
	difDP	<b>0,164</b>	0,204	0,447
	OhitS	2	1	0
80 m	MB	0,880	0,667	<b>0,503</b>
	OhitS	0	1	2
	RMSE	<b>1,935</b>	2,593	2,475
	OhitS	2	0	1
	MAGE	<b>1,489</b>	1,913	1,928
	OhitS	2	1	0
	d <sub>r</sub>	0,484	<b>0,581</b>	0,532
	OhitS	0	2	1
	R	0,554	<b>0,616</b>	0,609
	OhitS	0	2	1
	Fat2	90,0%	88,7%	<b>91,5%</b>
	OhitS	1	0	2
	difDP	<b>0,122</b>	0,152	0,379
	OhitS	2	1	0
Sum of scores	31	23	30	

Uma análise da Tabela 12 e da Figura 11 revela que a proximidade com o mar degrada a precisão da simulação. Observa-se que Mucugê exibe uma maior congruência entre as velocidades do vento simulada e observada (Figura 11). Ela (torre localizada no centro do estado da Bahia, a 280 km do mar) apresenta desempenho estatisticamente semelhante ao da Esplanada (40 km do litoral), e corresponde a um desempenho melhor do que o registrado em Mucuri (torre mais próxima do mar, 340m). Esse fenômeno pode ser explicado pelo comportamento diferenciado do modelo em regiões próximas a grandes corpos d'água em relação a áreas mais do interior. Em locais próximos ao mar, as condições atmosféricas variam em um instante de tempo e espaço mais rapidamente, devido aos efeitos de eventos de brisas terrestres e marítimas que ainda não são bem compreendidos e capturados pelos modelos atmosféricos (SALVADOR *et al.*, 2016a). A proximidade do mar, as interações entre o escoamento atmosférico na camada limite marinha e o desenvolvimento da camada limite sobre continente continuam sendo fatores críticos nas previsões de tais modelos. Além disso, a simulação adequada das características do escoamento relacionadas à entrada da brisa marinha em regiões costeiras persiste como um dos maiores desafios para os modelos meteorológicos (SHIN; HONG, 2011; CHENG *et al.*, 2012; DE LEÓN; ORFILA, 2013). Deve-se notar que o modelo interpretou a célula de grade contendo a torre Mucuri como terra, o que refuta a hipótese de que o seu mau desempenho seja induzido pela identificação equivocada do local como oceânico (dada sua proximidade com o mar), e sustenta a hipótese de que a proximidade com o mar influencia negativamente o desempenho das simulações. Tyagi *et al.* (2018) encontraram um resultado semelhante, indicando que os locais no interior são melhor simulados do que os locais no mar, e indicaram que as razões para essa diferença no desempenho estão provavelmente relacionadas à dificuldade de reproduzir a variabilidade vertical no mar, onde o desenvolvimento de PBL muito raso pode não ser totalmente reproduzido. Além disso as profundidades simuladas de PBL em locais do mar exibem um viés maior em relação às observações em locais do interior com camadas limites convectivas bem desenvolvidas.

A avaliação das estatísticas de velocidade do vento correspondentes a períodos de mais (Tabelas 13, 15 e 17) e menos chuva (Tabelas 14, 16 e 18) também revela que o cenário 5 (YSU e RUC) é um cenário de bom desempenho. É interessante notar que correspondendo ao período de menor chuva nos meses simulados em Mucugê (maio, junho, julho e setembro) (Tabela 18), as estimativas mais precisas para a velocidade do vento foram

idênticas às obtidas por análise agregada (parametrizações YSU e NOAH-MP – Cen6) (Tabela 6). A análise do período chuvoso (janeiro e fevereiro) (Tabela 17) também revelou melhores estimativas correspondentes ao Cenário 5 (YSU e RUC). Após a desagregação dos dois períodos (mais e menos chuva) na Esplanada, os dados correspondentes ao período chuvoso (maio e junho) (Tabela 15) continuaram a apoiar que o cenário 5 apresentou o melhor desempenho, ao lado do cenário 1 (MYJ e NLSM), enquanto que no período menos chuvoso (dezembro, janeiro, fevereiro, setembro e outubro) (Tabela 16), o cenário 5 obteve desempenho semelhante ao cenário 8 (ACM2 e RUC) que obteve os melhores indicadores. Correspondendo a Mucuri, o cenário 5 (YSU e RUC) continuou a emergir como a melhor opção para o mês mais seco (janeiro) (Tabela 14), enquanto os meses chuvosos (dezembro e maio) (Tabela 13) foram melhor caracterizados pelo cenário 8 (ACM2 e RUC). No entanto, os resultados obtidos por esses cenários foram tão bons quanto aqueles obtidos pelo cenário 5 em todos os casos. Assim, os resultados citados corroboram a escolha da combinação do esquema PBL-YSU com o esquema LSM-RUC para aplicação na previsão da produção de energia eólica para a região.

**TABELA 13 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS STAT. AO COMPARAR OS DADOS SIM. E OBS. DA VELOCIDADE DO VENTO PARA O PERÍODO CHUVOSO PARA A TORRE DE MUCURI**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	0,104	-0,382	<b>0,072</b>	0,117	0,522	0,396	-0,830	-0,194	-0,841	
	RMSE	2,604	2,811	2,961	2,499	2,391	2,440	2,495	<b>2,243</b>	2,422	
	MAGE	1,885	2,134	2,218	1,830	1,808	1,799	1,955	<b>1,756</b>	1,902	
	d <sub>r</sub>	0,614	0,564	0,546	0,626	0,630	0,632	0,600	<b>0,641</b>	0,611	
	R	0,654	0,609	0,548	0,663	<b>0,696</b>	0,662	0,644	0,687	0,652	
	Fat2	89,871	87,662	87,890	91,165	<b>91,394</b>	91,165	89,566	91,241	90,784	
	DP	3,394	3,402	3,306	3,433	3,312	3,250	<b>2,992</b>	3,009	2,767	2,954
	MB	0,096	-0,354	<b>0,021</b>	0,079	0,462	0,346	-0,818	-0,209	-0,834	
	RMSE	2,656	2,825	2,966	2,469	2,372	2,439	2,482	<b>2,228</b>	2,425	
120 m	MAGE	1,940	2,129	2,220	1,831	1,779	1,808	1,945	<b>1,742</b>	1,908	
	d <sub>r</sub>	0,601	0,563	0,544	0,624	0,635	0,629	0,600	<b>0,642</b>	0,608	
	R	0,636	0,596	0,536	0,657	<b>0,696</b>	0,651	0,644	0,690	0,651	
	Fat2	88,347	87,433	86,746	90,327	90,556	<b>90,937</b>	88,119	90,556	89,947	
	DP	3,318	3,326	3,215	3,296	3,260	3,141	2,914	<b>2,962</b>	2,712	2,983
	MB	<b>0,027</b>	-0,347	-0,105	0,052	0,434	0,306	-0,775	-0,188	-0,797	
	RMSE	2,653	2,803	2,936	2,425	2,342	2,403	2,471	<b>2,223</b>	2,431	
	MAGE	1,946	2,111	2,214	1,817	1,750	1,786	1,936	<b>1,738</b>	1,911	
	d <sub>r</sub>	0,599	0,565	0,543	0,625	0,639	0,632	0,601	<b>0,642</b>	0,606	
100 m	R	0,626	0,590	0,528	0,660	<b>0,700</b>	0,653	0,641	0,690	0,645	
	Fat2	87,586	86,824	85,834	90,327	90,175	90,708	88,043	<b>91,089</b>	89,871	
	DP	3,233	3,241	3,103	3,201	3,237	3,060	2,871	<b>2,940</b>	2,687	2,991
	MB	-0,369	-0,746	-0,834	<b>0,017</b>	0,403	0,250	-0,728	-0,163	-0,759	
	RMSE	2,330	2,478	2,488	2,375	2,312	2,349	2,456	<b>2,217</b>	2,432	
	MAGE	1,776	1,924	1,950	1,786	<b>1,728</b>	1,750	1,926	1,733	1,909	
	d <sub>r</sub>	0,634	0,604	0,598	0,632	<b>0,644</b>	0,639	0,603	0,643	0,607	
	R	0,681	0,658	0,647	0,667	<b>0,707</b>	0,661	0,641	0,692	0,643	
	Fat2	88,652	87,814	86,443	90,175	90,023	89,947	87,510	<b>90,327</b>	89,566	
80 m	DP	2,957	2,910	2,727	3,119	3,225	<b>2,984</b>	2,834	2,927	2,671	3,009

**TABELA 14 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTATÍSTICAS AO COMPARAR OS DADOS SIM. E OBS. DA VELOCIDADE DO VENTO PARA O PERÍODO MENOS CHUVOSO PARA A TORRE DE MUCURI**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	2,210	1,991	1,974	2,210	1,553	2,178	1,154	1,510	<b>0,902</b>	
	RMSE	4,046	4,138	4,603	4,061	<b>3,503</b>	4,193	3,820	3,814	3,732	
	MAGE	2,952	2,975	3,342	3,039	<b>2,551</b>	3,124	2,904	2,831	2,845	
	d <sub>r</sub>	0,294	0,289	0,201	0,274	<b>0,390</b>	0,253	0,306	0,323	0,320	
	R	0,300	0,188	0,096	0,287	<b>0,354</b>	0,270	0,211	0,289	0,201	
	Fat2	83,613	82,493	80,392	84,174	<b>84,874</b>	82,353	82,353	84,034	80,392	
120 m	DP	3,044	3,025	3,447	3,044	<b>2,949</b>	3,240	3,125	3,161	3,043	2,634
	MB	2,041	1,858	1,815	1,977	1,380	1,960	1,026	1,352	<b>0,780</b>	
	RMSE	3,889	3,987	4,449	3,797	<b>3,300</b>	3,980	3,649	3,627	3,535	
	MAGE	2,842	2,865	3,230	2,857	<b>2,415</b>	2,978	2,777	2,705	2,707	
	d <sub>r</sub>	0,304	0,298	0,208	0,300	<b>0,408</b>	0,270	0,319	0,337	0,337	
	R	0,300	0,204	0,095	0,274	<b>0,362</b>	0,252	0,209	0,278	0,213	
100 m	Fat2	84,174	82,073	80,112	<b>84,874</b>	<b>84,874</b>	81,933	82,213	84,454	81,232	
	DP	2,962	2,970	3,348	<b>2,765</b>	2,772	3,030	2,948	2,951	2,863	2,597
	MB	1,793	1,681	1,571	1,800	1,265	1,775	0,977	1,282	<b>0,732</b>	
	RMSE	3,741	3,885	4,258	3,592	<b>3,168</b>	3,812	3,573	3,546	3,444	
	MAGE	2,730	2,802	3,105	2,716	<b>2,326</b>	2,858	2,728	2,665	2,651	
	d <sub>r</sub>	0,326	0,309	0,234	0,330	<b>0,426</b>	0,295	0,327	0,342	0,346	
80 m	R	0,286	0,211	0,087	0,283	<b>0,376</b>	0,250	0,206	0,267	0,218	
	Fat2	83,053	82,353	79,692	85,154	<b>85,854</b>	81,232	81,793	83,894	81,373	
	DP	2,885	2,953	3,185	<b>2,580</b>	2,661	2,888	2,843	2,826	2,755	2,598
	MB	0,881	0,676	<b>0,311</b>	1,606	1,152	1,567	0,934	1,214	0,683	
	RMSE	<b>2,887</b>	3,029	3,382	3,370	3,042	3,627	3,478	3,451	3,333	
	MAGE	<b>2,167</b>	2,304	2,580	2,558	2,254	2,718	2,666	2,614	2,581	
80 m	d <sub>r</sub>	<b>0,462</b>	0,428	0,359	0,365	0,440	0,325	0,338	0,351	0,359	
	R	<b>0,393</b>	0,308	0,138	0,308	0,391	0,258	0,211	0,263	0,231	
	Fat2	84,874	84,734	80,392	84,734	<b>86,134</b>	81,092	80,672	82,353	81,373	
	DP	2,435	2,438	2,533	<b>2,427</b>	2,567	2,765	2,737	2,703	2,649	2,589

**TABELA 15. RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTAT. AO COMPARAR OS DADOS SIM. E OBS. DA VELOCIDADE DO VENTO PARA O PERÍODO CHUVOSO PARA A TORRE DE ESPLANADA**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	0,245	-0,264	0,531	<b>0,173</b>	0,639	0,638	-0,204	0,183	-0,343	
	RMSE	1,973	2,397	1,898	2,154	<b>1,893</b>	1,983	2,411	2,150	2,097	
	MAGE	1,534	1,863	1,476	1,659	<b>1,465</b>	1,506	1,887	1,606	1,617	
	d <sub>r</sub>	0,467	0,353	0,487	0,424	<b>0,491</b>	0,477	0,345	0,442	0,439	
	R	0,514	0,400	0,510	0,512	0,519	<b>0,533</b>	0,399	0,418	0,460	
	Fat2	90,745	81,976	91,858	88,727	92,624	<b>92,763</b>	85,038	89,701	87,822	
120 m	DP	2,173	2,472	1,939	2,445	<b>1,895</b>	2,107	2,496	2,177	2,185	1,773
	MB	0,290	-0,180	0,548	0,297	0,702	0,724	<b>-0,054</b>	0,315	-0,240	
	RMSE	1,926	2,297	1,915	2,166	<b>1,913</b>	2,017	2,339	2,117	2,032	
	MAGE	<b>1,484</b>	1,793	1,491	1,645	1,487	1,544	1,841	1,583	1,568	
	d <sub>r</sub>	<b>0,467</b>	0,356	0,464	0,409	0,466	0,445	0,339	0,431	0,436	
	R	<b>0,508</b>	0,393	0,479	0,485	0,485	0,501	0,381	0,391	0,449	
100 m	Fat2	89,840	81,559	90,675	87,196	<b>91,580</b>	90,745	83,646	87,683	86,360	
	DP	2,108	2,361	1,913	2,392	<b>1,837</b>	2,053	2,399	2,077	2,115	1,690
	MB	0,300	-0,119	0,505	0,397	0,756	0,778	<b>0,097</b>	0,450	-0,115	
	RMSE	<b>1,915</b>	2,211	1,916	2,161	1,923	2,041	2,274	2,079	1,977	
	MAGE	<b>1,463</b>	1,736	1,481	1,633	1,499	1,567	1,789	1,560	1,526	
	d <sub>r</sub>	<b>0,457</b>	0,356	0,450	0,394	0,444	0,418	0,336	0,421	0,433	
80 m	R	<b>0,501</b>	0,386	0,449	0,471	0,471	0,476	0,379	0,389	0,446	
	Fat2	88,239	80,097	88,796	85,038	<b>89,701</b>	88,935	82,672	86,917	85,456	
	DP	2,091	2,256	1,884	2,342	<b>1,811</b>	2,016	2,328	2,010	2,068	1,632
	MB	0,186	-0,191	0,310	0,441	0,757	0,764	0,183	0,528	<b>-0,041</b>	
	RMSE	<b>1,800</b>	2,049	1,832	2,083	1,892	2,013	2,193	2,025	1,919	
	MAGE	<b>1,380</b>	1,622	1,405	1,576	1,475	1,547	1,721	1,524	1,483	
80 m	d <sub>r</sub>	<b>0,480</b>	0,389	0,471	0,406	0,444	0,417	0,351	0,426	0,441	
	R	<b>0,529</b>	0,408	0,437	0,479	0,477	0,464	0,395	0,407	0,458	
	Fat2	86,013	79,680	86,639	83,786	<b>88,379</b>	86,917	81,420	86,291	84,482	
	DP	2,024	2,084	1,799	2,247	<b>1,788</b>	1,958	2,258	1,954	2,027	1,604

**TABELA 16 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTATÍSTICAS AO COMPARAR OS DADOS SIMULADOS E OBSERVADOS DA VELOCIDADE DO VENTO PARA O PERÍODO MENOS CHUVOSO PARA A TORRE DE ESPLANADA**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	0,649	-0,116	0,192	0,798	0,768	0,779	-0,157	0,139	<b>-0,574</b>	
	RMSE	2,041	2,101	1,949	2,074	<b>1,900</b>	2,048	2,033	1,918	2,065	
	MAGE	1,500	1,602	1,490	1,538	1,448	1,527	1,584	<b>1,443</b>	1,629	
	d <sub>r</sub>	0,420	0,380	0,424	0,405	0,440	0,409	0,387	<b>0,442</b>	0,370	
	R	0,461	0,389	0,442	0,477	<b>0,515</b>	0,480	0,375	0,407	0,355	
	Fat2	94,965	91,735	93,772	94,878	<b>95,489</b>	94,790	91,473	93,277	91,065	
120 m	DP	2,042	2,100	1,986	2,051	1,875	2,010	1,964	1,868	<b>1,850</b>	1,640
	MB	0,789	0,039	0,307	0,942	0,874	0,876	<b>0,019</b>	0,320	-0,427	
	RMSE	2,115	2,121	2,025	2,127	1,942	2,108	2,014	<b>1,937</b>	2,020	
	MAGE	1,571	1,615	1,553	1,594	1,486	1,590	1,568	<b>1,455</b>	1,593	
	d <sub>r</sub>	0,407	0,390	0,414	0,399	0,439	0,400	0,408	<b>0,451</b>	0,399	
	R	0,447	0,379	0,412	0,461	<b>0,513</b>	0,449	0,374	0,396	0,349	
100 m	Fat2	93,335	90,017	92,288	93,306	<b>93,859</b>	92,811	90,250	91,997	89,901	
	DP	2,032	2,096	1,989	1,985	1,846	1,948	1,926	1,818	<b>1,800</b>	1,667
	MB	0,839	<b>0,119</b>	0,292	1,016	0,935	0,907	0,149	0,459	-0,308	
	RMSE	2,137	2,108	2,048	2,143	1,966	2,126	1,988	<b>1,950</b>	1,979	
	MAGE	1,600	1,615	1,575	1,618	1,506	1,612	1,545	<b>1,464</b>	1,561	
	d <sub>r</sub>	0,416	0,411	0,425	0,409	0,450	0,412	0,436	<b>0,466</b>	0,430	
80 m	R	0,450	0,386	0,400	0,465	<b>0,527</b>	0,440	0,393	0,407	0,363	
	Fat2	91,473	88,591	90,629	91,211	<b>92,171</b>	91,153	89,319	90,716	89,086	
	DP	2,021	2,068	1,973	1,939	1,852	1,908	1,894	1,789	<b>1,768</b>	1,708
	MB	0,717	0,049	<b>0,041</b>	0,991	0,932	0,849	0,210	0,535	-0,244	
	RMSE	2,048	2,057	<b>1,925</b>	2,096	1,953	2,082	1,963	1,954	1,952	
	MAGE	1,538	1,580	1,506	1,594	1,490	1,582	1,525	<b>1,473</b>	1,541	
80 m	d <sub>r</sub>	0,474	0,460	0,485	0,455	0,490	0,459	0,479	<b>0,496</b>	0,473	
	R	0,483	0,417	0,450	0,488	<b>0,560</b>	0,456	0,429	0,441	0,397	
	Fat2	89,930	87,049	88,999	89,319	<b>90,716</b>	89,203	88,038	89,377	88,038	
	DP	1,984	2,022	1,883	1,880	1,878	1,851	1,872	1,782	<b>1,748</b>	1,796

**TABELA 17 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTAT. AO COMPARAR OS DADOS SIM. E OBS. DA VELOCIDADE DO VENTO PARA O PERÍODO CHUVOSO PARA A TORRE DE MUCUGÊ**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	0,614	0,706	0,395	<b>0,014</b>	0,023	0,518	-0,343	-0,258	-0,502	
	RMSE	3,148	3,203	3,137	2,701	<b>2,670</b>	2,785	2,937	2,898	2,696	
	MAGE	2,360	2,474	2,394	2,112	<b>2,070</b>	2,156	2,274	2,235	2,154	
	d <sub>r</sub>	0,465	0,439	0,457	0,521	<b>0,531</b>	0,511	0,485	0,494	0,512	
	R	0,515	0,456	0,516	<b>0,587</b>	0,578	0,575	0,533	0,535	0,582	
	Fat2	84,692	84,835	82,046	87,124	86,981	<b>89,628</b>	82,546	83,548	84,549	
120 m	DP	3,477	3,253	3,499	3,219	<b>3,118</b>	3,221	3,285	3,239	3,123	2,713
	MB	0,780	0,830	0,534	0,179	0,155	0,629	-0,170	<b>-0,094</b>	-0,363	
	RMSE	3,192	3,193	3,130	2,699	2,648	2,783	2,880	2,854	<b>2,629</b>	
	MAGE	2,390	2,465	2,395	2,102	<b>2,056</b>	2,159	2,235	2,204	2,105	
	d <sub>r</sub>	0,452	0,435	0,451	0,518	<b>0,529</b>	0,505	0,488	0,495	0,518	
	R	0,486	0,449	0,495	0,572	0,569	0,560	0,526	0,525	<b>0,575</b>	
100 m	Fat2	84,406	83,548	81,760	86,481	86,981	<b>88,770</b>	82,976	84,192	84,979	
	DP	3,385	3,191	3,394	3,136	3,051	3,114	3,204	3,156	<b>3,032</b>	2,662
	MB	0,693	0,694	0,407	0,098	<b>0,051</b>	0,489	-0,230	-0,165	-0,452	
	RMSE	3,150	3,125	3,070	2,691	<b>2,626</b>	2,718	2,860	2,839	2,626	
	MAGE	2,370	2,419	2,357	2,095	<b>2,037</b>	2,114	2,222	2,200	2,112	
	d <sub>r</sub>	0,465	0,454	0,468	0,527	<b>0,540</b>	0,523	0,498	0,504	0,523	
80 m	R	0,475	0,451	0,487	0,563	0,566	0,557	0,523	0,520	<b>0,570</b>	
	Fat2	85,193	84,478	81,974	86,266	87,124	<b>89,127</b>	83,047	84,049	85,050	
	DP	3,283	3,118	3,288	3,052	2,976	3,001	3,123	3,079	<b>2,951</b>	2,696
	MB	0,621	0,558	0,274	0,054	<b>-0,007</b>	0,377	-0,241	-0,188	-0,493	
	RMSE	3,043	2,985	2,949	2,655	<b>2,585</b>	2,624	2,825	2,802	2,611	
	MAGE	2,305	2,334	2,272	2,068	<b>2,003</b>	2,047	2,198	2,180	2,103	
80 m	d <sub>r</sub>	0,472	0,465	0,479	0,526	<b>0,541</b>	0,531	0,496	0,500	0,518	
	R	0,465	0,457	0,484	0,551	<b>0,557</b>	0,553	0,508	0,507	0,555	
	Fat2	85,408	84,764	82,117	86,338	86,767	<b>89,127</b>	82,976	83,834	84,835	
	DP	3,116	2,985	3,136	2,946	2,884	2,858	3,012	2,977	<b>2,851</b>	2,655

**TABELA 18 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTADÍSTICAS AO COMPARAR OS DADOS SIMULADOS E OBSERVADOS DA VELOCIDADE DO VENTO PARA O PERÍODO MENOS CHUVOSO PARA A TORRE DE MUCUGÊ**

Altura		Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	0,678	0,189	0,853	0,627	0,773	0,534	0,385	0,373	<b>-0,181</b>	
	RMSE	2,977	3,254	2,703	2,673	2,514	<b>2,335</b>	2,842	2,719	2,584	
	MAGE	2,393	2,603	2,145	2,160	2,004	<b>1,834</b>	2,270	2,178	2,054	
	d <sub>r</sub>	0,437	0,387	0,495	0,492	0,528	<b>0,568</b>	0,466	0,487	0,516	
	R	0,644	0,552	0,668	0,675	0,683	<b>0,705</b>	0,624	0,640	0,636	
	Fat2	87,674	83,723	91,917	90,307	<b>93,782</b>	93,599	88,149	89,356	89,247	
	DP	3,792	3,839	3,434	3,520	3,260	<b>3,119</b>	3,579	3,480	3,273	2,663
120 m	MB	0,840	0,240	0,955	0,786	0,898	0,645	0,557	0,534	<b>-0,070</b>	
	RMSE	2,920	3,180	2,683	2,631	2,494	<b>2,319</b>	2,802	2,687	2,522	
	MAGE	2,339	2,538	2,125	2,118	1,978	<b>1,819</b>	2,226	2,138	1,991	
	d <sub>r</sub>	0,426	0,377	0,478	0,480	0,514	<b>0,553</b>	0,453	0,475	0,511	
	R	0,639	0,533	0,653	0,666	0,671	<b>0,691</b>	0,611	0,624	0,616	
	Fat2	88,515	84,418	92,173	91,258	93,855	<b>94,294</b>	88,844	90,271	90,417	
	DP	3,636	3,682	3,294	3,357	3,106	<b>3,062</b>	3,437	3,331	3,118	2,555
100 m	MB	0,775	<b>0,108</b>	0,837	0,731	0,811	0,531	0,516	0,478	-0,165	
	RMSE	2,864	3,150	2,640	2,582	2,443	<b>2,277</b>	2,785	2,669	2,522	
	MAGE	2,283	2,501	2,078	2,071	1,925	<b>1,777</b>	2,203	2,113	1,993	
	d <sub>r</sub>	0,434	0,380	0,485	0,487	0,523	<b>0,560</b>	0,454	0,476	0,506	
	R	0,621	0,506	0,631	0,649	0,654	<b>0,674</b>	0,588	0,600	0,592	
	Fat2	88,808	84,418	92,319	92,099	94,148	<b>94,477</b>	89,466	90,966	91,002	
	DP	3,507	3,548	3,184	3,221	2,978	<b>2,938</b>	3,323	3,207	2,996	2,537
80 m	MB	0,768	<b>0,031</b>	0,740	0,727	0,763	0,438	0,529	0,468	-0,211	
	RMSE	2,812	3,092	2,568	2,555	2,416	<b>2,239</b>	2,778	2,658	2,513	
	MAGE	2,223	2,446	2,010	2,036	1,890	<b>1,740</b>	2,183	2,093	1,985	
	d <sub>r</sub>	0,436	0,379	0,490	0,483	0,520	<b>0,559</b>	0,446	0,469	0,496	
	R	0,597	0,475	0,605	0,624	0,629	<b>0,650</b>	0,558	0,568	0,562	
	Fat2	89,649	85,004	92,209	92,356	93,892	<b>94,404</b>	89,466	91,185	91,295	
	DP	3,337	3,370	3,004	3,069	2,839	<b>2,791</b>	3,190	3,063	2,855	2,480

Os resultados do cálculo das estatísticas para a direção do vento para os períodos de mais e menos chuva podem ser averiguados nos Apêndices A a F.

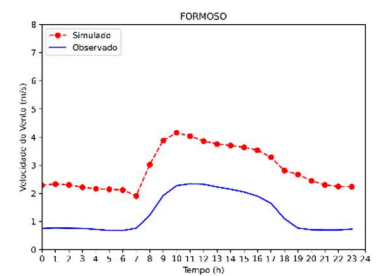
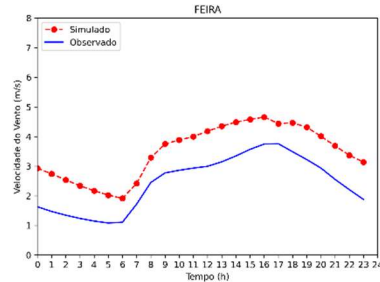
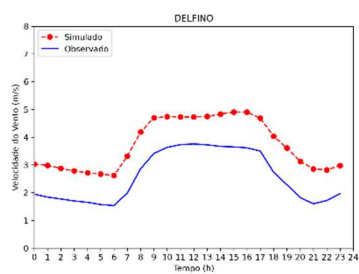
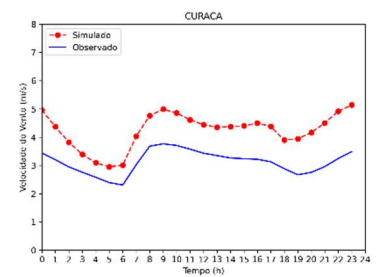
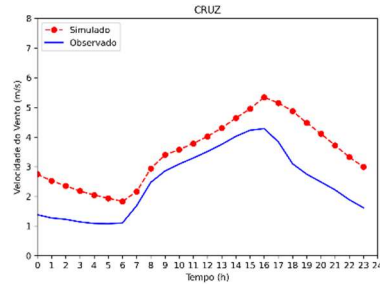
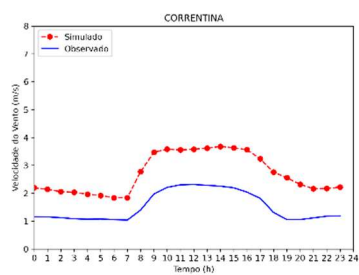
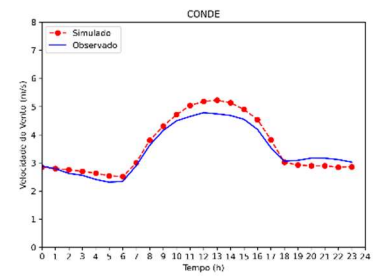
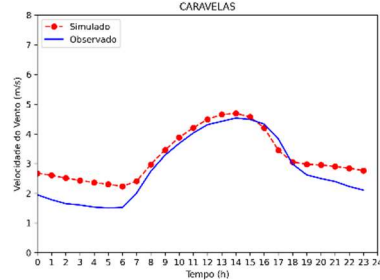
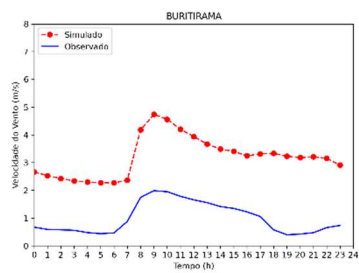
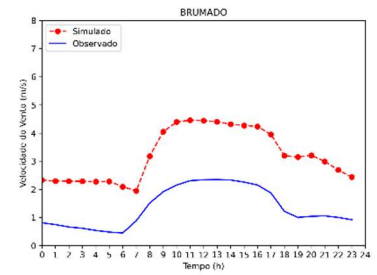
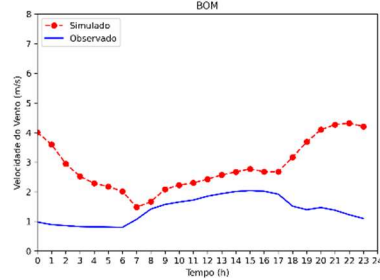
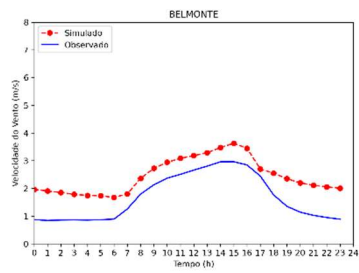
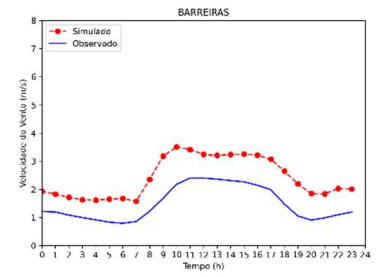
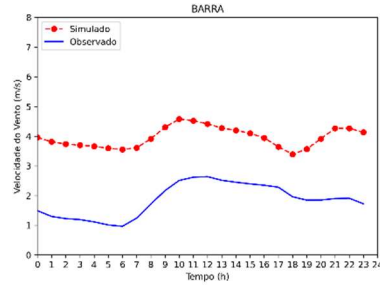
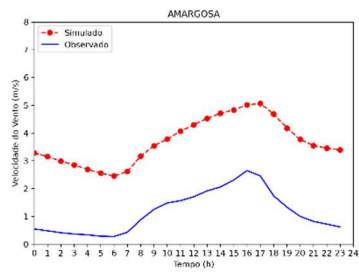
## 5.2 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO DOS MAPAS EÓLICOS

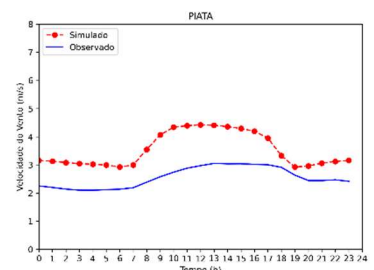
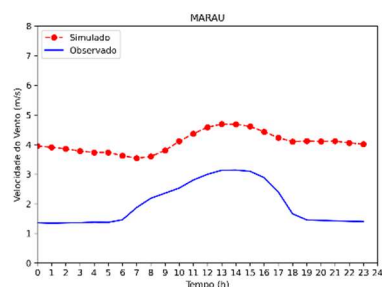
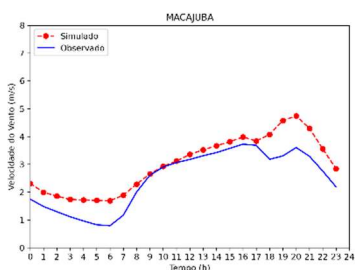
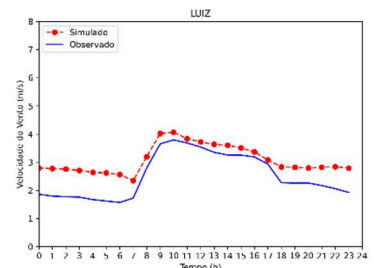
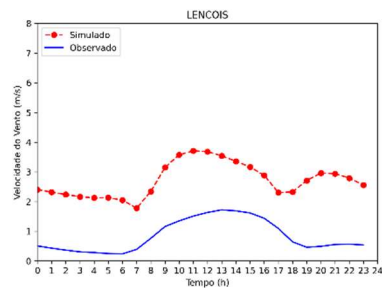
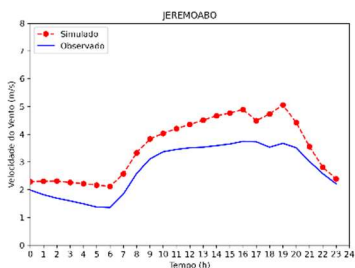
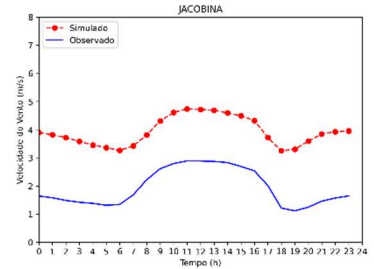
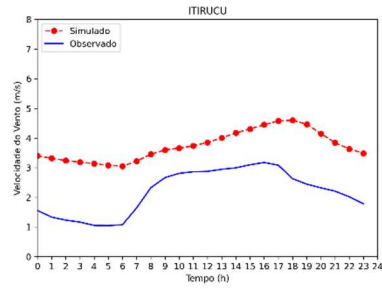
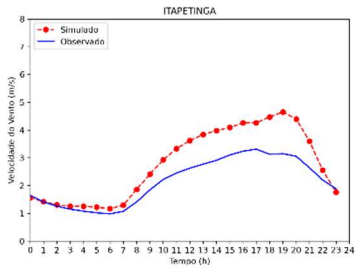
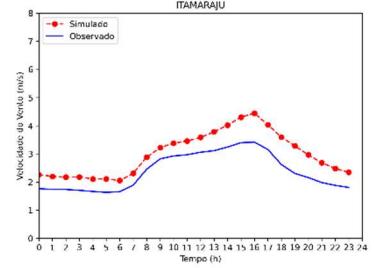
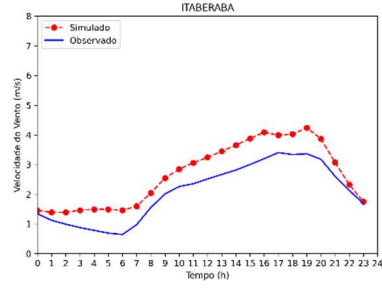
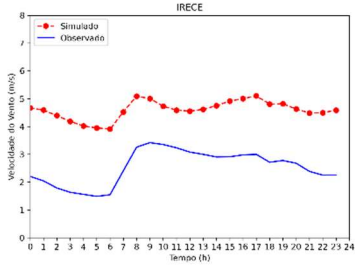
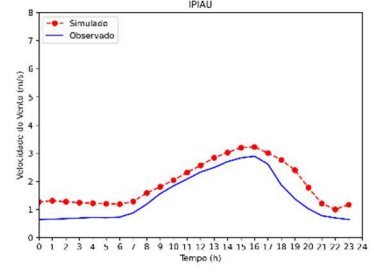
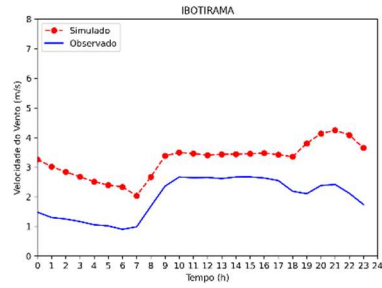
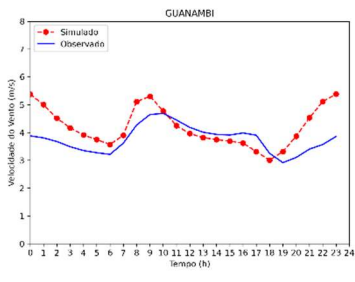
Nesta seção é apresentada a análise das simulações para a validação dos 5 (cinco) anos simulados (01 de agosto de 2015 a 31 de julho de 2020) que foram utilizados na construção dos mapas eólicos *onshore* e *offshore*.

### 5.2.1 Análise Temporal da Velocidade do Vento

A Figura 18 mostra a evolução temporal horária observada e simulada do vento a 10m, para os locais onde estão posicionadas as estações de superfície (E1-E41), e a

estação automática do Arquipélago de Abrolhos (E42), durante todo o período de estudo (agosto de 2015 a julho de 2020).







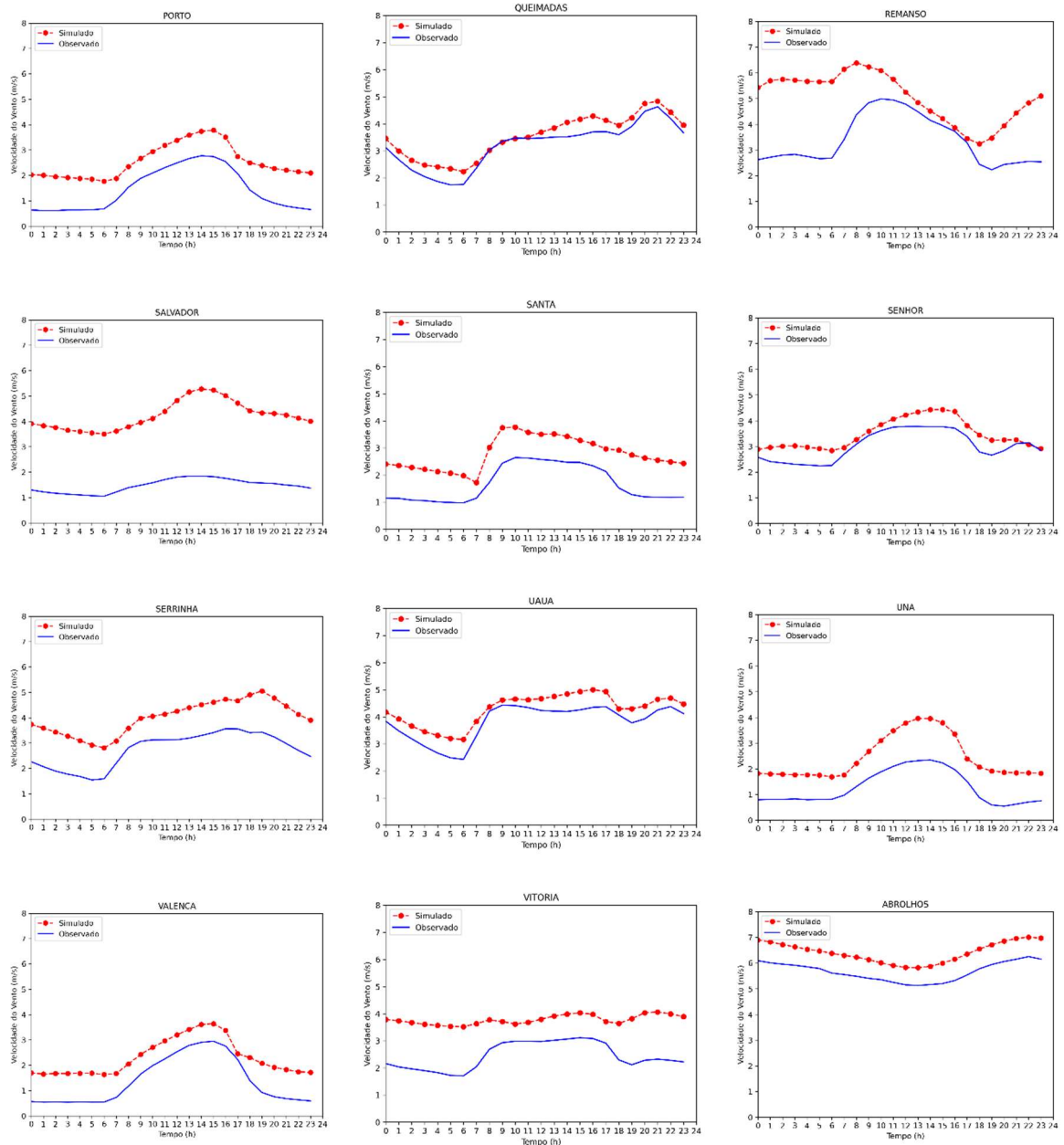


Figura 18 – Comportamento médio horário das velocidades do vento simuladas e observadas nas estações de superfície, considerando 24 h por um período de 5 anos

Os resultados mostraram tendência globalmente semelhante, apontando que o modelo foi capaz de capturar o comportamento geral da velocidade do vento, apesar das diferenças em termos de tempo e magnitude. As diferenças entre os dados modelados e observados são consistentes, porém as simulações tem a tendência de superestimar os dados medidos. Diferentemente, o modelo WRF subestima levemente a velocidade do vento em partes do dia nas estações de Caravelas (E8), localizada ao sul do estado, e Conde (E9), localizada no noroeste da Bahia, combinando muito bem os valores observados no intervalo de 00h às 10 h. Porém, subestima levemente os valores no início do período

noturno na estação de Conde, mas apresenta uma curva bem ajustada de 07 h às 16 h e, com valores ligeiramente subestimados das 16 h às 18 h para a estação de Caravelas. Outro período em que a velocidade do vento foi subestimada aparece na estação de Guanambi (E16), no centro-sul do estado, entre os horários de 10h às 18h. A estação de Macajuba (E28), situada no centro-norte baiano, também se destaca no período diurno de 08h às 17h, quando o comportamento médio horário da velocidade do vento simulado acompanha muito bem o observado.

A análise diurna mostra que a característica média horária da velocidade do vento é constante, com registros em torno de 2 a 6 m/s, para as estações *onshore*, mostrando valores mais elevados e constantes no Arquipélago de Abrolhos, variando entre 6 e 7 m/s. As estações de Conde (E9) e Queimadas (E32) das regiões Noroeste e Nordeste, respectivamente, e as estações de Caravelas (E8) e Ipiau (E18), das regiões Sul e Central, respectivamente, também tem boa concordância entre as curvas de dados simulados e observados durante 24 h. No entanto, uma análise estatística dos resultados das simulações da velocidade do vento em comparação com os dados medidos nas estações automáticas se faz necessária, a qual será apresentada a seguir.

### **5.2.2 Análise Estatística da Velocidade do Vento**

A validação por meio da estatística auxilia na identificação do potencial do modelo WRF na tentativa de alcançar a máxima precisão com dados observados nas estações de superfície. Nesta seção, as métricas estatísticas serão analisadas com o intuito de verificar a discrepância entre os dados de velocidade do vento simulados e observados. Concomitantemente a esta análise foi feito o ranqueamento das estações com relação ao desempenho das simulações frente às métricas analisadas por meio da aplicação do método OhitS (Objective hit Score) (PENCHAH *et al.*, 2017). Conforme mencionado anteriormente, valores baixos são melhores para os índices MB, RMSE e MAGE, e valores altos são melhores para os índices  $d_r$ , R e Fac2 em termos de precisão das simulações. No método OhitS, para o desvio padrão (DP), cada uma das simulações que apresentar o resultado mais próximo da observação correspondente obtém 41 pontos. A segunda melhor, obtém pontuação 40, e assim por diante; o pior resultado obtém pontuação 0. Para os índices MB, RMSE e MAGE,

as simulações ganham pontuações de 41 a 0 para mínimo e máximo, respectivamente. Assim, para os índices  $d_r$ , R e Fat2, ocorre o oposto.

A Tabela 19 mostra os resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da velocidade do vento das 42 estações automáticas. Entre parênteses encontra-se a pontuação OhitS recebida da respectiva métrica.

**TABELA 19 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTATÍSTICAS AO COMPARAR OS DADOS SIMULADOS E OBSERVADOS DA VELOCIDADE DO VENTO**

Pontos de Análise	MB	RMSE	MAGE	$d_r$	R	Fat2	difDP
E42-Abrolhos	0,728 (29)	2,260 (9)	1,675 (14)	0,591 (39)	0,544 (21)	87,517 (40)	-0,038 (37)
E1-Amargosa	2,550 (1)	3,033 (0)	2,664 (1)	0,097 (11)	0,492 (16)	59,815 (16)	-0,350 (7)
E2-Barra	2,138 (3)	2,637 (4)	2,253 (3)	-0,058 (6)	0,381 (3)	44,512 (5)	0,208 (13)
E3-Barreiras	0,927 (25)	1,740 (18)	1,385 (22)	0,313 (17)	0,364 (1)	54,949 (13)	0,096 (27)
E4-Belmonte	0,754 (28)	1,233 (40)	1,022 (39)	0,464 (26)	0,569 (27)	61,467 (17)	-0,035 (38)
E5-Bom J. da Lapa	1,485 (12)	2,297 (7)	1,800 (10)	-0,082 (4)	0,183 (0)	47,163 (6)	0,614 (0)
E6-Brumado	1,853 (8)	2,227 (10)	1,958 (8)	-0,008 (7)	0,551 (24)	41,865 (3)	0,251 (12)
E7-Buritirama	2,205 (2)	2,685 (2)	2,373 (2)	0,030 (8)	0,390 (4)	52,639 (12)	-0,187 (16)
E8-Caravelas	0,413 (39)	1,455 (31)	1,155 (30)	0,625 (41)	0,669 (40)	79,221 (33)	-0,326 (8)
E9-Conde	0,091 (41)	1,398 (35)	1,092 (35)	0,592 (40)	0,537 (20)	85,154 (37)	-0,317 (9)
E10-Correntina	1,185 (16)	1,683 (22)	1,400 (19)	0,033 (9)	0,451 (9)	51,352 (9)	0,443 (2)
E11-Cruz das Almas	0,991 (23)	1,588 (24)	1,299 (25)	0,482 (27)	0,648 (36)	74,366 (28)	0,048 (36)
E12-Curaca	1,111 (20)	1,738 (19)	1,398 (20)	0,315 (18)	0,546 (23)	82,247 (36)	0,283 (10)
E13-Delfino	1,165 (18)	1,676 (23)	1,393 (21)	0,407 (23)	0,647 (35)	69,979 (24)	0,100 (26)
E14-Feira de Santana	1,059 (22)	1,476 (28)	1,240 (27)	0,416 (24)	0,677 (41)	74,876 (30)	0,111 (23)
E15-Formoso do R. Preto	1,603 (10)	1,964 (14)	1,694 (13)	-0,072 (5)	0,492 (17)	37,147 (2)	0,355 (6)
E16-Guanambi	0,422 (38)	1,924 (15)	1,471 (16)	0,542 (35)	0,544 (22)	79,932 (35)	0,090 (30)
E17-Ibotirama	1,300 (14)	2,164 (12)	1,740 (11)	0,366 (22)	0,444 (8)	59,101 (15)	-0,102 (25)
E18-Ipiaú	0,475 (35)	1,099 (41)	0,855 (41)	0,528 (32)	0,606 (30)	61,605 (18)	-0,008 (41)
E19-Irece	2,053 (5)	2,648 (3)	2,222 (4)	0,237 (15)	0,481 (14)	65,963 (19)	-0,205 (14)
E20-Itaberaba	0,595 (31)	1,432 (32)	1,117 (34)	0,541 (34)	0,638 (33)	69,885 (23)	0,066 (32)
E21-Itamaraju	0,564 (33)	1,306 (37)	1,035 (38)	0,519 (31)	0,573 (28)	75,941 (32)	0,185 (17)
E22-Itapetinga	0,624 (30)	1,468 (29)	1,126 (33)	0,491 (28)	0,654 (38)	69,710 (22)	0,383 (4)
E23-Itiricu	1,536 (11)	2,023 (13)	1,704 (12)	0,175 (12)	0,471 (12)	67,564 (20)	0,030 (39)
E24-Jacobina	1,994 (6)	2,288 (8)	2,051 (7)	-0,088 (3)	0,486 (15)	43,641 (4)	-0,062 (33)
E25-Jeremoabo	0,756 (27)	1,432 (33)	1,133 (32)	0,515 (30)	0,660 (39)	79,359 (34)	0,158 (21)
E26-Lençóis	1,890 (7)	2,210 (11)	1,944 (9)	-0,259 (1)	0,373 (2)	30,344 (1)	0,263 (11)
E27-Luiz E. Magalhães	0,568 (32)	1,526 (26)	1,205 (29)	0,539 (33)	0,521 (19)	74,444 (29)	-0,392 (3)
E28-Macajuba	0,528 (34)	1,723 (21)	1,338 (23)	0,579 (37)	0,566 (25)	74,129 (27)	-0,381 (5)
E29-Marau	2,074 (4)	2,409 (6)	2,134 (5)	-0,096 (2)	0,429 (7)	49,346 (8)	-0,024 (40)
E30-Piata	0,984 (24)	1,777 (16)	1,464 (17)	0,351 (21)	0,414 (6)	70,647 (26)	-0,093 (29)
E31-Porto Seguro	1,095 (21)	1,419 (34)	1,215 (28)	0,318 (19)	0,644 (34)	51,754 (11)	0,088 (31)
E32-Queimadas	0,319 (40)	1,380 (36)	1,077 (37)	0,579 (38)	0,590 (29)	85,489 (38)	-0,180 (18)
E33-Remanso	1,621 (9)	2,566 (5)	2,059 (6)	0,350 (20)	0,468 (11)	68,734 (21)	0,123 (22)
E34-Salvador	2,762 (0)	2,960 (1)	2,774 (0)	-0,640 (0)	0,521 (18)	12,633 (0)	0,595 (1)
E35-Santa R. de Cássia	1,130 (19)	1,573 (25)	1,325 (24)	0,204 (13)	0,460 (10)	55,134 (14)	0,173 (19)
E36-Senhor do Bonfim	0,446 (37)	1,291 (38)	1,015 (40)	0,513 (29)	0,473 (13)	87,041 (39)	-0,094 (28)
E37-Serrinha	1,272 (15)	1,729 (20)	1,446 (18)	0,300 (16)	0,623 (32)	75,266 (31)	0,169 (20)
E38-Uauá	0,461 (36)	1,468 (30)	1,144 (31)	0,549 (36)	0,566 (26)	88,831 (41)	-0,111 (24)
E39-Una	1,171 (17)	1,507 (27)	1,281 (26)	0,207 (14)	0,612 (31)	51,396 (10)	0,201 (15)
E40-Valença	0,922 (26)	1,277 (39)	1,083 (36)	0,421 (25)	0,652 (37)	48,335 (7)	-0,062 (34)
E41-Vitória da Conquista	1,356 (13)	1,772 (17)	1,502 (15)	0,095 (10)	0,391 (5)	70,261 (25)	0,057 (35)

Observa-se que, dos 42 pontos de análise, o MB geral foi positivo, indicando uma tendência a superestimar a velocidade do vento. Nota-se que a maioria das estações não atingiram o limite estatístico sugerido por Emery *et al.* (2001) para este indicador. Porém, sete delas alcançaram  $-0,5 < MB \leq 0,5$  m/s: Conde (E9), Queimadas (E32), Caravelas (E8), Guanambi (E16), Senhor do Bonfim (E36), Uaua (E38) e Ipiau (E18). Os melhores resultados para este indicador aparecem para Conde (0,09). Em contrapartida, os maiores desvios são encontrados para Salvador (E34), Amargosa (E1) e Buritirama (E7), com 2,76, 2,55 e 2,20, respectivamente. Abrolhos (E42) foi a 15ª estação automática com melhor MB, com valor de 0,73.

Em geral, o RMSE das estações expressou boa acurácia, com 67% das estações com este índice dentro do benchmark recomendado por Emery *et al.* (2001) ( $RMSE < 2,0$  m/s). A estação de Ipiau apresentou a melhor resposta para este indicador (1,09), da mesma forma, MAGE de 0,85. Amargosa apresentou o pior índice RMSE (3,03), com MAGE de 2,66. A estação de Salvador apresentou o pior desempenho para o MAGE dentre as estações automáticas com o valor de 2,77. Da mesma forma, Abrolhos também não obteve bom desempenho para os índices RMSE (2,26) e MAGE (1,67).

Na análise do índice de Willmot ( $d_r$ ), Caravelas obteve grande destaque com valores acima de 0,6, indicando que o ajuste entre as velocidades observadas e as previstas é muito bom. Abrolhos, no mar, também apresentou ótimo resultado com  $d_r$  de 0,59. Mais uma vez, a estação de Salvador destacou-se por apresentar o pior desempenho (-0,64). Ressalta-se que os valores de  $d_r$  de Willmot *et al.* (2012) revisado são menores do que se fosse utilizado o antigo índice de concordância (IOA) desenvolvido por Willmott (1981). Devido a este fato, considera-se que, em geral, as simulações obtiveram bons desempenhos, com 45,2% dos pontos analisados com valores entre 0,41 a 0,63.

No que diz respeito ao coeficiente de correlação R, a estação de Feira de Santana (E14) foi a que apresentou mais forte correlação entre as velocidades do vento simulada e observada com  $R=0,67$ , e o pior resultado observado foi em Bom Jesus da Lapa (E5), com fraca correlação entre os dados ( $R = 0,18$ ). Somente 29% dos pontos de análise indicaram um bom ajuste para o coeficiente de correlação (acima de 0,6). As prováveis origens para essa baixa correlação podem estar relacionadas a

utilização do mesmo conjunto de esquemas de parametrizações físicas, particularmente para a PBL, nas simulações para todo o estado da Bahia, além do fato da existência algumas lacunas na série de dados medidos, bem como da localização inadequada do equipamento meteorológico de medição. Sistemáticamente, os valores obtidos nas simulações da velocidade do vento foram semelhantes quando comparados a estudos similares, tais como Kitagawa *et al.* (2017) que realizou estudo na Região Metropolitana de Salvador, capital do estado da Bahia.

Analisando-se o índice Fac2, nas estações automáticas variou entre 30% (E26 – Lençóis) a 89% (E38 - Uaua), excetuando-se o pior desempenho na estação de Salvador, com 13%. O segundo melhor desempenho foi de Abrolhos com Fac2 de 88%. Observa-se que as simulações comparadas com os dados das estações de superfície não obtiveram bons resultados como nas torres equipadas com vários anemômetros em altitudes diferentes, conforme o trabalho de Souza *et al.* (2021). Isto sugere a utilização do modelo em gerar melhores informações em alturas típicas do rotor do aerogerador (a partir de 80m) do que nas alturas padrão de medição da velocidade do vento (altura de 10m) (ARGÜESO; BUSINGER, 2018). Em altitude, o modelo pode representar melhor as informações se comparada a baixa altitude devido a distorção na integração da topografia (orografia e costa), variações acentuadas nas características aerodinâmicas (ou seja, comprimento da rugosidade) e, também, devido às heterogeneidades do uso e estado do solo (temperatura e umidade).

Em complemento a análise estatística, optou-se por verificar a diferença (difDP) entre os desvios padrões dos dados simulados (dpS) e observados (dpO) da velocidade do vento das séries estudadas. A estação de Ipiau teve o melhor desempenho neste indicador. Assim, levando-se em conta todas as pontuações obtidas em cada ponto de análise, a Tabela 20 sumariza as respectivas pontuações (ranking OhitS). A partir dela, pode-se mostrar quais localidades alcançaram melhores resultados nas simulações diante a todas as métricas estatísticas examinadas. Assim, Ipiau é a melhor, seguida por Queimadas, Uaua, Senhor do Bonfim e Caravelas. As estações de Buritirama (E7), Lençóis (E26), Bom Jesus da Lapa (E5), Barra (E2) e Salvador (E34), apresentaram os piores resultados.

**TABELA 20 - RANKING OHITS PARA A VELOCIDADE DO VENTO**

Ranking OhitS	Estações de superfície	Soma das pontuações
1	Ipiaú	238
2	Queimadas	236
3	Senhor do Bonfim	224
4	Uauá	224
5	Caravelas	222
6	Itaberaba	219
7	Conde	217
8	Itamaraju	216
9	Jeremoabo	216
10	Belmonte	215
11	Valença	204
12	Cruz das Almas	199
13	Feira de Santana	195
14	Guanambi	191
15	Abrolhos	189
16	Itapetinga	184
17	Porto Seguro	178
18	Macajuba	172
19	Luiz E. Magalhães	171
20	Delfino	170
21	Serrinha	152
22	Curacá	146
23	Uma	140
24	Piata	139
25	Santa R. de Cássia	124
26	Barreiras	123
27	Vitória da Conquista	120
28	Itirucu	119
29	Ibotirama	107
30	Remanso	94
31	Correntina	86
32	Jacobina	76
33	Irece	74
34	Brumado	72
35	Marau	72
36	Formoso do Rio Preto	67
37	Amargosa	52
38	Buritirama	46
39	Lençóis	42
40	Bom Jesus da Lapa	39
41	Barra	37
42	Salvador	20

### 5.2.3 Análise Estatística da Direção do Vento

A Tabela 21 apresenta as métricas estatísticas da direção do vento, comparando os valores simulados com os observados a 10m para as estações de superfície.

**TABELA 21 - RESULTADOS DAS MÉTRICAS ESTADÍSTICAS AO COMPARAR OS DADOS SIMULADOS E OBSERVADOS DA DIREÇÃO DO VENTO**

Estação	MB	RMSE	MAGE	$d_r$	R	Fat2	difDP
Abrolhos	-19,623 (4)	41,811 (38)	30,530 (33)	0,673 (33)	0,387 (40)	77,617 (22)	7,699 (23)
Amargosa	-5,888 (21)	38,448 (40)	25,005 (40)	0,591 (16)	0,356 (35)	92,948 (38)	3,501 (34)
Barra	3,445 (31)	75,560 (8)	55,967 (10)	0,674 (34)	0,147 (3)	56,989 (0)	24,802 (6)
Barreiras	-10,801 (13)	86,071 (2)	69,820 (1)	0,620 (23)	0,338 (31)	63,093 (3)	1,129 (38)
Belmonte	-9,700 (15)	73,411 (10)	52,014 (12)	0,665 (32)	0,309 (27)	69,091 (13)	3,641 (33)
Bom J. da Lapa	-6,353 (20)	81,391 (7)	64,865 (5)	0,475 (4)	0,107 (1)	68,811 (12)	12,644 (16)
Brumado	-17,822 (5)	68,046 (16)	51,771 (13)	0,600 (19)	0,088 (0)	59,070 (1)	28,967 (2)
Buritirama	-1,767 (37)	66,526 (18)	48,361 (18)	0,682 (36)	0,215 (13)	65,175 (7)	2,665 (36)
Caravelas	-1,750 (38)	59,541 (25)	38,914 (24)	0,767 (41)	0,334 (30)	72,697 (16)	15,443 (15)
Conde	-13,615 (10)	59,918 (24)	37,773 (25)	0,622 (25)	0,242 (18)	85,055 (28)	26,692 (4)
Corretina	-11,889 (12)	88,664 (0)	70,283 (0)	0,600 (18)	0,229 (16)	66,393 (11)	3,842 (32)
Cruz das Almas	-14,261 (8)	46,542 (29)	31,690 (29)	0,590 (15)	0,279 (24)	89,724 (34)	5,517 (28)
Curaca	1,608 (39)	43,582 (33)	27,891 (36)	0,563 (12)	0,155 (6)	88,362 (31)	7,577 (24)
Delfino	-4,717 (26)	63,149 (21)	42,992 (22)	0,569 (14)	0,182 (9)	77,590 (21)	24,775 (7)
Feira de Santana	-3,763 (29)	46,407 (30)	29,708 (34)	0,616 (21)	0,254 (20)	89,407 (33)	15,888 (12)
Formoso do R. Preto	-7,870 (17)	84,095 (3)	65,104 (4)	0,593 (17)	0,208 (11)	64,583 (6)	15,925 (11)
Guanambi	12,831 (11)	54,781 (27)	36,903 (27)	0,479 (5)	0,366 (36)	87,584 (30)	7,397 (25)
Ibotirama	-1,541 (40)	82,411 (6)	64,260 (6)	0,567 (13)	0,170 (8)	65,180 (8)	4,525 (31)
Ipiauí	-3,446 (30)	86,536 (1)	69,191 (2)	0,621 (24)	0,151 (5)	63,109 (4)	21,620 (8)
Irece	-5,551 (22)	42,236 (37)	25,803 (39)	0,538 (11)	0,267 (21)	91,098 (35)	6,197 (27)
Itaberaba	-6,795 (19)	65,903 (19)	47,716 (20)	0,465 (3)	0,159 (7)	74,406 (18)	9,873 (21)
Itamaraju	-1,799 (36)	64,775 (20)	45,056 (21)	0,736 (39)	0,389 (41)	69,113 (14)	1,508 (37)
Itapetinga	5,269 (25)	70,020 (13)	51,019 (14)	0,642 (29)	0,282 (25)	73,251 (17)	18,658 (9)
Itiricu	-10,162 (14)	44,804 (31)	31,553 (30)	0,692 (37)	0,302 (26)	79,928 (24)	15,554 (14)
Jacobina	23,452 (1)	63,128 (22)	49,125 (16)	0,456 (2)	0,247 (19)	76,030 (20)	30,138 (1)
Jeremoabo	3,171 (33)	43,046 (35)	25,856 (38)	0,510 (6)	0,212 (12)	92,671 (37)	16,261 (10)
Lençóis	-8,696 (16)	72,162 (12)	59,114 (8)	-0,054 (0)	0,149 (4)	85,946 (29)	35,457 (0)
Luiz E. Magalhães	-6,945 (18)	69,171 (14)	50,213 (15)	0,627 (26)	0,347 (34)	75,095 (19)	5,128 (29)
Macajuba	-21,236 (2)	84,042 (4)	63,574 (7)	0,534 (9)	0,135 (2)	71,701 (15)	28,213 (3)
Marau	-19,825 (3)	60,045 (23)	41,430 (23)	0,662 (31)	0,366 (37)	80,986 (25)	15,749 (13)
Piata	-24,452 (0)	74,784 (9)	57,837 (9)	0,516 (7)	0,317 (28)	65,708 (10)	25,217 (5)
Porto Seguro	-3,266 (32)	68,081 (15)	48,171 (19)	0,726 (38)	0,271 (22)	64,448 (5)	6,869 (26)
Queimadas	-3,095 (34)	39,437 (39)	26,601 (37)	0,534 (10)	0,279 (13)	94,319 (41)	0,917 (39)
Remanso	14,451 (6)	56,030 (26)	37,765 (26)	0,603 (20)	0,225 (15)	81,103 (26)	12,418 (18)
Salvador	0,262 (41)	43,217 (34)	30,738 (31)	0,675 (35)	0,340 (33)	88,472 (32)	12,624 (17)
Santa R. de Cássia	5,369 (24)	84,025 (5)	65,289 (3)	0,628 (27)	0,201 (10)	61,740 (2)	7,730 (22)
Senhor do Bonfim	14,344 (7)	47,573 (28)	34,123 (28)	0,438 (1)	0,230 (17)	92,999 (39)	4,715 (30)
Serrinha	-13,701 (9)	44,403 (32)	30,619 (32)	0,617 (22)	0,375 (39)	91,590 (36)	12,270 (19)
Uauá	-4,355 (27)	36,320 (41)	23,065 (41)	0,521 (8)	0,224 (14)	93,565 (40)	3,089 (35)
Una	3,988 (28)	66,641 (17)	48,984 (17)	0,746 (40)	0,339 (32)	65,495 (9)	10,814 (20)
Valença	-2,838 (35)	72,714 (11)	53,851 (11)	0,635 (28)	0,326 (29)	78,208 (23)	0,539 (40)
Vitória da Conquista	5,527 (23)	42,909 (36)	29,147 (35)	0,661 (30)	0,372 (38)	83,028 (27)	0,275 (41)

Nota-se, em geral, que as estações de superfície apresentaram menor MB, ficando a maior parte das estações (71%) com este índice dentro do benchmark recomendado por Emery *et al.* (2001) a 10m ( $-10 < MB < 10^0$ ). Para a maioria das estações, as simulações apresentaram desvios negativos, ou seja, a direção do vento modelada foi deslocada no sentido anti-horário quando comparada às observações. Os valores do índice  $d_r$  variaram entre  $-0,054 \sim 0,767$  para as estações. As estações automáticas, em geral, apresentaram altos valores para o índice MAGE. As exceções foram Uauá

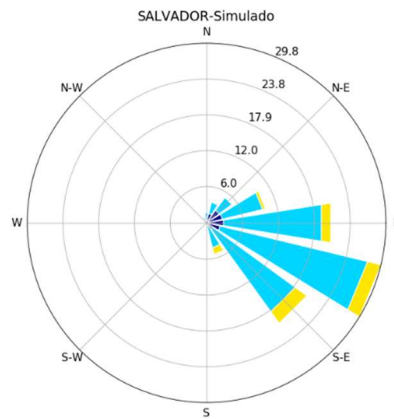
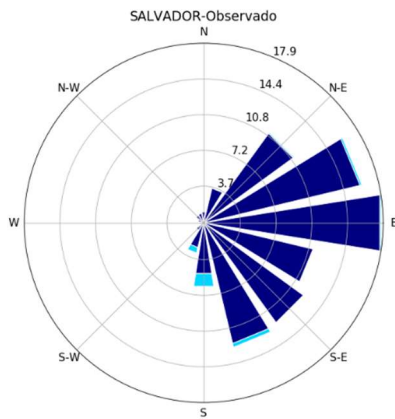
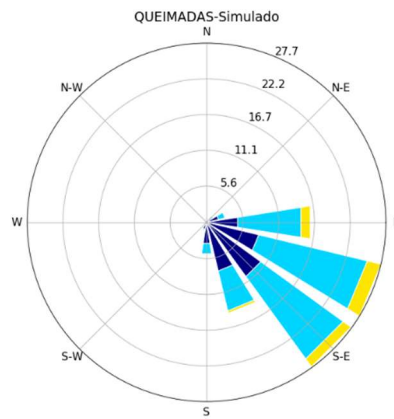
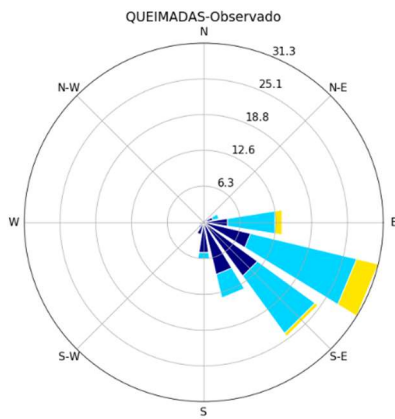
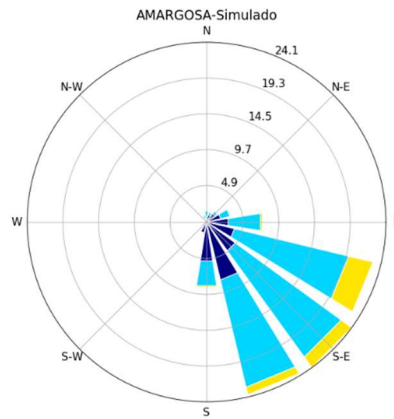
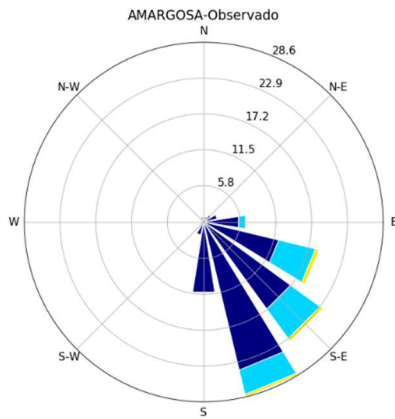
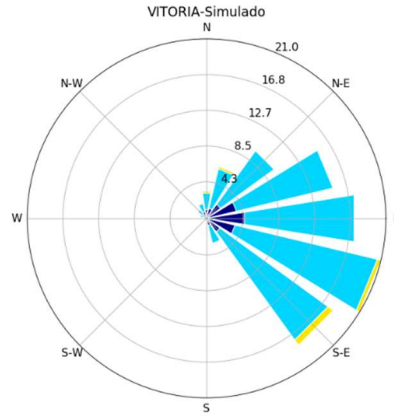
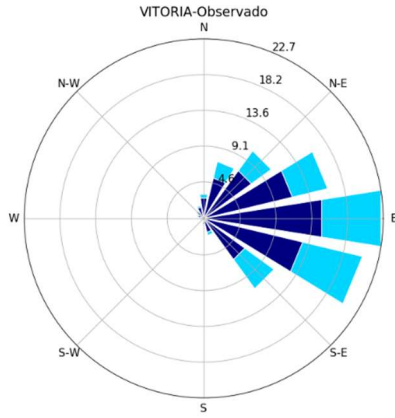
(23,06), Amargosa (25,00), Irece (25,80), Jeremoabo (25,85), Queimadas ( 26,60), Curaca (27,89), Vitória da Conquista (29,15) e Feira de Santana (29,15), que apresentaram  $MAGE < 30^\circ$ . Observa-se que as estações que obtiveram valores dentro dos limites estatísticos sugerido por Emery *et al.* (2001) para  $MAGE$  também alcançaram os valores de benchmarks para o índice MB. Entretanto, o teste da correlação estatística mostrou, em geral, fraca correlação dos dados de direção do vento, sendo que a estação de Itamaraju (E21) ( $R = 0,39$ ) e Abrolhos ( $R = 0,39$ ) apresentaram os maiores valores de  $R$ . Ressalta-se que os cálculos estatísticos para a direção do vento utilizam médias escalares, e não vetoriais, o que explica os menores valores de correlações para a direção do vento, visto que esta grandeza é de natureza vetorial. Assim, a correlação pode não representar a realidade quando a direção do vento está próxima de  $360^\circ$ . Outro ponto importante está no fato de que a avaliação estatística da direção do vento não é suficiente para avaliar a confiabilidade dos dados modelados, pois os erros geralmente se tornam grandes a baixas velocidades do vento (JIMÉNEZ; DUDHIA, 2013). Portanto, as rosas dos ventos foram produzidas no sentido de mostrar resultados visuais comparativos entre direção e velocidade do vento em cada ponto de análise. Uma vez que Vitória da Conquista, Amargosa, Queimadas, Salvador, Itamaraju e Uaua obtiveram melhores indicadores estatísticos para a direção do vento, nesta ordem, suas respectivas rosas dos ventos foram selecionadas a fim de observar se o modelo WRF conseguiu captar de forma satisfatória a predominância da direção do vento. Estes resultados são mostrados na Tabela 22 com o ranking OhitS para a direção do vento.



TABELA 22 - RANKING OHITS PARA A DIREÇÃO DO VENTO

Ranking OhitS	Estações de superfície	Soma das pontuações
1	Vitória da Conquista	230
2	Amargosa	224
3	Queimadas	223
4	Salvador	223
5	Itamaraju	208
6	Uaua	206
7	Abrolhos	193
8	Irece	192
9	Caravelas	189
10	Serrinha	189
11	Curaca	181
12	Feira de Santana	179
13	Valença	177
14	Itiricu	176
15	Jeremoabo	171
16	Cruz das Almas	167
17	Buritirama	165
18	Uma	163
19	Guanambi	161
20	Porto Seguro	157
21	Luiz E. Magalhães	155
22	Marau	155
23	Senhor do Bonfim	150
24	Belmonte	142
25	Remanso	137
26	Conde	134
27	Itapetinga	132
28	Delfino	120
29	Ibotirama	112
30	Barreiras	111
31	Itaberaba	107
32	Santa R. de Cássia	93
33	Barra	92
34	Correntina	89
35	Jacobina	81
36	Ipiaú	74
37	Formoso	69
38	Lençóis	69
39	Piata	68
40	Bom Jesus da Lapa	65
41	Brumado	56
42	Macajuba	42

A Figura 19 mostra as rosas dos ventos, considerando-se o período compreendido entre agosto de 2015 e julho de 2020 (5 anos de dados).



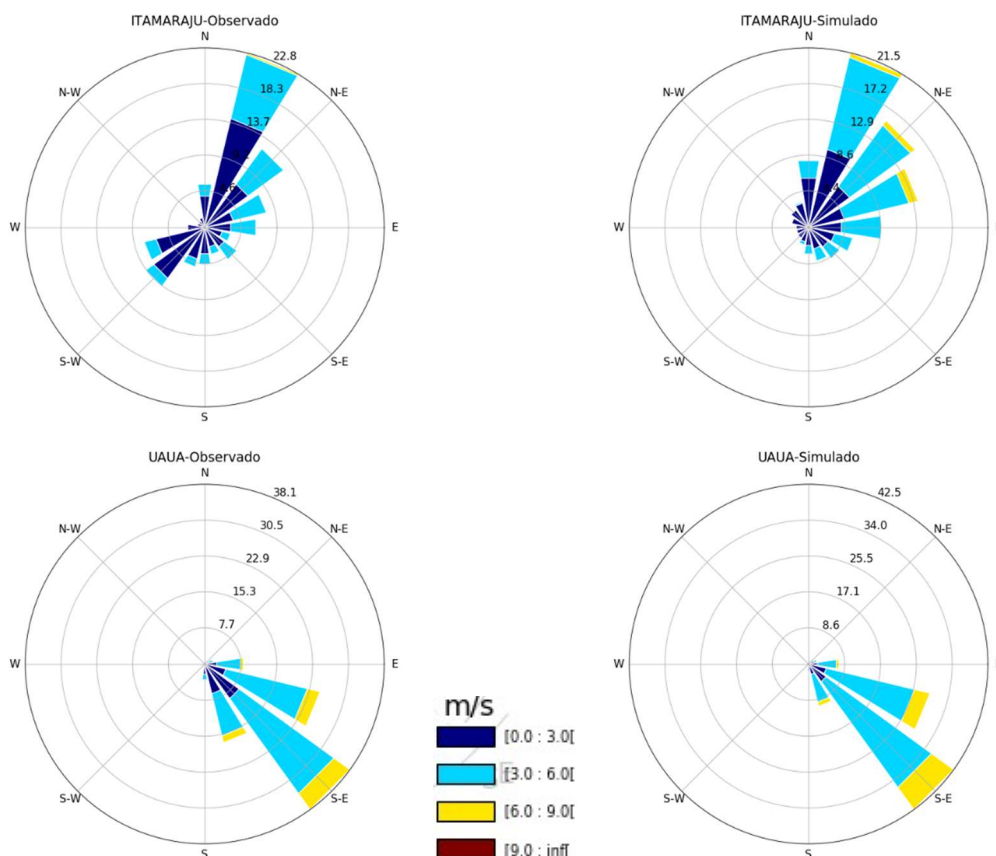


Figura 19 – Comparação das rosas dos ventos obtidas através das observações e simulações nas estações de Vitória da Conquista, Amargosa, Queimadas, Salvador, Itamaraju e Uaua

Na média, a predominância de ventos é nas direções leste e sudeste, com exceções de Itamaraju, com ventos entre norte e nordeste. Os resultados das simulações são condizentes com as observações, embora haja uma superestimação das magnitudes da velocidade do vento observadas nas estações de Vitória da Conquista, Amargosa e Salvador. As estações de Queimadas, Itamaraju e Uaua, as quais possuem as rosas dos ventos mais aproximadas entre o observado e o simulado estão entre o Top10 das estações com valores para velocidade do vento mais aderentes ao observado, como pode ser visto na Tabela 20. A comparação das rosas dos ventos (observada e simulada) para todas as estações podem ser observadas no Apêndice G. Por fim, vale destacar que a estação de Salvador aparece no último lugar do rankign OhitS para velocidade do vento, porém em boa colocação para a variável direção do vento.

### 5.3 CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE DA VELOCIDADE DO VENTO (DFA)

Os dados medidos e simulados foram submetidos à análise de flutuação descontínua, ou seja, a tendência das séries temporais foi retirada em diferentes escalas, o que permitiu a análise das flutuações intrínsecas dos dados. Assim, é possível registrar a existência de correlação entre as séries e a lei de potência. Assim, o comportamento previsível da série de potências pode permitir previsões da energia eólica local.

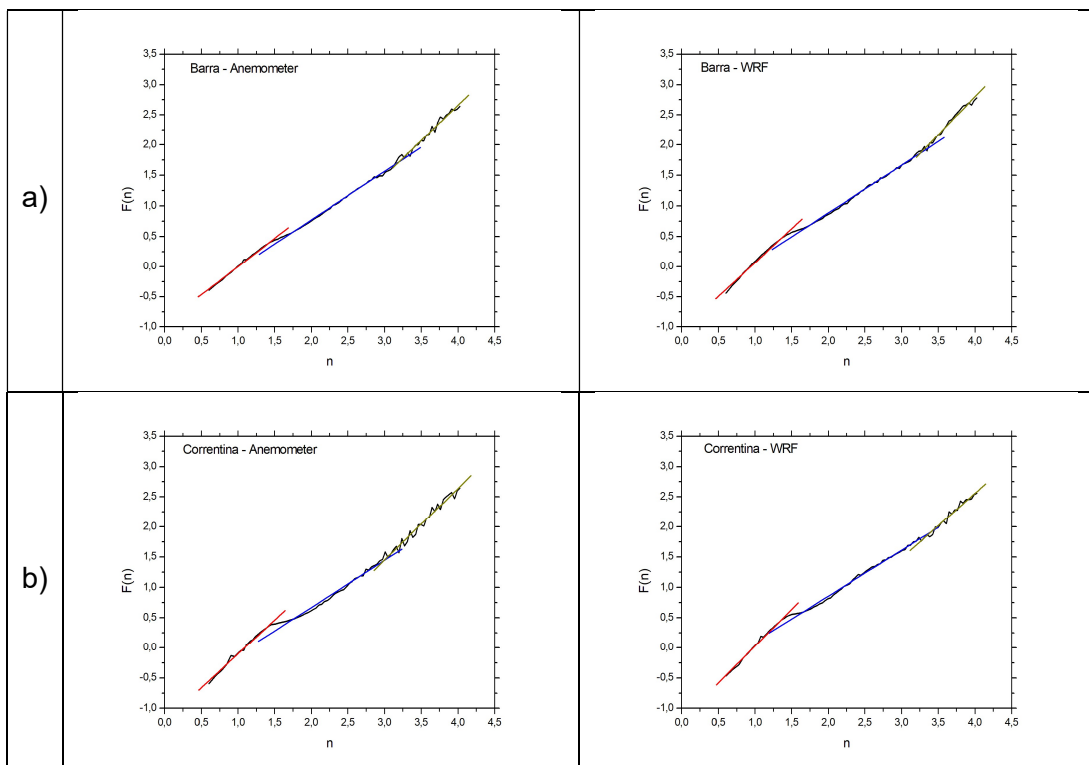
A Tabela 23 mostra a análise do parâmetro expoente em um ajuste de mínimos quadrados para a verificação do coeficiente ( $n$ ) na lei de potência associada. Do lado esquerdo estão os resultados das séries de dados com médias horárias e, do lado direito, com os dados médios diários de cada uma das 42 estações automáticas.

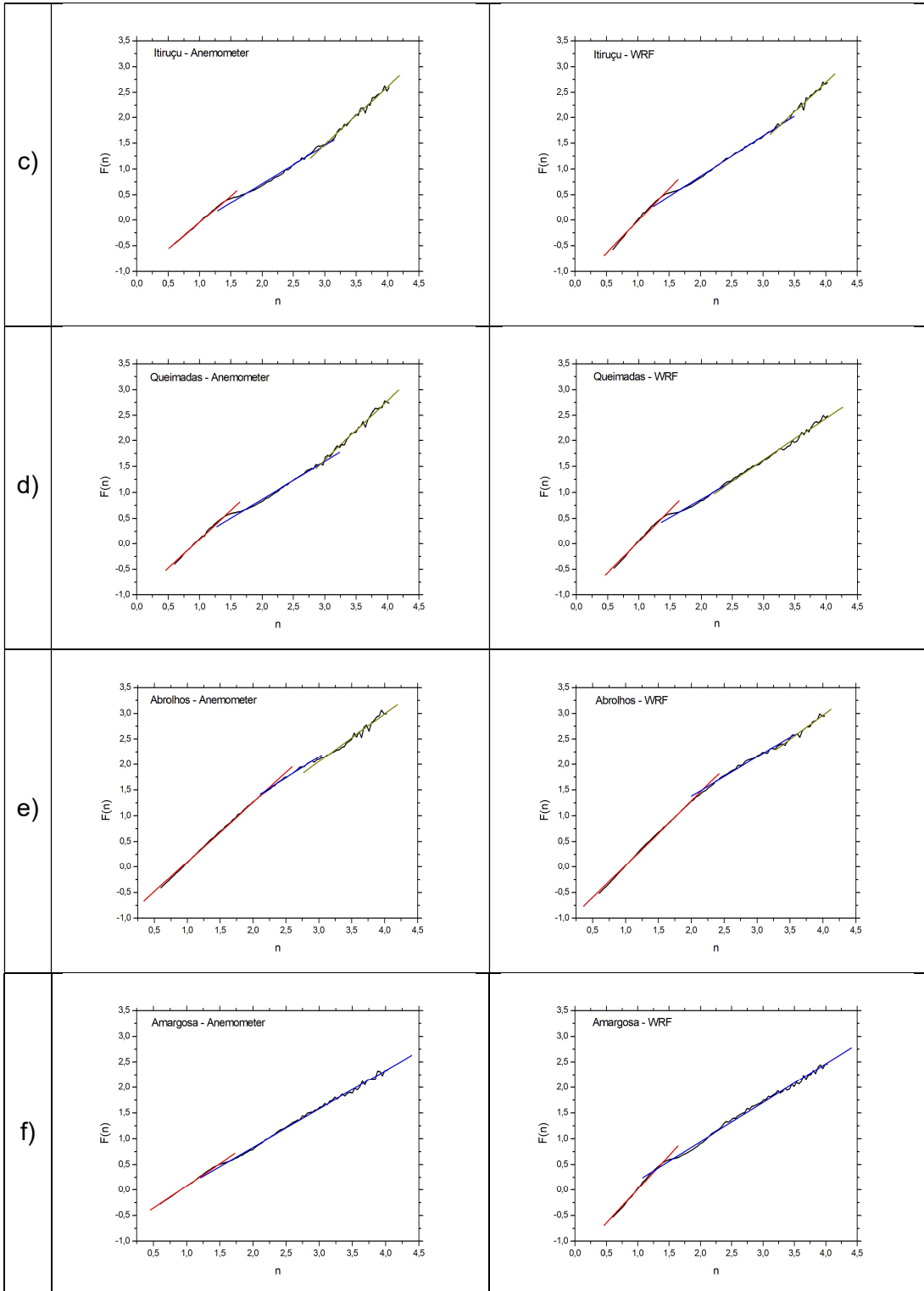
TABELA 23 - COMPARAÇÃO DE EXPOENTES DE ESCALA DE DADOS REAIS E SIMULADOS EM MÉDIAS HORÁRIAS E DIÁRIAS

Local	Elevação (m)	Valores do expoente da escala F(n)/n																							
		Dados em medias horárias												Dados em medias diárias											
		Anemômetro						Simulação WRF						Anemômetro						Simulação WRF					
		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
E1-Amargosa	407	0,90	0,01	0,74	0,01	-	-	1,31	0,01	0,76	0,01	-	-	0,89	0,02	-	-	-	-	0,86	0,02	0,74	0,03	-	-
E2-Barra	403	0,92	0,01	0,7	0,01	1,14	0,03	1,12	0,02	0,77	0,01	1,26	0,04	0,86	0,01	1,23	0,05	-	-	0,82	0,01	1,26	0,04	-	-
E3-Barreiras	470	0,99	0,02	0,67	0,01	1,18	0,02	1,11	0,02	0,79	0,01	-	-	0,92	0,02	1,25	0,06	-	-	0,88	0,01	-	-	-	-
E4-Belmonte	88	1,28	0,03	0,73	0,01	0,97	0,02	1,21	0,02	0,81	0,01	1,10	0,04	0,88	0,02	1,03	0,05	-	-	0,90	0,03	1,06	0,03	-	-
E5-Bom Jesus da Lapa	440	0,85	0,01	0,75	0,01	0,94	0,01	1,26	0,02	0,64	0,01	0,92	0,01	0,90	0,01	-	-	-	-	0,81	0,01	1,33	0,06	-	-
E6-Brumado	470	0,92	0,02	0,73	0,02	1,10	0,04	1,32	0,03	0,70	0,02	0,94	0,03	0,97	0,01	1,29	0,04	-	-	0,95	0,01	-	-	-	-
E7-Buritirama	506	0,85	0,02	0,72	0,01	1,16	0,03	1,10	0,03	0,77	0,01	1,34	0,01	0,94	0,01	1,12	0,01	-	-	0,85	0,01	1,34	0,04	-	-
E8-Caravelas	3	1,30	0,02	0,78	0,01	1,20	0,06	1,30	0,03	0,85	0,01	1,15	0,10	0,82	0,02	1,15	0,03	-	-	0,88	0,02	1,12	0,03	-	-
E9-Conde	32	1,18	0,02	0,77	0,01	1,27	0,05	1,33	0,04	0,82	0,01	-	-	0,81	0,01	1,29	0,05	-	-	0,88	0,02	1,01	0,05	-	-
E10-Correntina	549	1,14	0,03	0,76	0,02	1,18	0,04	1,21	0,03	0,75	0,01	1,07	0,04	1,04	0,02	-	-	-	-	0,79	0,02	1,13	0,05	-	-
E11-Cruz das Almas	226	1,31	0,02	0,64	0,02	1,01	0,02	1,40	0,03	0,66	0,01	1,08	0,01	0,90	0,01	-	-	-	-	0,96	0,02	0,86	0,02	-	-
E12-Curaça	370	0,99	0,02	0,94	0,01	-	-	1,25	0,04	0,65	0,02	0,90	0,01	0,95	0,01	1,16	0,03	-	-	0,92	0,02	1,06	0,03	-	-
E13-Umburanas (Delfino)	637	1,17	0,03	0,77	0,01	0,87	0,02	1,23	0,03	0,84	0,01	-	-	0,94	0,01	-	-	-	-	0,91	0,01	0,97	0,02	-	-
E14-Feira de Santana	231	1,35	0,03	0,59	0,01	1,16	0,04	1,37	0,03	0,56	0,02	1,18	0,02	0,87	0,01	1,17	0,04	-	-	0,80	0,02	1,29	0,02	-	-
E15-Formosa do Rio Preto	488	1,20	0,03	0,79	0,02	1,47	0,14	1,16	0,02	0,78	0,01	1,29	0,12	0,93	0,02	1,35	0,05	-	-	0,88	0,01	1,25	0,04	-	-
E16-Guanambi	882	0,92	0,01	-	-	-	-	1,15	0,04	0,94	0,01	-	-	0,87	0,01	1,19	0,06	-	-	0,89	0,01	1,17	0,05	-	-
E17-Ibotirama	430	0,86	0,01	-	-	-	-	1,04	0,02	0,81	0,01	1,18	0,05	0,89	0,01	1,32	0,08	-	-	0,81	0,01	1,22	0,06	-	-
E18-Ipiaú	125	1,25	0,04	0,51	0,02	1,12	0,03	1,24	0,04	0,65	0,01	0,83	0,03	0,83	0,01	0,86	0,02	-	-	0,83	0,03	0,86	0,02	-	-
E19-Irecê	755	0,85	0,01	-	-	-	-	0,97	0,01	-	-	-	-	0,92	0,01	1,17	0,03	-	-	1,05	0,03	0,78	0,03	-	-
E20-Itaberaba	249	1,19	0,02	0,62	0,01	1,17	0,02	1,30	0,04	0,69	0,01	1,12	0,01	0,87	0,01	1,27	0,04	-	-	0,82	0,01	1,04	0,03	-	-
E21-Itamaraju	110	0,86	0,01	-	-	-	-	0,90	0,01	-	-	-	-	0,82	0,02	1,06	0,03	-	-	0,94	0,01	1,08	0,03	-	-
E22-Itapetinga	269	1,27	0,03	0,58	0,02	1,29	0,03	1,37	0,03	0,53	0,08	1,20	0,03	0,86	0,02	1,30	0,02	-	-	0,87	0,01	1,24	0,03	-	-
E23-Itiruçu	756	1,04	0,02	0,74	0,03	1,15	0,03	1,26	0,03	0,77	0,01	1,16	0,04	0,84	0,01	1,22	0,03	-	-	1,81	0,01	1,18	0,04	-	-
E24-Jacobina	453	1,12	0,03	0,76	0,01	1,14	0,02	1,13	0,03	0,87	0,01	-	-	0,88	0,01	1,14	0,04	-	-	0,83	0,01	0,87	0,02	-	-
E25-Jeremoabo	261	1,29	0,04	0,65	0,02	1,20	0,03	1,30	0,04	0,72	0,01	0,97	0,03	0,89	0,01	1,29	0,04	-	-	0,84	0,01	-	-	-	-
E26-Lençóis	439	0,71	0,01	-	-	-	-	1,09	0,03	0,79	0,01	-	-	0,88	0,01	0,83	0,02	-	-	0,88	0,02	0,83	0,02	-	-
E27-Luiz Eduardo	754	1,05	0,02	0,91	0,01	-	-	0,89	0,01	-	-	-	-	0,86	0,01	1,21	0,08	-	-	0,85	0,01	1,30	0,05	-	-
E28-Macajuba	380	1,18	0,02	0,68	0,02	1,09	0,02	1,30	0,03	0,68	0,01	0,98	0,03	0,86	0,01	1,20	0,02	-	-	0,84	0,02	0,97	0,02	-	-
E29-Marau	10.	1,08	0,01	0,77	0,01	0,96	0,03	0,90	0,01	-	-	-	-	0,85	0,01	-	-	-	-	0,84	0,01	-	-	-	-
E30-Piatã	1290	0,85	0,01	-	-	-	-	1,26	0,03	0,86	0,01	-	-	0,79	0,01	1,09	0,09	-	-	0,84	0,02	1,06	0,06	-	-
E31-Porto Seguro	85	1,35	0,04	0,64	0,02	1,16	0,03	1,19	0,03	0,89	0,01	-	-	1,02	0,01	-	-	-	-	0,89	0,02	1,15	0,03	-	-
E32-Queimadas	315	1,18	0,02	0,71	0,01	1,16	0,02	1,13	0,03	0,70	0,02	0,81	0,01	0,89	0,01	1,19	0,04	-	-	0,81	0,01	-	-	-	-
E33-Remanso	401	1,13	0,02	0,80	0,01	1,23	0,03	1,33	0,03	0,95	0,01	-	-	0,95	0,01	1,29	0,02	-	-	0,94	0,01	1,29	0,04	-	-
E34-Salvador	51.	1,11	0,02	0,85	0,01	-	-	1,23	0,03	0,88	0,02	0,72	0,01	0,90	0,01	0,72	0,04	-	-	1,05	0,03	0,71	0,01	-	-
E35-Santa Rita de Cássia	450	1,11	0,03	0,75	0,01	1,34	0,04	1,11	0,02	0,77	0,01	1,22	0,10	0,89	0,01	1,15	0,01	-	-	0,84	0,01	1,12	0,03	-	-
E36-Senhor do Bonfim	539	1,10	0,02	0,85	0,01	-	-	1,21	0,02	0,79	0,01	-	-	0,86	0,01	1,01	0,03	-	-	0,98	0,02	0,75	0,01	-	-
E37-Serrinha	339	1,27	0,02	0,60	0,01	1,19	0,02	1,37	0,03	0,65	0,01	1,25	0,08	0,78	0,01	1,22	0,01	-	-	0,78	0,02	1,29	0,02	-	-
E38-Jauá	453	1,09	0,02	0,89	0,01	-	-	1,16	0,03	0,88	0,01	-	-	0,94	0,01	-	-	-	-	0,95	0,01	0,88	0,03	-	-
E39-Uma	74	1,14	0,02	0,78	0,01	-	-	1,29	0,03	0,65	0,02	0,96	0,02	1,08	0,02	0,79	0,01	-	-	0,98	0,02	1,03	0,02	-	-
E40-Valença	105	1,34	0,04	0,45	0,02	1,09	0,02	1,25	0,03	0,61	0,02	0,91	0,02	1,01	0,01	-	-	-	-	0,86	0,01	0,98	0,02	-	-
E41-Vitória da Conquista	875	1,08	0,01	0,85	0,01	-	-	1,16	0,03	0,87	0,01	-	-	0,78	0,01	1,08	0,02	-	-	0,78	0,01	1,20	0,04	-	-
E42-Abrolhos	15	1,17	0,01	0,82	0,02	0,93	0,03	1,25	0,01	0,77	0,01	0,94	0,04	0,85	0,02	0,93	0,03	-	-	0,98	0,02	0,80	0,02	-	-

Observa-se na Tabela 23 que na maioria das estações meteorológicas que utilizam médias horárias nos dados medidos (~67%) e simulados (~60%) aparece um duplo *crossover*, caracterizando os efeitos locais (mesoescala) no primeiro *crossover*, com ciclo menor, e efeitos globais (macroescala) no segundo. No entanto, o uso de médias diárias em dados medidos e simulados mostra apenas um *crossover* (~80% dos dados reais e ~90% dos dados simulados), indicando que apenas os efeitos de macroescala estão agindo, já que os efeitos de mesoescala estão presentes em dados com médias horárias (ciclo diário). Assim, para o cenário do primeiro *crossover*, há uma influência diária com as variações observadas na camada limite atmosférica (CLA) e na CLAM, que se inicia com o aquecimento da superfície terrestre, no caso da CLA, juntamente com os processos de difusão de calor na atmosfera durante um ciclo diário (BRUNT, 1932; LIU *et al.*, 1997; STULL, 2012; SANTOS *et al.*, 2019).

A Figura 20 mostra o comportamento da escala para alguns locais mencionados na Tabela 23, usando médias horárias nos dados medidos e simulados com o modelo WRF.





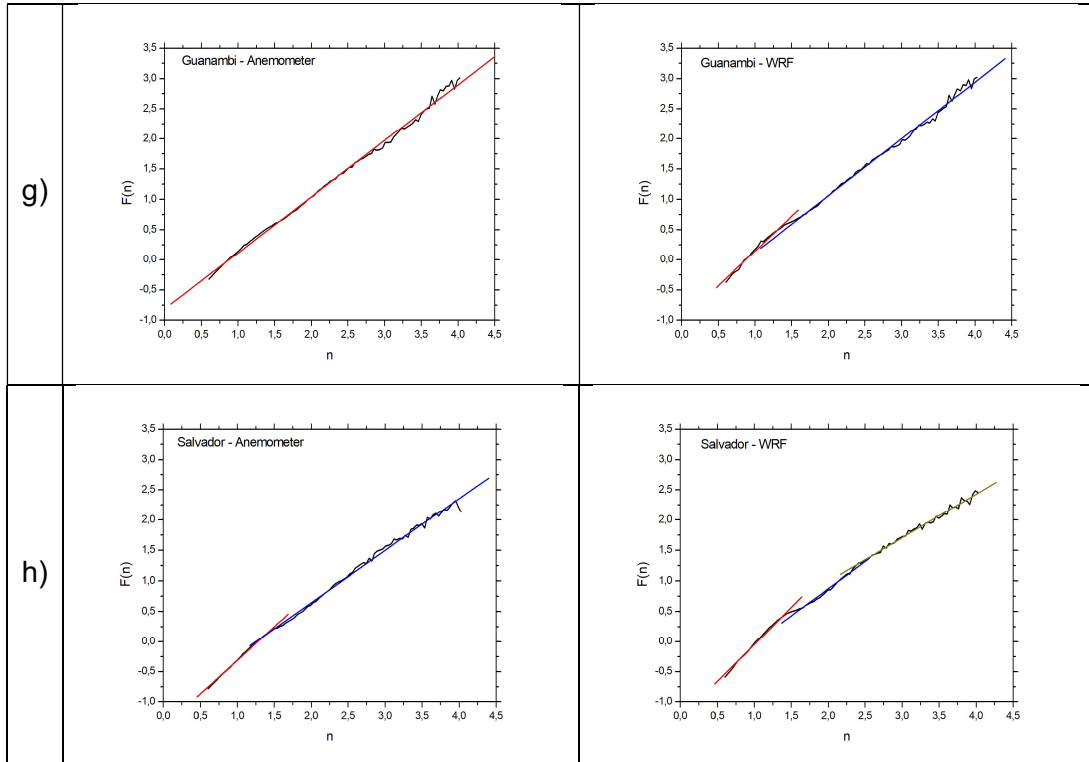


Figura 20 - DFA usando médias horárias em dados medidos e simulados para algumas estações meteorológicas

Podem ser observados na Figura 20 alguns cenários que mostram o registro de fenômenos locais (micro e mesoescala) e também globais (macroescala) ou seja, o aparecimento de dois *crossovers*. O primeiro *crossover* em aproximadamente 1 dia (24 h) e o segundo em torno de 365 dias. Cenário semelhante é obtido para as simulações do modelo WRF e análogo aos registrados nos municípios da Barra (S2) (Fig. 20a), Correntina (S10) (Fig. 20b), Itiruçu (S23) (Fig. 20c) e Queimadas (S32) (Fig. 20d). No entanto, esses distúrbios globais não são registrados nos municípios de Amargosa (S1) (Fig. 20f) e Guanambi (S16) (Fig. 20g) nos dados reais e simulados (Salvador (Fig. 20h) também não apresenta, mas apenas nos dados reais). Isso sugere que esses distúrbios não são detectados em todos os locais, como variações de temperatura e pressão já relatados na literatura (REITER, 1969; KOUSKY; CAVALCANTI, 1984; LUMPKIN; GARZOLI, 2005; MOLION, 2006; FERREIRA; MELLO, 2006; MELO *et al.*, 2009). Para o caso *offshore* de Abrolhos (S42) (Fig. 20e), nota-se o aparecimento de escala sob os efeitos da macroescala, mas também uma escala relacionada à mesoescala com um tempo diferente dos casos *onshore* (em torno de 2 dias). Assim, esta diferença entre o tempo *onshore* e *offshore* para o primeiro *crossover* sugere a influência dos efeitos do segundo *crossover*



(macroescala), uma vez que usando dados de um ano (SANTOS *et al.*, 2021), o primeiro e o segundo *crossover* não aparecem para o caso *offshore*. É importante mencionar que o ciclo diurno de aquecimento solar não produz mudanças significativas na temperatura da superfície do mar e na estrutura da CLAM na escala de um dia como ocorre no continente (DOURADO; PEREIRA, 2001).

A Figura 21 mostra o uso do DFA com médias horárias na estação meteorológica de Abrolhos (S42) e uma comparação entre valores medidos e simulados com WRF.

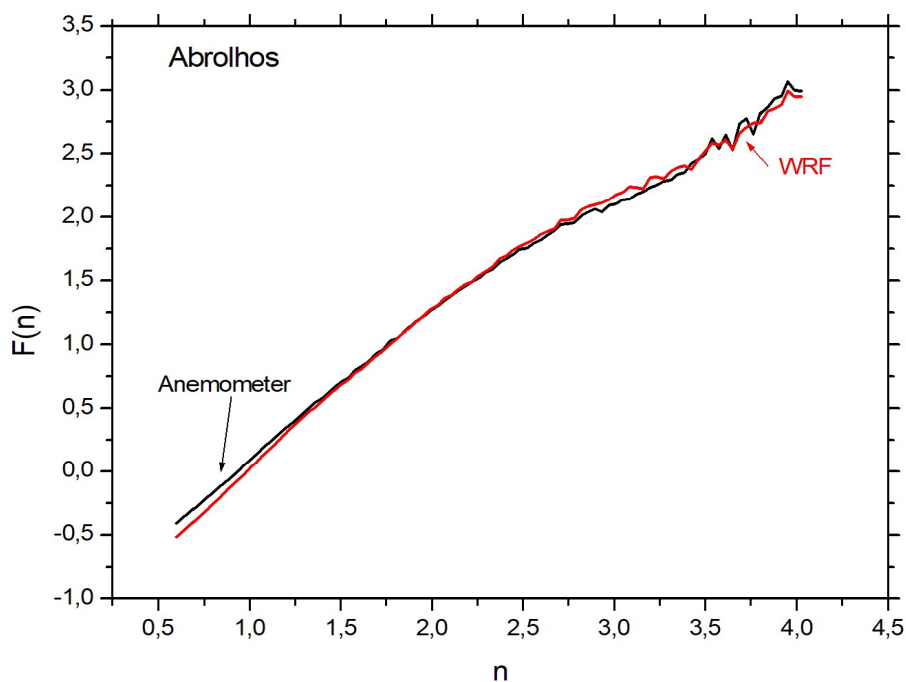


Figura 21 – DFA com médias horárias na estação meteorológica de Abrolhos: comparação entre valores medidos e simulados com WRF

Um comportamento muito semelhante é observado entre os dados horários medidos e simulado, onde o modelo WRF conseguiu reproduzir os dados medidos apresentando um duplo *crossover*, conforme mostrado na Figura 20(e).

Apesar da alta densidade de registros em 42 estações distribuídas em todas as regiões representativas do estado da Bahia, pode-se considerar que na maioria delas há duplo *crossover* para os dados reais, exceto nas estações de Amargosa (S1), Curaça (S12), Guanambi (S16), Ibotirama (S17), Irecê (S19), Itamaraju (S21), Lençóis (S26), Luiz Eduardo (S27), Macajuba (S28), Piatã (S30), Senhor do Bonfim (S36),

Uauá (S38) e Vitória da Conquista (S41), representando cerca de 30% dos casos, em que o segundo *crossover* não é registado. Essa afirmação pode ser observada na Figura 22 onde é mostrado um comportamento semelhante da velocidade do vento nessas regiões, indicando um cenário comum entre elas, incluindo um comportamento médio nessas localidades com uma autossimilaridade média ( $\alpha$ ) de 0,91 ( $\pm 0,01$ ) para a primeira escala e 0,74 ( $\pm 0,03$ ) para a segunda. Isso mostra para oscilações locais correlações de longo alcance com uma série persistente, demonstrando que essas localidades estão protegidas de efeitos de escala global (macroescala). De fato, vale a pena considerar que, geograficamente, observa-se que em todos esses casos as estações meteorológicas automáticas dos respectivos municípios estão localizadas em vales ou em áreas baixas de planícies, o que pode atenuar sobremaneira as características de macroescala da velocidade do vento, tendo como exemplos extremos, os municípios de Amargosa, Curaça, Ibotirama, Irecê, Lençóis e Piatã, que se localizam em encostas extremas e os demais em baixadas. Além disso, deve-se destacar que as cidades de Irecê, Itamaraju, Piatã, Lençóis, Guanambi e Ibotirama não possuem *crossover*. Em todos os casos, observa-se também que os dados simulados não registram o segundo *crossover*, não sendo, portanto, sensíveis a efeitos globais (macroescala). Os demais municípios que não estão sujeitos a esses efeitos seguem a regra geral com o aparecimento do *crossover* duplo e seus efeitos associados.

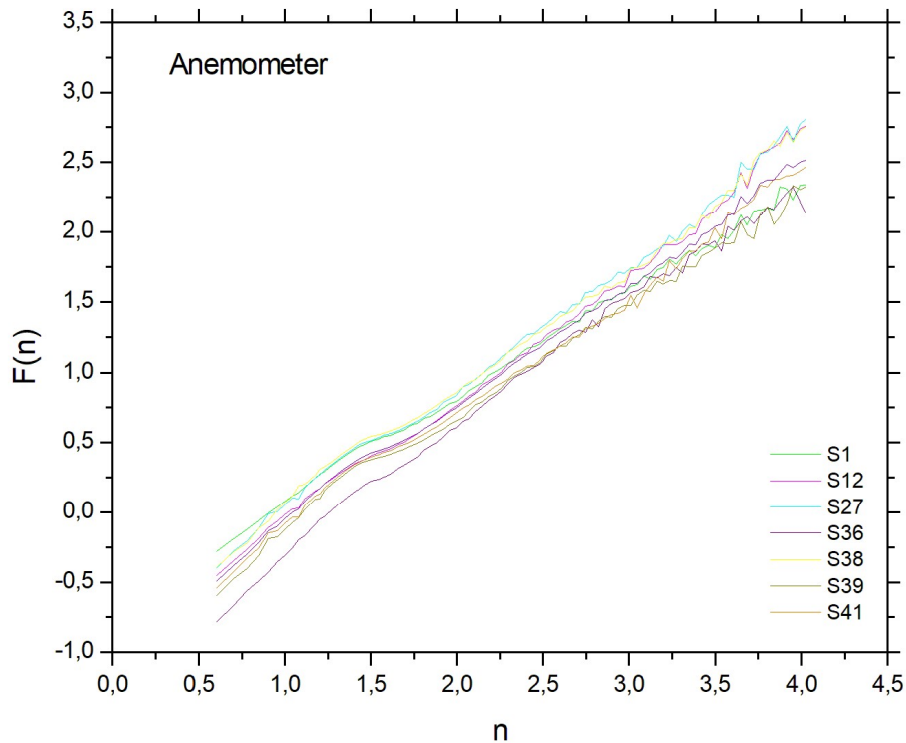


Figura 22 – DFA com comportamento isomórfico de localidades em regiões com declives extremos ou em zonas baixas de planícies

Esses diferentes comportamentos sugerem a influência de algum sistema global atuando na região, o que indica forte influência de efeitos de macroescala dos quais tem-se como correlação as oscilações, ocorridas em mesmo período, nos oceanos Pacífico e Atlântico, também denominadas, respectivamente de El Niño e La Niña (REITER, 1969; KOUSKY; CAVALCANTI, 1984; LUMPKIN; GARZOLI, 2005; FERREIRA; MELLO, 2006; MELO *et al.*, 2009). Nos períodos 2015-2016 houve forte influência das oscilações do El Niño, com registros em alguns locais, mas não em todos, de forma isomórfica ao duplo *crossover* em análise, o que leva à afirmação da existência de forte correlação entre essas oscilações e o aparecimento do segundo *crossover*, incluindo a não generalização da detecção de ambos, ou seja, as oscilações e o segundo *crossover*. De acordo com WMO (World Meteorological Organization), os anos de 2015, 2016 e 2017 foram os três anos mais quentes registrados globalmente desde 1850. No entanto, 2016 ainda detém o recorde mundial, enquanto 2017 foi o ano mais quente sem o fenômeno El Niño (2015-2016 muito forte). As temperaturas médias globais registradas em 2016 foram 1,2 °C acima

das da era pré-industrial, enquanto as registradas em 2015 e 2017 foram 1,1 °C acima dos níveis pré-industriais. Além das mudanças climáticas, o clima tem uma variação natural, devido a certos fenômenos como El Niño (geralmente associado à diminuição das velocidades) e La Niña (associado ao aumento da velocidade); que influenciam, respectivamente, a elevação ou a queda da temperatura atmosférica. Esse tipo de comportamento de aumento de temperatura é uma tendência derivada das mudanças climáticas (IPCC, 2021). Os principais efeitos causados por esses fenômenos no Brasil, principalmente devido à circulação atmosférica proveniente da costa brasileira, podem ser caracterizados na região Nordeste do Brasil com secas de diferentes intensidades durante o período chuvoso. No entanto, no sul e oeste da região Nordeste, as chuvas não são afetadas de forma significativa. Além do fenômeno El Niño, as secas nessa região também são causadas por fenômenos oceânicos e atmosféricos, como temperatura, pressão e vento no Oceano Atlântico. Normalmente, a influência do El Niño é mais forte no norte da Bahia. Em linhas gerais, os principais efeitos dos episódios de La Niña observados são a chegada de frentes frias do sul do Brasil para a região Nordeste, principalmente no litoral da Bahia, com possibilidade de chuvas acima da média na região semi-árida nordestina. (CASARIN; KOUSKY, 1986; PETERSON; STRAMMA, 1991; CARVALHO *et al.*, 2004; MOLION, 2006; REBOITA, 2008; PEZZI; SOUZA, 2009; PEZZI *et al.*, 2016).

Em geral, o duplo *crossover* não é registrado em todos os casos nos casos *onshore*, o que indica que se trata de um efeito global, pois não são percebidos em todos os lugares, tanto quanto os efeitos das oscilações do Oceano Pacífico e do Atlântico (El Niño e La Niña) (MOLION, 2006). No entanto, isso não é necessariamente verificado nos dados simulados, ou seja, o modelo WRF não representa bem os dados medidos em alguns locais. Assim, os resultados indicam que o *crossover* duplo é dependente da localização, mas confirma trabalhos anteriores (SANTOS *et al.*, 2019, 2021) que o *crossover* único é registrado em qualquer local em terra considerando apenas os dados horários anuais. Em contrapartida, neste trabalho, foram utilizados cinco anos de dados e maior distribuição espacial, demonstrando que o *crossover* duplo só é registrado em algumas regiões como as oscilações do Oceano Pacífico e Atlântico (El Niño e La Niña), evidenciando assim uma forte correlação entre esses fenômenos.

Assim, os resultados das análises de correlações de longo alcance da velocidade do vento mostraram o caráter não universal do aparecimento de *crossover* em situações *onshore* e *offshore*, de forma que este trabalho amplia o conhecimento científico deste fenômeno. Neste estudo, uma análise sistemática usada na detecção de correlações de longo prazo, conhecida como DFA, foi aplicada a dados de velocidade do vento de 42 estações automáticas localizadas no estado da Bahia. A principal contribuição dessa análise foi, diferentemente de trabalhos anteriores, mostrar o caráter não universal do fenômeno de *crossover*, considerando dados experimentais de diferentes localidades, surgindo um duplo *crossover*, sugerindo que isso ocorre devido ao efeito de macroescala capturado a partir das longas séries temporais (cinco anos). Na maioria dos casos, resultados semelhantes aparecem nas simulações do modelo WRF de mesoescala. Esses resultados devem ser úteis para a validação de modelos climáticos e de mesoescala, uma vez que um modelo válido deve explicar propriedades de escala que são detectadas empiricamente em dados observados. Os resultados também confirmaram a hipótese de que o primeiro fenômeno de *crossover* é devido à circulação local e efeitos da superfície da terra (mesoescala), com uma escala de tempo de aproximadamente um ciclo diário (~24 h) em terra, ao tempo em que o segundo *crossover* correlaciona-se com fenômenos de escala global (macroescala) (~365 dias) e tem forte correlação temporal e espacial com as oscilações do El Niño e La Niña, sendo que a primeira apresentou grande intensidade no período em estudo. No caso *offshore*, a escala de tempo do primeiro *crossover* foi de aproximadamente dois dias, sugerindo a influência do aparecimento do segundo *crossover* e seus efeitos.

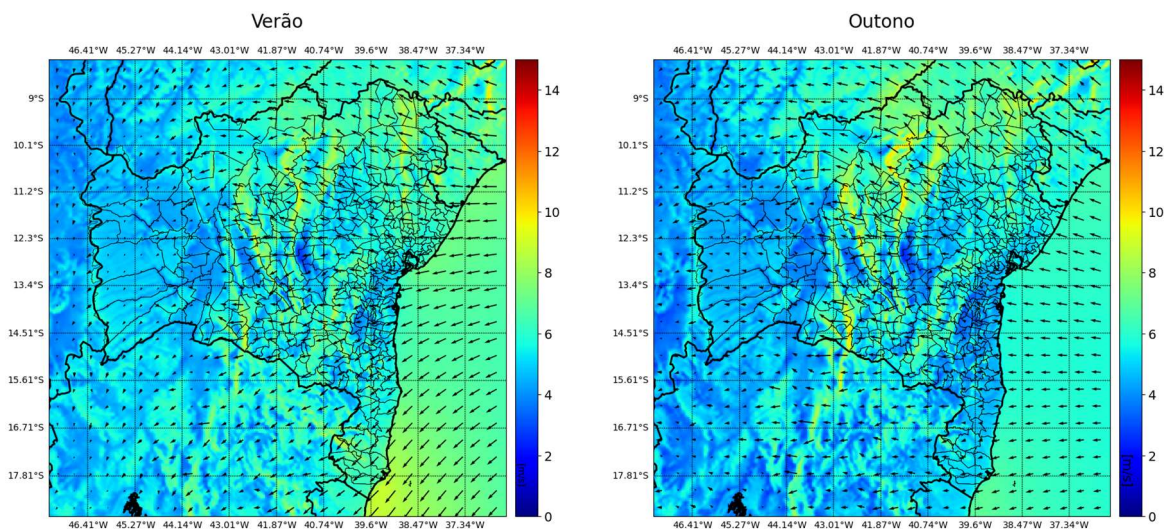
Observou-se também que o modelo de mesoescala WRF não representa bem os dados medidos em alguns pontos, mas captura os efeitos globais registrados na maioria das séries de dados reais. No caso *offshore* (Arquipélago de Abrolhos), dados reais e simulações mostraram comportamento subdifusivo antes do primeiro *crossover* e persistência para as outras duas escalas. Para o caso *onshore*, eles mostraram persistência entre o primeiro e o segundo *crossover*. Os resultados também sugerem que, quando as séries temporais são longas no aspecto cronológico, pode ser possível observar a existência de dois ou mais *crossovers*. Por exemplo, séries maiores que dez, trinta ou cinquenta anos também podem indicar ciclos mais longos, como a Lua e seus movimentos precessionários (MOLION, 2006) e também

solares (tempestades solares, oscilações no campo magnético do Sol, etc.). Por fim, é importante ressaltar que o método DFA não detecta oscilações nos dados medidos e simulados em todos os locais, principalmente em regiões com declives extremos ou em áreas de baixada, pois o *crossover* duplo não é registrado e, em alguns casos, até o *crossover* simples. Portanto, os resultados mostraram que o fenômeno do *crossover* não é universal, sendo dependente da localização geográfica e do período de tempo analisado.

#### 5.4 MAPAS EÓLICOS ONSHORE E OFFSHORE

As seções anteriores mostraram a validação das simulações em alta resolução espacial, que compreendem o período de 5 anos de dados horários, com a utilização de dados de 41 estações automáticas espalhadas por todo o território baiano e mais uma estação automática localizada no Arquipélago de Abrolhos. Destaca-se que este é um trabalho pioneiro com essas características. Dessa forma, agora apresenta-se os mapas eólicos elaborados a partir da modelagem numérica com uma análise estatística de forma satisfatória quando comparados com trabalhos similares da literatura.

O campo de velocidades horizontal sazonal (verão, outono, inverno e primavera) a 80, 100, 120 e 150m de altura podem ser visualizados nas Figuras 23, 24, 25 e 26, respectivamente.





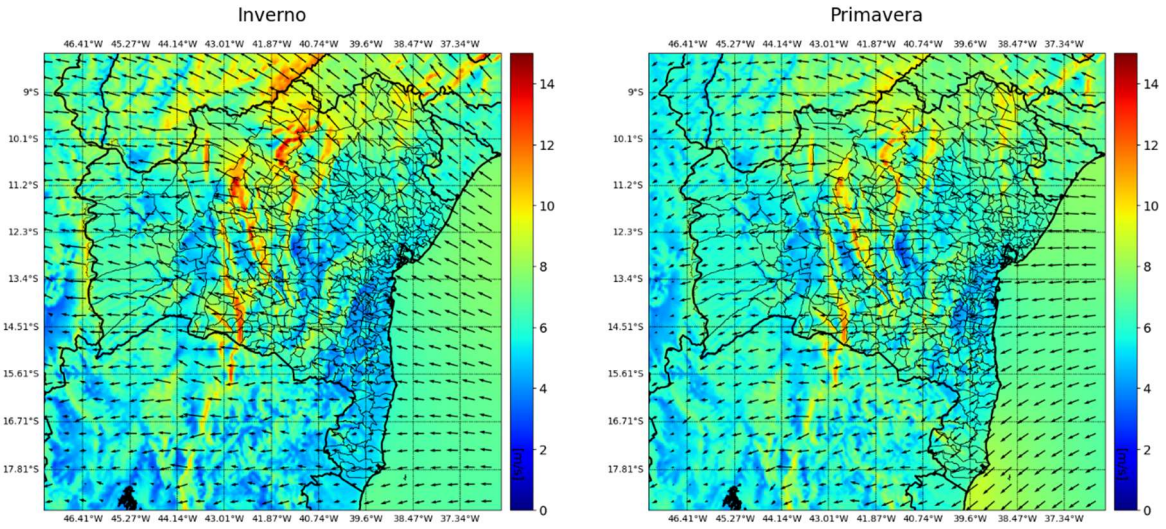


Figura 23 – Potencial eólico sazonal a 80m de altura

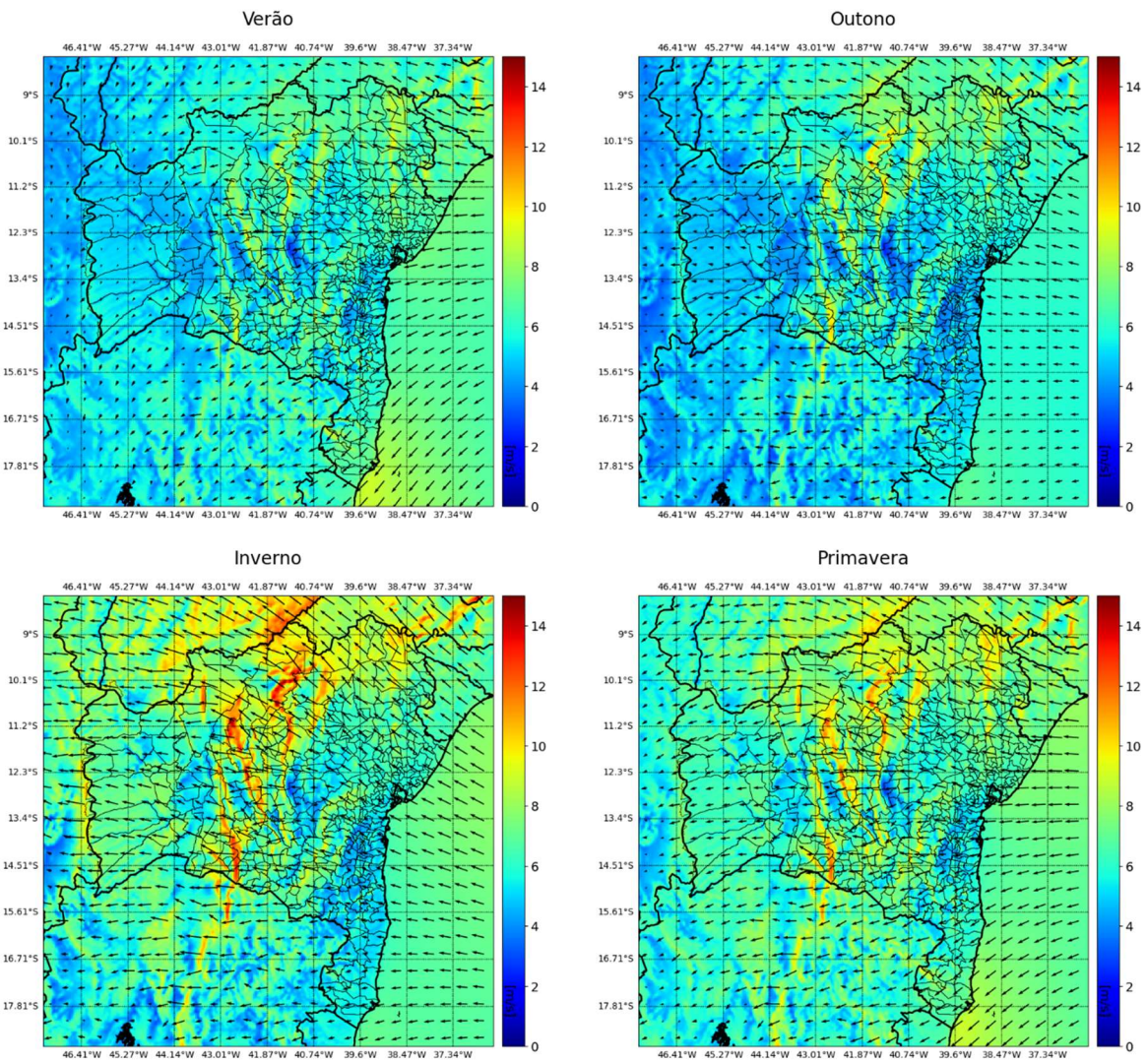


Figura 24 – Potencial eólico sazonal a 100m de altura



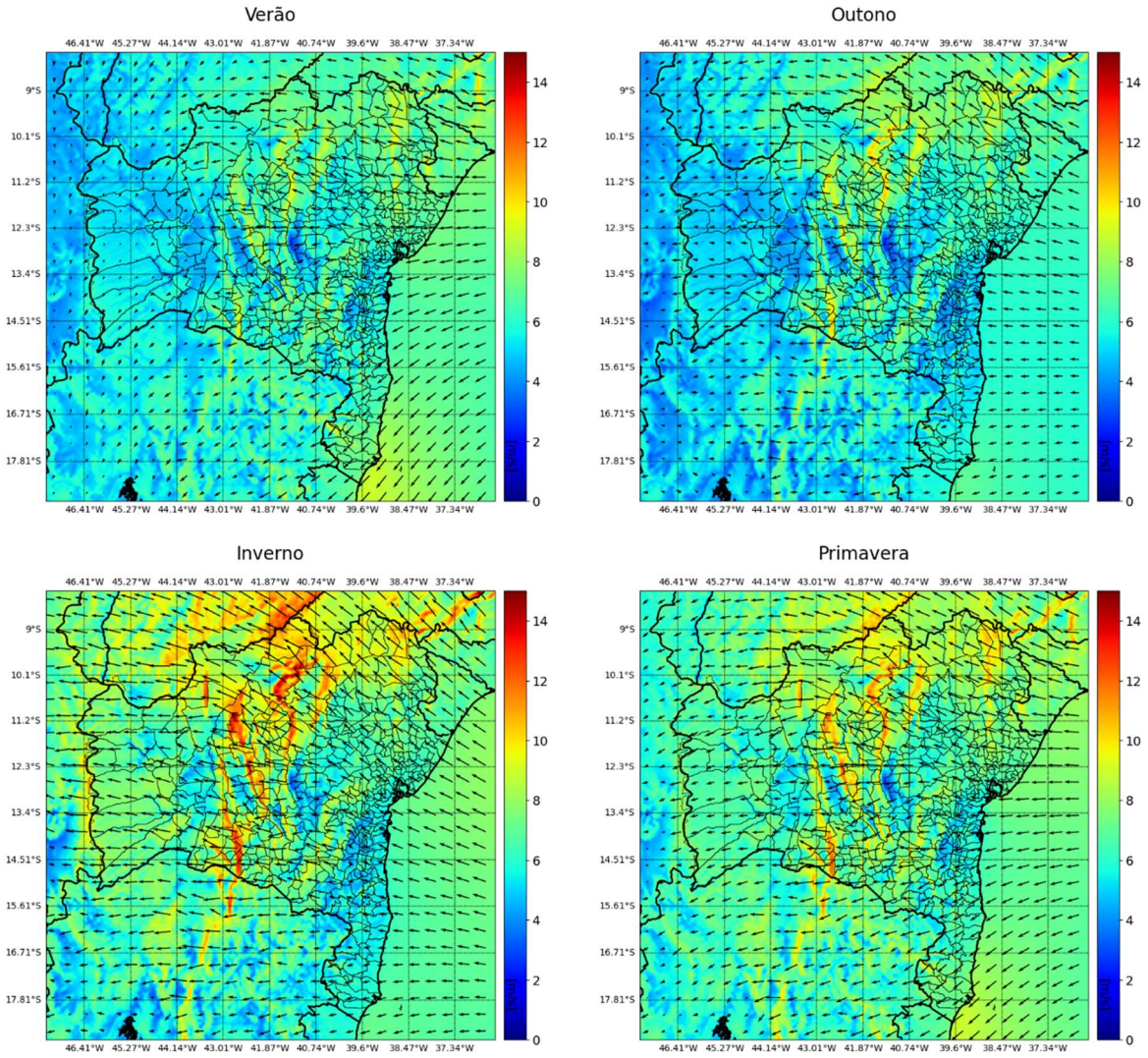
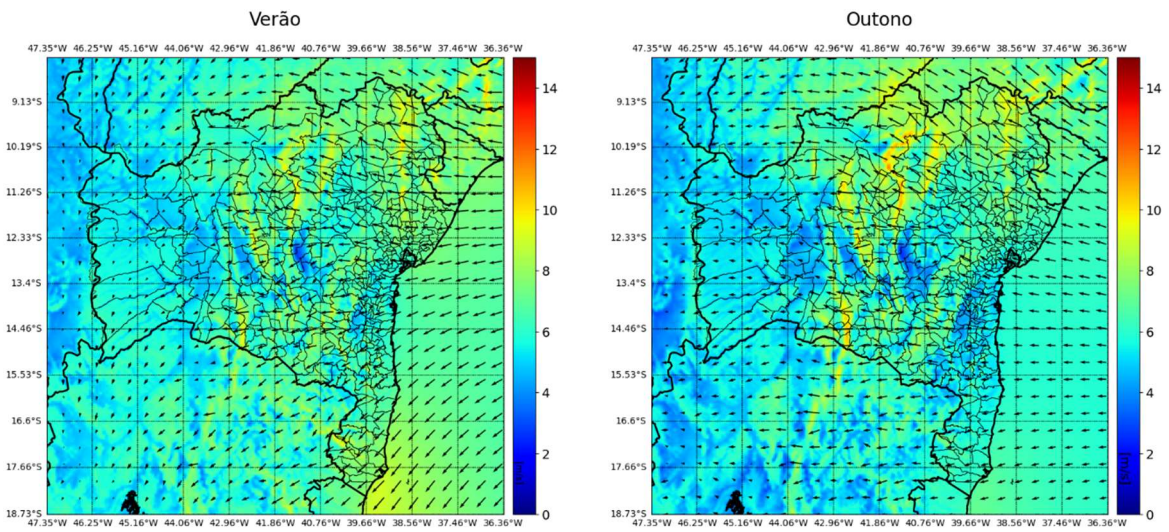


Figura 25 – Potencial eólico sazonal a 120m de altura





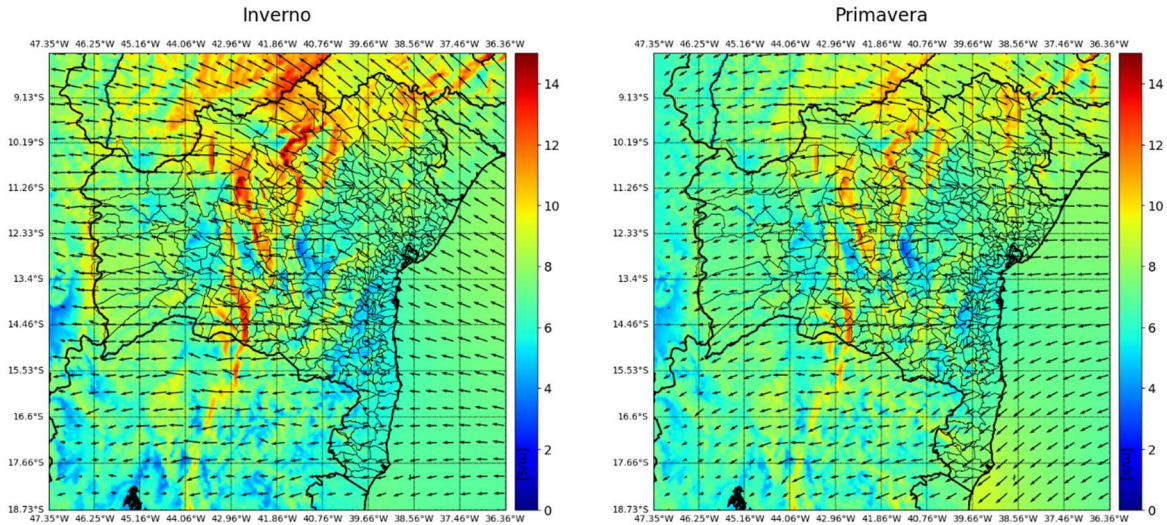


Figura 26 - Potencial eólico sazonal a 150m de altura

O período de inverno apresentou maiores valores de velocidade do vento para a região *onshore*, com valores de até 14 m/s entre as latitudes a leste de 42,96W e a oeste de 40,76W. Já para a região *offshore*, a primavera exibiu as maiores médias para a velocidade do vento, variando entre 7 a 8 m/s ao longo da costa e chegando a 10 m/s no extremo-sul da costa marítima, enquanto que o outono foi a estação com menor potencial eólico, com valores de aproximadamente 6m/s. Além da primavera, o verão teve grande destaque no extremo-sul da costa com registros altos na simulação do vento. Observa-se claramente que, à medida que a altura aumenta, o valor da velocidade do vento aumenta na região *onshore*, porém com pouca variação na região *offshore*. A diminuição da velocidade do vento para alturas menores em função do atrito com a superfície é perfeitamente visualizada em terra, e esse comportamento difere na região *offshore* devido ao menor atrito entre a atmosfera e a superfície oceânica.

As Figuras 27 e 28 mostram os mapas eólicos para o período diurno (09 h às 19 h) e noturno (20 h às 08 h) no estado Bahia. Além do aumento do valor da velocidade do vento, à medida que a altura se eleva, é nítido o maior potencial registrado no período noturno, tanto *onshore* quanto *offshore*. Assim, percebe-se que o regime de ventos fortes é noturno, mostrando um ciclo diário bem definido em que a velocidade do vento é marcadamente maior durante a noite e diminui durante as horas em que a Terra recebe a luz do sol.



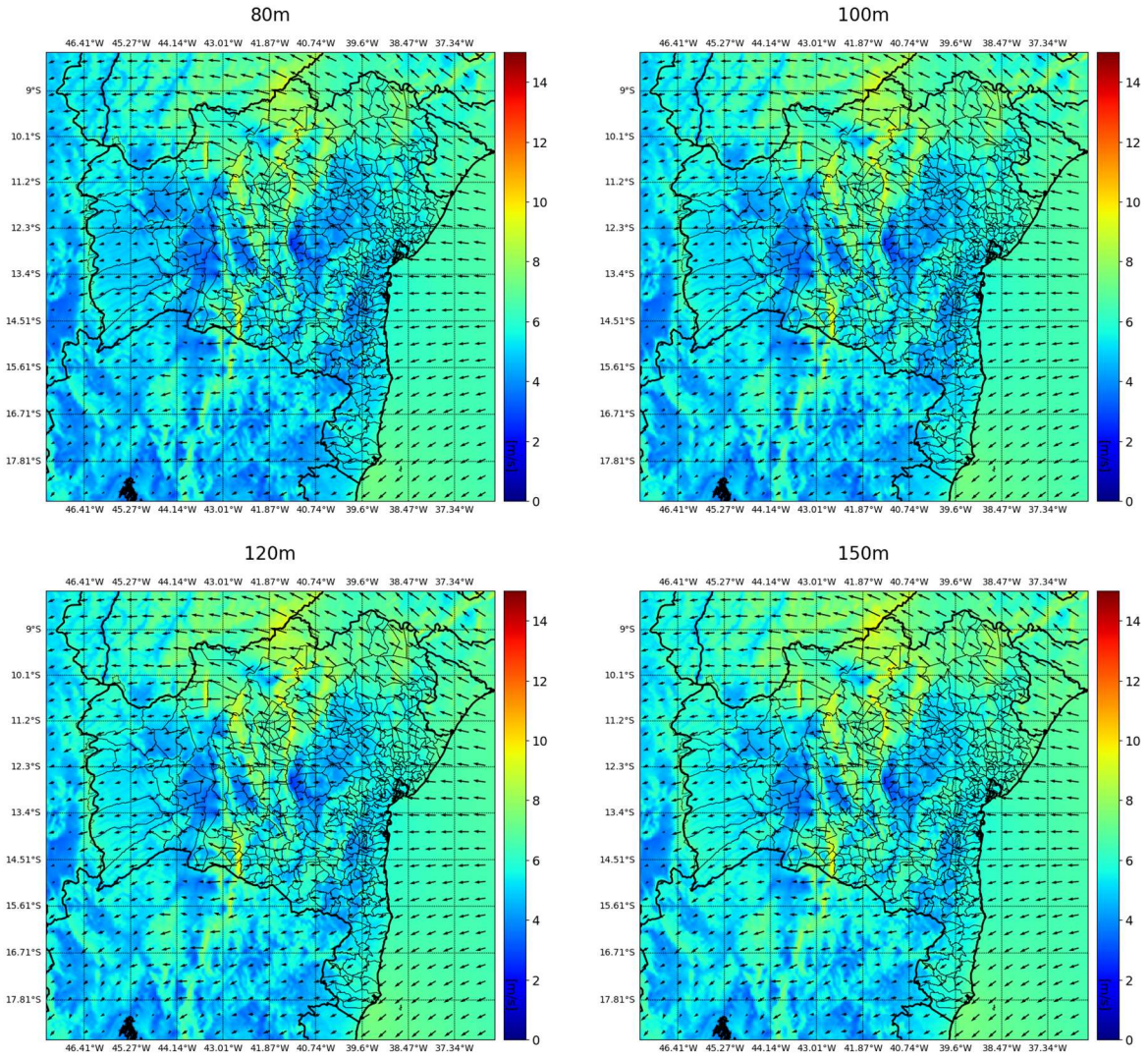
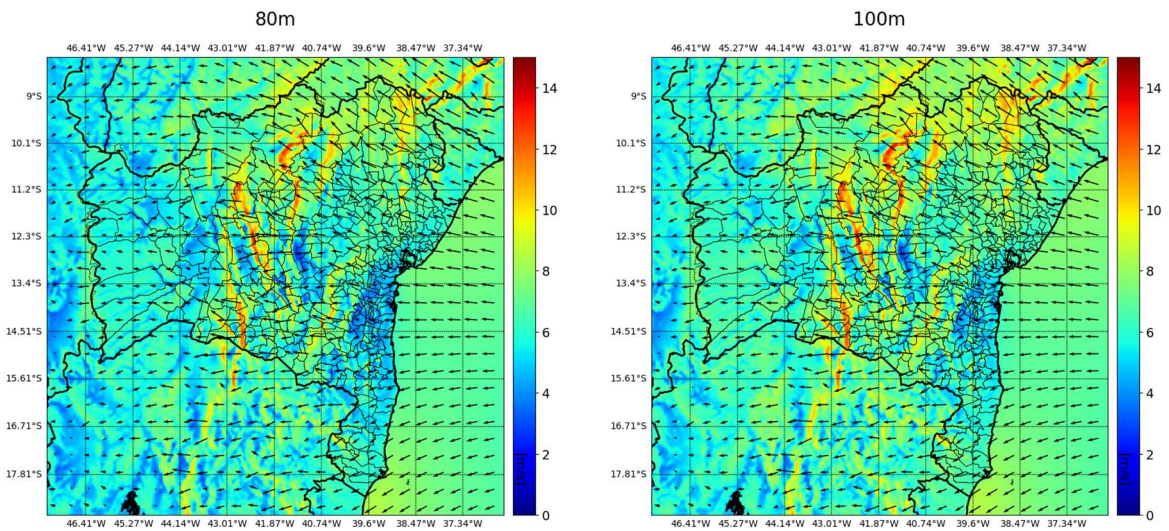


Figura 27 – Potencial eólico dia a 80, 100, 120 e 150m de altura





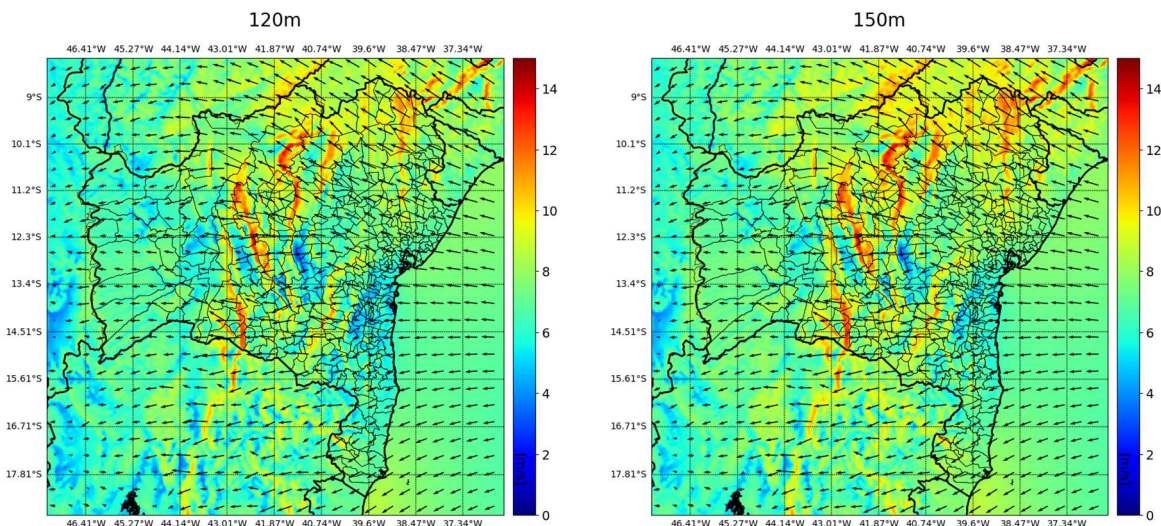
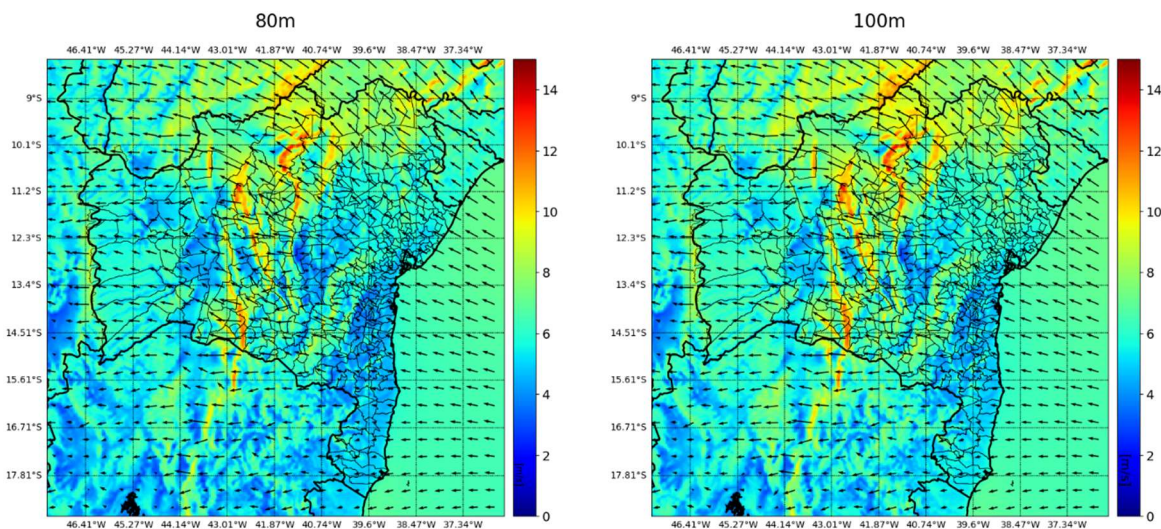


Figura 28 – Potencial eólico noite a 80, 100, 120 e 150m de altura

As Figuras 29 e 30 mostram os mapas eólicos, por período seco (abril a agosto) e úmido (setembro a março). Na estação seca, o potencial eólico é maior nas regiões que começam pela região do Vale São-Franciscano, descendo pela região do Centro-Norte até a região do Centro-Sul da Bahia. Diferentemente, na estação úmida o potencial eólico *offshore* é maior, com realce do extremo-sul da costa marítima.





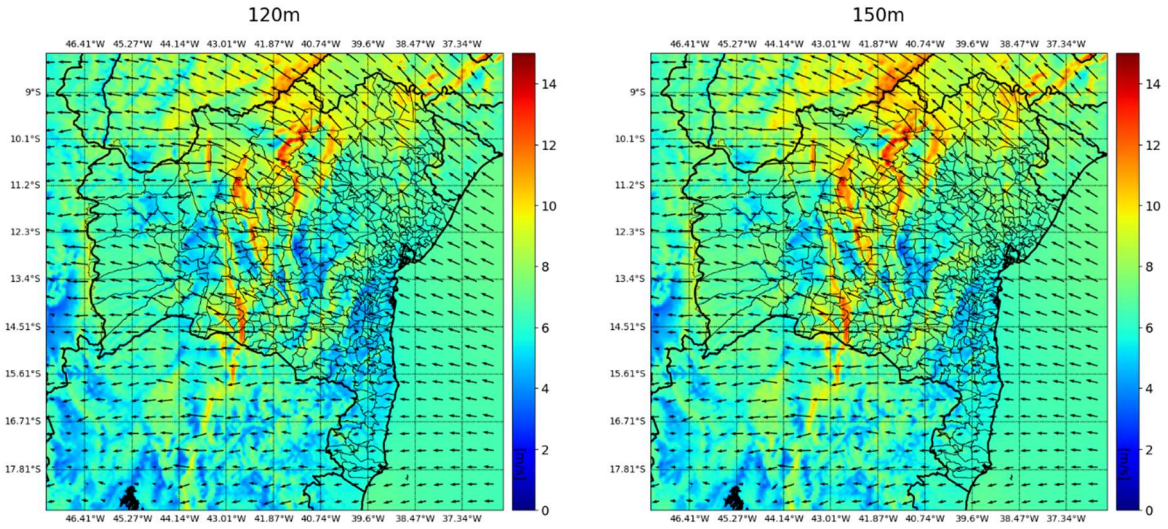


Figura 29 – Potencial eólico estação seca a 80, 100, 120 e 150m de altura

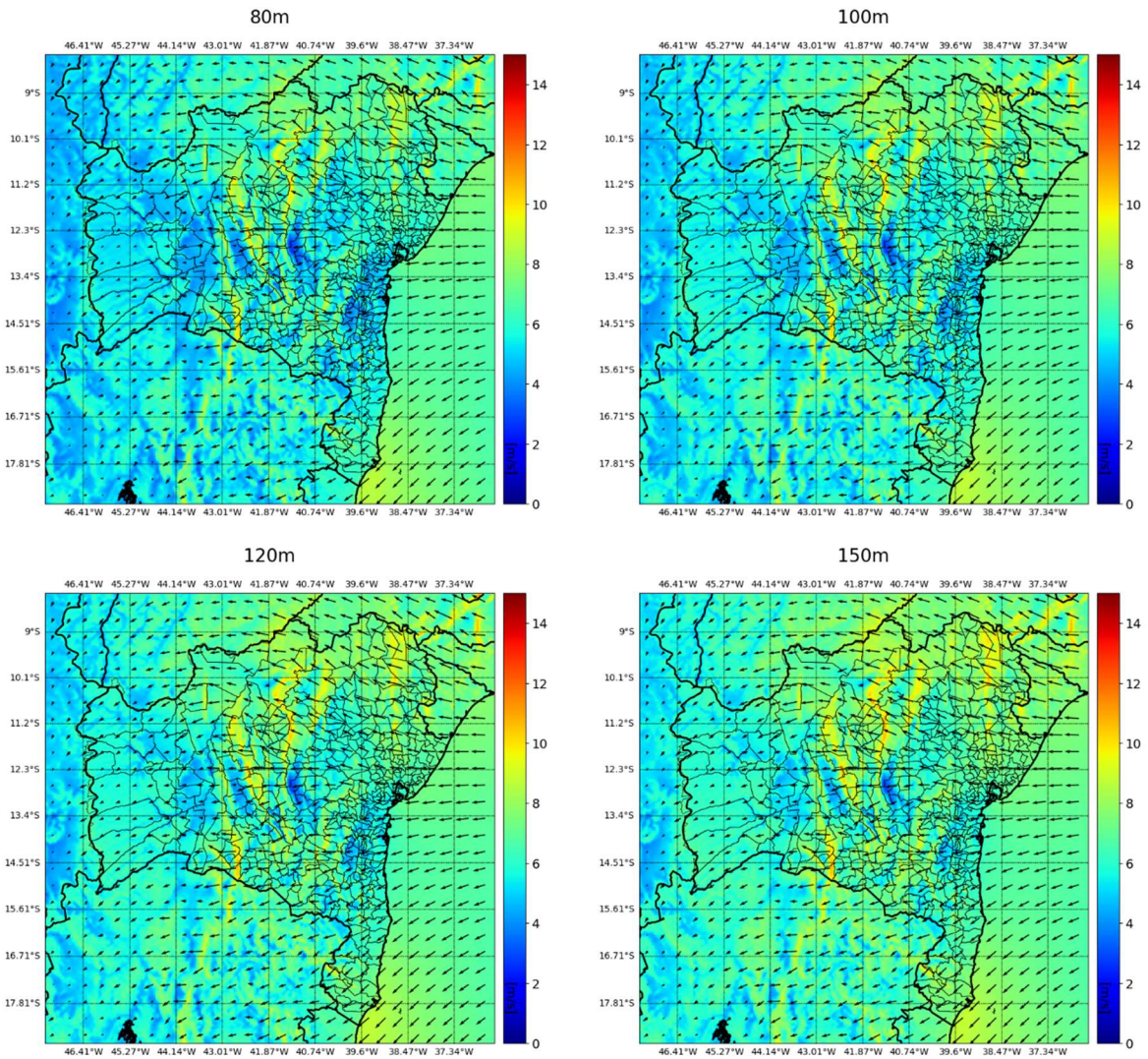


Figura 30 – Potencial eólico estação úmida a 80, 100, 120 e 150m de altura



Os campos eólicos mensais médios dos cinco anos simulados para a área de estudo a 150 m podem ser encontrados nos Apendices H, I, J, K, L e M.

A Figura 31 mostra as simulações do campo de velocidade horizontal, com média anual de 2016 a 2019 a 150 m de altura, cobrindo todo o estado da Bahia, incluindo a região da costa marítima.

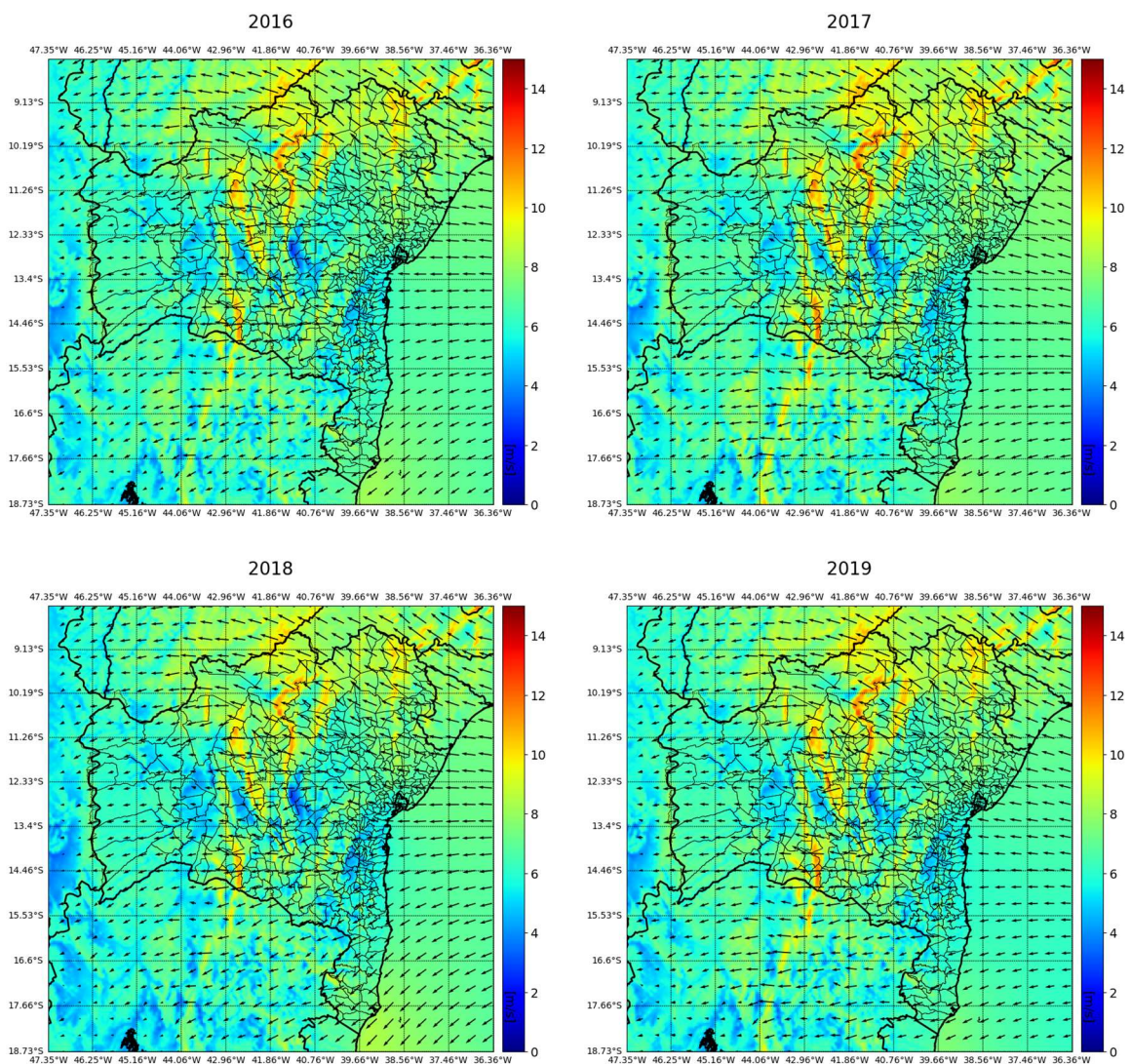


Figura 31 – Campo de velocidade horizontal com média anual (2016-2019) a 150 m de altura

Observa-se que, comparando-se o ano de 2016 com 2017, um ligeiro aumento do campo de velocidades tanto *onshore* quanto na costa marítima. No entanto, percebe-se uma diminuição do campo *onshore* em 2018, mantendo velocidades altas no sul

do estado na costa marítima. Em 2019, percebe-se um ligeiro aumento do campo *onshore* e uma diminuição *offshore*.

A Figura 32 mostra simulações da velocidade média mensal anual de 2016 a 2019 a 150 m de altura na localização de duas estações de superfície, sendo uma mais ao norte do estado (E19-Irece) e a outra localizada mais na região centro-sul (E5-Bom Jesus da Lapa).

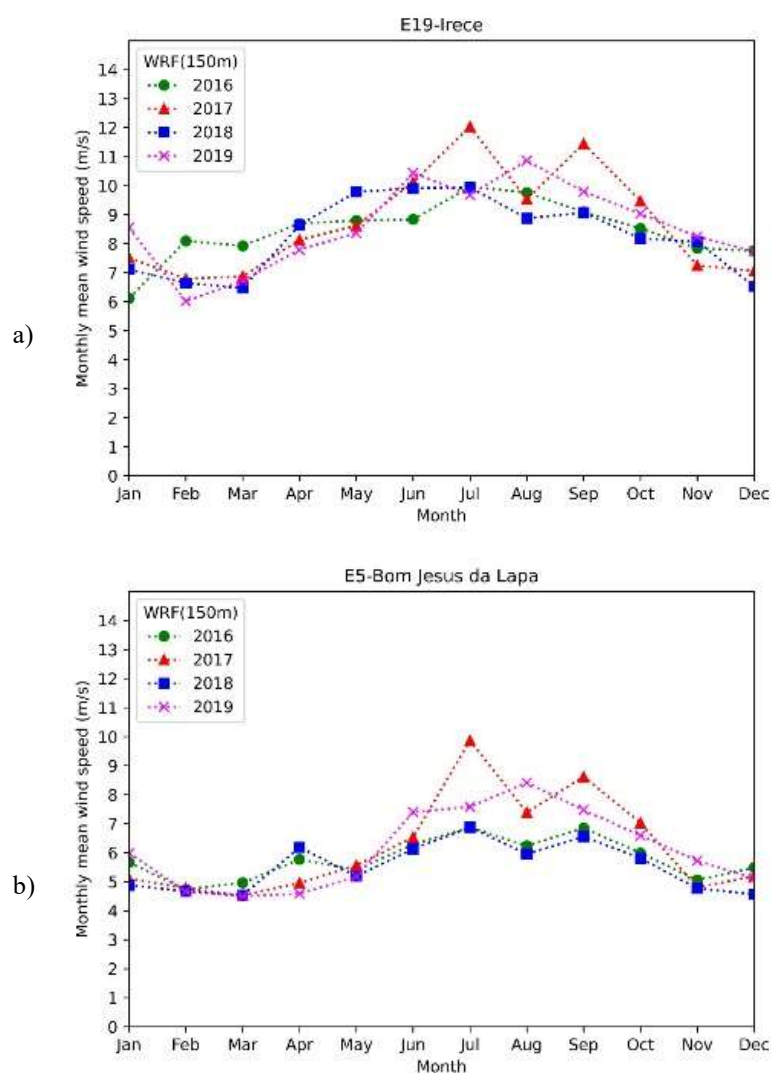


Figura 32 – Simulação da velocidade média mensal anual (2016-2019) a 150 m de altura: a) estação ao norte do estado (E19-Irece); b) estação no centro-sul do estado (E5-Bom Jesus da Lapa)

Observa-se na região da estação mais ao norte do estado (E19-Irece) um aumento significativo da velocidade média mensal no ano de 2017 (linha vermelha), com um crescimento menos acentuado em 2019 (linha rosa), ambos no segundo semestre dos

respectivos anos. Comportamento similar ocorre na região da estação na região centro-sul do estado (E5). A Figura 32 está de acordo com o campo de velocidades mostrado na Figura 31, com boas intensidades de vento anual, particularmente para o ano de 2017.

Estes comportamentos anuais diferenciados sugerem a influência de algum sistema global atuando na região. Segundo WMO (World Meteorological Organization), os anos de 2015, 2016 e 2017 foram os três anos mais quentes registrados a nível global desde 1850. No entanto, 2016 ainda mantém o recorde mundial, enquanto que 2017 foi o ano mais quente sem ocorrência do fenômeno EL Niño (2015-2016 muito forte). As temperaturas médias globais registradas em 2016 foram 1,2°C acima das da era pré-industrial, enquanto que as registradas em 2015 e 2017 foram 1,1°C acima dos níveis pré-industriais. Além das alterações climáticas, o clima tem uma variação natural devido a determinados fenômenos, como por exemplo o El Niño e a La Niña, que têm influência respectivamente na subida ou descida da temperatura da atmosfera. Assim, pode-se perceber das figuras anteriores que no ano de 2017, o qual não teve a influência do El Niño (normalmente associado a uma diminuição de velocidades) e com La Niña fraco (associado ao aumento de velocidades), as velocidades médias no segundo semestre tiveram um aumento significativo de forma atípica. Este tipo de comportamento de aumento de temperatura é uma tendência com as mudanças climáticas (IPCC, 2021).

Os principais efeitos causados por estes fenômenos no Brasil, principalmente em decorrência da circulação atmosférica originada da costa brasileira, podem ser caracterizados na região nordeste do Brasil com secas de diversas intensidades durante a estação chuvosa. No entanto, no sul e oeste da região nordeste as chuvas não são significativamente afetadas. Além do fenômeno El Niño, as secas nesta região também são causadas por fenômenos oceânicos e atmosféricos como as condições de temperatura, pressão e ventos no Oceano Atlântico. Normalmente, a influência do El Niño é mais forte no norte da Bahia. Em termos genéricos, os principais efeitos de episódios do La Niña observados são de chegada das frentes frias vindas do sul do Brasil até a região Nordeste, principalmente no litoral da Bahia, com possibilidades de chuvas acima da média sobre a região semiárida do nordeste do Brasil.



A Figura 33 mostra o campo de velocidades horizontal em 80, 100, 120 e 150m de altura das regiões *onshore* e *offshore* do estado baiano, considerando-se as simulações entre agosto de 2015 a julho de 2020 (5 anos de dados). Igualmente à análise anterior, o potencial eólico *onshore* aumenta à medida que a altura aumenta, sem impacto significativo no potencial eólico *offshore*.

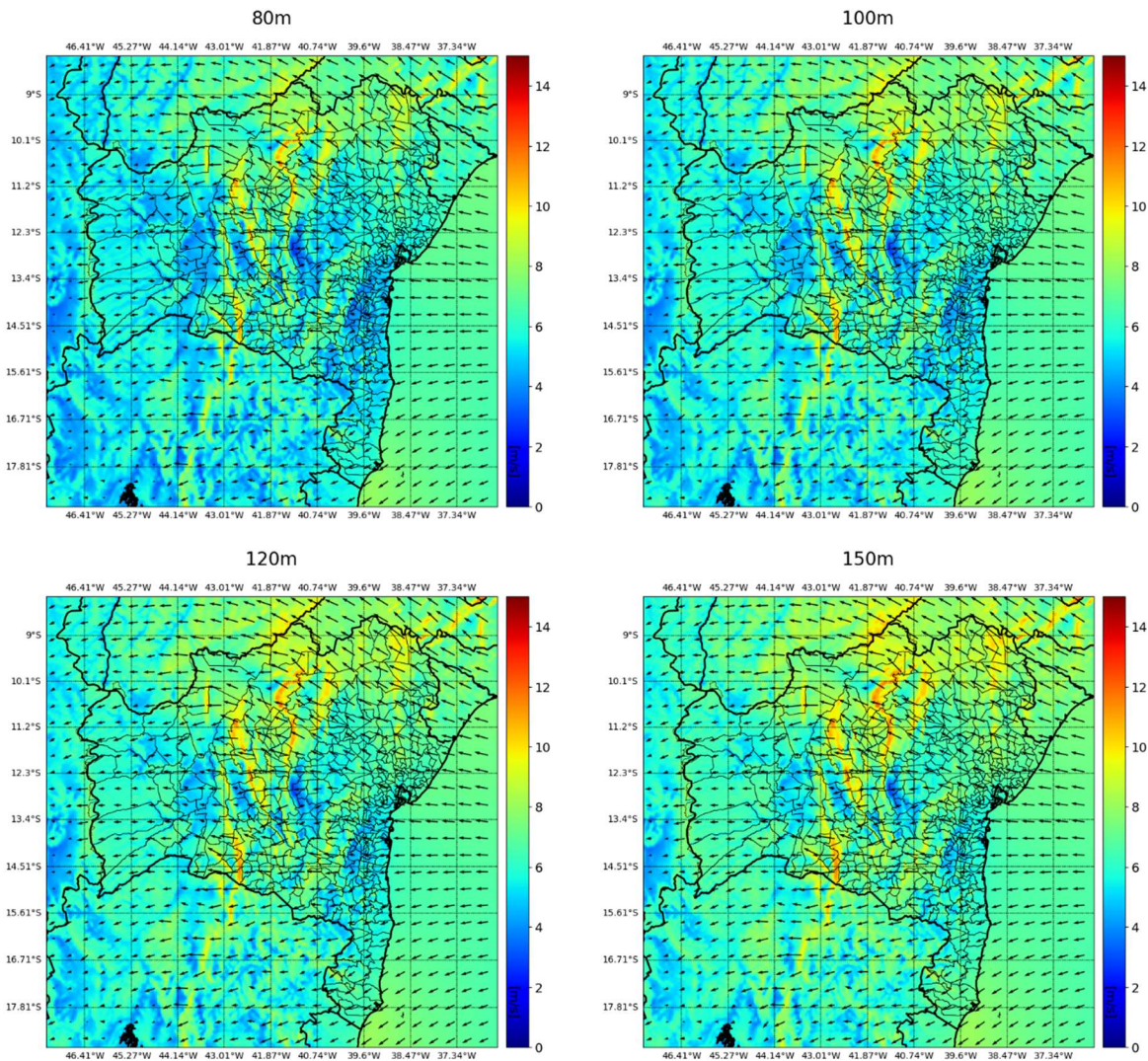


Figura 33 – Potencial eólico (on e offshore) para o período de 2016-2020 (80, 100, 120 e 150m de altura) usando WRF (3km)

Para grande parte da região *offshore* os resultados apresentaram velocidades médias em torno de 7 m/s, mostrando que as velocidades do vento são constantes ao longo da costa. Visualmente pode-se perceber o destaque da costa marítima do extremo sul do estado, compreendida entre os municípios de Caravelas e Mucuri, com valores da velocidade do vento médio em torno de 8 m/s. Assim, esta região exibiu um perfil favorável para o desenvolvimento da matriz eólica energética, já que ao longo do ano,



os ventos se apresentam com boa intensidade e constância próximos ao continente. Este fator também se torna relevante quando se pondera os custos relacionados ao projeto, como por exemplo, a distância para a conexão com as linhas de transmissão, o escoamento dos componentes até o local de instalação do parque e facilidade de acesso de mão-de-obra. Já a região *onshore* apresenta velocidades médias do vento maiores que a região *offshore*, sendo em grande parte maior que 6 m/s, chegando a 12 m/s em regiões entre longitudes a leste de 42,96W e a oeste de 40,76W. Importante salientar que o padrão da direção do vento em todo o estado, tanto *onshore* quanto *offshore*, em geral, origina-se a leste. Constata-se que os valores de velocidade do vento indicados para o estado baiano (Figura 33) estão de acordo com os limiares mínimos de atratividade para investimentos em geração de energia eólica, que variam, em termos de velocidades medias anuais, entre 5,5 m/s e 7,0 m/s.

A Figura 34 e a Tabela 24 apresentam a localização dos 10 pontos com maior potencial eólico *onshore* simulado do estado da Bahia, sendo o Top 1 com latitude de  $-10,6572^\circ$  e longitude de  $-41.6827^\circ$  e com velocidade do vento média de  $12,28 \text{ ms}^{-1}$ . Os pontos no domínio com maiores potenciais eólicos foram encontrados objetivamente por meio de rotinas implementadas no *Python*. Assim, de acordo com a Figura 34, percebe-se a existência de duas regiões com melhores recursos eólicos: a primeira, mais ao norte do estado, entre a divisa da Chapada Diamantina e o Sertão do São Francisco, entre os municípios de Sento Sé e Morro do Chapéu, e mais ao sudoeste do estado, entre o Sertão Produtivo e Vitória da Conquista, entre os municípios de Urandi, Pindaí e Licínio de Almeida.

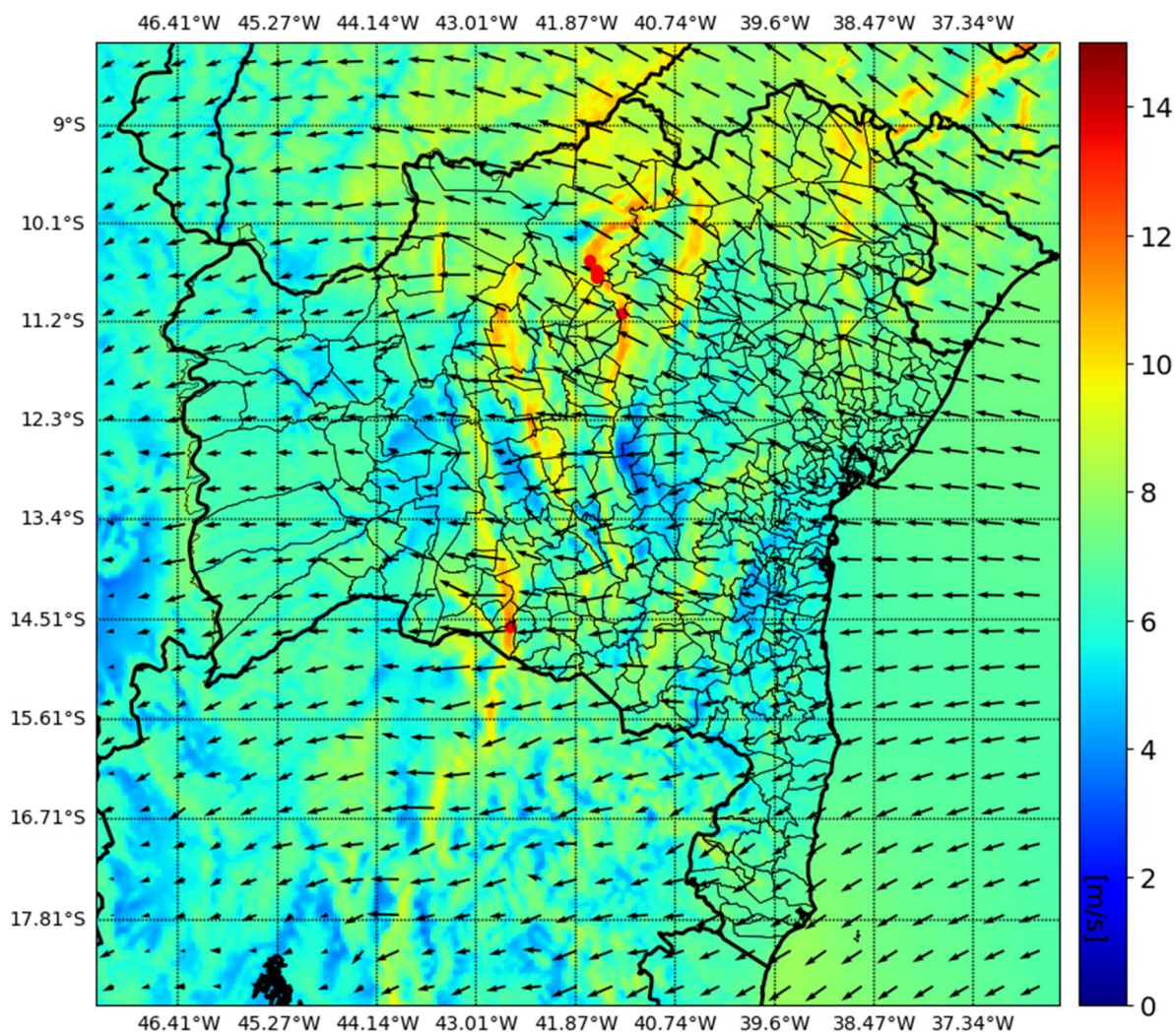


Figura 34 – Localização dos 10 pontos com o maior potencial eólico onshore a 150m de altura

**TABELA 24 - LOCALIZAÇÃO DOS 10 PONTOS COM MAIOR POTENCIAL EÓLICO ONSHORE NA BAHIA**

Top	Lat	Lon	Velocidade média (m/s)
01	-10.657289°	-41.682716°	12,28065
02	-10.630261°	-41.682716°	12,14349
03	-10.657289°	-41.655689°	12,11897
04	-10.684316°	-41.682716°	12,07267
05	-10.684316°	-41.655689°	12,01609
06	-10.630261°	-41.655689°	11,89378
07	-10.603234°	-41.682716°	11,8808
08	-10.495126°	-41.763797°	11,75352
09	-14.657289°	-42.655689°	11,7497
10	-11.089721°	-41.385419°	11,74694

Os pontos de 1 a 8 estão dentro da chamada Área de Proteção Ambiental (APA) do Boqueirão da Onça, criada pelo Decreto nº 9.337, de 5 de abril de 2018, com os objetivos de:

- I – proteger a diversidade biológica e os ambientes naturais, a flora e a fauna da caatinga, incluídas as transições altitudinais;
- II – proteger as formações cársticas e os sítios paleontológicos e arqueológicos associados, com destaque para as Grutas Toca da Boa Vista e Toca da Barriguda;
- III – proteger e promover a recuperação das formações vegetacionais da área; e
- IV – conciliar as ações antrópicas com a proteção ao meio ambiente.

A APA do Boqueirão da Onça, com aproximadamente 505.692 hectares, tem seus limites representados na Figura 35, abaixo. Percebe-se que o ponto 10, está fora desses limites, próximo ao Parque Estadual do Morro do Chapéu, na porção mais ao norte do município. Neste ponto os ventos médios são de 11,75 m/s, conforme indicado pela Tabela 24.

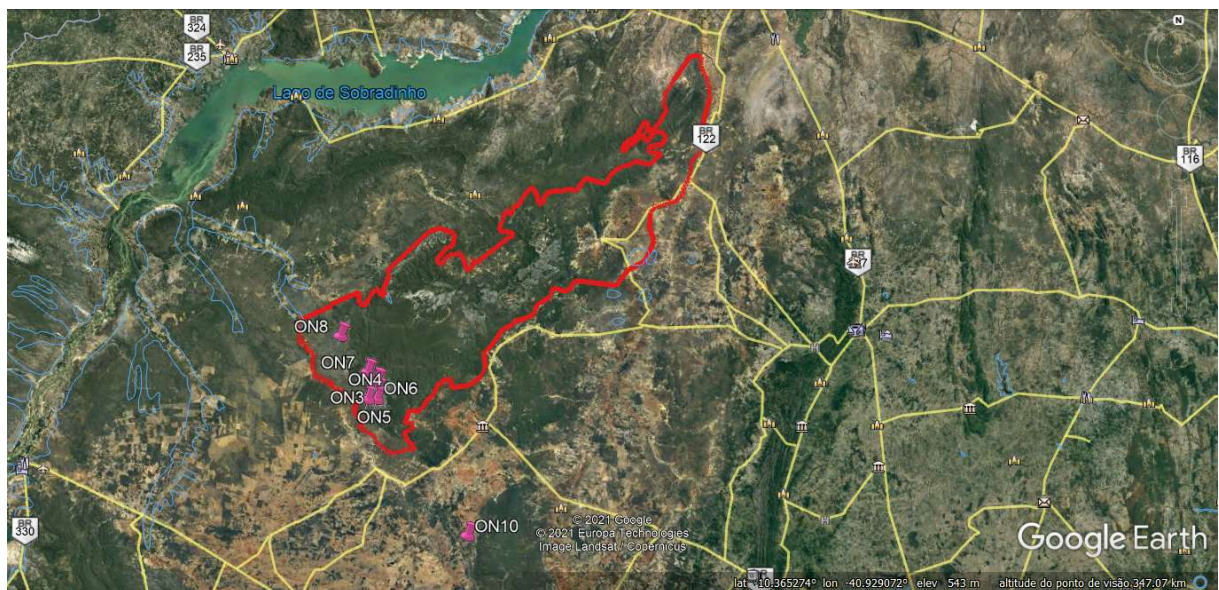


Figura 35 – Localização da APA do Boqueirão da Onça  
Fonte: Elaborada pela Pesquisadora (2021).

Entre os municípios de Morro do Chapéu e Cafarnaum, ao sul do Parque Estadual do Morro do Chapéu, a companhia de energia multinacional Enel Green Power, através de sua subsidiária brasileira de energias renováveis Enel Green Power Brasil Participações (EGPB) opera o complexo eólico Morro do Chapéu Sul (Figura 36), no estado da Bahia.





Figura 36 – Complexo eólico do Morro do Chapéu  
Fonte: Enel (2021).

Outro ponto com grande capacidade eólica, é o Top 09 (Tabela 24), com 11,7497 m/s de velocidade média a 150m de altura. As cidades que o rodeiam são Urandi (16,6 mil habitantes), Pindaí (15,6 mil habitantes) e Licínio de Almeida (12,6 mil habitantes). Mais ao norte dessa região existe o complexo eólico em operação Guirapá na cidade de Pindaí (BA) (Figura 37). O Complexo possui um potencial de aproximadamente 170MW, com fatores de capacidade superiores a 50%, índice acima da média nacional e mundial (BWGUIRAPA, 2021).



Figura 37 – Complexo eólico Guirapá  
Fonte: Confer (2021).

A Figura 38 e a Tabela 25 apresentam a localização dos 10 pontos com maior potencial eólico *offshore* simulado do estado da Bahia, a 150m de altitude. A região destacada em vermelho, costa marítima do extremo sul no município de Mucuri, na divisa com o estado do Espírito Santo, é a região com melhor aproveitamento da energia eólica *offshore*, com velocidades do vento médias de 8,04 m/s. Não somente o extremo sul da Bahia, mas também o norte do Espírito Santo apresenta grande potencial *offshore*.

**TABELA 25 - LOCALIZAÇÃO DOS 10 PONTOS COM MAIOR POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE NA BAHIA**

Top	Lat	Lon	Velocidade média (m/s)
01	-18,29556	-39,39536	8,04539
02	-18,32125	-39,42242	8,04516
03	-18,24416	-39,39536	8,04507
04	-18,29556	-39,42242	8,04440
05	-18,24416	-39,36829	8,04436
06	-18,21844	-39,36829	8,04436
07	-18,32125	-39,39536	8,04412
08	-18,26986	-39,36829	8,04316
09	-18,26986	-39,42242	8,04287
10	-18,21844	-39,39536	8,04244

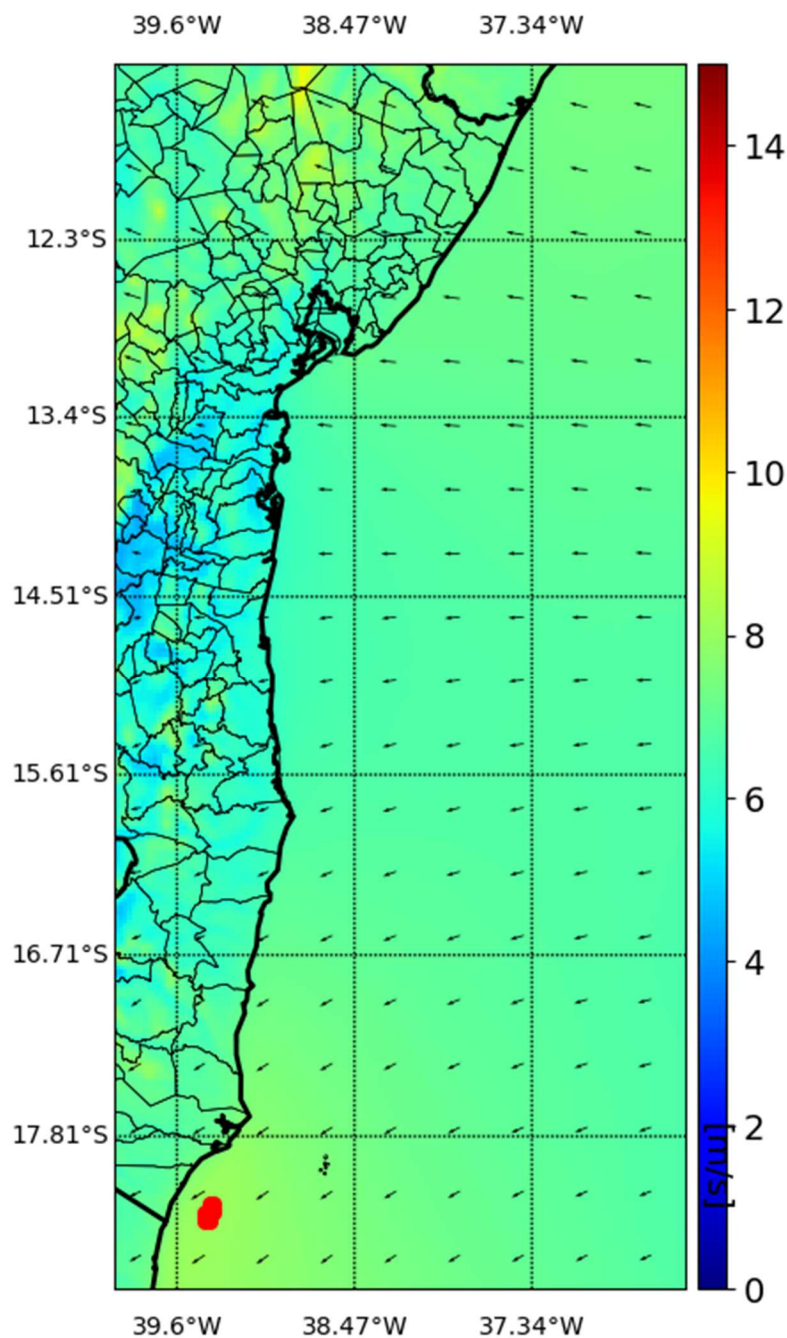


Figura 38 – Localização dos 10 pontos com o maior potencial eólico offshore a 150m de altura

## 5.5 DFA E MAPA EÓLICO

Além de detectar o crossover, o método DFA foi utilizado para análise da persistência da velocidade dos ventos na região de estudo, tendo em vista que a variabilidade dos ventos é um dos aspectos mais importantes a serem analisados em termos de potencial eólico. Neste sentido, o coeficiente angular ou expoente de

autossimilaridade  $\alpha$  que caracteriza a autocorrelação da série analisada variando entre  $0,5 < \alpha < 1$  indica que a série original apresenta correlações de longo alcance persistentes. No entanto, o padrão do vento é impulsionado pela forma do terreno subjacente. Por exemplo, um terreno mais áspero (ou seja, uma floresta, uma cidade, etc.) resultará em um aumento da turbulência e uma diminuição nas velocidades médias do vento, pois as estruturas criarão arrasto aerodinâmico. A turbulência também pode ser criada através de advecção vertical dentro de uma atmosfera estável ou instável. Neste sentido, estimativas da velocidade do vento para uma altura de 10 m podem experimentar alta turbulência devido à rugosidade superficial. Como resultado, a irregularidade na velocidade do vento é forte e, portanto,  $\alpha$  é geralmente baixo quando persistente. O oposto pode acontecer em regiões com dados registrados em alturas maiores em relação ao solo. Esse aumento da distância do solo resulta em uma diminuição da irregularidade do vento causada pela rugosidade superficial e, portanto, poderá resultar em maior valor para  $\alpha$ .

A Tabela 26 mostra o vento médio dos dados medidos no anemômetro e simulados pelo modelo WRF na altura de 10 m (média dos 5 anos), incluindo o comportamento de escala do vento medido, além do vento a 150 m estimado pelo modelo WRF.

**TABELA 26 – VALORES MÉDIOS DE CINCO ANOS DA VELOCIDADE DO VENTO A 10 M SIMULADOS E MEDIDOS EM TODAS AS ESTAÇÕES E SEUS RESPECTIVOS VALORES DE  $\alpha$  (Vs = Velocidade simulada (ms-1); Vm = Velocidade medida (ms-1))**

Estação	Vs (150 m)	Vs (10 m)	Vm (10 m)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
Buritirama	9,97	3,20	0,99	<b>0,85</b>	<b>0,72</b>	1,16
Guanambi	9,51	4,21	3,77	<b>0,92</b>	-	-
Remanso	9,09	5,06	3,37	1,13	<b>0,80</b>	1,23
Serrinha	8,99	4,00	2,73	1,27	<b>0,60</b>	1,19
Uaua	8,66	4,29	3,83	1,09	<b>0,89</b>	-
Irece	8,63	4,60	2,54	<b>0,85</b>	-	-
Bom J. da Lapa	8,62	2,87	1,39	<b>0,85</b>	<b>0,75</b>	<b>0,94</b>
Barra	8,43	3,96	1,86	<b>0,92</b>	<b>0,70</b>	1,14
Curaça	8,04	4,25	3,13	<b>0,99</b>	<b>0,94</b>	-
Feira de Santana	7,90	3,49	2,48	1,35	<b>0,59</b>	1,16
Vitória da Conquista	7,76	3,78	2,43	1,08	<b>0,85</b>	-
Caravelas	7,56	3,23	2,84	1,30	<b>0,78</b>	1,20
Ibotirama	7,52	3,25	1,97	<b>0,86</b>	-	-
Cruz das Almas	7,50	3,47	2,49	1,31	<b>0,64</b>	1,01
Abrolhos	7,34	6,42	5,67	1,17	<b>0,82</b>	<b>0,93</b>
Queimadas	7,25	3,53	3,21	1,18	<b>0,71</b>	1,16
Conde	7,20	3,58	3,46	1,18	<b>0,77</b>	1,27
Senhor do Bonfim	7,14	3,46	3,02	1,10	<b>0,85</b>	-
Jeremoabo	7,11	3,51	2,75	1,29	<b>0,65</b>	1,20
Santa R. de Cássia	6,94	2,79	1,69	1,11	<b>0,75</b>	1,34
Correntina	6,94	2,70	1,52	1,14	<b>0,76</b>	1,18
Salvador	6,90	4,22	1,47	1,11	<b>0,85</b>	-
Amargosa	6,64	3,69	1,16	<b>0,90</b>	<b>0,74</b>	-
Jacobina	6,64	3,94	1,96	1,12	<b>0,76</b>	1,14
Porto Seguro	6,58	2,53	1,43	1,35	<b>0,64</b>	1,16
Marau	6,48	4,07	2,01	1,08	<b>0,77</b>	<b>0,96</b>
Delfino	6,45	3,73	2,57	1,17	<b>0,77</b>	<b>0,87</b>
Una	6,37	2,43	1,28	1,14	<b>0,78</b>	-
Belmonte	6,36	2,44	1,67	1,28	<b>0,73</b>	<b>0,97</b>
Luiz E. Magalhães	6,34	3,09	2,51	1,05	<b>0,91</b>	-
Brumado	6,31	3,22	1,37	<b>0,92</b>	<b>0,73</b>	1,10
Piata	6,24	3,54	2,55	<b>0,85</b>	-	-
Itamaraju	6,20	3,00	2,40	<b>0,86</b>	-	-
Valença	6,06	2,28	1,38	1,34	0,45	1,09
Formoso do R. Preto	5,98	2,88	1,30	1,20	<b>0,79</b>	1,47
Itaberaba	5,95	2,66	2,06	1,19	<b>0,62</b>	1,17
Itiricu	5,92	3,73	2,19	1,04	<b>0,74</b>	1,15
Macajuba	5,71	3,01	2,47	1,18	<b>0,68</b>	1,09
Ipiau	5,63	1,92	1,45	1,25	<b>0,51</b>	1,12
Itapetinga	5,41	2,77	2,15	1,27	<b>0,58</b>	1,29
Barreiras	5,01	2,41	1,48	<b>0,99</b>	<b>0,67</b>	1,18
Lençóis	4,82	2,72	0,84	<b>0,71</b>	-	-

É possível verificar a similaridade do vento medido e simulado a 10 m, o que assegura a validade dos dados extrapolados pelo modelo a 150 m, também visto na mesma tabela. Possíveis discrepâncias entre os valores medidos e simulados a 10 m podem ser devido a resolução de 3 km para os dados simulados, grosseira dado o ponto analisado, além dos erros associados a topografia que tem influência direta na grade computacional. Os valores em negrito referem-se a ventos persistentes, que se traduz



em energia eólica quando submetido a um aerogerador (ARGÜESO; BUSINGER, 2018). Na Tabela 26, com exceção de Valença (E40), os resultados do DFA com médias horárias das estações apresentam persistência no segundo escala ( $\alpha_2$ ). Porém, há diferença em suas magnitudes, o que impacta no quanto cada um é mais persistente que outro. Sabe-se que valores altos de  $\alpha$ , dentro do intervalo de persistência, indicam alta persistência (ANJOS *et al.*, 2015). Concomitante a isso, a existência de persistência ou ventos constantes na região não define por si só a sua boa localização para geração de energia eólica, mas também a existência de ventos com boa intensidade na região.

Dentre os resultados da Tabela 26, o único local que apresenta persistência nas três escalas (devido ao *crossover* duplo) e com altos valores de persistência é Bom Jesus da Lapa (0,85, 0,75 e 0,94). Adiciona-se a isso o valor alto da velocidade média do vento neste ponto,  $8,62 \text{ ms}^{-1}$ . Dessa forma, este local seria indicado para exploração dos ventos, pois durante todo o período de estudo (5 anos) ele foi persistente e com alto valor de velocidade do vento médio. No caso offshore, o Arquipélago de Abrolhos também se caracteriza por ser um bom local para ventos, pois apresenta duas curvas com excelentes valores de  $\alpha$  (0,82 e 0,93) e com um valor de vento médio considerado dentro de níveis esperados para geração eólica ( $7,34 \text{ ms}^{-1}$ ).

Os resultados também mostram que as séries apresentaram correlações de longo alcance persistentes mais instáveis (maior variabilidade dos valores do expoente de escala). Entretanto, as séries de velocidade do vento a 10 m apresentaram uma persistência mais forte em alguns locais (maior valor do expoente da escala) em sua evolução temporal. Vale atentar que no período de estudo algumas séries apresentaram valores dos expoentes da escala menores (mesmo que ainda persistentes), podendo ter sido ocasionadas pelos fenômenos atmosférico oceânicos El Niño (forte em 2015 e 2016) e El Niña (fraco no período). O El Niño é caracterizado por um aquecimento anormal das águas superficiais no oceano Pacífico Tropical, e que pode afetar o clima regional e global, mudando os padrões de vento a nível mundial.

A Figura 39 mostra o mapa eólico a 10 m resultante das simulações com o modelo WRF para efeito comparativo com os resultados de DFA para todas as estações de superfície, tendo em mente a falta de dados em maiores altitudes.

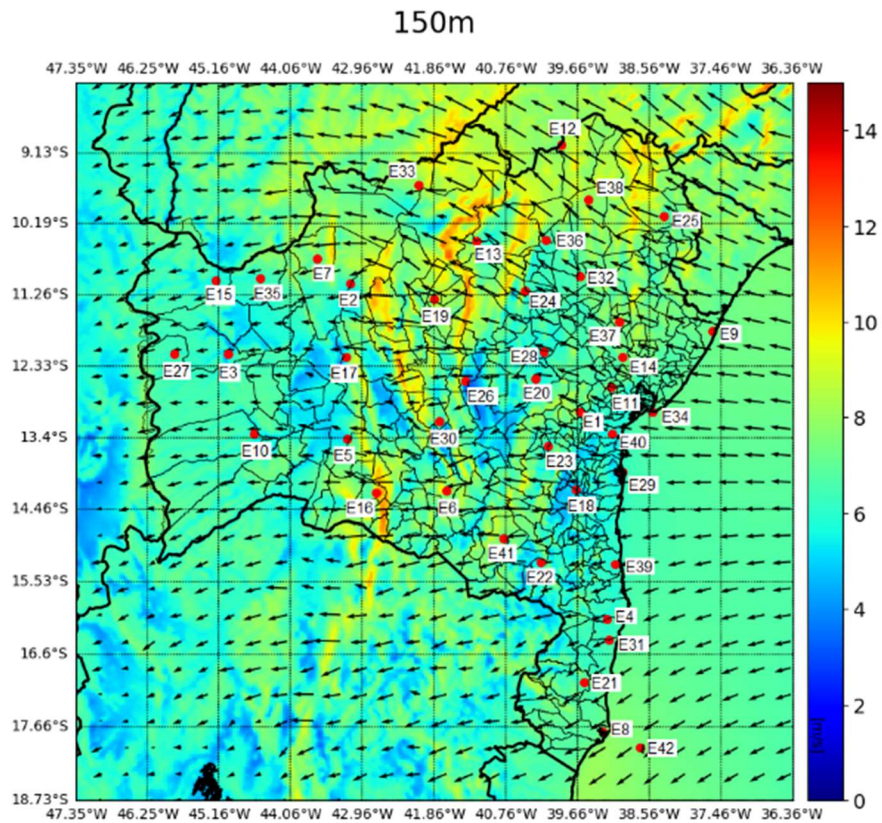
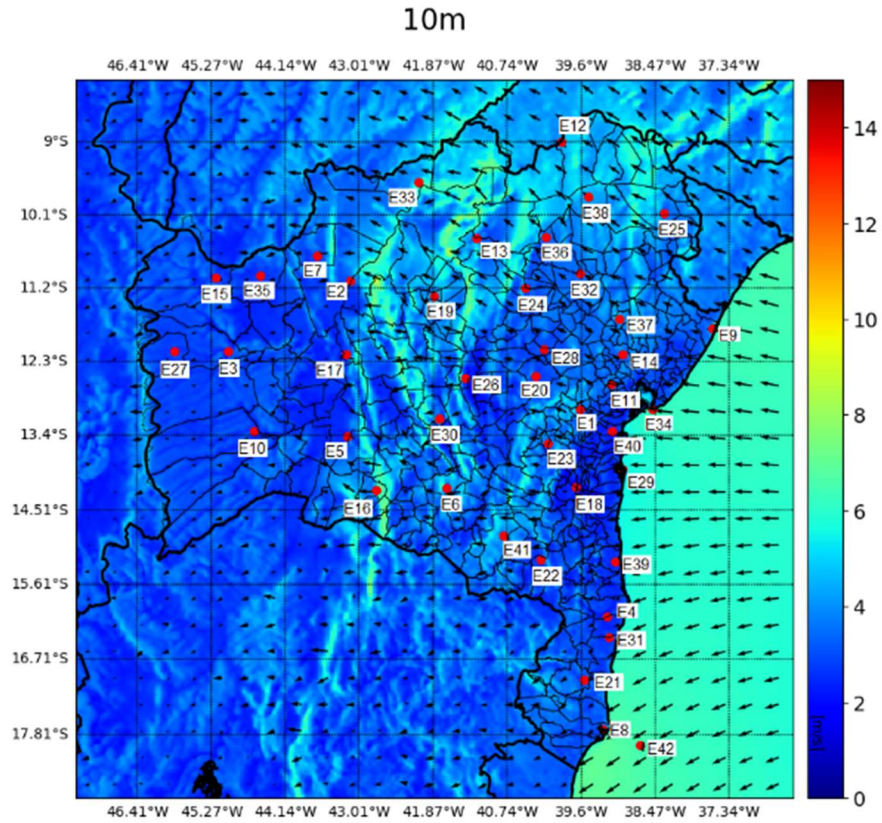


Figura 39 – Mapa eólico a 10 m e 150 m com a localização espacial das 42 estações anemométricas

Neste sentido, observa-se que a estrutura do campo de velocidade em 150 m se mantém similar a dos ventos em 10 m (localização espacial), mesmo que, como esperado, com intensidades diferentes. Percebe-se também bons indicativos de velocidades *offshore* mesmo em baixas alturas. Estes resultados sugerem que maiores alturas envolvem maior persistência da velocidade do vento do que alturas mais baixas, o que pode ser explicado pelo fato de que a rugosidade da superfície aumenta a turbulência do vento, e o impacto da rugosidade da superfície nos padrões de velocidade do vento diminui com a altura.

Percebe-se também pelas Tabela 26 e pela Figura 39 que, dentre as estações, Curaça (E12) apresentou dois comportamentos de escala, com altos valores para  $\alpha$ , sendo o primeiro 0,99 e o segundo 0,94, caracterizando-se como um excelente local em termos de altos valores de energia e persistência do vento, além de não apresentar influência do segundo crossover. Porém, outros locais como Ipiau (E18) e Itaberaba (E20), apresentaram baixos valores para a persistência do vento, 0,51 e 0,62, respectivamente, e em somente um dos três valores de expoente de escala, combinação essa que os excluiria de possíveis locais para utilização em energia eólica. Destaca-se o fato que esses locais também apresentaram valores mais baixos para a velocidade média do vento. Assim, quanto mais alto o valor do  $\alpha$  dentro do intervalo de persistência, melhores são os locais para energia eólica.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo simulou um período de 5 anos (2015-2020), com vistas a elaboração de um mapa eólico *onshore* e *offshore* do estado da Bahia, nordeste do Brasil. Para tanto, uma avaliação de desempenho do modelo WRF foi realizada, bem como, a avaliação de nove cenários oriundos das combinações de três esquemas de parametrização PBL e três esquemas de parametrização LSM. O modelo WRF foi capaz de capturar o comportamento geral da velocidade do vento. A combinação dos esquemas de parametrização YSU e RUC exibiu o melhor desempenho. Como esperado, o esquema simples de difusão térmica do solo, RUC, foi mais bem adaptado ao caso da Bahia, pois esta região não apresenta opção de neve. Observou-se também que o esquema RUC se enquadra no nível intermediário de complexidade.

É importante destacar que a velocidade do vento foi superestimada nas simulações e, em geral, as direções do vento estimadas pelas simulações foram bastante semelhantes aos dados observados. Além disso, foi observado que a proximidade com o oceano degradou a precisão das simulações. Assim, as torres de Mucugê e Esplanada, mais distantes do mar, exibiram os melhores resultados para todas as métricas estatísticas em relação à velocidade do vento. No entanto, a evolução horária média das velocidades do vento observadas e simuladas em Mucugê exibiu menos dissonância. Uma análise desagregada dos resultados correspondentes aos períodos chuvoso e seco em cada torre revelou que esquema YSU-RUC é o melhor. Esse fato deu suporte à aplicação da combinação do PBL-YSU e do LSM-RUC à simulação da produção de energia eólica para todo o estado da Bahia.

A fim de verificar a persistência do vento foi estudado as características do seu comportamento de escala, visto que são necessários ventos persistentes para a geração de energia eólica. Para isso foi utilizada a técnica DFA que apresentou bons resultados e a maioria das regiões se mostraram com comportamento persistente para a velocidade do vento. No entanto, algumas regiões se destacaram pois apresentaram persistência para valores de vento médios mais elevados, além de valores altos do expoente de autossimilaridade, caracterizando-se como excelentes locais em termos de altos valores de energia e persistência do vento.

A média horária do vento *onshore* e *offshore* para o estado da Bahia demonstra o grande potencial eólico da região, com altas e médias velocidades em altitude, o que está de acordo com os limiares mínimos de atratividade para investimentos em geração de energia eólica. Salienta-se a região *onshore* com maiores valores de velocidade do vento do que a região *offshore*. Em geral, o modelo superestimou a velocidade do vento tanto nas estações automáticas de superfície que cobrem o estado, quanto nas torres em altitude. No entanto, os resultados mostraram que o modelo foi capaz de capturar bem o comportamento geral da velocidade do vento, em especial em alturas típicas do rotor de um aerogerador (a partir de 80 m). Neste sentido, quando comparados aos resultados das torres, é perceptível que em altitude o modelo representa melhor os dados observados se comparado com baixa altitude de uma estação de superfície padrão (10 m), devido a distorção na integração da topografia (orografia e costa), variações acentuadas nas características aerodinâmicas e, também, devido às heterogeneidades do uso e tipo de solo. No entanto, um comportamento diferente ocorreu para a variável direção do vento, a qual mostrou maior adaptabilidade às estações de superfície.

Com relação a sazonalidade, a estação do inverno apresenta maiores valores da velocidade do vento para a região *onshore*, enquanto que na estação da primavera as maiores médias para a velocidade do vento são alcançadas para a região *offshore*, seguida pela estação do verão. Observa-se também que a medida que a altura aumenta, o valor da velocidade do vento aumenta na região *onshore*, porém com pouca variação na parte *offshore*. A diminuição da velocidade do vento com a altura, em função do atrito com a superfície é perfeitamente visualizada em terra, e esse comportamento difere sob a água devido ao menor atrito entre a atmosfera e a superfície oceânica. Constatou-se também que o regime de ventos no período noturno é mais intenso do que o período diurno, quando os valores da velocidade média do vento caem, indicando uma grande complementariedade com a energia solar. Pode-se também verificar a complementariedade entre o potencial eólico *onshore* e *offshore* nas estações seca e úmida, pois a estação seca apresenta maiores valores da velocidade do vento em terra e a estação úmida se sobressai na costa marítima.

Finalmente, este estudo indicou a costa marítima do extremo sul para a região *offshore* e as regiões mais ao norte e sudoeste do estado para a região *onshore*, como as

regiões de destaque para a geração de energia eólica na região de cobertura do estado da Bahia. Como um trabalho futuro, será feita uma análise de complementaridade entre a energia eólica e solar para a região, tendo em vista a crescente escassez hídrica e a bem conhecida dependência dos grandes reservatórios de água para o fornecimento de energia elétrica na região, sempre atentos as mudanças climáticas emergentes.

Os resultados encontrados nessa pesquisa podem ser úteis ao desenvolvimento e validação de modelos teóricos e computacionais, que auxiliem as estimativas para a velocidade do vento no estado da Bahia, cuja necessidade em encontrar soluções para implementação de energia elétrica por fontes alternativas é eminente à garantia do desenvolvimento sustentável do estado e do Brasil. Como trabalho futuro, pode-se verificar se as séries analisadas possuem as propriedades multifractais e se existem as correlações cruzadas entre estas séries (fractais ou multifractais), procedimento útil à avaliação de possibilidade de implementação de um sistema híbrido (eólico e solar).

## REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA – **Boletim anual de geração eólica**. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>>. Acesso em: 21 junho 2019.
- ADDISON, P. S. **Fractals and Chaos: An Illustrated Course**. 1a. Ed. London, CRC Press, 1997.
- AMJAD, M.; ZAFAR, Q.; KHAN, F.; SHEIKH, M. M. Evaluation of weather research and forecasting model for the assessment of Wind resource over Ghara, Pakistan. **International Journal of Climatology**, 35, 1821-183, 2015. <https://doi.org/10.1002/joc.4089>
- ANJOS, P. S. **Correlação de longo alcance em séries temporais da velocidade do vento e radiação solar em Fernando de Noronha, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.
- ARGÜESO, D.; BUSINGER, S. Wind power characteristics of Oahu, Hawaii. **Renewable Energy**, 128, 324-336, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.080>
- ATKINSON, B.W. 1981. **Meso-scale Atmospheric Circulations**. London Acad. Press. Atlas Climático de Sudamerica. Mapa 4. <http://www.master.iag.usp.br/ind.php?inic=00□=ensino&pos=2>. Acessado em: 23.07.2020.
- AVOLIO, E.; FEDERICO, S.; MIGLIETTA, M. M.; LO FEUDO, T.; CALIDONNA, C. R.; SEMPREVIVA, A. M. Sensitivity analysis of WRF model PBL schemes in simulating boundary-layer variables in southern Italy: An experimental campaign. **Atmospheric Research**, 192, 58-71, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.003>
- BANKS, R. F.; TIANA-ALSINA, J.; BALDASANO, J. M.; ROCADENBOSCH, F.; PAPAYANNIS, A.; SOLOMOS, S.; TZANIS, C. G. Sensitivity of boundary layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations, lidar, and radiosondes during the HygrA-CD campaign. **Atmospheric Research**, 176-177:185-201, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.024>
- BANKS, R. F.; BALDASANO, J. M. Impact of WRF model PBL schemes on air quality simulations over Catalonia, Spain. **Science of the Total Environment**, 572, 98-113, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.167>
- BASHANA, A.; BARTSCH, R.; KANTELHARDT, J. W.; HAVLIN, S. Comparison of detrending methods for fluctuation analysis. **Physica A**, 387, 5080-5090, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.04.023>

BELJAARS, A. C. M. The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 121, 255-270, 1994. <https://doi.org/10.1002/qj.49712152203>

BOADH, R.; SATYANARAYANA, A. N. V.; RAMA KRISHNA, T. V. B. P. S.; MADALA, S. Sensitivity of PBL schemes of the WRF-ARW model in simulating the boundary layer flow parameters for their application to air pollution dispersion modeling over a tropical station. **Atmosfera**, 29, 61-81, 2016. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.01.05>

BRUNT D. Notes on radiation in the atmosphere. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 58, 389, 1932. <https://doi.org/10.1002/qj.49705824704>

BUNDE, A.; HAVLIN, S.; KANTELHARDT, J. W.; PENZEL, T.; PETER, J. H.; VOIGT, K. Correlated and uncorrelated regions in heart-rate fluctuations during sleep. **Physical Review Letters**, 85, 3736-3739, 2000. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3736>.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. New York: John Wiley & Sons, Ltd, v. 1, 2001.

BWGUIRAPA, 2021. Disponível em: <<http://www.bwguirapa.com.br/quemsomos.php>>. Acessado em: 21 abr 2021.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, 17, 88-108, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2)

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. S. Sensitivity of the WRF model wind simulation and wind energy production estimates to planetary boundary layer parameterizations for onshore and offshore areas in the Iberian Peninsula. **Applied Energy**, 135, 234-246, 2014a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.082>

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. S. WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. **Applied Energy**, 117, 116–126, 2014b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.001>

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. S. A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. **Environmental Modelling & Software**, 33, 23–34, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.01.019>

CASARIN, D. P.; KOUSKY, V. E. Anomalias de precipitação no sul do Brasil e variações na circulação atmosférica. **Brazilian Journal of Meteorology**, 1, 83-90, 1986.



CHEN, F.; DUDHIA, J. Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. **Monthly Weather Review**, 129, 569-585, 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)

CHEN, X.; GUANGXING, L.; ZUNTAO, F. Long-range correlations in daily relative humidity fluctuations: new indexes to characterize the climate regions over China. **Geophysical Research Letters**, 34, L07804, 2007. <https://doi.org/10.1029/2006GL027755>

CHENG, F. Y.; CHIN, S. C.; LIU, T. H. The role of boundary layer schemes in meteorological and air quality simulations of the Taiwan area. **Atmospheric Environment**, 54, 714–727, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.029>

CHENG, W. Y. Y.; LIU, Y.; BOURGEOIS, A. J.; WU, Y.; HAUPT, S. E. Short-term wind forecast of a data assimilation/weather forecasting system with wind turbine anemometer measurement assimilation. **Renewable Energy**, 107, 340-351, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.014>

CHENG, W. Y. Y.; LIU, Y.; ZHANG, Y.; MAHONEY, W. P.; WARNER, T. T. The impact of model physics on numerical wind forecasts. **Renewable Energy**, 55, 347-356, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.041>

CONFER, 2021. Disponível em [http://www.conferconstrutora.com.br/ultimas\\_obras/3/complexo\\_eolico\\_guirapa\\_i\\_em\\_pindai\\_e\\_caetite\\_ba-38](http://www.conferconstrutora.com.br/ultimas_obras/3/complexo_eolico_guirapa_i_em_pindai_e_caetite_ba-38). Acessado em 20 Abr 2021.

DE LEÓN, S. P.; ORFILA, A. Numerical study of the marine breeze around Mallorca Island. **Applied Ocean Research**, 40, 26–34, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2012.12.003>

D'ISIDORO, M.; BRIGANTI, G.; VITALI, L.; RIGHINI, G.; ADANI, M.; GUARNIERI, G.; MORETTI, L.; RALISELO, M.; MAHAHABISA, M.; CIANCARELLA, L.; ZANINI, G.; FINO, E. Estimation of solar and wind energy resources over Lesotho and their complementarity by means of WRF yearly simulation at high resolution. **Renewable Energy**, 158, 114-129, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.106>

DOURADO, M.; OLIVEIRA, A. P. Observational description of the atmospheric and oceanic boundary layers over the Atlantic Ocean. **Revista Brasileira de Oceanografia**, 49(1-2), 49-59, 2001. <https://doi.org/10.1590/S1413-77392001000100005>

DRAPER, M.; GUGGERI, A.; MENDINA, M.; USERA, G.; CAMPGANOLO, F. A Large Eddy Simulation-Actuator Line Model framework to simulate a scaled wind energy facility and its application. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, 182, 146-159, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.09.010>

DUDHIA, J. **WRF physics options**. NCAR WRF basic tutorial, 26–30 July 2010, NCAR, Boulder, CO, 154–158, 2010.

EMERY, C.; TAI, E.; YARWOOD, G. **Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes**. Prepared for the Texas natural resource conservation commission, by ENVIRON International Corporation, 2001.

FEDER, J. **Fractals**. Physics: University of Oslo. Norway. Springer Science - Business Media, LLC. Physics of Solids and Liquids. Fractals-Springer US, 1988.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, S.; MARTÍN, M.L.; GARCIA-ORTEGA, E.; MERINO, A.; LORENZANA, J.; SÁNCHEZ, J.L.; VALERO, F.; RODRIGO, J.S. Sensitivity Analysis of the WRF Model: Wind-Resource assessment for complex terrain. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 57, 733-753, 2018. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0121.1>

FERRARI, F.; BESIO, G.; CASSOLA, F.; MAZZINO, A. Optimized wind and wave energy resource assessment and offshore exploitability in the Mediterranean Sea. **Energy**, 190, 116447, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116447>

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste e a influência dos oceanos Pacíficos e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, 1, 15-28, 2006.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, 119(6), 1293-1302, 1991. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2)

GIANNAKOPOULOU, E-M.; NHILI, R. WRF Model Methodology for Offshore Wind Energy Applications. **Advances in Meteorology**, 2014, ID 319819, 14p, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/319819>

GIANNAROS, T. M.; MELAS, D.; ZIOMAS, I. Performance evaluation of the Weather Research and Forecasting (WRF) model for assessing wind resource in Greece. **Renewable Energy**, 102, 190-198, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.033>

GIEBEL, G.; BROWNSWORD, R.; KARINIOTAKIS, G.; DENHARD, M.; DRAXL, C. **The state-of-the-art in short-term prediction of wind power**: A literature overview. Relatório técnico, ANEMOS. plus, 2011.

GILLIAM, R. C.; PLEIM, J. E. Performance assessment of new land surface and planetary boundary layer physics in the WRF-ARW. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 49, 760-774, 2010. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2126.1>

GLAHN, B.; GILBERT, K.; COSGROVE, R.; RUTH, D.; SHEETS, K. The gridding of MOS. **Weather and Forecasting**, 24(2), 520-529, 2009. <https://doi.org/10.1175/2008WAF2007080.1>

GUNWANI, P.; MOHAN, M. Sensitivity of WRF model estimates to various PBL parameterizations in different climatic zones over India. **Atmospheric Research**, 194, 43-65, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.026>

HARIPRASAD, K. B. R. R.; SRINIVAS, C. V.; SINGH, A. B.; RAO, S. V. B.; BASKARAN, R.; VENKATRAMAN, B. Numerical simulation and intercomparison of boundary layer structure with different PBL schemes in WRF using experimental observations at a tropical site. **Atmospheric Research**, 145-146, 27–44, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.023>

HOLTSLAG, A. A. M.; BOVILLE, B. A. Local Versus Nonlocal Boundary-Layer Diffusion in a Global Climate Model, **American Meteorological Society**, 6, 1825-2842, 1993. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1825:LVNBLD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1825:LVNBLD>2.0.CO;2)

HONG, S.-Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Process. **Monthly Weather Review**, 134(9), 2318-2341, 2006. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>

HONG, S.-Y.; DUDHIA, J.; CHEN, S.-H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. **Monthly Weather Review**, 132(1), 103–120, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)

IMRAN, H. M.; Kala, J.; Ng, A. W. M; MUTHUKUMARAN, S. An evaluation of the performance of a WRF multi-physics ensemble for heatwave events over the city of Melbourne in the southeast Australia. **Climate Dynamics**, 50, 2553-2586, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3758-y>

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

ISLAM, T.; SRIVASTAVA, P. K.; RICO-RAMIREZ, M. A.; DAI, Q.; GUPTA, M.; SINGH, S. K. Tracking a tropical cyclone through WRF–ARW simulation and sensitivity of model physics. **Nat. Hazards**, 76, 1473-1495, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1494-8>

IVANOVA, K.; AUSLOOS, M. Application of the detrended fluctuation analysis (DFA) method for describing cloud breaking. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 274, 349-354, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(99\)00312-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(99)00312-X)

JAIN, S.; PANDA, J.; RATH, S. S.; DEVARA, P. C. S. Evaluating Land Surface Models in WRF Simulations over DMIC Region. **Indian Journal of Science and Technology**, 10, 1-24, 2017. <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i18/103522>

JANJIC, Z. I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, 122, 927-945, 1994. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)

JIANG, Z.-Q.; CHEN, W.; ZHOU, W.-X. Detrended fluctuation analysis of intertrade durations. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 388(4), 433-440, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.10.028>

JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J. Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 51, 300-316, 2012. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-084.1>

JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J. On the Ability of the WRF Model to Reproduce the Surface Wind Direction over. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 52, 1610-1617, 2013. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0266.1>

JONG, P.; DARGAVILLE, R.; SILVER, J.; UTEMBE, S.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast electricity grid. **Applied Energy**, 195(1), 538-555, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.058>

KITAGAWA, Y. K. L.; NASCIMENTO, E. G. S.; SOUZA, N. B. P. de; ZUCATELLI, P. J.; AYLAS, G. Y. R.; MOREIRA, D. M.; SALVADOR, N. **Assessment of the sensitivity of the WRF model using different PBL schemes over the Metropolitan Region of Salvador**. XXXVIII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE2017), 2017. <https://doi.org/10.20906/CPS/CILAMCE2017-0647>

KOÇAK, K. Examination of persistence properties of wind speed records using detrended fluctuation analysis. **Energy**, 34, 1980-1985, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.08.006>

KOUSKY, V.; CAVALCANTI, I. F. A. Eventos oscilação sul - El Niño: características, evolução e anomalias de precipitação. **Ciência e Cultura**, 36(11), 1888-1899, 1984.

KUMAR, R. A.; DUDHIA, J.; BHOWMIK, S. K. R. Evaluation of physics options of the Weather Research and Forecasting (WRF) Model to simulate high impact heavy rainfall events over Indian Monsoon region. **Geofisika**, 27, 101-125, 2010.

KUMAR, R.; STALLARD, T.; STANSBY, P. Large-scale offshore wind energy installation in northwest India: Assessment of wind resource using Weather Research and Forecasting and levelized cost of energy. **Wind Energy**, 24, 174-192, 2021. <https://doi.org/10.1002/we.2566>

LEE, C. B.; KIM, J.; BELORID, M.; ZHAO, P. Performance Evaluation of Four Different Land Surface Models in WRF. **Asian Journal of Atmospheric Environment**, 10(1), 42-50, 2016. <https://doi.org/10.5572/ajae.2016.10.1.042>

LIMA, D. K. S.; LEÃO, R. P. S.; DOS SANTOS, A. C. S.; MELO, F. D. C.; COUTO, V. M.; DE NORONHA, A. W. T.; OLIVEIRA JR, D. S. Estimating the offshore wind resources of the State of Ceará in Brazil. **Renewable Energy**, 83, 203-221, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.025>

LINAJE, N. G. A.; MATTAR, C.; BORVARÁN, D. Quantifying the wind energy potential differences using different WRF initial conditions on Mediterranean coast of Chile. **Energy**, 188, 116027, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116027>

LIU, L.; MA, Y.; MENENTI, M.; ZHANG, X.; MA, W. Evaluation of WRF Modeling in Relation to Different Land Surface Schemes and Initial and Boundary Conditions: A Snow Event Simulation Over the Tibetan Plateau. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 124, 209-226, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JD029208>

LIU, Y.; CIZEAU, P.; MEYER, M.; PENG, C. K.; STANLEY, H. E. Correlations in economic time series. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 245, 437-440, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(97\)00368-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00368-3)

LUCENA, L. R. R. D.; ARAÚJO, L. D. S.; STOSIC, T.; FILHO, M. C. Long term correlations and lacunarity of wind direction in Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Biometria**, 35(4), 645-657, 2017.

LUMPKIN, R.; GARZOLI, S. Near-surface circulation in the tropical Atlantic ocean, Part II: time-mean currents and seasonal variability. **Deep-Sea Research I**, 53(3), 495-518, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.09.001>

MANDELBROT, B. **The Fractal Geometry of Nature**. New York: W.H. Freeman and Company, 1983.

MARJANOVIC, N.; WHARTON, S.; CHOW, F. K. Investigation of model parameters for high-resolution wind energy forecasting: Case studies over simple and complex terrain. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, 134, 10-24, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.007>

MATTAR, C.; BORVARÁN, D. Offshore Wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile. **Renewable Energy**, 94, 22-31, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.005>

MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; SOUZA, P. P. **Zona de convergência intertropical do Atlântico: tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2, 25-41, 2009.

MENDES, C. do R. S. **Proposta de uma Metodologia Livre para Avaliação de Potencial Eólico de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de São João Del Rei, 2011.

MOHAN, M.; BAHATI, S. Analysis of WRF Model Performance over Subtropical Region of Delhi, India. **Advances in Meteorology**, 2011, 1-13, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/621235>

MOLION, L. C. B. Aquecimento Global, El Niños, manchas solares, vulcões e oscilação decadal do Pacífico. **Revista Climanálise**, 3(1), 1-10, 2006.

MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere. **Tr. Akad. Nauk SSSR Geophiz. Inst.**, 24, 163-187, 1954.

National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2015, updated daily. NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D65Q4T4Z>. Acessado em: 23 janeiro 2017.

NIU, G.-Y.; YANG, Z.-L.; MITCHELL, K. E.; CHEN, F.; EK, M. B.; BARLAGE, M.; KUMAR, A.; MANNING, K.; NIYOGI, D.; ROSERO, E.; TEWARI, M.; XIA, Y. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. **Journal of Geophysical Research**, 116, D12109, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>

OBUKHOV, A. M. Turbulence in an Atmosphere with a Non-Uniform Temperature. **Boundary-Layer Meteorology**, 2, 7-29, 1971.

OLIVEIRA, S. S. **Análise do potencial eólico do estado da Paraíba utilizando modelos de mesoescala**. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2013.

ORTEGA, A.; ESCOBAR, R.; COLLE, S.; ABREU, S. L. The state of solar energy resource assessment in Chile. **Renewable Energy**, 35(11), 2514-2524, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.022>

ORUN, M.; KOÇAK, K. Application of detrended fluctuation analysis to temperature data from Turkey. **International Journal of Climatology**, 29, 2130-2136, 2009. <https://doi.org/10.1002/joc.1853>

PAULSON, C. A. The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 9(6), 857-861, 1970. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1970\)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1970)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2)

PEI, L.; MOORE, N.; ZHONG, S.; LUO, L.; HYNDMAN, D. W.; HEILMAN, W. E.; GAO, Z. WRF Model Sensitivity to Land Surface Model and Cumulus Parameterization under Short-Term Climate Extremes over the Southern Great Plains of the United States. **Journal of Climate**, 27, 7703-7724, 2014. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00015.1>

PENCHAH, M. M.; MALAKOOTI, H.; SATKIN, M. Evaluation of planetary boundary layer simulations for wind resource study in east of Iran. **Renewable Energy**, 111, 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.040>

PENG, C. K.; BULDYREV, S. V.; HAVLIN, S.; SIMONS, M.; STANLEY, H. E.; GOLDBERGER, A. L. Mosaic organization of DNA nucleotides. **Physical Review E**, 49(2), 1685-1989, 1994. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.1685>

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic ocean. **Progress in Oceanography**, 26, 1-73, 1991. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90006-8)

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B. D.; QUADRO, M. F. A review on the ocean atmosphere interaction processes in regions of strong sea surface temperature gradients of the South Atlantic Ocean based on observational data. **Brazilian Journal of Meteorology**, 31(4), 428-453, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778631231420150032>

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B. **Variabilidade de meso-escala e interação oceano-atmosfera no Atlântico sudoeste**. In: Iracema F. A. Cavalcanti; Nelson J. Ferreira; Maria Assunção F. Dias; Maria Gertrudes A. Justi. (Org.). *Tempo e Clima no Brasil*, 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1, 385-405, 2009.

PHILANDER, S. G. H. Instabilities of zonal equatorial currents. **Journal of Geophysical Research**, 81, 3725-3735, 1976. <https://doi.org/10.1029/JC081i021p03725>

PLEIM, J. E. A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part II: Application and Evaluation in a Mesoscale Meteorological Model. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 46, 1396-1409, 2007. <https://doi.org/10.1175/JAM2534.1>

RAMOS, D. N. S.; LYRA, R. F. F.; SILVA JÚNIOR, R. S. Previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 28, 163-172, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000200005>

RAMOS, D. N. da S. **Mapeamento eólico do estado de Alagoas utilizando ferramentas computacionais e dados observados**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, 2012.

REBOITA, M. S. **Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: simulação climática e experimentos numéricos de sensibilidade**. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, 230pp, 2008.

REITER, E. R. Tropopause Circulations and Jet Streams. *World Survey of Climatology*. **Climate of Free Atmosphere**, 4, 85-204, 1969.

SALAMANCA, F.; ZHANG, Y.; BERLAGE, M.; CHEN, F.; MAHALOV, A.; MIAO, S. Evaluation of the WRF-Urban Modeling System Coupled to Noah and Noah-MP Land Surface Models Over a Semiarid Urban Environment. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 123, 2387-2408, 2018. <https://doi.org/10.1002/2018JD028377>

SALVAÇÃO, N.; SOARES, C. G. Wind resource assessment offshore the Atlantic Iberian coast with the WRF model. **Energy**, 145, 276-287, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.101>

SALVADOR, N.; LORIATO, A. G.; SANTIAGO, A.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; REIS, N. C.; SANTOS, J. M.; LANDULFO, E.; MOREIRA, G.; LOPES, F.; HELD, G.; MOREIRA, D. M. Estudo da camada limite interna térmica em condições de brisa do mar, utilizando diferentes parametrizações: Aplicação do modelo WRF na região da

Grande Vitória. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 31(4), 593–609, 2016a. <https://doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150093>

SALVADOR, N.; REIS, N. C.; SANTOS, J. M.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; LORIATO, A. G.; DELBARRE, H.; AUGUSTIN, P.; SOKOLOV, A.; MOREIRA, D. M. Evaluation of weather research and forecasting model parameterizations under sea-breeze conditions in a North Sea coastal environment. **Journal of Meteorological Research**, 30(6), 998–1018, 2016b. <https://doi.org/10.1007/s13351-016-6019-9>

SALVADOR, N. **Estudo da Camada Limite Atmosférica em Regiões Metropolitanas Costeiras com Simulações de Brisa Marítima**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

SANTIAGO, A. M. **Formação e transporte de material particulado na região metropolitana da Grande Vitória/ES: utilização e avaliação de desempenho do modelo CMAQ**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

SANTOS, A. T. S.; SILVA, C. M. S.; LEMOS, D. F. A.; OLIVEIRA, L. L.; BEZERRA, L. A. C. Assessment of wind resources in two parts of Northeast Brazil with the use of numerical models. **Meteorological Applications**, 23, 563-573, 2016. <https://doi.org/10.1002/met.1595>

SANTOS, J. V. C.; MOREIRA, D. M.; MORET, M. A.; NASCIMENTO, E. G. S. Analysis of long-range correlations of wind speed in different regions of Bahia and the Abrolhos Archipelago, Brazil. **Energy**, 167, 680-687, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.015>

SANTOS, J. V. C.; PERINI, N. B.; MORET, M. A.; NASCIMENTO, E. G. S.; MOREIRA, D. M. Scaling behavior of wind speed in the coast of Brazil and the South Atlantic Ocean: the *crossover* phenomenon. **Energy**, 217, 119413, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119413>

SANTOS, J. V. C. **Estudo das características espaciais e temporais da velocidade do vento utilizando a técnica DFA e o modelo WRF em regiões do estado da Bahia e no Oceano Atlântico Sul**. Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – SENAI CIMATEC, Salvador, 2020.

SANTOS, M. O.; STOSIC, T.; STOSIC, B. D. Long-term correlations in hourly wind speed records in Pernambuco, Brazil. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 391(4), 1546-1552, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.08.041>

SANTOS-ALLAMILOS, F. J.; POZO-VÁSQUWZ, D.; RUIZ-ARIAS, J. A.; LARA-FANEGO V.; TOVAR-PESCADOR J. Anaysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain). **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 52, 1592-1609, 2013. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0204.1>



SHIN, H. H.; HONG, S. Y. Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parameterizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99. **Boundary-Layer Meteorology**, 139, 261–281, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9583-z>

SILVA, J. C. M. **Geradores Eléctricos para Aproveitamentos de Energias Renováveis**. 157f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

SIWY, Z.; AUSLOSS, M.; IVANOVA, K. Correlation studies of open and closed state fluctuations in an ion channel: Analysis of ion current through a large-conductance locust potassium channel. **Physical Review E**, 65, 031907, 2002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.031907>

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; DUDA, M. G. ; HUANG, X.-Y.; WANG, W.; POWERS, J. G. **A Description of the Advanced Research WRF Version 3**. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp, 2008. <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>

SMIRNOVA, T. G.; BROWN, J. M.; BENJAMIN, S. G. Performance of Different Soil Model Configurations in Simulating Ground Surface Temperature and Surface Fluxes. **Monthly Weather Review**, 125, 1870-1884, 1997. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<1870:PODSMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<1870:PODSMC>2.0.CO;2)

SMIRNOVA, T. G.; BROWN, J. M.; BENJAMIN, S. G.; KIM, D. Parameterization of cold-season processes in the MAPS land-surface scheme, **Journal of Geophysical Research**, 105, 4077-4086, 2000. <https://doi.org/10.1029/1999JD901047>

SONI, M.; PAYRA, S.; SINHA, P.; VERMA, S. A Performance Evaluation of WRF Model Using Different Physical Parameterization Scheme during Winter Season over a Semi-Arid Region, India. **International Journal of Earth and Atmospheric Science I**, 1, 104-114, 2014.

SOUZA, N. B. P.; NASCIMENTO, E. G. S.; MOREIRA, D. M. Performance evaluation of the WRF model in a tropical region: wind speed analysis at different sites. **Atmòsfera**, 1-53, 2021. <https://doi.org/10.20937/ATM.52968>, In press.

STUCKI, P.; DIERER, S.; WELKER, C.; GOMEZ-NAVARRO, J. J.; RAIBLE, C. C.; MARTIUS, O.; BRONNIMANN, S. Evaluation of downscaled wind speeds and parameterized gusts for recent and historical windstorms in Switzerland. **Tellus A**, 68, 31820, 2016. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.31820>

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Springer Science & Business Media, 2012.

SURUSSAFADEE, C. **Evaluation of Tropical Near-Surface Wind Forecasts Using Ground Observations**. The 8th International Renewable Energy Congress (IREC 2017), 2017a. <https://doi.org/10.1109/IREC.2017.7926006>

SURUSSAFADEE, C. **Evaluation of WRF near-surface wind Simulations in Tropics Employing different planetary boundary layer schemes**. The 8th

International Renewable Energy Congress (IREC 2017), 2017b. <https://doi.org/10.1109/IREC.2017.7926005>

TSONIS, A. A.; ROEBBER, P. J.; ELSNER, J. B. Long-range correlations in the extratropical atmospheric circulation: origins and implications. **Journal of Climate**, 12, 1534-1541, 1999. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1534:LRCITE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1534:LRCITE>2.0.CO;2)

TUCHTENHAGEN, P.; CARVALHO, G. G.; MARTINS, G.; SILVA, P. E.; OLIVEIRA, C. P.; ANDRADE, L. M. B.; ARAÚJO, J. M.; MUTTI, P. R.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. WRF model assessment for Wind intensity and power density simulation in the Southern coast of Brazil. **Energy**, 190, 116341, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116341>

TUCHTENHAGEN, P.; BASSO, J.; YAMASAKI, Y. Avaliação do potencial eólico no Brasil em 2011. **Ciência e Natura**, 36, 390-401, 2014. <https://doi.org/10.5902/2179460X13148>

TYAGI, B.; MAGLIULO, V.; FINARDI, S.; GASBARRA, D.; CARLUCCI, G.; TOSCANO, P.; ZALDEI, A.; RICCIO, A.; CALORI, G.; D'ALLURA, A.; GIOLI, B. Performance analysis of Planetary Boundary Layer parameterization schemes in WRF modeling set up over southern Italy. **Atmosphere**, 9, 272, 2018. <https://doi.org/10.3390/atmos9070272>

WHARTON, S.; SIMPSON, M.; OSUNA, J. L.; NEWMAN, J. F.; BIRAUD, S. C. Role of Surface Energy Exchange for Simulating Wind Turbine Inflow: A Case Study in the Southern Great Plains, USA. **Atmosphere**, 6, 21-49, 2015. <https://doi.org/10.3390/atmos6010021>

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, 32(13), 2088-2094, 2012. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, 2, 184-194, 1981. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>

WONNACOTT, T. H.; WONNACOTT R. J. 1972. **Introductory Statistics**. JohnWiley & Sons: New York, NY, 510 pp.

XIE, B.; FUNG, J. C. H.; CHAN, A.; LAU, A. Evaluation of nonlocal and local planetary boundary layer schemes in the WRF model. **Journal of Geophysical Research**, 117, D12103, 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JD017080>

XIU, A.; PLEIM, J. E. Development of a Land Surface Model. Part I: Application in a Mesoscale Meteorological Model. **American Meteorological Society**, 40, 192-209, 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<0192:DOALSM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0192:DOALSM>2.0.CO;2)

ZEMPILA, M.-M.; GIANNAROS, T. M.; BAIS, A.; MELAS, D. Evaluation of WRF shortwave radiation parameterizations in predicting Global Horizontal Irradiance in

Greece. **Renewable Energy**, 86, 831-840, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.057>

ZHANG, D.; ANTHES, R. A. A High-resolution Model of the Planetary Boundary Layer-Sensitivity Tests and Comparisons with SESAME-79 Data. **Journal of Applied Meteorology**, 21, 1594-1609, 1982. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1982\)021<1594:AHRMOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1982)021<1594:AHRMOT>2.0.CO;2)

ZILITINKEVICH, S. S. Non-local turbulent transport: pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows. **Transactions on Ecology and the Environment**, 6, 53-60, 1995. <https://doi.org/10.2495/AIR950071>

ZUCATELLI, P. J.; NASCIMENTO, E. G. S.; AYLAS, G. Y. R.; SOUZA, N. B. P.; KITAGAWA, Y. K. L.; ARCE, A. M. G.; MOREIRA, D. M. Short-term wind speed forecasting in Uruguay using computational intelligence. **Heliyon**, 5, e01664, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01664>

ZUCATELLI, P. J.; NASCIMENTO, E. S.; SANTOS, A. A. B.; GUTIERREZ, A.; MOREIRA, D. M. An investigation on deep learning and wavelet transform to nowcast wind power and wind power ramp: A case study in Brazil and Uruguay. **Energy**, 230, 120842, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120842>

# **APÊNDICES**

**APÊNDICE A – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período chuvoso para a torre de Mucuri**

H	Estat.	Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	-16,521	-15,729	-22,478	-16,604	-19,043	-19,613	<b>-14,723</b>	-16,694	-15,647	
	RMSE	<b>37,438</b>	41,138	43,454	39,797	41,680	43,525	38,223	41,979	41,322	
	MAGE	<b>26,687</b>	29,174	30,803	27,481	29,049	29,859	28,411	30,457	29,964	
	d <sub>r</sub>	0,628	0,587	0,639	0,630	<b>0,657</b>	0,647	0,598	0,593	0,601	
	R	0,361	0,372	<b>0,485</b>	0,388	0,461	0,458	0,340	0,329	0,348	
	Fat2	81,098	79,040	77,668	82,393	81,707	<b>82,470</b>	78,277	80,488	80,030	
	DP	83,496	90,788	71,163	81,518	<b>60,695</b>	63,823	90,784	81,603	81,488	70,127
120 m	MB	-18,225	-16,909	-23,940	-18,972	-20,325	-20,983	<b>-16,616</b>	-18,416	-16,813	
	RMSE	<b>38,501</b>	42,485	45,038	41,021	42,843	44,774	40,131	43,688	42,878	
	MAGE	<b>28,263</b>	30,898	32,666	29,514	30,942	31,874	30,417	32,446	31,878	
	d <sub>r</sub>	0,629	0,577	0,628	0,604	<b>0,657</b>	0,633	0,582	0,595	0,582	
	R	0,402	0,373	0,487	0,366	<b>0,519</b>	0,449	0,334	0,355	0,331	
	Fat2	78,582	77,973	75,457	80,335	80,412	<b>81,326</b>	76,753	78,735	77,896	
	DP	84,714	92,571	73,181	85,839	<b>64,094</b>	68,103	92,851	81,536	84,455	71,535
100 m	MB	-15,136	-14,750	-20,134	-16,179	-17,741	-18,595	<b>-14,541</b>	-16,238	-14,579	
	RMSE	<b>38,569</b>	41,783	45,256	41,005	43,359	44,785	40,299	44,494	42,423	
	MAGE	<b>26,950</b>	29,421	31,222	28,315	29,954	30,829	29,374	31,740	30,600	
	d <sub>r</sub>	0,659	0,621	0,655	0,639	<b>0,682</b>	0,653	0,617	0,625	0,631	
	R	0,411	0,399	0,464	0,380	<b>0,498</b>	0,416	0,343	0,360	0,377	
	Fat2	80,198	79,970	76,847	80,427	79,284	<b>81,036</b>	77,609	78,827	79,360	
	DP	87,587	93,248	77,552	86,872	<b>67,014</b>	70,230	94,490	82,480	85,343	78,704

**APÊNDICE B – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período menos chuvoso para a torre de Mucuri**

H	Estat.	Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	<b>-17,346</b>	-17,857	-18,237	-19,795	-17,659	-20,104	-19,259	-19,361	-19,574	
	RMSE	<b>45,150</b>	51,517	47,544	48,378	50,057	47,437	54,970	52,832	56,366	
	MAGE	<b>31,810</b>	35,448	33,175	33,352	35,180	33,170	39,471	38,506	39,808	
	d <sub>r</sub>	0,561	0,523	0,546	<b>0,597</b>	0,561	0,560	0,440	0,408	0,406	
	R	0,301	0,216	0,244	<b>0,474</b>	0,413	0,358	0,259	0,212	0,246	
	Fat2	<b>65,126</b>	61,345	58,964	64,986	62,605	62,885	49,720	50,280	51,961	
	DP	88,796	86,133	<b>81,869</b>	96,214	97,961	93,899	111,177	115,472	118,353	83,477
120 m	MB	-19,893	-20,137	-20,609	-20,762	<b>-18,197</b>	-21,351	-20,583	-21,709	-21,148	
	RMSE	<b>47,503</b>	53,531	50,178	50,263	52,054	50,370	56,499	53,870	57,734	
	MAGE	<b>34,249</b>	37,661	35,489	35,386	37,231	35,659	41,319	40,149	41,547	
	d <sub>r</sub>	0,534	0,521	0,545	<b>0,594</b>	0,537	0,569	0,433	0,391	0,376	
	R	0,279	0,254	0,294	<b>0,516</b>	0,392	0,407	0,271	0,210	0,227	
	Fat2	61,905	61,064	57,283	<b>62,745</b>	59,664	60,644	48,319	49,860	51,120	
	DP	89,447	85,182	<b>81,896</b>	96,945	98,580	93,454	110,147	115,546	119,643	81,947
100 m	MB	-16,714	-16,621	-17,163	-18,309	<b>-16,514</b>	-17,212	-20,288	-18,829	-17,910	
	RMSE	<b>47,241</b>	53,125	49,357	49,763	51,351	49,737	54,575	52,189	56,175	
	MAGE	<b>32,567</b>	35,956	33,439	33,513	35,186	33,475	38,884	37,634	39,140	
	d <sub>r</sub>	0,562	0,539	0,581	<b>0,620</b>	0,564	0,590	0,477	<b>0,433</b>	0,423	
	R	0,286	0,214	0,315	<b>0,500</b>	0,379	0,405	0,294	0,208	0,246	
	Fat2	<b>65,966</b>	63,165	60,644	65,126	63,585	64,286	52,101	52,521	53,361	
	DP	92,102	85,530	<b>84,357</b>	97,557	99,833	95,609	111,837	115,388	120,464	86,662

**APÊNDICE C – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período chuvoso para a torre de Esplanada**

H	Estat.	Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	-46,941	<b>-42,982</b>	-50,643	-50,637	-53,187	-53,847	-45,008	-49,434	-44,902	
	RMSE	<b>60,216</b>	66,624	61,489	62,003	62,498	64,943	63,920	63,970	63,482	
	MAGE	<b>52,021</b>	57,119	54,047	54,572	55,652	57,502	54,215	54,960	53,717	
	d <sub>r</sub>	0,166	0,036	0,160	0,141	0,139	0,108	0,137	0,149	<b>0,167</b>	
	R	0,346	-0,048	0,606	0,476	<b>0,669</b>	0,567	0,315	0,522	0,465	
	Fat2	<b>90,536</b>	88,309	90,049	90,466	90,188	89,492	85,943	88,309	88,657	
	DP	44,265	57,711	34,669	38,430	<b>33,156</b>	35,128	47,425	41,375	43,328	42,778
120 m	MB	-25,086	<b>-23,129</b>	-28,827	-30,809	-33,737	-33,643	-24,471	-28,952	-24,670	
	RMSE	51,335	60,381	<b>50,601</b>	50,967	50,696	53,147	55,771	54,241	53,826	
	MAGE	<b>37,541</b>	44,893	38,036	39,245	39,617	41,295	42,405	41,671	40,913	
	d <sub>r</sub>	0,410	0,249	<b>0,440</b>	0,408	0,427	0,392	0,342	0,381	0,393	
	R	0,284	-0,043	0,544	0,445	<b>0,658</b>	0,524	0,248	0,432	0,409	
	Fat2	92,028	87,133	93,706	91,748	<b>94,685</b>	93,077	88,252	91,818	91,748	
	DP	47,446	59,250	37,141	40,841	<b>34,474</b>	37,085	51,636	45,792	45,428	49,718
100 m	MB	-32,310	<b>-29,783</b>	-35,295	-37,247	-39,703	-40,222	-29,843	-35,054	-31,813	
	RMSE	50,239	59,036	<b>49,121</b>	50,871	49,789	53,023	55,994	54,516	53,920	
	MAGE	<b>40,151</b>	46,919	40,656	42,744	42,751	44,774	45,290	44,705	43,851	
	d <sub>r</sub>	0,275	0,107	<b>0,307</b>	0,255	0,278	0,240	0,197	0,238	0,255	
	R	0,292	-0,050	0,571	0,461	<b>0,686</b>	0,562	0,267	0,474	0,452	
	Fat2	91,093	87,822	93,459	91,788	<b>94,085</b>	92,971	88,100	90,745	91,371	
	DP	49,771	60,388	40,347	44,427	<b>35,441</b>	38,372	54,165	47,603	46,709	39,421

**APÊNDICE D – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período menos chuvoso para a torre de Esplanada**

H	Estat.	Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
150 m	MB	-34,361	-34,183	<b>-31,115</b>	-36,316	-37,513	-37,382	-33,917	-37,152	-34,067	
	RMSE	47,679	49,482	<b>44,854</b>	46,773	48,581	48,310	47,798	49,665	48,167	
	MAGE	40,913	41,590	<b>38,034</b>	41,252	42,929	42,648	40,872	42,892	41,164	
	d <sub>r</sub>	0,159	0,140	<b>0,227</b>	0,165	0,144	0,138	0,144	0,093	0,125	
	R	0,396	0,364	0,517	0,494	0,391	<b>0,523</b>	0,367	0,318	0,300	
	Fat2	88,719	85,086	89,293	<b>91,205</b>	89,245	89,579	85,946	86,759	87,237	
	DP	34,407	42,245	37,917	<b>33,787</b>	39,214	35,634	45,040	49,265	46,580	36,804
120 m	MB	-15,239	-15,601	<b>-11,618</b>	-16,574	-18,322	-18,310	-14,376	-17,390	-14,587	
	RMSE	34,113	37,143	32,935	<b>32,580</b>	34,139	33,533	35,786	36,490	36,428	
	MAGE	24,254	26,609	<b>23,123</b>	24,016	25,396	24,888	26,215	26,851	26,352	
	d <sub>r</sub>	0,456	0,386	<b>0,479</b>	0,475	0,420	0,460	0,390	0,366	0,383	
	R	0,388	0,293	0,426	0,508	0,368	<b>0,548</b>	0,349	0,340	0,324	
	Fat2	92,447	89,388	92,973	<b>94,885</b>	93,595	94,312	91,539	91,444	91,587	
	DP	35,816	43,265	38,941	<b>34,778</b>	39,574	36,343	46,642	50,018	47,138	37,371
100 m	MB	-22,538	-22,763	<b>-18,783</b>	-23,578	-25,856	-25,823	-21,292	-25,099	-21,209	
	RMSE	37,617	40,877	<b>36,320</b>	36,775	38,563	37,847	39,642	41,071	40,457	
	MAGE	29,671	31,835	<b>27,787</b>	29,831	31,443	30,981	31,461	32,639	31,663	
	d <sub>r</sub>	0,345	0,292	<b>0,394</b>	0,360	0,299	0,340	0,286	0,248	0,283	
	R	0,408	0,370	0,509	0,531	0,380	<b>0,593</b>	0,371	0,341	0,359	
	Fat2	91,683	87,763	92,113	<b>93,690</b>	92,304	92,830	89,866	90,057	89,914	
	DP	36,887	44,292	41,225	<b>34,890</b>	40,230	36,582	48,257	51,991	48,264	35,359

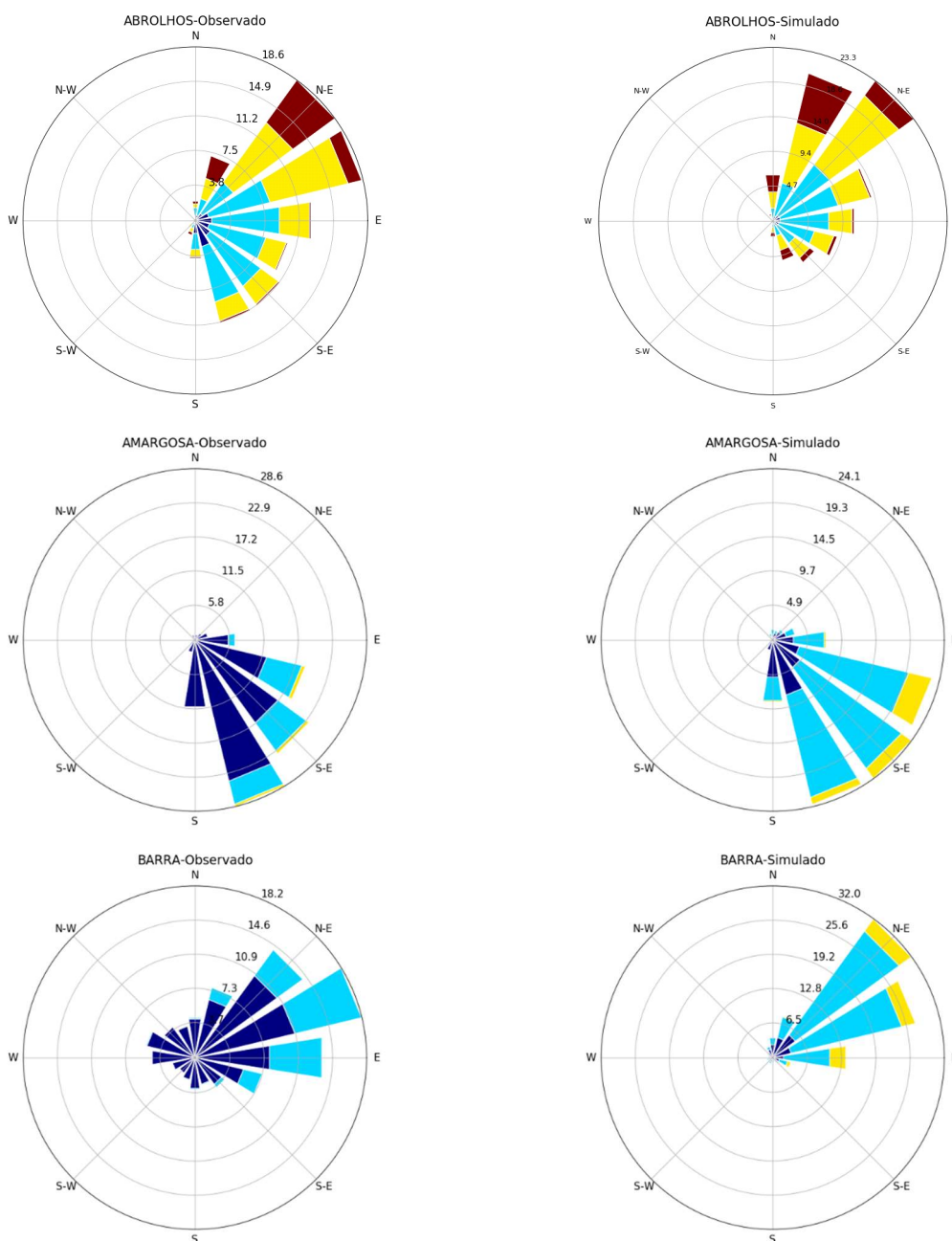
**APÊNDICE E – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período chuvoso para a torre de Mucugê**

H	Estat.	Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
120 m	MB	0,454	4,340	<b>0,149</b>	-4,326	-5,499	-1,662	-3,763	-0,768	-2,566	
	RMSE	<b>39,540</b>	40,795	43,329	45,172	44,633	40,648	46,144	43,912	42,983	
	MAGE	23,613	24,118	25,146	25,948	26,024	<b>23,342</b>	27,637	26,436	25,652	
	d <sub>r</sub>	0,473	<b>0,519</b>	0,455	0,401	0,447	0,497	0,368	<b>0,390</b>	0,438	
	R	0,227	0,289	0,238	0,251	0,301	0,294	0,271	0,285	<b>0,302</b>	
	Fat2	77,969	<b>79,113</b>	77,253	76,609	76,609	78,398	74,177	74,893	75,751	
	DP	85,297	<b>82,037</b>	89,544	96,763	93,470	87,553	101,607	101,043	96,903	73,107
100 m	MB	-22,078	<b>-18,129</b>	-22,414	-24,981	-26,435	-24,526	-24,068	-24,043	-23,775	
	RMSE	46,365	<b>45,313</b>	49,502	52,687	52,894	47,927	53,175	50,616	50,027	
	MAGE	35,110	<b>32,777</b>	36,721	39,134	39,431	36,772	38,432	37,455	36,796	
	d <sub>r</sub>	0,317	<b>0,389</b>	0,298	0,234	0,272	0,311	0,230	0,258	0,289	
	R	0,208	0,267	0,216	0,216	0,265	0,263	0,243	<b>0,281</b>	0,271	
	Fat2	76,466	<b>79,757</b>	75,823	74,678	75,107	76,681	73,176	73,963	74,392	
	DP	83,259	<b>79,959</b>	87,532	94,562	91,583	86,076	99,958	99,144	94,846	67,136

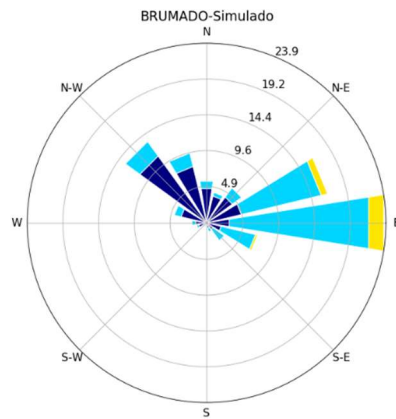
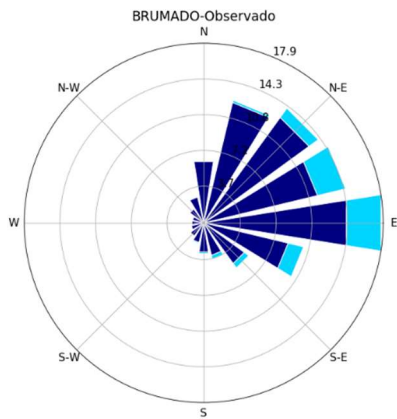
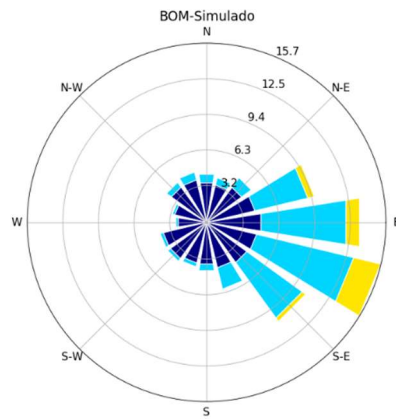
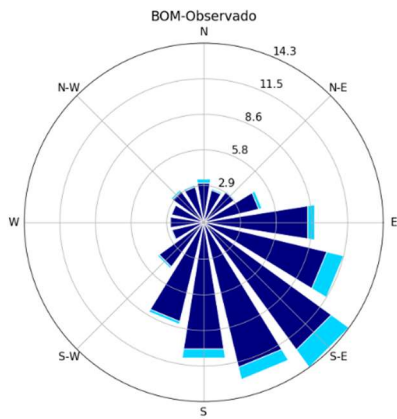
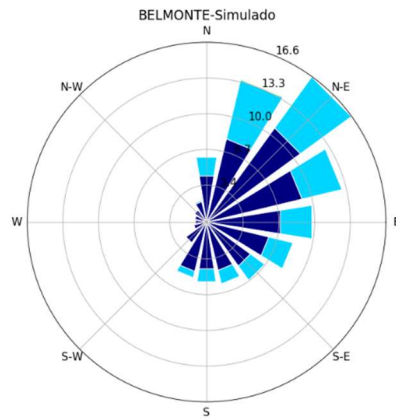
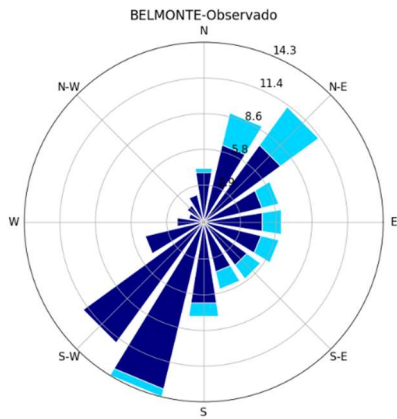
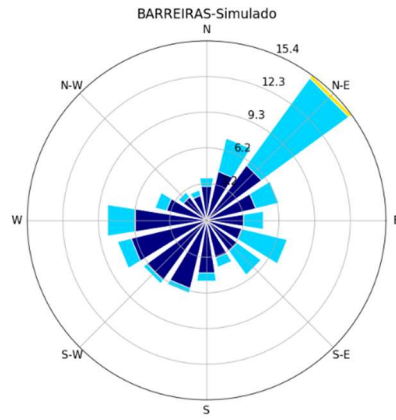
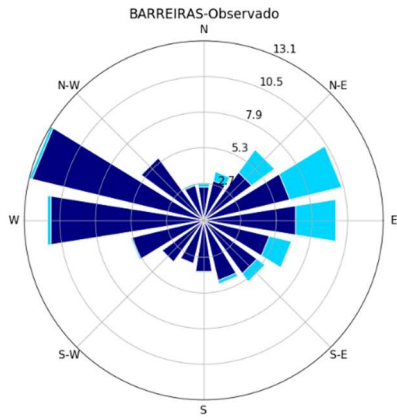
**APÊNDICE F – Resultados das métricas estatísticas ao comparar os dados simulados e observados da direção do vento para o período menos chuvoso para a torre de Mucugê**

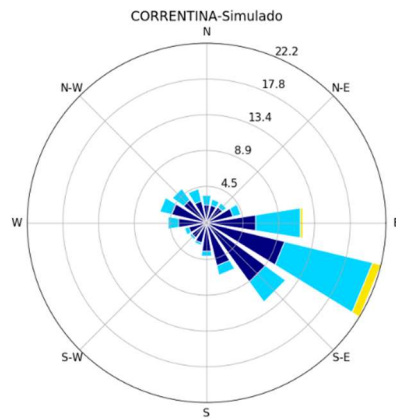
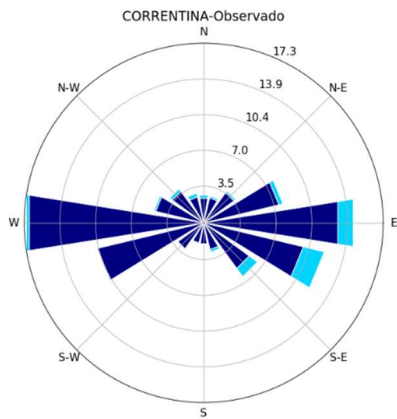
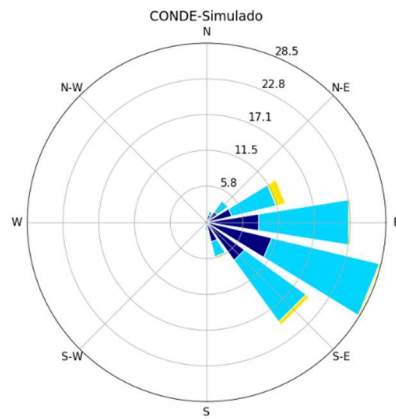
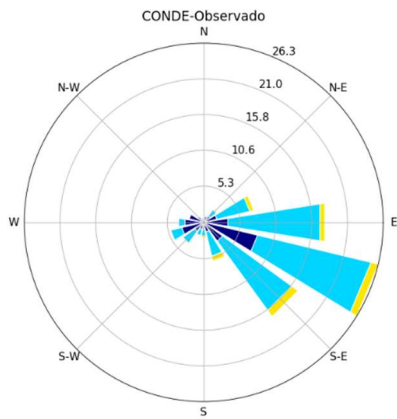
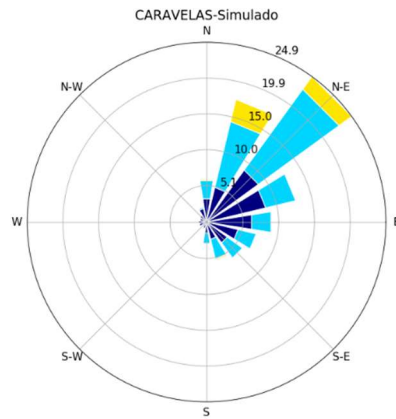
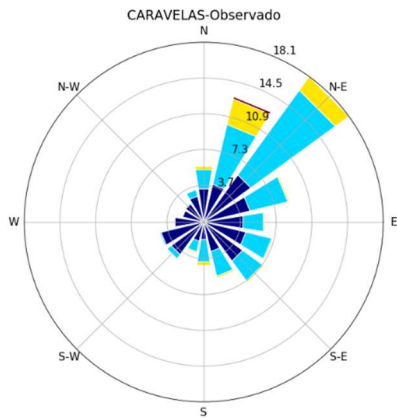
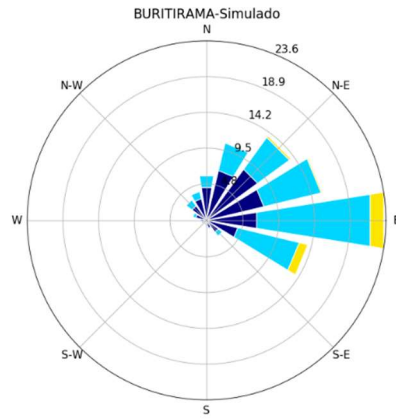
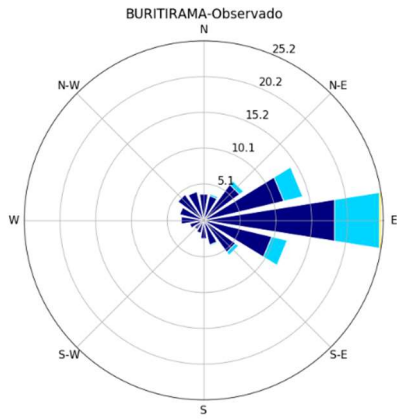
H	Estat.	Cen1	Cen2	Cen3	Cen4	Cen5	Cen6	Cen7	Cen8	Cen9	Obs
120 m	MB	-1,463	4,796	-3,673	0,813	0,071	-0,989	0,881	-0,191	<b>-0,044</b>	
	RMSE	32,155	39,648	29,760	31,376	31,168	<b>29,742</b>	32,876	32,015	31,148	
	MAGE	18,118	22,992	16,608	18,021	17,462	<b>16,548</b>	18,988	18,509	17,969	
	d <sub>r</sub>	0,523	0,470	0,560	0,565	0,580	<b>0,606</b>	0,533	0,535	0,552	
	R	0,224	0,185	0,294	0,373	<b>0,406</b>	0,398	0,278	0,355	0,325	
	Fat2	91,587	89,210	93,014	92,063	93,526	<b>94,221</b>	91,807	91,734	92,868	
	DP	47,934	42,496	48,417	44,649	42,426	<b>41,799</b>	44,684	49,466	46,076	37,430
100 m	MB	-26,910	<b>-18,329</b>	-28,475	-24,272	-24,760	-26,009	-24,137	-25,998	-25,112	
	RMSE	41,871	43,801	41,844	<b>40,097</b>	40,422	40,204	41,139	41,300	40,524	
	MAGE	32,536	32,239	33,213	<b>31,023</b>	31,948	31,847	31,627	32,423	31,587	
	d <sub>r</sub>	0,273	0,301	0,264	<b>0,329</b>	0,324	0,318	0,301	0,285	0,298	
	R	0,236	0,183	0,297	0,355	<b>0,427</b>	0,374	0,260	0,340	0,302	
	Fat2	90,710	89,356	90,819	92,502	92,099	<b>93,416</b>	91,185	90,380	91,587	
	DP	46,141	<b>41,173</b>	46,776	44,064	43,396	41,281	43,838	48,841	45,955	37,692

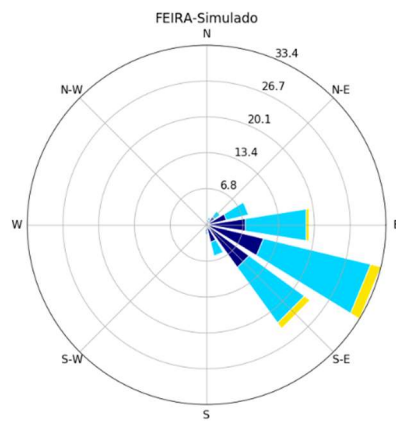
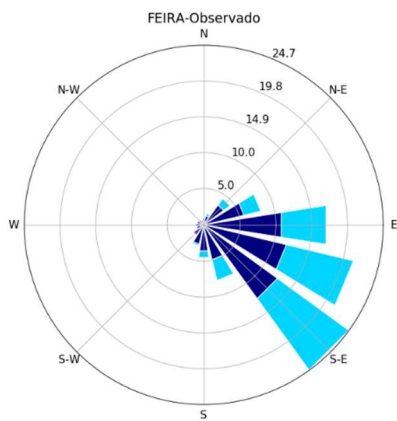
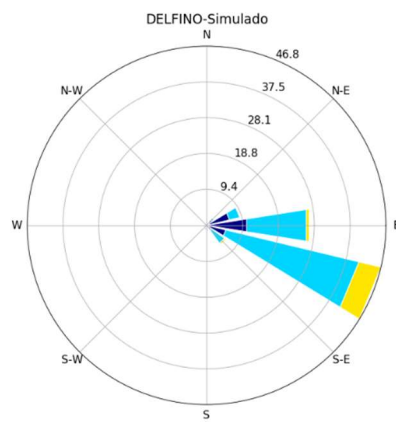
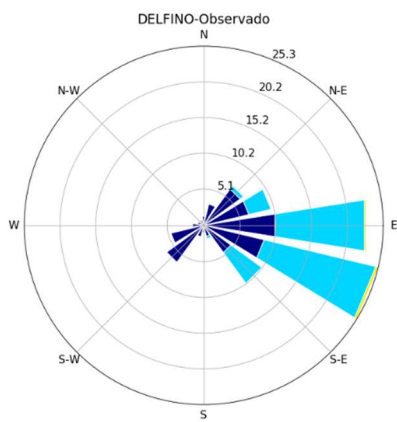
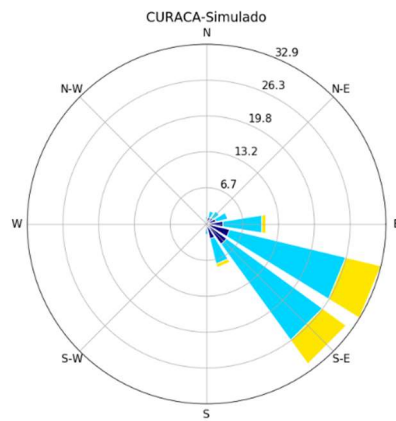
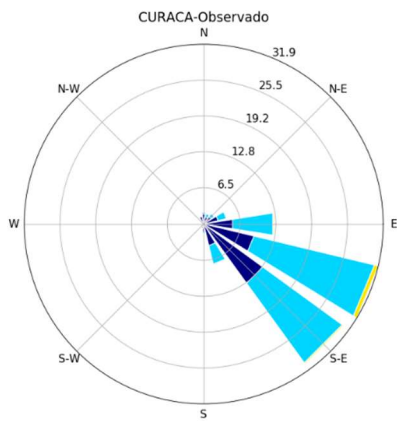
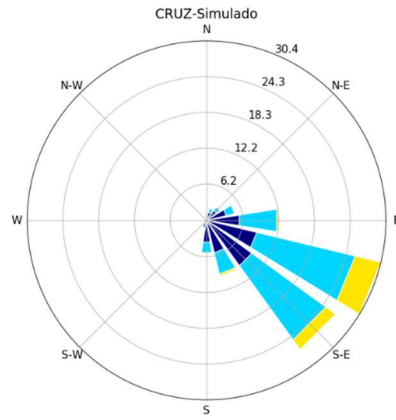
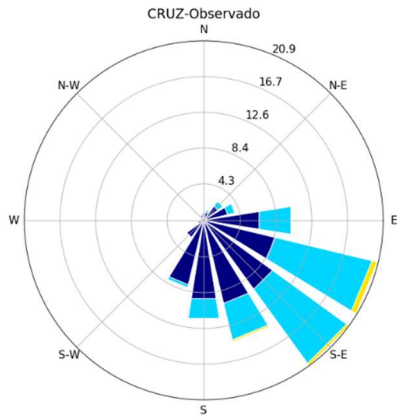
**APÊNDICE G – Comparação das rosas dos ventos obtidas através dos dados simulados e observados sobre as coordenadas geográficas das estações do Inmet para o período de 2015-2020**

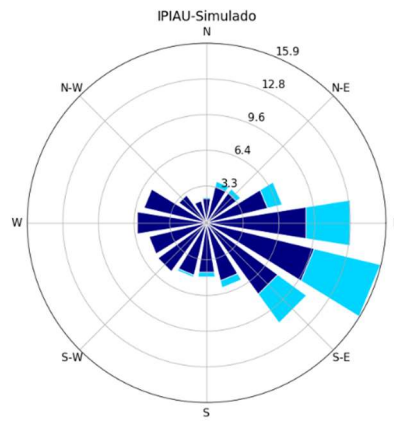
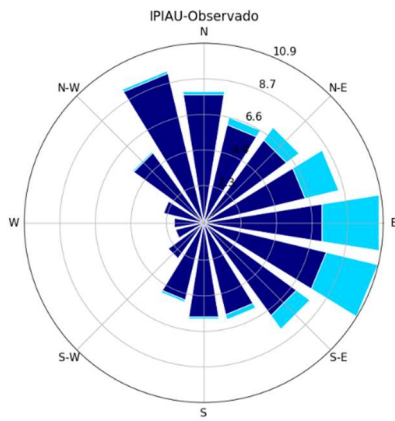
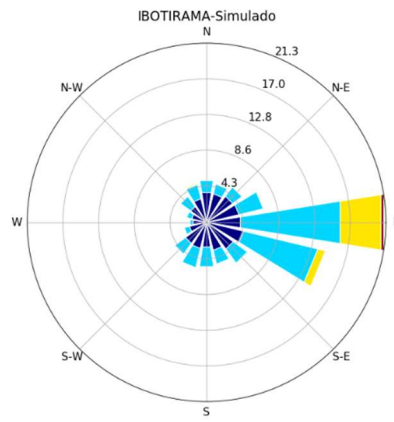
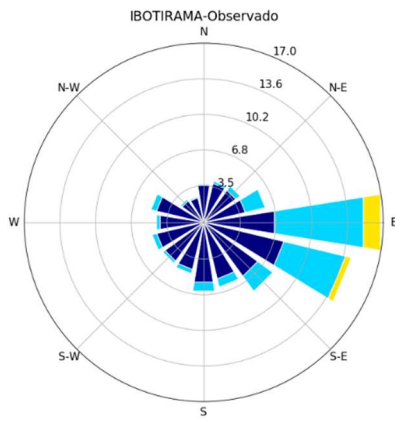
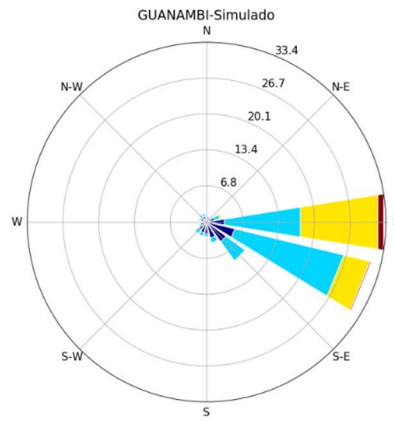
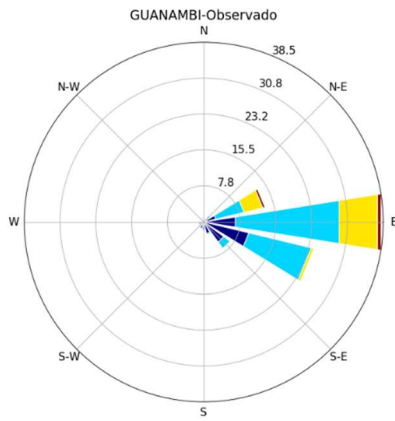
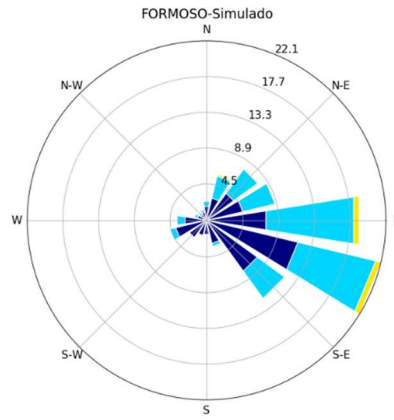
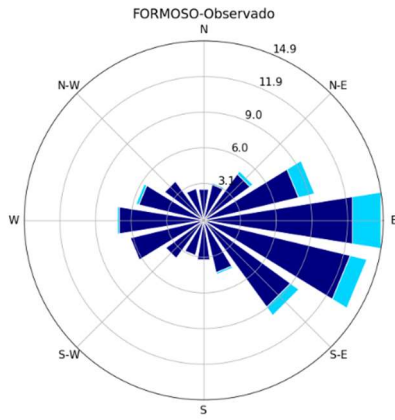


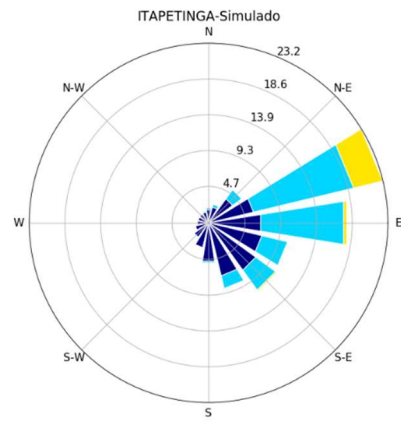
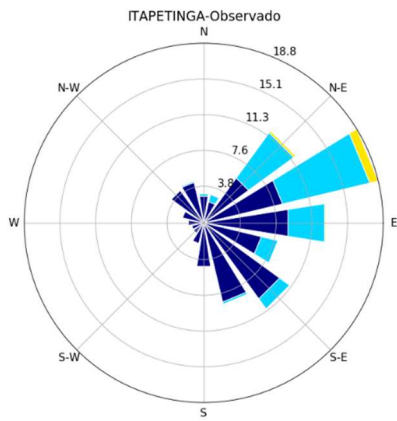
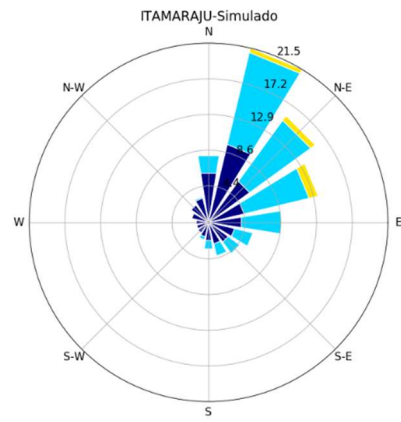
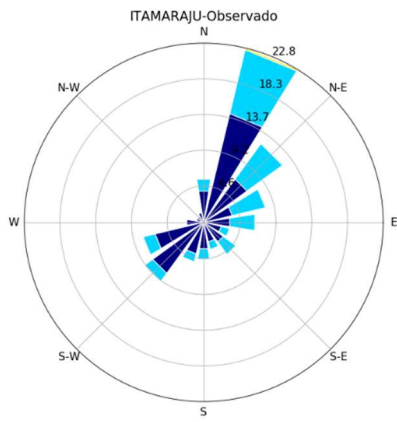
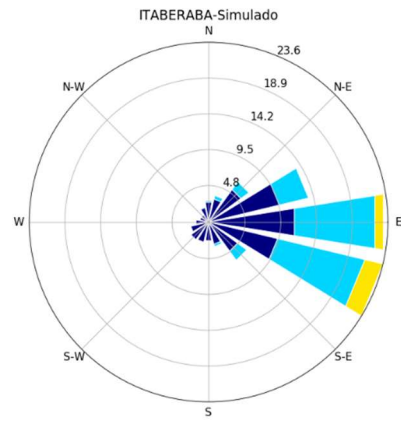
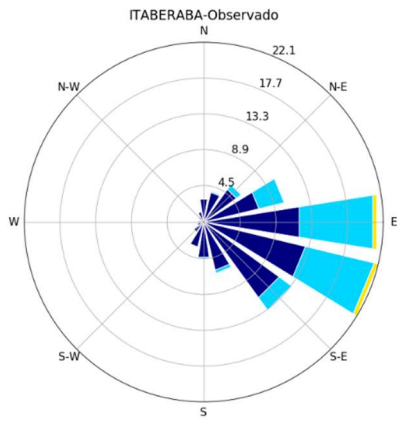
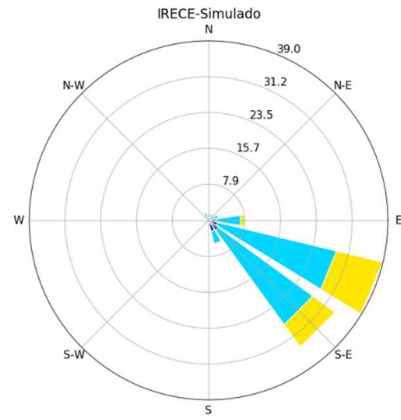
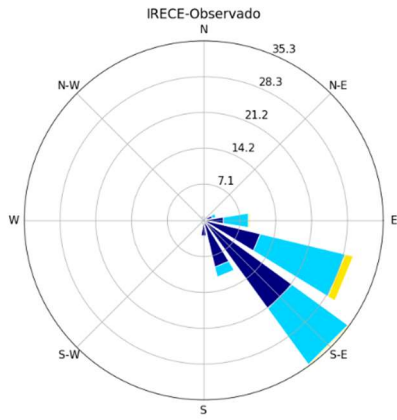




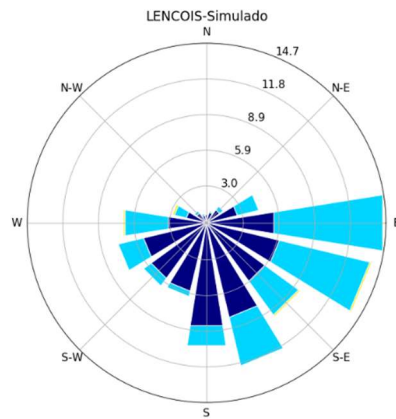
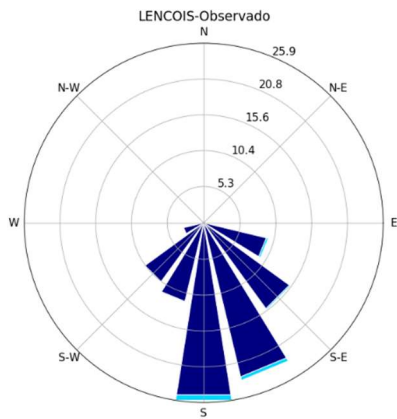
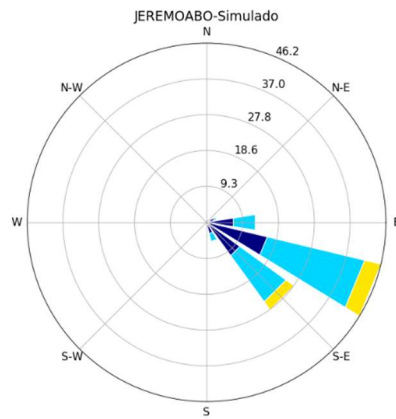
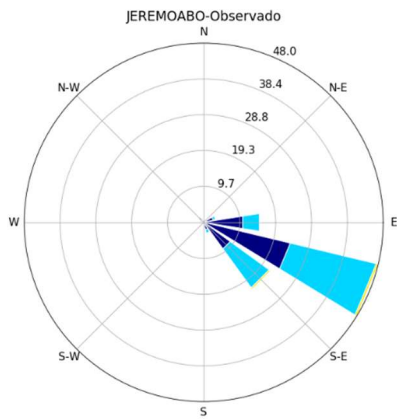
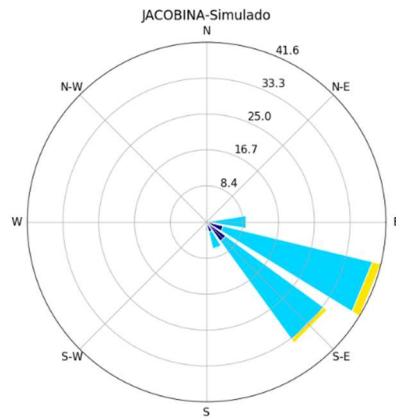
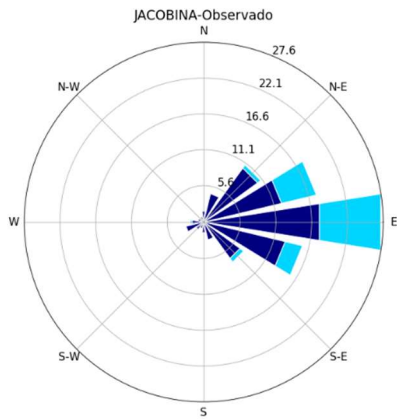
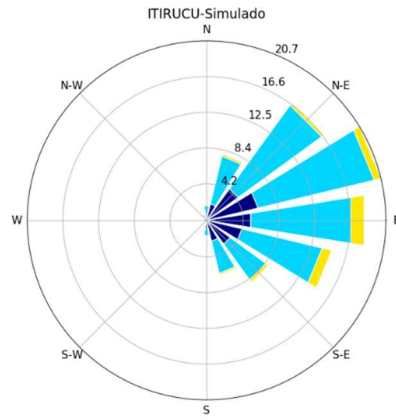
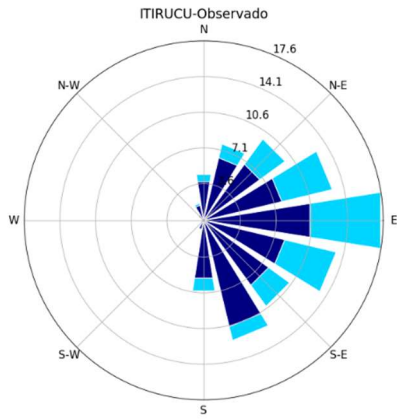


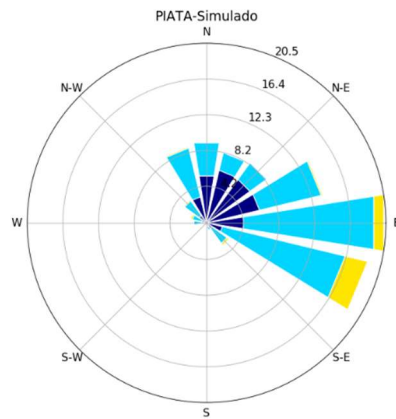
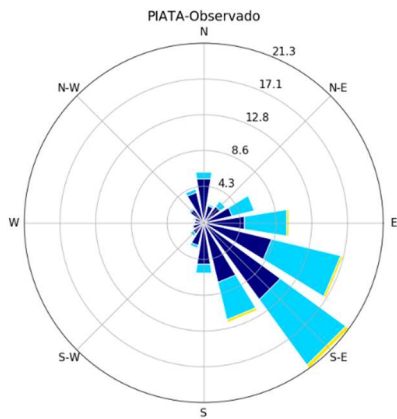
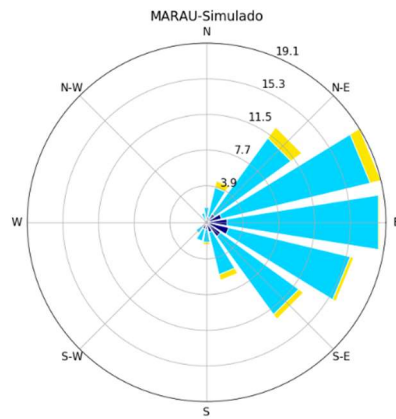
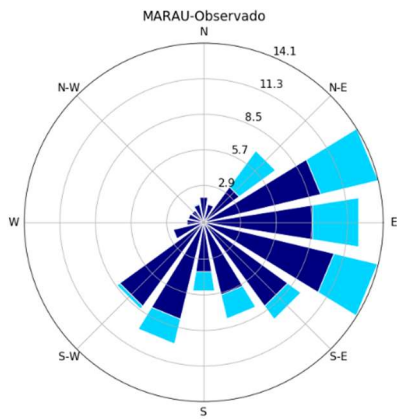
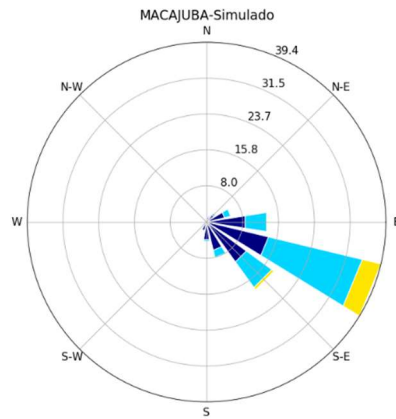
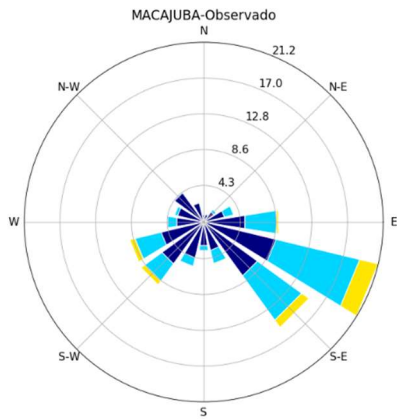
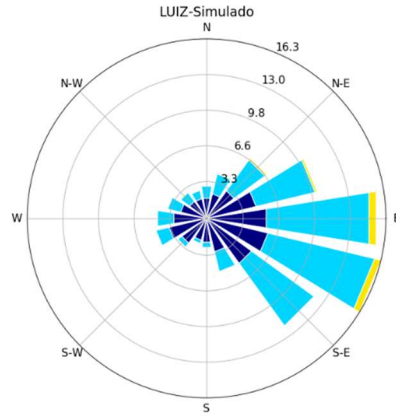
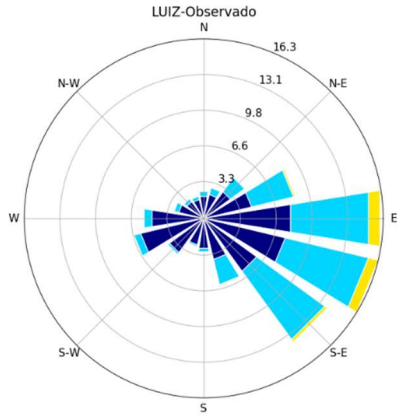


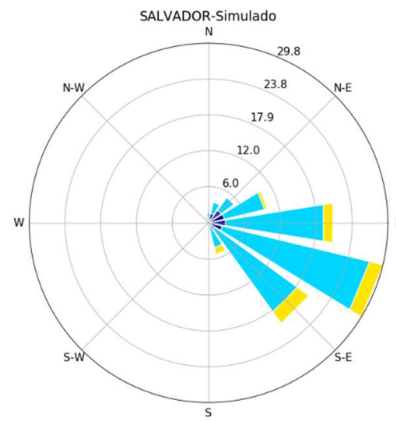
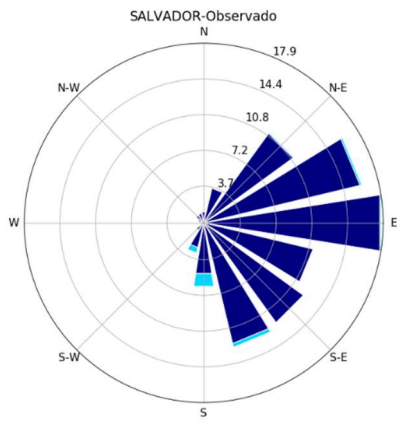
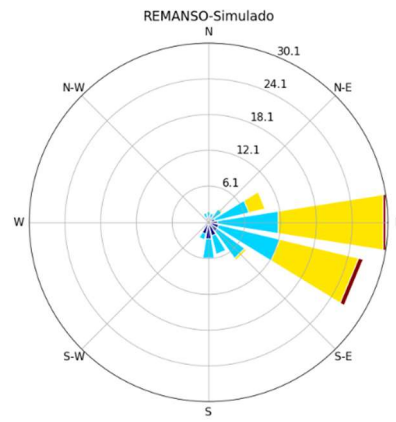
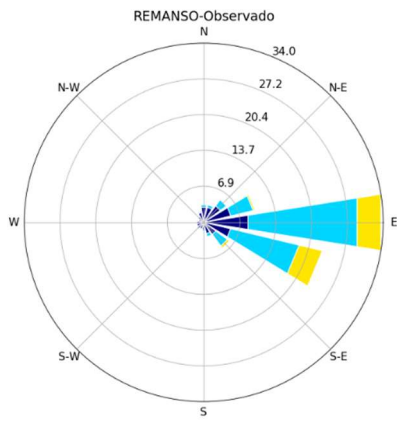
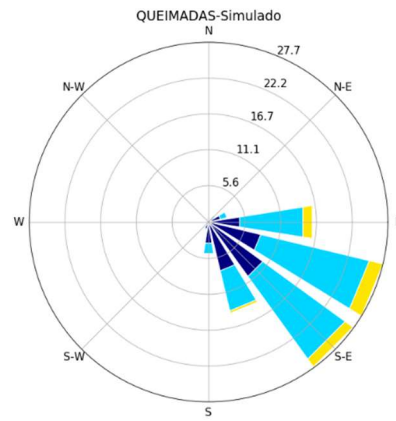
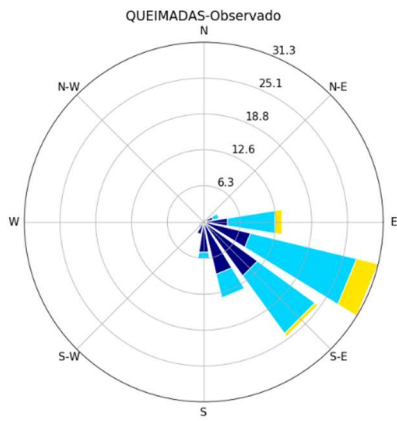
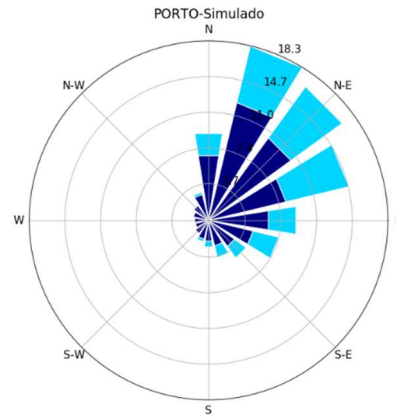
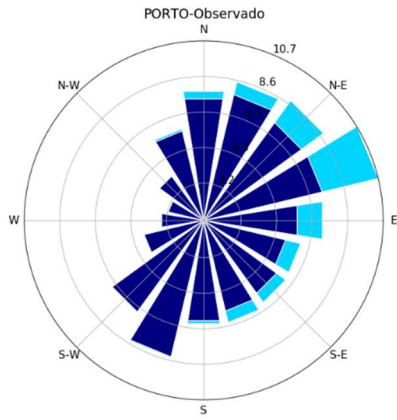




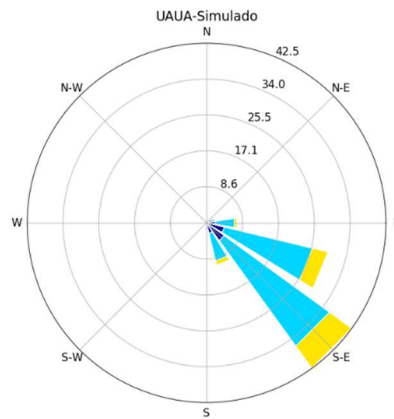
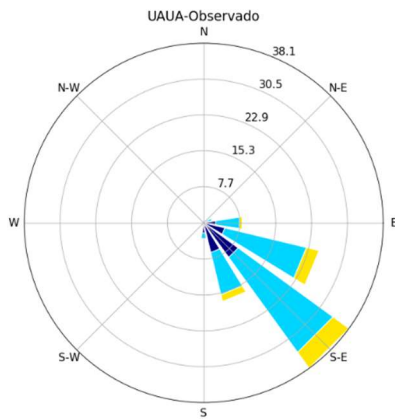
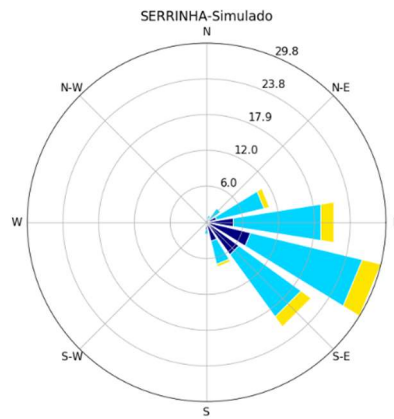
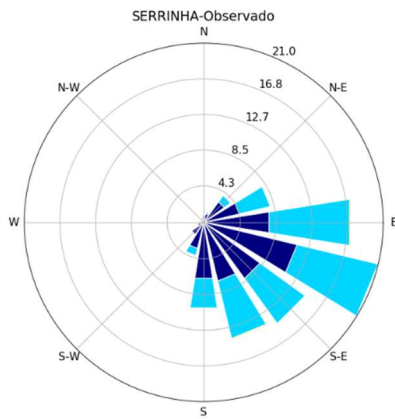
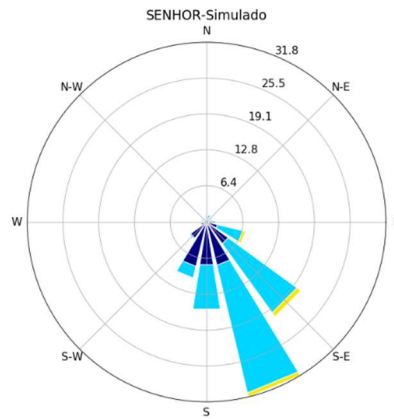
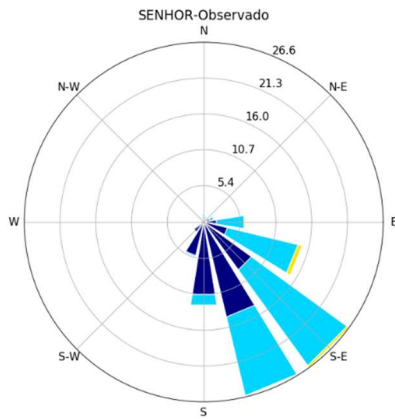
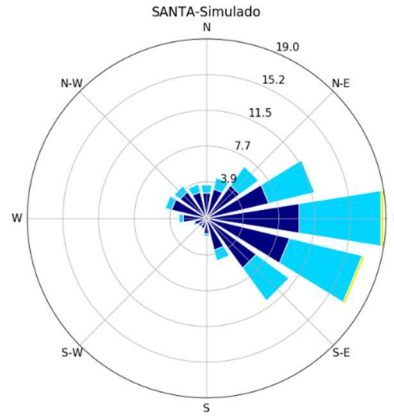
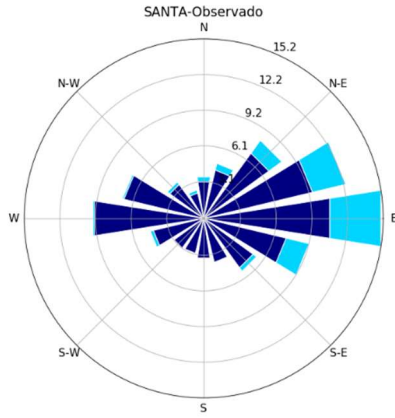


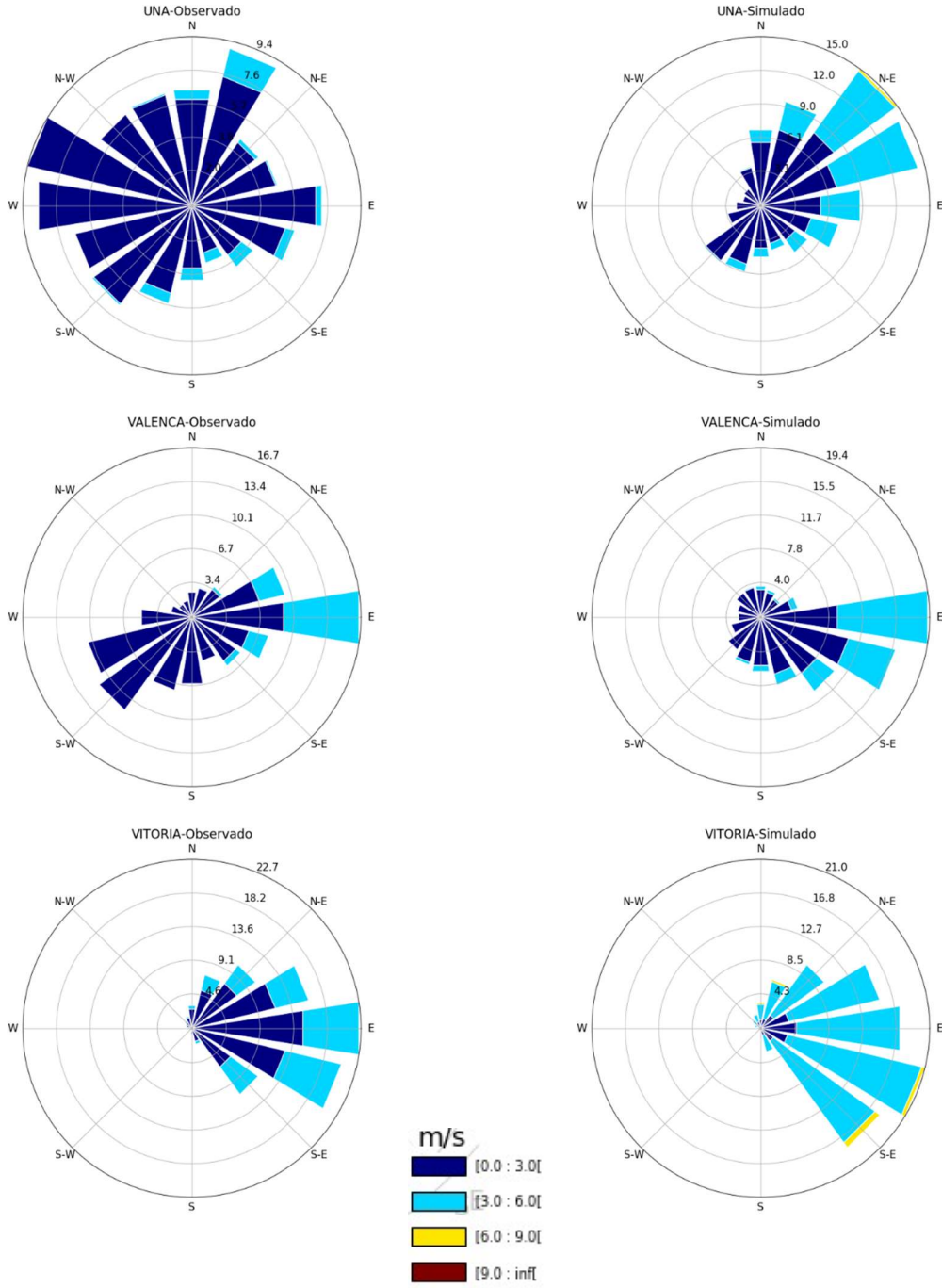




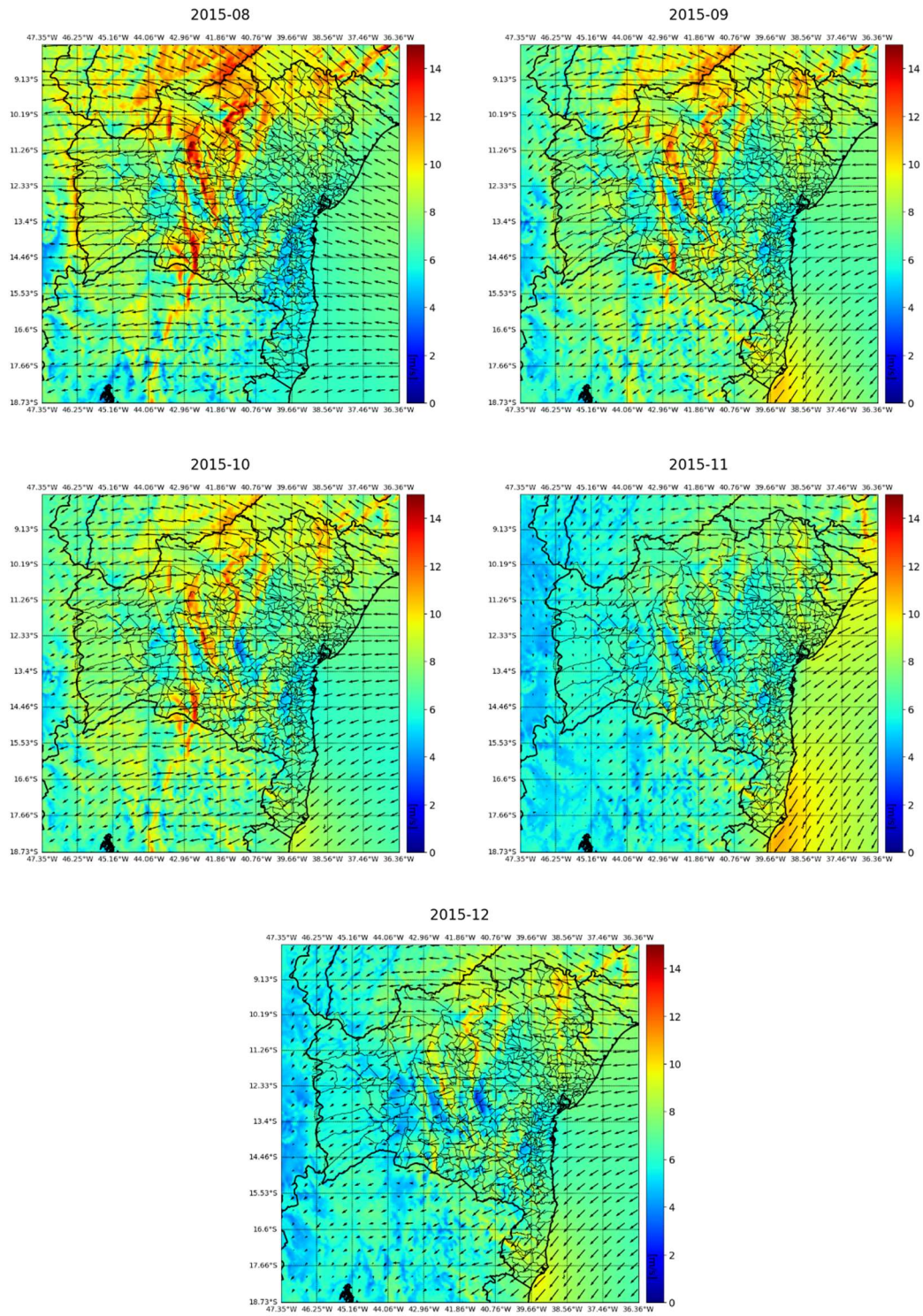






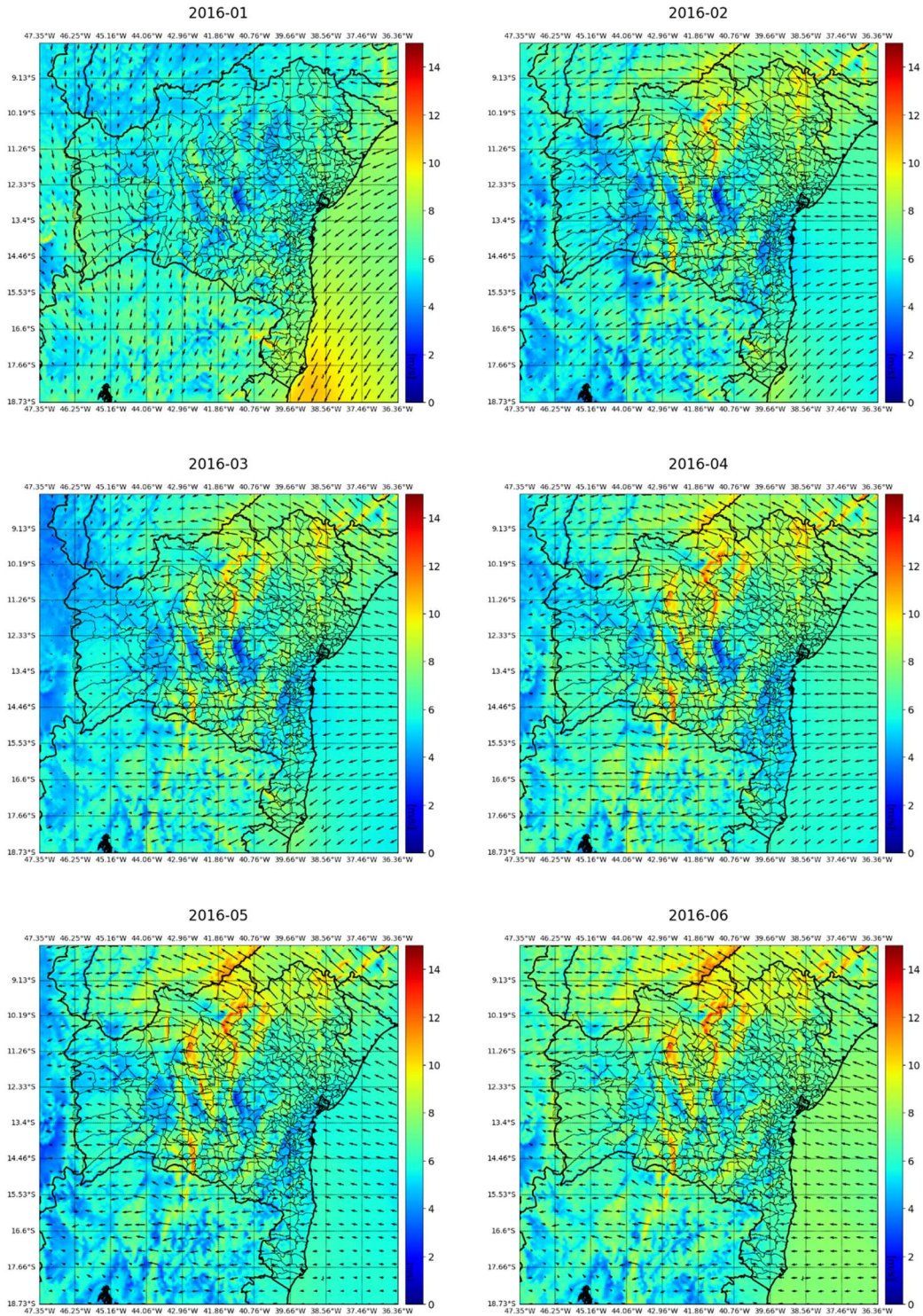


**APÊNDICE H – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região *onshore* e *offshore* que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2015**



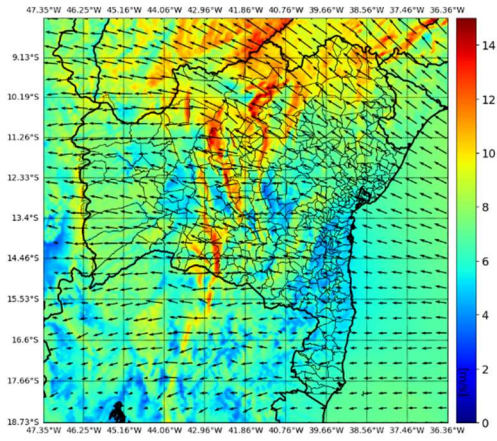


**APÊNDICE I – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região *onshore* e *offshore* que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2016**

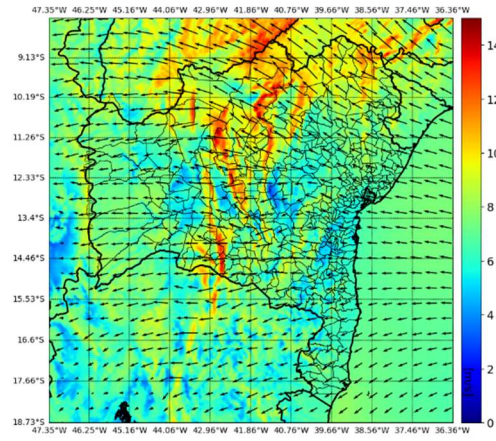




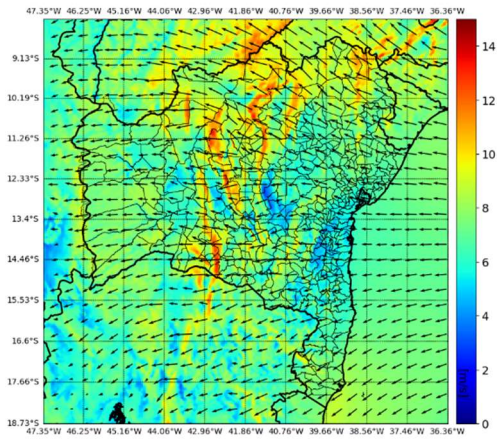
2016-07



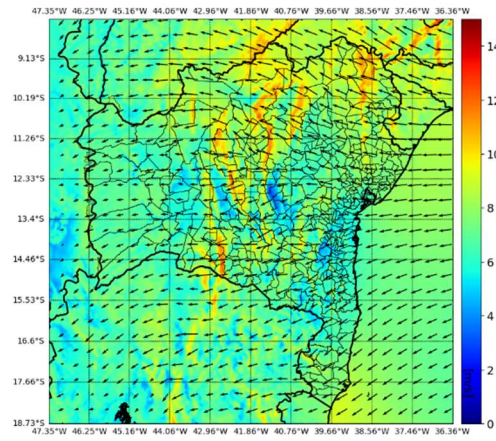
2016-08



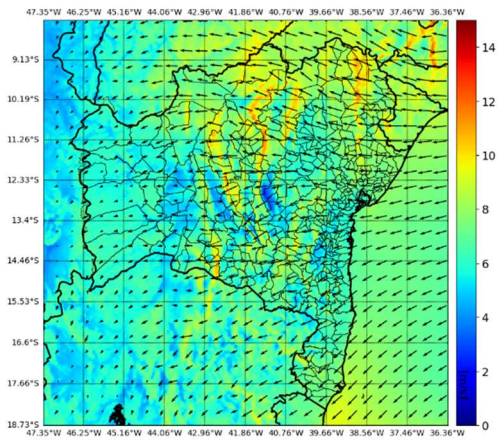
2016-09



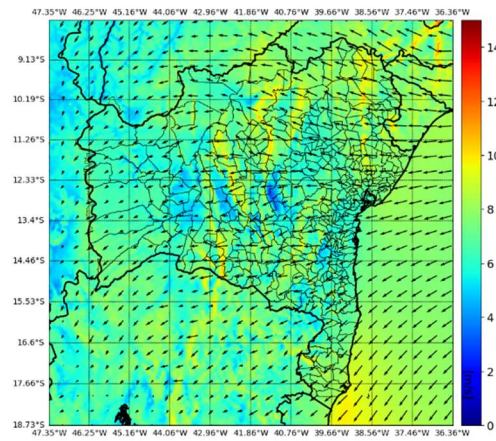
2016-10



2016-11

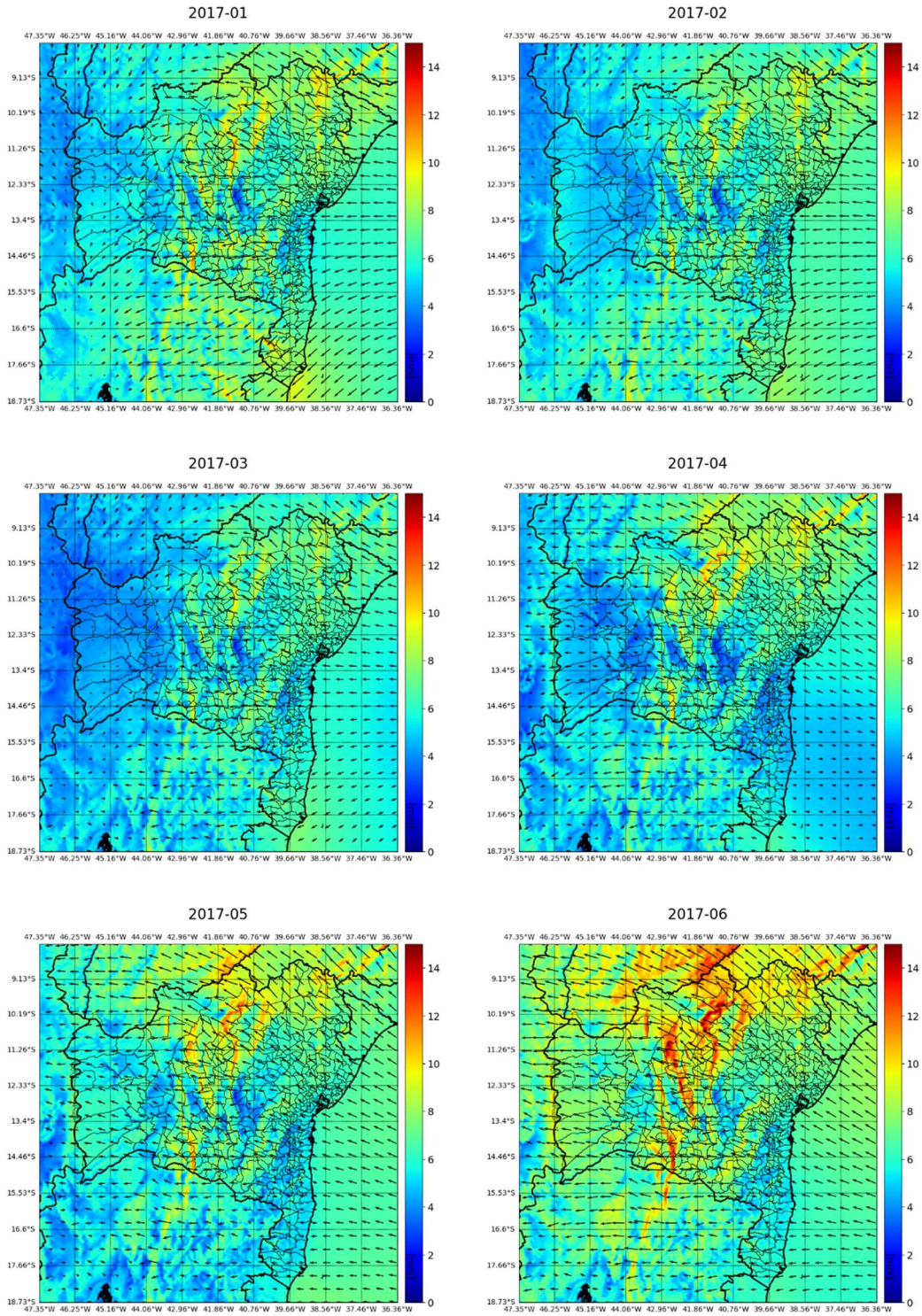


2016-12



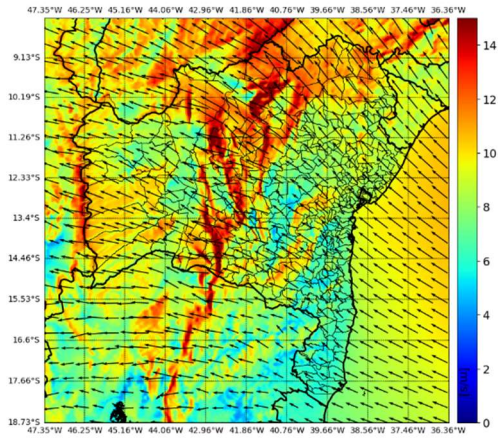


**APÊNDICE J – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região *onshore* e *offshore* que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2017**

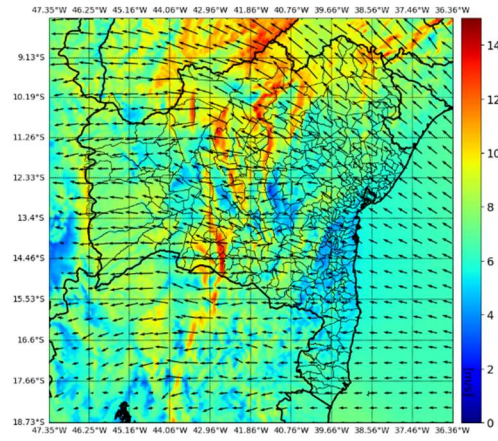




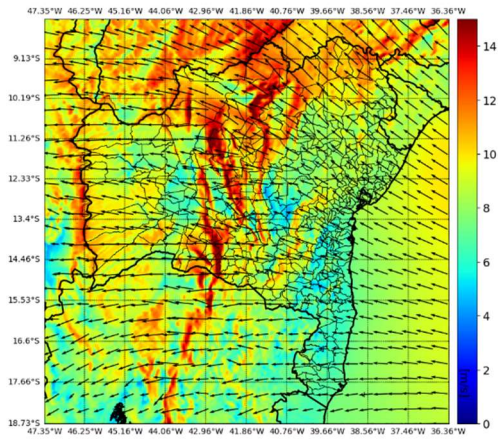
2017-07



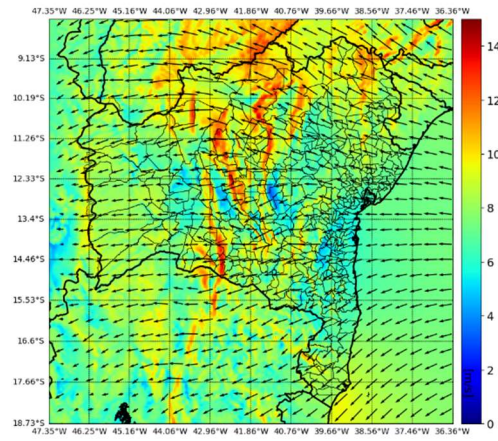
2017-08



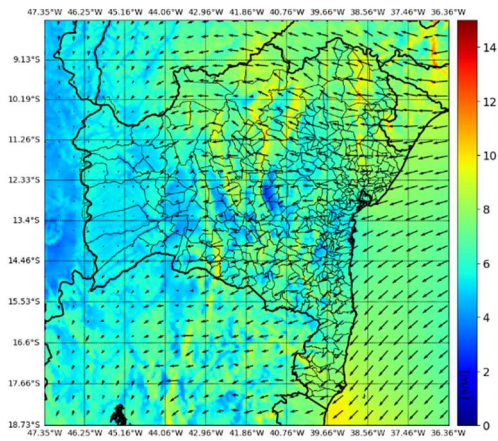
2017-09



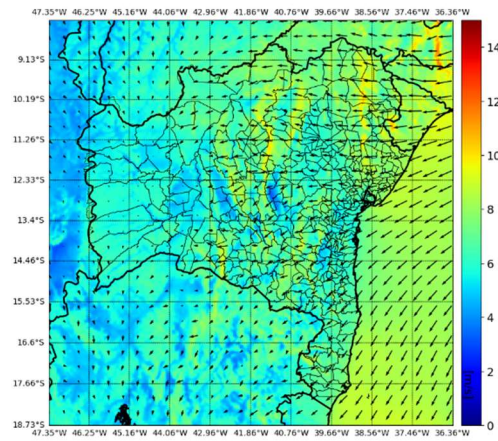
2017-10



2017-11

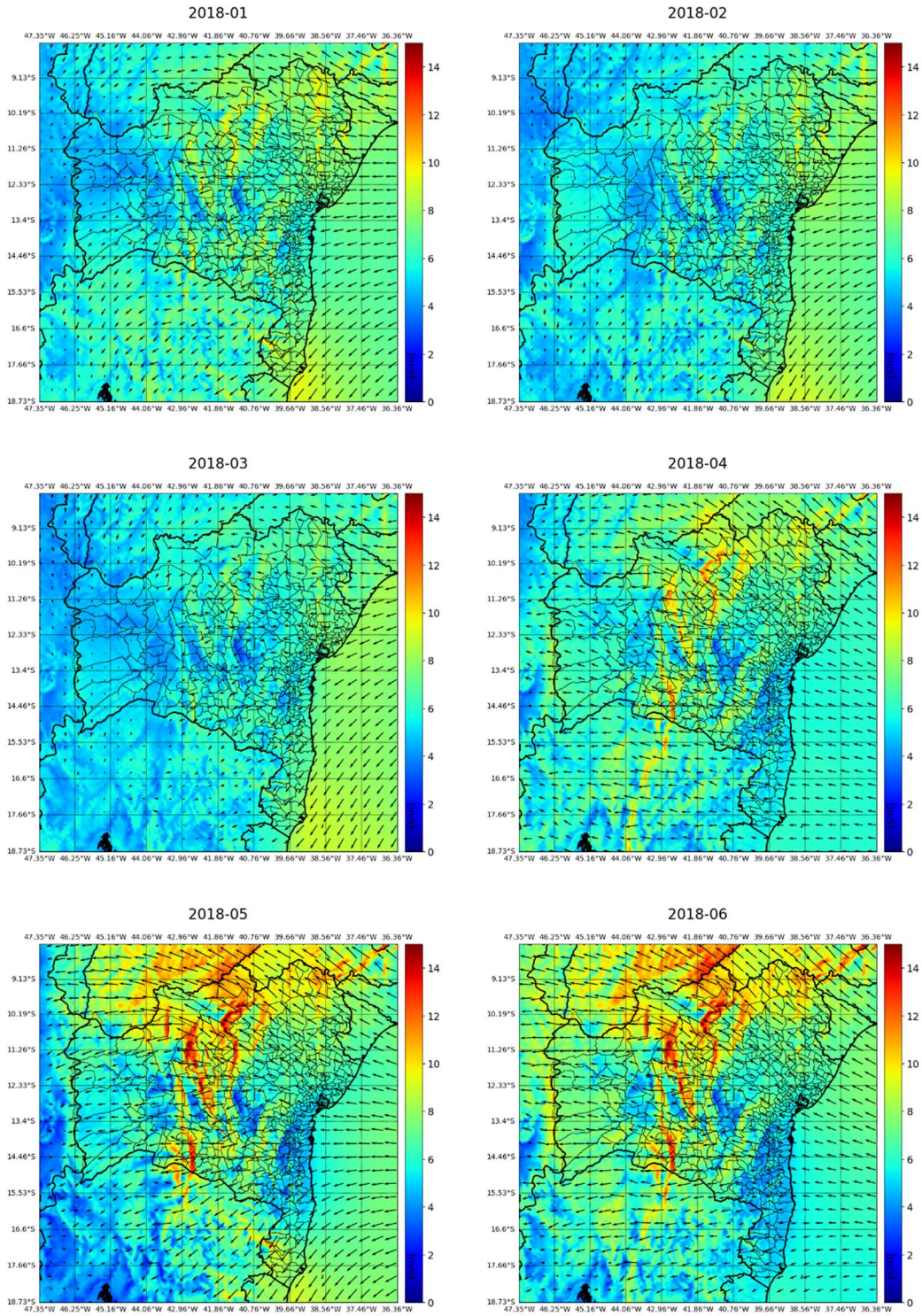


2017-12



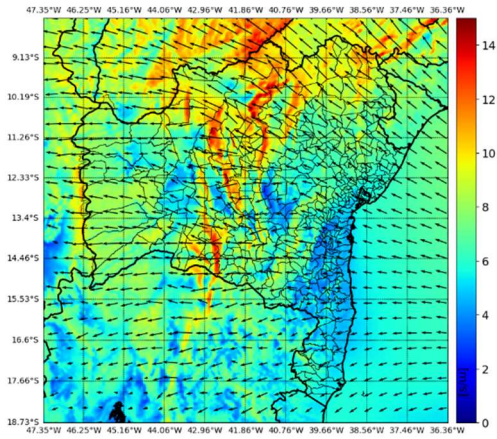


**APÊNDICE K – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região *onshore* e *offshore* que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2018**

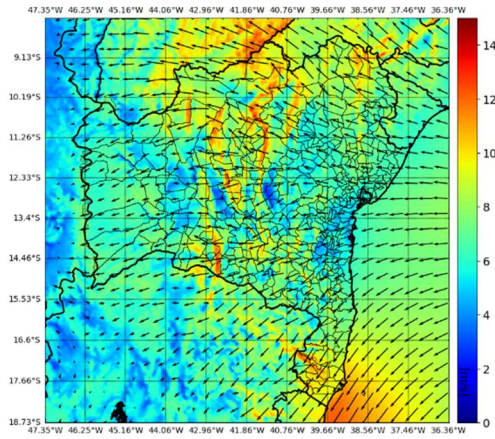




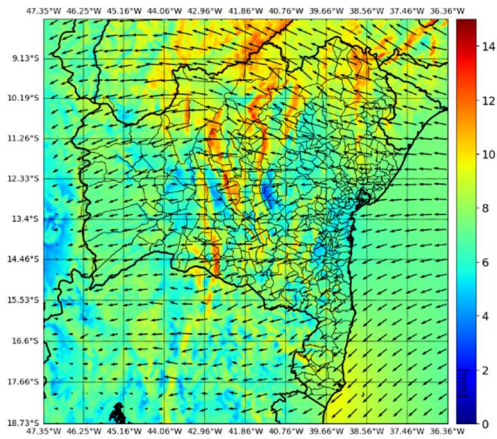
2018-07



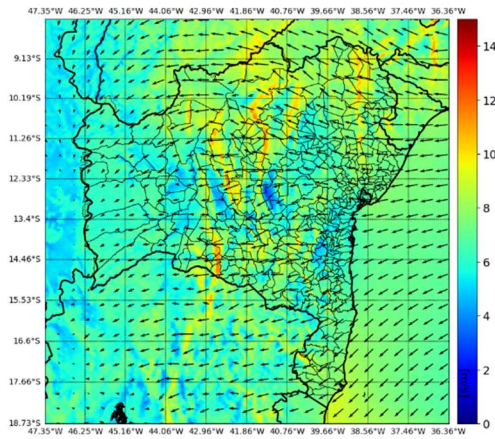
2018-08



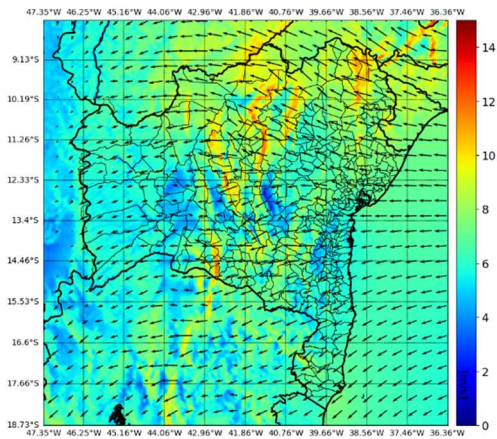
2018-09



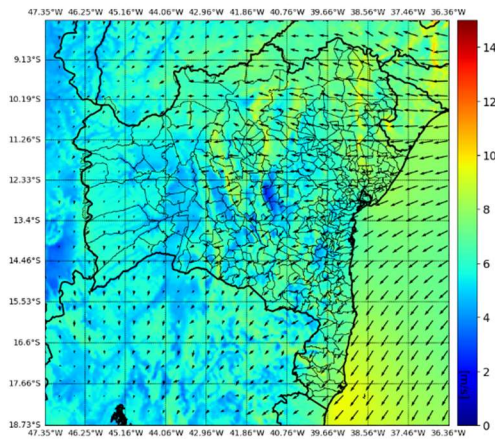
2018-10



2018-11

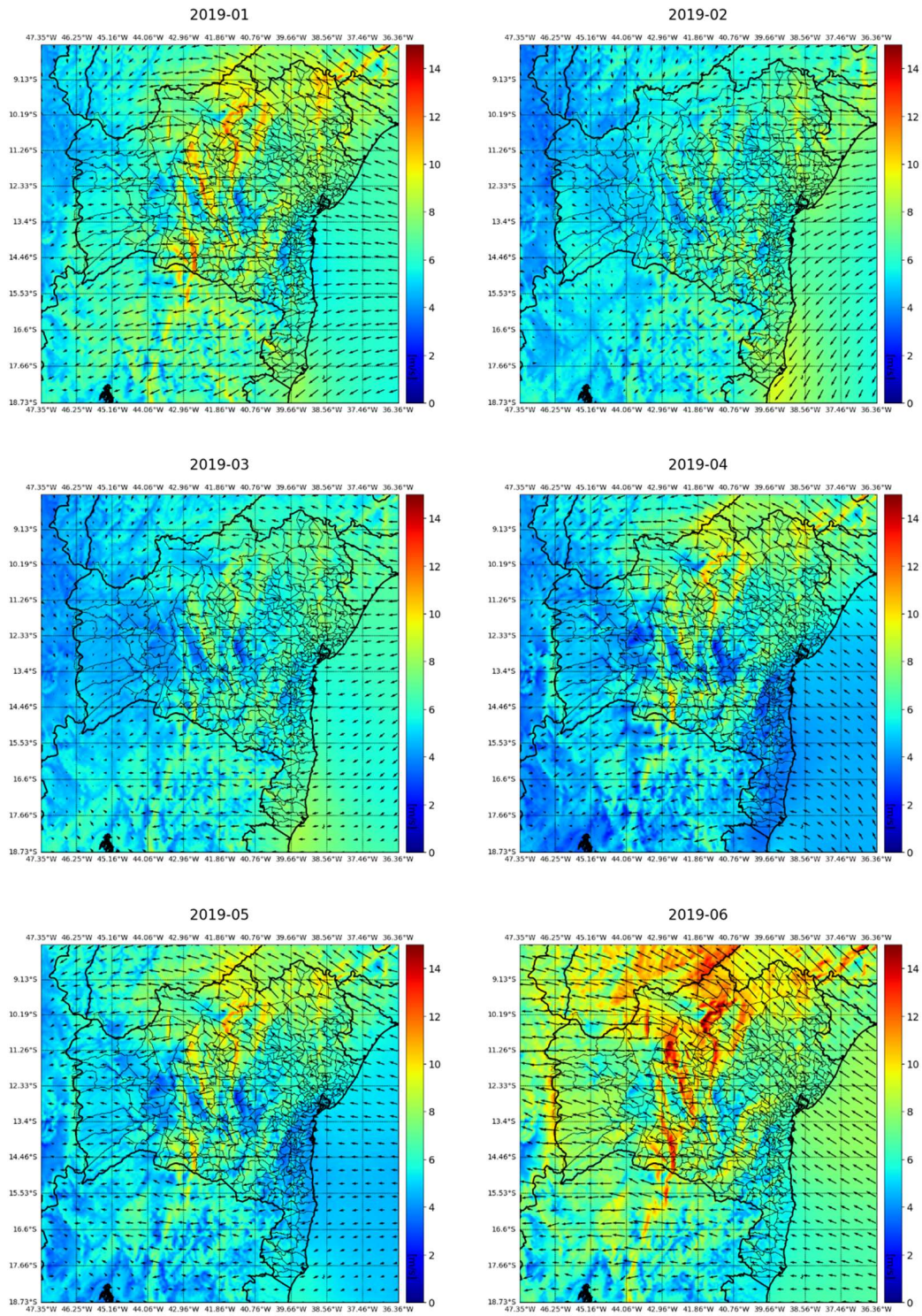


2018-12



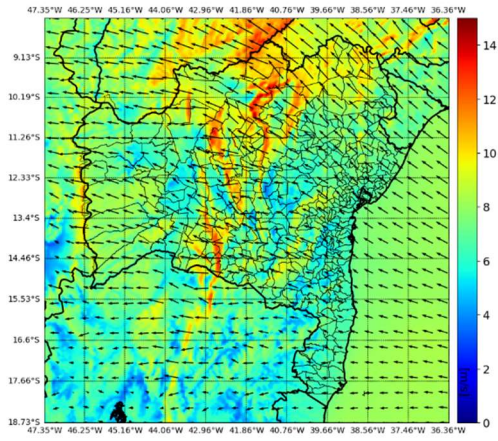


**APÊNDICE L – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região *onshore* e *offshore* que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2019**

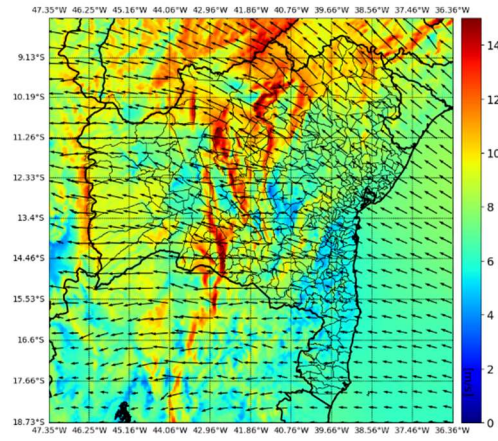




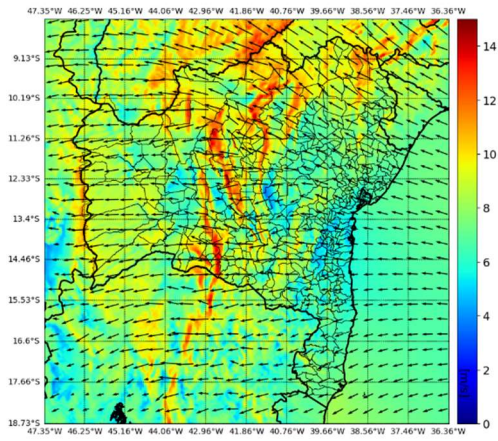
2019-07



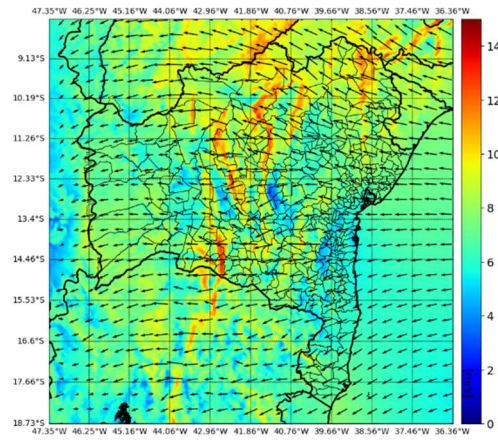
2019-08



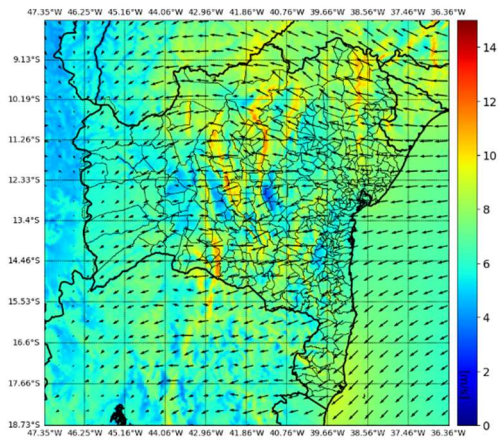
2019-09



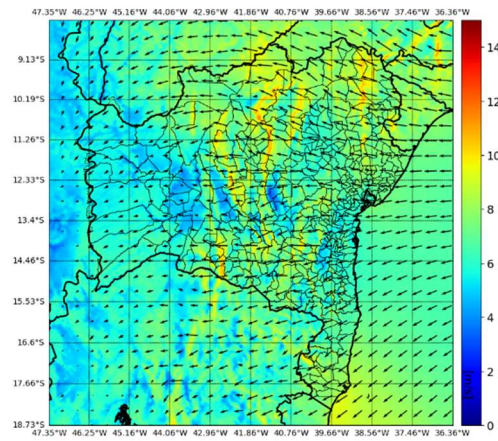
2019-10



2019-11

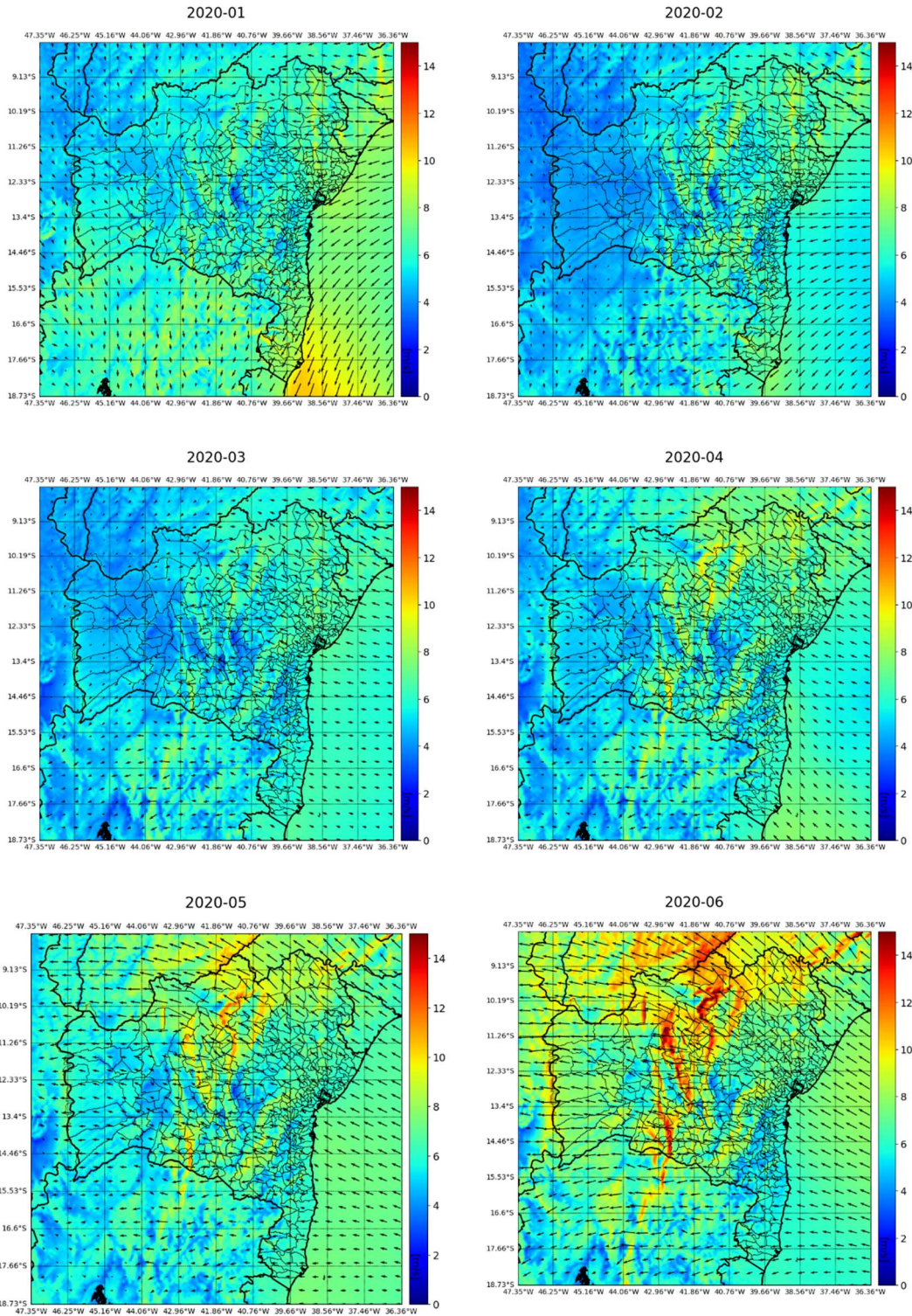


2019-12





**APÊNDICE M – Campos mensais de velocidade do vento simulado para a região *onshore* e *offshore* que compõe o território da Bahia a uma altura de 150m no período de 2020**



2020-07

