

**AVALIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA MODELAGEM ATMOSFÉRICA:  
UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO NA  
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Beatriz Rogers Paranhos

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-graduação em Engenharia  
Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, como parte dos requisitos necessários  
à obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Civil.

Orientador(es): Luiz Landau

Marcio Cataldi

Rio de Janeiro  
Junho de 2021

**AVALIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA MODELAGEM ATMOSFÉRICA:  
UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO NA  
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Beatriz Rogers Paranhos

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.**

Orientadores: Luiz Landau

Marcio Cataldi

Aprovada por: Prof. Luiz Landau

Prof. Marcio Cataldi

Prof. Luiz Claudio Gomes Pimentel

Prof. Luiz Paulo de Freitas Assad

Dr. Rafael Henrique Oliveira Rangel

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2021

Paranhos, Beatriz Rogers

Avaliação espacial e temporal da modelagem atmosférica: uma contribuição para a estimativa do potencial eólico na Região Nordeste do Brasil/ Beatriz Rogers Paranhos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XV, 193 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Landau

Marcio Cataldi

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 161 – 171.

1. Modelagem atmosférica. 2. Potencial eólico brasileiro. 3. Análises de sensibilidade. I. Landau, Luiz *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e aos amigos espirituais que me guiaram e me fortaleceram durante essa jornada de muito aprendizado e superação.

A minha família por todo o apoio, principalmente aos meus pais, Maria Cecília e Celso, meus grandes incentivadores, que sempre acreditaram em mim e nas minhas escolhas. Também destaco meu agradecimento ao meu irmão, Ricardo, membro da comunidade científica, de quem pude pedir auxílio a qualquer hora do dia.

A todos os meus amigos, incluindo aqueles do PEC/COPPE, pelas trocas tão importantes e por tornarem essa trajetória mais leve e bem-humorada.

Aos meus estimados orientadores, Professor Doutor Luiz Landau e Professor Doutor Marcio Cataldi, pela oportunidade, orientação, apoio e paciência na execução deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Professor Doutor Luiz Claudio Gomes Pimentel, Professor Doutor Luiz Paulo de Freitas Assad e Doutor Rafael Henrique Oliveira Rangel, que se dispuseram a avaliar este trabalho, norteando-o para seu melhor aproveitamento.

Ao NACAD/UFRJ por me fornecer a infraestrutura necessária para a realização da modelagem de alto desempenho a que minha pesquisa está associada. Especialmente, agradeço ao Albino Aveleda, sem o qual a instalação do WRF no Lobo Carneiro restaria prejudicada.

Ao LAMMOC/UFRJ e ao LAMCE/UFRJ por também me concederem parte de suas estruturas para execução do presente trabalho.

Ao Rafael Rangel, mais uma vez, e ao Ian Dragaud pelo suporte e pela partilha de tantos conhecimentos essenciais para a execução de minhas simulações.

À Brennand Energia S.A. pela imensurável contribuição com esta pesquisa e com a Ciência de modo geral, ao fornecer dados observados para validação dos resultados associados.

A todo o corpo do PEC/COPPE, sobretudo aos Professores e à Secretaria Acadêmica, por todo o precioso conhecimento transmitido e pela assistência primorosa a todas as minhas solicitações.

À COPPE e à UFRJ como um todo, assim como à UFF, não só por me acolherem como aluna e pesquisadora, me passando ensinamentos de extremo valor acadêmico, social e pessoal, mas também por resistirem e persistirem em meio a movimentos que tentam desmoralizar a Universidade Pública, tão fundamental para o desenvolvimento do nosso país.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Logo, agradeço também à CAPES pelos proveitosos incentivos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação, muito obrigada!

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

(Isaac Newton)

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**AVALIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA MODELAGEM ATMOSFÉRICA:  
UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO NA  
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Beatriz Rogers Paranhos

Junho/2021

Orientadores: Luiz Landau

Marcio Cataldi

Programa: Engenharia Civil

Modelos atmosféricos são recursos que estimam a velocidade e a direção dos ventos. A precisão e a acurácia das simulações variam, dentre outros fatores, com as condições locais e temporais. Neste estudo, é feita uma análise da sensibilidade do modelo WRF ao ajuste de suas parametrizações físicas, sendo propostas quatro configurações distintas, bem como confrontados os desempenhos nas resoluções horizontais de 3 e 9 km, sobre a Região Nordeste, de modo a estimular o crescimento do setor eólico no Brasil. As avaliações ocorrem nas primeiras quinzenas de março e de setembro de 2018. Os resultados são comparados a dados observados coletados a 10 m de altura, em 18 pontos, a medidas a 50, 52, 94 e 98 m, de um único sítio, e também às análises do modelo global GFS, que serviram de entrada para as simulações do WRF. Verifica-se que a seleção que utiliza os esquemas de Camada Limite Planetária YSU e de Camada de Superfície *Revised MM5*, com a opção *topo\_wind* ativada, possui a melhor representação sobre o Nordeste, tal como o cenário baseado nas parametrizações do GFS. O litoral leste é a área com as melhores performances, sendo isso expandido para o interior no mês de setembro. Assim, ficam constatadas as potencialidades do WRF sobre o Nordeste brasileiro, sendo um importante instrumento para os usuários dos dados de vento.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SPATIAL AND TEMPORAL ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC MODELING: A  
CONTRIBUTION TO WIND POTENTIAL ESTIMATION IN THE NORTHEAST  
REGION OF BRAZIL

Beatriz Rogers Paranhos

June/2021

Advisors: Luiz Landau

Marcio Cataldi

Department: Civil Engineering

Atmospheric models are resources that estimate wind speed and direction. Simulations precision and accuracy vary, among other factors, with local and temporal conditions. In this study, a sensitivity analysis of the WRF model to the adjustment of its physical parameters is carried out. Four distinct configurations are proposed, as well as a comparison of performances in horizontal resolutions of 3 and 9 km, over the Northeast Region, to stimulate wind sector growth in Brazil. The assessments are made in the first two weeks of March and September 2018. Results are compared to observed data collected at 10 m high, at 18 points, to measurements at 50, 52, 94, and 98 m, from a single site, and also to GFS global model analyses, which served as input to WRF simulations. It turns out that YSU Planetary Boundary Layer and Revised MM5 Surface Layer set, with topo\_wind option activated, has the Northeast best representation, as also the scenario based on GFS parameterizations. The east coast is the area with the best performances, and this was expanded inland in September month. Thus, WRF potential over the Brazilian Northeast is confirmed, being an important instrument for wind data users.

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
2	Referencial teórico.....	6
2.1	O deslocamento do ar na atmosfera e sua influência na geração de energia .....	6
2.2	A modelagem atmosférica como instrumento de previsibilidade dos ventos..	18
2.3	<i>O Weather Research and Forecasting Model</i> .....	21
2.3.1	Parametrizações físicas.....	24
2.3.2	Condições iniciais e de contorno .....	37
3	Materiais e métodos .....	39
3.1	Definição da área de estudo .....	39
3.2	Ajuste do modelo WRF .....	40
3.3	Aplicação do modelo GFS .....	49
3.4	Seleção de dados observados para validação dos resultados .....	50
3.5	Estatísticas aplicadas.....	53
3.6	Construção do mapa da diferença altimétrica .....	56
4	Resultados e discussão .....	57
4.1	Análises estatísticas .....	57
4.1.1	Análise do Erro Médio .....	58
4.1.2	Análise da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio .....	65
4.1.3	Análise do Coeficiente de Correlação .....	71
4.1.4	Análise do percentual de octantes errados na indicação da direção do vento.....	78
4.1.5	Análise do percentual de erros além dos octantes vizinhos na indicação da direção do vento.....	85
4.1.6	Análise das estatísticas médias .....	93
4.2	Distribuição espacial das estatísticas aplicadas .....	99

4.2.1	Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio.....	99
4.2.2	Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação.....	109
4.2.3	Distribuição espacial do percentual de octantes errados na indicação da direção do vento.....	119
4.2.4	Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos na indicação da direção do vento .....	129
4.3	Aprofundamento das análises sobre a velocidade do vento: Erro Percentual Absoluto Médio .....	139
4.4	Análise topográfica .....	148
4.5	Sistemas atmosféricos associados.....	153
5	Conclusões.....	157
6	Referências bibliográficas .....	161
	APÊNDICES .....	172
	APÊNDICE A - SIMULAÇÕES MENSAIS DE MARÇO DE 2018.....	173
	APÊNDICE B - SIMULAÇÕES MENSAIS DE SETEMBRO DE 2018 .....	179
	APÊNDICE C - SIMULAÇÕES-TESTE PARA AVALIAÇÃO SOBRE A ATIVAÇÃO DA OPÇÃO DE ARRASTO POR ONDAS DE GRAVIDADE ( <i>GRAVITY WAVE DRAG OPTION</i> ).....	185
	APÊNDICE D – EXEMPLIFICAÇÃO DE UM ARQUIVO NAMelist.INPUT UTILIZADO PARA C1 COM AS PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS DESTACADAS .....	190

## LISTA DE FIGURAS

<p>Figura 1: Divisão da Troposfera em Camada Limite Atmosférica e Atmosfera Livre. Fonte: Adaptado de Stull, 1988 .....</p> <p>Figura 2: Perfis de velocidade do vento, fluxo de quantidade de movimento, temperatura potencial e taxa de mistura de vapor d'água dentro da Troposfera. Fonte: Adaptado de Geenaert, 2003.....</p> <p>Figura 3: Comprimento de rugosidade associado ao perfil vertical logarítmico da velocidade do vento. Fonte: Martins et al., 2008.....</p> <p>Figura 4: Comportamento do escoamento do ar ao encontrar um obstáculo. Fonte: Adaptado de Mathew, 2006.....</p> <p>Figura 5: Efeito do terreno sobre o escoamento do ar. Fonte: Mathew, 2006.....</p> <p>Figura 6: Perfil vertical característico da velocidade do vento em função da estabilidade atmosférica. Fonte: Thom, 1975, apud Marques Filho, 1999.....</p> <p>Figura 7: Funcionamento básico de um aerogerador de eixo horizontal conectado à rede elétrica. Fonte: Picolo et al., 2014 .....</p> <p>Figura 8: Impacto da turbulência sobre as pás de uma turbina eólica. Fonte: Picolo et al., 2014 .....</p> <p>Figura 9: Representação gráfica de um modelo global e suas trocas verticais e horizontais entre os pontos de grade. Fonte: Sampaio e Silva Dantas, 2014 .....</p> <p>Figura 10: Funcionamento do modelo WRF-ARW considerando dados reais. Fonte: Carvalho et al., 2013.....</p> <p>Figura 11: Interações entre as parametrizações físicas no WRF-ARW. Fonte: Adaptado de Skamarock et al., 2019.....</p> <p>Figura 12: Parques eólicos da Região Nordeste do Brasil .....</p> <p>Figura 13: Grades aninhadas com 9 km e 3 km de resolução espacial horizontal .....</p> <p>Figura 14: Estações meteorológicas selecionadas .....</p> <p>Figura 15: Erros Médios (Bias) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018 .....</p> <p>Figura 16: Erros Médios (Bias) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018.....</p> <p>Figura 17: Erros Médios (Bias) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de março de 2018 .....</p>	<p>7</p> <p>9</p> <p>10</p> <p>11</p> <p>11</p> <p>15</p> <p>16</p> <p>17</p> <p>21</p> <p>24</p> <p>31</p> <p>40</p> <p>41</p> <p>52</p> <p>60</p> <p>62</p> <p>64</p>
---	---

Figura 18: Erros Médios (Bias) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018.....	64
Figura 19: Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018 .....	66
Figura 20: Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018.....	68
Figura 21: Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de março de 2018.....	70
Figura 22: Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018.....	70
Figura 23: Coeficiente de Correlação (r) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018.....	73
Figura 24: Coeficiente de Correlação (r) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018 .....	75
Figura 25: Coeficiente de Correlação (r) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de março de 2018.....	77
Figura 26: Coeficiente de Correlação (r) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018 .....	77
Figura 27: Percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018 .....	80
Figura 28: Percentual de octantes errados da direção do vento 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018.....	82
Figura 29: Percentual de octantes errados da direção do vento a 50 e 94 m de altura - primeira quinzena de março de 2018.....	84
Figura 30: Percentual de octantes errados da direção do vento a 50 e 94 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018 .....	84
Figura 31: Percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura – primeira quinzena de março de 2018.....	87
Figura 32: Percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura – primeira quinzena de setembro de 2018 .....	90
Figura 33: Percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 50 e 94 m de altura – primeira quinzena de março de 2018.....	92
Figura 34: Percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 50 e 94 m de altura – primeira quinzena de setembro de 2018 .....	92

Figura 35: Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de março de 2018 .....	100
Figura 36: Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de março de 2018 .....	102
Figura 37: Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de setembro de 2018 .....	104
Figura 38: Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de setembro de 2018.....	106
Figura 39: Distribuição espacial das menores Raízes Quadradas do Erro Quadrático Médio RMSE a 10 m de altura e as opções associadas – primeira quinzena de março e de setembro de 2018, respectivamente .....	108
Figura 40: Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação (r) a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de março de 2018.....	110
Figura 41: Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação (r) a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de março de 2018 .....	112
Figura 42: Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação (r) a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de setembro de 2018 ....	114
Figura 43: Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação (r) a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de setembro de 2018.....	116
Figura 44: Distribuição espacial dos maiores Coeficientes de Correlação (r) a 10 m de altura e as opções associadas – primeira quinzena de março e de setembro de 2018, respectivamente .....	118
Figura 45: Distribuição espacial do percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de março de 2018 .....	120
Figura 46: Distribuição espacial do percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de março de 2018 .....	122

Figura 47: Distribuição espacial do percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de setembro de 2018 .....	124
Figura 48: Distribuição espacial do percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de setembro de 2018.....	126
Figura 49: Distribuição espacial dos menores percentuais de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura e as opções associadas – primeira quinzena de março e de setembro de 2018, respectivamente.....	128
Figura 50: Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de março de 2018 .....	130
Figura 51: Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de março de 2018 .....	132
Figura 52: Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de setembro de 2018.....	134
Figura 53: Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de setembro de 2018 .....	136
Figura 54: Distribuição espacial dos menores erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura e as opções associadas – primeira quinzena de março e de setembro de 2018, respectivamente.....	138
Figura 55: Diferença altimétrica entre um Modelo Digital de Elevação e a representação topográfica do WRF .....	151
Figura 56: Densidade de potência eólica a 100 m de altura sobre o Brasil. Fonte: CEPEL, 2017 .....	152
Figura 57: Principais sistemas atmosféricos na baixa e na alta troposfera atuantes na América do Sul. Fonte: Reboita et al., 2010.....	156

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores típicos mínimos e máximos do comprimento de rugosidade de acordo com o tipo de terreno .....	10
Tabela 2: Esquemas de Microfísica do WRF v.4 .....	25
Tabela 3: Esquemas de <i>Cumulus</i> do WRF v.4 .....	26
Tabela 4: Esquemas de Camada Limite Planetária do WRF v.4.....	27
Tabela 5: Esquemas de Camada de Superfície do WRF v.4 .....	28
Tabela 6: Esquemas de Modelo de Superfície Terrestre do WRF v.4 .....	28
Tabela 7: Esquemas de Radiação Atmosférica de Onda Curta do WRF v.4.....	29
Tabela 8: Esquemas de Radiação Atmosférica de Onda Longa do WRF v.4 .....	29
Tabela 9: Principais esquemas de Camada Limite Planetária e suas óticas de tratamento da turbulência .....	33
Tabela 10: Parametrizações físicas utilizadas na configuração C1 .....	46
Tabela 11: Parametrizações físicas utilizadas na configuração C2 .....	47
Tabela 12: Parametrizações físicas utilizadas na configuração C3 .....	47
Tabela 13: Parametrizações físicas utilizadas na configuração C4 .....	49
Tabela 14: Estações meteorológicas selecionadas para validação dos resultados e suas principais características.....	51
Tabela 15: Relação da quantidade de dados de velocidade do vento a 10 m de altura ajustados para cálculo do Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), de acordo com a estação e o período de estudo .....	55
Tabela 16: Octantes de direção do vento e respectivos intervalos .....	56
Tabela 17: Estatísticas aplicadas médias .....	98
Tabela 18: Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018 .....	141
Tabela 19: Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018.....	144
Tabela 20: Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de março de 2018 .....	147
Tabela 21: Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018.....	147

## 1 Introdução

Um dos grandes desafios enfrentados pela humanidade no século XXI é o de reduzir os impactos das mudanças climáticas no planeta, sobretudo no que diz respeito ao controle da elevação da temperatura média global. Essa preocupação foi ratificada através do Acordo de Paris, ocorrido na referida cidade francesa, durante a 21<sup>a</sup> Conferência das Partes (COP 21) em 2015 (ARANTEGUI; JÄGER-WALDAU, 2018; HOEGH-GULDBERG *et al.*, 2019).

O Acordo de Paris, assinado ou ratificado por diversos países, dentre eles o Brasil, objetivou traçar medidas cooperativas para manter o crescimento da temperatura média do planeta, em relação aos níveis pré-industriais, abaixo de 2,0º C. Preferencialmente, deseja-se limitá-lo o mais próximo de 1,5º C possível, através de ações de redução da emissão de gases do efeito estufa a partir de 2020 (ARANTEGUI; JÄGER-WALDAU, 2018; HOEGH-GULDBERG *et al.*, 2019).

Nesse sentido, a busca pela independência da utilização de combustíveis fósseis é primordial. A queima desses combustíveis, que contêm grande concentração de carbono, libera na atmosfera emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gás do efeito estufa de longa vida, bem como de poluentes de menor duração, como o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) (SHINDELL; SMITH, 2019).

Segundo Arantegui e Jäger-Waldau (2018), cerca de 65% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> são provenientes da combustão de combustíveis fósseis. Além disso, os combustíveis fósseis são fontes não renováveis, ou seja, recursos esgotáveis, o que faz pesar ainda mais a necessidade de crescimento do uso de outras alternativas energéticas.

Dentre as fontes renováveis, a energia eólica se apresenta como uma opção promissora para a descarbonização do fornecimento energético. Ela pode ser instalada modularmente e utiliza a energia cinética proveniente dos ventos para gerar energia mecânica e eletricidade (PICOLO *et al.*, 2014; ARANTEGUI; JÄGER-WALDAU, 2018). Hernández *et al.* (2019) estimam que a energia eólica será capaz de reduzir as emissões totais de dióxido de carbono na União Europeia de, aproximadamente, 6.600 a 13.1000 Mt, dependendo da tecnologia envolvida, no período de 2015 a 2050.

A atratividade da energia eólica se reflete por meio dos números crescentes de sua aplicação ao redor do globo. De acordo com a *World Wind Energy Association*, a capacidade total instalada no mundo, no ano de 2013, foi de 318.919 MW. Em 2016, esse valor foi igual a 488.508 MW, representando um crescimento de aproximadamente 53% em relação a três anos antes. Já em 2019, a capacidade total instalada foi de 650.758 MW, ou seja, um aumento de cerca de 104%, quando comparado a 2013, e de cerca de 33% no que se refere a 2016 (WWEA, 2020).

Nesse contexto, o Brasil se encontra entre os 10 maiores mercados de energia eólica do mundo. Em 2019, o país figurou na 8<sup>a</sup> posição desse ranking, com uma capacidade instalada de, aproximadamente, 15.452 MW. Em relação a 2016, exemplificando, esse aumento foi de cerca de 43%, superando, em termos relativos, o crescimento global (WWEA, 2020).

A matriz elétrica brasileira é majoritariamente composta por fontes renováveis de energia. No ano de 2019, cerca de 83% da oferta interna de energia elétrica brasileira era desse tipo de procedência, sendo 64,9% de origem hidráulica. Nesse grupo, aproximadamente 8,6% provieram dos ventos. Ademais, o país vem diversificando essa matriz e ampliando a contribuição eólica ao longo dos anos. De 2018 para 2019, a geração de eletricidade a partir da energia eólica saltou de 48.475 GWh para 55.986 GWh, se traduzindo em um crescimento perto de 15,5% (EPE, 2020).

Dessa considerável participação brasileira no setor eólico, muito se deve à Região Nordeste, produzindo, em 2019, eletricidade através da energia eólica correspondente a 50.072 GWh. Esse montante representou, nesse ano, cerca de 89% da geração dessa fonte no país. No mesmo período, a Região Sul foi responsável pela geração de, aproximadamente, 10%, ao passo que 1% foi produzido pelo Sudeste (EPE, 2020).

Diante da demanda progressiva pela produção de energia oriunda dos ventos, fica evidente a necessidade de se avaliar adequadamente o recurso eólico nacional tanto na busca por novos locais para instalação de parques eólicos quanto para o planejamento energético e operacional dos já existentes.

A modelagem atmosférica é, dentro desse cenário, um artifício relevante para avaliação do vento. Esse tipo de modelagem possui a habilidade de realizar a previsão numérica de tempo (PNT), sobre uma determinada superfície, levando em consideração os fenômenos físicos atuantes sobre ela e diminuindo a dependência de aparato

instrumental para medições *in situ* do vento. Um desses modelos, de mais ampla utilização e desenvolvimento no cenário mundial, é o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) (POWERS *et al.*, 2017; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

Apesar de sua grande aplicabilidade, diversos autores como Paranhos *et al.* (2019), Carvalho *et al.* (2014a), Draxl *et al.* (2014) e Santos-Alamillos *et al.* (2013), já evidenciaram a variabilidade de desempenho do WRF em função de fatores físicos específicos da área de simulação utilizada. No que concerne aos dados de vento, por exemplo, há dificuldade do modelo em representar apropriadamente a interação entre o fluxo atmosférico e as condições do terreno, variando de acordo com a sazonalidade e as escalas temporais e espaciais empregadas.

Além da própria resolução espacial e topográfica aplicadas nas simulações, as parametrizações físicas utilizadas têm também influência expressiva nessas perdas ou ganhos de performance por parte do modelo. Isso porque seus diferentes esquemas tratam de maneira distinta os processos físicos envolvidos, bem como se utilizam de constantes empíricas em suas resoluções (SKAMAROCK *et al.*, 2019). Essas medições, muitas das vezes, são escassas e usadas indistintamente em diferentes pontos do planeta, com clima e geografia que não condizem com os dos locais em que foram extraídas.

Ao passo que a energia eólica ganha espaço na geração elétrica, erros na previsão do vento passam a prejudicar mais significativamente o Sistema Interligado Nacional (SIN), aumentando riscos técnicos e financeiros. Uma previsão que minimize incertezas prioriza a segurança energética do país. Além disso, boas estimativas de vento auxiliam na manutenção dos custos competitivos para a indústria, à medida que se evitam reduções desnecessárias na produção e se aumenta a confiabilidade por parte de investidores (UZUNOGLU; TASCIKARAOGLU, 2014).

Com isso, a configuração inadequada do WRF para certa região de aplicação pode levar a resultados inconsistentes com a realidade, dificultando as avaliações do recurso eólico e prejudicando os setores dependentes dessas informações. Dessa maneira, análises de sensibilidade do modelo vêm sendo largamente empregadas pelo mundo, para se encontrar melhores possibilidades de previsão do vento frente às opções oferecidas por ele e favorecendo a evolução do mesmo. É o caso dos trabalhos de Avolio *et al.* (2017), Gunwani e Mohan (2017), Tymvios *et al.* (2018), dentre outros abordados neste estudo.

Diante de tal conjuntura, o presente trabalho tem por objetivo verificar o resultado de alterações nas configurações do WRF, via modelagem de alto desempenho, sobre a Região Nordeste do Brasil, no que diz respeito à acurácia das simulações de vento por ele executadas. Busca-se auxiliar os diferentes usuários desses dados nas tomadas de decisões apropriadas, bem como fornecer suporte para novas pesquisas científicas.

Para isso, são estabelecidos quatro arranjos de parametrizações físicas. Em três deles, o enfoque é examinar qual esquema de Camada Limite Planetária, assim como de Camada de Superfície, mais impacta positivamente a representação da velocidade e da direção do vento. A partir desses resultados, uma quarta configuração é proposta e avaliada, tendo como referencial os esquemas físicos utilizados pelo modelo *Global Forecast System* (GFS).

As análises de sensibilidade são feitas em múltiplos pontos do mapa, em diferentes alturas, de maneira a se obter uma melhor compreensão de como as configurações propostas influenciam a performance do WRF em situações variadas. Além disso, são comparados os resultados em dois intervalos temporais específicos, as primeiras quinzenas de março e de setembro do ano de 2018, referentes a meses em que há tendência climatológica de comportamentos distintos do vento no Nordeste. As avaliações são realizadas considerando as resoluções horizontais de 3 e 9 km.

Ainda, o estudo concentra-se na distribuição espacial do desempenho do modelo, averiguando em quais extensões do território nordestino o WRF fornece representações eólicas mais acuradas e quais as zonas mais vulneráveis a reproduções de baixa qualidade.

Por fim, as análises do GFS, que assimilam dados observados e foram empregadas como condições iniciais e de contorno nas simulações, são também avaliadas a título de comparação com o WRF. A finalidade foi compreender o quanto a sensibilidade do modelo é influenciada pelas parametrizações físicas e o quanto isso pode estar associado aos dados de entrada e o tratamento deles.

Sendo assim, este trabalho é dividido em seis capítulos, além dos apêndices. A primeira e presente seção trata dos aspectos introdutórios envolvendo a temática da pesquisa, seus fatores motivadores e objetivos, assim como apresenta a estruturação do texto.

No capítulo 2, é apresentado o referencial teórico do trabalho. Contextualizam-se aspectos atinentes ao escoamento do ar na atmosfera, suas características e seu comportamento diante das dinâmicas locais, de modo a se melhor compreender sua influência na geração de energia eólica. Além disso, aborda-se sobre o papel da modelagem na previsão dos ventos, via questões mais fundamentais, bem como foca-se no WRF, na importância de suas parametrizações físicas e das condições iniciais e de contorno.

Em seguida, no capítulo 3, são evidenciados os materiais e a metodologia envolvidos na elaboração da referida pesquisa. Assim, a área de estudo é delimitada e o WRF é ajustado, com seus diferentes cenários, bem como aborda-se o modo de utilização do modelo GFS. Ademais, é demonstrada a seleção dos dados observados utilizados para validação do trabalho e quais foram as estatísticas aplicadas nas análises de sensibilidade. São também passados detalhes de como foi construído um mapa de diferença altimétrica, necessário para complementar as averiguações.

No capítulo 4, são expostos os resultados das análises realizadas e também discutidos os seus significados. Dessa forma, discorre-se sobre o desempenho do WRF, através dos parâmetros estatísticos relacionados à velocidade e à direção do vento, para cada uma das configurações selecionadas, em cada um dos pontos de validação e em suas alturas associadas. O mesmo é realizado para as análises do GFS. Essa investigação é feita através de gráficos de barra, de tabelas e de mapas de distribuição espacial. Além disso, avalia-se a qualidade da representação da topografia e sua possível influência nos resultados, bem como o efeito dos sistemas atmosféricos atuantes na região sobre a performance do modelo.

Posteriormente, tem-se o capítulo 5. Nele, é feita uma breve contextualização de todo o trabalho, apresentada as principais conclusões extraídas dos resultados e sintetizada a contribuição do estudo. São também evidenciadas as limitações encontradas e sugeridas direções para estudos futuros.

As referências bibliográficas se encontram no capítulo 6. Finalmente, são incluídos quatro apêndices ao trabalho. O apêndice A e o apêndice B apresentam, respectivamente, as estatísticas aplicadas às simulações mensais inicialmente realizadas para março e para setembro de 2018. O apêndice C traz as estatísticas resultantes de uma simulação-teste que objetivava definir se uma determinada opção deveria ser ativada nas

simulações finais ou não. Já o apêndice D exibe um exemplo de arquivo namelist.input utilizado em uma das simulações realizadas, com o campo das parametrizações físicas destacado.

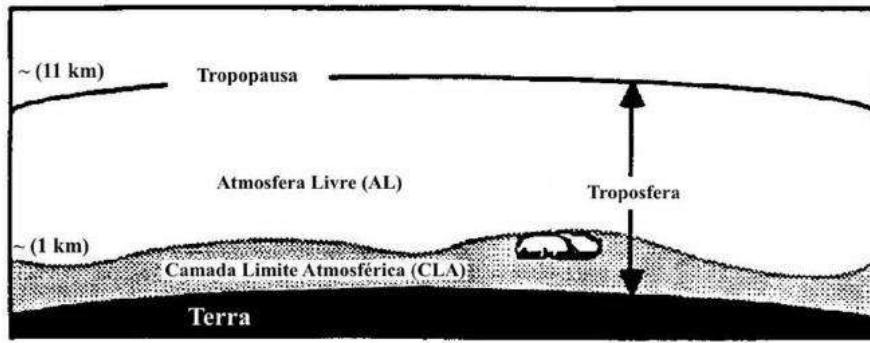
## 2 Referencial teórico

O capítulo em questão traz conceitos que servem de fundamento para a confecção da presente pesquisa. Nesse sentido, são evidenciados os principais mecanismos de ação do escoamento do ar e como isso impacta na produção de energia eólica. Além disso, expõe-se a caracterização e utilidade da modelagem atmosférica no tratamento da previsão do vento, destacando o WRF e algumas de suas propriedades relevantes.

### 2.1 O deslocamento do ar na atmosfera e sua influência na geração de energia

A geração de energia eólica depende do comportamento dos fluxos de ar dentro da coluna atmosférica. Mais especificamente, a porção da atmosfera contida entre, aproximadamente, os 100 e os 3.000 m mais próximos à superfície terrestre tem papel fundamental nesse processo, sofrendo influência direta do planeta. Essa região é denominada de Camada Limite Atmosférica (CLA), também conhecida como Camada Limite Planetária (CLP). A camada remanescente da troposfera, localizada acima dela, é conhecida como Atmosfera Livre (AL) e pode alcançar, em média, 11 km de altitude (STULL, 1988).

Segundo Stull (1988), a CLA possui uma capacidade de início de resposta às forçantes da superfície de cerca de uma hora ou menos. A significativa variabilidade da espessura dessa camada acontece tanto no espaço quanto no tempo, a depender de fatores como arrasto, evaporação e transpiração, transferências de calor, emissão de poluentes e topografia. Enquanto isso, a AL tem reações mais lentas e suaves aos impactos da superfície, sendo suas propriedades menos variáveis na escala espaço-temporal. A Figura 1 ilustra o esquema da CLA definido por Stull (1988).



*Figura 1: Divisão da Troposfera em Camada Limite Atmosférica e Atmosfera Livre. Fonte: Adaptado de Stull, 1988*

Matematicamente, o escoamento do ar na atmosfera pode ser representado pelas equações de Navier-Stokes. Essas equações caracterizam o escoamento de um fluido contínuo e derivam dos princípios da conservação da massa, energia e movimento. A forma dessas equações em notação vetorial, considerando os movimentos horizontais do ar em escala sinótica como os de um fluido incompressível e de viscosidade constante, é dada por (1) (FREIRE, 2012).

Nela,  $D_{\vec{U}}/D_t$  representa a derivada total do vetor velocidade do vento  $\vec{U}$ , que se decompõe na variação local, mais relevante em microescala, e na advecção de  $\vec{U}$ . A densidade do ar é dada por  $\rho$ . Já  $\vec{F}$  simboliza o somatório de forças externas. O termo  $-\nabla p$  representa o gradiente de pressão atuante, ao passo que  $\mu\nabla^2\vec{U}$  é o termo que trata da influência dos efeitos viscosos em  $\vec{U}$ , o qual também é mais expressivo em microescala.

$$\rho \frac{D_{\vec{U}}}{D_t} = \vec{F} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (1)$$

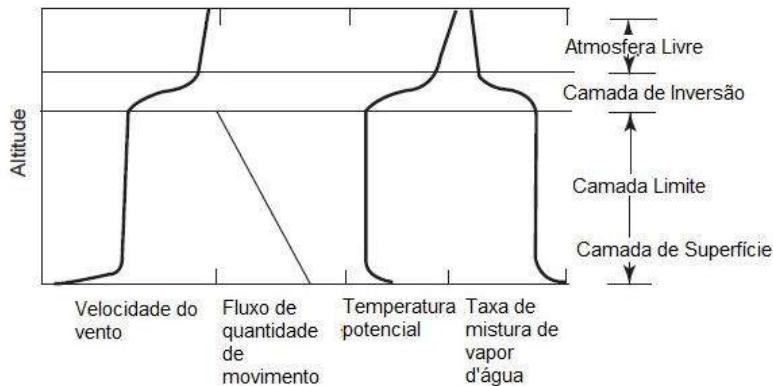
O escoamento do ar dentro da Camada Limite é caracterizado por possuir movimentos turbulentos e difusivos. A turbulência pode ser visualizada como turbilhões irregulares de vento que podem se sobrepor, ou, ainda, como a flutuação da componente instantânea da velocidade do vento em relação ao seu termo médio local. Visto que na AL o movimento é consideravelmente laminar, admite-se o topo da CLA como o local onde a turbulência desaparece ou torna-se insignificante (STULL, 1988).

Os maiores e mais intensos turbilhões alcançam a própria altura da Camada Limite. Já os menores, são da ordem de alguns milímetros e são fracos em vista dos efeitos dissipativos da viscosidade molecular. A turbulência transporta energia, massa e quantidade de movimento entre a superfície da Terra e a atmosfera, sendo ela consideravelmente mais eficaz nesse deslocamento que a difusão. O movimento difusivo, por sua vez, ocorre em nível molecular, sendo traduzido como a vibração das moléculas de ar, e não causa grandes perturbações no escoamento (STULL, 1988).

Ademais, a própria CLA pode ser seccionada em diferentes camadas, de acordo com os efeitos observados dentro delas. Uma das subcamadas de maior relevância para a produção de energia eólica é a denominada Camada de Superfície ou Superficial (CS), região onde estão geralmente localizados os rotores dos aerogeradores que irão gerar eletricidade. A CS é a camada mais baixa da atmosfera, representando, aproximadamente, 10% da Camada Limite. Nessa região, os fluxos turbulentos variam em menos de 10% de sua magnitude (STULL, 1988).

Vale ainda destacar outras três propostas de camadas verificadas dentro da CLA amplamente aceitas pela comunidade científica. Wyngaard (1992) sugere que, antes mesmo da Camada de Superfície, existe a subcamada molecular, da ordem de alguns centímetros, onde prevalecem os efeitos viscosos. Após a subcamada molecular e a subcamada superficial, se encontra a subcamada de mistura, local de predominância dos efeitos convectivos. A quarta e última seção, a subcamada interfacial, ocorre apenas em CLAs estratificadas, ou seja, com gradiente térmico vertical não nulo. Ela é definida como a região entre os pontos onde o fluxo de calor equivale a zero.

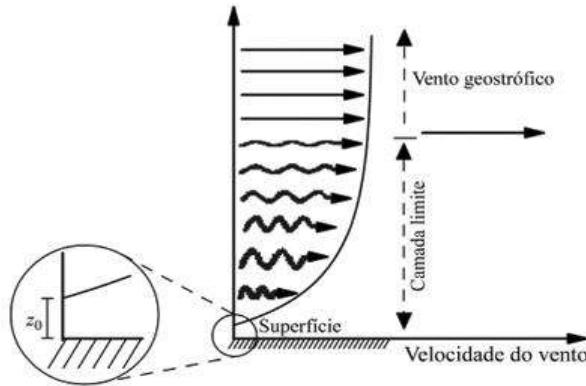
Conforme Geenaert (2003), na Camada de Superfície ocorre uma rápida mudança da velocidade do vento, da temperatura e da umidade com a altura. Ultrapassada essa camada, esses parâmetros vão atingindo certa estabilidade conforme eleva-se a altura, até que se chega na chamada Camada de Inversão. A Figura 2 ilustra o perfil desses parâmetros em uma CLA idealizada. Em contrapartida, a direção do vento é relativamente constante dentro de toda a CS e, após essa área, começa a mudar significativamente com o aumento da altura, influenciada sobretudo pela rotação da Terra.



*Figura 2: Perfis de velocidade do vento, fluxo de quantidade de movimento, temperatura potencial e taxa de mistura de vapor d'água dentro da Troposfera. Fonte: Adaptado de Geenaert, 2003*

Pela análise da Figura 2 também é possível observar que o fluxo descendente turbulento de quantidade de movimento é máximo junto à superfície e, com a elevação da altura, vai se aproximando de zero, quando alcança o topo da Camada Limite Atmosférica. A turbulência na Camada de Superfície é gerada por cisalhamento. Todavia, sua intensidade varia de acordo com a rugosidade do terreno e com a estabilidade atmosférica (GEENAERT, 2003).

Conforme verifica-se na Figura 3, existe uma determinada altura, denominada comprimento de rugosidade ( $z_0$ ), a partir da qual se inicia o perfil vertical da velocidade do vento. Em outras palavras, o comprimento de rugosidade equivale ao ponto onde o vento apresenta velocidade igual a zero. Essa altura é função da cobertura do terreno, de seu relevo e dos obstáculos presentes (MARTINS *et al.*, 2008). Dessa maneira, quanto mais regular e desobstruída for a superfície, menor será  $z_0$  e a turbulência associada. Alguns valores típicos de comprimento de rugosidade são exemplificados na Tabela 1.



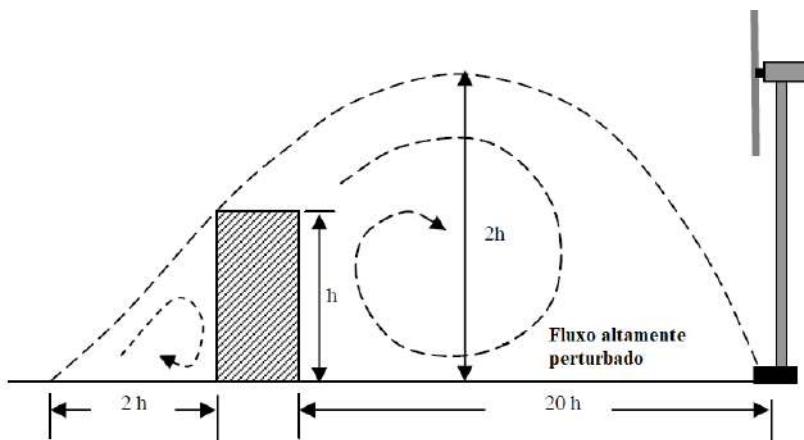
*Figura 3: Comprimento de rugosidade associado ao perfil vertical logarítmico da velocidade do vento.*  
Fonte: Martins et al., 2008

*Tabela 1: Valores típicos mínimos e máximos do comprimento de rugosidade de acordo com o tipo de terreno*

<b>Tipo de terreno</b>	<b><math>z_0</math> mín (m)</b>	<b><math>z_0</math> máx (m)</b>
Lama/gelo	0,00001	0,00003
Mar calmo	0,0002	0,0003
Areia	0,0002	0,001
Neve	0,001	0,006
Campo de cereais	0,001	0,01
Relva baixa/estepes	0,01	0,04
Descampados	0,02	0,03
Relva alta	0,04	0,1
Terreno com árvores	0,1	0,3
Floresta	0,1	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centro da cidade	1	4

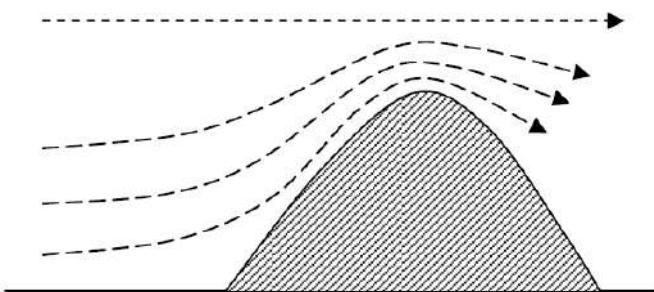
Fonte: Castro, 2003

A presença de barreiras físicas, tais como edifícios, árvores e aerogeradores, modificam o fluxo do ar, alterando a direção e a velocidade do vento. O escoamento, conforme ilustrado na Figura 4, logo após passar por obstáculos, fica mais lento e turbulento, sendo esse efeito denominado de esteira. A intensidade da turbulência depende do tamanho e da forma do objeto. Após certo prolongamento no espaço, que pode ser de 10 a 20 vezes a altura do obstáculo, o fluxo atmosférico se mistura com as massas de ar do escoamento livre e retoma seu equilíbrio, com uma velocidade similar à inicial (MATHEW, 2006; PICOLO *et al.*, 2014).



*Figura 4: Comportamento do escoamento do ar ao encontrar um obstáculo. Fonte: Adaptado de Mathew, 2006*

O relevo em si é mais um fator que influencia o comportamento do ar. Topos de morros aumentam a intensidade do vento que passa sobre eles, visto que ocorre a compressão das camadas de ar nessa região, provocando sua aceleração, como exemplificado na Figura 5. A depender do formato do morro, essa aceleração variará. A sua jusante, o escoamento volta a se expandir em camadas de estratificação e desacelera novamente (MATHEW, 2006).



*Figura 5: Efeito do terreno sobre o escoamento do ar. Fonte: Mathew, 2006*

Já a estabilidade atmosférica afeta a turbulência de maneira distinta. A CLA pode ser classificada como instável, neutra ou estável, em função do aquecimento e do resfriamento da superfície terrestre. Com isso, durante o dia, com a incidência da radiação solar sobre a Terra, movimentos convectivos do ar são gerados, com deslocamento ascendente das camadas mais quentes e descente daquelas mais frias. Assim, verifica-se

uma CLA instável, em que a turbulência é mais acentuada. (STULL, 1988; GEENAERT, 2003).

Durante a noite, quando a superfície terrestre se resfria, o ar mais frio, de maior massa específica, é o que se encontra mais próximo ao solo e o ar mais quente se localiza nas camadas mais elevadas. Assim, não há estímulo aos movimentos turbulentos, tendendo a uma CLA estável. Por fim, uma estratificação neutra é aquela em que o gradiente térmico vertical é nulo, não induzindo movimentos verticais do ar (STULL, 1988; GEENAERT, 2003).

Cabe ressaltar que, além da variação térmica atribuída aos ciclos diurnos e noturnos, as mudanças das estações do ano também induzem a diferentes estratificações da Camada Limite Atmosférica, de acordo com a maior ou menor incidência solar sobre determinada região (STULL, 1988; GEENAERT, 2003).

Uma maneira de se obter matematicamente soluções para os fluxos turbulentos contidos dentro da Camada Limite Atmosférica é através da Teoria da Similaridade. Essa teoria organiza grupos adimensionais de variáveis e extrai relações empíricas entre eles, aplicadas universalmente, dada a impossibilidade de resolução analítica das equações governantes da turbulência atmosférica (STULL, 1988; GEENAERT, 2003; MOREIRA, 2012).

Mais especificamente, Monin e Obukhov (1954) descreveram a Teoria da Similaridade na Camada de Superfície, ficando essa conhecida como Teoria da Similaridade de Monin-Obukov. Nela, segundo os autores, assume-se que as características mais relevantes que envolvem a CS são os fluxos de quantidade de movimento, calor e umidade, considerando propriedades horizontais uniformes da superfície. Além disso, os atributos médios do fluxo atmosférico são função somente da altura acima da superfície ( $z$ ).

Assim, a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov dispõe que o perfil de velocidade do vento ( $\partial U / \partial z$ ) e da temperatura ( $\partial T / \partial z$ ) podem ser escritos conforme as Equações (2) e (3), respectivamente.

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \phi_U \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_*}{kz} \phi_T \quad (3)$$

Onde  $u^*$  representa a velocidade de atrito do vento, definida por (4), sendo  $\tau$  o fluxo da quantidade de movimento ou, ainda a tensão superficial de Reynolds,  $\rho$  a densidade do ar e  $\overline{u'w'}$  as flutuações médias das componentes horizontal e vertical da velocidade do vento, nessa ordem.

$$u_* = \sqrt{\frac{|\tau|}{\rho}} = \sqrt{|\overline{-u'w'}|} \quad (4)$$

Além disso,  $T_*$  simboliza a escala de temperatura, que pode ser escrita como (5). A constante  $k$  é denominada de von Kármán, com valor aproximadamente igual a 0,4,  $q$  é o fluxo vertical de calor turbulento e  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante (MONIN; OBUKHOV, 1954).

$$T_* = -\frac{1}{ku_*} \frac{q}{c_p \rho} \quad (5)$$

Por derradeiro, os termos  $\phi_U$  e  $\phi_T$  são funções dependentes do parâmetro de estabilidade adimensional  $z/L$ , em que  $L$  é o chamado Comprimento de Monin-Obukhov, o qual é definido por (6). A variável  $T_o$  representa a temperatura média da camada, enquanto  $g$  é a aceleração da gravidade.

$$L = -\frac{u_*^3}{k \frac{g}{T_o} \frac{q}{c_p \rho}} \quad (6)$$

O Comprimento de Monin-Obukhov corresponde a altura em que a turbulência de origem mecânica se iguala àquela de origem térmica. Em pontos mais próximos à superfície, em que  $z < |L|$ , há predominância da turbulência mecânica. Já quando  $z >$

$|L|$ , ou seja, em alturas mais elevadas, é a turbulência térmica que impera (MOREIRA *et al.*, 2008).

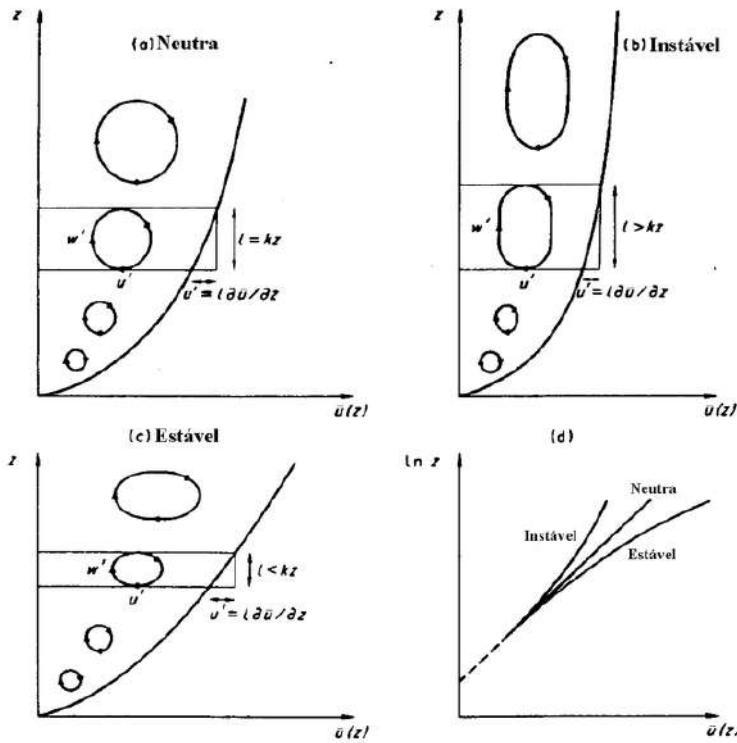
As Equações (7) e (8) são resultado da integração de (2) e (3) no intervalo entre  $z$  e  $z_0$  e representam o perfil vertical da velocidade do vento e da temperatura, respectivamente. O termo  $z_0$  é o comprimento de rugosidade, altura na qual a velocidade do vento se inicia, enquanto  $\psi_m$  e  $\psi_h$  são as funções integradas de estabilidade associadas a quantidade de movimento e calor, nessa ordem, na Camada de Superfície.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \psi_m \right] \quad (7)$$

$$T(z) - T(z_0) = \frac{T_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \psi_h \right] \quad (8)$$

Em uma atmosfera neutra,  $\psi_m$  e  $\psi_h$  são nulas. Quando os valores dessas funções de similaridade são positivos, tem-se uma condição de estratificação instável da atmosfera, ao passo que, quando seus valores são negativos, há uma estratificação estável da mesma (GEENAERT, 2003).

A Figura 6 ilustra os diferentes perfis que a velocidade do vento pode assumir a depender da estabilidade atmosférica. Nota-se que para uma atmosfera neutra, o perfil do vento é logarítmico. No caso de uma atmosfera instável, com a correção da função de estabilidade positiva, os turbilhões de ar tendem a ser mais alongados em sua componente vertical e mais achatados em sua componente horizontal. Em sentido oposto, em uma condição de estabilidade atmosférica, dada a presença de uma função de estabilidade negativa, os redemoinhos de vento têm a componente horizontal maior que a vertical, configurando um perfil com curvatura mais aberta que os demais.



*Figura 6: Perfil vertical característico da velocidade do vento em função da estabilidade atmosférica.*  
Fonte: Thom, 1975, apud Marques Filho, 1999

Dessa maneira, as características do deslocamento das correntes de ar dentro da Camada de Superfície afetam o aproveitamento dos ventos para a geração de energia eólica. A Figura 7 representa a essência da transformação da energia dos ventos em eletricidade.

Basicamente, a energia cinética contida nos ventos é convertida em energia mecânica ao entrar em contato com as pás acopladas ao rotor do aerogerador, que começam a se movimentar. Quando necessário, um sistema de engrenagens multiplica a frequência do rotor e essa energia mecânica rotacional é então transmitida para um gerador elétrico. Ocorre, nesse momento, a transformação em eletricidade, via indução eletromagnética (PICOLO *et al.*, 2014).

A torre, além sustentar o rotor e de abrigar a fiação que interliga a energia elétrica produzida à rede elétrica, tem também a função de situar o aerogerador na altura potencial de captação do vento em que sua intensidade é mais elevada e menos perturbada pelos efeitos da superfície. Além disso, há um sistema de segurança composto por freios que controlam o giro da turbina em condições adversas de funcionamento (AMARAL, 2011).

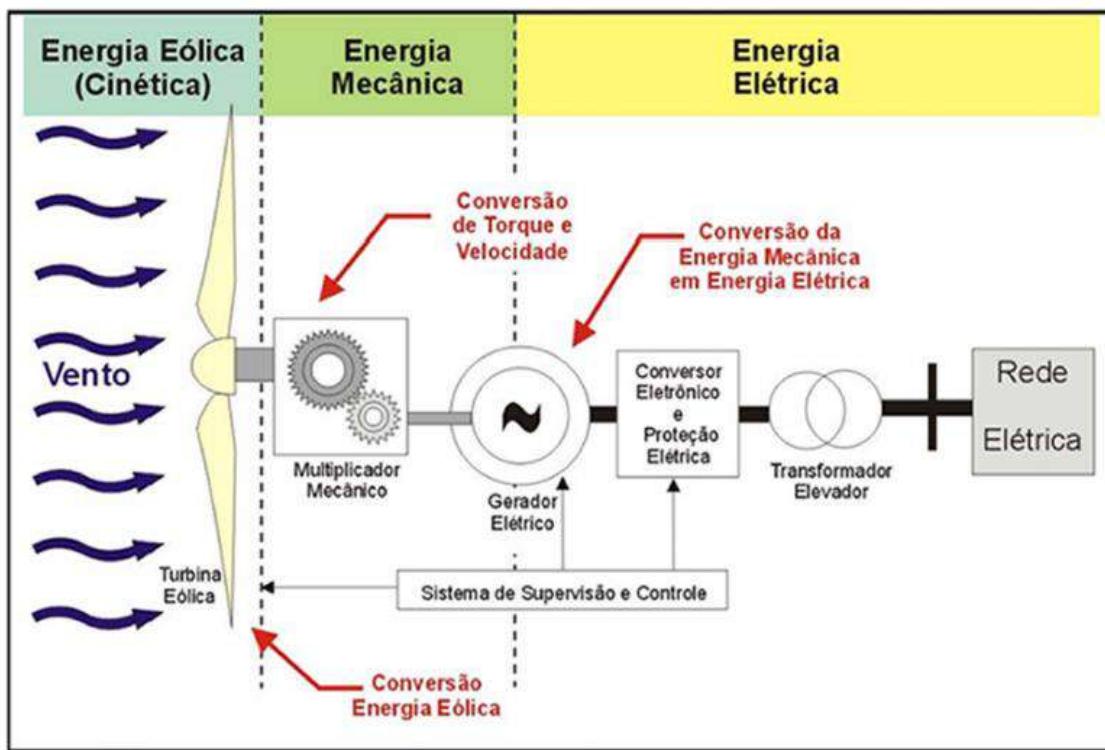


Figura 7: Funcionamento básico de um aerogerador de eixo horizontal conectado à rede elétrica. Fonte: Picolo et al., 2014

Os movimentos turbulentos na atmosfera, além de afetar a intensidade e direção do vento, impactam também o próprio funcionamento de um aerogerador. Conforme verifica-se pela Figura 8, o vento e a turbulência associada se distribuem irregularmente sobre a área correspondente à movimentação das pás do rotor. Assim, as rajadas de vento atingem de maneira desigual essas pás, alterando a velocidade local do vento tangencialmente (PICOLO et al., 2014).

Por isso, zonas de menor turbulência terão efeito mais ameno sobre a turbina eólica, diminuindo os riscos de falha durante sua operação e assegurando melhor exploração do vento.

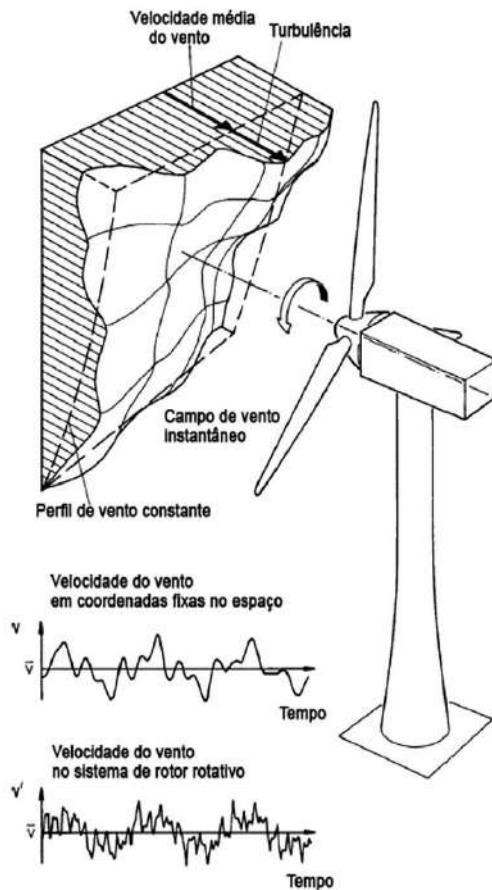


Figura 8: Impacto da turbulência sobre as pás de uma turbina eólica. Fonte: Picolo et al., 2014

A potência ( $P$ ) extraída do vento que cruza a área representada pela interceptação das pás do rotor ( $A$ ) é dada por (9). O termo  $c_p$  é chamado de coeficiente de potência e representa a capacidade de extração de energia do vento pelas pás da turbina. Apesar dessa limitação, nota-se que a produção de energia é proporcional à terceira potência da velocidade do vento. Assim, pequenas alterações nessa velocidade provocam mudanças significativas na potência gerada (MARTINS *et al.*, 2008; PICOLO *et al.*, 2014).

Com isso, para um aproveitamento eólico satisfatório, um fluxo relativamente constante e intenso de vento se faz necessário. Além do mais, mesmo uma pequena melhora na previsão da velocidade do vento pode acarretar em diminuições consideráveis entre a energia prevista e aquela de fato gerada em um determinado período de tempo, diminuindo incertezas, por exemplo, no sistema elétrico e na operação de parques eólicos (MARTINS *et al.*, 2008; PICOLO *et al.*, 2014).

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 c_p \quad (9)$$

Dessa forma, é notável como as características locais e temporais impactam o escoamento do ar na atmosfera e, consequentemente, a propensão à geração de energia eólica. Portanto, para uma estimativa fidedigna do potencial eólico de determinada região, é essencial que a dinâmica envolvendo os fluxos atmosféricos seja considerada, bem como que seja adequadamente representada.

## **2.2 A modelagem atmosférica como instrumento de previsibilidade dos ventos**

Conforme Sampaio (2009), um modelo é um ambiente construído e limitado que reproduz eventos, objetos e processos idealizados ou que refletem uma certa realidade, buscando a sua melhor compreensão. Ainda segundo o autor, uma simulação tem por objetivo concentrar-se nas saídas oferecidas pela execução do modelo em determinadas condições.

Os métodos de previsão do vento associados a modelos são geralmente divididos em estatísticos e físicos. O enfoque estatístico utiliza dados observados como entrada, construindo uma relação capaz de prever a evolução do vento no futuro. Para tal, demanda-se uma sólida série temporal de observações de, no mínimo, um ano. Todavia, em muitos lugares, há escassez dessas mensurações, tanto temporais, quanto espaciais, tornando difícil a sua aplicação. Além disso, esses modelos não são capazes de prever mudanças na dinâmica atmosférica que interferem no fluxo do ar próximo à superfície (LAHOUAR; SLAMA, 2017; MURTHY; RAHI, 2017).

De outro modo, modelos físicos, apesar de possuírem um custo computacional e temporal elevado, se pautam em informações meteorológicas e físicas da superfície. A modelagem atmosférica se encaixa nessa abordagem, descrevendo a atmosfera terrestre e sendo capaz de prever, dentre outras variáveis, os ventos. Para isso, faz uso da Previsão Numérica de Tempo (PNT) sobre uma superfície determinada, resolvendo as equações físicas associadas ao fluido atmosférico por meio de aproximações algébricas. Como muitas vezes essas equações não possuem solução analítica, são usados métodos

numéricos para resolvê-las (GANDU, 2005; SAMPAIO; SILVA DIAS, 2014; LAHOUAR; SLAMA, 2017).

Para a previsibilidade dos ventos especificamente, a modelagem atmosférica é aplicada fundamentalmente com a finalidade de selecionar áreas mais favoráveis ao aproveitamento eólico, avaliando os ventos médios locais, e para previsões de curto e médio prazo, ligadas ao planejamento da operação de parques eólicos e ao gerenciamento da distribuição da energia gerada (MARTINS *et al.*, 2008).

A escala atmosférica desses modelos pode variar de acordo com os fenômenos que se pretende representar. Dentre as possíveis categorias existentes, se encontram os modelos globais e os de mesoescala. Os modelos globais, ou modelos de circulação geral da atmosfera (MCGA), compreendem a dinâmica atmosférica de todo o planeta Terra (GANDU, 2005).

Esses modelos são aplicados tanto à previsão do tempo como para estudos do clima, nesse último caso podendo ser executado concomitantemente a um modelo oceânico de circulação geral. Em geral, por considerarem toda dimensão planetária, modelos globais possuem resoluções espaciais mais simplificadas (GANDU, 2005).

Já os modelos atmosféricos de mesoescala, também chamados de modelos regionais ou modelos de área limitada (MAL), se restringem a cobrir uma área delimitada da superfície e da atmosfera terrestre. Devido a isso, conseguem conter resoluções espaciais usualmente mais refinadas que os modelos globais (GANDU, 2005).

Suas fronteiras são alimentadas por dados climáticos ou por aqueles provenientes de modelos de maior escala, como os de circulação geral, sendo essa técnica denominada *downscaling*. Consequentemente, erros procedentes do modelo de escala mais elevada afetam as execuções do modelo de mesoescala. Assim, para minimizar a propagação desses erros, é recomendado que a área que se deseja avaliar esteja distante das fronteiras, principalmente daquela associada à entrada do escoamento predominante (GANDU, 2005; SAMPAIO; SILVA DIAS, 2014).

A região que comprehende a superfície de atuação de um modelo atmosférico é chamada de grade numérica ou domínio de integração. Essas grades são cubos constituídos por pontos, exemplificados na Figura 9, os pontos de grade, onde são encontradas as soluções das discretizações numéricas relacionadas à resolução

computacional das equações físicas (GANDU, 2005; MARTINS *et al.*, 2008; SAMPAIO; SILVA DIAS, 2014).

A distância entre os pontos de grade reflete a resolução espacial do modelo. Dessa maneira, uma maior resolução está associada a um menor espaçamento entre esses pontos. Por conseguinte, resoluções elevadas têm uma grande quantidade de pontos de grade e, portanto, mais locais onde são solucionadas numericamente as condições físicas do modelo. Ademais, uma maior resolução demanda um menor passo de tempo entre cada iteração. Logo, resoluções mais refinadas necessitam de mais recursos computacionais para sua execução (GANDU, 2005).

Uma alternativa para diminuir a demanda computacional de um domínio de alta resolução é a técnica conhecida como aninhamento de grades ou *nesting*. Com ela, grades de menor resolução e maior área abrigam grades de maior resolução em seu interior, de modo que apenas uma região menor seja discretizada com um pequeno espaçamento de grade. Assim, ocorre troca de informações entre os domínios, sendo que essa pode ser em interação de mão única (*one-way*), ou seja, apenas da grade de menor para a de maior resolução, ou em interação de mão dupla (*two-way*), quando há transferências em ambos os sentidos (GANDU, 2005; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

A resolução do modelo é caracterizada tanto horizontalmente como verticalmente. O número de níveis verticais também faz variar a quantidade de pontos onde são resolvidas as equações dinâmicas. Esses níveis podem ser dispostos de maneira variada sobre a coluna atmosférica. Geralmente, as camadas adjacentes à superfície possuem mais proximidades entre elas, visto ser a região de maiores trocas verticais entre as forçantes terrestres e a atmosfera (GANDU, 2005).

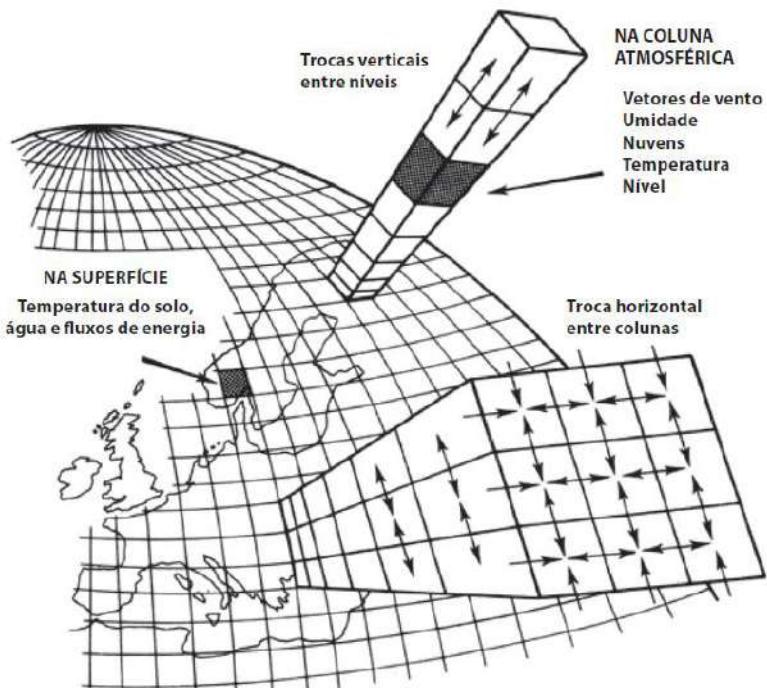


Figura 9: Representação gráfica de um modelo global e suas trocas verticais e horizontais entre os pontos de grade.  
Fonte: Sampaio e Silva Dantas, 2014

### 2.3 O Weather Research and Forecasting Model

Um dos modelos atmosféricos mais explorados no mundo é o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF). Segundo Powers *et al.* (2017), o número acumulado de usuários registrados do WRF, em 2017, era superior a 36.000, ao passo que o modelo climático *Community Earth System Model* (CESM) possuía em torno de 6.000 registros acumulados. Além disso, entre 2011 e 2015, foi observada uma média anual de mais de 3.600 registros associados ao WRF.

Trata-se de um modelo de Previsão Numérica de Tempo e de simulação atmosférica de mesoescala, de domínio público e sem custos ou restrições a modificações, o que o torna acessível e atrativo aos diversos tipos de demandas, como pesquisas científicas, operações em instituições governamentais e em empresas privadas. Essas diferentes aplicações do WRF contribuem para o aperfeiçoamento de suas capacidades e sua constante atualização. Considera-se o WRF como a evolução do modelo *the fifth-generation Pennsylvania State University – NCAR Mesoscale Model* (MM5), se destacando por sua maior precisão numérica, de ordem superior, e pelas propriedades de conservação escalares (DA SILVA; FISCH, 2014; POWERS *et al.*, 2017).

O WRF foi criado no final da década de 1990, fruto dos esforços colaborativos entre o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), o *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)<sup>1</sup>, a Força Aérea dos Estados Unidos da América, o *Naval Research Laboratory*, a Universidade de Oklahoma e a *Federal Aviation Administration* (FAA) (POWERS *et al.*, 2017; SKAMAROCK *et al.*, 2019). Desde seu surgimento, o modelo já passou por quatro versões, tendo sido atualizado em julho de 2020 para a versão 4.2.1 (NCAR, 2020).

O modelo WRF é capaz de tratar e resolver as equações do movimento atmosférico por meio de dois núcleos dinâmicos distintos: o *Advanced Research WRF* (ARW; WRF-ARW), desenvolvido pelo NCAR, e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM; WRF-NMM), elaborado pelo NCEP. O WRF-NMM foi confeccionado a partir da inclusão de dinâmicas não hidrostáticas em um modelo hidrostático de PNT que utiliza coordenadas verticais baseadas em massa (JANJIC, 2003). Por outro lado, o WRF-ARW é um núcleo capaz de resolver as equações de Euler não hidrostáticas na forma de fluxos, considerando variáveis conservativas como a massa de ar seco e a massa escalar, e possuindo também uma opção hidrostática (SKAMAROCK *et al.*, 2019). O presente estudo tem por aplicação o WRF-ARW e, portanto, o capítulo em questão foca em suas funcionalidades.

O funcionamento do WRF pode ser dividido em três fases. Inicialmente, o pré-processamento é executado pelo WRF *Preprocessing System* (WPS). Esse pacote de programas transforma dados de topografia e uso do solo, assim como dados meteorológicos, geralmente no formato *General Regularly-distributed Information in Binary form* (GRIB), em arquivos no formato *Network Common Data Form* (NETCDF), com as condições iniciais e de contorno que serão utilizadas pelo modelo em seu processamento (CARVALHO *et al.*, 2013; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

Os principais sistemas do WPS são o geogrid, o ungrid e o metgrid, executados nessa ordem. O geogrid é responsável por delinear fisicamente a grade do modelo e interpolar os dados terrestres para tal domínio. O ungrid, por sua vez, tem a função de reformatar os dados meteorológicos de entrada (sejam análises, reanálises ou previsões),

---

<sup>1</sup>Atuaram no desenvolvimento do WRF, como integrantes do NOAA, o *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e o *NOAA Earth System Research Laboratory* (ESRL).

que são, em seguida, interpolados horizontalmente para as grades construídas, através do metgrid (CARVALHO *et al.*, 2013; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

Posteriormente, passa-se para o processamento de fato do modelo. Cabe destacar que, nessa fase, existem duas possíveis classes de simulações, aquelas com inicialização ideal e as que utilizam dados reais. Na primeira, o usuário pode trabalhar com um cenário controlado, e as condições iniciais são produzidas a partir de uma sondagem 1-D ou 2-D, exibindo uma orografia mais simplificada. Já no caso dos dados reais, geralmente é necessária a realização do mencionado pré-processamento do WPS. Dentro da etapa de processamento, o que irá variar é a opção de inicialização selecionada, que poderá ser a denominada “ideal” ou a “real” (CARVALHO *et al.*, 2013; NCAR, 2019; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

O outro sistema que integra o processamento é o WRF propriamente dito, que é o mesmo independentemente da classe de simulação escolhida. Mais especificamente, com a opção de inicialização que trabalha com dados reais, o “real” faz a interpolação vertical dos campos do WRF e, feito isso, ocorre a execução do modelo no sistema WRF, gerando os resultados atmosféricos adaptados para o período e o local de interesse (CARVALHO *et al.*, 2013; NCAR, 2019; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

Todavia, para que seja factível a visualização gráfica de tais dados de saída, é necessária ainda a aplicação da etapa de pós-processamento. O pós-processamento pode ser executado por diferentes pacotes, como, por exemplo, o ARWpost, o NCAR *Command Language* (NCL) e o NCEP *Unified Post Processor* (UPP). Ademais, ressalta-se que é nos arquivos-texto denominados “namelist”, presentes em cada uma das fases, que são direcionadas as configurações do WRF, sem que seja necessário recompilar o código-fonte (CARVALHO *et al.*, 2013; NCAR, 2019; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

A Figura 10 exemplifica o esquema de funcionamento do WRF do mesmo modo que foi empregado no presente trabalho, ou seja, levando em consideração o uso do núcleo dinâmico ARW, com inicialização a partir de dados reais e tendo como programa de pós-processamento o ARWpost.

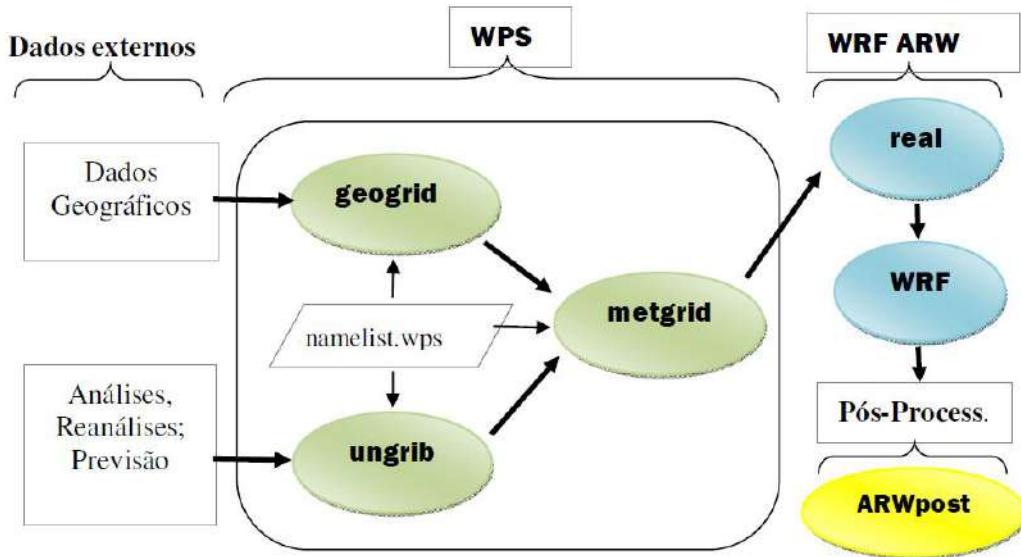


Figura 10: Funcionamento do modelo WRF-ARW considerando dados reais. Fonte: Carvalho et al., 2013

### 2.3.1 Parametrizações físicas

Dentre os recursos que compõem o WRF, um dos mais influentes sobre seu desempenho é das parametrizações físicas. Muitos processos físicos acontecem em escalas espaciais inferiores àquelas fornecidas para a grade do modelo e, com isso, não são resolvidos explicitamente pelo mesmo. As parametrizações físicas funcionam como um auxílio empírico, resolvendo implicitamente os processos de subgrade, que são independentes do tempo (CARVALHO et al., 2014a). Assim, elas evitam uma maior necessidade de recurso computacional na resolução desses processos.

As parametrizações físicas do WRF compreendem as seguintes categorias: Microfísica, *Cumulus*, Camada de Superfície (CS), Camada Limite Planetária (CLP), Radiação (subdividida em Radiação de Onda Longa e Radiação de Ondas Curta) e Modelo de Superfície Terrestre (LSM). Para cada uma delas, há diversas opções de esquemas que podem ser selecionados pelo usuário. Dependendo da versão do WRF, essas alternativas variarão. As Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 agrupam os esquemas físicos disponíveis para a versão 4 do WRF. Além disso, alguns desses esquemas dependem da eleição de outros esquemas específicos para funcionar, necessitando que sejam executados juntos (NCAR, 2019).

Tabela 2: Esquemas de Microfísica do WRF v.4

<b>mp_physics</b>	<b>Esquema</b>	<b>Referência</b>
1	Kessler	Kessler (1969)
2	Purdue Lin	Chen e Sun (2002)
3	WSM3	Hong <i>et al.</i> (2004)
4	WSM5	Hong <i>et al.</i> (2004)
5	Eta (Ferrier)	Rogers <i>et al.</i> (2001)
6	WSM6	Hong e Lim (2006)
7	Goddard	Tao <i>et al.</i> (1989), Tao <i>et al.</i> (2016)
8	Thompson	Thompson <i>et al.</i> (2008)
9	Milbrandt 2-mom	Milbrandt e Yau (2005)
10	Morrison 2-mom	Morrison <i>et al.</i> (2009)
11	CAM 5.1	Neale <i>et al.</i> (2012)
13	SBU-YLin	Lin e Colle (2011)
14	WDM5	Lim e Hong (2010)
16	WDM6	Lim e Hong (2010)
17	NSSL 2-mom	Mansell <i>et al.</i> (2010)
18	NSSL 2-mom w/ CCN prediction	Mansell <i>et al.</i> (2010)
19	NSSL 1-mom	
21	NSSL 1-momlfo	
22	NSSL 2-mom w/o hail	
28	Thompson aerosol-aware	Thompson e Eidhammer (2014)
30	HUJI SBM ‘fast’	Khain <i>et al.</i> (2010)
32	HUJI SBM full	Khain <i>et al.</i> (2010)
40	Morrison+CESM aerosol	EPA
50, 51 e 52	P3	Morrison e Milbrandt (2015)

Fonte: Adaptado de NCAR, 2019

Tabela 3: Esquemas de Cumulus do WRF v.4

<b>cu_physics</b>	<b>Esquema</b>	<b>Referência</b>
1	Kain-Fritsch	Kain (2004)
kfeta_trigger = 2	Moisture-advection-based Trigger for Kain-Fritsch Cumulus Scheme RH-dependent Additional	Ma e Tan (2009)
kfeta_trigger = 3	Perturbation to option 1 for the Kain-Fritsch Scheme	
2	Betts-Miller-Janjic	Janjic (1994); Janjic (2000)
3	Grell-Freitas	Grell e Freitas (2013)
4	Old Simplified Arakawa-Schubert	Pan e Wu (1995)
5	Grell-3	Grell (1993); Grell e Dévényi (2002)
6	Tiedtke	Tiedtke (1989); Zhang <i>et al.</i> (2011)
7	Zhang-McFarlane	Zhang e McFarlane (1995)
10	KF-CuP	Berg <i>et al.</i> (2013)
11	Multi-scale KF	Zheng <i>et al.</i> (2015); Glotfelty <i>et al.</i> (2019)
14	New SAS	Han e Pan (2011); Kwon e Hong (2017)
16	New Tiedtke	Zhang e Wang (2017)
84	New SAS	Han e Pan (2011)
93	Grell-Devenyi	Grell e Devenyi (2002)
99	Old Kain-Fritsch	Kain e Fritsch (1990); Kain e Fritsch (1993)

Fonte: Adaptado de NCAR, 2019

Tabela 4: Esquemas de Camada Limite Planetária do WRF v.4

<b>bl_pbl_physics</b>	<b>Esquema</b>	<b>Referência</b>
1	YSU	Hong <i>et al.</i> (2006)
2	MYJ	Janjic (1994)
3	GFS	Hong e Pan (1996)
4	QNSE	Sukoriansky <i>et al.</i> (2005)
5	MYNN2	Nakanishi e Niino (2006); Nakanishi e Niino (2000); Olson <i>et al.</i> (2019)
6	MYNN3	Nakanishi e Niino (2006); Nakanishi e Niino (2009); Olson <i>et al.</i> (2019)
7	ACM2	Pleim (2007)
8	BouLac	Bougeault e Lacarrere (1989)
9	UW	Bretherton e Park (2009)
10	TEMF	Angevine <i>et al.</i> (2010)
11	Shin-Hong	Shin e Hong (2015)
12	GBM	Grenier e Bretherton (2001)
99	MRF	Hong e Pan (1996) Hong <i>et al.</i> (2008); Kim e Arakawa (1995); Choi e Hong (2015)
gwd_opt = 1	Gravity Wave Drag	
windturbine_spec	Wind-farm (drag) Surface Layer Parameterization Scheme	Fitch <i>et al.</i> (2012)
grav_settling = 2	FogDES Scheme	Katata (2014)

Fonte: Adaptado de NCAR, 2019

Tabela 5: Esquemas de Camada de Superfície do WRF v.4

<b>sf_sfclay_physics</b>	<b>Esquema</b>	<b>Referência</b>
1	Revised MM5	Jimenez <i>et al.</i> (2012)
2	Eta Similarity	Monin e Obukhov (1954); Janjic (1994); Janjic (1996); Janjic (2002)
3	NCEP Global Forecast System	
4	QNSE	
5	MYNN	
7	Pleim-Xiu	Pleim (2006)
10	TEMF	Angevine <i>et al.</i> (2010)
91	MM5 Similarity	Paulson (1970); Dyer e Hicks (1970); Webb (1970); Beljaars (1994); Zhang e Anthes (1982)
topo_wind = 1 ou 2	topo_wind	Jimenez e Dudhia (2012)
iz0tlnd	Chen-Zhang Modified Zilitinkevich Thermal Roughness Length	Chen e Zhang (2009)

Fonte: Adaptado de NCAR, 2019

Tabela 6: Esquemas de Modelo de Superfície Terrestre do WRF v.4

<b>sf_surface_physics</b>	<b>Esquema</b>	<b>Referência</b>
1	5-Layer Termal Diffusion	Dudhia (1996)
2	Unified Noah	Tewari <i>et al.</i> (2004)
3	RUC	Benjamin <i>et al.</i> (2004)
4	Noah-MP	Niu <i>et al.</i> (2011) ; Yang <i>et al.</i> (2011)
5	CLM4	Oleson <i>et al.</i> (2010); Lawrence <i>et al.</i> (2011)
7	Pleim-Xiu	Noilan e Planton (1989); Pleim e Xiu (1995); Xiu e Pleim (2001); Pleim e Xiu (2003); Pleim e Gilliam (2009); Gilliam e Pleim (2010)
8	SSiB	Xue <i>et al.</i> (1991); Sun e Xue (2001)
ua_phys = .true.	University of Arizona Snow Physics for Noah	Wang <i>et al.</i> (2010)
sf_surface_mosaic = 1	Sub-tiling option for Noah LSM	Li <i>et al.</i> (2013)

Fonte: Adaptado de NCAR, 2019

*Tabela 7: Esquemas de Radiação Atmosférica de Onda Curta do WRF v.4*

<b>ra_sw_physics</b>	<b>Esquema</b>	<b>Referência</b>
1	Dudhia	Dudhia (1989)
2	Goddard	Chou e Suarez (1994)
3	CAM	Collins <i>et al.</i> (2004)
4	RRTMG	Lacono <i>et al.</i> (2008)
24	RRTMG	Versão mais rápida
14	RRTMG-K	Baek (2017)
5	New Goddard	Chou e Suarez (1999)
7	FLG	Gu <i>et al.</i> (2011); Fu e Liou (1992)
99	GFDL	Fels e Schwarzkopf (1981)

*Fonte: Adaptado de NCAR, 2019**Tabela 8: Esquemas de Radiação Atmosférica de Onda Longa do WRF v.4*

<b>ra_lw_physics</b>	<b>Esquema</b>	<b>Referência</b>
1	RRTM	Mlawer <i>et al.</i> (1997)
3	CAM	Collins <i>et al.</i> (2004)
4	RRTMG	Iacono <i>et al.</i> (2008)
24	RRTMG	Versão mais rápida
14	RRTMG-K	Baek (2017)
5	New Goddard	Chou e Suarez (1999)
7	FLG	Gu <i>et al.</i> (2011); Fu e Liou (1992)
31	Held-Suarez	
99	GFDL	Fels e Schwarzkopf (1981)

*Fonte: Adaptado de NCAR, 2019*

Na busca de representar a realidade, cada uma das diferentes classes de parametrizações interage entre si, conforme ilustrado pela Figura 11. A parametrização de *Cumulus* é aquela que trata dos efeitos de formação de nuvens convectivas e/ou rasas sobre o sistema atmosfera-superfície. Esse processo físico se associa à Microfísica, que por seu turno, resolve explicitamente os mecanismos de evaporação, condensação e precipitação (DE ALMEIDA DANTAS *et al.*, 2019; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

A radiação solar sofre influência dessa nebulosidade, que acaba funcionando como um filtro capaz de regular a intensidade da radiação direta e difusa emanada. Os

esquemas de Radiação são responsáveis pelas trocas radiativas de onda curta e de onda longa, regulando a temperatura atmosférica e, consequentemente, a temperatura da superfície (DE ALMEIDA DANTAS *et al.*, 2019; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

As parametrizações de Superfície são afetadas não só pela Radiação, mas também pelas trocas com a Camada Limite Planetária, assim como são influenciadas pela precipitação, associada à *Cumulus* e à Microfísica. Os esquemas de Superfície incluem a Camada de Superfície e o Modelo de Superfície Terrestre. O primeiro deles envolve o cálculo da velocidade de atrito e dos fluxos de calor, quantidade de movimento e umidade na superfície de interação entre a atmosfera e o solo. Já o segundo, utilizando além dos demais dados citados e de seus próprios, aqueles da Camada de Superfície, resolve as trocas de calor e umidade em variadas camadas do solo (DE ALMEIDA DANTAS *et al.*, 2019; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

As saídas das parametrizações de Superfície acabam por impactar a Radiação, seja pela emissão de onda longa ou pela capacidade de reflexão de onda curta de uma superfície, assim como a CLP, através dos fluxos de calor latente e de calor sensível. Por fim, a CLP dedica-se a determinar os perfis dos fluxos verticais devidos ao transporte turbulento na coluna atmosférica (DE ALMEIDA DANTAS *et al.*, 2019; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

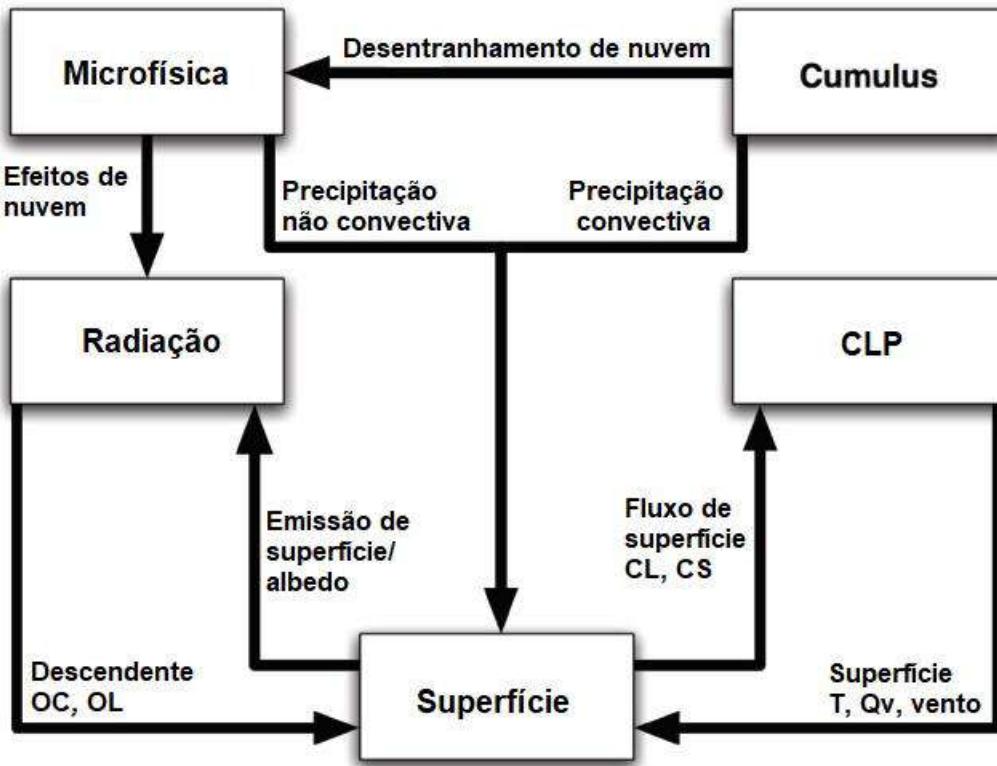


Figura 11: Interações entre as parametrizações físicas no WRF-ARW. Fonte: Adaptado de Skamarock et al., 2019

Uma atenção especial deve ser dada às parametrizações de Camada Limite Planetária, Camada de Superfície e Modelo de Superfície Terrestre quando se analisa a velocidade e a direção do vento. Juntas, essas parametrizações são capazes de representar as transferências de calor, quantidade de movimento e umidade entre a superfície, a Camada Limite e a Atmosfera Livre, afetando, assim, a dinâmica dos ventos (TYMVIOS et al., 2018).

Conforme Cohen et al. (2015), os esquemas de CLP representam o escoamento turbulento majoritariamente sob a ótica da ordem de fechamento e sob a ótica da mistura local ou não local. As equações que desenvolvem a turbulência sempre apresentam mais termos desconhecidos do que aqueles conhecidos, devido às perturbações inerentes envolvidas no processo. O termo desconhecido é sempre de uma ordem acima do maior dos demais termos. Dessa forma, o fechamento de ordem  $n$  exprime de maneira empírica a associação entre o termo desconhecido de ordem  $n + 1$  a uma combinação entre os termos conhecidos de ordem  $n$ .

Com isso, em um fechamento de 1<sup>a</sup> ordem, as variáveis de estado são calculadas, enquanto os termos de covariância sofrem parametrização. Ao avançar para um fechamento de 2<sup>a</sup> ordem, tanto as variáveis de estado quanto os termos de covariância são explicitamente equacionados e são os termos de correlação tripla que são parametrizados, e assim sucessivamente. Esquemas de ordem mais elevada demandam maiores custos computacionais (COHEN *et al.*, 2015; TYMVIOS *et al.*, 2018).

Dentre os principais esquemas de CLP do WRF, são de 1<sup>a</sup> ordem o MRF, o YSU e o ACM2. O MYNN3 é de 2<sup>a</sup> ordem. Há também o chamado fechamento de ordem 1.5, que conjuga fechamentos de 1<sup>a</sup> ordem para determinadas variáveis, com fechamentos de 2<sup>a</sup> ordem para outras. Entre esses estão o MYJ, o QNSE, o MYNN2, o BouLac, o GBM, o UW e o TEMF (COHEN *et al.*, 2015; AVOLIO *et al.*, 2017).

A segunda ótica, referente a abordagem local ou não local, trata de como um determinado ponto de interesse é afetado verticalmente pelas variáveis conhecidas das equações que envolvem a turbulência. No fechamento local, apenas os níveis verticais vizinhos a certo ponto impactam as variáveis nesse local. Das parametrizações físicas do WRF são locais a MYJ, a QNSE, a MYNN2 e 3, a BouLac, a GBM e a UW (COHEN *et al.*, 2015; AVOLIO *et al.*, 2017).

Já no fechamento não local, os diversos níveis verticais dentro da Camada Limite influenciam as variáveis em um dado ponto. São esquemas de abordagem não local o MRF e o YSU. Há ainda as opções consideradas híbridas, que possuem componentes tanto locais como não locais. É o caso dos esquemas ACM2 e TEMF (COHEN *et al.*, 2015; AVOLIO *et al.*, 2017).

Além disso, a abordagem local e a não local possuem processos diferentes para definir a altura da Camada Limite. Segundo Avolio *et al.* (2017), no fechamento local, essa altura é equivalente àquela na qual o perfil de energia cinética turbulenta (TKE) decresce até atingir um certo valor pré-definido. Por outro lado, no fechamento não local a altura da CLP é representada como a menor altura a partir da qual o número de Richardson em massa (Rib) ultrapassa determinado limite.

Tymvios *et al.* (2018) afirmam que os esquemas não locais são mais representativos da realidade, visto que a mistura vertical dentro da CLP é influenciada principalmente pelos grandes turbilhões e, portanto, ultrapassam os níveis verticais mais próximos a determinado local. Ademais, esse tipo de abordagem, conforme Tymvios *et*

*al.* (2018), é mais adequado a situações em que a Camada Limite é bem conhecida, sendo, assim, a estrutura vertical assimilada na simulação. Por outro lado, os esquemas de fechamento local são mais adequados a regimes atmosféricos estáveis, visto que são menos afetados pelos grandes movimentos turbulentos (CARVALHO *et al.*, 2014a).

Cabe ressaltar que uma outra forma de classificação, que mescla as anteriores, é a considerada por Tyagi *et al.* (2018), em que os esquemas de Camada Limite do WRF podem ser separados entre aqueles que consideram em sua abordagem o número de Richardson, conhecidos como fechamento de 1<sup>a</sup> ordem, e aqueles que aplicam o critério da energia cinética turbulenta, o fechamento de TKE, capazes de modelar a turbulência e a altura da CLP.

A Tabela 9 reúne as principais parametrizações de CLP do WRF utilizadas e suas óticas de abordagem sobre os fluxos turbulentos.

*Tabela 9: Principais esquemas de Camada Limite Planetária e suas óticas de tratamento da turbulência*

<b>Esquema</b>	<b>Ordem de fechamento</b>	<b>Abordagem local/não local</b>
YSU	1.0	Não local
MYJ	1.5	Local
QNSE	1.5	Local
MYNN2	1.5	Local
MYNN3	2.0	Local
ACM2	1.0	Híbrida: local e não local
BouLac	1.5	Local
UW	1.5	Local
TEMF	1.5	Híbrida: local e não local
MRF	1.0	Não local

*Fonte: Adaptado de Cohen *et al.*, 2015*

Enquanto a parametrização de Camada Limite Planetária se preocupa com a resolução em escala de subgrade do movimento turbulento na atmosfera, a parametrização de Camada de Superfície, que representa a camada atmosférica mais baixa e diretamente em contato com a superfície terrestre, tem como função calcular os

coeficientes de troca da superfície, assim como a velocidade de fricção, para que se determine os fluxos de calor latente, calor sensível e de quantidade de movimento (SHIN; HONG, 2011).

Alguns esquemas de CLP do WRF, como é o caso do ACM2 e do MRF, demandam uma espessura da Camada de Superfície próxima a real, ou seja, entre, aproximadamente 50 e 100 m. Todavia, a maioria dos esquemas permite a consideração de Camadas de Superfície mais finas (SKAMAROCK *et al.*, 2019). As parametrizações de Camada de Superfície baseiam-se na Teoria da Similaridade de Monin-Obukov (MONIN; OBUKOV, 1954). O que varia entre os esquemas é o modo de tratamento das funções de similaridade em relação aos regimes de estabilidade, assim como a abordagem para estimar o comprimento de rugosidade (SKAMAROCK *et al.*, 2019).

Passando então para a superfície terrestre, a parametrização física de LSM simula a evolução da temperatura, das trocas de calor e da umidade no solo, como também no mar e no gelo. É uma parametrização que trabalha com comunicações em colunas unidimensionais, pois os pontos de grade horizontalmente adjacentes não interagem entre si. Os esquemas de LSM se diversificam em termos de números de camadas de solo considerados, suas profundidades, além da possibilidade de inclusão de vegetação, raízes e efeitos de dossel, bem como de previsão de cobertura de neve (LO *et al.*, 2008; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

O Modelo de Superfície Terrestre calcula as propriedades das diferentes superfícies tendo por base os dados de cobertura e uso do solo. Com isso, essa parametrização tem forte influência sobre o comprimento de rugosidade, que por seu turno, afeta os movimentos atmosféricos e a turbulência mecânica associada (SANTOS-ALAMILLOS *et al.*, 2015).

Um dos maiores desafios ligados à aplicação das parametrizações físicas é a dependência que elas têm sobre a localização geográfica e sobre a escala temporal envolvidas nas simulações, visto que os processos físicos são dependentes de dados empíricos para suas resoluções e esses dados muitas vezes são específicos de alguns pontos do globo terrestre, não sendo representativos de localidades com características físicas distintas (CARVALHO *et al.*, 2014a).

Dessa maneira, o conjunto de esquemas que fornecem o melhor desempenho para determinado local não será necessariamente o mesmo para outra região, assim como as

performances também variarão conforme a época do ano, a extensão do período analisado e os eventos meteorológicos envolvidos (CARVALHO *et al.*, 2014a). Por isso, análises de sensibilidade do WRF a diferentes combinações de parametrizações físicas, em variadas condições, se fazem fundamentais para o desenvolvimento do modelo e para o alcance de resultados mais condizentes com a realidade.

Notadamente, para valores de intensidade e direção dos ventos, uma performance mais fidedigna está fortemente subordinada à escolha dos esquemas de CLP, CS e LSM e suas relações com as condições sinóticas e de estabilidade atmosférica do sítio de estudo. Entretanto, vale frisar que o conjunto escolhido de esquemas como um todo irão afetar os resultados de vento, haja vista que os processos físicos se comunicam dentro do modelo (SANTOS-ALAMILLOS *et al.*, 2013; CARVALHO *et al.*, 2014a).

Ademais, outro importante aspecto que influencia no desempenho do WRF e que se inter-relaciona com os processos físicos parametrizados é a representação topográfica, principalmente em regiões de topografia mais accidentada, dado que a velocidade e a direção do vento são especialmente impactadas pelas condições do terreno. A representação da topografia, por sua vez, é dependente da resolução espacial utilizada no modelo (SANTOS-ALAMILLOS *et al.*, 2013; PARANHOS *et al.*, 2019).

Devido à importância da escolha das parametrizações físicas para o funcionamento do modelo, existem variadas pesquisas científicas envolvendo testes de sensibilidade de tais parametrizações do WRF em diferentes partes do mundo e sob diferentes condições. Exemplo disso é o de Yang *et al.* (2019) que verificaram o esquema de Microfísica mais acurado para se determinar a distribuição do tamanho da gota de chuva em Chilbolton, no Reino Unido, segundo 12 diferentes cenários baseados na estação do ano e na uniformidade e nas taxas de precipitação. Dentre os esquemas de Morrison, WDM6 e de Thompson *aerosol-aware*, os autores constataram que o último obteve o melhor desempenho e habilidade para reconhecimento da precipitação, possuindo o WRF uma tendência a superestimar os resultados quando as taxas de precipitação eram baixas e a subestimá-los quando essas taxas eram mais elevadas.

Já Budakoti *et al.* (2019) investigaram a sensibilidade do WRF a vários esquemas de *Cumulus* ao simular um evento de precipitações extremas ocorrido em Pithoragarh, no Noroeste do Himalaia, usando a técnica de previsão por conjuntos conhecida como *Ensemble*. Tendo fixadas as demais parametrizações físicas, o estudo notou que, para a

precipitação acumulada em 24h, os agrupamentos que tinham em sua composição o esquema de Kain-Fritsch lograram valores mais próximos aos observados na região, para esse tipo de evento. Além disso, avaliando-se a precipitação média por conjunto, foi verificada a boa acurácia dos esquemas *Multi-scale* Kain-Fritsch e Tiedtke, com destaque para o primeiro.

Kim e Wang (2011), por outro lado, testaram, além da sensibilidade do modelo à absorção de ozônio associado à radiação de onda curta, também qual entre seus esquemas de Dudhia e de Goddard fornecia um melhor desempenho durante uma monção de verão no Leste do continente asiático, em 1993. Foi observado que o esquema de radiação de onda curta de Goddard teve a representação das estruturas térmicas mais adequada ao caso, impactando positivamente também a circulação dos ventos na atmosfera. Os autores constataram que a inclusão da altura máxima de ozônio possui grande significância para as simulações. Ademais, eles concluíram que dependendo da seleção dos esquemas de precipitação, o padrão dela variará e, consequentemente, influenciará a temperatura atmosférica. Assim, nota-se a interação das diferentes parametrizações físicas dentro do WRF.

Sob o ângulo do impacto da parametrização de CLP, Gunwani e Mohan (2017) avaliaram quais dos diferentes esquemas do WRF podem trazer mais acurácia a variáveis como a temperatura, a umidade relativa, a velocidade e a direção do vento e a altura da Camada Limite. Esse estudo foi feito durante o verão e o inverno, em três regiões climáticas da Índia: tropical, árida e temperada. Com isso, eles atestaram que a escolha da parametrização de CLP depende da variável atmosférica que se deseja investigar, assim como da zona climática em questão. De maneira mais geral, nesse trabalho, ACM2 foi a escolha que melhor se enquadrou aos diversos parâmetros considerados.

Dessa forma, esses estudos, como tantos outros, evidenciam a variabilidade de circunstâncias e de parâmetros que podem sofrer modificações a depender da parametrização física e do esquema selecionado, bem como da interação entre todas elas.

### 2.3.2 Condições iniciais e de contorno

As condições iniciais e de contorno (CICC), ou de fronteira, são fatores de grande relevância na qualidade de uma simulação no WRF. O comportamento caótico de um modelo atmosférico gera incertezas e sensibilidade aos dados usados como entrada para as simulações, podendo levar a resultados discrepantes da realidade (YOSHIMURA *et al.*, 2019). Portanto, é essencial que a disposição das configurações de grade, assim como a qualidade dos dados iniciais, seja levada em consideração na execução do modelo.

Existem diferentes tipos de dados fornecidos por modelos globais que servem de entrada para modelos de área limitada. As análises assimilam uma série de observações como condições iniciais para representar o ambiente atmosférico durante um instante de tempo. Já as reanálises são uma derivação das análises, em que se emprega um software fixo do modelo de previsão para assimilar dados ao longo de um certo período, não sendo afetada por alterações na metodologia. Além disso, há as previsões, em que os modelos propagam a representação atmosférica para o futuro e são capazes de acumular parâmetros atmosféricos através do tempo (NCAR, 2014).

Conforme Carvalho *et al.* (2014b), são três as usuais distinções entre as análises e as reanálises. Primeiramente, as reanálises utilizam um volume de dados observados e medidos superior às análises. Ademais, o tempo de fornecimento dos dados difere entre essas abordagens, em que as análises são capazes de disponibilizá-los dentro de um dia ou menos, enquanto as reanálises levam nesse processo de dias a meses. Por fim, os dados produzidos pela reanálise são mais homogêneos, pois é aplicado um mesmo modelo físico, suas parametrizações e demais aspectos, ao passo que as análises ficam vulneráveis a variadas configurações em qualquer período de tempo.

Uma das técnicas utilizadas para aprimorar a qualidade das condições iniciais e de fronteira em modelos de mesoescala é a assimilação de dados. Trata-se de um algoritmo que combina as saídas de um modelo de PNT com dados observacionais por métodos que possibilitam uma melhor estimativa do estado da atmosfera. Dessa maneira, busca-se corrigir a solução do modelo e levá-la para valores mais próximos aos reais (CINTRA; DE CAMPOS VELHO, 2009; CHENG *et al.*, 2017; XU *et al.*, 2020). Sua essência é similar a das análises de modelos de circulação geral, que podem ser usados como CICC em modelos de área limitada.

O WRF traz a possibilidade de assimilar dados através de seu sistema denominado WRF *Data Assimilation* (WRFDA). O WRFDA faz uso combinado de observações, previsões anteriores e erros associados, assim como de leis físicas, para gerar incrementos de análise que são adicionados à primeira estimativa de modo a atualizá-las (SKAMAROCK *et al.*, 2019).

Assim, as previsões que servem como primeira estimativa nesse processo são influenciadas por observações assimiladas em tempos anteriores. Dessa maneira, elas são propagadas por meio das equações dinâmicas atmosféricas para regiões que podem possuir escassez de medições, ampliando a abrangência das informações assimiladas (CAZES BOEZIO; ORTELLI, 2019).

Segundo Cazes Boezio e Ortelli (2019), os resultados da assimilação de dados servem não só na própria previsão do modelo, mas também como “pseudo-observações” das variáveis atmosféricas, podendo ser amplamente utilizados, desde que avaliada sua acurácia em relação a dados observados.

No contexto da assimilação de dados, Xu *et al.* (2020) constataram que a modelagem da velocidade do vento pode ter seus erros sistemáticos e aleatórios reduzidos com a aplicação da assimilação de dados, como também pode aumentar a correlação entre observações e resultados simulados e, assim, melhorar a variabilidade ao longo do tempo reproduzida pelo modelo.

Xu *et al.* (2020) também verificaram que a assimilação de dados reflete em melhores performances de velocidade do vento em alturas mais elevadas, como 50 e 70 m. A influência do terreno nas camadas próximas a superfície dificulta o desempenho a 10 m de altura. Além disso, evidencia-se que o uso de dados provenientes de satélite dá maior aplicabilidade à técnica de assimilação de dados que o uso de dados medidos, visto sua ampla cobertura geográfica, inclusive sobre o oceano.

Destarte, deve-se considerar as particularidades e habilidades das condições iniciais e de contorno empregadas no modelo ao se verificar o desempenho deste. As CICC influenciam não só nas interações do modelo em si, mas também na representação dos processos físicos não resolvidos implicitamente por ele, ou seja, nas parametrizações.

### 3 Materiais e métodos

O presente capítulo trata dos materiais e métodos empregados para a confecção desta dissertação. Assim, aborda-se sobre a definição da área de estudo, sobre a implementação do modelo WRF e todas as configurações pertinentes utilizadas, bem como sobre os dados selecionados para validação dos resultados. Finalmente, apresentam-se os passos executados relativos à aplicação do modelo GFS, as análises estatísticas aplicadas aos dados obtidos por ambos os modelos, como também se trata sobre a construção de um mapa topográfico para auxílio nas análises envolvidas.

#### 3.1 Definição da área de estudo

Dada a importante participação da Região Nordeste na geração de eletricidade através da fonte eólica no Brasil (EPE, 2019), o referido estudo se concentrou sobre a área que engloba seus principais parques eólicos, de modo a auxiliar a previsão dos ventos nesses locais. Além disso, complementarmente, o intuito foi abarcar localidades de possível potencial eólico, para futuro aproveitamento.

Em fevereiro de 2019, conforme a Figura 12, o total de parques eólicos operando comercialmente ou em teste, no país, era de 587, concentrados em 12 Estados brasileiros. Desse grupo, 8 são Estados do Nordeste: Rio Grande do Norte, Bahia, Ceará, Piauí, Pernambuco, Maranhão, Paraíba e Sergipe. Apenas Alagoas não possui produção elétrica via energia eólica. Dos 491 parques operando na Região, cerca de 31% estão no Rio Grande do Norte, 28% na Bahia, 16% no Ceará e 12% no Piauí, o que representa em torno de 87% dos parques no Nordeste e mais de 77% dos 14,79 GW de potência instalada de geração eólica no país.

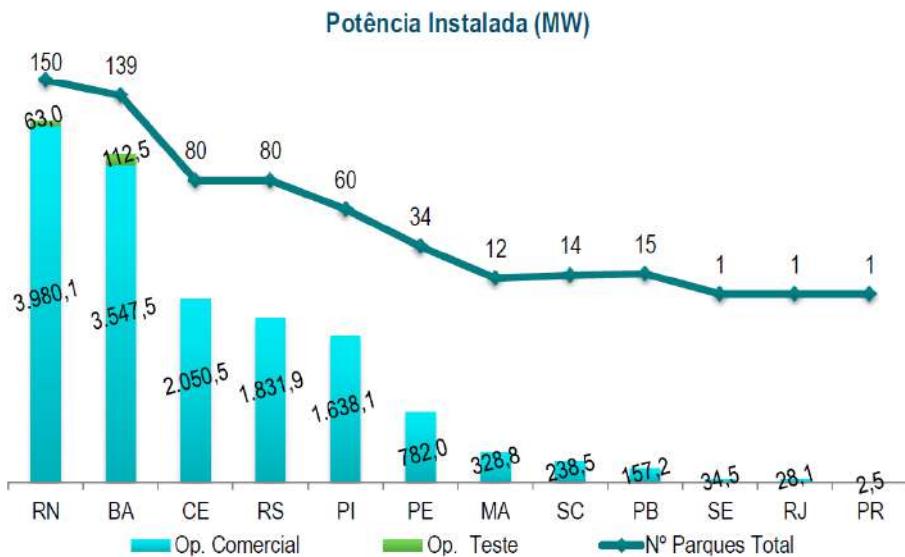


Figura 12: Parques eólicos da Região Nordeste do Brasil

Fonte: ABEEólica, 2020

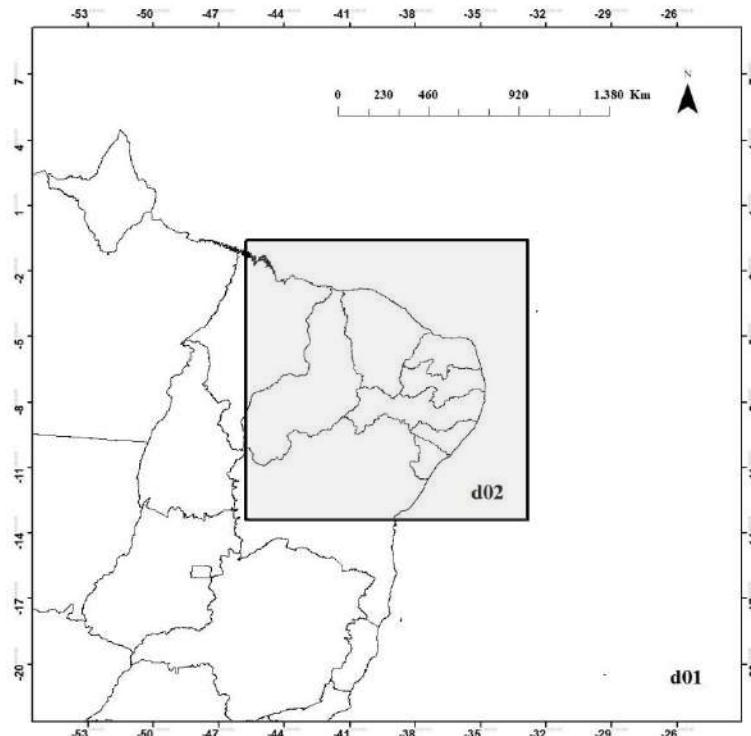
Assim, a área de estudo do presente trabalho procurou contemplar tal Região, incluindo parte do seu território *offshore*. Concomitantemente, a definição dessa área foi delineada de modo a se obter uma resolução espacial adequada no modelo WRF e que fosse viável, do ponto de vista computacional, para a execução das simulações.

### 3.2 Ajuste do modelo WRF

Para que fosse computacionalmente possível a execução desta pesquisa, a mesma foi desenvolvida com o apoio do Núcleo Avançado de Computação de Alto Desempenho (NACAD) da COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), que possibilitou o uso do supercomputador Lobo Carneiro para o processamento em paralelo do WRF. O estudo em questão utilizou a versão 4.0.3 do modelo *Advanced Research WRF* (ARW-WRF), núcleo dinâmico com mais opções físicas e capaz de executar simulações por intermédio de dados reais (SKAMAROCK *et al.*, 2019), e teve suas configurações definidas em diferentes etapas.

Primeiramente, foram selecionadas as características das grades de trabalho. Assim, dois domínios de resoluções espaciais horizontais de 9 km e 3 km, denotadas na Figura 13 como d01 e d02, respectivamente, foram construídos. A grade de 3 km

representa a área de estudo, tendo dimensões de 1.425 km x 1.425 km. A grade de 9 km, de modo a evitar efeitos de borda sobre a grade subsequente, foi dimensionada em 3.600 km x 3.600 km. Ambas as grades foram centradas na latitude de -7,02 e na longitude de -39,29, ponto situado na região sudeste do Estado do Ceará. Além disso, as trocas de informações entre as grades foram todas em “via de mão única” (*one-way*). A projeção cartográfica adotada foi a de Mercator, por proporcionar menores distorções em áreas próximas à Linha do Equador (NCAR, 2019).



*Figura 13: Grades aninhadas com 9 km e 3 km de resolução espacial horizontal*

As condições iniciais e de contorno usadas foram extraídas, a cada 6h, das análises realizadas pelo GFS, modelo global de previsão do tempo da *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), com resolução espacial horizontal de 0,25°. Os dados de topografia e uso do solo foram coletados do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e configurados a uma resolução de 30 segundos de arco para as duas grades<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Os campos SOILCTOP, SOILCBOT e VAR\_SSO foram processados na resolução escolhida, enquanto os demais campos obrigatórios utilizaram a resolução *default* da fonte de dados.

Devido a limitações computacionais e temporais para a execução das simulações, foram adotados dois períodos de análise: março e setembro de 2018. A definição baseou-se na ideia de comparar um mês, em termos climatológicos, de ventos de baixa magnitude no Nordeste, e, em contrapartida, de altos índices pluviométricos na Região, o relativo a março, com um mês de altas velocidades de vento e baixos índices pluviométricos, setembro (SILVEIRA *et al.*, 2012; SANTOS; SILVA, 2013).

Além disso, o horizonte mensal de avaliação, para dois meses de um mesmo ano, aperfeiçoa a representatividade do modelo, englobando uma gama mais ampla de conjunturas atmosféricas que a análise de alguns dias, como também é mais viável para os recursos computacionais disponíveis que a aplicação da avaliação para diversos meses ou anos.

Respeitando-se o tempo de ajuste do modelo (*spin up*), foram descartadas as primeiras 6 horas de cada simulação, procurando um equilíbrio entre a necessidade do WRF em alcançar estabilidade e a demanda de recurso computacional (LUCAS-PICHER *et al.*, 2013). Vale destacar que, o arquivo de condições iniciais e de contorno do dia 28 de fevereiro de 2018, das 18h UTC, se encontrava danificado e, portanto, foi desprezado. Desta maneira, a simulação de março se iniciou às 00h UTC do dia primeiro, finalizando às 00h UTC do dia primeiro de abril. Já a de setembro, cujos arquivos do GFS se encontravam todos utilizáveis, se iniciou às 18h UTC do dia 31 de agosto e teve fim às 00h UTC do dia primeiro de outubro.

Para a realização de tais simulações mensais, foram feitas seis reinicializações para março (cinco de cinco dias de duração e uma para um dia) e cinco para setembro (todas de cinco dias), além da primeira inicialização, sendo descartadas as seis primeiras horas de cada uma delas. O método das reinicializações, quando comparado a uma simulação contínua, é capaz de melhorar o desempenho do modelo, por diminuir os erros nos cálculos das variáveis atmosféricas, incluindo o vento (QIAN; SETH; ZEBIAK, 2003 LO; YANG; PIELKE, 2008).

Para março, portanto, as simulações foram: das 00h UTC do dia 1º até às 06h UTC do dia 6; das 00h UTC do dia 6 até às 06h UTC do dia 11; das 00h UTC do dia 11 até às 06h UTC do dia 16; das 00h UTC do dia 16 até às 06h UTC do dia 21; das 00h UTC do dia 21 até às 06h UTC do dia 26; das 00h UTC do dia 26 até às 06h UTC do dia 31; por fim, das 00h UTC do dia 31 até às 00h UTC do dia 1º de abril.

No caso de setembro, as simulações foram: das 18h UTC do dia 31 de agosto até às 00h do dia 6 de setembro; das 18h UTC do dia 5 até às 00h UTC do dia 11 de setembro; das 18h UTC do dia 10 até às 00h UTC do dia 16; das 18h UTC do dia 15 até às 00h UTC do dia 21; das 18h UTC do dia 20 até às 00h UTC do dia 26; finalmente, das 18h UTC do dia 25 até às 00h UTC do dia 1º de outubro.

Em seguida, a resolução vertical do WRF foi ajustada para 45 níveis verticais, estando 12 desses níveis a menos de 500 m da superfície. O objetivo de tal disposição foi dar ênfase aos fluxos verticais entre as forçantes da superfície terrestre com o fluido atmosférico, avaliando o comportamento do vento na região em que se encontram os rotores dos aerogeradores disponíveis no mercado. Para tal configuração vertical, foi usado o sistema de coordenadas híbridas, capaz de diminuir os efeitos da topografia sobre as coordenadas de superfície e, assim, reduzir os erros numéricos (PARK; KLEMP; KIM, 2019).

Inicialmente, a escolha das parametrizações físicas baseou-se em manter os processos físicos de Microfísica, Radiação de Onda Longa, Radiação de Onda Curta, Modelo de Superfície Terrestre e *Cumulus* fixados e variar os esquemas de Camada de Superfície e Camada Limite Planetária (CLP). Desta forma, objetivou-se aferir qual parametrização física e qual de seus esquemas tem maior interferência para o melhor desempenho do WRF sobre a Região Nordeste.

Sendo assim, para a Microfísica foi utilizado o esquema *WRF Single-moment 6-class* (WSM6); para a Radiação de Onda Longa foi utilizado o *Rapid Radiative Transfer Model for GCMs* (RRTMG); para a Radiação de Onda Curta, novamente, foi utilizado o RRTMG; para o Modelo de Superfície Terrestre foi utilizado o *Unified Noah Land-Surface Model* (Noah); e, para a *Cumulus*, o esquema de Kain-Fritsch. Destaca-se que a parametrização *Cumulus* somente foi ativada para a grade de 9 km (DE MEIJ; VINUESA; MAUPAS, 2018; SKAMAROCK *et al.*, 2019).

A escolha desses esquemas foi fundamentada em uma combinação de fatores. Um deles foi a consideração de outros trabalhos científicos, em diferentes partes do mundo, envolvendo testes de sensibilidade de parametrizações do WRF, bem como os que avaliavam a capacidade de geração eólica com esse modelo.

Como exemplo, Lee e Lundquist (2017) usaram, nos Estados Unidos da América, os esquemas RRTMG, *Unified Noah Land-Surface Model* e Kain-Fritsch, verificando que

a habilidade da parametrização de parques eólicos em prever a produção de energia depende principalmente do desempenho do WRF ao simular a velocidade do vento.

Tymvios *et al.* (2017), no Chipre, empregaram os esquemas WSM6, *Unified Noah Land-Surface Model* e Kain-Fritsch. De 10 configurações distintas envolvendo a variação dos esquemas de CLP, foi constatado que, para diferentes regiões do Chipre, não foi encontrado uma parametrização de Camada Limite que levasse, de maneira geral, aos melhores resultados, variando essa seleção de acordo com cada um dos locais avaliados.

Dentre a literatura, destaca-se ainda como fonte de inspiração para as parametrizações fixadas a pesquisa de Santos *et al.* (2016) que teve como área de estudo o Nordeste brasileiro, mais especificamente com foco em frações dos Estados do Ceará e de Pernambuco, locais incluídos como parte da presente pesquisa. O trabalho considerou os esquemas RRTMG, WSM6, Kain-Fritsch e *Unified Noah Land-Surface Model*, aplicando as simulações do WRF como condições iniciais no modelo numérico de microescala do *Wind Atlas Analysis and Application Program* (WAsP), e constatou que Triunfo – PE e Paracuru – CE são locais favoráveis para o aproveitamento eólico.

Somado a isso, foi avaliado o resultado de uma pesquisa fornecida pela Página dos Usuários do Modelo WRF (NCAR, 2015), onde são explicitadas as frequências de uso de cada uma das opções, para cada uma das parametrizações físicas. Os esquemas escolhidos são todos muito utilizados pelos usuários. O WSM6 teve uma frequência relativa ajustada de 45,65%, sendo o esquema mais usado de Microfísica; Kain-Fritsch ficou com 80,11%, para *Cumulus*; *Unified Noah Land-Surface Model* obteve 90,56% de frequência relativa ajustada para o Modelo de Superfície Terrestre; o RRTMG, para a Radiação de Onda Longa, ficou com 53,82%; por fim, o RRTMG, para a Radiação de Onda Curta, obteve 57,50%.

Dessa forma, foram criados três cenários para avaliar a sensibilidade das parametrizações de Camada Limite Planetária e Camada de Superfície (Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12). Primeiramente, foram alternados os esquemas de Camada Limite Planetária entre o *Yonsei University Scheme* (YSU) e o *Asymmetric Convection Model 2 Scheme* (ACM2).

A comunidade científica vem demonstrando o bom desempenho desses dois esquemas de CLP em diversas regiões do planeta, sendo inspiração para a escolha dos mesmos no presente estudo. É o caso de Carvalho *et al.* (2014a), que compararam 5

esquemas de CLP do WRF sobre a região da Península Ibérica para averiguar quais deles produziam simulações de vento e estimativas de produção eólica mais próximos aos valores observados e constataram que isso ocorreu ao utilizar o ACM2.

Similarmente, Hariprasad *et al.* (2014) avaliaram 7 esquemas de CLP no WRF em Kalpakkam, na Índia, e constataram que, para a velocidade do vento, o esquema ACM2 produziu os resultados mais próximos à realidade. O esquema YSU, que também produziu resultados significativamente acurados para o vento, foi, no geral, juntamente com o esquema Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN), o que melhor simulou os diferentes parâmetros analisados da Camada Limite Planetária.

Já Avolio *et al.* (2017) verificaram que, dentre os 5 esquemas de CLP do WRF avaliados na região de Calábria, Itália, o ACM2 e o YSU foram os que se associaram aos melhores desempenhos estatísticos para o perfil vertical do vento, tanto em relação à velocidade quanto à direção, quando confrontados com os dados observados. Ressalta-se que os trabalhos de Hariprasad *et al.* (2014) e Avolio *et al.* (2017) também serviram de inspiração para a escolha das demais parametrizações físicas fixadas.

Na área da Grande Vitória, no Brasil, Salvador *et al.* (2016) estudaram a Camada Limite Interna Térmica sob influência da brisa marítima e concluíram que a parametrização de CLP YSU, junto a parametrização de Modelo de Superfície Terrestre Noah, no WRF, apresentaram resultados de direção do vento e de altura da referida camada mais condizentes com os números observados. Em vista dessas e de outras pesquisas, YSU e ACM2 foram escolhidos para aplicação sobre o Nordeste brasileiro.

Na configuração 1 (C1), em que foi usado o YSU, a Camada de Superfície empregada foi a *Revised MM5 Monin-Obukhov*, por ser uma exigência para o uso da parametrização de CLP. Ademais, para aperfeiçoar as simulações, foi incluído o esquema *Topographic Correction for Surface Winds to Represent Extra Drag from Sub-grid Topography and Enhanced Flow at Hill Tops (topo\_wind)*, opção 1 (*Jiménez method*). Ele, de modo semelhante, só funciona acoplado ao YSU e tem como objetivo principal representar os efeitos orográficos sobre as circulações de superfície em escala de sub-grade (JIMÉNEZ; DUDHIA, 2012).

Na configuração 2 (C2), o esquema de CLP utilizado foi o ACM2, enquanto o de Camada de Superfície foi mantido o mesmo da configuração 1 (*Revised MM5 Monin-Obukhov*), de modo a focar na investigação do impacto que tais esquemas de Camada

Limite Planetária do WRF têm sobre a área de estudo. Neste caso, foi retirado o *topo\_wind*, por não funcionar com o ACM2.

Feito isso, partiu-se para a alternância entre os processos físicos de Camada de Superfície. O esquema de CLP foi fixado como o ACM2. Esse esquema é capaz de operar com dois esquemas de Camada de Superfície, que foram, portanto, os escolhidos. Além do já adotado, *Revised MM5 Monin-Obukhov*, o outro esquema capaz de trabalhar com o ACM2 é o Pleim-Xiu (cenário 3, C3).

Ao aplicar o Pleim-Xiu para a Camada de Superfície, foi preciso alterar a parametrização física de Modelo de Superfície Terrestre para o *Noah Land Surface Model with Multiparameterization Options* (Noah-MP), versão mais refinada do *Unified Noah* em relação ao tratamento das representações dos processos hidrológicos e biofísicos terrestres (ZHUO et al., 2019). Além disso, a simulação foi limitada ao período de março de 2018. Essas adaptações foram feitas já que não foi possível realizar simulações com o WRF utilizando o esquema *Unified Noah Land-Surface Model*, bem como simular o mês de setembro de 2018 com a combinação do Pleim-Xiu com o Noah-MP. Isso ocorre porque algumas parametrizações são dependentes de outras, já que necessitam de variáveis calculadas por elas. Nem todas as parametrizações têm as mesmas entradas e saídas. A TKE, por exemplo, só é calculada em dois esquemas da CLA.

*Tabela 10: Parametrizações físicas utilizadas na configuração C1*

Processo físico	Esquema	Referências
Microfísica	WSM6	Hong; Lim, 2006
Radiação de Onda Longa	RRTMG	Iacono et al., 2008
Radiação de Onda Curta	RRTMG	Iacono et al., 2008
Camada de Superfície	Revised MM5 Monin-Obukhov + topo_wind	Jiménez; Dudhia, 2012/Jiménez et al., 2012
Modelo de Superfície Terrestre	Unified Noah Land-Surface Model	Tewari et al., 2004
Camada Limite Planetária	YSU	Hong et al., 2006
<i>Cumulus</i>	Kain-Fritsch	Kain, 2004

*Tabela 11: Parametrizações físicas utilizadas na configuração C2*

<b>Processo físico</b>	<b>Esquema</b>	<b>Referências</b>
Microfísica	WSM6	Hong; Lim, 2006
Radiação de Onda Longa	RRTMG	Iacono <i>et al.</i> , 2008
Radiação de Onda Curta	RRTMG	Iacono <i>et al.</i> , 2008
Camada de Superfície	Revised MM5 Monin-Obukhov	Jiménez <i>et al.</i> , 2012
Modelo de Superfície Terrestre	Unified Noah Land-Surface Model	Tewari <i>et al.</i> , 2004
Camada Limite Planetária	ACM2	Pleim, 2007
<i>Cumulus</i>	Kain-Fritsch	Kain, 2004

*Tabela 12: Parametrizações físicas utilizadas na configuração C3*

<b>Processo físico</b>	<b>Esquema</b>	<b>Referências</b>
Microfísica	WSM6	Hong; Lim, 2006
Radiação de Onda Longa	RRTMG	Iacono <i>et al.</i> , 2008
Radiação de Onda Curta	RRTMG	Iacono <i>et al.</i> , 2008
Camada de Superfície	Pleim-Xiu	Pleim, 2006
Modelo de Superfície Terrestre	Noah-MP	Niu <i>et al.</i> , 2011/Yang <i>et al.</i> , 2011
Camada Limite Planetária	ACM2	Pleim, 2007
<i>Cumulus</i>	Kain-Fritsch	Kain, 2004

Após análise das configurações C1, C2 e C3, uma nova disposição de parametrizações foi selecionada (C4). Nesse caso, conforme verificado na Tabela 13, a escolha dos esquemas usados no WRF foi baseada nas parametrizações do modelo GFS: Eta Ferrier, para Microfísica; *Rapid Radiative Transfer Model for GCMs* (RRTMG), para Radiação de Onda Longa e para Radiação de Onda Curta; Mellor–Yamada Nakanishi

Niino (MYNN) *Level 2.5*, para Camada Limite Planetária; MYNN, para Camada de Superfície; *Unified Noah Land-Surface Model*, para Modelo de Superfície Terrestre; e *New Simplified Arakawa–Schubert Scheme (for Basic WRF)*, para *Cumulus* (somente a grade de 9 km) (DTC, 2016; DTC, 2016; NOAA, 2016; CAMPANA; CAPLAN; HALPERIN *et al.*, 2019).

Destaca-se que, para se assemelhar à parametrização de Camada Limite Planetária do GFS, foram ativadas, ao MYNN 2.5, as opções do esquema de fluxo de massa (*bl\_mynn\_edmf = 1*), do esquema de transporte de quantidade de movimento (*bl\_mynn\_edmf\_mom = 1*) e do esquema de transporte de Energia Cinética Turbulenta - TKE (*bl\_mynn\_edmf\_tke = 1*) (DTC, 2016; DTC, 2016; NOAA, 2016; CAMPANA; CAPLAN; HALPERIN *et al.*, 2019). Assim, foi possível avaliar o comportamento do WRF, em relação à velocidade e à direção do vento, para a região da área de estudo, quando esse tem seus processos físicos de subgrade similares aos do GFS.

O período das simulações foi reduzido a quinze dias, para março e setembro de 2018, cada um com uma inicialização e duas reinicializações. Para março, os intervalos foram: das 00h UTC do dia 1º até às 06h UTC do dia 6; das 00h UTC do dia 6 até às 06h UTC do dia 11; das 00h UTC do dia 11 até às 06h UTC do dia 16. Já para setembro: das 18h UTC do dia 31 de agosto até às 00h do dia 6 de setembro; das 18h UTC do dia 5 até às 00h UTC do dia 11 de setembro; das 18h UTC do dia 10 até às 00h UTC do dia 16. Vale ressaltar que, assim como para as configurações anteriores, as seis primeiras horas das simulações foram descartadas.

Tabela 13: Parametrizações físicas utilizadas na configuração C4

Processo físico	Esquema	Referências
Microfísica	Eta Ferrier	Rogers <i>et al.</i> , 2001
Radiação de Onda Longa	RRTMG	Iacono <i>et al.</i> , 2008
Radiação de Onda Curta	RRTMG	Iacono <i>et al.</i> , 2008
Camada de Superfície	MYNN	
Modelo de Superfície Terrestre	Unified Noah Land-Surface Model	Tewari <i>et al.</i> , 2004
Camada Limite Planetária	MYNN 2.5	Nakanishi; Niino, 2006/Nakanishi; Niino, 2009/Olson <i>et al.</i> , 2019
<i>Cumulus</i>	New Simplified Arakawa–Schubert Scheme (for Basic WRF)	Han; Pan, 2011/Kwon; Hong, 2017

Além disso, foi avaliado se deveria ser ativada, na configuração C4, a opção de arrasto por ondas de gravidade (*gravity wave drag option*), que também é utilizada no GFS. Com esse objetivo, anteriormente à execução da simulação C4, o cenário C1 foi novamente simulado, com a referida opção incluída, sendo então denominado C1.2, para o período de quinze dias de março de 2018, em uma inicialização e duas reinicializações, semelhantes às da configuração 4. Novamente, o *spin up* usado foi de seis horas. Dessa maneira, pôde-se fazer uma comparação estatística entre C1 e C1.2, para concluir se ocorreria um melhoramento no desempenho do WRF com a inclusão ou não de tal opção no cenário 4.

### 3.3 Aplicação do modelo GFS

As mesmas avaliações aplicadas ao WRF também foram feitas diretamente com os dados de análise de 0,25° do GFS, os quais haviam servido como condições iniciais e de contorno daquele modelo. Assim, os mesmos períodos das simulações foram usados para as análises do modelo global, ou seja, dos dias 1 a 31 de março de 2018 e dos dias 1

a 30 de setembro de 2018, inicialmente, e dos dias 1 a 16 de março e 1 a 16 de setembro de 2018, posteriormente com a adição da configuração 4.

Permitiu-se, então, avaliar o quanto significativo é o uso do WRF, para previsões de velocidade e direção do vento, comparando seus resultados aos dados de análise do GFS, os quais, por assimilar dados observados (NCAR, 2014), serviram como mais uma forma de validação dos dados do referido modelo de mesoescala.

Além disso, as observações estatísticas dos dados do GFS possibilitaram ponderar se o WRF é mais sensível às parametrizações físicas utilizadas em suas simulações, quando esse modelo logra performances superiores às análises do GFS, ou aos dados aplicados como condição inicial e de contorno, quando as análises do GFS são mais fidedignas que o WRF.

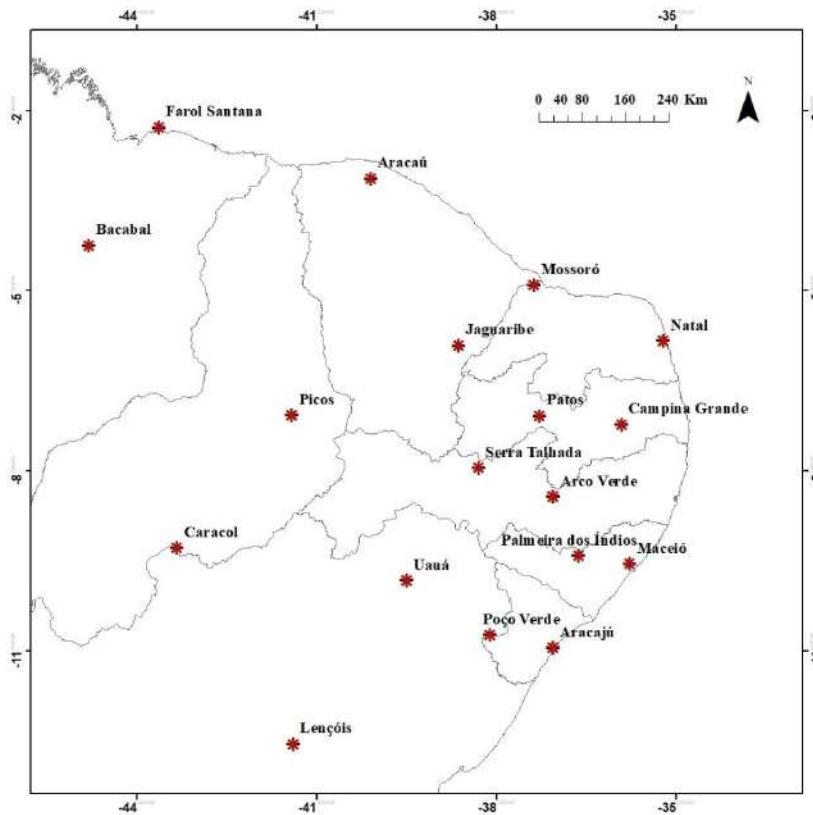
### **3.4 Seleção de dados observados para validação dos resultados**

A título de validação dos resultados gerados pelo modelo WRF, como também para comparar com os dados de análise do GFS, foi feita uma seleção de dados anemométricos provenientes de estações meteorológicas de observação de superfície automáticas, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para tal, foram escolhidas duas estações por Estado do Nordeste, totalizando dezoito estações, que continham medições horárias para as mesmas datas selecionadas para as simulações do WRF e do GFS.

A escolha das estações buscou conciliar a distribuição espacial das mesmas (Figura 14) com a disponibilidade total dos dados para as referidas datas. Todavia, a Estação Aracaú (A360), no Ceará, possui alguns dados ausentes para a direção do vento de setembro, sendo, por isso, usados apenas seus valores de intensidade do vento nesse mês. Vale ressaltar que essas estações fazem suas medições a 10 m da superfície (INMET, 2011), sendo, portanto, utilizadas para comparação com os resultados de vento processados pelos modelos a mesma altura. A Tabela 14 evidencia os principais dados sobre as referidas estações meteorológicas.

*Tabela 14: Estações meteorológicas selecionadas para validação dos resultados e suas principais características*

Estado	Cidade	Código da estação	Detentor	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Alagoas	Maceió	A303	INMET	-9,55	-35,77	84
	Palmeira dos Índios	A327	INMET	-9,42	-36,62	278
Bahia	Lençóis	A425	INMET	-12,56	-41,39	438
	Uauá	A435	INMET	-9,83	-39,50	451
Ceará	Aracaú	A360	INMET	-3,12	-40,09	67
	Jaguaribe	A358	INMET	-5,91	-38,63	149
Maranhão	Bacabal	A220	INMET	-4,24	-44,79	22
	Farol Santana	A217	INMET	-2,27	-43,62	10
Paraíba	Campina Grande	A313	INMET	-7,23	-35,90	546
	Patos	A321	INMET	-7,08	-37,27	264
Pernambuco	Arco verde	A309	INMET	-8,43	-37,06	684
	Serra Talhada	A350	INMET	-7,95	-38,30	499
Piauí	Caracol	A337	INMET	-9,29	-43,32	515
	Picos	A343	INMET	-7,07	-41,40	233
Rio Grande do Norte	Mossoró	A318	INMET	-4,90	-37,37	29
	Natal	A304	INMET	-5,84	-35,21	47
Sergipe	Aracajú	A409	INMET	-10,95	-37,05	4
	Poço Verde	A419	INMET	-10,74	-38,11	367



*Figura 14: Estações meteorológicas selecionadas*

Além dos dados a 10 m de altura fornecidos pelo INMET, a Brennand Energia S.A., de modo a contribuir com o referido estudo e com o desenvolvimento científico brasileiro, forneceu dados de velocidade de vento medidos na altura dos sensores acoplados a uma de suas torres de medição anemométrica (TMA), situada a latitude de -9,83 e a longitude de -41,07, na cota de 683 m, auxiliando na averiguação da resposta do WRF e do GFS ao perfil vertical do vento, em relação aos dados observados.

Dessa forma, foram usados os dados de velocidade do vento concedidos a 52 e 98 m de altura e os relativos à direção do vento a 50 e 94 m de altura. Diferentemente do caso a 10 m de altura, que é fornecido diretamente pelo WRF e pelo GFS, utilizou-se do método de interpolação linear para se encontrar os valores de velocidade e direção do vento nas alturas dos sensores (JIMÉNEZ *et al.*, 2016).

Para ambos os casos de validação dos resultados, ou seja, tanto em relação às estações meteorológicas do INMET quanto em relação aos sensores da Brennand Energia, os dados extraídos do WRF e do GFS com o objetivo de comparação foram aqueles

concernentes aos pontos mais próximos das referidas medições (DRAXL *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2016).

### 3.5 Estatísticas aplicadas

A avaliação dos dados gerados pelo WRF, tanto para a grade de 3 km como para a grade de 9 km, e dos dados de análise do GFS, em relação aos valores observados, foi possível devido a diferentes análises estatísticas aplicadas. Para a variável intensidade do vento, foram calculados o Erro Médio (*ME* ou *Bias*, em inglês), assim como a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (*RMSE*, em inglês), conforme as equações (10) e (11), respectivamente. Ademais, o Coeficiente de Correlação (*r*) entre os dados observados e os dados simulados, foi estimado conforme a equação (12) (MATTAR; BORVARÁN, 2016; AVOLIO *et al.*, 2017; RATJIRANUKOOL; RATJIRANUKOOL, 2017).

O Erro Médio foi usado com a finalidade de mensurar a tendência do modelo em superestimar ou subestimar seus resultados quando comparados aos dados observados. Já a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio, reflete a magnitude média do erro independentemente do sinal, dando mais peso aos erros de maior amplitude e, assim, indicando a conformação dos resultados de uma forma mais criteriosa. Finalmente, o Coeficiente de Correlação mede a força da relação linear entre os dados medidos e os dados observados dentro do intervalo [-1, 1] (CHAI, 2014; HALLAK; FILHO, 2011).

Dessa forma, o Erro Médio, a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio e o Coeficiente de Correlação foram calculados para a velocidade do vento a 10 m de altura e comparados aos dados das estações meteorológicas do INMET, enquanto que a 52 e 98 m de altura esses dados foram comparados aos dados dos sensores da TMA da Brennand Energia.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P - O) \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P - O)^2} \quad (11)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P - \bar{P})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P - \bar{P})^2 (O - \bar{O})^2}} \quad (12)$$

Por fim, o Erro Percentual Absoluto Médio (*MAPE* ou *MAPD*, em inglês), representado por (13), também foi adicionado às análises da velocidade do vento, de modo a melhor avaliar se a magnitude do *Bias* e do *RMSE* não estariam sendo influenciadas pela magnitude do próprio valor observado do vento (GOODWIN; LAWTON, 1999).

Destaca-se que alguns dados medidos em determinadas estações apresentavam velocidade igual a 0 m/s e, para que fosse possível calcular o *MAPE*, foi necessário ajustá-los para 0,50 m/s. A relação da quantidade de dados ajustados e o respectivo local, para cada um dos períodos de estudo, se encontra na Tabela 15. Os dados da TMA fornecidos pela Brennand Energia não possuíam velocidades nulas e, portanto, não precisaram de nenhuma modificação para o cálculo do *MAPE*.

$$MAPE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P - O}{O} \right| \right) \times 100 \quad (13)$$

*Tabela 15: Relação da quantidade de dados de velocidade do vento a 10 m de altura ajustados para cálculo do Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), de acordo com a estação e o período de estudo*

<b>Estação</b>	<b>Quantidade de dados ajustados - Primeira quinzena de março de 2018</b>	<b>Quantidade de dados ajustados - Primeira quinzena de setembro de 2018</b>
Maceió - AL	0	0
Palmeira dos Índios - AL	3	4
Lençóis - BA	11	17
Uauá - BA	3	0
Aracaju - CE	0	1
Jaguaribe - CE	0	0
Bacabal - MA	19	10
Farol Santana - MA	0	0
Campina Grande - PB	0	0
Patos - PB	3	1
Arco Verde - PE	1	0
Serra Talhada - PE	0	0
Picos - PI	0	0
Caracol - PI	7	5
Mossoró - RN	0	0
Natal - RN	0	0
Aracajú - SE	0	0
Poço Verde - SE	15	16
<b>Total de dados utilizados em cada período</b>	<b>61</b>	

No caso da direção do vento, uma diferente metodologia de apreciação do erro foi empregada. Procurou-se averiguar se a direção fornecida pelas simulações do WRF e pelas análises do GFS se encontravam dentro do mesmo octante que a realmente observada. Caso contrário, se não se encontravam em um de seus octantes vizinhos.

A partir disso, foi avaliado o número de dados que não se enquadravam em nenhuma dessas situações em relação ao número total de dados, constatando-se o respectivo erro percentual. Os octantes referem-se aos possíveis intervalos de direção assumidos pelo vento, sendo: Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste, conforme Tabela 16.

Os erros percentuais de octante de direção incorreto e de mais de um octante de direção incorreto foram avaliados a 10 m de altura, e comparados em relação aos valores medidos das estações meteorológicas do INMET, assim como foram calculados a 50 e a 94 m, e comparados aos dados dos sensores da torre de medição da Brennand Energia.

O referido procedimento foi adotado fundamentando-se no fato de que, para a geração de energia eólica, o fator primordial é que a previsão acerte o intervalo relativo a direção de origem do vento, pois os aerogeradores de eixo horizontal modernos, os mais utilizados pela indústria eólica brasileira, possuem mecanismos de orientação capazes de alinhar seus rotores e suas pás de acordo com a referida direção (AMARAL, 2011). Ou seja, não se faz necessário um valor discreto para essa previsão.

*Tabela 16: Octantes de direção do vento e respectivos intervalos*

<b>Octante de direção</b>	<b>Intervalo</b>
Norte	]0,0° - 22,5°]
Nordeste	]22,5° - 67,5°]
Leste	]67,5° - 112,5°]
Sudeste	]112,5° - 157,5°]
Sul	]157,5° - 202,5°]
Sudoeste	]202,5° - 247,5°]
Oeste	]247,5° - 292,5°]
Noroeste	]292,5° - 337,5°]

### **3.6 Construção do mapa da diferença altimétrica**

Paralelamente às simulações executadas pelo modelo, foi construído no *software* ArcGIS 10.3 um mapa topográfico relativo à área de estudo, representada pela grade de maior resolução no WRF, ilustrando a diferença espacial entre as cotas do Modelo Digital de Elevação (MDE) e as cotas usadas pelo WRF.

Para tal, foram obtidos, através do Projeto Brasil em Relevo, da Embrapa (MIRANDA, 2005), os Modelos Digitais de Elevação do Nordeste brasileiro. A resolução espacial é de, aproximadamente, 90 m, sendo a origem desses dados a missão de mapeamento do relevo terrestre *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). O objetivo desse procedimento foi a melhor avaliação posterior da qualidade da representação da topografia utilizada pelo WRF.

## 4 Resultados e discussão

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir dos materiais e métodos aplicados, abordando também a discussão pertinente a eles. Sendo assim, são expostas as análises estatísticas da velocidade e da direção do vento, avaliadas as suas distribuições espaciais, bem como examinada a representação da topografia pelo WRF e os sistemas atmosféricos atuantes na região que influenciam nas simulações.

### 4.1 Análises estatísticas

As análises estatísticas sobre o Erro Médio, a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio e o Coeficiente de Correlação, da velocidade do vento, assim como aquelas referentes aos erros percentuais na indicação do octante da direção do vento e na indicação dos octantes vizinhos ao correto, são exibidas na presente seção.

Os resultados referentes às simulações completas para os meses de março e de setembro de 2018 possibilitaram a verificação de que as análises do GFS forneciam, muitas vezes, padrões de desempenho superiores às configurações 1, 2 e 3 do WRF, no período de avaliação. Assim, a partir dessas observações, foi criado o último arranjo de parametrizações físicas, baseado no GFS, C4, buscando alcançar uma performance mais alinhada aos dados observados. Esses procedimentos encontram-se explicitados na seção 3.2, entre as páginas 42 e 49.

Nesse sentido, a abordagem do presente estudo foca na discussão das simulações de horizonte temporal de quinze dias para março e setembro de 2018, que incluem todas as quatro configurações do WRF e os dados de análise do GFS. Os dados mensais de março e de setembro se encontram no Apêndice A e no Apêndice B desta dissertação, respectivamente.

Ademais, as estatísticas da simulação-teste realizada para os primeiros quinze dias de março de 2018, referentes à ativação da opção de arrasto por ondas de gravidade, são apresentadas no Apêndice C. Através das referidas análises, foi optado pela não ativação de tal opção. Apesar dela apresentar melhores resultados de velocidade e direção do vento

em determinados pontos, sua não ativação oferece desempenho melhor em outros. Além disso, a diferença entre os valores com e sem a opção não é muito exacerbada.

Vale ressaltar que, com a elevação da altura para níveis em que aerogeradores captam o vento, C1 demonstrou uma performance mais alinhada aos valores observados que C1.2, tendo por base o Coeficiente de Correlação. Por fim, o recurso computacional demandado pela ativação da opção foi consideravelmente maior que aquele sem a sua ativação. Como C1.2 não obteve um desempenho tão notório em relação a C1, a maior viabilidade computacional da configuração 1 se mostrou mais adequada para as simulações seguintes, com as configurações similares as do GFS. Ou seja, C4 permaneceu, assim como C1, C2 e C3, sem tal opção ativada.

Finalmente, cabe destacar que todas as estatísticas apresentadas foram realizadas com os resultados horários fornecidos pelo modelo de 6 em 6h, de maneira que fosse praticável compará-los com os dados de análise do GFS, que são disponibilizados nesse intervalo de tempo.

#### **4.1.1 Análise do Erro Médio**

A presente seção trata das análises do Erro Médio, obtidas de 6 em 6 h, da velocidade do vento resultantes da aplicação das configurações do WRF, assim como das análises do GFS. Nesse caso, a primeira quinzena de março e de setembro de 2018 são os períodos simulados. Sendo assim, os resultados de março compreendem C1, C2, C3 e C4, além do que é fornecido pelo GFS, ao passo que os de setembro incluem C1, C2, C4 e os valores do GFS.

A Figura 15 permite avaliar o *Bias* de março, para a velocidade a 10 m de altura, em cada um dos locais das estações meteorológicas do INMET. Os valores são representativos tanto dos resultados do WRF da grade de 9 km (d01) quanto daqueles da grade de 3 km (d02). É possível observar que, nesse período, as simulações do WRF superestimam a velocidade do vento em todos os pontos e nos dois domínios, dado que todos os *Bias* são positivos. Os dados de análise do GFS também apresentam a mesma tendência, exceto em uma única localidade, Picos - PI, em que ocorre a subestimação da velocidade. No entanto, essa diferença negativa é bem próxima a zero.

Além disso, nota-se que, na maioria das estações, os Erros Médios do domínio de 9 km de resolução são inferiores aos de 3 km. Mais especificamente, em 10 de 18 locais. As exceções ocorrem em Lençóis – BA (em todas as configurações), Uauá – BA (em C2 e C3), Aracaú – CE (apenas em C3), Campina Grande – PB (apenas em C2), Arco Verde – PE (em C1, C2 e C4), Caracol – PI (em todas as configurações), Natal – RN (em C1, C2 e C4) e Aracajú – SE (em C1, C2 e C4). Com isso, é possível notar que a simulação C3 tende, no intervalo de tempo analisado, a possuir comportamentos para a velocidade do vento divergentes das demais configurações do WRF e se destaca com erros muito superiores em Maceió, Campina Grande, Natal e Aracajú.

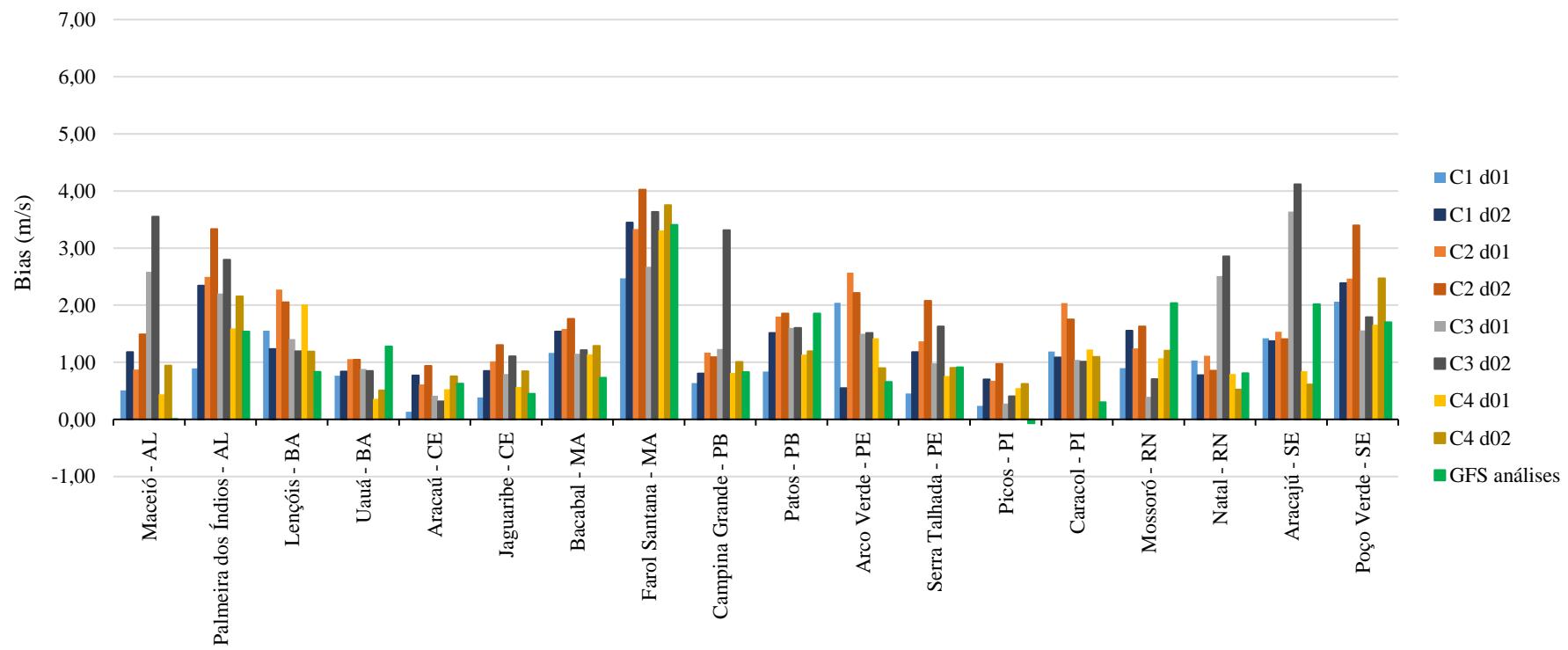
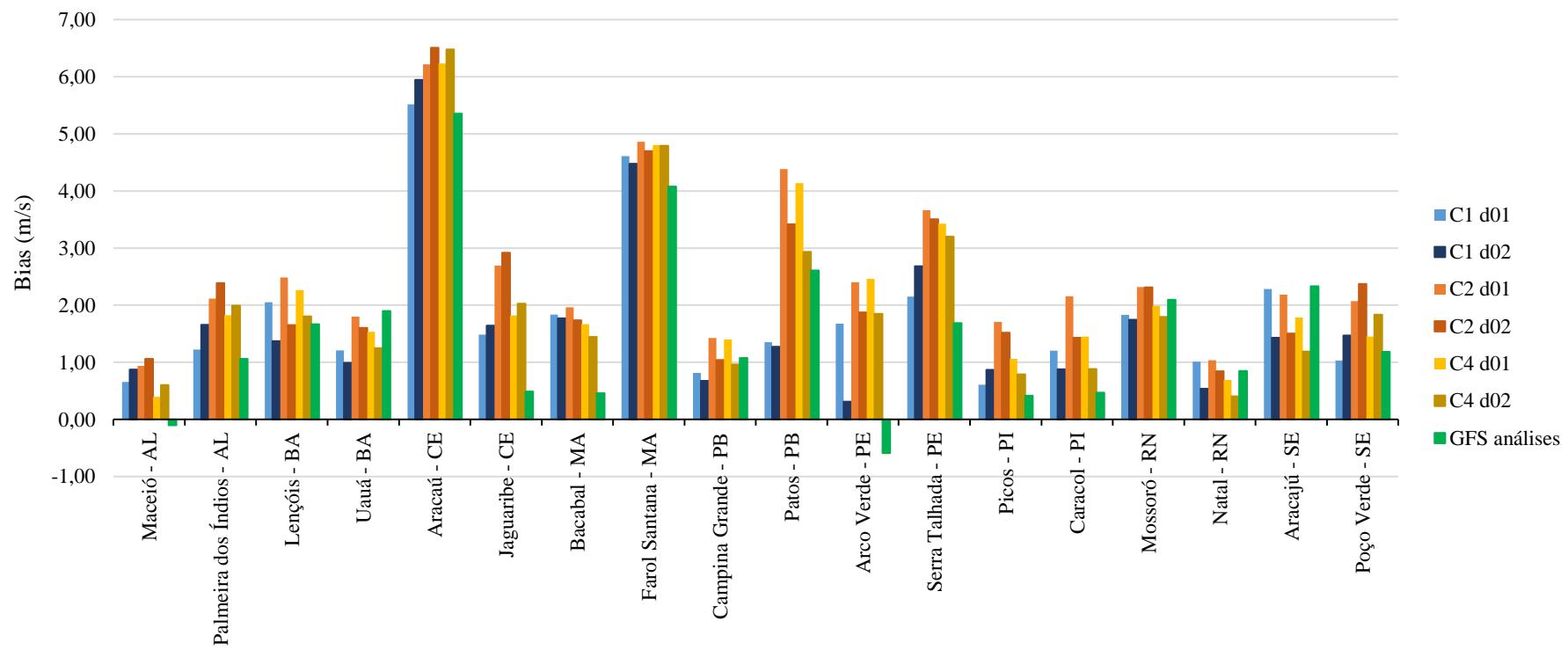


Figura 15: Erros Médios (Bias) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

Através da Figura 16, é possível avaliar o Erro Médio da velocidade do vento a 10 m de altura, na primeira quinzena de setembro do ano de estudo. Nesse intervalo de tempo, as reproduções do WRF novamente superestimam a velocidade do vento em relação aos dados observados com todas as configurações empregadas e em todos os lugares, visto que obteve somente *Bias* positivos. Nesse caso, as análises do GFS subestimam a velocidade em Maceió e em Arco Verde.

Em setembro, diferentemente do que foi observado em março, na maior parte das estações, 13 de 18, ocorre a diminuição do *Bias* da grade de 9 km para a grade de 3 km em pelo menos uma das configurações do WRF. Desses locais, 7 também apresentaram o mesmo padrão em março. Somente Aracau não foi contabilizado também em setembro, dado que, em março, diminuiu seu Erro Médio da grade mãe para a grade filha apenas em C3 e, no caso de setembro, essa configuração não foi aplicada.



*Figura 16: Erros Médios (Bias) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018*

O *Bias* da velocidade do vento nas alturas dos sensores da torre de medição da Brennand Energia, 52 e 98 m, são apresentados na Figura 17, para março, e na Figura 18, para setembro. Verifica-se que, na primeira quinzena de março de 2018, todos os resultados do WRF, assim como das análises do GFS, superestimam a velocidade do vento. Ademais, ocorre nesse ponto, a tendência de Erros Médios superiores na grade de 9 km, em relação a grade de 3 km. Como avaliado a 10 m, C3, tanto a 52 m como a 98 m, contraria o padrão das demais opções do WRF e aumenta o *Bias* de d01 para d02. Nota-se, também, que os Erros Médios em ambas as grades aumentam, nesse local, com a elevação da altura.

Com relação aos primeiros quinze dias de setembro de 2018, mais uma vez os valores de velocidade do vento, a 52 e a 98 m de altura, são superestimados pelas simulações do WRF e pelas análises do GFS em relação aos valores medidos. Nesse horizonte temporal de análise, para o local avaliado, ocorre um comportamento oposto ao verificado em março com relação a variação do *Bias* entre os diferentes domínios. Em outras palavras, o Erro Médio é superior na grade de 3 km de resolução. Além disso, como ocorreu em março, com a elevação da altura, houve o aumento do *Bias* em ambos os domínios e em todas as configurações do WRF, assim como nas análises do GFS. Excepcionalmente, C2, na grade filha, diminuiu o Erro Médio a 98 m, quando comparado a 52 m.

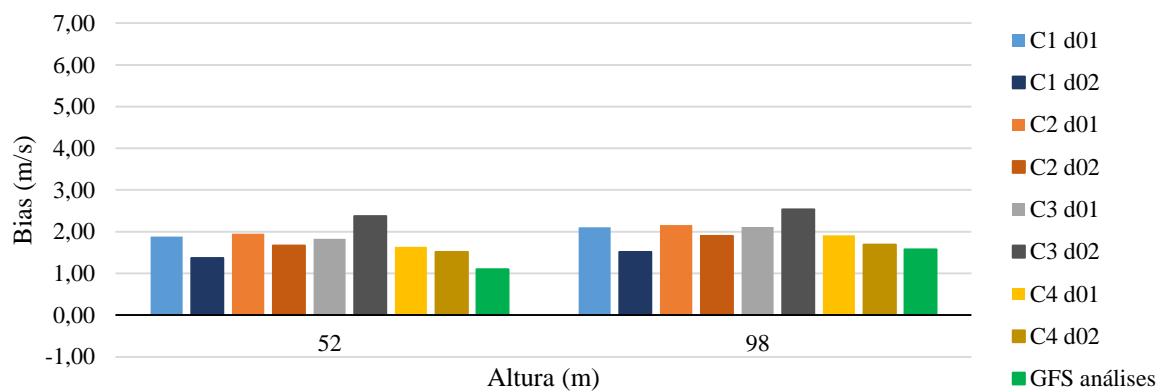


Figura 17: Erros Médios (Bias) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

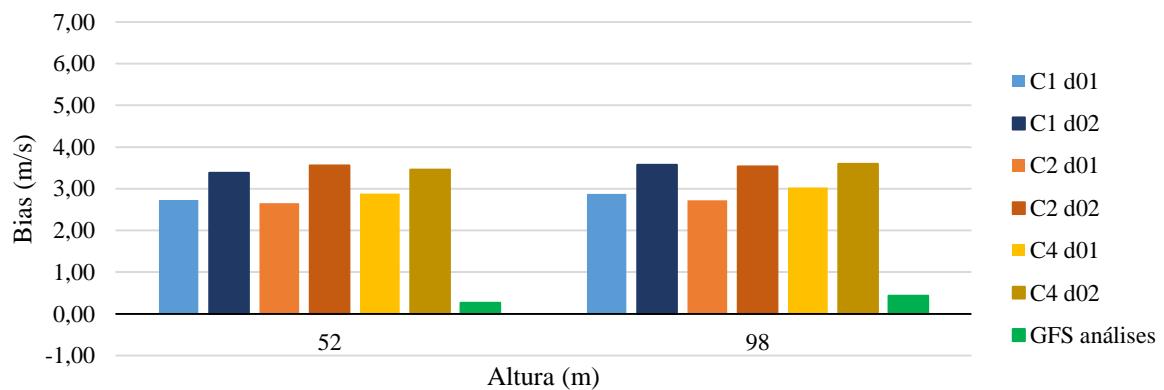


Figura 18: Erros Médios (Bias) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018

#### 4.1.2 Análise da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio

Os resultados da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio, para a velocidade do vento a 10 m de altura, nas resoluções de 9 km e de 3 km do WRF e das análises do GFS, podem ser observados na Figura 19, para março, e na Figura 20, para setembro.

Através da Figura 19, nota-se que as análises do GFS possuem menor *RMSE* em relação às quatro configurações do WRF em 12 de 18 estações: Maceió, Lençóis, Aracaú, Jaguaribe, Bacabal, Campina Grande, Arco Verde, Serra Talhada, Picos, Caracol, Natal e Poço Verde. Desses locais, 4 deles têm C1 como a opção do WRF mais próxima dos dados do GFS: Maceió, Lençóis, Campina Grande e Arco Verde. Apenas em Maceió a grade de 9 km foi a que obteve melhor resultado com C1. C3 é a opção mais próxima do GFS em 3 locais: Picos, Caracol e Poço Verde. Desse grupo de C3, somente Caracol conseguiu o melhor desempenho com a grade de 9 km. Por fim, C4 alcança essa maior aproximação às análises do GFS em 5 estações: Aracaú, Jaguaribe, Bacabal, Serra Talhada e Natal. Salvo Natal, as demais estações têm *RMSE* inferior com a grade de 9 km.

Nas coordenadas em que os resultados do GFS não foram os mais baixos, esse posto foi logrado por C1 em 3 pontos, todos eles com o domínio de 9 km: Palmeira dos Índios, Farol Santana e Patos. A simulação que usa C4 obteve menor *RMSE* em 2 localidades: Uauá, com a grade de 9 km, e Aracajú, com a grade de 3 km. C3 têm menor erro em Mossoró, com a grade de 9 km. Dessa forma, observa-se que C2 não consegue o melhor desempenho do WRF em nenhum dos locais de observação. Além disso, C3 tem discrepância de valores, em relação a C1, C2 e C4, de mais de 1,00 *m/s* em Maceió, Campina Grande, Natal e Aracajú.

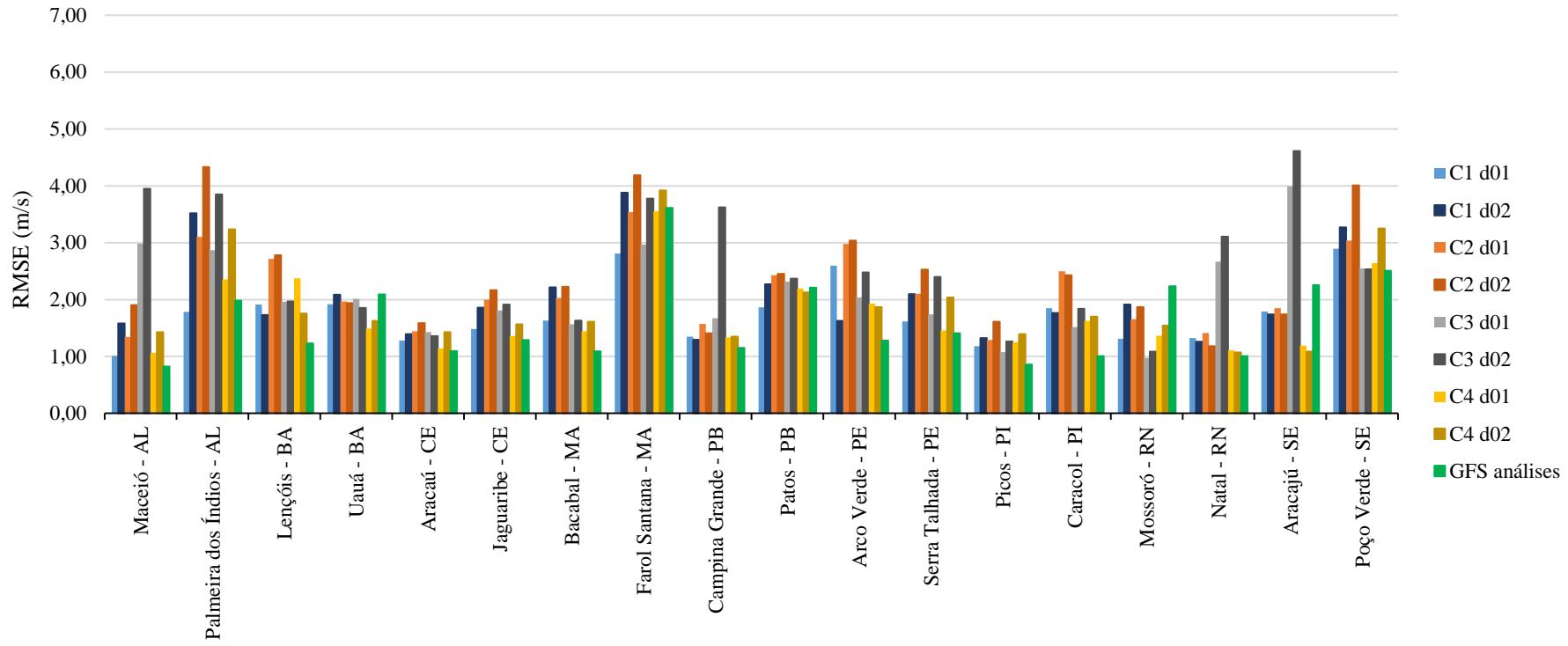


Figura 19: Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

No caso de setembro de 2018, conforme verificado na Figura 20 em 11 das 18 estações as análises do GFS obtêm a menor Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio. Desse grupo, C1 tem os resultados mais próximos aos do GFS em 10 pontos: Palmeira dos Índios, Lençóis, Aracajú, Jaguaribe, Farol Santana, Patos, Arco Verde, Serra Talhada, Picos e Poço Verde. Desses, metade são obtidos com d01 (Palmeira dos Índios, Aracaú, Serra Talhada, Picos e Poço Verde) e os demais 5, com d02. Bacabal é o único local em que C4 tem os desempenhos mais próximos aos das análises GFS, com a grade de 3 km.

Assim sendo, 7 estações conseguem a menor *RMSE* de todas com alguma configuração do WRF. C1 fica com o menor erro em 4 pontos, sendo que 3 são com a os resultados de d02 (Uauá, Campina Grande e Caracol) e só Mossoró consegue tal feito com d01. As demais 3 menores *RMSE* ocorrem com C4, dos quais apenas Maceió é com d01 e Natal e Aracajú são com d02. Dessa forma, nota-se que C2, como em março, não obtém melhor desempenho do WRF em nenhum dos pontos de análise.

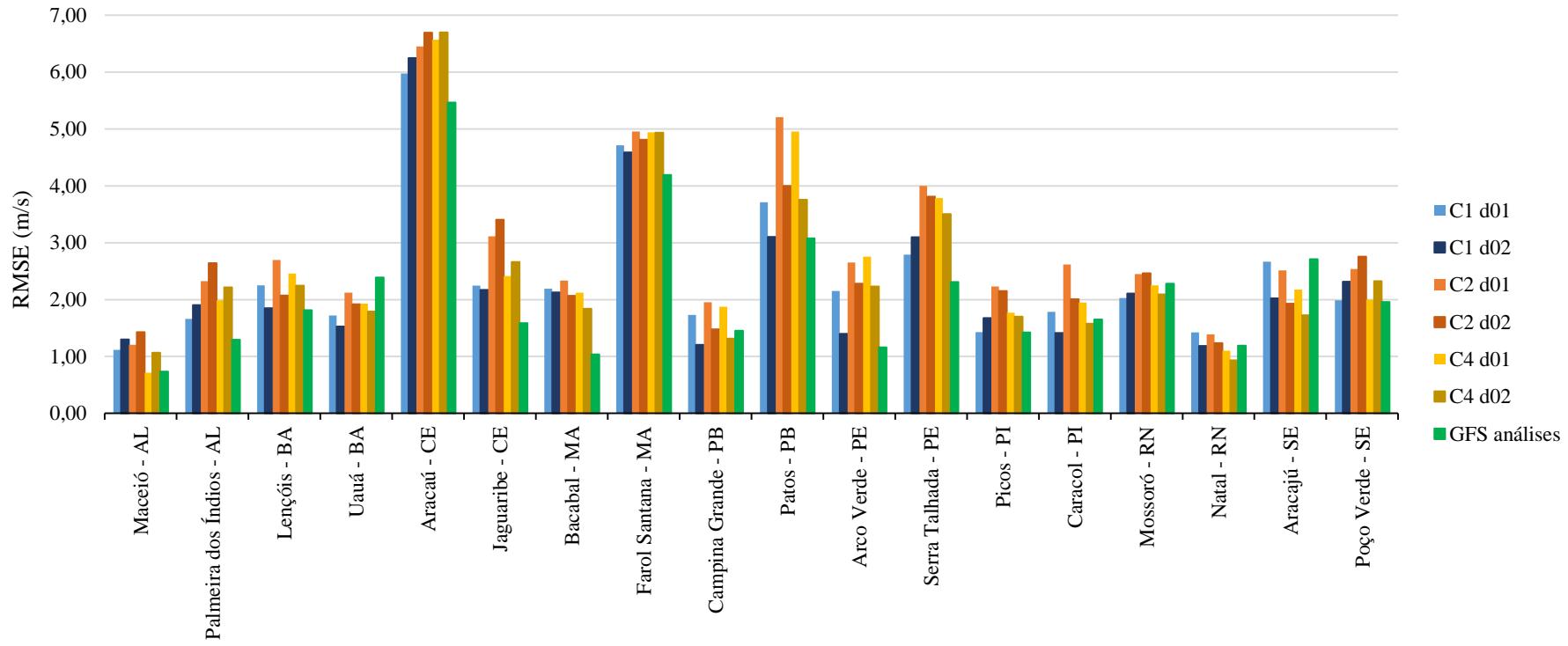


Figura 20: Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018

Os resultados da *RMSE* a 52 e a 98 m de altura, na localização da torre de medição avaliada, para março de 2018, podem ser averiguados na Figura 21. Observa-se que as análises do GFS têm o menor valor do referido erro tanto a 52 quanto a 98 m. No primeiro nível, C1, com a resolução de 3 km, é a opção do WRF mais próxima das análises do modelo global. Em contrapartida, a 98 m, é C4, também com a grade filha, que logra a maior aproximação com o GFS. Das configurações do WRF, C3 é a única que aumenta a *RMSE* quando aumenta a resolução. Cabe destacar que a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio eleva-se, em todos os casos, com o aumento da altura.

Através da Figura 22, é possível avaliar que, em setembro de 2018, a *RMSE* da velocidade do vento a 52 e a 98 m de altura, é a menor do grupo com os dados de análise do GFS. Diferentemente de março, as representações do WRF tem melhor desempenho, tanto a 52 como a 98 m, com C2 na resolução de 9 km. Com exceção de C4 d02, que permanece com o mesmo valor de *RMSE*, C1, C2 e as análises do GFS aumentam, no período, com a ascensão da altura.

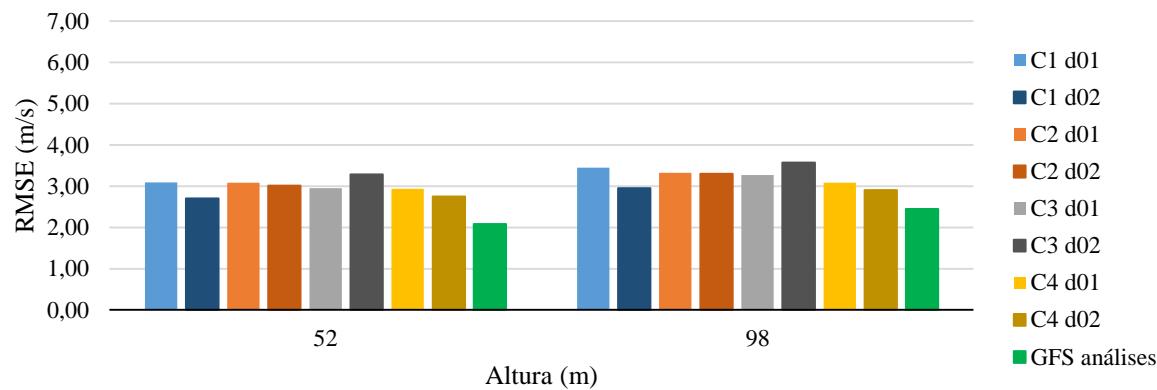


Figura 21: Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

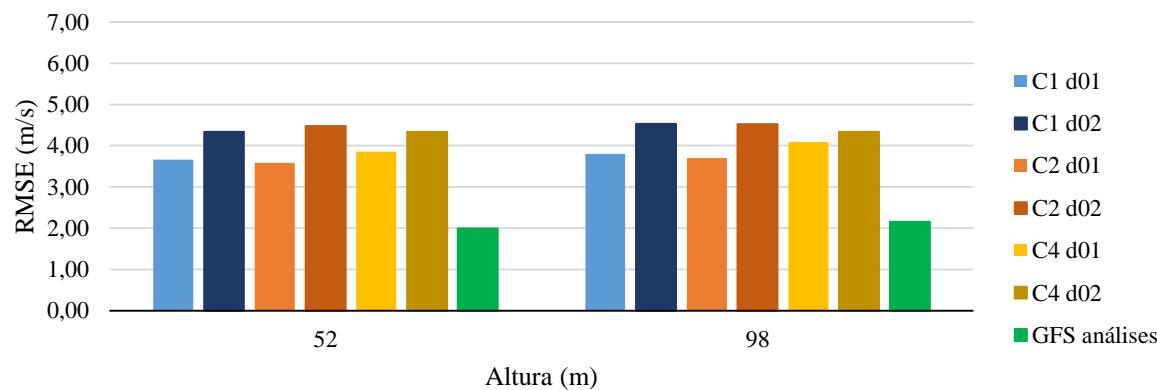


Figura 22: Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018

Comparando-se os dados estatísticos da grade de 9 e de 3 km, em cada um dos pontos de análise, constata-se que, entre às 06h UTC do dia 1º de março e às 06h UTC do dia 16 de março de 2018, o domínio de menor resolução do WRF tende a ter *Bias* e *RMSE* da velocidade do vento a 10 m inferiores aos do domínio de maior resolução. Isso é percebido em cerca de 69% dos casos de C1, C2, C3 e C4, para o *Bias*, e em cerca de 74% dos casos para a *RMSE*. Todavia, a 52 m, bem como a 98 m, no ponto de análise, a grade de 3 km tem *Bias* menor que a de 9 km 75% das vezes. O mesmo padrão se observa com relação à *RMSE*, que é 75% dos casos inferior em d02, para ambas as alturas.

No período das 00h UTC do dia 1º de setembro de 2018 às 00h UTC do dia 16 de setembro de 2018, os resultados do *Bias* e da *RMSE* a 10 m, para a grade de 9 km e para a de 3 km do WRF, opostamente ao que se observa em março, são menores na grade filha. No caso do *Bias*, a resolução de 3 km é melhor em 69% das observações de C1, C2 e C4. A *RMSE* na resolução de 3 km é inferior em cerca de 67% das ocorrências de C1, C2 e C4. Por outro lado, na localidade da torre de medição, a 52 e a 98 m, d02 tem, em 100% dos casos, *Bias* e *RMSE* mais elevados que d01.

#### **4.1.3 Análise do Coeficiente de Correlação**

Os Coeficientes de Correlação da velocidade do vento a 10 m de altura, da primeira quinzena de março de 2018, encontram-se graficamente representados na Figura 23. Averíguase que a simulação referente a C2 apresenta correlação linear negativa com os dados observados em três locais. Em dois deles, Palmeira dos Índios e Arco Verde, essa relação inversa acontece com o emprego dos resultados da grade de 3 km. Aracajú tem um coeficiente negativo com a grade de 9 km, utilizando C2. A simulação que usa C3, por sua vez, tem correlações negativas em Arco Verde, com seu domínio 2, e em Aracajú, com seu domínio 1. Em Farol Santana, a configuração 4, com d01, também apresenta variáveis negativamente correlacionadas. As análises do GFS foram todas positivamente correlacionadas às medições.

Dos 18 sítios utilizados no estudo, o  $r$  das análises do GFS é o mais fortemente correlacionado às observações em 10 deles: Maceió, Aracaú, Bacabal, Farol Santana, Campina Grande, Patos, Arco Verde, Serra Talhada, Caracol, Natal. Nessas estações, C1 conseguiu o segundo melhor desempenho em Maceió e Campina Grande, ambos com

d01. C2 teve esse posto em Farol Santana, com a grade de 9 km, em Patos, com a grade de 3 km, e em Serra Talhada, também com a grade de 3 km. C4 teve o segundo maior coeficiente no maior número de lugares: Aracaú, com d01, Bacabal, com d02, Arco Verde, com d01, Caracol, com d01 e Natal, com d01. Dessa forma, em 7 desses 10 pontos a resolução de 9 km conseguiu maior correlação.

Por outro lado, as simulações do WRF tiveram Coeficiente mais próximo de 1,00 em 8 outros locais. Em Palmeira dos Índios e Lençóis, C1 conseguiu a melhor performance com sua grade mãe. Poço Verde teve maior  $r$  com C2, também em sua grade de 9 km. Já Uauá, Jaguaribe, Picos, Mossoró e Aracaju conseguiram esse feito com C4. Desses cinco, apenas Uauá teve Coeficiente de Correlação igual em d01 e d02. Em Picos, foi a grade filha a de maior correlação positiva e, em todas as outras estações, a grade mãe. Ou seja, dessas 8 localidades, 7 tiveram a resolução de 9 km como a mais satisfatória. Destaca-se que a configuração 3 do WRF não obteve maior  $r$  dentre as opções do modelo em nenhum dos locais em que as análises do GFS foram melhores, assim como em nenhum dos locais em que as próprias reproduções do WRF tiveram performances mais acuradas.

É notável que alguns pontos alcançam um Coeficiente de Correlação inferior a 0,50 com qualquer das opções avaliadas, o que evidencia uma dispersão considerável em relação aos dados observados. Foram esses: Palmeira dos Índios, Lençóis, Uauá, Arco Verde e Picos. Em Farol Santana e em Patos um  $r$  maior ou igual a 0,50 só foi alcançado pelas análises do GFS. Lençóis e Uauá ficam as duas no interior do Estado da Bahia. Palmeira dos Índios, Arco Verde, Patos e Picos também se localizam mais para o interior de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Piauí, respectivamente. Apenas a estação do Maranhão, Farol Santana, está localizada em seu litoral. Correlações superiores ou iguais a 0,80, em outras palavras, mais fortes, ocorrem em Maceió, Aracaú (apenas com as análises do GFS) e Mossoró. As três ficam relativamente mais próximas ao litoral de Alagoas, Ceará e Rio Grande do Norte que aquelas com resultados fracos.

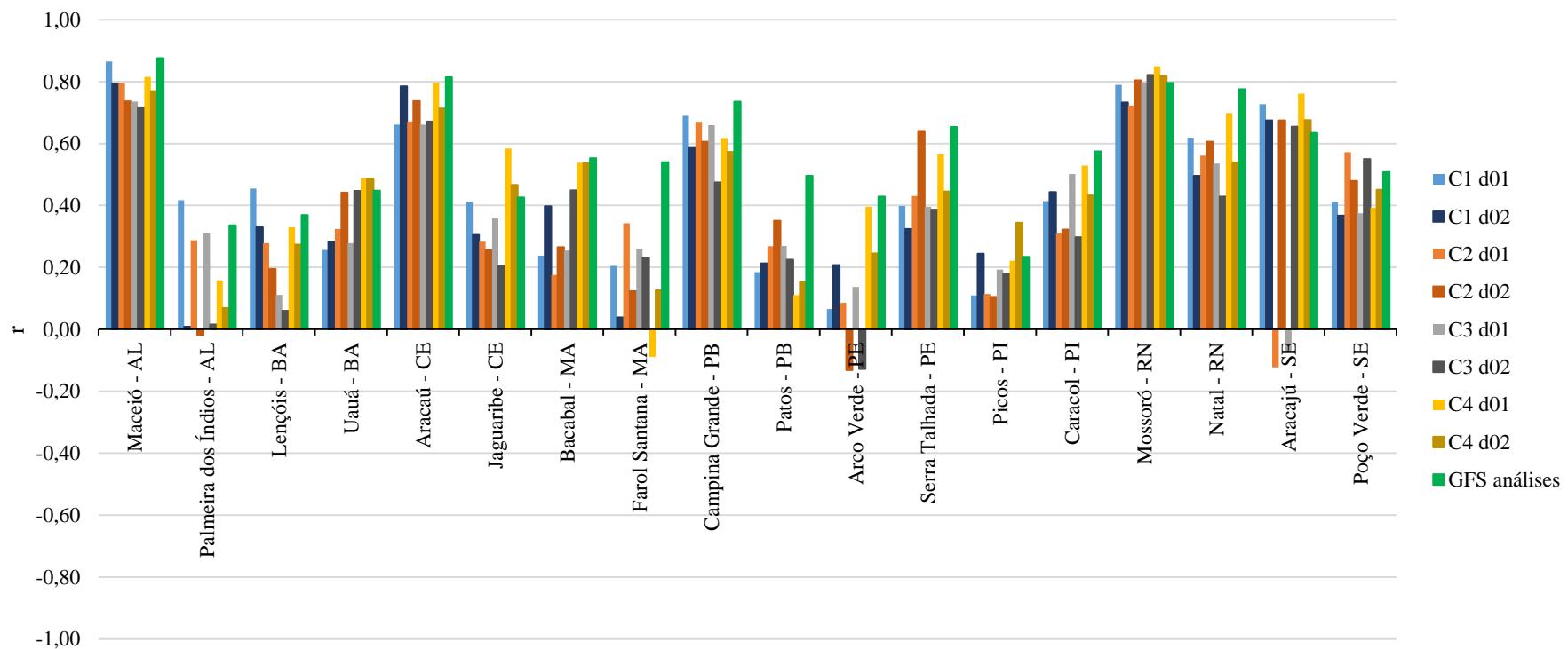


Figura 23: Coeficiente de Correlação ( $r$ ) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

A Figura 24 contém os Coeficientes de Correlação da velocidade do vento a 10 m relativos ao período dos primeiros quinze dias de setembro de 2018. Nessa temporada, não ocorre nenhuma correlação negativa com os dados medidos. Além disso, é observado que, comparado a primeira quinzena de março de 2018, os coeficientes logram resultados mais elevados em setembro, tendo, assim, uma relação linear mais forte com os dados observados.

Os locais em que o  $r$  é menor ou igual a 0,50, por exemplo, passaram de 5 para 2: Patos, onde os resultados são até inferiores aos de março para C1, C2 e para as análises do GFS, e Aracajú, que alcançara correlações relativamente boas em março, exceto para C2 e C3 com a grade mãe. Sobre os coeficientes maiores ou iguais a 0,80, além de Maceió, Aracaú e Mossoró, lograram esse Palmeira dos Índios e Caracol. É interessante notar que Palmeira dos Índios obteve Coeficiente de Correlação baixos em março. Caracol, com  $r$  moderado em março, fica localizado no interior do Piauí. Ademais, verifica-se uma maior uniformidade, comparado a março, entre os coeficientes de correlação associados a cada umas das configurações, em cada estação.

Além disso, setembro teve uma queda na quantidade de locais em que as análises do GFS obtiveram maior correlação, passando para apenas três: Lençóis, Patos e Natal. Em Lençóis, a melhor correlação do WRF foi com C1 na grade mãe. Em Patos, isso ocorreu com C2 na grade filha. Já em Natal, com C4 também na grade de 3 km. Com isso, 15 pontos tiveram uma das opções do WRF como a de correlação positiva mais próxima de 1,00.

A configuração 1 foi a mais satisfatória em 6 estações. Com a resolução de 9 km, isso ocorreu em Bacabal, Picos e Mossoró. Com a de 3 km, em Farol Santana, Arco Verde e Caracol. C2 teve maior  $r$  em Uauá e Poço Verde, os dois com a grade de 3 km. C4 ficou com a maior parte dos coeficientes mais elevados, totalizando 8 lugares. A grade mãe foi responsável por alcançar melhor resultado em Maceió, Palmeira dos Índios, Aracaú, Jaguaribe, Campina Grande, e Poço Verde. Por sua vez, a grade filha teve resultado mais elevado em três locais, sendo eles Serra Talhada, Aracajú e Poço Verde. Ressalta-se que C4 teve resultado equivalente com o domínio de 9 e de 3 km nessa última estação. Dessa maneira, 9 de 15 pontos tiveram com a resolução de 9 km a mais forte relação linear com os dados observados. Já dos 3 pontos em que as análises do GFS são superiores, a resolução de 3 km é melhor em 2 deles.

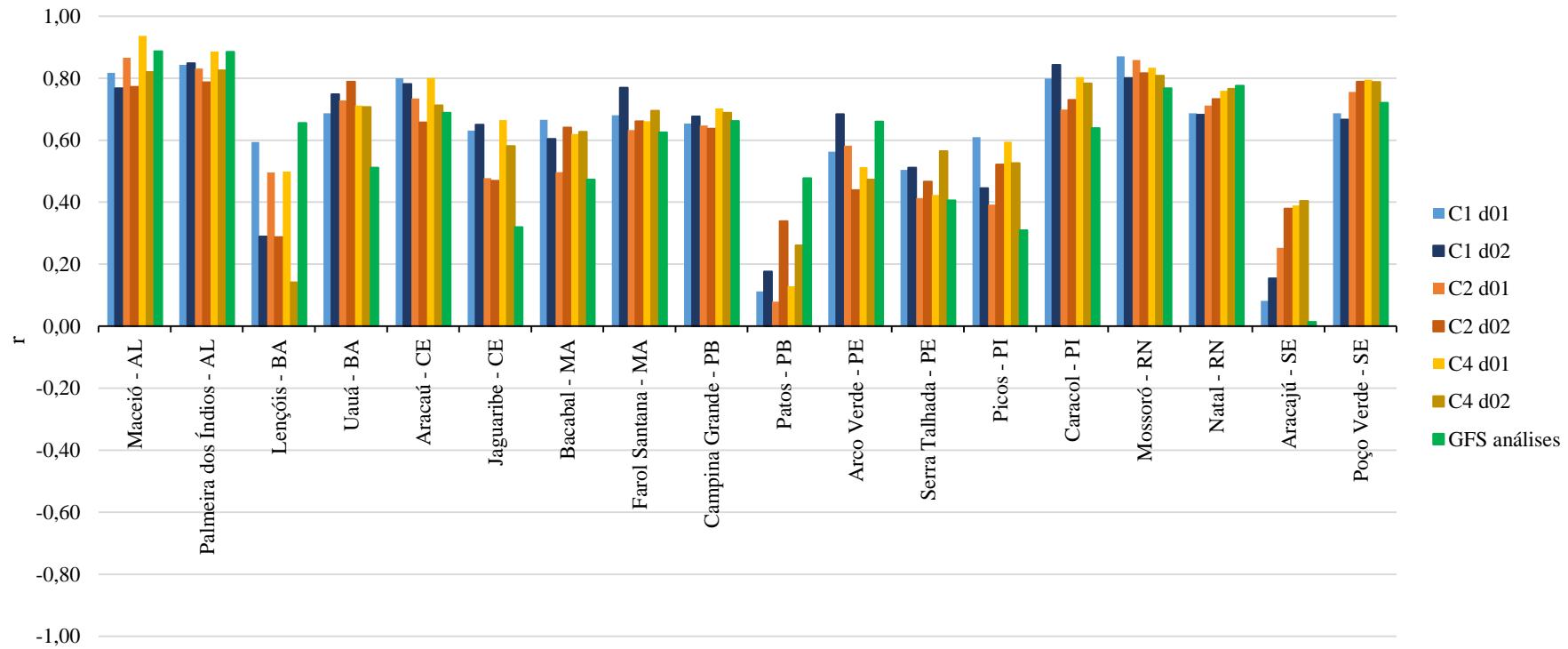


Figura 24: Coeficiente de Correlação ( $r$ ) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018

Ao tratar dos Coeficientes de Correlação da velocidade do vento a 52 m e a 98 m de altura, relativo ao ponto de localização da torre de medição anemométrica, a Figura 25 permite analisar que, na primeira quinzena de março de 2018, todas as correlações são positivas. Nota-se que, salvo C2 e C3 com as respectivas grades de 3 km, todas as opções elevam o  $r$  de 52 para 98 m, no referido período.

A 52 m, as análises do GFS conseguem a correlação linear mais forte com os dados observados. Das configurações do WRF, a que vem em seguida com uma correlação forte é C3 em sua resolução de 3 km. Em contrapartida, a resolução de 9 km de tal configuração obteve o resultado de maior dispersão. A 98 m, novamente são as análises do GFS que conseguem  $r$  mais próximo de 1,00. Nessa altura, a opção do WRF mais próxima a do GFS é C4 com a grade de 9 km.

Destaca-se que apenas as análises do GFS a 98 m possuem um  $r$  superior a 0,50. Com isso, a correlação entre os dados dos modelos e as observações não é muito forte. Como esses resultados foram interpolados linearmente, essas aproximações matemáticas podem acabar refletindo numa maior dispersão de valores. Além disso, nota-se que, a 52 m, todas as opções referentes às grades de 3 km alcançam Coeficientes de Correlação superiores às grades de 9 km. Contudo, a 98 m, isso ocorre somente com C1 e C3, tendo C2 e C4 maiores coeficientes com a resolução de 9 km.

Os Coeficientes de Correlação a 52 m e a 98 m dos primeiros quinze dias de setembro de 2018 são representados na Figura 26. Observa-se que, nesse horizonte temporal, todos os coeficientes também foram positivos. Exceto para as análises do GFS, todas as configurações do WRF apresentaram correlações maiores a 98 m.

Na altura de 52 m, foi o GFS que obteve maior  $r$  e, o segundo melhor desempenho foi o de C4 com a grade de 3 km. Na altura de 98 m, mais uma vez as análises do GFS tiveram correlação linearmente mais fortemente explicada. Foi C1 com a grade de 9 km que obteve a melhor performance dentre as simulações do WRF, embora C4 na grade filha tenha alcançado um  $r$  muito próximo ao do primeiro.

Diferentemente de março, todos os coeficientes de setembro foram superiores a 0,50. Esse mesmo comportamento de maiores correlações em setembro também havia sido observado a 10 m de altura. Por fim, observa-se que, tanto a 52 como a 98 m, os Coeficientes de Correlação de C1 e C2 são maiores com a resolução de 9 km, ao passo que, apesar de muito próximos, o  $r$  de C4 é superior com a resolução de 3 km.

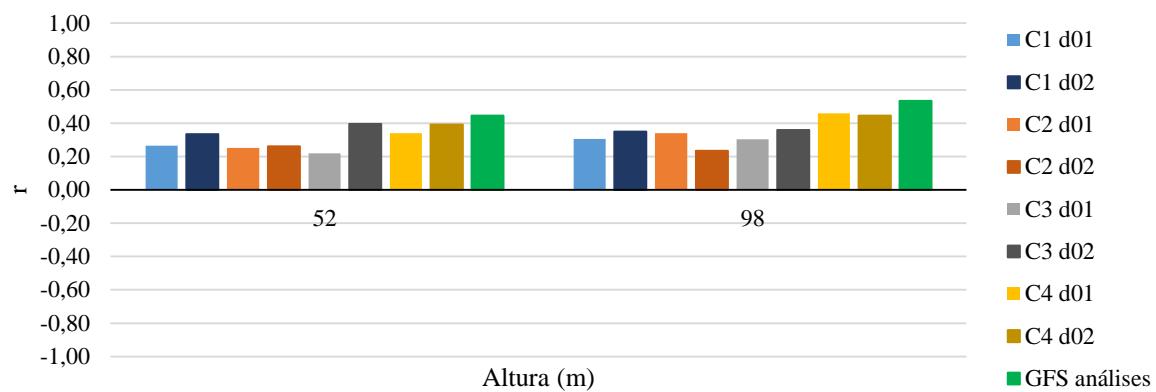


Figura 25: Coeficiente de Correlação ( $r$ ) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

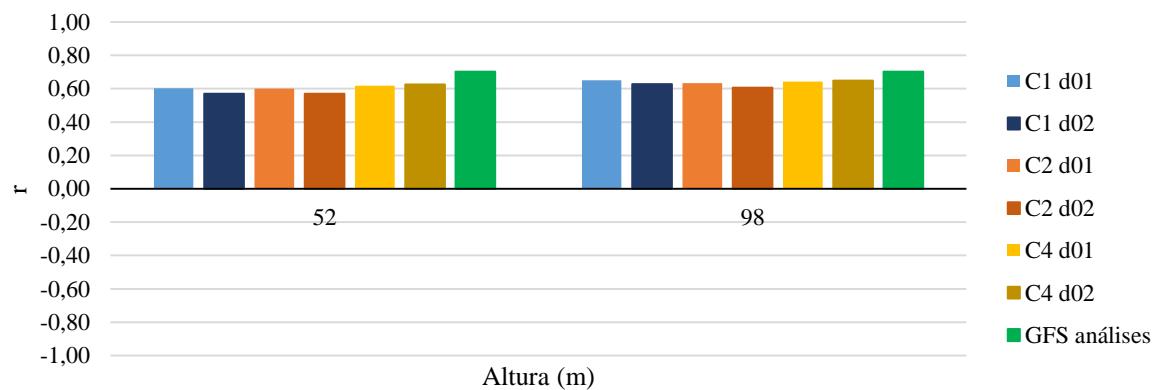


Figura 26: Coeficiente de Correlação ( $r$ ) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018

#### 4.1.4 Análise do percentual de octantes errados na indicação da direção do vento

A presente seção trata do comportamento da direção do vento segundo as diferentes configurações usadas do WRF, assim como conforme as análises do GFS, em comparação aos dados observados. Pela análise da Figura 27, é possível verificar o percentual de erros na indicação do octante da direção do vento, a 10 m de altura, no período da primeira quinzena de março de 2018. Das 18 estações usadas para avaliação, as porcentagens de erro das análises do GFS são as inferiores do grupo em 7 delas: Uauá, Aracaú, Jaguaribe, Farol Santana, Patos, Picos e Poço Verde.

Vale destacar que, em Aracaú, as simulações do WRF tiveram, juntamente às análises do GFS, o menor erro, ao utilizar C2 com a grade de 3 km. O mesmo é observado em Patos, onde C1, também com a grade filha, e C4, com a grade mãe, têm o mesmo erro que o GFS. Das demais localidades, C2 tem o segundo menor percentual em Farol Santana, com d01, e em Uauá, com d02. C3 fica com o segundo melhor desempenho em Jaguaribe, com a grade filha, em Farol Santana, com ambas as grades e compartilhando o mesmo resultado que C2 d01, e em Poço Verde, com a grade mãe. C4 tem segundo menor erro em Picos, com a grade mãe, e em Uauá, também com a grade mãe e com mesmo percentual que C2 d02.

Dessa maneira, nota-se que a maioria dos erros é inferior com o uso de alguma das opções empregadas pelo WRF, mais especificamente, em 10 pontos. A performance é mais satisfatória com C1 em 3 locais, todos com o domínio de 9 km: Palmeira dos Índios, Arco Verde e Caracol. A configuração 2 é a melhor, dentre as opções utilizadas, em 2 pontos, ambos com o domínio de 3 km: Lençóis, que empata com C3, e Aracajú. C3, por seu turno, obteve maior êxito em 3 estações, todas com a resolução de 3 km: Lençóis, Serra Talhada, empatando com C4, e Mossoró. C4 fica com menor erro em 4 locais: Maceió, Bacabal e Natal, usando a grade de 9 km, e Serra Talhada, usando a de 3 km. Comportando-se como um *outlier* dentro da amostra, Campina Grande teve erros máximos ao aplicar todas as opções do WRF, bem como com as análises do GFS.

Assim, averígua-se que, para a indicação do octante exato da direção do vento, a 10 m, as performances são mais homogêneas que aquelas relativas a velocidade do vento nessa altura. Um fator que acaba influenciando nesse sentido é a apresentação dos

resultados em intervalos de classe, mais especificamente octantes, o que não acontece quando avalia-se a velocidade.

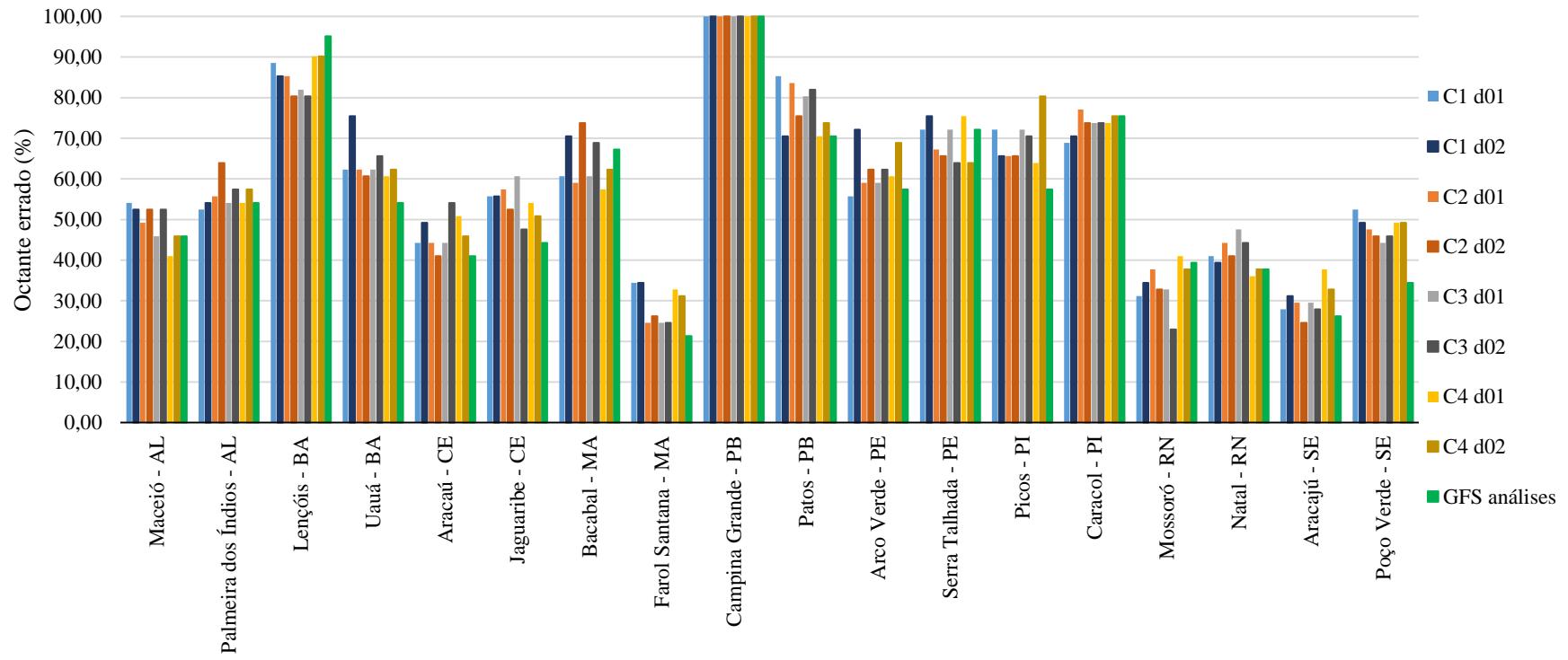


Figura 27: Percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

A Figura 28 reúne graficamente os erros na indicação do octante da direção do vento, a 10 m de altura, para o intervalo temporal dos primeiros quinze dias de setembro de 2018. Nessa quinzena, as análises do GFS lograram o menor erro em 5 estações: Uauá, Jaguaribe, Caracol, Serra Talhada e Natal. Em Uauá, o WRF também obteve a mesma porcentagem que o GFS com a configuração 1, na grade de 3 km, e com a configuração 4, na grade de 9 km. Das demais, C2 conseguiu o segundo melhor desempenho em Jaguaribe, com a grade mãe, e em Caracol, com as grades mãe e filha. C4 teve a melhor performance, depois das análises do GFS, em Natal, com a grade de 3 km. Em Serra Talhada, as análises do GFS tiveram erros iguais aos de C1, C2 e C4, todos com a grade de 9 km do WRF.

Com relação aos outros 12 locais avaliados, os quais as simulações do WRF obtêm melhores resultados, C1 fica com esse posto em 5 deles: Palmeira dos Índios, empatando esse valor em ambas os domínios, em Bacabal, com d02, em Arco Verde, com d02, em Mossoró, com d02, e em Aracajú, que também empata as porcentagens nas duas resoluções. C2 alcança os menores resultados do grupo em 2 pontos: Patos, com o mesmo valor nas duas grades, e em Picos, com a grade de 3 km. Finalmente, C4 tem desempenho mais vantajoso em 5 estações, sendo todos eles com a resolução de 9 km: Maceió, Lençóis, Farol Santana, Campina Grande e Poço Verde. Vale ressaltar que, Campina Grande, embora tenha diminuído seu percentual de erro em relação a março do mesmo ano, ainda tem, para todas as opções do espectro de avaliação, percentuais de erro na indicação do octante da direção do vento superiores a 90%, se destacando atípicamente em relação às outras localidades.

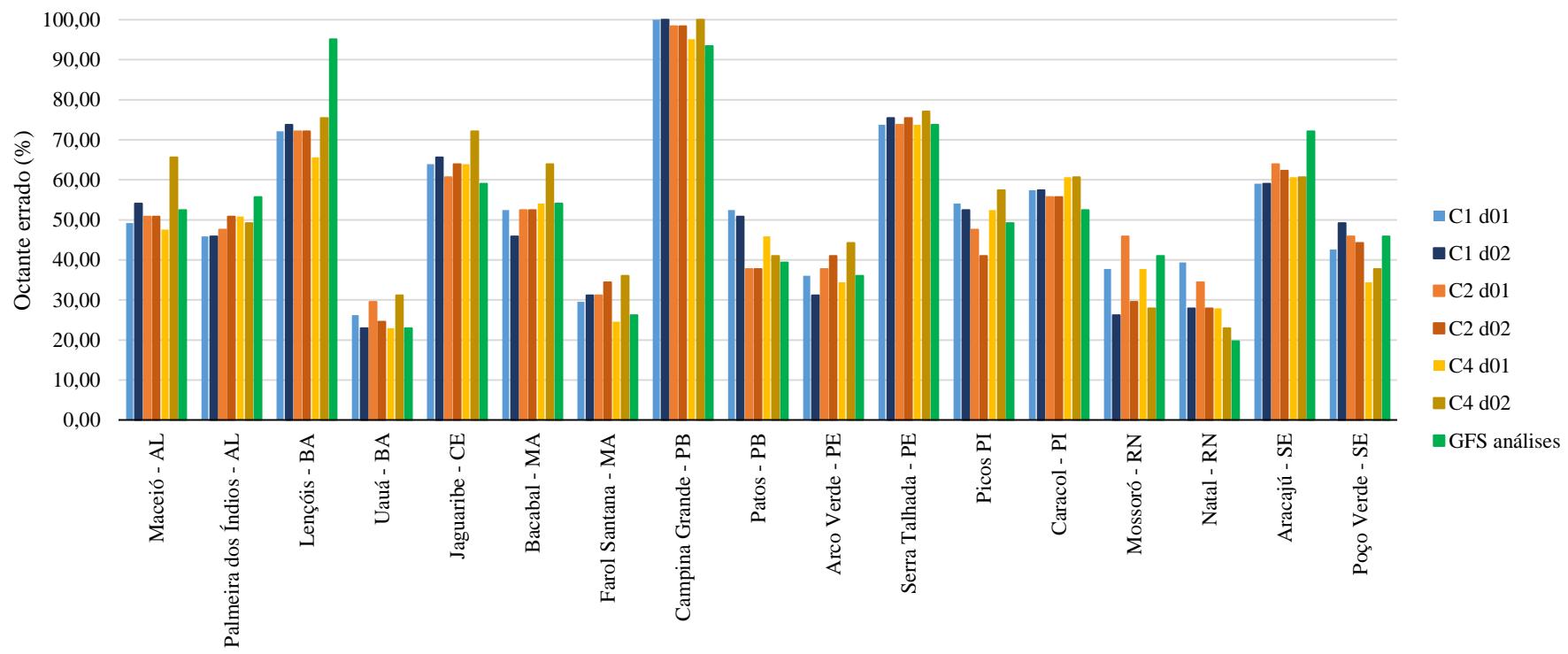


Figura 28: Percentual de octantes errados da direção do vento 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018

A Figura 29 permite analisar os diferentes resultados do erro no apontamento do octante da direção do vento a 50 e a 94 m, tendo por base os valores medidos da torre de medição anemométrica cedidos pela Brennand Energia, dos primeiros quinze dias de março de 2018.

Distintamente do observado com relação à velocidade do vento, os erros da direção, no período de análise, diminuíram com a elevação da altura, inclusive os das análises do GFS. Dentre todas as opções, a 50 m, aquela que tem a porcentagem de erro mais baixa é a de C1 na resolução de 9 km. Já a 94 m, além de C1 com sua grade mãe, C4, com d01, também tem o menor erro do grupo. Assim, percebe-se que, no ponto em questão, as simulações do WRF conseguiram ser mais satisfatórias na indicação do octante da direção do vento que as análises do GFS.

Ao verificar a primeira quinzena de setembro de 2018, através da Figura 30, nota-se, como em março, a diminuição nos percentuais de erro ao elevar-se a altura de 50 para 94 m. No primeiro nível, 50 m, é C4 com a resolução de 3 km que obtém o erro mais baixo dentre os avaliados. O mesmo acontece a 94 m. Dessa maneira, como em março, o WRF tem nos primeiros quinze dias de setembro de 2018 um desempenho melhor no apontamento do octante da direção do vento, no local de estudo. Ademais, verifica-se, em setembro, percentuais inferiores de erro em relação ao mesmo período de março.

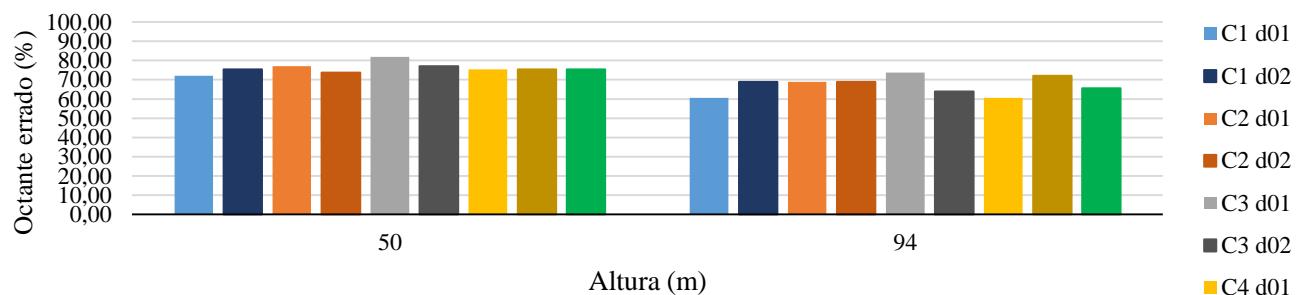


Figura 29: Percentual de octantes errados da direção do vento a 50 e 94 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

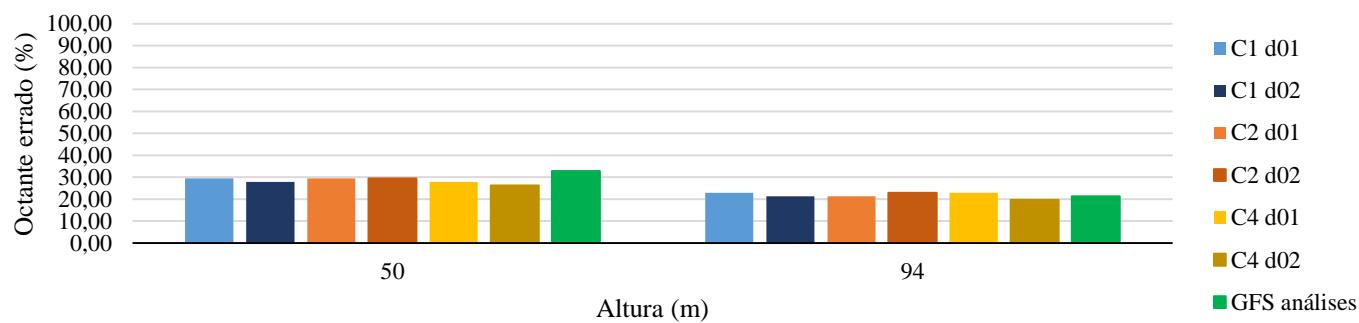


Figura 30: Percentual de octantes errados da direção do vento a 50 e 94 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018

Avaliando-se comparativamente as performances entre a grade de 9 e a de 3 km a 10 m, salvo os pontos que tiveram a mesma indicação de erro para as duas resoluções, verifica-se que em, aproximadamente, 51% dos casos os percentuais mais elevados de erro acontecem na grade filha, no período analisado de março de 2018. A 50 m, por sua vez, a grade de 9 km obteve erros superiores aquela de 3 km em 67% dos eventos, quando esses valores não foram equivalentes. Em contrapartida, a 94 m, é a grade filha que tem os piores desempenhos em 67% dos casos, excluídas as observações em que os resultados foram iguais.

Para o período verificado de setembro, é possível notar que os percentuais mais altos de erros no octante da direção do vento, a 10 m, acontecem na resolução de 3 km, em cerca de 56% das observações, excetuando-se os pontos em que os valores são iguais nas duas grades. Dessa forma, a prevalência do melhor desempenho em d01 se assemelha ao constatado em março de 2018. A 50 m, salvo quando os resultados são iguais nas duas grades, 100% dos demais casos aponta, a grade de 9 km com erros superiores. A 94 m, o domínio de menor resolução também tem um pior desempenho, porém isso diminui para 67% dos eventos em que os resultados dos erros não são idênticos nos dois domínios.

#### **4.1.5 Análise do percentual de erros além dos octantes vizinhos na indicação da direção do vento**

Além da apreciação dos erros percentuais na indicação do octante da direção do vento, fez-se necessário checar o número de vezes, dentro dos períodos de estudo, em que o WRF, com cada uma das configurações estabelecidas, conseguiu acertar ao menos um dos dois octantes vizinhos ao correto. Com isso, a Figura 31 ilustra graficamente os erros além dos octantes vizinhos, da primeira quinzena de março de 2018, a 10 m de altura.

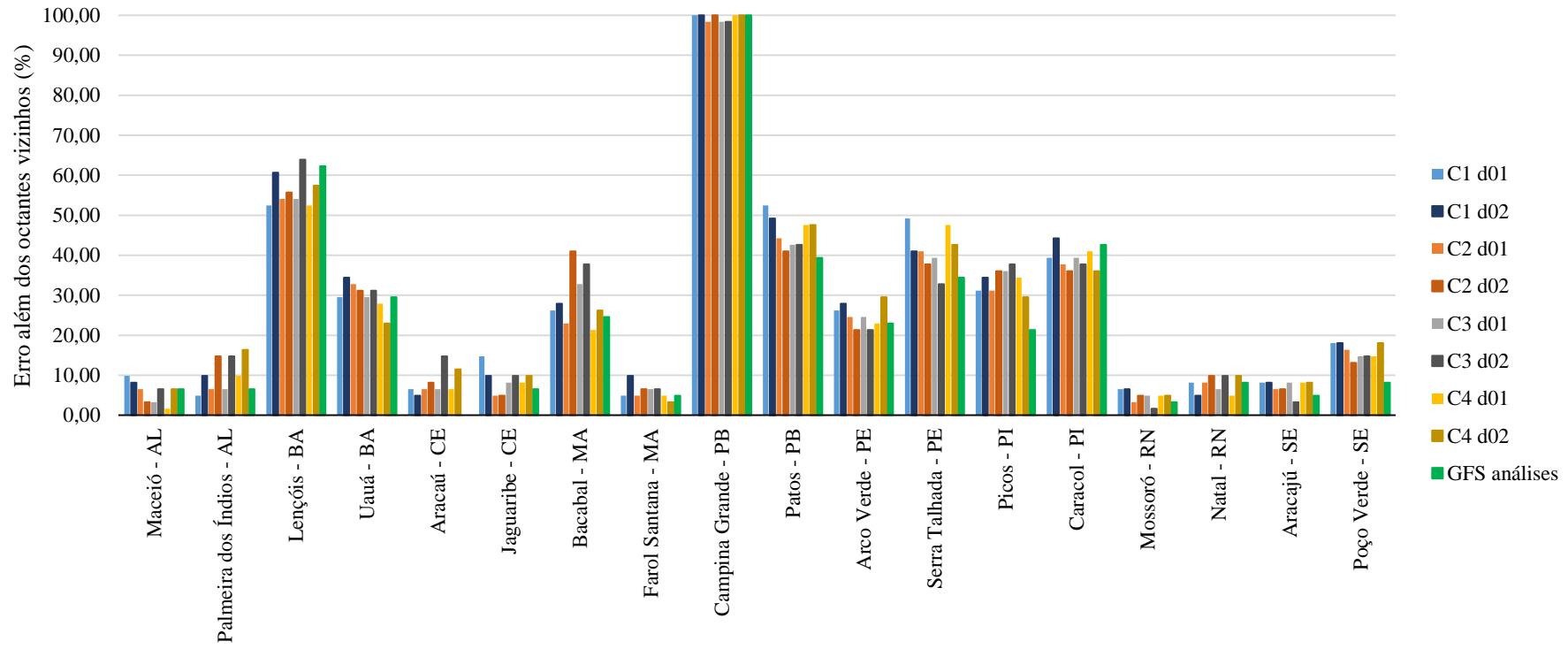
Das 18 estações avaliadas, 4 foram as que os erros além dos octantes vizinhos das análises do GFS foram os inferiores do grupo. Desses locais, em Aracaú, onde o GFS obteve percentual nulo, o melhor desempenho do WRF ficou com a simulação relativa a C1, na resolução de 3 km. Em Patos e em Poço Verde, C2 teve o erro mais baixo daqueles referentes ao WRF, ambos na resolução de 3 km. Por fim, em Picos a configuração 4 do WRF teve a segunda performance mais satisfatória de todo o conjunto, também com o domínio de 3 km.

Observa-se que esses quatro pontos também obtiveram os menores erros na indicação do octante com as análises do GFS. Contudo, em relação aos erros de mais de um octante vizinho, ocorreu uma diminuição no número de estações que tinham as análises do GFS como os valores percentuais mais baixos, demonstrando que as simulações do WRF melhoraram seus desempenhos ainda mais ao enquadrar o octante da direção simulado na classe anterior ou posterior à observada.

Dessa maneira, 14 sítios alcançaram o menor erro além dos octantes vizinhos com alguma das configurações do WRF. A configuração 1 foi responsável pelo melhor desempenho em 3 pontos, sendo em Palmeira dos Índios e em Lençóis com a grade de 9 km e em Natal com a grade de 3 km. C2 obteve menor erro em 5 localidades: em Jaguaribe, onde as duas resoluções lograram o mesmo percentual; em Campina Grande, com a grade de 9 km; em Arco Verde, com a grade de 3 km; em Caracol, com a grade de 3 km; e em Natal, com a grade de 9 km. C3, por sua vez, conseguiu melhor resultado em 4 estações: em Campina Grande, com os dois domínios; em Arco Verde, com o domínio de 3 km; em Mossoró, com o domínio de 3 km; e em Aracajú, com o domínio de 3 km. C4 teve percentuais inferiores em 6 locais: Maceió, com a grade de 9 km; Lençóis, com a grade de 9 km; Uauá, com a grade de 3 km; Bacabal, com a grade de 9 km; Farol Santana, com a grade de 3 km; e em Caracol, com a grade de 3 km.

Vale destacar que, em alguns desses pontos, mais de uma configuração do WRF atingiu as menores porcentagens de erro. Foram esses: Lençóis, com C1 e C4; Campina Grande, com C2 e C3; Arco Verde, com C2 e C3; Caracol, com C2 e C4; e Natal, com C1 e C2. Ademais, nota-se que Campina Grande, local que, no mesmo período, apresentou 100% de erro na indicação do octante da direção do vento a 10 m, conseguiu abaixar essa proporção com C2 e C3 para o erro além dos octantes vizinhos, entretanto, ainda com valores muito elevados.

Comparando-se a Figura 27 e a Figura 31, observa-se que há uma contração significativa dos erros da primeira para a segunda. Com isso, tanto as simulações do WRF como as análises do GFS, quando não conseguem acertar o octante da direção do vento, tendem a indicar um dos octantes vizinhos ao correto. Por exemplo, 14 estações tiveram um percentual de erro no octante maior ou igual a 50% com alguma das opções analisadas. Em contrapartida, apenas 3 estações tiveram um erro para além dos octantes vizinhos ao correto maior ou igual a 50%.



*Figura 31: Percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura – primeira quinzena de março de 2018*

A Figura 32 ilustra os percentuais de erros além dos octantes vizinhos, a 10 m de altura, relativo ao período dos primeiros quinze dias de setembro de 2018. As análises do GFS tiveram os menores erros em 8 de 17 estações avaliadas: Maceió, Bacabal, Campina Grande, Patos, Serra Talhada, Mossoró, Aracajú e Poço Verde.

Entretanto, em 5 desses locais uma das configurações do WRF teve erro similar ao das análises do GFS. Assim, em Maceió, C4, com a grade mãe, também obteve menor erro. Em Patos, tal fato ocorreu com C2 na grade mãe. Em Mossoró, empataram com o GFS C1 d01 e d02, C2 d01 e C4 d02. Já em Aracajú, isso aconteceu com C1 d01, C2 d01e C4 d02. Finalmente, em Poço Verde, foi C1 d01 e C2 d01 e d02 que obtiveram o menor erro, assim como as análises do GFS.

Além disso, em Uauá, Farol Santana e Natal todas as opções do WRF e as análises do GFS tiveram erro além dos octantes vizinhos nulo. Em outras palavras, nesses 3 sítios o WRF, quando não acerta o octante da direção, indica um de seus vizinhos com qualquer das configurações usadas.

Dessa forma, 6 estações tiveram um dos cenários do WRF como o de menor erro além dos octantes vizinhos. Desses, 5 foram com C2. Em Jaguaribe e em Caracol, C2 foi melhor com a grade mãe, ao passo que em Palmeira dos Índios, Lençóis e Picos C2 foi melhor com a grade filha. Além dessas, uma estação obteve melhor indicativo da direção com C4, na resolução de 9 km: Arco Verde. Assim, verifica-se um aumento no total de localidades em que as análises do GFS conseguem melhores desempenhos de erros além dos octantes vizinhos, quando comparado aos resultados relativos aos octantes errados.

Assim como observado para o período de março, em setembro é notado uma queda relevante dos erros da direção do vento para além dos octantes vizinhos, em relação aos erros na indicação do octante observado. Pela análise da Figura 28 e da Figura 32, averígua-se que 11 estações obtiveram erros maiores ou iguais a 50% na indicação da direção do vento, a 10 m de altura, com alguma das opções avaliadas. Já para os erros da direção do vento além dos octantes vizinhos que foram superiores ou equivalentes a 50%, o número de estações diminuiu para somente 1, sendo que isso ocorreu apenas com as análises do GFS. Ou seja, no período analisado de setembro de 2018, as simulações do WRF quando não acertaram o octante da direção, apontaram um dos octantes vizinhos ao real, em todos os pontos de estudo.

Comparando-se as porcentagens de erros além dos octantes vizinhos de março e de setembro de 2018, é possível verificar a diferença entre a magnitude dos valores desses dois intervalos de tempo. Apesar de pontos como Maceió e Jaguaribe tenderem a elevar seus erros em setembro, a maior parte dos valores são superiores em março. Destaca-se que Campina Grande, *outlier* nas amostras de março e naquela de setembro para a indicação do octante exato da direção, decai consideravelmente seus percentuais de erros além dos octantes vizinhos de setembro, passando a possuir valores inferiores a 50%. Todavia, esse local ainda é um dos que possuem magnitudes de tais erros mais altas no período de análise, ainda que sem tanta discrepância dentro da amostra.

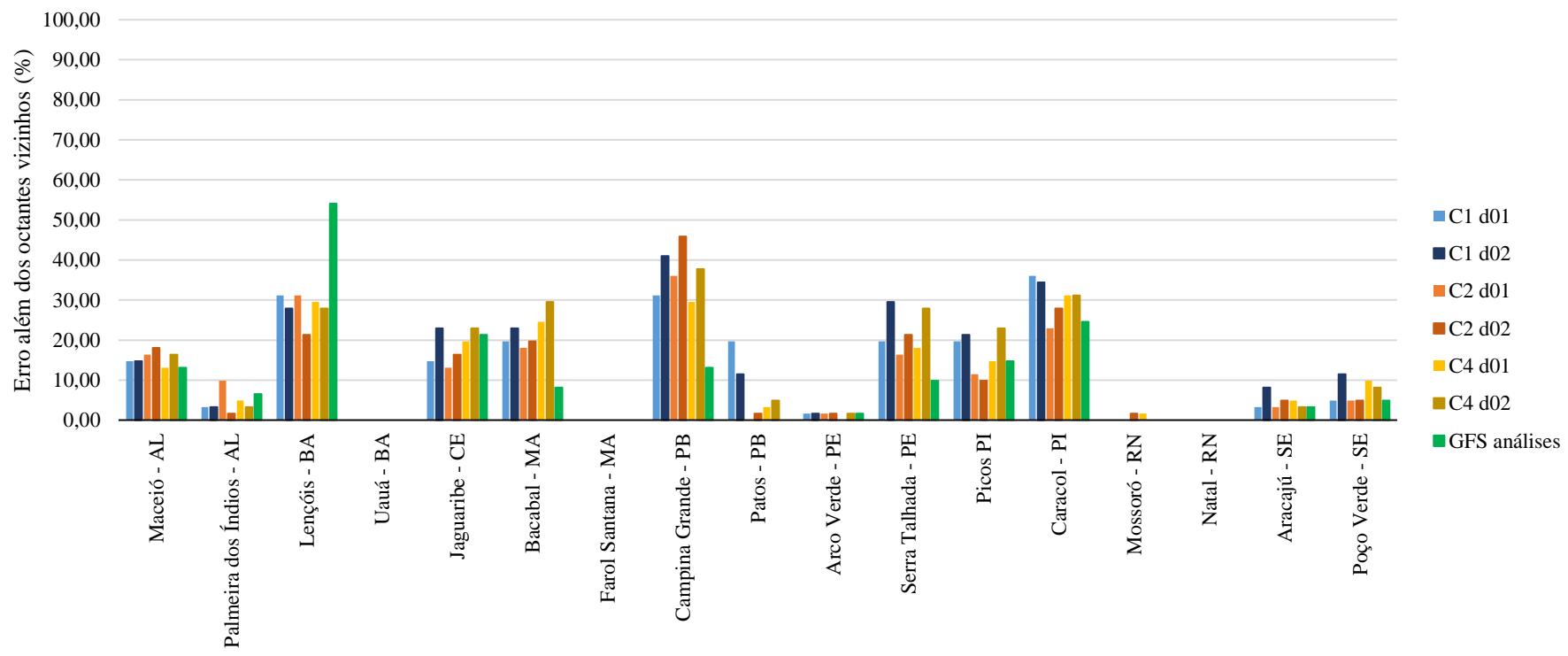


Figura 32: Percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura – primeira quinzena de setembro de 2018

As proporções de erro além dos octantes vizinhos a 50 e a 94 m de altura, para a primeira quinzena de março de 2018, na localização da torre de medição, estão reunidas na Figura 33. Ocorre, com a elevação do primeiro para o segundo nível de altura, a diminuição dessas porcentagens de erro ao utilizar todas as configurações propostas do WRF, em ambas as grades, bem como ao avaliar as análises do GFS. O mesmo padrão fora verificado para o erro na indicação do octante correto da direção do vento.

Na altura de 50 m, o valor mais baixo de erro ocorre com o cenário 4, na resolução de 9 km. Em contrapartida, a 94 m, a melhor performance na indicação de um dos octantes vizinhos ao observado é a fornecida pelas análises do GFS. Das configurações do WRF, a que mais se aproxima do melhor desempenho é a de C4 com a resolução de 9 km.

Ao avaliar as porcentagens de erro além dos octantes vizinhos a 50 e a 94 m, no período dos primeiros quinze dias de setembro de 2018, nota-se, pela Figura 34, que a magnitude dos valores referentes às simulações do WRF permanece constante nos dois níveis de altura. As análises do GFS, por seu turno, diminuem de 50 m para 94 m. C2, com os resultados da grade mãe, atinge erro nulo a 50 m de altura. Já a 94 m, as análises do GFS se equiparam a C2 d01, atingido o menor índice de erro do grupo.

Dessa maneira, C2 e as análises do GFS, no horizonte temporal avaliado, não erram a indicação do octante da direção para além da classe anterior ou posterior à real. Outro ponto cabível de realce é a discrepância entre as proporções de erro de março e de setembro, tendo o segundo mês todos os resultados muito próximos a zero.

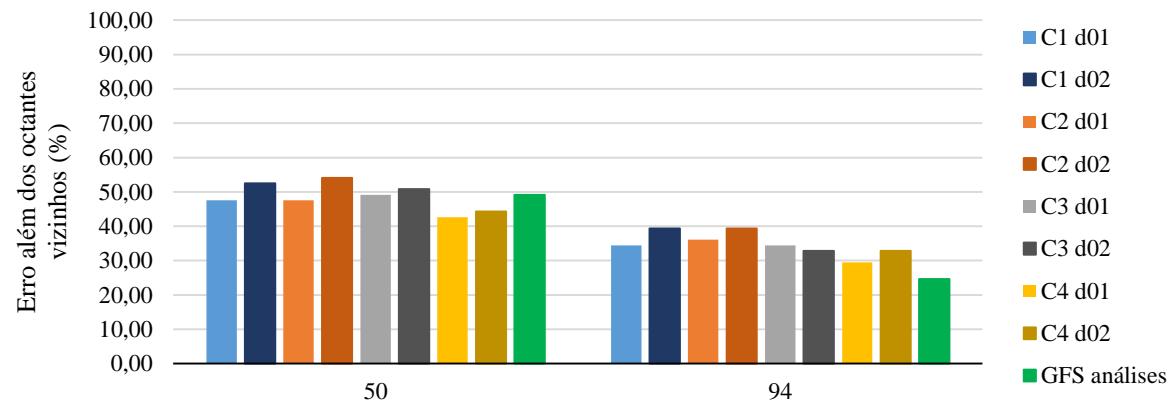


Figura 33: Percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 50 e 94 m de altura – primeira quinzena de março de 2018

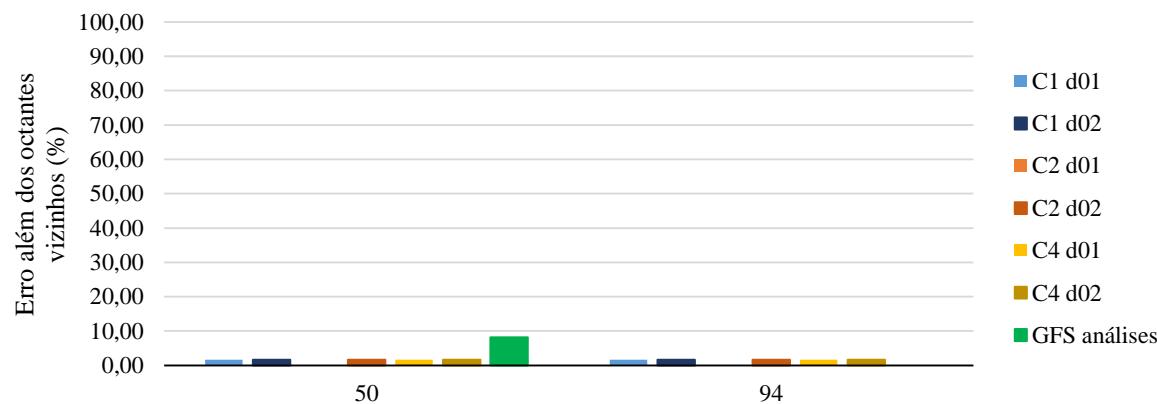


Figura 34: Percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 50 e 94 m de altura – primeira quinzena de setembro de 2018

Na primeira quinzena de março de 2018, a 10 m de altura, 60% das observações da grade de 9 km têm erros além dos octantes vizinhos inferiores a grade de 3 km, salvo os casos em que esses valores são iguais. A mesma avaliação, a 50 m, na torre de medição, demonstrou que todas as ocorrências de tal erro foram superiores na resolução de 3 km. A 94 m, a grade filha ainda tem maiores percentuais em 75% dos casos.

Em setembro de 2018, em seus primeiros quinze dias, observa-se que, a 10 m de altura, os erros além dos octantes vizinhos são, como em março, menores na resolução de 9 km. No caso de setembro, isso acontece em 69% das ocorrências, sem contar aquelas em que os erros em ambas as grades são similares. A 50 e a 94 m, no respectivo local de análise, os erros são maiores em 100% das observações, quando não equivalentes, na resolução de 3 km.

Sendo assim, nos dois espectros temporais avaliados no presente estudo, o domínio de 9 km acaba sendo mais assertivo ao orientar um dos octantes vizinhos da direção do vento, em diferentes locais e alturas.

#### **4.1.6 Análise das estatísticas médias**

Além das estatísticas envolvendo a velocidade e a direção do vento em cada um dos sítios em que se encontravam as estações meteorológicas, foram também extraídas as suas respectivas médias para cada uma das configurações do WRF usadas, assim como para as análises do GFS. A Tabela 17 possibilita analisar as opções que obtiveram, em termos médios, maior fidedignidade de dados tendo por base o *Bias*, a *RMSE*, o *r*, o percentual do octante errado e o percentual de erro além dos octantes vizinhos.

Em março de 2018, o menor *Bias* médio dentre as opções do WRF e as análises do GFS é alcançado por C1, na resolução de 9 km. Por outro lado, a *RMSE* médio mais baixo é o das análises do GFS, seguido de C4, também com a grade de 9 km. Com o mesmo padrão da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio, são as análises do GFS que apresentam correlação linear positiva mais forte com os dados observados, ficando C4, com a grade de 9 km, com a segunda maior representatividade.

Já com relação a direção do vento, a menor porcentagem de indicação do octante errado é das análises do GFS. C2, na resolução de 3 km, tem o segundo mais baixo

resultado médio. Por fim, a média do erro além dos octantes vizinhos tem a mesma tendência ao indicar as análises do GFS como a melhor performance e, depois, C2, todavia com a grade de 9 km.

Desse modo, fica evidenciado que, na primeira quinzena de março de 2018, as análises do GFS alcançam maior acurácia tanto em relação a velocidade do vento, a 10 m de altura, como em relação a sua direção, na mesma altura. Esse fato reforça o peso que a assimilação de dados observados pode ter, no período, para a melhor representação da realidade.

Além disso, para a velocidade do vento, é C4, configuração que tem por referência as parametrizações físicas usadas pelo GFS, que mais se aproxima das análises do modelo global. Já para a direção do vento, C2 tem os melhores desempenhos médios dentro das simulações do WRF. Em termos médios, a resolução de 9 km do WRF acaba sendo mais satisfatória nesse intervalo de tempo.

Em setembro de 2018, tanto o *Bias* quanto a *RMSE* médios mais baixos são os das análises do GFS, e, das configurações do WRF, é C1 com a grade de 3 km que mais se aproxima de seus resultados. Apesar disso, a correlação média com as observações é mais fortemente explicada com C4 na resolução de 9 km, ultrapassando o desempenho das análises do GFS. Além do mais, todas as configurações do WRF, nesse período, conseguem valores médios de *r* melhores que as análises do GFS.

No que diz respeito a direção do vento, o menor percentual médio do octante errado é também o de C4 com a grade de 9 km. Em contrapartida, ao avaliar a capacidade de prever um dos octantes vizinhos ao observado como o certo, são as análises do GFS que obtêm melhor performance. C2 fica com o segundo menor erro, na resolução de 9 km.

Com isso, nota-se que, em termos médios, em setembro de 2018, as simulações do WRF têm representatividade satisfatória da velocidade e da direção do vento a 10 m de altura, sendo isso mais preponderante com a configuração baseada no GFS. No entanto, o peso das análises do GFS para apontar a direção do vento a 10 m é ainda considerável para os octantes vizinhos, embora as reproduções do WRF alcancem resultados não muito distantes dessas análises.

Comparando-se os dois períodos observados, verifica-se que há o aumento do *Bias* e da *RMSE* em setembro, época de ventos preponderantemente mais intensos no Nordeste (SANTOS; SILVA, 2013), o que tende a elevar esses erros. Todavia, os coeficientes de correlação também se elevam, mostrando aptidão das simulações do WRF para lograr desempenhos relevantes com relação a variabilidade diurna da intensidade do vento. Além disso, os erros da direção do vento diminuem do primeiro para o segundo mês.

Analizando mais especificamente as três primeiras configurações exploradas no WRF, nas quais as parametrizações de Microfísica, Radiação de Onda Longa e de Onda Curta, Modelo de Superfície Terrestre<sup>3</sup> e *Cumulus* foram fixadas, é possível averiguar qual das combinações de esquemas de Camada Limite Planetária e de Camada de Superfície melhor se enquadram para a área de estudo.

Para a velocidade do vento, C1 tem os melhores resultados, sendo esse cenário composto pelo esquema YSU, para a CLP, e pelo *Revised MM5* com a inclusão do *topo\_wind*, para a Camada de Superfície. Para a direção do vento, como visto, C2 tem erros inferiores, sendo composto dos esquemas ACM2, para a CLP, e *Revised MM5*, para a Camada de Superfície.

Assim, para os períodos avaliados, na localização estabelecida dentro do Estado do Nordeste, o YSU e a ativação do *topo\_wind*, conferem maior representatividade aos dados de velocidade do vento, enquanto que o ACM2 tem mais aderência aos dados da direção.

Por seu turno, o esquema de Camada de Superfície *Revised MM5* é mais adequado na área e períodos estudados, visto que os valores médios do *Bias*, da *RMSE*, do *r*, do octante errado e do erro além dos octantes vizinhos das simulações associadas a C3, que utiliza o Pleim-Xiu enquanto fixa o ACM2 para a CPL, são menos precisos que os de C2.

Como C1 e C2 utilizam o *Revised MM5* como esquema de Camada de Superfície, nota-se que a escolha da parametrização de Camada Limite Planetária acaba tendo, nos períodos de estudo, maior influência para se atingir resultados mais satisfatórios, tanto para a velocidade como para a direção do vento, embora com opções distintas.

---

<sup>3</sup> Exceto no caso de C3, que requereu a versão mais aperfeiçoada do Noah, o Noah-MP.

Apesar disso, a diferença percentual dos erros médios da direção do vento entre C1 e C2 é baixa, enquanto que C1 de modo geral é suficientemente mais representativo da velocidade do vento, o que acaba por dar mais relevância a aplicação da primeira configuração em detrimento da segunda.

A configuração 4, uma das mais promissoras dentre as aplicadas para o WRF, diferencia-se de C1 e de C2, não só pelas parametrizações de Camada Limite e de Camada de Superfície, mas também por aquelas de Microfísica e de *Cumulus*. Consequentemente, esses esquemas físicos de C4 não podem ser comparados isoladamente na área de estudo às demais configurações.

Diante dos resultados alcançados pelas configurações do WRF, que ora tem performance estatísticas melhores que as análises do GFS e ora não, é possível evidenciar a sensibilidade do modelo às parametrizações físicas aplicadas, como também aos dados de condição inicial e de contorno usados. Como as análises do GFS incorporam observações aos seus dados, isso demonstra que a técnica assimilação de dados observados pelo WRF poderia levá-lo a ainda melhores previsões.

Ressalta-se que, justamente por possuir informação do dado observado em todo seu domínio, era suposto que as análises do GFS forneceriam os resultados mais acurados em todos os casos. Assim, mesmo com a limitação do WRF à utilização dessas análises, e consequentemente das observações, às condições iniciais e de fronteira, as simulações do modelo de mesoscala conseguem superar, em certos momentos, o desempenho das análises do modelo global.

Além disso, cabe destacar que as piores acurácia nos resultados das simulações do WRF tendem a se relacionar, principalmente, à magnitude da velocidade do vento, enquanto que a sua capacidade de correlacionar essa velocidade é notável. Como evidenciado pela análise do *Bias* do modelo destacada na seção 4.1.1, há superestimação da velocidade em todos os pontos e em ambos os períodos de estudo. O fato das análises do GFS atingirem menores erros nessa magnitude pode ser consequência da menor resolução do modelo global, que superestima com menos força essa velocidade do vento. Por se tratar de um erro sistemático, ele pode ser corrigido, por exemplo, estatisticamente em seu pós-processamento (SAHA, 1992).

Vale frisar que diversas pesquisas já indicaram essa inclinação do WRF a superestimar a velocidade do vento. Carvalho *et al.* (2014b), por exemplo, verificaram

essa tendência em Portugal. Os autores constataram que isso se deve à suavização e à simplificação da representação do terreno pelo referido modelo. Avolio *et al.* (2017) resultaram na mesma observação no sul da Itália.

Já Draxl *et al.* (2014) notaram que a maioria dos esquemas de Camada Limite Planetária utilizados em seu trabalho levaram à superestimação da velocidade do vento a 10 m de altura em Høvsøre, na Dinamarca. Com a elevação da altura, houve tendência de aproximação dos resultados em relação aos dados observados. Na presente pesquisa, de outra forma, observa-se um aumento da magnitude do erro quando se vai de 52 para 98 m de altura na localização da TMA.

Tabela 17: Estatísticas aplicadas médias

	Opções	Março/2018		Setembro/2018	
		d01	d02	d01	d02
C1	Bias (m/s)	1,04	1,34	1,81	1,70
	RMSE (m/s)	1,76	2,05	2,42	2,29
	r	0,44	0,40	0,63	0,62
	Octante errado (%)	58,83	60,29	52,46	51,11
C2	Erro além dos octantes vizinhos (%)	27,14	27,78	12,92	14,75
	Bias (m/s)	1,62	1,84	2,58	2,35
	RMSE (m/s)	2,16	2,41	2,93	2,73
	r	0,38	0,40	0,59	0,61
C3	Octante errado (%)	58,29	57,65	52,07	50,72
	Erro além dos octantes vizinhos (%)	25,05	26,23	10,90	11,57
	Bias (m/s)	1,49	1,87	-	-
	RMSE (m/s)	2,12	2,53	-	-
C4	r	0,38	0,37	-	-
	Octante errado (%)	58,11	58,01	-	-
	Erro além dos octantes vizinhos (%)	25,68	26,96	-	-
	Bias (m/s)	1,12	1,22	2,24	2,01
GFS análises	RMSE (m/s)	1,72	1,89	2,65	2,48
	r	0,49	0,45	0,65	0,62
	Octante errado (%)	58,29	59,20	50,14	54,29
	Erro além dos octantes vizinhos (%)	25,50	26,68	12,05	13,98
	Bias (m/s)	1,11		1,50	
	RMSE (m/s)	1,62		2,10	
	r	0,57		0,58	
	Octante errado (%)		55,19		52,27
	Erro além dos octantes vizinhos (%)		23,68		10,32

## 4.2 Distribuição espacial das estatísticas aplicadas

Além dos gráficos de barras apresentados na seção 4.1, foram confeccionados mapas das estatísticas utilizadas a 10 m de altura, de modo a melhor visualizar suas distribuições espaciais. Cabe destacar que não foi gerado um mapa associado ao *Bias* da intensidade do vento, visto que sua principal função foi avaliar a capacidade do modelo em superestimar ou subestimar suas simulações e o *RMSE* supre o objetivo de verificar a magnitude média do erro relativo à intensidade.

### 4.2.1 Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio

A Figura 35 apresenta os mapas da distribuição espacial da *RMSE* da velocidade do vento, relativa a primeira quinzena de março de 2018, para cada uma das configurações do WRF, tendo por base a resolução espacial de 9 km.

É possível verificar uma tendência das simulações do WRF em possuírem erros de menor magnitude, nesse período, nas estações situadas na costa leste do Nordeste, assim como mais à leste da costa norte, incluindo também a estação de Picos, situada na área mais central do Piauí. Já as magnitudes mais elevadas se concentram, principalmente, nas estações mais interioranas, sobretudo aquelas situadas na Bahia. No entanto, altas Raízes Quadradas do Erro Quadrático Médio também são notadas no litoral do Maranhão e do Sergipe.

A configuração C4 consegue obter, com a grade mãe, *RMSE* menor ou igual a 1,50  $m/s$  sobre uma extensão maior do território de estudo. Em contrapartida, C3 d01 tem a menor superfície coberta por uma *RMSE* menor ou igual a 1,50  $m/s$  dentre as opções do WRF.

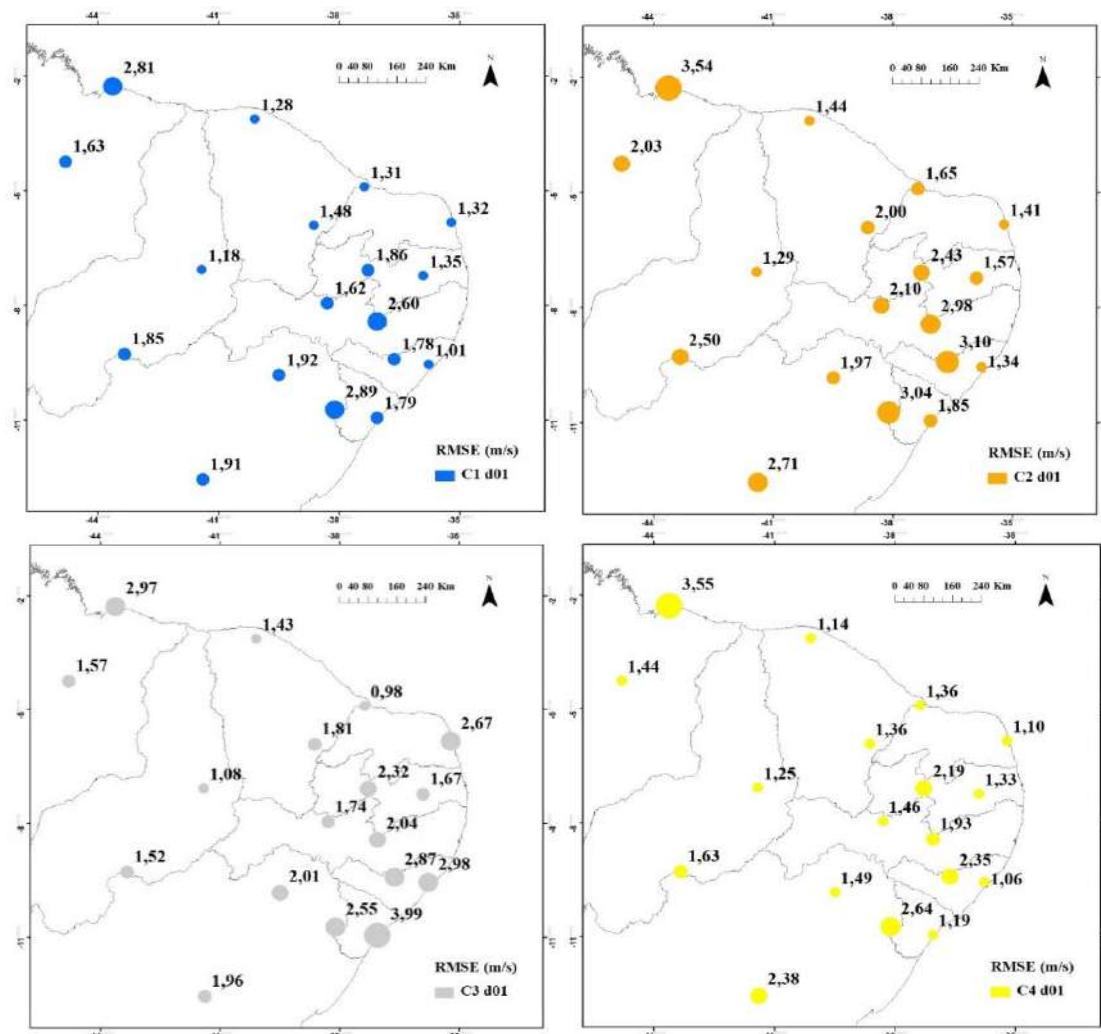


Figura 35: Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de março de 2018

A Figura 36 exibe a distribuição espacial da *RMSE* considerando os resultados relativos às configurações do WRF com a grade de 3 km de resolução, bem como aquela associada às análises do GFS, também para os primeiros quinze dias de março de 2018.

Assim, é notável que, com a grade filha do modelo, ocorre certa propensão ao encolhimento da região na costa leste do Nordeste que abriga os erros de menor grandeza, quando comparados aos resultados da grade mãe. Exceto para C2 d02, o litoral do Ceará e o centro do Piauí, conseguem permanecer com erros mais baixos.

C4, com a grade de 3 km, é ainda a configuração do WRF com maior número de estações apontando uma *RMSE* menor ou igual a 1,50 m/s. Por outro lado, C2 é, com essa resolução espacial, a opção com a mais baixa quantidade de erros de até 1,50 m/s, tendo desempenho pior que C3.

Ao avaliar o comportamento da *RMSE* das análises do GFS sobre a área de estudo, na primeira quinzena de março de 2018, percebe-se que os menores erros conseguem se distribuir também pelas estações mais interiores dos respectivos Estados do local de estudo. Ou seja, o erro é menor em uma maior proporção do território.

Raízes Quadradas do Erro Quadrático Médio superiores a 1,50 m/s, por exemplo, são reduzidas ao litoral do Maranhão, ao norte da Bahia, ao Sergipe, ao interior de Alagoas e da Paraíba, e ao litoral norte do Rio Grande do Norte. De qualquer maneira, é importante frisar que C4 d01 obtém a mesma quantidade de estações com *RMSE* menor ou igual a 1,50 m/s que as análises do GFS, apenas distribuídos de forma distinta.

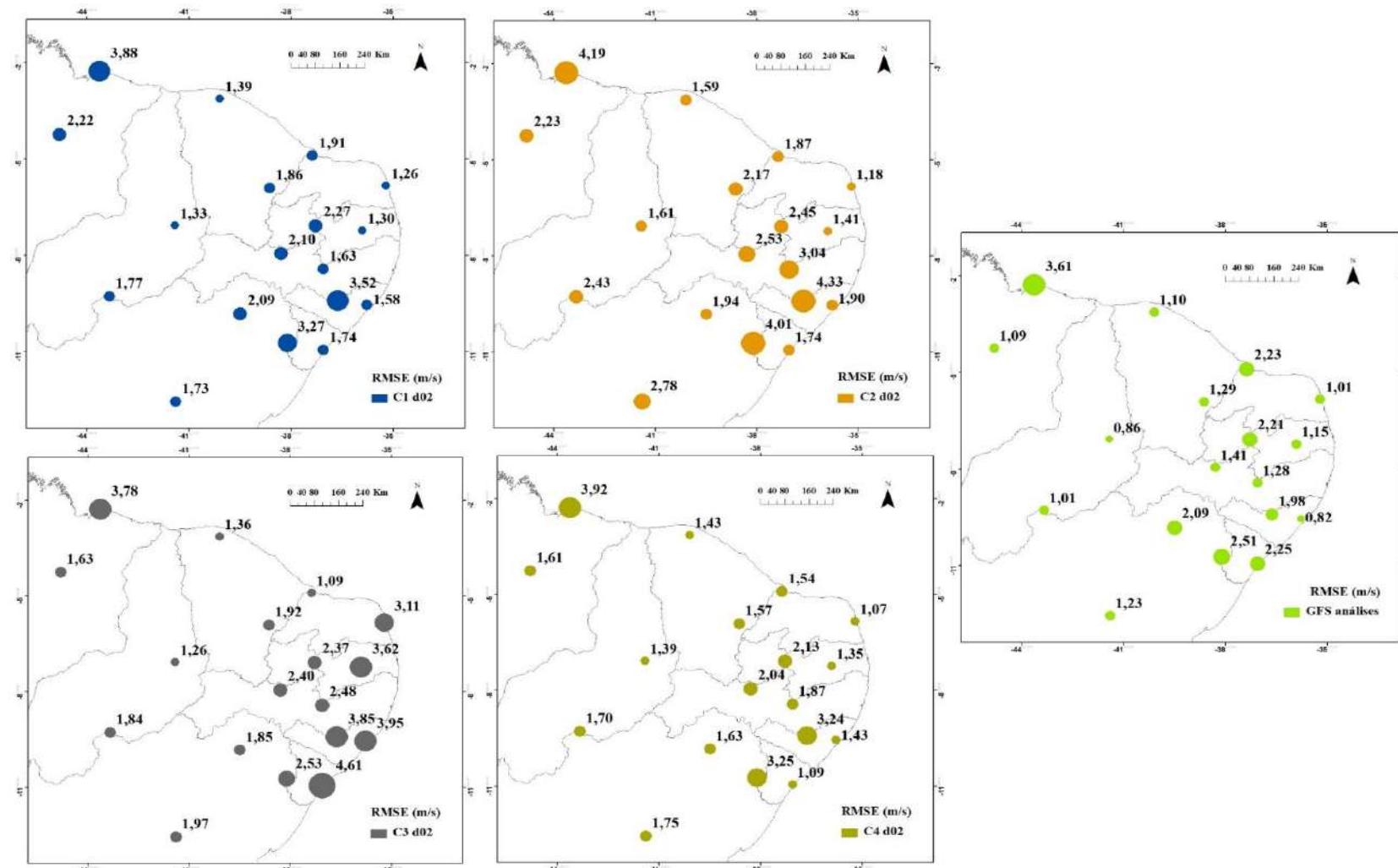


Figura 36: Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de março de 2018

Os valores da *RMSE* das configurações do WRF, considerando a grade de 9 km, relativos à primeira quinzena de setembro de 2018, estão visualmente distribuídos sobre a área de estudo na Figura 37.

Nesse espaço temporal, além da magnitude mais elevada, a disposição da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio se altera em relação a março. Os erros mais altos tendem a se concentrar, sobretudo, na costa norte do Nordeste, como também no interior dos Estados da Paraíba e de Pernambuco.

Apenas as estações de Natal, de Maceió e, no caso de C1, também de Picos, são capazes de apresentar *RMSE* inferior a 1,50 *m/s* nesse período. Avaliando erros, nesse caso, com valores maiores que 2,50 *m/s*, obtém-se que C2 d01 apresenta o maior número de estações enquadradas nessa situação. Opostamente, C1 d01 e C4 d01 possuem a mesma quantidade de locais com *RMSE* menor ou igual a 2,50 *m/s*, tendo melhor desempenho.

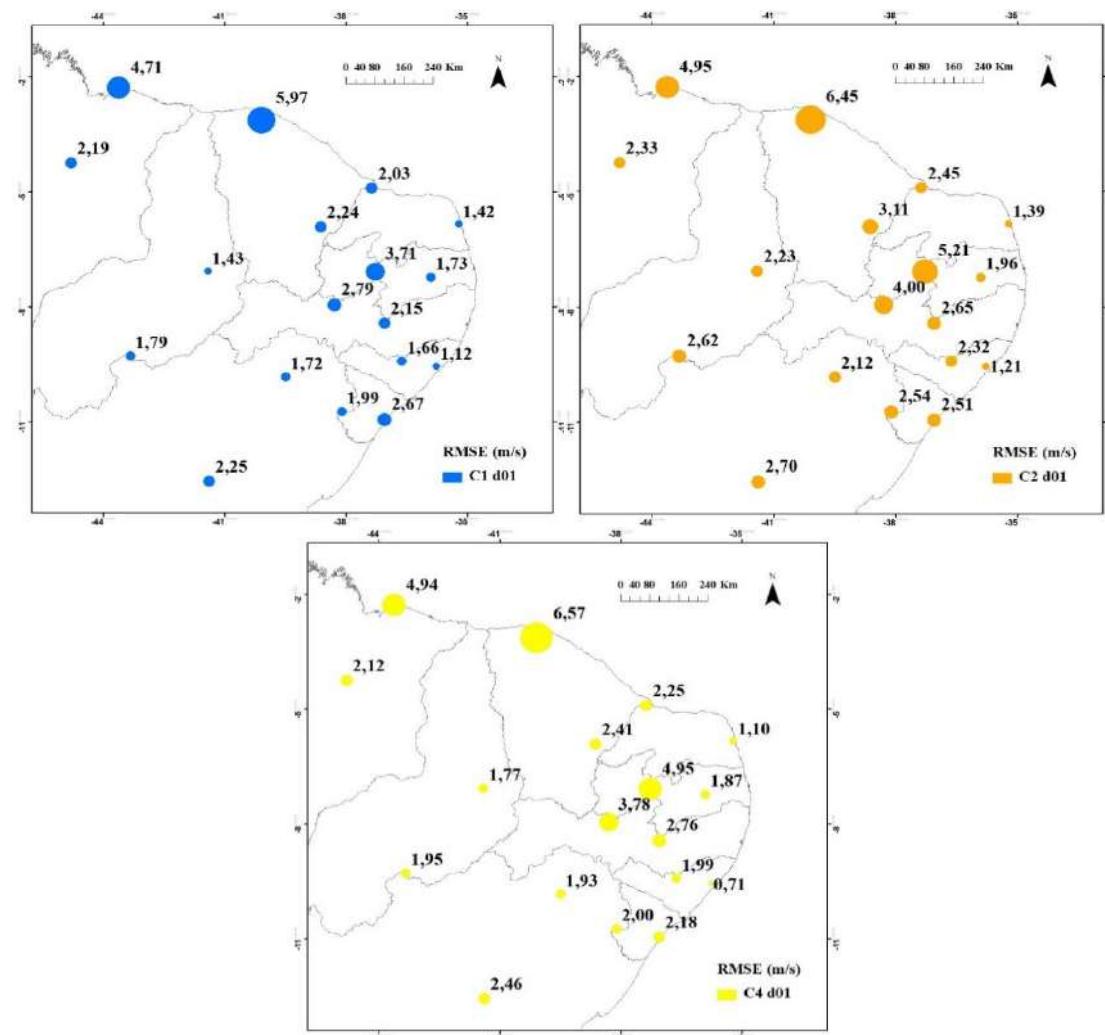


Figura 37: Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de setembro de 2018

A distribuição da *RMSE* considerando as configurações associadas à grade de 3 km do WRF e também as análises do GFS, para a primeira quinzena de setembro de 2018, são ilustradas pela Figura 38. Novamente há uma inclinação aos maiores erros na costa norte do Nordeste e no interior da Paraíba e de Pernambuco. Com C2 d02 e C4 d02 o interior do Ceará também entra nesse grupo. Em todos esses locais, a *RMSE* é superior a 2,50 m/s. C2 d02 é a configuração com maior quantidade de erros nessa circunstância.

Com a resolução de 3 km no referido período de setembro, um número maior de estações consegue obter *RMSE* inferior a 1,50 m/s. Elas se concentram, principalmente, na costa leste do Nordeste. C1 d02 também inclui nessa categoria a estação de Caracol, no sul do Piauí.

Com relação às análises do GFS, a costa norte continua com valores de *RMSE* maiores que 2,50 m/s, mas, no caso interiorano, se reduz à estação de Patos, na Paraíba. Por outro lado, também aponta Aracajú, no litoral de Sergipe, nessa situação. Novamente, a costa leste tem valores inferiores a 1,50 m/s, o que ocorre também na área central do Piauí e no interior do Maranhão. As análises do GFS empatam com C1 d02 no número de pontos com erros superiores a 2,50 m/s, mas o primeiro tem mais estações com *RMSE* inferior a 1,50 m/s que o segundo.

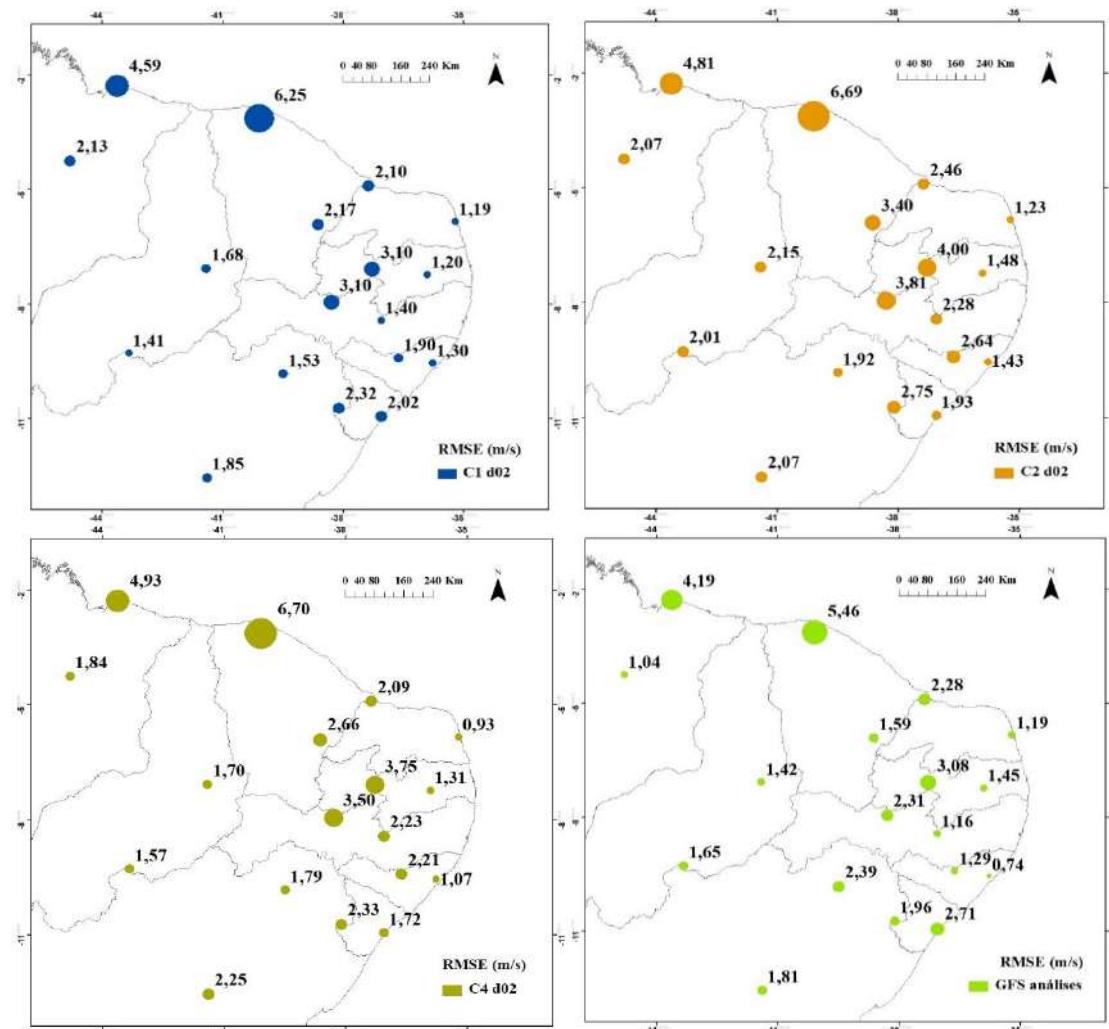


Figura 38: Distribuição espacial da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de setembro de 2018

A Figura 39 traz mapas dos primeiros quinze dias de março e de setembro de 2018, respectivamente, com os menores valores da *RMSE* em cada estação e a indicação de qual das opções utilizadas que a fornece, por meio de diferentes cores.

Ao avaliar o mapa da esquerda, relativo a março, nota-se a predominância das análises do GFS sobre a região de estudo, apontando menores magnitudes de erro na velocidade do vento. Das configurações do WRF, C1 d01 é a que apresenta erros mais baixos em mais locais, todos eles superiores a 1,50 m/s e situados em pontos que as simulações de modo geral tiveram mais dificuldade em representar precisamente a velocidade.

De outra forma, C2 não obteve melhor performance em nenhuma das estações, com nenhum de seus domínios. C4 logrou os menores erros em dois pontos próximos entre si, ao norte da Bahia, com d01, e no litoral de Sergipe, com d02. Ambos os locais com *RMSE* inferiores a 1,50 m/s. C3 d01 alcançou menor erro, também inferior a 1,50 m/s, somente ao norte do Rio Grande do Norte.

Nessa avaliação das menores *RMSE* do período de março, fica notável que as estações de pior representação da velocidade do vento se reúnem, essencialmente, no interior dos Estados da costa leste, entre a Paraíba, a Bahia e Sergipe, e no litoral do Maranhão.

Quando se checa o mapa da direita, concernente a setembro, novamente há predomínio das análise do GFS com os menores valores de *RMSE* sobre o território. C1 ainda é a configuração do WRF com melhor desempenho, porém isso acontece predominantemente com a grade de 3 km. C4 consegue melhores resultados em três pontos, todos na costa leste, também com destaque para a grade filha.

Dentre os menores erros de setembro, também se percebe que a acurácia é pior na costa norte do Nordeste e no interior da Paraíba e de Pernambuco. Dessa maneira, apesar das diferentes grandezas entre as quinzenas de março e de setembro de 2018, é observável que as simulações da velocidade do vento são prejudicadas em áreas significativamente similares do mapa.

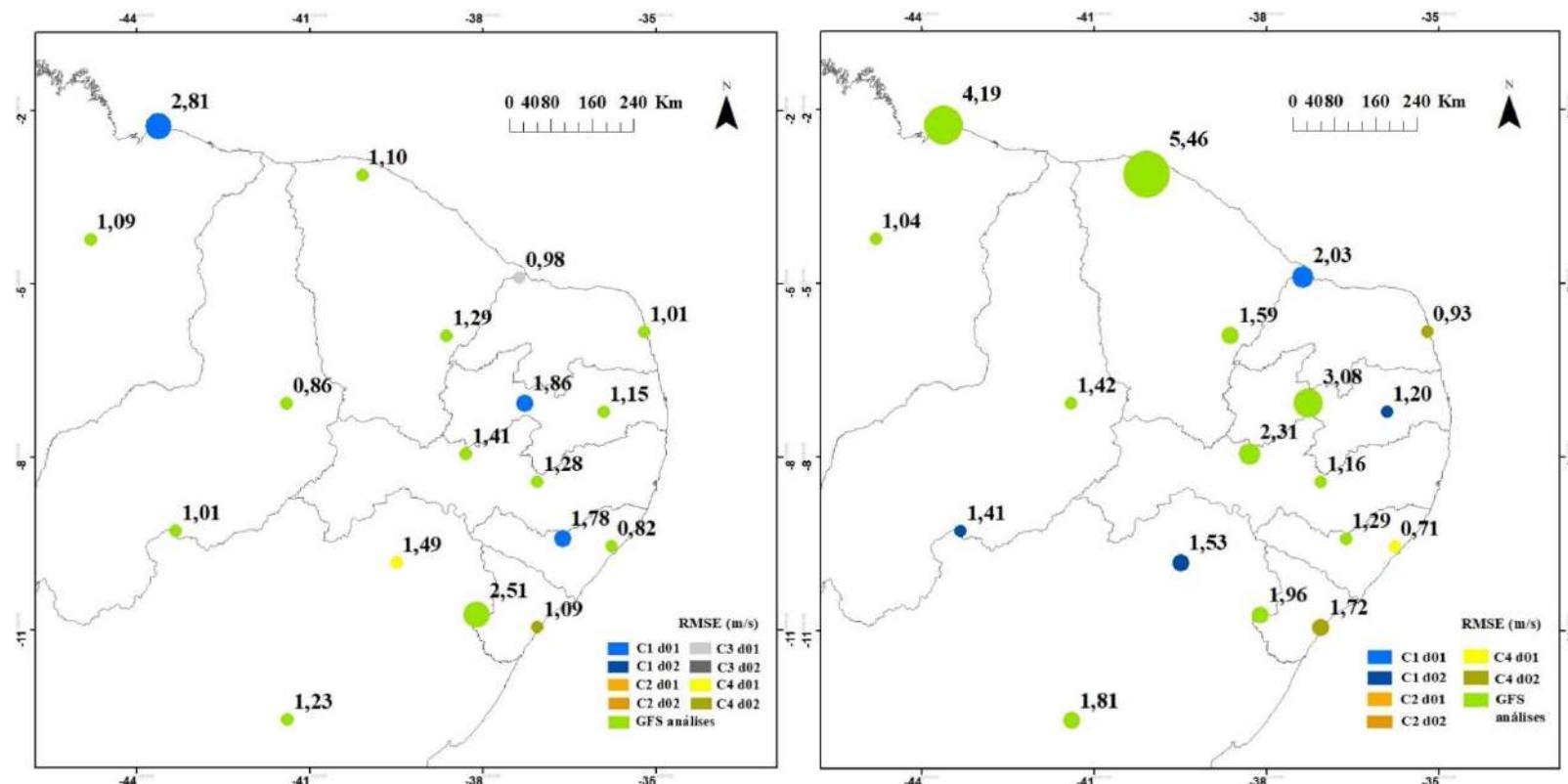


Figura 39: Distribuição espacial das menores Raízes Quadradas do Erro Quadrático Médio RMSE a 10 m de altura e as opções associadas – primeira quinzena de março e de setembro de 2018, respectivamente

#### 4.2.2 Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação

Os Coeficientes de Correlação da velocidade do vento, dos primeiros quinze dias de março de 2018, das configurações do WRF com resolução horizontal de 9 km, são espacialmente dispostos conforme ilustrado na Figura 40.

Averígu-se que as simulações do WRF tendem a ter os maiores Coeficientes no litoral do Nordeste, partindo do Ceará e chegando até Sergipe. Por seu turno, os menores valores de  $r$  são observados sobretudo no Maranhão, incluindo sua costa, no centro do Piauí e no interior dos Estados que fazem parte da costa leste, com destaque para Paraíba, Pernambuco e Alagoas.

A configuração 4, com a grade mãe, consegue, junto com C1, o maior número de estações com  $r$  superior a 0,60. Contudo, a primeira consegue correlacionar mais fortemente os dados observados e os simulados que a segunda, exceto em Campina Grande e em Maceió. Já C2 e C3, além de possuírem quantidade menor de locais que alcançam correlações superiores a 0,60, também têm maior número de estações em que a correlação é inferior a 0,20. Nesse grupo, destaca-se Aracajú, situada no litoral de Sergipe, onde C1 e C4 logram bons resultados.

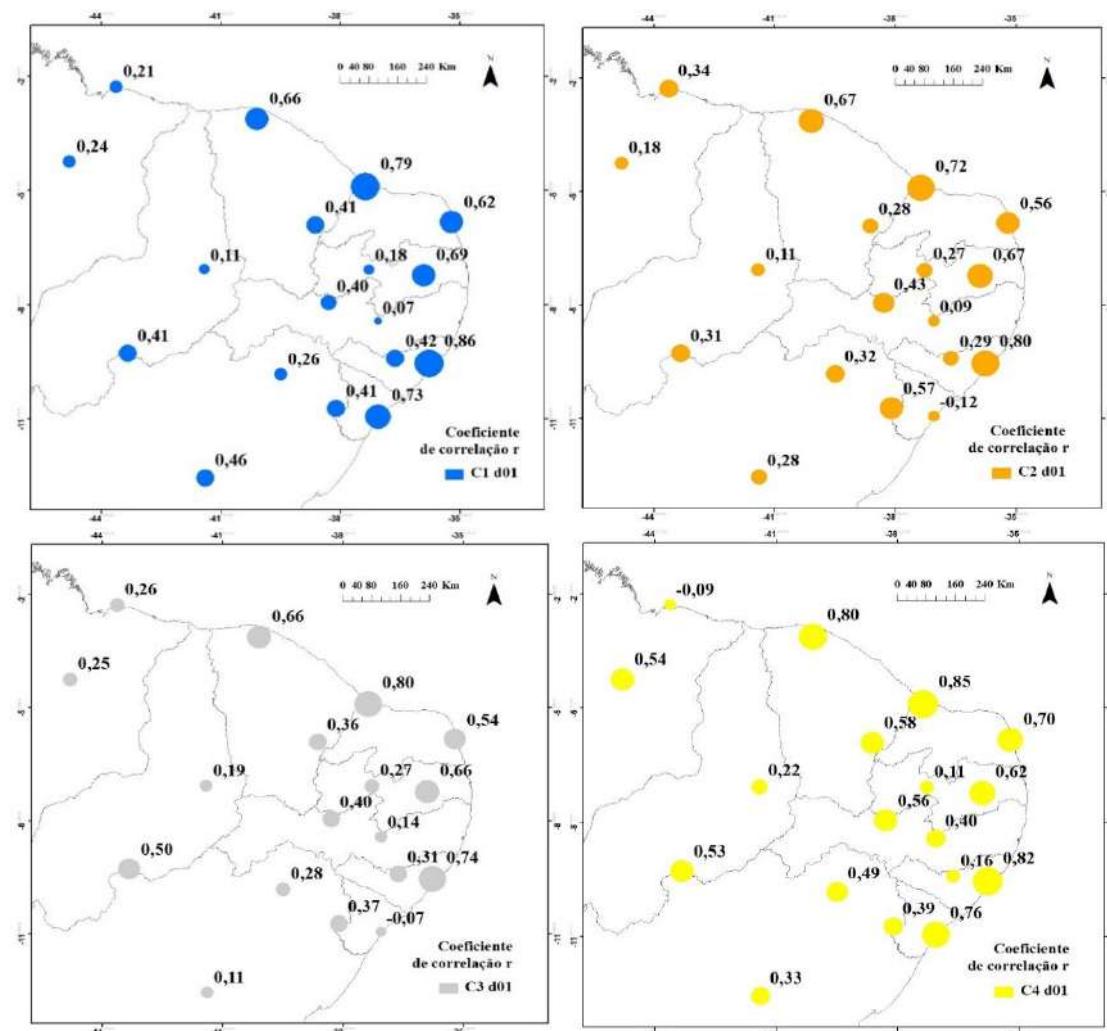


Figura 40: Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação ( $r$ ) a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de março de 2018

A Figura 41 exibe os mapas do Coeficiente de Correlação da velocidade do vento, da primeira quinzena de março de 2018, associados à resolução de 3 km do WRF, bem como aquele referente às análises do GFS.

Assim como observado com a grade de 9 km, a de 3 km também demonstra que as correlações são mais fortemente explicadas pelas simulações do WRF no litoral da Região Nordeste, salvo no Estado do Maranhão. Como também verificado em d01, os Coeficientes mais fracos possuem tendência a ocorrer no litoral do Maranhão, no centro do Piauí e na área mais interiorana entre a Paraíba e Alagoas.

Com d02, é C2 a opção do WRF que mais abriga estações com correlações superiores a 0,60. Em contrapartida, também a configuração que mais reúne ao longo do território correlações inferiores a 0,20. Nesse último quesito, C1 apresenta apenas a estação de Palmeira dos Índios, local esse de fracos coeficientes com todas as opções do modelo, e a estação de Farol Santana.

Os Coeficientes de Correlação das análises do GFS continuam com o padrão observado de serem mais elevados junto ao litoral nordestino. No caso dessas análises do GFS, mesmo a costa do Maranhão é capaz de obter um  $r$  considerável. Ademais, ocorre um crescimento desses coeficientes também na faixa mais interior da área de estudo, onde as representações do WRF apontam mais baixos valores. Nota-se que não há nenhuma localidade com  $r$  inferior a 0,20, sendo a parte central do Piauí o local mais fracamente correlacionado com os dados observados.

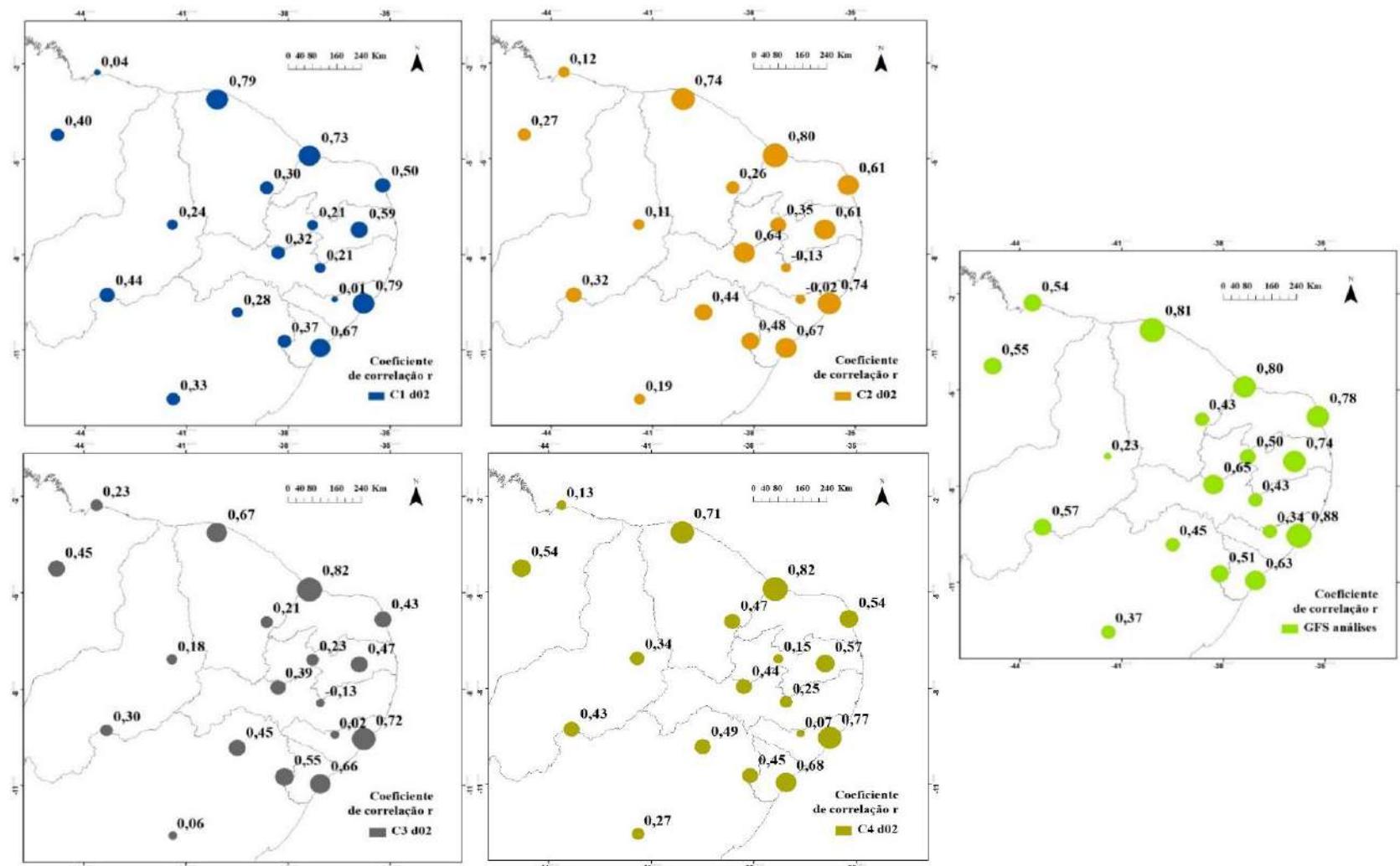


Figura 41: Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação ( $r$ ) a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de março de 2018

A análise espacial do  $r$  da velocidade do vento de cada uma das configurações do WRF com a resolução de 9 km, para os primeiros quinze dias de setembro de 2018, pode ser feita a partir da Figura 42.

Em relação ao intervalo de março, há um notável crescimento da superfície do mapa que possui Coeficientes de Correlação elevados. O Estado do Maranhão melhora significativamente sua correlação, ficando os piores desempenhos localizados, principalmente, na já observada região entre a Paraíba e Pernambuco. Em comparação aos demais sítios, nesse período, o litoral de Sergipe também é fraco ao correlacionar os dados simulados aos observados.

C1 d01 tem a maior concentração de estações com  $r$  superior a 0,60, com 5 locais que não alcançam tal patamar. Por outro lado, C4 d01 tem somente uma estação a mais que a primeira com correlação menor a 0,60. Além disso, C4 possui uma única estação com um Coeficiente inferior a 0,20.

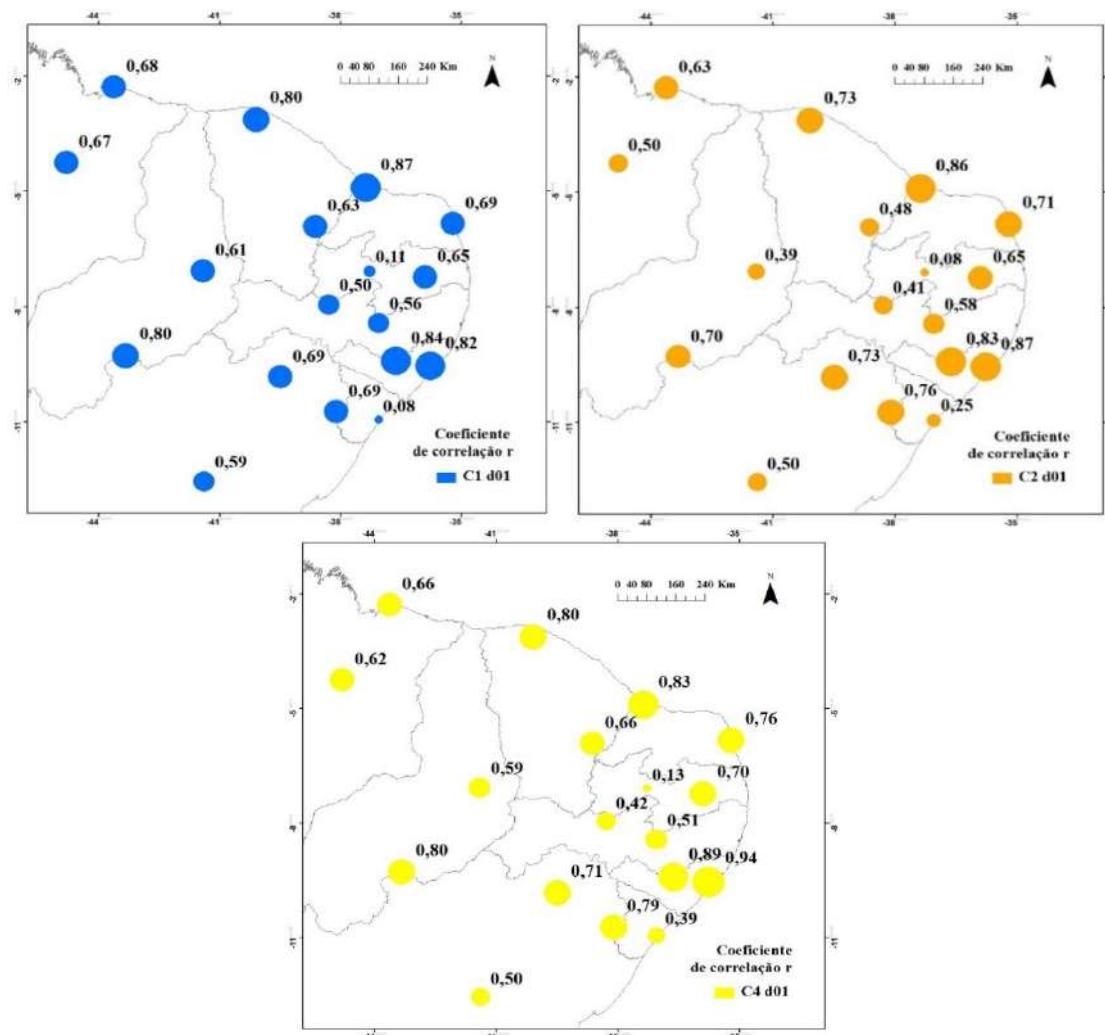


Figura 42: Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação ( $r$ ) a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de setembro de 2018

Na Figura 43 verifica-se a distribuição espacial do  $r$  relativo a velocidade do vento, no mesmo período de setembro de 2018, para os resultados do WRF associados à grade de 3 km e para as análises do GFS.

Nesse caso, um comportamento similar à d01 é observado para as configurações do WRF. A área com Coeficientes de Correlação mais fracos é novamente aquela entre a Paraíba e Pernambuco, como também o litoral de Sergipe. Em d02, ocorre uma queda considerável da performance na estação de Lençóis, mais ao centro da Bahia.

Das opções do WRF, C1 d02 tem o maior número de pontos com  $r$  superior a 0,60. Em compensação, é a configuração que mais tem estações com  $r$  inferior a 0,20. C2 d02 não apresenta nenhum coeficiente menor que esse último valor, mas é a alternativa com maior quantidade de coeficientes espalhados pelo mapa com valores entre 0,20 e 0,60.

As análises do GFS também fornecem Coeficientes mais fracos no litoral de Sergipe, no interior da Paraíba e de Pernambuco, bem como no interior do Ceará e mais ao centro do Piauí. Diminui notavelmente, em relação às simulações do WRF, a correlação no interior do Maranhão e ao norte da Bahia. Opostamente, tem melhor performance em Lençóis, na Bahia, que o modelo WRF. Seis estações possuem  $r$  entre 0,20 e 0,60 e uma possui  $r$  inferior a esse intervalo.

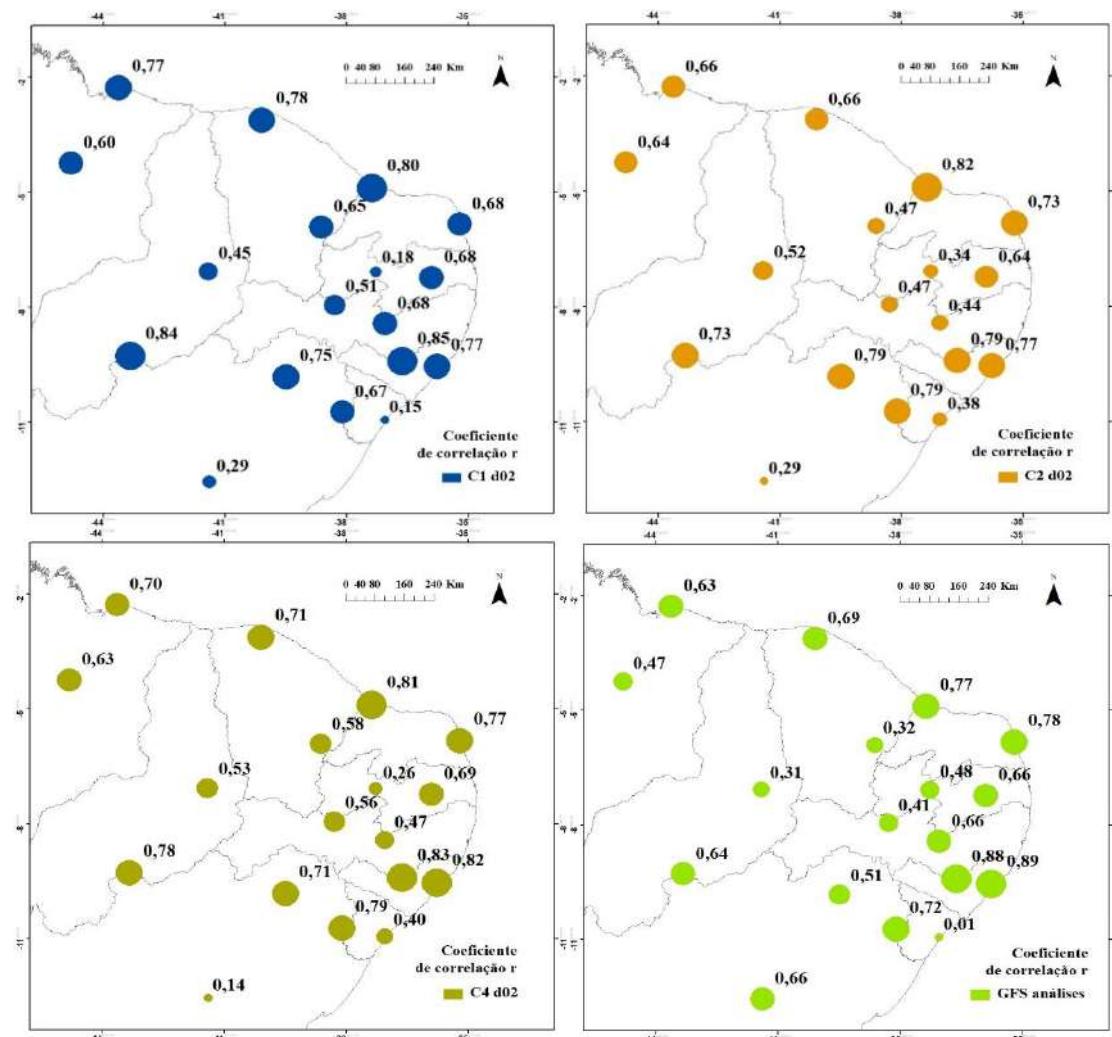


Figura 43: Distribuição espacial do Coeficiente de Correlação ( $r$ ) a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de setembro de 2018

A Figura 44 agrupa os mapas dos maiores Coeficientes de Correlação da velocidade do vento a 10 m de altura, em cada um dos pontos de estudo, para a primeira quinzena de março e de setembro de 2018, nessa ordem. Ressalta-se que, em alguns casos, mais de uma opção avaliada apresentou o mesmo valor para o  $r$  mais alto. Por isso, foi necessário criar cores extras para cada combinação de opções observadas.

Nota-se que, em março, como ocorrido com a *RMSE*, as análises do GFS possuem destaque com as mais elevadas correlações em grande parte do mapa, demonstrando aptidão para o entendimento da variabilidade do ciclo diurno do vento. Nesse mapa, fica evidenciado, outra vez, o direcionamento das mais fortes correlações para o litoral, ao passo que as mais fracas tendem para o interior.

As simulações do WRF concentram as melhores performances majoritariamente na parte inferior da área de estudo: Alagoas, Sergipe e Bahia. C4 também conquista os melhores resultados na faixa entre a região central do Piauí, o interior do Ceará e o norte do Rio Grande do Norte. Enquanto C4 é a opção do WRF que mais aparece no mapa de março, C3 não aparece em nenhum local.

Partindo-se para o mapa da direita, relativo a setembro, verifica-se que são as simulações do WRF que têm predominância sobre os maiores Coeficientes de Correlação, diferentemente do que ocorre com o *RMSE*. Essa superioridade fica dividida, basicamente, entre C1 e C4, com essa configuração tendo mais uma estação de vantagem que aquela. C2 obtém os melhores desempenhos entre o norte da Bahia e o oeste de Sergipe.

Com mais altos entendimentos da variabilidade da velocidade do vento que em março, em setembro avalia-se que, como já notado individualmente para cada opção, as piores representações localizam-se entre o interior da Paraíba e de Pernambuco, assim como no litoral de Sergipe. Todos esses valores são inferiores a 0,60, mas superiores a 0,20. Dessa maneira, nesse período, fortes correlações são mais bem distribuídas por toda a extensão do território.

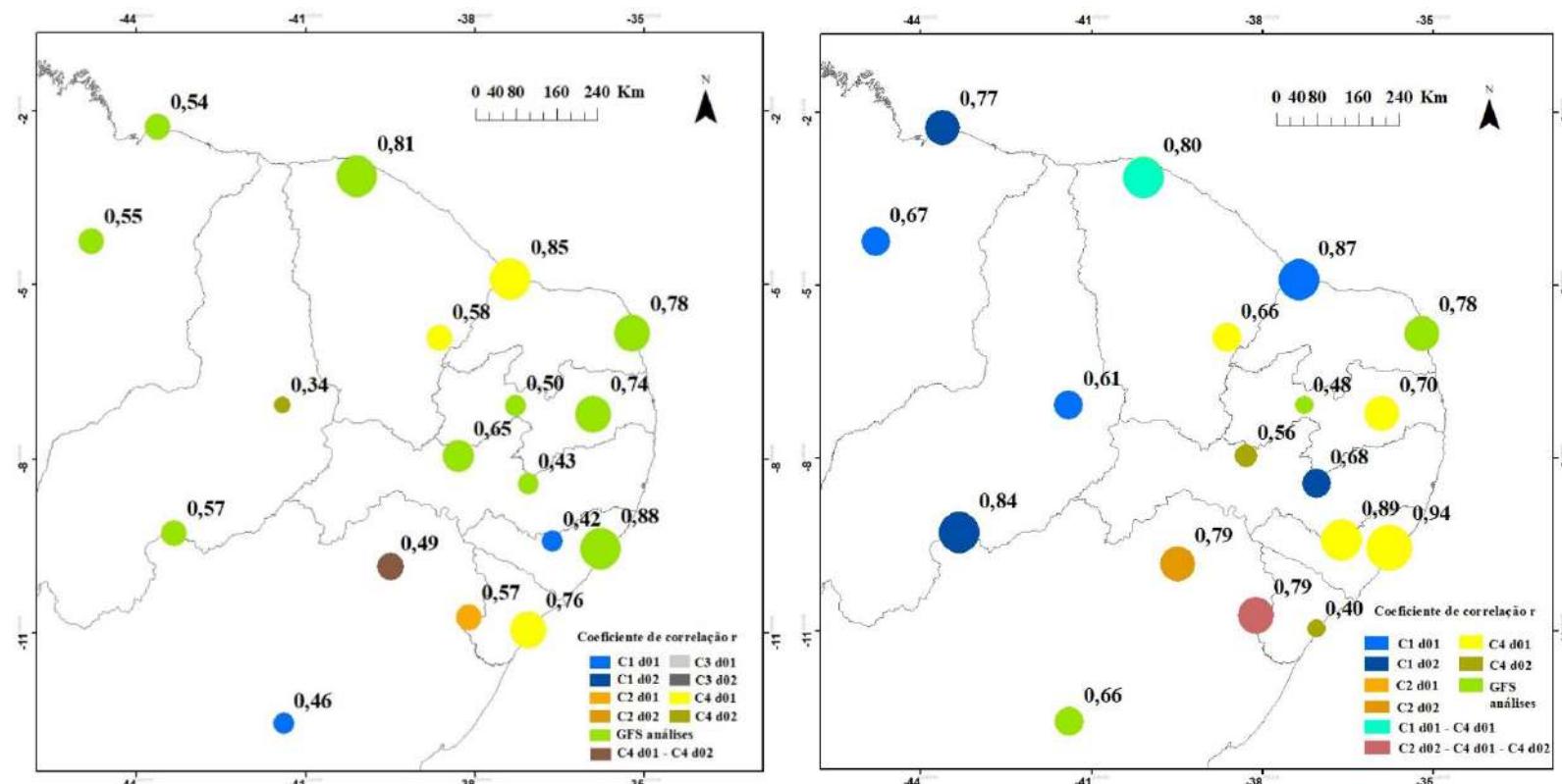


Figura 44: Distribuição espacial dos maiores Coeficientes de Correlação ( $r$ ) a 10 m de altura e as opções associadas – primeira quinzena de março e de setembro de 2018, respectivamente

#### **4.2.3 Distribuição espacial do percentual de octantes errados na indicação da direção do vento**

A disposição territorial dos percentuais de octantes errados na indicação da direção do vento, para a primeira quinzena de março de 2018, se encontra ilustrada na Figura 45, para as grades de 9 km, e na Figura 46, para as de 3 km e para as análises do GFS.

Inicialmente, averiguando a resolução da grade mãe na Figura 45, percebe-se que os erros na direção são, em sua maioria, superiores a 50% sobre grande parte das estações observadas. Assim como verificado para a velocidade do vento, as maiores acuráciais na direção ficam nos pontos litorâneos. Cabem destaque a costa do Maranhão e do Sergipe, que lograram bons indicadores da direção, ao passo que o mesmo não fora observado para a intensidade.

C2 e C3 conseguiram as maiores quantidades de estações com erros inferiores a 50% com d01. Essas configurações também conquistaram os maiores números de pontos com erros inferiores a 30%, ainda que escassos. De outro modo, C1 teve o menor número de pontos com erros inferiores a 50%.

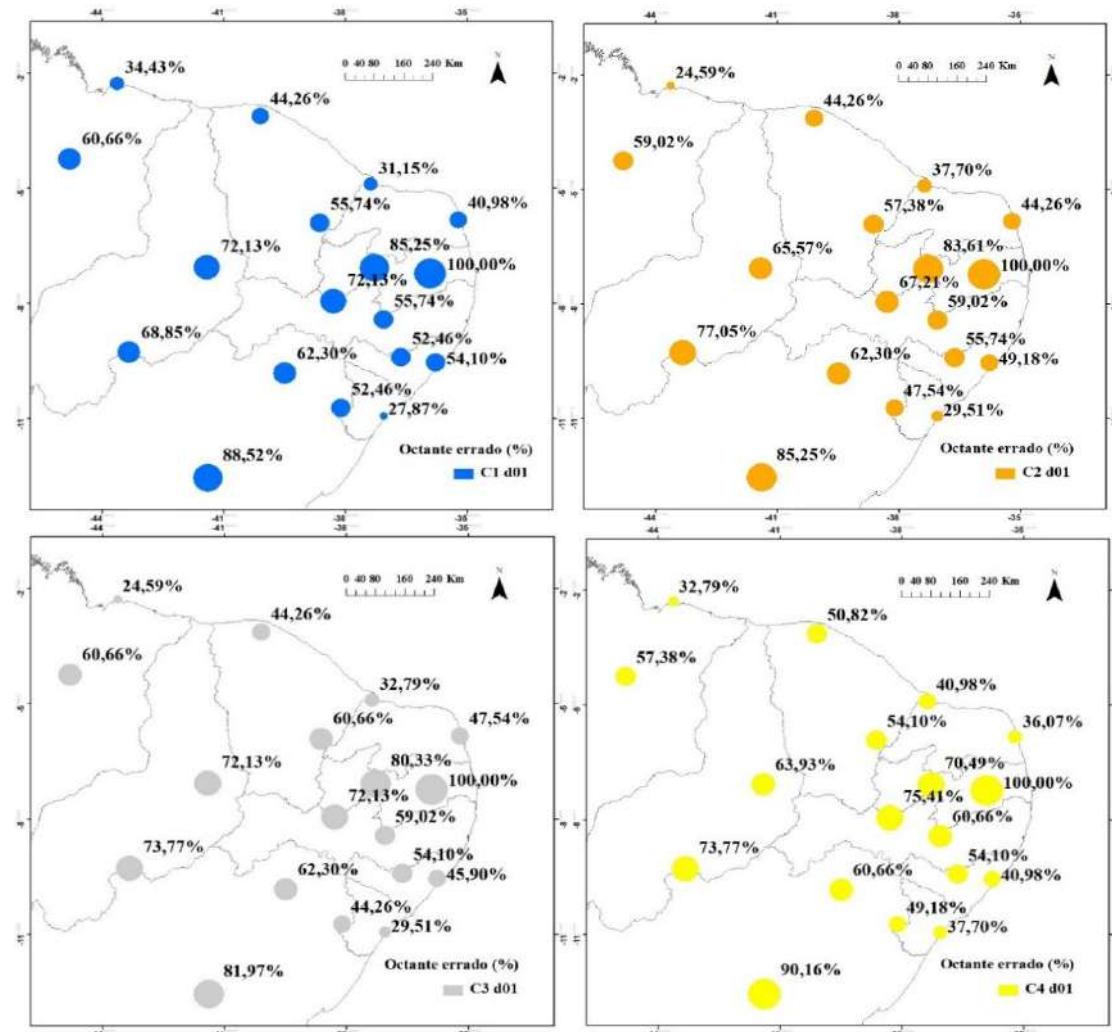


Figura 45: Distribuição espacial do percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de março de 2018

Quando analisada a Figura 46, relativa à resolução horizontal de 3 km, nota-se um padrão similar ao da grade mãe para a disposição dos erros. Uma grande faixa da região fica coberta por erros na direção maiores que 50%. A porção litorânea é também a que abriga os menores percentuais. Novamente, as costas maranhenses e sergipanas tiveram bons desempenhos para a direção do vento.

Todavia, no caso da grade de 3 km, é C4 que obtém um maior grupo de estações com erros inferiores a 50%. As demais configurações do WRF têm os mesmos números de pontos nessa situação. Entretanto, é C3 que possui o maior número de sítios com erros na direção menores que 30%, novamente escassos, ao passo que C4 não tem nenhum.

Por fim, as análises do GFS mantêm a tendência das menores porcentagens de erros no litoral, porém é capaz de adentrar um pouco mais para o interior do Ceará. A faixa litorânea do Maranhão e de Sergipe permanecem nessa melhor condição, sendo os lugares que as análises do GFS obtêm erros inferiores a 30%.

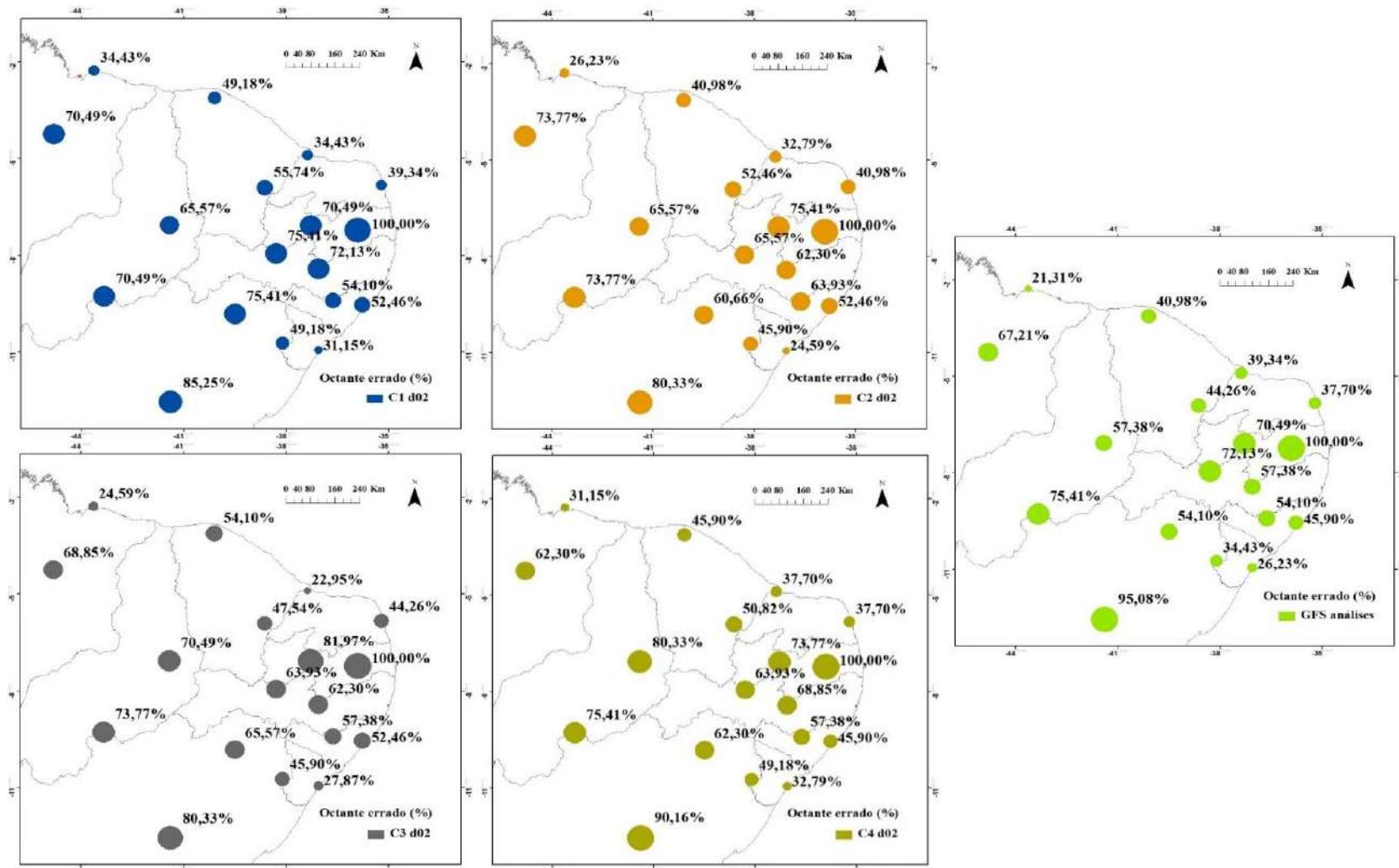


Figura 46: Distribuição espacial do percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de março de 2018

A distribuição espacial dos erros percentuais da indicação do octante da direção do vento, da primeira quinzena de setembro de 2018, associados a resolução de 9 km do WRF, se encontra ilustrada na Figura 47.

Nessa época, há amplificação, partindo do litoral em direção ao interior, da superfície do mapa coberta por erros mais baixos, quando comparado a março. Esse fato acontece principalmente nos Estados da Paraíba, de Pernambuco e ao norte da Bahia. Ressalta-se que, nesse período, o litoral de Sergipe piora sua performance em relação ao mês do primeiro semestre, ao passo que o litoral do Maranhão conserva a representação significativa da direção.

As simulações relativas à C2 alcançaram com d01 o máximo de estações com erros percentuais abaixo de 50%. Contudo, C4 d01 teve a habilidade de obter o maior conjunto de locais com erros menores que 30%.

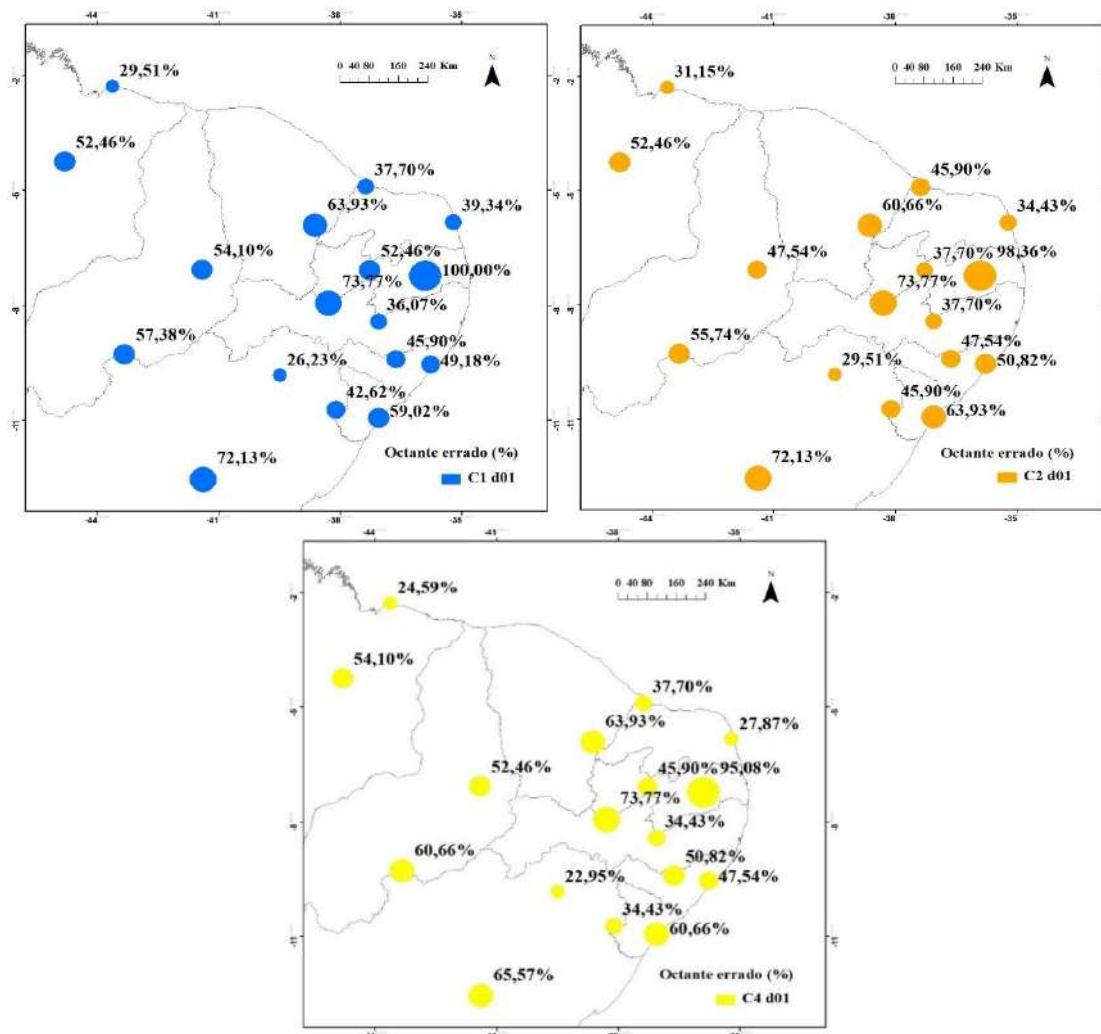


Figura 47: Distribuição espacial do percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de setembro de 2018

De outra forma, a Figura 48 reúne as porcentagens de erros relativos ao octante da direção do vento associadas às configurações do WRF tendo por base o domínio de 3 km de resolução espacial, assim como às análises do GFS, na primeira quinzena de setembro de 2018.

Os resultados das simulações do WRF associados a d02 mantêm a mesma tendência verificada na grade mãe de crescer a faixa das estações, que se inicia no litoral e caminha para o interior, com competência para reproduzir melhores simulações da direção do vento. A costa de Sergipe permanece com percentuais consideravelmente altos e a do Maranhão com valores menores.

Nessa situação, todas as configurações do WRF têm o mesmo número de estações com erros inferiores a 50%. C1 d02 e C2 d02 têm a mesma quantidade de pontos com erros abaixo de 30%, mas a primeira atinge valores iguais ou inferiores aos da segunda.

Já as análises do GFS, de novo, aumentam em relação a março a área mais para o interior que abriga menores porcentagens de erro, como é verificado no interior do Piauí, parte da Paraíba e de Pernambuco, norte da Bahia e oeste de Sergipe. Por outro lado, o litoral desse último e o de Alagoas, que antes possuíam erros mais baixos, em setembro elevam esses valores.

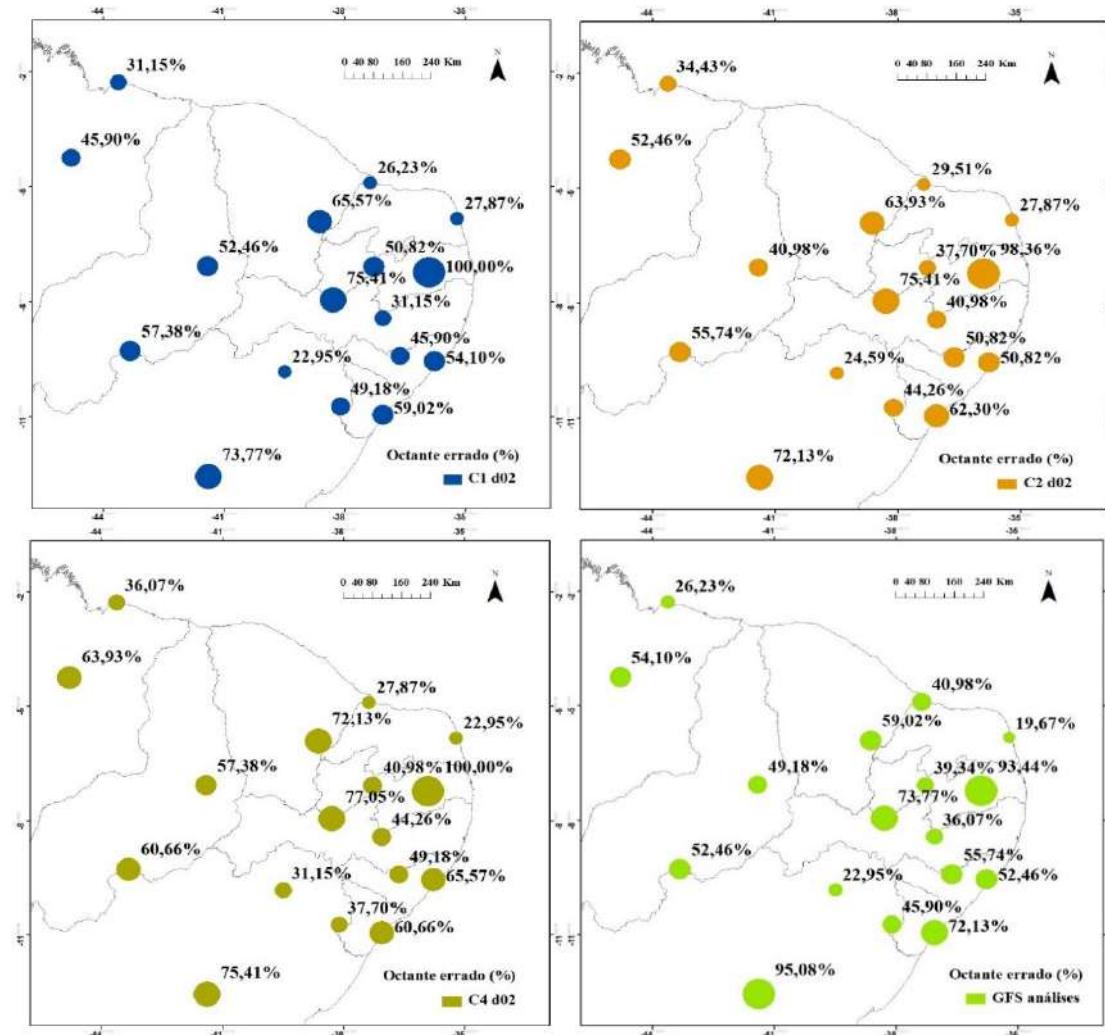


Figura 48: Distribuição espacial do percentual de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de setembro de 2018

A seleção dos menores percentuais de erros na indicação do octante da direção do vento e a opção associada, para a primeira quinzena de março e de setembro de 2018, estão espacialmente representadas, nessa ordem, na Figura 49. Aqui, cabe frisar que algumas configurações e/ou as análises do GFS atingiram juntas os resultados mais baixos do erro e, para que fosse possível representar esse tipo de situação graficamente, foram adicionadas novas cores à legenda.

O esquema de março permite verificar significativa heterogeneidade nas opções que têm os menores valores de erro sobre o mapa. Contudo, as análises do GFS aparecem em mais regiões do território, seja isoladamente, seja em conjunto com alguma outra alternativa.

É interessante notar que a maior parte das localidades que ficam junto ao oceano possuem as melhores performances com alguma das configurações do WRF, indicando ser uma zona que o modelo consegue representar com maior acurácia. Das configurações do WRF, C4 é a que mais predomina sobre a superfície de estudo.

Além disso, o litoral é a região de menores erros de modo geral, salvo o interior do Sergipe que merece destaque para o desempenho significativo. Os mais elevados percentuais, como também já notado para a velocidade do vento, tendem a se concentrar no interior, sobretudo entre a Paraíba, Pernambuco, mais ao centro da Bahia e sul do Piauí.

Pela análise da imagem referente a setembro de 2018, constata-se mais uma vez um perfil heterogêneo dos melhores desempenhos da direção do vento sobre a área de estudo. Nesse caso, há um empate entre as análises do GFS e a configuração 4 do WRF sobre o maior número de pontos com os percentuais mais baixos de erro.

Bem como verificado em março, as estações localizadas no litoral possuem, sobretudo, menores erros com alguma das configurações do WRF, embora essas adentrem também mais para o interior no segundo mês. Nesse sentido, as porcentagens da indicação do octante errado da direção são maiores em uma área mais reclusa no interior da Região Nordeste que no mês anterior. Salienta-se ainda que a costa norte, até a fronteira entre o Ceará e o Rio Grande do Norte, tem, em setembro, erros de direção inferiores à costa leste.

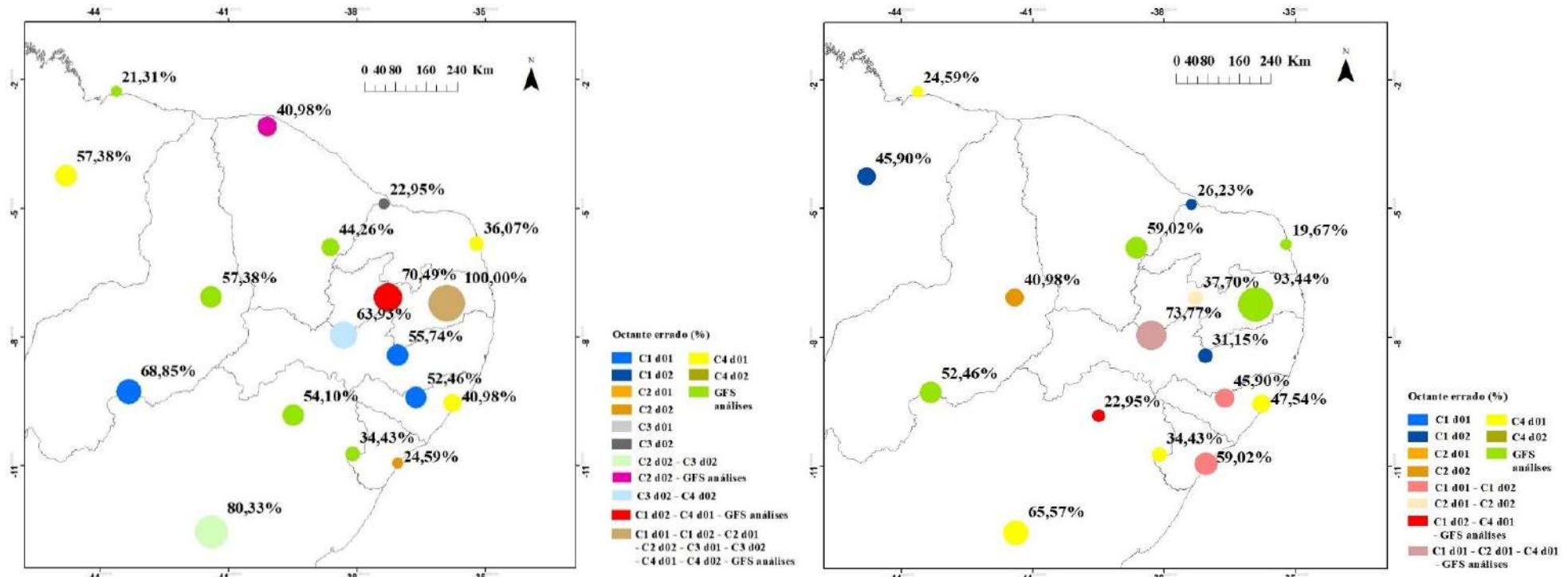


Figura 49: Distribuição espacial dos menores percentuais de octantes errados da direção do vento a 10 m de altura e as opções associadas – primeira quinzena de março e de setembro de 2018, respectivamente

#### 4.2.4 Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos na indicação da direção do vento

Ao tratar os erros na direção do vento para além dos octantes vizinhos, a Figura 50 ilustra o mapa da disposição espacial desses valores conforme as configurações do WRF na resolução de 9 km, para o intervalo temporal dos primeiros quinze dias de março de 2018.

Além da evidente queda nas porcentagens de erro do octante correto para o octante vizinho, observa-se que os resultados mais elevados se reduzem a uma pequena extensão do mapa. Prioritariamente, é o interior da Bahia, em sua região mais central, e o interior da Paraíba e de Pernambuco, que abarcam as menores acurácia. Essas áreas também tiveram dificuldade em simular com acurácia os dados relativos à velocidade do vento.

C2, C3 e C4, com o domínio 01, conseguiram o menor número de estações com erros superiores a 50%, se limitando a dois com cada opção. De mesmo modo, essas três configurações obtiveram o maior e igual número de estações com erros inferiores a 10%. Esses menores erros além dos octantes vizinhos convergem para o litoral do Nordeste, tanto a costa norte quanto a leste, mas também incluem o interior do Ceará e de Alagoas. Dessa maneira, o litoral tende a ter uma boa representação do vento pelo modelo, não só pela sua direção, mas também pela sua velocidade, como percebido através da *RMSE* e do *r*.

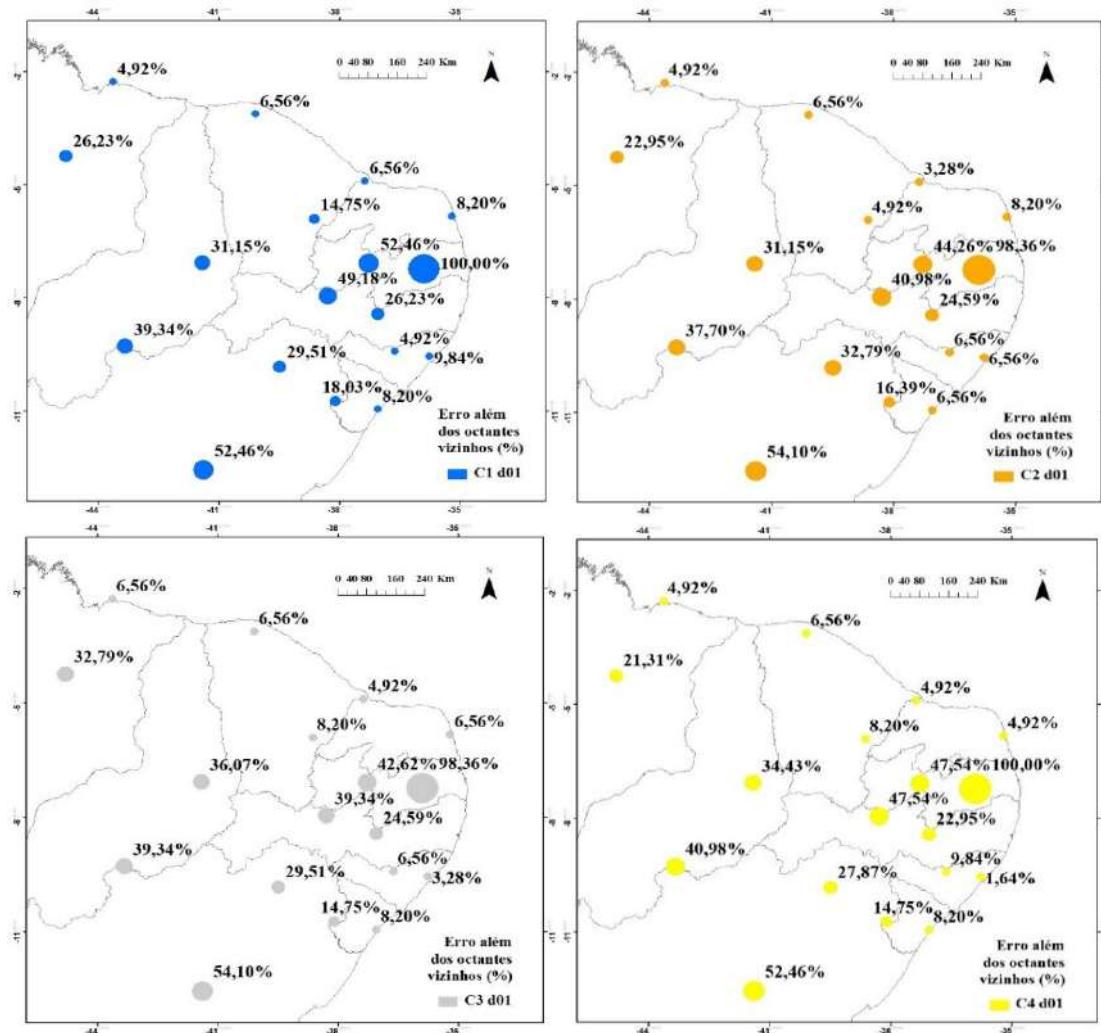


Figura 50: Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de março de 2018

A Figura 51, por sua vez, traz os mapas da distribuição espacial dos erros além dos octantes vizinhos da direção do vento, relativos a março, ligados à grade de 3 km do WRF e às análises do GFS.

Averíguase que a porção do mapa tendente a abrigar os maiores erros permanece similar àquela observada com a grade de 9 km, ou seja, o interior da Bahia, da Paraíba e de Pernambuco. No entanto, nota-se que ocorre certa queda nessas magnitudes ao redor de Campina Grande – PB, local ainda com altos erros, de d01 para d02. Em contrapartida, em Lençóis – BA, há ligeiro aumento percentual.

Todas as configurações do WRF obtiveram duas estações com porcentagens acima de 50%. Já com relação a quantidade de locais com erros menores que 10%, o destaque ficou com C1 d02, que apresentou o maior conjunto de pontos nessa situação. Nesse caso, o padrão de localização dos melhores e piores desempenhos do modelo, sobre a direção do vento, acompanha aquele notado com a grade mãe.

Finalmente, as análises do GFS têm uma disposição dos erros semelhante as simulações do WRF. O litoral abriga os erros mais baixos, incluindo valor nulo na costa do Ceará, ao passo que o interior da Bahia, mais para seu centro, e entre a Paraíba e Pernambuco ficam com os piores desempenhos. Os percentuais maiores que 50% se mantêm nos mesmos locais que aqueles indicados pelas reproduções do WRF. Já as localidades com erros menores que 10% se expandem também para o interior de Alagoas e Sergipe.

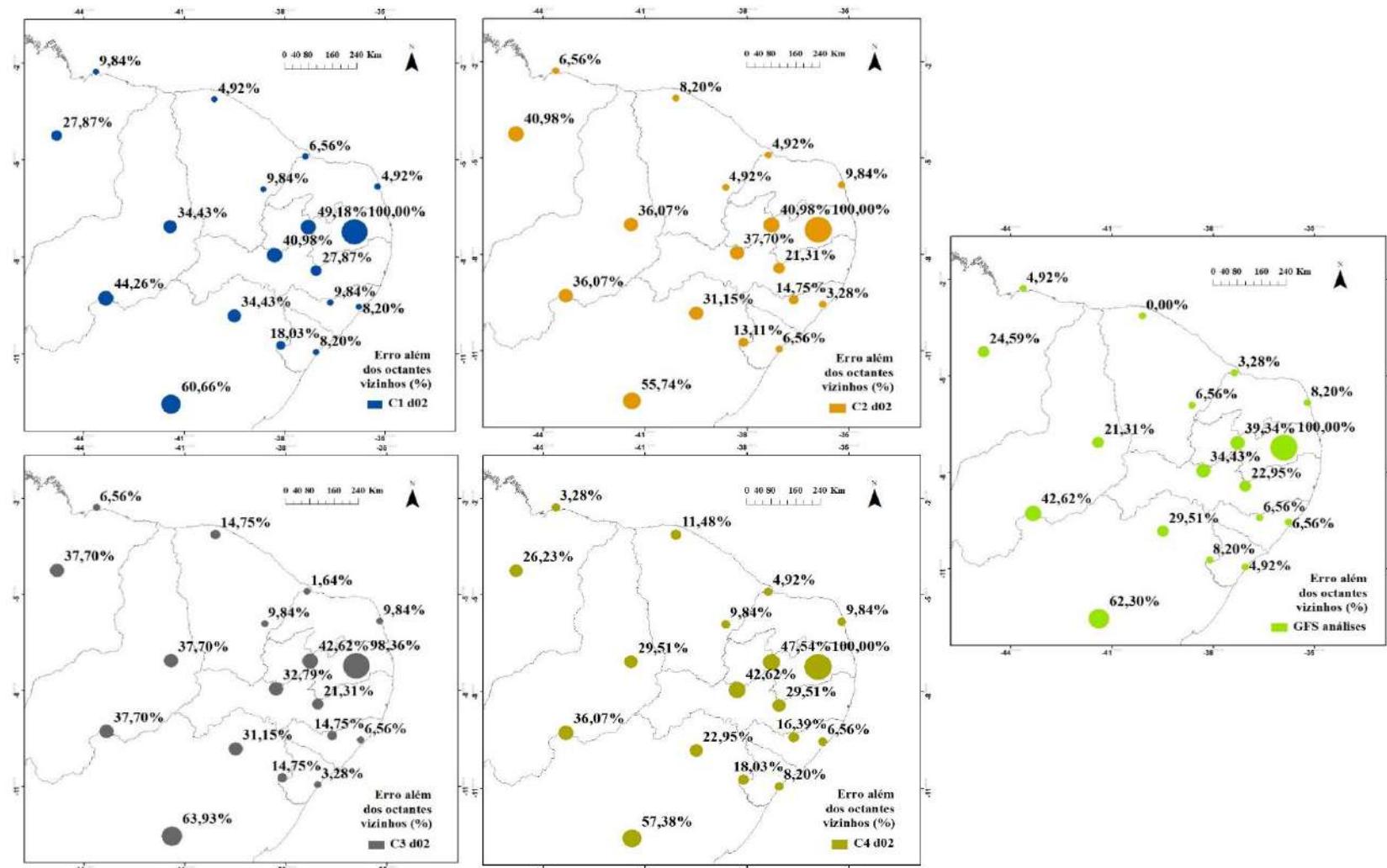


Figura 51: Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de março de 2018

A Figura 52 apresenta o comportamento espacial dos erros além dos octantes vizinhos da direção do vento, de C1, C2 e C4, com a resolução de 9 km, para a primeira quinzena de setembro de 2018.

É possível analisar a significante diminuição dos erros em comparação aos valores encontrados para a indicação do octante exato da direção. Como em março, os erros além dos octantes vizinhos têm maior grandeza no interior da Paraíba e de Pernambuco, bem como mais ao centro da Bahia. Por outro lado, esses erros em setembro são mais brandos, inferiores a 40%, enquanto no mês anterior eram superiores. Além disso, nota-se um crescimento de pontos em que o erro é nulo ou próximo disso, principalmente na costa norte até Natal.

C4 d01 é a configuração em que mais sítios possuem erros menores que 30%. Em compensação, C2 d01 tem mais erros iguais a 0%, demonstrando que, quando ela não aponta o octante correto, aponta um de seus vizinhos.

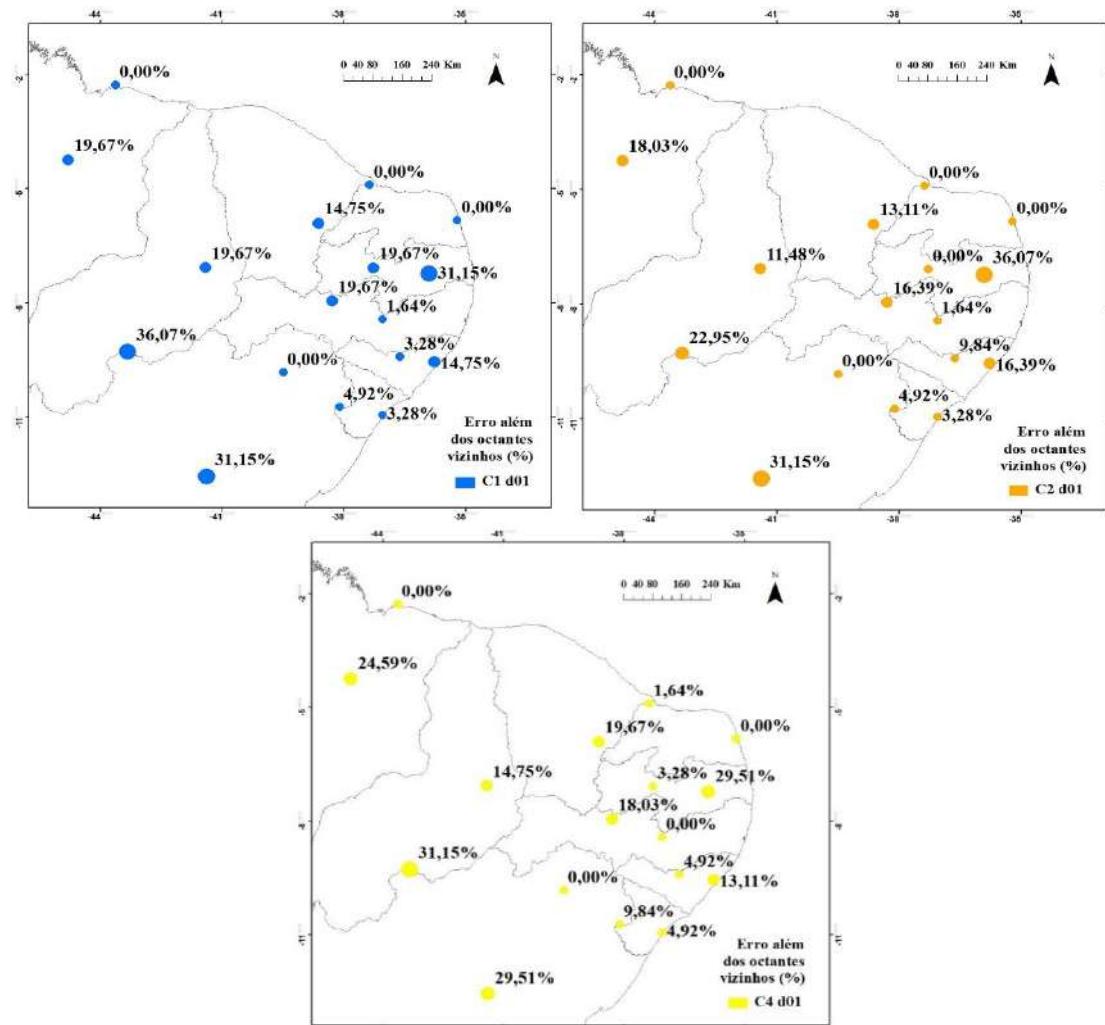


Figura 52: Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 9 km do WRF - primeira quinzena de setembro de 2018

De outra forma, a Figura 53 permite visualizar a distribuição dos erros da direção do vento além dos octantes vizinhos ao real para a resolução de 3 km do WRF, com cada uma das configurações utilizadas, bem como para as análises do GFS, nos primeiros quinze dias de setembro de 2018.

As configurações do WRF, com a grade filha, têm, em relação à grade mãe, uma inclinação a reduzir o erro na Bahia, convergindo a menor acurácia basicamente à estação de Campina Grande, onde o percentual é maior que 35%. Caracol, no Piauí, também tende a apresentar erros superiores a 30%, exceto na simulação referente à C2. Os demais sítios ficam abaixo desse patamar, porém é notável a acurácia do litoral nordestino, mais uma vez. O litoral norte continua sendo capaz de errar menos a direção do vento.

Apesar de desempenhos semelhantes entre si, C4 tem o maior número de erros iguais a 0%, empatando com C1, porém o erro máximo daquela é inferior ao dessa última. Com isso, repete-se em d02 a tendência das simulações do WRF, vista em setembro com d01, de apresentarem resultados para os erros além dos octantes vizinhos relativamente uniformes entre suas configurações, ao longo do território.

As análises do GFS já têm, em Campina Grande, erro mais baixo que as simulações do WRF. Contudo, mais ao centro da Bahia as análises do GFS não conseguem um bom desempenho, tendo representação menos fidedigna que as simulações do modelo de mesoescala. Novamente é a costa norte que abriga a maior concentração de erros nulos da direção do vento.

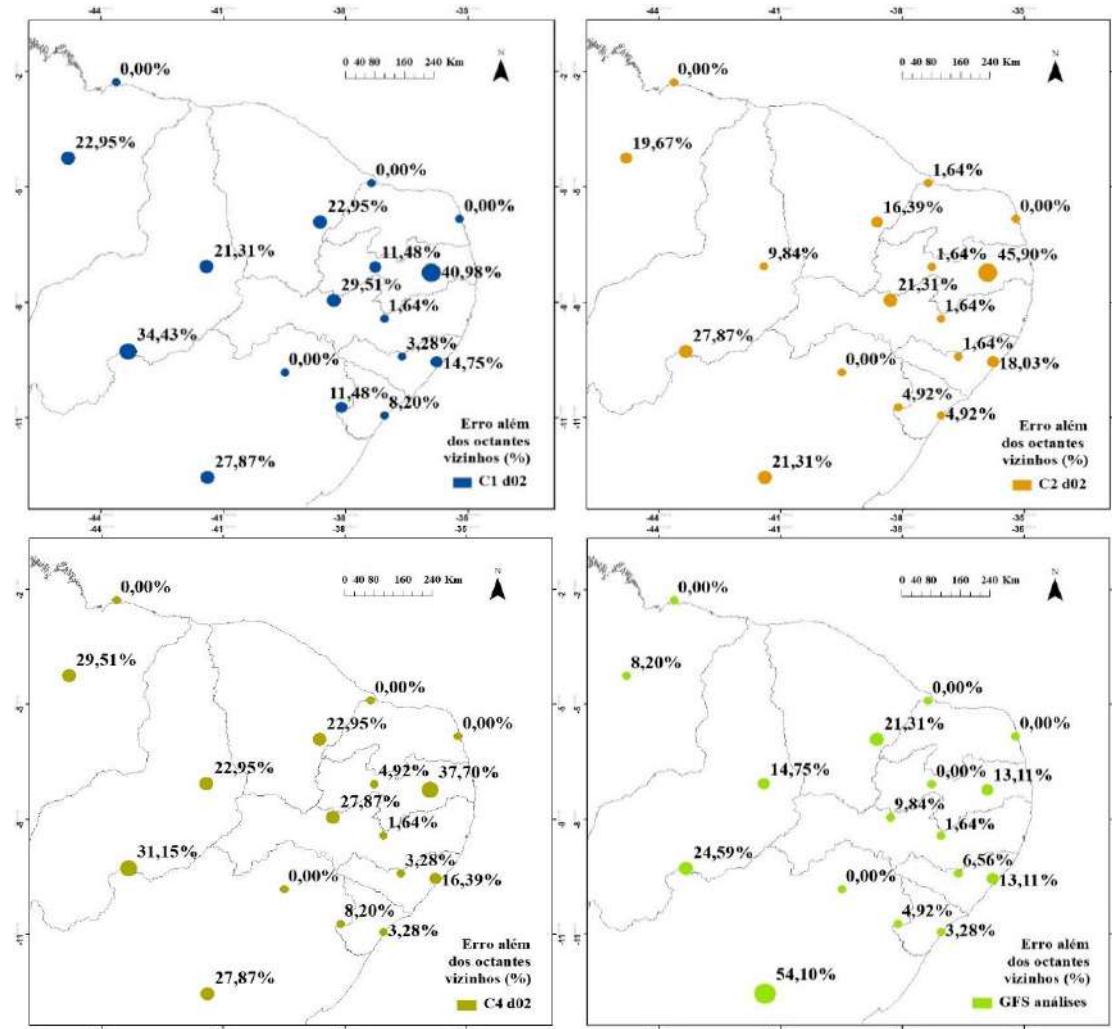


Figura 53: Distribuição espacial do percentual de erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura considerando a grade de 3 km do WRF e as análises do GFS - primeira quinzena de setembro de 2018

Por fim, a Figura 54 agrupa os mapas da distribuição dos menores percentuais de erro para além dos octantes vizinhos da direção do vento, a 10 m, em cada um dos pontos de observação. Da esquerda para a direita, a primeira representação é referente aos primeiros quinze dias de março de 2018, e a segunda, ao mesmo período de setembro de 2018. As diferentes cores simbolizam as opções avaliadas que atingem os melhores desempenhos e, no caso de haver mais de uma opção nessa situação, uma nova cor é adicionada à legenda.

Assim, observa-se que, no mapa de março, ao longo da superfície de estudo existe grande variabilidade de configurações que obtêm maior acurácia ao simular a direção do vento. Ademais, muitos pontos têm mais de uma opção com o mesmo resultado. É C4 a escolha que mais tem estações com melhores desempenhos, superando as análises do GFS.

As regiões litorâneas tendem a possuir os menores erros, sobretudo na costa norte. Caminhando para o interior, a direção do vento tem queda em sua representação. Todavia, isso é mais discrepante em Campina Grande, em que C2 e C3 conseguem melhor performance, porém ainda muito próxima de 100% de erro, e em Lençóis, onde C1 e C4 estão associadas às melhores simulações da direção. Assim, verifica-se que em locais de erros mais elevados, são as simulações do WRF que mais se aproximam dos dados observados.

Tratando-se de setembro, há significativa habilidade de se obter erros inferiores a 10% na maior parte da área de estudo. Nesse período também ocorre variabilidade relevante das opções que chegam aos melhores valores e muitos são os locais em que isso ocorre com mais de uma alternativa. A configuração 2 do WRF é a que mais consegue se espalhar sobre a região com os menores erros percentuais de mais de um octante.

Como percebido em março, e continuando o direcionamento das simulações do WRF nesse sentido, o litoral logra simulações com resultados próximos à realidade para a direção do vento. O interior da Paraíba, mais especificamente Campina Grande, já não tem erros expressivos, porém são as análises do GFS que mais acertam. O interior de Pernambuco também reduz seus percentuais. A faixa entre o sul do Piauí e o centro da Bahia é a que ainda tende a permanecer com representações piores, em comparação ao restante do território. Todavia, essa porção não atinge nem 25% de erro e é o WRF que a melhor simula.

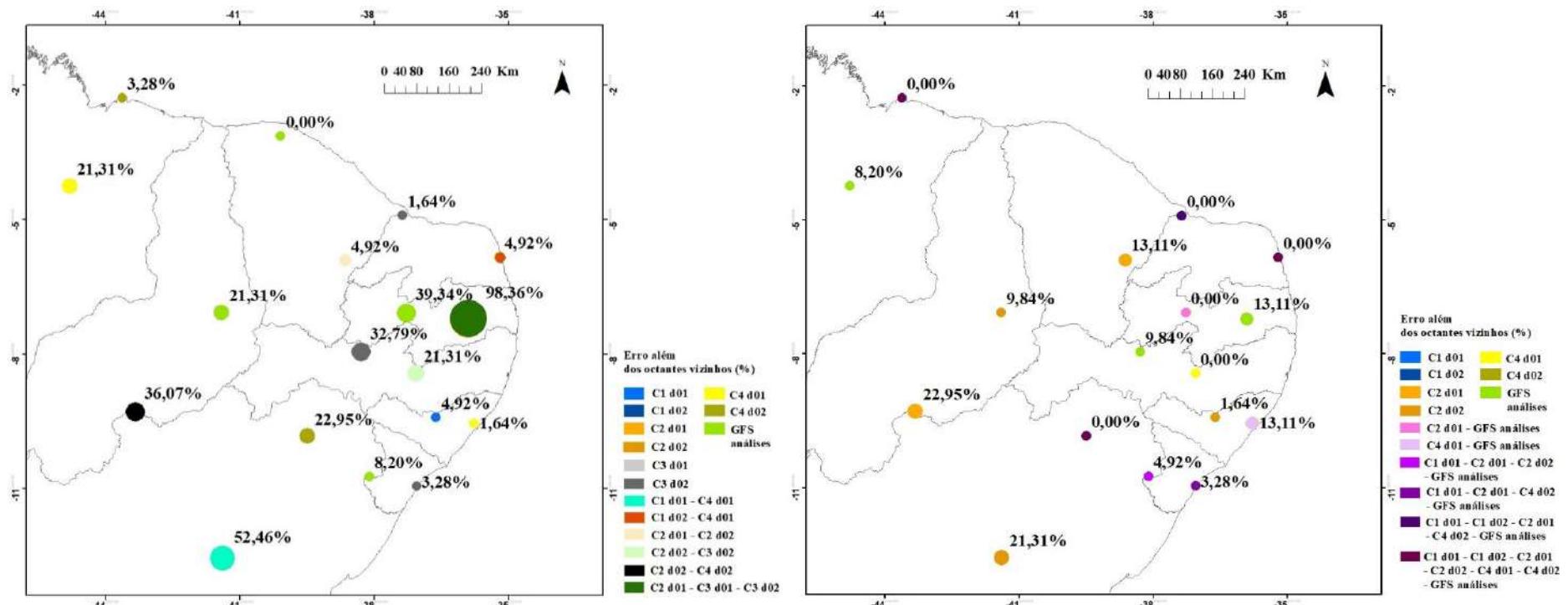


Figura 54: Distribuição espacial dos menores erros além dos octantes vizinhos da direção do vento a 10 m de altura e as opções associadas – primeira quinzena de março e de setembro de 2018, respectivamente

#### **4.3 Aprofundamento das análises sobre a velocidade do vento: Erro Percentual Absoluto Médio**

A fim de avaliar se os *Bias* e *RMSE* elevados, ligados à velocidade do vento, poderiam estar sendo impactados pela própria intensidade do vento na região, e assim não traduzindo de fato a habilidade do modelo em representá-la, foi acrescentado às análises o Erro Percentual Absoluto Médio. Assim, o *MAPE* entra com a função de mostrar o quanto as simulações se distanciam do vento observado.

Dessa forma, foram criadas tabelas tanto para o *MAPE* associado aos diferentes pontos a 10 m de altura como para aquele relativo às alturas de 52 e 98 m, na localização da TMA usada nesse trabalho. Junto ao erro, para melhor compreensão das informações, estão a velocidade média observada do vento e a velocidade média observada ajustada, quando necessário, para cada período, além da quantidade de dados que precisaram ser ajustados. Como as demais análises, essas também foram feitas de 6 em 6h, para cada uma das configurações do WRF e para as análises do GFS.

Desse modo, a Tabela 18 permite analisar o *MAPE* da primeira quinzena de março de 2018 a 10 m de altura, associados a cada uma das estações do INMET. É possível observar que os sítios que necessitaram ter dados de velocidade do vento ajustados de 0 para 0,5 *m/s*, tendem a ter erros mais altos, sendo, com isso, mais difícil para o modelo precisar ventos de baixas magnitudes.

Como verificado territorialmente nos mapas da distribuição espacial ligados à velocidade do vento, os Erros Percentuais Absolutos Médios são menores, dentro de todo o grupo, especialmente no litoral nordestino, a partir do Ceará e seguindo até Sergipe. A exceção fica com Jaguaribe – CE e Campina Grande – PB, que estão situados mais ao interior de seus Estados. Fica destacado o mau desempenho, em comparação às demais opções, de C3 em Campina Grande – PB, Natal – RN e Aracajú – SE.

Ainda conforme avaliado nos mapas das estatísticas da velocidade do vento, as estações da Bahia, ambas com dados ajustados, tiveram performances de baixa fidedignidade. Ademais, os pontos do Maranhão tiveram erros superiores a 100% com todas as alternativas usadas e repetiram as baixas acurácia evidenciadas nos mapas. Ressalta-se que Farol Santana – MA, localizada no litoral, não necessitou ajustar nenhum dado e, ainda assim, teve resultados elevados para o *MAPE*. As estações fora da costa

entre a Paraíba e Sergipe também mantêm o padrão observado anteriormente de erros altos. Por fim, Caracol – PI, que teve uma quantidade considerável de dados ajustados, apresentou valores de *MAPE* indo de quase 200% até mais de 400%.

Além disso, ocorre inclinação do modelo, como também já verificado pelos gráficos de barra e pelos mapas, a possuir Erros Percentuais Absolutos Médios superiores quando utilizada a resolução espacial de 3 km, indicando ter sido a grade de 9 km, no período, mais representativa em boa parte dos casos.

Por derradeiro, as análises do GFS representam a possibilidade que agrega o maior número de erros relativos inferiores sobre a velocidade do vento, corroborando o desempenho mais apropriado, na primeira metade de março de 2018, dessas análises. Vale ainda salientar que, dos 8 sítios que precisaram ajustar seus dados para o cálculo do *MAPE*, 4 deles têm os menores erros com as análises do GFS. Os demais ficam distribuídos entre C1, C3 e C4.

Dentre as simulações do WRF, aquela que tem sua melhor performance sobre um maior número de locais, avaliando o *MAPE*, é C4. C2, de modo oposto, não consegue ter o menor percentual de erro em nenhum dos pontos, com nenhum dos domínios, confirmando também seu baixo potencial de representar a velocidade do vento nessa época.

Tabela 18: Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

Estação	Quantidade de dados ajustados	Velocidade média do vento - dados observados (m/s)	Velocidade média do vento - dados observados ajustados (m/s)	MAPE								
				C1 d01	C2 d01	C3 d01	C4 d01	C1 d02	C2 d02	C3 d02	C4 d02	GFS análises
Maceió - AL	0	3,37	-	38%	52%	110%	43%	66%	80%	149%	64%	<b>31%</b>
Palmeira dos Índios - AL	3	2,70	2,73	<b>130%</b>	226%	208%	189%	272%	340%	301%	251%	142%
Lençóis - BA	11	0,76	0,85	421%	594%	426%	559%	375%	572%	417%	405%	<b>282%</b>
Uauá - BA	3	2,74	2,76	143%	146%	141%	<b>87%</b>	147%	114%	99%	100%	118%
Aracauí - CE	0	2,54	-	62%	78%	66%	<b>59%</b>	66%	73%	61%	75%	71%
Jaguaribe - CE	0	2,59	-	57%	77%	64%	51%	68%	84%	79%	64%	<b>50%</b>
Bacabal - MA	19	0,95	1,11	293%	380%	275%	252%	293%	391%	271%	275%	<b>189%</b>
Farol Santana - MA	0	3,18	-	<b>100%</b>	125%	104%	133%	142%	153%	139%	144%	117%
Campina Grande - PB	0	3,02	-	<b>40%</b>	56%	60%	48%	46%	59%	148%	57%	44%
Patos - PB	3	2,06	2,08	<b>143%</b>	194%	176%	169%	177%	189%	183%	152%	180%
Arco Verde - PE	1	2,38	2,38	155%	181%	122%	113%	83%	175%	140%	85%	<b>73%</b>
Serra Talhada - PE	0	2,32	-	83%	129%	113%	<b>82%</b>	122%	145%	144%	107%	98%
Picos - PI	0	1,65	-	73%	99%	66%	76%	90%	116%	81%	75%	<b>45%</b>
Caracol - PI	7	1,47	1,52	294%	422%	262%	311%	223%	411%	291%	237%	<b>182%</b>
Mossoró - RN	0	2,77	-	62%	84%	<b>47%</b>	66%	94%	96%	59%	74%	122%
Natal - RN	0	2,85	-	53%	59%	113%	41%	48%	46%	126%	<b>39%</b>	41%
Aracajú - SE	0	3,40	-	49%	54%	119%	34%	50%	51%	131%	<b>32%</b>	72%
Poço Verde - SE	15	2,09	2,21	471%	479%	<b>397%</b>	425%	430%	593%	401%	522%	434%

Partindo para o intervalo temporal da primeira quinzena de setembro de 2018, verifica-se novamente, através da Tabela 19, que as estações que demandaram ajustes de seus dados de velocidade do vento têm valores elevados de *MAPE*. A maioria delas também necessitaram de modificações em março. As diferenças ficam em Uauá – BA, que em março teve 3 dados observados iguais a 0 m/s e em setembro nenhum, e em Aracaú – CE, que em setembro passou a ter um dado modificado de 0 para 0,5 m/s.

Pode-se observar que as porcentagens mais baixas do erro se concentram na região mais litorânea do Nordeste, em especial entre o Rio Grande do Norte e Alagoas, se estendendo um pouco para o interior na Paraíba, em Pernambuco e no norte da Bahia, como verificado em Campina Grande, Arco Verde e Uauá. Nos mapas de distribuição espacial associados à velocidade do vento, salvo Uauá, o litoral leste também fora a fração do território de maior destaque na representação do vento.

Todavia, os Coeficientes de Correlação da velocidade do vento a 10 m, foram, nesse período, altos em Caracol, no Piauí, enquanto que seu *MAPE* ficou entre os piores resultados. Ressalta-se que esse local necessitou de ajustes na velocidade do vento para a obtenção do Erro Percentual Absoluto Médio, o que influencia negativamente seu valor.

Além de Caracol, evidencia-se que o *MAPE* tem suas mais altas porcentagens sobretudo na costa norte, adentrando também para o interior do Maranhão, e na faixa que vai desde mais a oeste da Paraíba, de Pernambuco e de Alagoas, finalizando sobre todo o Estado de Sergipe. Por fim, a região mais central da Bahia, simbolizada pela estação de Lençóis, se inclui entre as menores acurácia. Esses resultados vão ao encontro do que fora espacialmente averiguado pelos mapas da seção 4.2.

Uma localidade particularmente se sobressai sobre as demais na primeira quinzena de setembro de 2018. Apesar de possuir apenas um dado ajustado, Aracaú, no Ceará, apresenta valores de *MAPE* que ultrapassam os 3000%, com qualquer uma das opções avaliadas, se caracterizando como um *outlier* dentro da amostra. Suas altas magnitudes ocorreram igualmente ao aplicar o *Bias* e a *RMSE*.

Com isso, percebe-se que tanto as simulações do WRF como as análises do GFS se distanciam consideravelmente dos dados observados fornecidos em Aracaú. Por outro lado, o Coeficiente de Correlação nesse local é elevado, revelando que, apesar da diferença de magnitude da velocidade do vento, as simulações conseguem acompanhar a variabilidade do seu ciclo diurno. Vale atentar que essa estação possuía dados de direção

do vento ausentes em setembro, levantando a possibilidade de que a medição da velocidade do vento também tenha sido de alguma forma afetada.

Diferentemente de março, em setembro houve maior heterogeneidade entre as performances com a grade de 9 e de 3 km. Apesar disso, há tendência de, nessa quinzena, a grade filha obter resultados mais fidedignos. Conduta similar foi diagnosticada com o *Bias* e a *RMSE* desse momento.

No mês do segundo semestre, C1 que ocupa a colocação de alternativa que mais contempla os percentuais inferiores do *MAPE*. C2, como em março, não tem o melhor desempenho em nenhum dos pontos observados. Dentre os sítios que careceram de ajustes em seus dados, foi C1 mais uma vez que mais se aproximou dos dados medidos e as análises do GFS conseguiram o mesmo em Lençóis – BA e Bacabal – MA, dois dos três lugares que tiveram pelo menos dez modificações em seus dados para a obtenção do *MAPE*.

Tabela 19: Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) da velocidade do vento a 10 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018

Estação	Quantidade de dados ajustados	Velocidade média do vento - dados observados (m/s)	Velocidade média do vento - dados observados ajustados (m/s)	Velocidade								
				MAPE	MAPE	MAPE	MAPE	MAPE	MAPE	MAPE	MAPE	GFS análises
		C1	C2	C4	C1	C2	C4	d01	d01	d01	d02	d02
Maceió - AL	0	2,78	-	55%	63%	<b>29%</b>	69%	83%	50%	33%		
Palmeira dos Índios - AL	4	2,61	2,65	<b>71%</b>	132%	116%	105%	147%	125%	73%		
Lençóis - BA	17	0,80	0,94	407%	519%	472%	352%	398%	528%	<b>340%</b>		
Uauá - BA	0	4,93	-	36%	45%	41%	<b>29%</b>	40%	36%	50%		
Aracauá - CE	1	0,18	0,19	<b>3061 %</b>	3684%	3587%	3450%	3957%	3881%	3275%		
Jaguaribe - CE	0	3,16	-	66%	116%	72%	67%	124%	84%	<b>52%</b>		
Bacabal - MA	10	1,45	1,54	208%	278%	181%	211%	227%	175%	<b>142%</b>		
Farol Santana - MA	0	3,88	-	124%	131%	129%	119%	126%	128%	<b>110%</b>		
Campina Grande - PB	0	3,77	-	40%	47%	45%	<b>30%</b>	37%	35%	38%		
Patos - PB	1	4,64	4,65	81%	155%	145%	<b>76%</b>	121%	109%	94%		
Arco Verde - PE	0	4,08	-	58%	76%	79%	31%	64%	63%	<b>24%</b>		
Serra Talhada - PE	0	3,26	-	85%	136%	127%	101%	129%	116%	<b>70%</b>		
Picos - PI	0	2,73	-	<b>58%</b>	114%	71%	78%	86%	62%	69%		
Caracol - PI	5	2,81	2,85	151%	255%	171%	<b>130%</b>	194%	144%	150%		
Mossoró - RN	0	4,32	-	48%	63%	53%	<b>47%</b>	65%	48%	63%		
Natal - RN	0	4,90	-	28%	29%	21%	22%	25%	<b>17%</b>	25%		
Aracajú - SE	0	2,59	-	136%	130%	106%	97%	94%	<b>80%</b>	140%		
Poço Verde - SE	16	2,60	2,73	<b>142%</b>	249%	161%	181%	250%	199%	183%		

Pela comparação entre a Tabela 18 e a Tabela 19, analisa-se a queda, de maneira geral, nos percentuais dos Erros Percentuais Absolutos Médios de março para setembro de 2018, indo em sentido oposto à avaliação feita para o *Bias* e para a *RMSE*. Isso sinaliza que o tendente crescimento do Erro Médio e da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio no segundo mês estão significativamente relacionados ao aumento na intensidade do vento nessa época. A própria velocidade média do vento observado, presente em ambas as tabelas, traz essa confirmação, visto que, na maioria dos casos, ela sobe de um mês para o outro.

Dentro de cada período, de outro modo, há um movimento maior de interação entre as regiões com *Bias* e *RMSE* mais elevados e aquelas de maiores *MAPE*. Tal fato, por seu turno, reafirma que os dois primeiros erros são superiores em função da falta de habilidade do modelo para representar precisamente a velocidade do vento nessas áreas.

Quanto ao *MAPE* nas alturas de 52 e 98 m, referente aos dados da TMA da Brennand Energia, situada no norte da Bahia, a Tabela 20 agrupa seus valores para a primeira metade de março de 2018, segundo cada uma das configurações do WRF e segundo as análises do GFS. Como nenhum dos dados eram equivalentes a 0 *m/s*, não houve ajustes e, consequentemente, apenas a velocidade média observada foi adicionada à referida tabela.

Bem como mostrado na Tabela 18, os erros percentuais de março são notadamente elevados e, tanto a 52 como a 98 m, todos superiores a 100%. Além disso, são as análises do GFS que obtêm os melhores desempenhos. Porém, a 98 m de altura, C4 d01 atinge a mesma acurácia dessas análises. Vale ressaltar que C4, juntamente com C1, consegue o segundo menor erro a 52 m, os dois com d02.

Salvo no caso da configuração 3, nas duas alturas observadas, e da configuração 4 a 98 m, há erros inferiores com a grade de 3 km, o que difere da tendência majoritária observada nas estações a 10 m de altura. De outra maneira, essa mesma tendência acontece com o *Bias* e a *RMSE* referentes a localização da TMA nos dois níveis avaliados.

Em contrapartida, pela avaliação da Tabela 21, verifica-se que os primeiros quinze dias de setembro de 2018 têm *MAPE* de mais baixas magnitudes que março, tanto a 52 como a 98 m de altura. Ao mesmo tempo, o intervalo referente ao segundo semestre de 2018 eleva suas velocidades médias observadas, assim como o *Bias* e a *RMSE*.

Nesse sentido, acompanhando o que acontece nas diferentes estações do INMET, no segundo mês de observação o Erro Médio e a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio são impactados pelo crescimento da intensidade do vento, não refletindo uma baixa qualidade das simulações do WRF. Também não houve necessidade de nenhum ajuste aos dados medidos para representação do *MAPE*.

Em setembro, as análises do GFS possuem os menores erros percentuais tanto a 52 como a 98 m. No primeiro patamar, C1 d01 e C2 d01 que ficam com o segundo menor *MAPE*, ao passo que no segundo nível, esse posto é somente de C2 d01. Todas as opções do WRF têm erros percentuais mais baixos para a velocidade do vento ao considerar a resolução espacial de 9 km, seguindo o *Bias* e a *RMSE*.

Por fim, comparando as duas alturas, em março ocorre aumento do *MAPE* com a elevação de 52 para 98 m em todas as opções avaliadas. Essa mesma disposição acontece com o *Bias* e a *RMSE*. De maneira distinta, em setembro, o *MAPE* diminui com o aumento da altura, exceto com as análises do GFS, em que permanecem iguais. Esse comportamento difere, na maioria das opções, para o que se verifica com o *Bias* e o *RMSE*. Somente C2 d02 diminui o Erro Médio com a altura e C4 d01 não muda a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio.

Tabela 20: Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de março de 2018

Altura (m)	Quantidade de dados ajustados	Velocidade média do vento - dados observados (m/s)	MAPE								MAPE GFS análises
			MAPE C1 d01	MAPE C2 d01	MAPE C3 d01	MAPE C4 d01	MAPE C1 d02	MAPE C2 d02	MAPE C3 d02	MAPE C4 d02	
52	0	3,21	145%	132%	134%	117%	116%	125%	148%	116%	<b>92%</b>
98	0	3,35	193%	178%	189%	<b>134%</b>	150%	173%	195%	160%	<b>134%</b>

Tabela 21: Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) da velocidade do vento a 52 e 98 m de altura - primeira quinzena de setembro de 2018

Altura (m)	Quantidade de dados ajustados	Velocidade média do vento - dados observados (m/s)	MAPE								MAPE GFS análises
			MAPE C1 d01	MAPE C2 d01	MAPE C4 d01	MAPE C1 d02	MAPE C2 d02	MAPE C4 d02	MAPE C1 d02	MAPE C2 d02	
52	0	8,26	46%	46%	48%	56%	57%	53%	24%	24%	
98	0	8,97	43%	42%	46%	52%	51%	50%	24%	24%	

#### 4.4 Análise topográfica

A presente seção objetiva complementar as avaliações de sensibilidade do WRF, no que diz respeito aos dados de vento, por meio da verificação da representação da topografia utilizada no modelo. Dessa maneira, a Figura 55 ilustra cartograficamente a diferença entre as cotas fornecidas pelo MDE utilizado, de resolução equivalente a 90 m aproximadamente, e as cotas aplicadas pelo WRF para representar a topografia da região, de cerca de 1 km de resolução.

Os tons avermelhados do mapa representam diferenças positivas, significando que a representação do WRF indica uma altimetria inferior àquela do Modelo Digital. Em contrapartida, as tonalidades voltadas para o azul simbolizam diferenças negativas, ou seja, a topografia usada pelo WRF dá uma cota superior àquela do MDE. A cor marfim aponta as faixas em que o MDE e a topografia representada no WRF mais se assemelham.

Assim, pode-se verificar através da Figura 55, uma maior predominância da coloração azulada. Em outras palavras, a tendência geral é de que o WRF fornece uma cota mais elevada que o MDE, sendo a média da diferença altimétrica sobre toda a área equivalente a -2 m e seu desvio padrão igual a 65 m.

Na faixa mais próxima ao Oceano Atlântico, sobretudo onde estão situadas as estações utilizadas no presente estudo, a altimetria utilizada no WRF é predominantemente melhor representada, visto sua cor voltada para o marfim. Essa região também possui, de modo geral, capacidade de simular com maior acurácia a velocidade e a direção do vento.

De outra forma, o interior da Paraíba e de Pernambuco, área que apresentou performances dominadamente fracas de velocidade e direção do vento, congrega uma maior heterogeneidade de cores. Patos, por exemplo, fica sobre uma extensão em que a representação topográfica do WRF utiliza cotas superiores ao MDE.

Campina Grande, diferentemente, se localiza sobre uma porção do mapa em que há diferença positiva leve, ou seja, a topografia empregada no WRF é inferior àquela do MDE. Contudo, o ponto está muito próximo a uma zona com indicação negativa da altura. Essa mudança na representação topográfica pelo WRF pode acabar impactando no fluxo atmosférico sobre esse local, prejudicando seu desempenho nas simulações.

Serra Talhada, outro sítio que obteve baixa acurácia em seus resultados, se situa sobre uma região de heterogeneidade de cores, em tons mais leves, sendo esse ponto especificamente de variação negativa (azul), porém muito próximo a áreas positivas (vermelhas). Assim como em Campina Grande, essa irregularidade na topografia pode prejudicar a dinâmica do vento no local, levando a um desempenho ruim do modelo.

Similarmente, Santos *et al.* (2016) indicaram, na localidade de Triunfo – PE, Município vizinho à Serra Talhada, baixa resolução do terreno no WRF, suavizando as condições topográficas em relação à realidade. No entanto, os autores chegaram a resultados subestimados de velocidade do vento na região, o que vai em sentido oposto ao observado no presente trabalho, em que somente se notam resultados superestimados.

Lençóis, na Bahia, que também foi identificado como uma localidade de baixa fidedignidade nos resultados das simulações do WRF, se inclui no grupo de estações que se situam em uma faixa de variação de diferença altimétrica entre positiva e negativa e, com isso, deve contribuir para uma simulação inexata do vento nessa região.

Poço Verde, em Sergipe, teve desempenhos ruins da velocidade do vento, principalmente em março, e entra na mesma situação dos pontos anteriores, ficando em uma área de alternância entre uma topografia super e subestimada.

Cabe ressaltar que as posições consideradas como os locais das estações, para extração dos dados simulados de vento, são os pontos de grade mais próximos a elas. Logo, nessas zonas em que há significativa variabilidade na topografia, com tendência a sua má representação, uma pequena distinção entre as coordenadas pode levar a erros maiores que os reais, visto não ser esse ponto a exata localidade de onde foram coletados os resultados do modelo.

Apesar de ser observada ligação entre pontos que se posicionam em extensões de baixa regularidade na representação da topografia e suas respectivas performances, em Farol Santana – MA, o comportamento é diferente. Nota-se, pela Figura 55, que na sua localização a topografia utilizada pelo WRF consegue ser consideravelmente similar ao MDE. Todavia, lá, a magnitude da velocidade do vento não foi bem simulada, embora a direção do vento o tenha sido.

Ademais, em Aracau, Ceará, acontece algo semelhante a Farol Santana. Como verificado, essa estação tem uma representação atípica da velocidade do vento na primeira

quinzena de setembro de 2018, especificamente. Em contrapartida, a topografia utilizada nas simulações, nesse local, é regular e similar àquela fornecida pelo Modelo Digital de Elevação.

Compete ainda tratar da localização da TMA utilizada para avaliar a velocidade do vento a 52 e 98 m de altura e sua direção a 50 e a 94 m. Na zona em que se localiza esse sítio ocorrem variações negativas significantes da cota, demonstrando que o WRF apresenta uma representação altimétrica mais elevada que o Modelo Digital de Elevação. Essa situação pode levar a uma errônea reprodução do escoamento do ar e, assim, influenciar as significativas magnitudes dos erros associados aos dados simulados de velocidade do vento nesse local, em suas diferentes alturas.

A Figura 56 apresenta um mapa da densidade de potência a 100 m de altura, ilustrando as áreas de maior capacidade de geração de energia proveniente dos ventos no país (CEPEL, 2017). A título comparativo com as análises de sensibilidade, fica evidenciado que a costa norte do Nordeste tem grande potencial eólico. Apesar de tal fato ir ao encontro do que é verificado na Figura 55, em que a topografia nessa porção do território é bem representada, as simulações da velocidade do vento em Farol Santana – MA, de março e de setembro, e em Aracauá – CE, do segundo mês, não são compatíveis com isso.

Por outro lado, nota-se que a parte do litoral que vai do Estado do Rio Grande do Norte até Sergipe é uma região de significativa capacidade de geração eólica, o que é demonstrado pelas simulações de vento feitas pelo WRF. Além disso, a representação topográfica do modelo nessa área é próxima a do MDE, com poucas variações positivas ou negativas ao longo de sua extensão. Vale ressaltar que, embora as alturas de comparação sejam distintas, o perfil vertical próximo ao logarítmico do vento mostra que a tendência é de que as observações a 10 m se amplifiquem a 100 m.

Assim, fica evidenciado que, além dessa porção da Região Nordeste ser propícia para a produção de energia, ela é capaz de ser bem modelada pelo WRF, com relação ao vento e, portanto, esse modelo pode ser utilizado para previsões de velocidade e de direção do vento nessa parte do território.

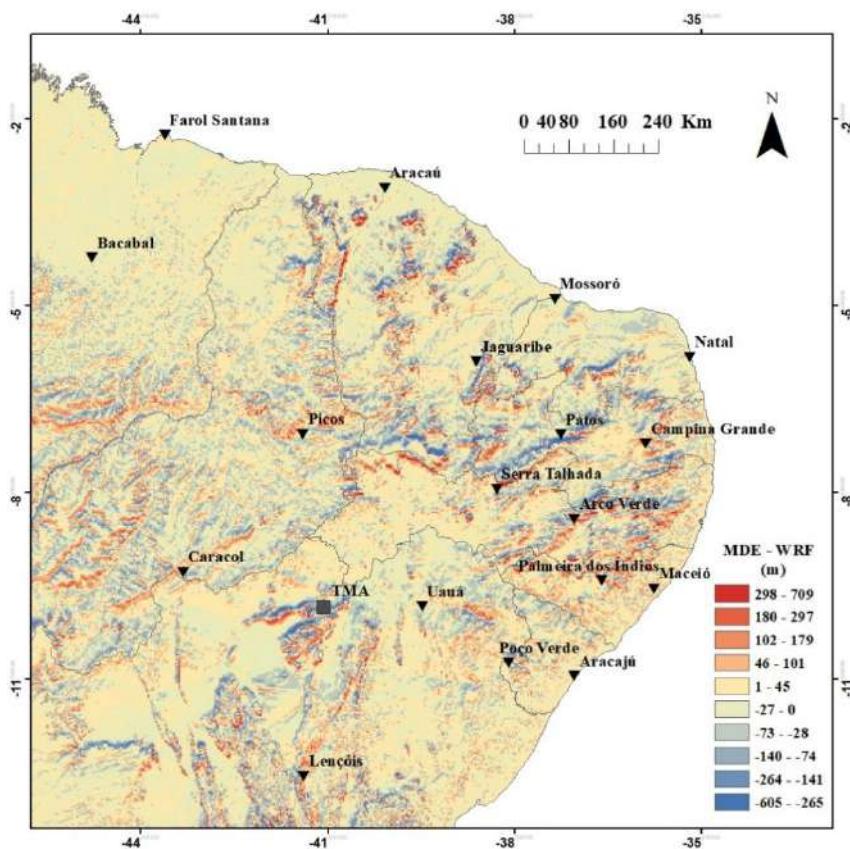


Figura 55: Diferença altimétrica entre um Modelo Digital de Elevação e a representação topográfica do WRF

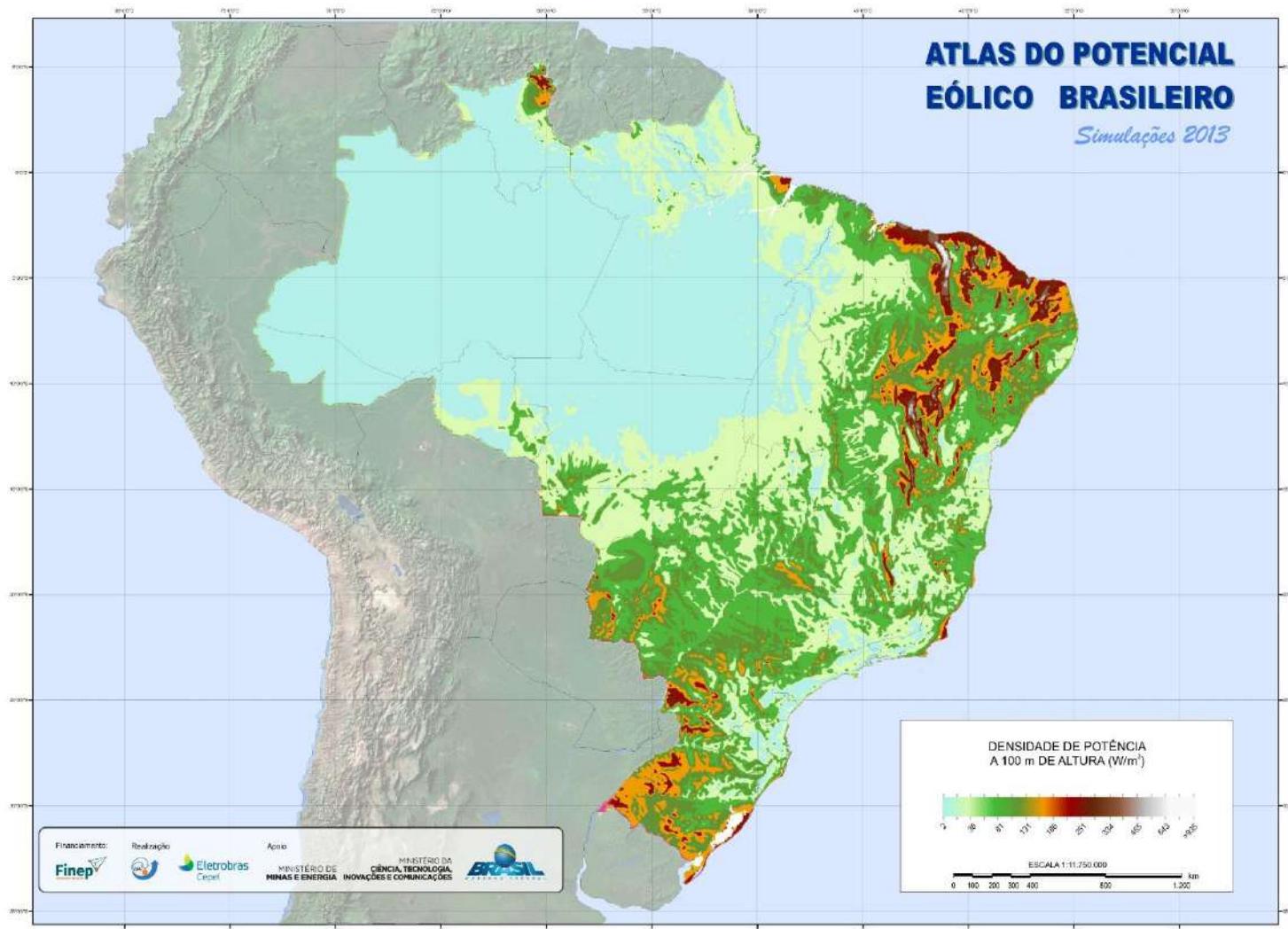


Figura 56: Densidade de potência eólica a 100 m de altura sobre o Brasil. Fonte: CEPEL, 2017

#### **4.5 Sistemas atmosféricos associados**

Por derradeiro, cabe ainda verificar a influência dos principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a área de estudo na acurácia dos resultados de velocidade e de direção do vento. Nesse sentido, a Figura 57 ilustra os referidos sistemas na baixa e na alta troposfera que são influentes sobre o continente Sul-Americano (REBOITA *et al.*, 2010).

Focando no Nordeste brasileiro, na baixa troposfera, é possível observar que a sua porção norte é uma região que concentra muitos fenômenos atmosféricos. Próximo à Linha do Equador se encontram os ventos alísios de nordeste (ANE), vindos do Hemisfério Norte, e de sudeste (ASE), vindos do Hemisfério Sul. Tais ventos, oriundos dos ramos inferiores das células de Hadley, são praticamente constantes e intensos na Região Nordeste durante todo o ano e convergem em baixos níveis na faixa denominada Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (FERREIRA; MELLO, 2005; VAREJÃO-SILVA, 2005).

A ZCIT é caracterizada como uma área de formação de nuvens convectivas e, consequentemente, de intensas precipitações. Sua posição oscila a depender da época do ano. Entre fevereiro e abril, ela se situa a, aproximadamente, 4° S, área coincidente com a costa norte do Nordeste, sendo a época que contribui para a precipitação na Região. Já de agosto a outubro, a ZCIT se desloca para, aproximadamente, 10° N no Oceano Atlântico e 13° N no Pacífico. Dessa forma, no final do inverno, a ZCIT não se estabelece sobre o Nordeste e é o período de menores taxas de precipitação nessa área (FERREIRA; MELLO, 2005; VAREJÃO-SILVA, 2005; REBOITA *et al.*, 2010).

Além disso, os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) podem se formar sobre a Região. Os CCM são conjuntos de nuvens que também contribuem para a precipitação intensa, isolada, e de curta duração, geralmente acompanhada de rajadas de vento. Sua origem está associada a condições locais favoráveis, tais como relevo, temperatura e pressão. Os CCM tropicais ocorrem principalmente no verão e no outono e tem alcance inferior a 150.000 km<sup>2</sup> (FERREIRA; MELLO, 2005; REBOITA *et al.*, 2010).

Contornando não só a costa norte, mas todo o litoral nordestino, há influência da brisa marítima. Diurna, a brisa marítima sopra do oceano para o continente e pode

adentrar por até 100 km. No Nordeste, devido a atuação dos ventos alísios, as brisas marítimas acabam por mudar um pouco a direção e a velocidade daqueles. A brisa marítima transporta umidade para o interior do continente contribuindo para outros sistemas que geram precipitação (FERREIRA; MELLO, 2005; VAREJÃO-SILVA, 2005; REBOITA *et al.*, 2010).

A interação entre os alísios e a circulação de brisa, somada ao deslocamento de umidade provocado pela brisa marítima, contribuem para a geração de Linhas de Instabilidade (LI). Ademais, a proximidade da ZCIT no final do verão e no início do outono austral também colabora para a constituição de LI. As LI são conjuntos de nuvens, normalmente em formato de linha, que provocam precipitação (FERREIRA; MELLO, 2005; REBOITA *et al.*, 2010).

Reboita *et al.* (2010) afirmam que o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), quando deslocado a sul de sua posição climatológica e próximo à América do Sul, influencia a precipitação sobre o litoral do Nordeste. Nessa situação, os ventos do setor norte do ASAS fortalecem os ventos de sudeste e de leste, favorecendo ainda mais o transporte de umidade do oceano para o continente.

As Frentes Frias (FF) são mais um dos fenômenos capazes de gerar precipitação sobre o Nordeste. Conforme averiguado por Kousky (1979), os sistemas frontais alcançam a parte sul do Nordeste durante todo o ano. Principalmente na Bahia, esses sistemas têm grande impacto nas precipitações entre dezembro e janeiro. Ademais, conforme o autor, os sistemas frontais contribuem para a intensificação da precipitação no litoral nordestino, durante o outono e o inverno, da Bahia ao Rio Grande do Norte. Em alguns casos, as frentes conseguem penetrar até o Ceará, influenciando na precipitação da região.

Outro sistema atuante no litoral nordestino, não representado pela Figura 57, são as chamadas Ondas de Leste (OL). Essas são ondas originadas no campo de pressão atmosférica, influenciadas pelos ventos alísios, que se movimentam para oeste. Ao entrarem em contato com a ZCIT as OL são capazes de formar intercalações entre áreas de nebulosidade e áreas sem nebulosidade (VAREJÃO-SILVA, 2005; REBOITA *et al.*, 2010). Segundo Ferreira e Mello (2005), as OL ocasionam precipitações sobretudo na Zona da Mata, sub-região que vai desde o litoral do Rio Grande do Norte até o sul da

Bahia. Contudo, essas ondas também podem causar precipitações no Ceará, entre junho e agosto.

Por fim, na alta troposfera, ocorre a presença dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Eles têm formação, na maioria das vezes, no Oceano Atlântico, com deslocamento típico de leste para oeste, sendo observados, geralmente, entre novembro e março na Região Nordeste do Brasil. São sistemas caracterizados por ter, no seu centro, movimentos subsidentes do ar que inibem a formação de nuvens nessa área. Em contraponto, em sua periferia, o ar é ascendente, favorecendo a nebulosidade e a precipitação. Quando situado sobre o Nordeste, o VCAN provoca precipitações na costa norte, no Piauí e no oeste de Pernambuco, enquanto evita a nebulosidade na Bahia (FERREIRA; MELLO, 2005; VAREJÃO-SILVA, 2005; REBOITA *et al.*, 2010).

Dessa maneira, além da costa norte concentrar o encontro de variados sistemas atmosféricos que provocam precipitação, isso é mais comum durante o primeiro semestre do ano. Nessa área, como observado, as reproduções do WRF tiveram maiores dificuldades em simular a velocidade do vento, em ambos os meses de análise, mesmo possuindo uma representação topográfica de boa qualidade. A mesma dificuldade nas simulações foi verificada para as análises do GFS.

A porção do interior da Paraíba e de Pernambuco, também indicativa de baixa qualidade nos resultados de velocidade e direção do vento, possui uma representação topográfica de menor qualidade nas simulações do WRF. Além disso, essa é uma região que, além da ZCIT, sofre os impactos do transporte de umidade do oceano para o continente, caracterizada não só por ser um local de formação de Linhas de Instabilidade, como verificado na Figura 57, mas também que pode ser abrangido pela precipitação induzida pelo VCAN.

A área central da Bahia, mais uma localidade que apresentou fraca fidedignidade entre as simulações e os dados de vento observados, possui uma representação topográfica irregular, e é afetada, principalmente, por frentes frias e pela formação de um VCAN. O ASAS também é capaz de impactar essa porção do mapa graças ao deslocamento de umidade para o interior do continente.

Por outro lado, o litoral nordestino, partindo do Rio Grande do Norte e finalizando em Sergipe, foi a área de melhores simulações pelo WRF, sendo também bem representada pelas análises do GFS. Ademais, nessa faixa as reproduções do WRF

obtiveram insignificativa variação da topografia que utilizou em relação ao MDE, sendo também uma área de menor rugosidade do terreno. Somado a isso, nota-se que essa região sofre grande influência dos alísios e da circulação de brisa, além do ASAS, favorecendo a intensificação e a estabilidade do vento.

Assim, verifica-se que há associação entre áreas de maior susceptibilidade de formação de nebulosidade com um pior desempenho nas simulações do vento pelo WRF. A ocorrência de precipitações tende a enfraquecer a intensidade dos ventos no Nordeste, o que, por sua vez, gera maior vulnerabilidade do modelo a erros (SANTOS; SILVA, 2013).

Cabe ainda destacar que o mês de março de 2018 correspondeu ao final de uma La Niña (NOAA, 2020), fenômeno no qual as águas do Oceano Pacífico são resfriadas anomalamamente (FERREIRA; MELLO, 2005). Segundo Santos e Silva (2013), a La Niña é também responsável por contribuir para a diminuição da intensidade do vento na Região Nordeste do Brasil.

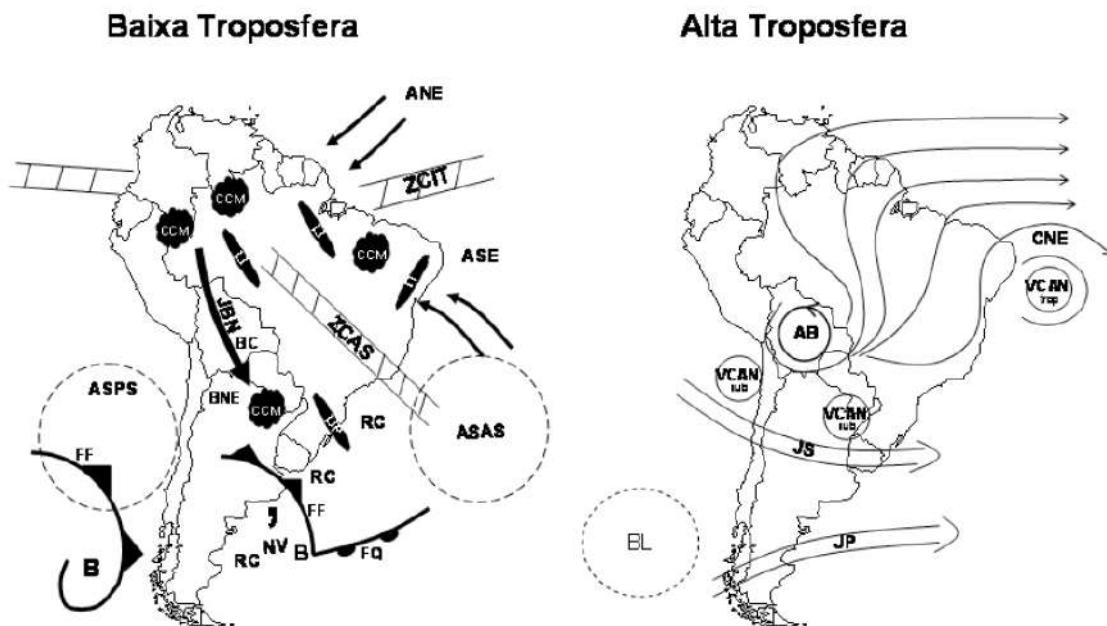


Figura 57: Principais sistemas atmosféricos na baixa e na alta troposfera atuantes na América do Sul.  
Fonte: Reboita et al., 2010

## 5 Conclusões

O presente estudo teve por intuito realizar uma investigação da sensibilidade do modelo WRF a diferentes ajustes em suas configurações, via modelagem de alto desempenho, visando examinar quais desses proporcionavam resultados mais fidedignos à realidade para a velocidade e a direção do vento no Nordeste do Brasil.

Para isso, quatro composições de parametrizações físicas foram averiguadas, sendo que três buscaram focar nos esquemas de Camada Limite Planetária e naqueles de Camada de Superfície, ao passo que a quarta teve como objetivo se assemelhar às parametrizações utilizadas pelo modelo global GFS.

Além disso, foram examinados os desempenhos das simulações do WRF a 10, 52 e 98 m de altura, para a intensidade, e a 10, 50 e 94 m, para a direção do vento, bem como a resolução espacial horizontal do modelo (com grades de 3 e 9 km). As simulações foram realizadas para as primeiras quinzenas de março e de setembro de 2018.

Foram aplicadas estatísticas para avaliar o desempenho das simulações de vento, analisando os padrões de suas distribuições sobre o território de estudo, bem como observada a influência da representação topográfica nessas simulações e o impacto dos sistemas atmosféricos sobre elas.

Assim sendo, verificou-se que as reproduções do WRF associadas às configurações denominadas neste estudo de C1 e C4, para os períodos avaliados, foram as que obtiveram estimativas de velocidade e direção do vento, como um todo, mais acuradas e, portanto, as que melhor simularam o recurso eólico no Nordeste.

A configuração C1 é composta pelo esquema YSU para a Camada Limite Planetária; *Revised MM5* para a Camada de Superfície, com a opção *topo\_wind* ativada; RRTMG para Radiação de Onda Longa e de Onda Curta; WSM6 para Microfísica; Kain-Fritsch para *Cumulus*; e *Unified Noah* para o Modelo de Superfície Terrestre.

Já na C4, inspirada no GFS, aplicou-se o esquema MYNN 2.5 para a Camada Limite Planetária, com a ativação de algumas opções discriminadas na seção 3.2; MYNN para a Camada de Superfície; RRTMG para Radiação de Onda Longa e de Onda Curta; Eta Ferrier para Microfísica; *New Simplified Arakawa–Schubert* para *Cumulus*; e *Unified Noah* para o Modelo de Superfície Terrestre.

Em comparação às análises do GFS, as execuções do WRF, com essas duas configurações, tiveram a tendência de apresentar mais acurácia com relação ao acompanhamento da variabilidade da velocidade do vento dentro da série temporal, assim como com relação à estimativa da sua direção.

As análises do GFS alcançaram, de maneira geral, maior fidedignidade quanto à intensidade do vento. No entanto, erros de magnitude são de mais fácil correção estatística que os de correlação, os quais as simulações do WRF tendem a representar de maneira mais acurada. A variabilidade do vento ao longo do tempo impacta a qualidade da energia gerada e o seu adequado planejamento, sendo, portanto, fundamental para previsões eólicas que a correlação linear seja forte. Isso demonstra um ganho ao se utilizar o WRF na previsão do vento.

Ressalta-se que as análises do GFS, que assimilam dados observados em todo o domínio ao representar um instante de tempo, servem como entrada para as simulações do WRF. A partir disso, o modelo de mesoescala propaga a representação atmosférica para o tempo futuro isoladamente, até que entra novamente em contato, em suas fronteiras, com um conjunto de dados contendo observações após um período de 6h.

Ademais, em uma previsão operacional, o WRF apenas utiliza as análises do GFS nas condições iniciais, sendo o único momento em que os dados observados são empregados. Depois disso, somente se tem informações da previsão do GFS como condição de contorno e da própria previsão do WRF.

Diante de tais fatos, era esperado que as análises do modelo global tivessem sempre melhor resultado, apesar de sua resolução mais baixa, já que elas contêm a informação do dado observado.

Ao analisar a performance das simulações do WRF sobre o mapa, nota-se que o modelo tem maior propensão, tanto em março quanto em setembro de 2018, a fornecer melhores desempenhos estatísticos no litoral nordestino, especialmente na sua costa leste. Cabe destacar que essa região tem grande potencial eólico e, assim, a utilização do WRF é capaz de contribuir para o desenvolvimento do setor.

Por outro lado, as piores performances se concentram, sobretudo, na área englobada pelo interior da Paraíba e de Pernambuco, como também mais ao centro da Bahia e no litoral do Maranhão. Houve ainda a observação de *outliers* dentro da amostra,

como foi o caso de Aracauá, no Ceará, para a velocidade do vento, e de Campina Grande, na Paraíba, para a direção do mesmo.

É interessante observar que as análises do GFS tiveram comportamento espacial semelhante às simulações do WRF, com desempenhos mais satisfatórios focalizados nas mesmas zonas que esse último. Todavia, para a velocidade do vento, as análises do GFS tendem a projetar resultados de maior acurácia sobre uma extensão mais ampla do mapa, partindo dos núcleos em comum com as reproduções do WRF.

Essa predisposição conjunta entre as simulações do WRF e as análises do GFS sobre a distribuição espacial de seus erros de velocidade e de direção do vento pode ser associada aos sistemas atmosféricos que operam sobre a área de estudo. As localidades que concentram mais fenômenos ligados à nebulosidade e à precipitação são também as que tendem a possuir resultados mais distantes dos dados observados.

Ademais, notou-se que, em março, foram as simulações realizadas com a grade de 9 km que tiveram maior inclinação a uma melhor performance estatística. Em contrapartida, em setembro isso ocorreu com o domínio de 3 km, devido, essencialmente, aos resultados referentes à velocidade do vento. Dessa forma, infere-se de forma preliminar que, para a região de estudo, em um cenário de mais precipitações e nebulosidade, o WRF funciona melhor com uma resolução horizontal mais grosseira. De outra maneira, em um ambiente de tempo mais estável, a resolução mais propícia deve ser mais refinada.

Cabe ainda salientar a participação da topografia em todo esse processo. Mais uma vez, nota-se comunicação entre boa parte dos pontos em que o modelo é menos assertivo com uma perda de qualidade da representação do terreno, evidenciando seu impacto sobre o escoamento do ar no modelo e a necessidade de se inserir Modelos Digitais de Terreno mais precisos, em relação à topografia brasileira, no WRF.

Portanto, o referido trabalho auxilia a direcionar alguns dos principais parâmetros que afetam a representatividade do WRF sobre o vento para o caso específico da Região Nordeste do Brasil. Assim, ajustes podem ser feitos para que os resultados de velocidade e direção do vento sejam cada vez mais realísticos e, com isso, afetem positivamente a indústria eólica, contribuindo para seu desenvolvimento e expansão no país, bem como auxiliem as operações do sistema elétrico brasileiro a atingirem maior segurança energética. Por fim, espera-se colaborar para mais avanços na modelagem atmosférica e

no aperfeiçoamento do WRF como um todo, estimulando novos estudos e aplicações nessa área.

Enfatiza-se que essas conclusões foram extraídas dentro de certas limitações. As simulações não foram realizadas em quantidade e horizontes temporais superiores, o que daria mais respaldo aos resultados, devido à necessidade computacional e de tempo para que fossem executadas. O próprio WRF teve suas restrições computacionais, o que impediu a execução da configuração 3 para o período de setembro.

Além disso, a avaliação em diferentes alturas ficou reduzida a apenas um sítio, visto não ter sido possível o fornecimento dos dados anemométricos acima de 10 m de altura em outros locais. Ainda, ressalta-se a dificuldade na validação dos resultados do modelo, uma vez que há carência de medições em determinados locais, como também certos valores destoam dos demais, diminuindo sua confiabilidade.

Nesse sentido, sugere-se, para trabalhos futuros, que sejam feitas análises de sensibilidade para períodos de tempo superiores e comparados outros arranjos de parametrizações tanto no Nordeste como em outras regiões do país, bem como propõe-se que se avalie a influência do uso do solo e da temperatura da superfície do mar nos resultados de velocidade e direção do vento. Ademais, seria notável incluir, nos exames, comparações das condições iniciais e de contorno com assimilação de dados observados e sem, de modo a verificar se o efeito desse mecanismo sobre essa área aprimora a simulação do vento pelo WRF.

Por conseguinte, a utilização do WRF contribui para a diminuição da queima de combustíveis fósseis e consequente redução na emissão de dióxido de carbono e outros poluentes para a atmosfera, uma vez que amplia as possibilidades de planejamento e exploração da energia eólica. No entanto, é necessário um gasto científico para que a modelagem seja aplicada, compreendendo as dinâmicas locais e as configurações do modelo que melhor se adequam a elas. Em outras palavras, a preparação pertinente do WRF é tão importante quanto a simples análise a partir de seus resultados.

## 6 Referências bibliográficas

- ABEEÓLICA. Números ABEEólica – Fevereiro de 2019. ABEEÓLICA/Associação Brasileira de Energia Eólica. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>. Acesso em: 17 mai. 2020.
- AMARAL, B. M. **Modelos VARX para Geração de Cenários de Vento e Vazão Aplicados a Comercialização de Energia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 155. 2011.
- ARANTEGUI, R. L.; JÄGER-WALDAU, A. Photovoltaics and wind status in the European Union after the Paris Agreement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2460-2471, 2018.
- AVOLIO, E. et al. Sensitivity analysis of WRF model PBL schemes in simulating boundary-layer variables in southern Italy: An experimental campaign. **Atmospheric Research**, v. 192, n. April, p. 58–71, 2017.
- BUDAKOTI, S.; SINGH, C.; PAL, P. K. Assessment of various cumulus parameterization schemes for the simulation of very heavy rainfall event based on optimal ensemble approach. **Atmospheric Research**, v. 218, p. 195-206, 2019.
- BUSINGER et al. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. **Journal of the atmospheric Sciences**, v.28, n. 2, p. 181-189, 1971.
- CAMPANA, K. et al. The Development and Success of NCEP's Global Forecast System. In: **99th American Meteorological Society Annual Meeting**. AMS, 2019.
- CARVALHO, D. et al. 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**, v. 135, p. 234–246, 2014a.
- CARVALHO, D. et al. WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. **Applied Energy**, v. 117, p. 116-126, 2014b.

CARVALHO, M. Â. V. de; ABRUNHOSA, M. L.; LOPES, J. R. O. **Manual de instalação, compilação e execução do modelo de mesoescala WRF no ICEA (versão 3.4.1)**. Instituto de Controle do Espaço Aéreo. São José dos Campos. 2013.

CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada**. 4 ed. Lisboa. DEEC/Área Científica de Energia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica De Lisboa. 2008.

CAZES BOEZIO, G.; ORTELLI, S. Use of the WRF-DA 3D-Var data assimilation system to obtain wind speed estimates in regular grids from measurements at wind farms in Uruguay. **Data**, v. 4, n. 4, p. 142, 2019.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013**. CEPEL/Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Rio de Janeiro. 2017.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific model development**, v. 7, n. 3, p. 1247-1250, 2014.

CHENG, W. YY et al. Short-term wind forecast of a data assimilation/weather forecasting system with wind turbine anemometer measurement assimilation. **Renewable Energy**, v. 107, p. 340-351, 2017.

CINTRA, R. S.; DE CAMPOS VELHO, H. F. Assimilação de Dados Atmosféricos utilizando Redes Neurais Artificiais: Nova Abordagem. **X Congresso Brasileiro de Redes Neurais/Inteligência Computacional (IX CBRN)**, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 25-28 Outubro 2009.

COHEN, A. E. et al. A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern U.S. cold season severe weather environments. **Weather and Forecasting**, v. 30, n. 3, p. 591–612, 2015.

DA SILVA, N. F. et al. Wind energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the favorable environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 686–697, 2013.

DE ALMEIDA DANTAS, V. et al. Testando diferentes esquemas da Parametrização Cumulus do modelo WRF, para a região norte Nordeste do Brasileiro (Testing different WRF Cumulus parameterization schemes for the north-eastern region of Brazil). **Revista**

**Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 754-767, 2019.

DE MEIJ, A.; VINUESA, J. F.; MAUPAS, V. GHI calculation sensitivity on microphysics, land- and cumulus parameterization in WRF over the Reunion Island. **Atmospheric Research**, v. 204, n. January, p. 12–20, 2018.

DRAXL, C. et al. Evaluating winds and vertical wind shear from Weather Research and Forecasting model forecasts using seven planetary boundary layer schemes. **Wind Energy**, v. 17, n. 1, p. 39-55, 2014.

DTC. **Common Community Physics Package (CCPP) Scientific Documentation Version 3.0.** DTC/Developmental Testbed Center. Disponível em: [https://dtcenter.org/GMTB/v3.0/sci\\_doc/allscheme\\_page.html](https://dtcenter.org/GMTB/v3.0/sci_doc/allscheme_page.html). Acesso em: 6 jan. 2020.

\_\_\_\_\_. **GFS Operational Physics Documentation.** DTC/Developmental Testbed Center. Disponível em: [https://dtcenter.org/GMTB/gfs\\_phys\\_dev/index.html](https://dtcenter.org/GMTB/gfs_phys_dev/index.html). Acesso em: 6 jan. 2020.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019.** EPE/Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. 2020.

FERREIRA, A. G.; DA SILVA MELLO, N. G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FREIRE, A. P. S. **Teoria de camada limite.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/7857>. Acesso em: 5 nov. 2020.

GANDU, A. W. **Introdução a modelagem atmosférica de mesoescala.** Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. v. 1, 2005.

GEERNAERT, G. L. Surface layer. **Encyclopedia of atmospheric sciences**, p. 305-311, 2003.

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**, v. 49, n. 4, p. 760–774, 2010.

GOMES, A. F.; SILVA, D. A.; FISCH, G. Avaliação do modelo WRF para a previsão do

perfil do vento no centro de lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 2, p. 259-270, 2014.

GOODWIN, P.; LAWTON, R. On the asymmetry of the symmetric MAPE. **International journal of forecasting**, v. 15, n. 4, p. 405-408, 1999.

GUNWANI, P; MOHAN, M. Sensitivity of WRF model estimates to various PBL parameterizations in different climatic zones over India. **Atmospheric Research**, v. 194, p. 43-65, 2017.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011.

HAN, J.; PAN, H. L. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 4, p. 520–533, 2011.

HERNÁNDEZ, C. V.; GONZÁLEZ, J. S.; FERNÁNDEZ-BLANCO, R. New method to assess the long-term role of wind energy generation in reduction of CO<sub>2</sub> emissions—case study of the European union. **Journal of cleaner production**, v. 207, p. 1099-1111, 2019.

HOEGH-GULDBERG, Ove et al. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5 C. **Science**, v. 365, n. 6459, 2019.

HONG, S-Y; LIM, J-O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 42, n. 2, p. 129-151, 2006.

HONG, S.-Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. **Monthly Weather Review**, v. 134, n. 9, p. 2318–2341, 2006.

IACONO, M. J. et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, n. 13, p. 2–9, 2008.

INMET. **Nota Técnica nº 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET**. INMET/Instituto Nacional de Meteorologia. n. 001, p. 1–11, 2011.

JANJIC, Z. I. A nonhydrostatic model based on a new approach. **Meteorology and**

**Atmospheric Physics**, v. 82, n. 1–4, p. 271–285, 2003.

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**, v. 51, n. 2, p. 300–316, 2012.

JIMÉNEZ, P. A. et al. A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 3, p. 898–918, 2012.

JIMÉNEZ, P. A. et al. Role of synoptic- and meso-scales on the evolution of the boundary-layer wind profile over a coastal region: the near-coast diurnal acceleration. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 128, n. 1, p. 39–56, 2016.

KAIN, J. S. The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. **Journal of applied meteorology**, v. 43, n. 1, p. 170-181, 2004.

KENUL, P. et al. NOAA Technical Memorandum OAR GSD-61. **NOAA Technical Memorandum OAR UAS-003**, n. March, 2018.

KIM, H.-J.; WANG, B. Sensitivity of the WRF model simulation of the East Asian summer monsoon in 1993 to shortwave radiation schemes and ozone absorption. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 47, n. 2, p. 167-180, 2011.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

KWON, Y. C.; HONG, S. Y. A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions. **Monthly Weather Review**, v. 145, n. 2, p. 583–598, 2017.

LAHOUAR, A.; SLAMA, J. B. H. Hour-ahead wind power forecast based on random forests. **Renewable energy**, v. 109, p. 529-541, 2017.

LEE, J. C. Y.; LUNDQUIST, J. K. Evaluation of the wind farm parameterization in the Weather Research and Forecasting model (version 3.8. 1) with meteorological and turbine power data. **Geoscientific Model Development (Online)**, v. 10, n. NREL/JA-5000-70672, 2017.

LO, J. C. F.; YANG, Z. L.; PIELKE, R. A. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, n. 9, 2008.

LUCAS-PICHER, P. et al. Dynamical Downscaling with Reinitializations: A Method to Generate Finescale Climate Datasets Suitable for Impact Studies. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 4, p. 1159–1174, 2013.

MARQUES FILHO, E. P. Alguns aspectos teóricos e experimentais da Camada Limite Superficial acima do Pantanal Matogrossense. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 2-3, p. 228-228, 1999.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008.

MATHEW, S. **Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics**. Berlin: Springer, 2006.

MATTAR, C.; BORVARÁN, D. Offshore wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile. **Renewable Energy**, v. 94, p. 22–31, 2016.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 13 fev. 2019.

MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. **Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR**, v. 151, n. 163, p. e187, 1954.

MOREIRA, G. A. A. **Desenvolvimento de Modelos de Camada Limite Atmosférica Aplicados a Micro-Regiões**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 214. 2012.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; MORAES, M. R. Meteorologia e poluição atmosférica. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, n. 1, p. 1-13, 2008.

MURTHY, K. S. R.; RAHI, O. P. A comprehensive review of wind resource assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1320-1342, 2017.

NAKANISHI, M.; NIINO, H. An improved Mellor-Yamada Level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 119, n. 2, p. 397–407, 2006.

\_\_\_\_\_. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 87, n. 5, p. 895–912, 2009.

NCAR. Research Data Archive. **Analysis, reanalysis, forecast - what's the difference?**. 2014. NCAR/National Center for Atmospheric Research. Disponível em: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/docs/Analysis.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2019.

\_\_\_\_\_. WRF Users Page. **WRF Physics Survey Results**. NCAR/National Center for Atmospheric Research. 2015. Disponível em: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf\\_physics\\_survey.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_physics_survey.pdf). Acesso em: 22 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Weather Research and Forecasting Model – ARW – Version 4 Modeling System User’s Guide**. NCAR/National Center for Atmospheric Research. 2019.

\_\_\_\_\_. WRF Users Page. **WRF Model’s Users’ Page**. NCAR/National Center for Atmospheric Research. 2020. Disponível em: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>. Acesso em: 24 ago. 2020.

NOAA. **Global Forecast System - Global Spectral Model (GSM) - v13.0.2**. NOAA/National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <https://vlab.ncep.noaa.gov/web/gfs/documentation>. Acesso em: 6 jan. 2020.

\_\_\_\_\_. **Cold & Warm Episodes by Season**. NOAA/National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Acesso em: 28 out. 2020.

NOILHAN, J.; PLANTON, S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. **Monthly weather review**, v. 117, n. 3, p. 536-549, 1989.

OLSON, J. B. et al. **A description of the MYNN-EDMF scheme and the coupling to other components in WRF-ARW**. NOAA Technical Memorandum OAR GSD-61, NOAA. 2019.

PARANHOS, B. R. et al. Wind Power Use Capacity in Rural Areas of Complex Topography via WRF Model: a Case Study in a Mountainous Region in Rio de Janeiro

State, Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 3, 2019.

PARK, S.-H.; KLEMP, J. B.; KIM, J.-H. Hybrid Mass Coordinate in WRF-ARW and Its Impact on Upper-Level Turbulence Forecasting. **Monthly Weather Review**, v. 147, n. 3, p. 971–985, 2019.

PICOLO, A. P.; BÜHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 4306, 2014.

PLEIM, J. E. A simple, efficient solution of flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 45, n. 2, p. 341–347, 2006.

\_\_\_\_\_. A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 9, p. 1383–1395, 2007.

PLEIM, J. E.; AIJUN XIU. Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models. **Journal of Applied Meteorology**, 1995.

PLEIM, J. E.; GILLIAM, R. An indirect data assimilation scheme for deep soil temperature in the Pleim-Xiu land surface model. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 7, p. 1362–1376, 2009.

PLEIM, J. E.; XIU, A. Development of a land surface model. Part II: Data assimilation. **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, n. 12, p. 1811–1822, 2003.

POWERS, J. G. et al. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 8, p. 1717–1737, 2017.

QIAN, J.-H.; SETH, A.; ZEBIAK, S. Reinitialized versus Continuous Simulations for Regional Climate Downscaling. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 11, p. 2857–2874, 2003.

RATJIRANUKOOL, P.; RATJIRANUKOOL, S. Evaluating Wind Speed by WRF Model over Northern Thailand. **Energy Procedia**, v. 138, p. 1171–1176, 2017.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.

ROGERS, E. et al. National Oceanic and Atmospheric Administration Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. **NWS Tech. Proced. Bull.**, v. 488, p. 15, 2001.

SAMPAIO, F. F. A modelagem dinâmica computacional no processo de ensino-aprendizagem: algumas questões para reflexão. **Ciência em tela**, v. 2, p. 1-11, 2009.

SAMPAIO, G.; SILVA DIAS, P. L. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41-54, 2014.

SANTOS, A. T. S.; SILVA, C. M. S. Seasonality, Interannual Variability, and Linear Tendency of Wind Speeds in the Northeast Brazil from 1986 To 2011. **The Scientific World Journal**, v. 2013, p. 1–10, 2013.

SANTOS, A. T. S. et al. Assessment of Wind resources in two parts of Northeast Brazil with the use of numerical models. **Meteorological Applications**, v. 23, n. 4, p. 563-573, 2016.

SANTOS-ALAMILLOS, F. J. et al. Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain). **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, n. 7, p. 1592–1609, 2013.

SANTOS-ALAMILLOS, F. J. et al. Influence of land-use misrepresentation on the accuracy of WRF wind estimates: Evaluation of GLCC and CORINE land-use maps in southern Spain. **Atmospheric Research**, v. 157, p. 17–28, 2015.

SAHA, S. Response of the NMC MRF model to systematic-error correction within integration. **Monthly weather review**, v. 120, n. 2, p. 345-360, 1992.

SHIN, H. H.; HONG, S. Y. Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 139, n. 2, p. 261–281, 2011.

SHINDELL, D.; SMITH, C. J. Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels. **Nature**, v. 573, n. 7774, p. 408-411, 2019.

- SILVA, N. F. DA et al. Wind energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the favorable environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 686–697, 2013.
- SILVEIRA, C. DA S. et al. Sazonalidade da Precipitação Sobre o Nordeste Setentrional Brasileiro nas Simulações do IPCC-AR4. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 125–134, 2012.
- SKAMAROCK, W. et al. A description of the advanced research WRF version 4. **Technical Report**, March, p. 162, 2019.
- STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Atmospheric Sciences Library, Dordrecht: Kluwer, 1988, v. 1, 1988.
- TASCIKARAOGLU, A.; UZUNOGLU, M. A review of combined approaches for prediction of short-term wind speed and power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 243-254, 2014.
- TEWARI, M. et al. Implementation and verification of the unified noah land surface model in the WRF model. **Bulletin of the American Meteorological Society**, p. 2165–2170, 2004.
- TYAGI, B. et al. Performance analysis of planetary boundary layer parameterization schemes in WRF modeling set up over southern Italy. **Atmosphere**, v. 9, n. 7, p. 272, 2018.
- TYMVIOS, F. et al. Intercomparison of boundary layer parameterizations for summer conditions in the eastern Mediterranean island of Cyprus using the WRF-ARW model. **Atmospheric Research**, v. 208, p. 45-59, 2018.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia: versão digital**. Recife: Esalq, 2005.
- WWEA. **Statistics**. WWEA/World Wind Energy Association. Disponível em: <https://wwindea.org/blog/category/statistics/>. Acesso em: 20 nov 2020.
- WYNGAARD, J. C. Atmospheric turbulence. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 24, n. 1, p. 205-234, 1992.
- XIU, A. J.; PLEIM, J. E. Development of a land surface model. Part I: Application in a

mesoscale meteorological model. **Journal of Applied Meteorology**, v. 40, n. 2, p. 192–209, 2001.

XU, W.; NING, L.; LUO, Y. Applying Satellite Data Assimilation to Wind Simulation of Coastal Wind Farms in Guangdong, China. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 973, 2020.

YANG, Q. et al. Sensitivity analysis of raindrop size distribution parameterizations in WRF rainfall simulation. **Atmospheric Research**, v. 228, p. 1-13, 2019.

YOSHIMURA, R. et al. Application of observability Gramian to targeted observation in WRF data assimilation. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 72, n. 1, p. 1-11, 2020.

ZHUO, L. et al. Assessment of simulated soil moisture from WRF Noah, Noah-MP, and CLM land surface schemes for landslide hazard application. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 10, p. 4199–4218, 2019.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A - SIMULAÇÕES MENSAIS DE MARÇO DE 2018

*Análises estatísticas a 10 m de altura, relativas à velocidade do vento, para março de 2018 – grade de 9 km*

d01			C1			C2			C3			GFS análises		
Estação	Estado	Código	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r
Maceió	Alagoas	A303	0,51	<b>1,14</b>	<b>0,81</b>	0,75	<b>1,29</b>	<b>0,79</b>	2,29	2,70	0,75	<b>0,03</b>	<b>0,80</b>	<b>0,87</b>
Palmeira dos Índios		A327	0,70	1,70	0,56	2,04	2,55	0,49	1,78	2,34	0,51	1,34	1,72	0,63
Lençóis	Bahia	A425	1,59	1,85	0,52	2,17	2,49	0,31	1,39	1,79	<b>0,13</b>	1,20	1,51	0,40
Uauá		A435	0,42	1,55	0,42	0,88	1,68	0,47	0,63	1,63	0,45	1,43	2,01	0,57
Aracaú	Ceará	A360	0,41	1,37	0,62	0,77	1,57	0,62	0,64	1,58	0,60	0,76	1,20	0,76
Jaguaribe		A358	0,40	1,48	0,30	1,06	1,98	0,18	0,76	1,81	0,28	0,43	1,35	0,29
Bacabal	Maranhão	A220	1,23	1,67	0,23	1,52	2,07	0,10	1,13	1,58	0,24	0,73	1,24	0,32
Farol Santana		A217	<b>2,33</b>	<b>2,73</b>	0,45	<b>3,12</b>	<b>3,35</b>	0,50	2,52	2,84	0,45	<b>3,19</b>	<b>3,38</b>	0,67
Campina Grande	Paraíba	A313	0,47	1,31	0,62	0,93	1,40	0,66	0,84	1,40	0,65	0,74	1,13	0,70
Patos		A321	0,46	1,88	<b>0,09</b>	1,47	2,34	0,23	1,20	2,13	0,21	1,87	2,42	0,36
Arco Verde	Pernambuco	A309	1,65	2,29	0,21	2,04	2,60	0,18	0,94	1,77	0,18	0,22	1,16	0,47
Serra Talhada		A350	0,50	1,50	0,37	1,16	1,95	0,32	0,82	1,65	0,35	0,92	1,48	0,50
Picos	Piauí	A343	<b>0,38</b>	1,17	0,23	<b>0,62</b>	1,42	<b>0,08</b>	<b>0,20</b>	1,03	0,23	0,08	0,98	<b>0,23</b>
Caracol		A337	1,25	1,75	0,62	1,77	2,19	0,49	0,95	1,44	0,57	0,48	1,10	0,63
Mossoró	Rio Grande	A318	0,96	1,31	0,81	1,24	1,59	0,75	0,44	<b>1,00</b>	<b>0,80</b>	1,97	2,19	0,78
Natal	do Norte	A304	0,98	1,34	0,57	0,94	1,31	0,54	2,40	2,65	0,50	0,77	1,07	0,67
Aracajú	Sergipe	A409	1,48	1,90	0,59	1,43	1,88	<b>-0,35</b>	<b>3,15</b>	<b>3,58</b>	<b>-0,30</b>	2,07	2,35	0,55
Poço Verde		A419	1,62	2,67	0,40	2,24	2,90	0,56	1,34	2,31	0,50	1,69	2,46	0,55
<b>Média</b>			<b>0,96</b>	<b>1,70</b>	<b>0,47</b>	<b>1,45</b>	<b>2,03</b>	<b>0,38</b>	<b>1,30</b>	<b>1,96</b>	<b>0,39</b>	<b>1,11</b>	<b>1,64</b>	<b>0,55</b>

*Erros percentuais a 10 m de altura, relativos à direção do vento, para março de 2018 – grade de 9 km*

Estação	Estado	Código	d01		C1		C2		C3		GFS análises	
			Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)
Maceió	Alagoas	A303	62,90	14,52	53,23	11,29	54,84	11,29	52,42	11,29		
Palmeira dos Índios		A327	50,00	7,26	48,39	6,45	50,00	6,45	47,58	5,65		
Lençóis	Bahia	A425	79,84	42,74	75,81	41,94	72,58	42,74	93,55	61,29		
Uauá		A435	48,39	16,13	51,61	19,35	50,81	18,55	45,16	16,13		
Aracaiú	Ceará	A360	44,35	11,29	45,16	9,68	41,94	8,87	42,74	4,03		
Jaguaribe		A358	62,90	22,58	62,10	16,94	66,13	22,58	53,23	20,16		
Bacabal	Maranhão	A220	70,97	37,10	66,13	35,48	64,52	37,10	70,97	31,45		
Farol Santana		A217	33,87	10,48	29,84	9,68	32,26	11,29	28,23	6,45		
Campina Grande	Paraíba	A313	100,00	100,00	100,00	99,19	99,19	96,77	100,00	100,00		
Patos		A321	83,87	47,58	75,81	35,48	73,39	40,32	67,74	33,06		
Arco Verde	Pernambuco	A309	52,42	16,94	54,84	17,74	58,06	19,35	51,61	17,74		
Serra Talhada		A350	77,42	46,77	75,81	45,16	79,03	45,97	77,42	41,13		
Picos	Piauí	A343	76,61	39,52	75,00	39,52	78,23	44,35	69,35	35,48		
Caracol		A337	70,16	41,13	72,58	37,90	70,97	39,52	70,16	44,35		
Mossoró	Rio Grande do Norte	A318	29,84	5,65	32,26	4,03	29,03	4,84	41,94	4,03		
Natal		A304	44,35	8,87	50,00	10,48	50,81	10,48	43,55	6,45		
Aracajú	Sergipe	A409	34,68	8,87	36,29	7,26	41,94	10,48	37,10	7,26		
Poço Verde		A419	45,97	12,10	46,77	8,87	48,39	8,06	37,90	4,03		
<b>Média</b>			<b>59,36</b>	<b>27,20</b>	<b>58,42</b>	<b>25,36</b>	<b>59,01</b>	<b>26,61</b>	<b>57,26</b>	<b>25,00</b>		

Análises estatísticas a 52 e 98 m de altura, relativas à velocidade do vento, para março de 2018 – grade de 9 km

<b>d01</b>		<b>C1</b>			<b>C2</b>			<b>C3</b>			<b>GFS análises</b>		
<b>Altura</b> <b>(m)</b>	<b>Bias</b> <b>(m/s)</b>	<b>RMSE</b> <b>(m/s)</b>	<b>r</b>										
52	1,73	3,09	0,51	1,81	2,84	0,60	1,36	2,88	0,44	0,89	2,12	0,64	
98	1,91	3,39	0,55	1,96	3,08	0,64	1,52	3,15	0,49	1,33	2,40	0,70	

Erros percentuais a 50 e 94 m de altura, relativos à direção do vento, para março de 2018 – grade de 9 km

<b>d01</b>		<b>C1</b>			<b>C2</b>			<b>C3</b>			<b>GFS análises</b>		
<b>Altura (m)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	
50	54,03	30,65	54,84	29,84	61,29	33,06	56,45	31,45					
94	47,58	23,39	50,81	24,19	58,87	25,81	50,00	15,32					

*Análises estatísticas a 10 m de altura, relativas à velocidade do vento, para março de 2018 – grade de 3 km*

d02			C1			C2			C3			GFS análises		
Estação	Estado	Código	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r									
Maceió	Alagoas	A303	1,04	1,55	<b>0,75</b>	1,22	1,71	0,72	3,08	3,53	0,70	<b>0,03</b>	<b>0,80</b>	<b>0,87</b>
Palmeira dos Índios		A327	1,74	2,75	0,29	2,66	3,53	0,12	2,16	3,07	0,19	1,34	1,72	0,63
Lençóis	Bahia	A425	1,15	1,57	0,31	1,76	2,34	0,17	0,97	1,65	<b>0,01</b>	1,20	1,51	0,40
Uauá		A435	0,47	1,81	0,34	<b>0,71</b>	1,64	0,47	<b>0,48</b>	1,52	0,51	1,43	2,01	0,57
Aracaú	Ceará	A360	0,80	1,45	0,72	1,00	1,68	0,66	0,49	1,39	0,65	0,76	1,20	0,76
Jaguaribe		A358	0,83	1,92	0,18	1,37	2,22	0,19	1,13	2,02	0,18	0,43	1,35	0,29
Bacabal	Maranhão	A220	1,62	2,24	0,29	1,74	2,21	0,30	1,38	1,94	0,31	0,73	1,24	0,32
Farol Santana		A217	<b>3,01</b>	<b>3,37</b>	0,48	<b>3,59</b>	<b>3,85</b>	0,43	3,25	3,53	0,38	<b>3,19</b>	<b>3,38</b>	0,67
Campina Grande	Paraíba	A313	0,71	<b>1,27</b>	0,59	0,93	1,35	0,58	2,82	3,21	0,50	0,74	1,13	0,70
Patos		A321	1,12	2,17	<b>0,12</b>	1,50	2,29	0,31	1,31	2,42	0,14	1,87	2,42	0,36
Arco Verde	Pernambuco	A309	<b>0,37</b>	1,43	0,35	1,84	2,69	<b>0,00</b>	0,97	2,11	0,03	0,22	1,16	0,47
Serra Talhada		A350	1,13	2,06	0,29	1,63	2,27	0,48	1,26	2,17	0,29	0,92	1,48	0,50
Picos	Piauí	A343	0,73	1,62	0,13	0,81	1,53	0,23	0,51	1,42	0,19	0,08	0,98	<b>0,23</b>
Caracol		A337	1,10	1,64	0,62	1,47	2,11	0,41	0,95	1,63	0,45	0,48	1,10	0,63
Mossoró	Rio Grande	A318	1,60	1,95	0,72	1,63	1,86	<b>0,80</b>	0,76	<b>1,18</b>	<b>0,79</b>	1,97	2,19	0,78
Natal do Norte		A304	0,82	1,38	0,42	0,87	<b>1,26</b>	0,56	2,77	3,08	0,43	0,77	1,07	0,67
Aracajú	Sergipe	A409	1,37	1,79	0,60	1,29	1,68	0,62	<b>3,65</b>	<b>4,13</b>	0,58	2,07	2,35	0,55
Poço Verde		A419	1,97	2,94	0,45	2,97	3,64	0,51	1,49	2,33	0,56	1,69	2,46	0,55
<b>Média</b>			<b>1,20</b>	<b>1,94</b>	<b>0,42</b>	<b>1,61</b>	<b>2,22</b>	<b>0,42</b>	<b>1,64</b>	<b>2,35</b>	<b>0,38</b>	<b>1,11</b>	<b>1,64</b>	<b>0,55</b>

*Erros percentuais a 10 m de altura, relativos à direção do vento, para março de 2018 – grade de 3 km*

d02			C1		C2		C3		GFS análises	
Estação	Estado	Código	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)
Maceió	Alagoas	A303	55,65	15,32	58,06	11,29	58,87	13,71	52,42	11,29
Palmeira dos Índios		A327	49,19	6,45	54,03	9,68	49,19	8,87	47,58	5,65
Lençóis	Bahia	A425	78,23	44,35	78,23	46,77	83,06	53,23	93,55	61,29
Uauá		A435	61,29	19,35	50,81	20,97	58,87	18,55	45,16	16,13
Aracáu	Ceará	A360	51,61	8,87	45,16	13,71	51,61	15,32	42,74	4,03
Jaguaribe		A358	66,13	17,74	62,10	20,16	59,68	21,77	53,23	20,16
Bacabal	Maranhão	A220	70,97	36,29	72,58	38,71	66,94	39,52	70,97	31,45
Farol Santana		A217	<b>33,06</b>	11,29	<b>29,03</b>	8,87	30,65	10,48	<b>28,23</b>	6,45
Campina Grande	Paraíba	A313	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>98,39</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
Patos		A321	70,16	41,13	72,58	34,68	75,81	43,55	67,74	33,06
Arco Verde	Pernambuco	A309	58,06	19,35	57,26	13,71	58,87	15,32	51,61	17,74
Serra Talhada		A350	79,03	46,77	76,61	47,58	78,23	46,77	77,42	41,13
Picos	Piauí	A343	73,39	39,52	74,19	46,77	74,19	43,55	69,35	35,48
Caracol		A337	66,94	41,13	71,77	34,68	65,32	36,29	70,16	44,35
Mossoró	Rio Grande	A318	35,48	8,06	33,87	<b>5,65</b>	<b>24,19</b>	<b>4,84</b>	41,94	4,03
Natal	do Norte	A304	44,35	<b>7,26</b>	48,39	10,48	51,61	10,48	43,55	6,45
Aracajú	Sergipe	A409	34,68	10,48	32,26	8,87	37,10	6,45	37,10	7,26
Poço Verde		A419	50,81	16,13	50,00	10,48	48,39	11,29	37,90	4,03
<b>Média</b>			<b>59,95</b>	<b>27,20</b>	<b>59,27</b>	<b>26,84</b>	<b>59,59</b>	<b>27,69</b>	<b>57,26</b>	<b>25,00</b>

Análises estatísticas a 52 e 98 m de altura, relativas à velocidade do vento, para março de 2018 – grade de 3 km

d02		C1			C2			C3			GFS análises	
Altura (m)	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r
52	1,74	2,99	0,63	1,75	3,04	0,55	2,04	3,15	0,54	0,89	2,12	0,64
98	1,83	3,23	0,64	1,87	3,25	0,57	2,11	3,37	0,56	1,33	2,40	0,70

Erros percentuais a 50 e 94 m de altura, relativos à direção do vento, para março de 2018 – grade de 3 km

d02		C1			C2			C3			GFS análises	
Altura (m)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)
50	58,87	32,26	58,87	33,06	62,10	31,45	56,45	31,45	50,00	15,32	56,45	31,45
94	55,65	26,61	57,26	25,81	54,84	22,58	50,00	15,32	50,00	15,32	50,00	15,32

**APÊNDICE B - SIMULAÇÕES MENSAIS DE SETEMBRO DE 2018**

*Análises estatísticas a 10 m de altura, relativas à velocidade do vento, para setembro de 2018 – grade de 9 km*

<b>d01</b>			<b>C1</b>			<b>C2</b>			<b>GFS análises</b>		
<b>Estação</b>	<b>Estado</b>	<b>Código</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>
Maceió	Alagoas	A303	<b>0,45</b>	<b>1,13</b>	0,77	<b>0,78</b>	<b>1,11</b>	<b>0,85</b>	-0,22	<b>0,77</b>	<b>0,87</b>
Palmeira dos Índios		A327	0,87	1,64	0,77	1,89	2,14	0,81	0,76	1,23	0,80
Lençóis	Bahia	A425	1,87	2,04	0,63	2,20	2,39	0,53	1,67	1,83	0,58
Uauá		A435	1,21	1,85	0,54	1,78	2,23	0,57	2,03	2,52	0,51
Aracauá	Ceará	A360	<b>5,60</b>	<b>6,04</b>	0,68	<b>6,37</b>	<b>6,61</b>	0,61	<b>5,45</b>	<b>5,56</b>	0,49
Jaguaribe		A358	1,37	2,34	0,43	2,60	3,09	0,40	0,51	1,78	0,26
Bacabal	Maranhão	A220	1,91	2,20	0,71	2,20	2,48	0,61	0,52	1,01	0,65
Farol Santana		A217	4,49	4,62	0,54	4,73	4,85	0,50	4,22	4,34	0,52
Campina Grande	Paraíba	A313	0,62	1,76	0,60	1,22	1,91	0,60	0,90	1,41	0,60
Patos		A321	1,20	3,31	0,20	4,34	5,01	<b>0,14</b>	2,37	2,80	0,60
Arco Verde	Pernambuco	A309	1,86	2,21	0,55	2,47	2,69	0,53	-0,57	1,11	0,63
Serra Talhada		A350	2,32	2,91	0,42	3,84	4,16	0,34	1,62	2,28	0,37
Picos	Piauí	A343	0,77	1,52	0,66	1,78	2,21	0,48	0,45	1,25	0,44
Caracol		A337	1,19	1,67	<b>0,84</b>	2,02	2,45	0,76	0,62	1,81	0,59
Mossoró	Rio Grande do Norte	A318	1,91	2,13	0,82	2,34	2,49	0,83	2,24	2,45	0,74
Natal		A304	0,84	1,24	0,71	0,86	1,18	0,76	0,61	1,00	0,77
Aracajú	Sergipe	A409	1,83	2,22	<b>0,20</b>	1,76	2,08	0,36	1,81	2,18	<b>0,19</b>
Poço Verde		A419	0,81	2,32	0,49	1,79	2,52	0,64	0,86	2,04	0,58
<b>Média</b>			<b>1,73</b>	<b>2,40</b>	<b>0,59</b>	<b>2,50</b>	<b>2,87</b>	<b>0,57</b>	<b>1,44</b>	<b>2,08</b>	<b>0,57</b>

*Erros percentuais a 10 m de altura, relativos à direção do vento, para setembro de 2018 – grade de 9 km*

d01			C1		C2		GFS análises	
Estação	Estado	Código	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)
Maceió	Alagoas	A303	41,32	12,40	40,50	14,05	42,15	12,40
Palmeira dos Índios		A327	37,19	1,65	37,19	4,96	38,02	3,31
Lençóis	Bahia	A425	71,07	28,10	76,86	29,75	<b>96,69</b>	<b>52,89</b>
Uauá		A435	35,54	0,83	33,06	0,83	29,75	1,65
Jaguaribe	Ceará	A358	61,16	14,88	61,16	11,57	59,50	16,53
Bacabal	Maranhão	A220	48,76	19,83	53,72	19,83	49,59	13,22
Farol Santana		A217	<b>23,14</b>	<b>0,00</b>	24,79	<b>0,00</b>	22,31	0,83
Campina Grande	Paraíba	A313	<b>100,00</b>	<b>47,93</b>	<b>99,17</b>	<b>49,59</b>	<b>96,69</b>	23,14
Patos		A321	52,89	15,70	47,93	0,83	47,11	1,65
Arco Verde	Pernambuco	A309	52,07	3,31	46,28	4,13	48,76	1,65
Serra Talhada		A350	83,47	27,27	83,47	28,93	80,17	21,49
Picos	Piauí	A343	57,85	19,83	48,76	9,09	53,72	9,92
Caracol		A337	57,85	30,58	52,07	23,97	46,28	23,14
Mossoró	Rio Grande do Norte	A318	33,06	<b>0,00</b>	42,15	<b>0,00</b>	35,54	<b>0,00</b>
Natal	Norte	A304	23,97	<b>0,00</b>	<b>21,49</b>	<b>0,00</b>	<b>11,57</b>	<b>0,00</b>
Aracajú	Sergipe	A409	32,23	1,65	34,71	1,65	41,32	1,65
Poço Verde		A419	33,06	3,31	33,06	2,48	36,36	4,13
	<b>Média</b>		<b>49,68</b>	<b>13,37</b>	<b>49,20</b>	<b>11,86</b>	<b>49,15</b>	<b>11,04</b>

*Análises estatísticas a 52 e 98 m de altura, relativas à velocidade do vento, para setembro de 2018 – grade de 9 km*

<b>d01</b>		<b>C1</b>		<b>C2</b>		<b>GFS análises</b>		
<b>Altura (m)</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>
52	2,49	3,32	0,58	2,32	3,19	0,56	0,43	1,93
98	2,61	3,45	0,64	2,37	3,30	0,60	0,56	2,09

*Erros percentuais a 50 e 94 m de altura, relativos à direção do vento, para setembro de 2018 – grade de 9 km*

<b>d01</b>		<b>C1</b>		<b>C2</b>		<b>GFS análises</b>	
<b>Altura (m)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	
50	28,93	0,83	28,10	0,00	34,71	6,61	
94	23,97	0,83	22,31	0,00	24,79	0,00	

*Análises estatísticas a 10 m de altura, relativas à velocidade do vento, para setembro de 2018 – grade de 3 km*

d02			C1			C2			GFS análises		
Estação	Estado	Código	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	r
Maceió	Alagoas	A303	0,72	1,22	0,75	0,89	1,28	0,79	<b>-0,22</b>	<b>0,77</b>	<b>0,87</b>
Palmeira dos Índios		A327	1,44	1,82	0,79	2,28	2,54	0,76	0,76	1,23	0,80
Lençóis	Bahia	A425	1,23	1,66	0,35	1,43	1,83	<b>0,28</b>	1,67	1,83	0,58
Uauá		A435	1,09	1,81	0,61	1,62	2,10	0,62	2,03	2,52	0,51
Aracauá	Ceará	A360	<b>6,02</b>	<b>6,32</b>	0,66	<b>6,67</b>	<b>6,84</b>	0,57	<b>5,45</b>	<b>5,56</b>	0,49
Jaguaribe		A358	1,55	2,22	0,50	2,84	3,46	0,39	0,51	1,78	0,26
Bacabal	Maranhão	A220	1,94	2,23	0,68	1,99	2,27	0,67	0,52	1,01	0,65
Farol Santana		A217	4,41	4,55	0,65	4,59	4,73	0,55	4,22	4,34	0,52
Campina Grande	Paraíba	A313	0,58	1,20	0,64	0,87	1,37	0,64	0,90	1,41	0,60
Patos		A321	1,17	2,91	<b>0,25</b>	3,39	3,88	0,44	2,37	2,80	0,60
Arco Verde	Pernambuco	A309	<b>0,34</b>	1,42	0,58	2,02	2,38	0,40	<b>-0,57</b>	1,11	0,63
Serra Talhada		A350	2,88	3,33	0,40	3,79	4,11	0,33	1,62	2,28	0,37
Picos	Piauí	A343	0,91	1,70	0,52	1,67	2,19	0,51	0,45	1,25	0,44
Caracol		A337	0,93	1,42	<b>0,86</b>	1,48	1,98	0,78	0,62	1,81	0,59
Mossoró	Rio Grande do Norte	A318	1,85	2,19	0,78	2,35	2,52	<b>0,80</b>	2,24	2,45	0,74
Natal		A304	0,39	<b>1,06</b>	0,68	<b>0,62</b>	<b>1,04</b>	0,75	0,61	1,00	0,77
Aracajú	Sergipe	A409	1,13	1,65	0,32	1,16	1,58	0,45	1,81	2,18	<b>0,19</b>
Poço Verde		A419	1,08	2,57	0,46	2,32	2,85	0,71	0,86	2,04	0,58
<b>Média</b>			<b>1,65</b>	<b>2,29</b>	<b>0,58</b>	<b>2,33</b>	<b>2,72</b>	<b>0,58</b>	<b>1,44</b>	<b>2,08</b>	<b>0,57</b>

*Erros percentuais a 10 m de altura, relativos à direção do vento, para setembro de 2018 – grade de 3 km*

d02			C1		C2		GFS análises	
Estação	Código	Estado	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)
Maceió	A303	Alagoas	44,63	13,22	40,50	14,88	42,15	12,40
Palmeira dos Índios	A327		33,06	1,65	41,32	0,83	38,02	3,31
Lençóis	A425	Bahia	74,38	28,10	68,60	22,31	96,69	<b>52,89</b>
Uauá	A435		31,40	0,83	33,06	0,83	29,75	1,65
Jaguaribe	A358	Ceará	63,64	19,83	57,02	13,22	59,50	16,53
Bacabal	A220	Maranhão	47,93	20,66	48,76	18,18	49,59	13,22
Farol Santana	A217		25,62	<b>0,00</b>	28,10	<b>0,00</b>	22,31	0,83
Campina Grande	A313	Paraíba	<b>100,00</b>	<b>56,20</b>	<b>99,17</b>	<b>57,85</b>	<b>96,69</b>	23,14
Patos	A321		56,20	11,57	46,28	0,83	47,11	1,65
Arco Verde	A309	Pernambuco	35,54	3,31	50,41	4,13	48,76	1,65
Serra Talhada	A350		84,30	40,50	85,12	33,06	80,17	21,49
Picos	A343	Piauí	60,33	24,79	45,45	9,92	53,72	9,92
Caracol	A337		58,68	29,75	53,72	26,45	46,28	23,14
Mossoró	A318	Rio Grande do Norte	19,83	<b>0,00</b>	26,45	0,83	35,54	<b>0,00</b>
Natal	A304	Norte	<b>17,36</b>	<b>0,00</b>	<b>18,18</b>	<b>0,00</b>	<b>11,57</b>	<b>0,00</b>
Aracajú	A409	Sergipe	32,23	4,13	35,54	2,48	41,32	1,65
Poço Verde	A419		44,63	12,40	33,88	2,48	36,36	4,13
<b>Média</b>			<b>48,81</b>	<b>15,70</b>	<b>47,74</b>	<b>12,25</b>	<b>49,15</b>	<b>11,04</b>

*Análises estatísticas a 52 e 98 m de altura, relativas à velocidade do vento, para setembro de 2018 – grade de 3 km*

<b>d02</b>		<b>C1</b>			<b>C2</b>			<b>GFS análises</b>		
<b>Altura (m)</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	
52	3,16	4,00	0,54	3,13	4,01	0,56	0,43	1,93	0,64	
98	3,29	4,16	0,60	3,06	4,04	0,55	0,56	2,09	0,65	

*Erros percentuais a 50 e 94 m de altura, relativos à direção do vento, para setembro de 2018 – grade de 3 km*

<b>d02</b>		<b>C1</b>			<b>C2</b>			<b>GFS análises</b>		
<b>Altura (m)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>
50	27,27	0,83	28,10	0,83	34,71	6,61				
94	22,31	0,83	23,14	0,83	24,79	0,00				

**APÊNDICE C - SIMULAÇÕES-TESTE PARA AVALIAÇÃO SOBRE A ATIVAÇÃO DA OPÇÃO DE ARRASTO POR ONDAS DE GRAVIDADE (*GRAVITY WAVE DRAG OPTION*)**

*Comparação entre C1 e C1.2 a 10 m de altura, relativas à velocidade do vento – grade de 9 km*

<b>d01</b>			<b>C1</b>				<b>C1.2</b>	
<b>Estação</b>	<b>Estado</b>	<b>Código</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>
Maceió	Alagoas	A303	0,51	<b>1,01</b>	<b>0,86</b>	0,53	<b>1,06</b>	<b>0,85</b>
Palmeira dos Índios		A327	0,89	1,78	0,42	0,94	1,81	0,43
Lençóis	Bahia	A425	1,55	1,91	0,46	1,31	1,63	0,50
Uauá		A435	0,76	1,92	0,26	0,76	1,90	0,24
Aracaú	Ceará	A360	<b>0,13</b>	1,28	0,66	<b>0,15</b>	1,25	0,68
Jaguaribe		A358	0,39	1,48	0,41	0,43	1,56	0,38
Bacabal	Maranhão	A220	1,17	1,63	0,24	1,23	1,63	0,36
Farol Santana		A217	<b>2,47</b>	2,81	0,21	<b>2,54</b>	2,88	0,19
Campina Grande	Paraíba	A313	0,64	1,35	0,69	0,62	1,28	0,71
Patos		A321	0,84	1,86	0,18	0,64	1,97	<b>-0,02</b>
Arco Verde	Pernambuco	A309	2,04	2,60	<b>0,07</b>	1,58	2,19	0,18
Serra Talhada		A350	0,46	1,62	0,40	0,43	1,63	0,42
Picos	Piauí	A343	0,24	1,18	0,11	0,27	1,15	0,15
Caracol		A337	1,19	1,85	0,41	1,38	1,99	0,45
Mossoró	Rio Grande do Norte	A318	0,90	1,31	0,79	0,83	1,26	0,80
Natal		A304	1,03	1,32	0,62	1,01	1,30	0,61
Aracajú	Sergipe	A409	1,42	1,79	0,73	1,39	1,75	0,73
Poço Verde		A419	2,06	<b>2,89</b>	0,41	2,01	<b>2,90</b>	0,38
<b>Média</b>			<b>1,04</b>	<b>1,76</b>	<b>0,44</b>	<b>1,00</b>	<b>1,73</b>	<b>0,45</b>

*Comparação entre C1 e C1.2 a 10 m de altura, relativas à direção do vento – grade de 9 km*

<b>Estação</b>	<b>Estado</b>	<b>Código</b>	<b>d01</b>	<b>C1</b>	<b>C1.2</b>	
			<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>
Maceió	Alagoas	A303	54,10	9,84	52,46	9,84
Palmeira dos Índios		A327	52,46	<b>4,92</b>	50,82	<b>4,92</b>
Lençóis	Bahia	A425	88,52	52,46	85,25	47,54
Uauá		A435	62,30	29,51	62,30	32,79
Aracaú	Ceará	A360	44,26	6,56	45,90	8,20
Jaguaribe		A358	55,74	14,75	59,02	9,84
Bacabal	Maranhão	A220	60,66	26,23	59,02	21,31
Farol Santana		A217	34,43	<b>4,92</b>	36,07	<b>4,92</b>
Campina Grande	Paraíba	A313	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
Patos		A321	85,25	52,46	73,77	45,90
Arco Verde	Pernambuco	A309	55,74	26,23	57,38	26,23
Serra Talhada		A350	72,13	49,18	72,13	44,26
Picos	Piauí	A343	72,13	31,15	75,41	39,34
Caracol		A337	68,85	39,34	73,77	36,07
Mossoró	Rio Grande do Norte	A318	31,15	6,56	34,43	6,56
Natal		A304	40,98	8,20	39,34	<b>4,92</b>
Aracajú	Sergipe	A409	<b>27,87</b>	8,20	<b>29,51</b>	9,84
Poço Verde		A419	52,46	18,03	50,82	16,39
<b>Média</b>			<b>58,83</b>	<b>27,14</b>	<b>58,74</b>	<b>30,51</b>

Comparação entre C1 e C1.2 a 10 m de altura, relativas à velocidade do vento – grade de 3 km

<b>d02</b>		<b>C1</b>				<b>C1.2</b>		
<b>Estação</b>	<b>Estado</b>	<b>Código</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>
Maceió	Alagoas	A303	1,18	1,58	<b>0,79</b>	1,23	1,73	0,73
Palmeira dos Índios		A327	2,34	3,52	<b>0,01</b>	2,49	3,70	0,03
Lençóis	Bahia	A425	1,23	1,73	0,33	1,07	1,60	0,47
Uauá		A435	0,84	2,09	0,28	0,56	1,83	0,39
Aracaú	Ceará	A360	0,77	1,39	0,79	0,86	1,53	<b>0,75</b>
Jaguaribe		A358	0,85	1,86	0,30	0,95	1,86	0,35
Bacabal	Maranhão	A220	1,54	2,22	0,40	1,41	1,79	0,39
Farol Santana		A217	<b>3,45</b>	<b>3,88</b>	0,04	<b>3,50</b>	<b>3,98</b>	<b>-0,17</b>
Campina Grande	Paraíba	A313	0,81	1,30	0,59	0,78	<b>1,20</b>	0,66
Patos		A321	1,51	2,27	0,21	1,33	2,60	<b>0,00</b>
Arco Verde	Pernambuco	A309	<b>0,55</b>	1,63	0,21	<b>0,22</b>	1,32	0,33
Serra Talhada		A350	1,18	2,10	0,32	1,41	2,39	0,29
Picos	Piauí	A343	0,70	1,33	0,24	0,65	1,57	<b>-0,01</b>
Caracol		A337	1,08	1,77	0,44	1,29	2,07	0,33
Mossoró	Rio Grande	A318	1,55	1,91	0,73	1,44	1,89	0,70
Natal	do Norte	A304	0,78	<b>1,26</b>	0,50	0,76	1,21	0,55
Aracajú	Sergipe	A409	1,37	1,74	0,67	1,40	1,74	0,68
Poço Verde		A419	2,39	3,27	0,37	2,36	3,32	0,35
		<b>Média</b>	<b>1,34</b>	<b>2,05</b>	<b>0,40</b>	<b>1,32</b>	<b>2,07</b>	<b>0,38</b>

*Comparação entre C1 e C1.2 a 10 m de altura, relativas à direção do vento – grade de 3 km*

		d02	C1		C1.2	
Estação	Estado	Código	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)	Octante errado (%)	Erro além dos octantes vizinhos (%)
Maceió	Alagoas	A303	52,46	8,20	50,82	6,56
Palmeira dos Índios		A327	54,10	9,84	55,74	13,11
Lençóis	Bahia	A425	85,25	60,66	86,89	52,46
Uauá		A435	75,41	34,43	55,74	39,34
Aracaú	Ceará	A360	49,18	<b>4,92</b>	42,62	9,84
Jaguaribe		A358	55,74	9,84	59,02	8,20
Bacabal	Maranhão	A220	70,49	27,87	65,57	34,43
Farol Santana		A217	34,43	9,84	40,98	8,20
Campina Grande	Paraíba	A313	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
Patos		A321	70,49	49,18	68,85	42,62
Arco Verde	Pernambuco	A309	72,13	27,87	77,05	36,07
Serra Talhada		A350	75,41	40,98	72,13	49,18
Picos	Piauí	A343	65,57	34,43	62,30	37,70
Caracol		A337	70,49	44,26	72,13	47,54
Mossoró	Rio Grande do Norte	A318	34,43	6,56	34,43	8,20
Natal		A304	39,34	<b>4,92</b>	37,70	<b>4,92</b>
Aracajú	Sergipe	A409	<b>31,15</b>	8,20	<b>26,23</b>	6,56
Poço Verde		A419	49,18	18,03	55,74	22,95
		<b>Média</b>	<b>60,29</b>	<b>27,78</b>	<b>59,11</b>	<b>29,33</b>

*Comparação entre C1 e C1.2 a 52 e 98 m de altura, relativas à velocidade do vento – grade de 9 e 3 km, respectivamente*

<b>d01</b>		<b>C1</b>			<b>C1.2</b>		
<b>Altura (m)</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	
52	1,88	3,09	0,27	1,52	3,03	0,19	
98	2,10	3,45	0,31	1,48	3,19	0,27	

<b>d02</b>		<b>C1</b>			<b>C1.2</b>		
<b>Altura (m)</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	<b>Bias (m/s)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>r</b>	
52	1,37	2,70	0,33	0,76	2,55	0,24	
98	1,51	2,95	0,35	0,63	2,69	0,27	

*Comparação entre C1 e C1.2 a 50 e 94 m de altura, relativas à direção do vento – grade de 9 e 3 km, respectivamente*

<b>d01</b>		<b>C1</b>			<b>C1.2</b>	
<b>Altura (m)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>
50	72,13	47,54	80,33	47,54		
94	60,66	34,43	68,85	40,98		

<b>d02</b>		<b>C1</b>			<b>C1.2</b>	
<b>Altura (m)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>	<b>Octante errado (%)</b>	<b>Erro além dos octantes vizinhos (%)</b>
50	75,41	52,46	77,05	57,38		
94	68,85	39,34	67,21	42,62		

**APÊNDICE D – EXEMPLIFICAÇÃO DE UM ARQUIVO NAMELIST.INPUT  
 UTILIZADO PARA C1 COM AS PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS  
 DESTACADAS**

```

&time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 126,
run_minutes         = 0,
run_seconds         = 0,
start_year          = 2018,   2018,
start_month         = 03,    03,
start_day           = 01,    01,
start_hour          = 00,    00,
end_year            = 2018,   2018,
end_month           = 03,    03,
end_day             = 06,    06,
end_hour            = 06,    06,
interval_seconds    = 21600,
input_from_file     = .true., .true.,
history_interval    = 60,    60,
frames_per_outfile  = 1000,   1000,
restart             = .false.,
restart_interval    = 1440,
io_form_history     = 2,
io_form_restart      = 2,
io_form_input        = 2,
io_form_boundary     = 2,
debug_level          = 0,
/

```

&domains

```

auto_levels_opt = 2,
max_dz           = 1000.,
dzbot            = 25.,
dzstretch_s      = 1.1,
dzstretch_u      = 1.2,
time_step        = 45,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom          = 2,
e_we              = 400,    475,
e_sn              = 400,    475,
e_vert            = 45, 45,
p_top_requested   = 5000,
num_metgrid_levels = 32,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                = 9000,   3000,
dy                = 9000,   3000,
grid_id           = 1,     2,
parent_id         = 1,     1,
i_parent_start    = 1,     121,
j_parent_start    = 1,     121,
parent_grid_ratio = 1,     3,
parent_time_step_ratio = 1,   3,
feedback          = 0,
smooth_option     = 0,
/
&physics
mp_physics        = 6,   6,
cu_physics        = 1,   0,
ra_lw_physics    = 4,   4,

```

```

ra_sw_physics      = 4,   4,
bl_pbl_physics     = 1,   1,
sf_sfclay_physics  = 1,   1,
sf_surface_physics = 2,   2,
radt                = 27,  27,
bldt                = 0,   0,
cudt                = 5,   5,
isfflx              = 1,
ifsnow              = 0,
icloud              = 1,
num_land_cat        = 21,
sf_urban_physics    = 0,   0,
topo_wind            = 1,   1,
/

```

**&fdda**

/

**&dynamics**

```

hybrid_opt          = 2,
w_damping           = 0,
diff_opt             = 1,   1,
km_opt               = 4,   4,
diff_6th_opt        = 0,   0,
diff_6th_factor     = 0.12, 0.12,
base_temp            = 290.
damp_opt             = 0,
zdamp                = 5000., 5000.,
dampcoef             = 0.2,  0.2,
khdif                = 0,   0,
kvdif                = 0,   0,
non_hydrostatic      = .true., .true.,

```

```
moist_adv_opt      = 1,    1,  
scalar_adv_opt     = 1,    1,  
gwd_opt           = 0,  
&fdda  
/
```

```
&bdy_control  
spec_bdy_width    = 5,  
spec_zone          = 1,  
relax_zone         = 4,  
specified          = .true., .false.,  
nested             = .false., .true.,  
/
```

```
&grib2  
/
```

```
&namelist_quilt  
nio_tasks_per_group = 0,  
nio_groups          = 1,  
/
```