



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Meteorologia

**SISTEMA INTEGRADO DE MODELAGEM AMBIENTAL
DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE NA ÁREA DE
INFLUÊNCIA DE CENTRAIS NUCLEARES**

Larissa de Freitas Ramos Jacinto

Orientadores: D. Sc. Luiz Cláudio Gomes Pimentel
D. Sc. Luiz Paulo de Freitas Assad

Rio de Janeiro
Dezembro de 2020

**SISTEMA INTEGRADO DE MODELAGEM
AMBIENTAL DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE
NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE CENTRAIS
NUCLEARES**

LARISSA DE FREITAS RAMOS JACINTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientador: D. Sc. Luiz Cláudio Gomes Pimentel

Orientador: D. Sc. Luiz Paulo de Freitas Assad

Rio de Janeiro
Dezembro de 2020

**SISTEMA INTEGRADO DE MODELAGEM AMBIENTAL DOS
FENÔMENOS DE TRANSPORTE NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE
CENTRAIS NUCLEARES**

LARISSA DE FREITAS RAMOS JACINTO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).



PROF. DR. LUIZ CLÁUDIO GOMES PIMENTEL (ORIENTADOR)



PROF. DR. LUIZ PAULO DE FREITAS ASSAD (ORIENTADOR)



PROF. DR. EDILSON MARTON



PROF. DR. WALLACE FIGUEIREDO MENEZES



DR. JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA JUNIOR

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2020

JACINTO, LARISSA DE FREITAS RAMOS

“SISTEMA INTEGRADO DE MODELAGEM AMBIENTAL DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE CENTRAIS NUCLEARES.”

Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2020, 153p.

Orientador: D. Sc. Luiz Cláudio Gomes Pimentel

Orientador: D. Sc. Luiz Paulo de Freitas Assad

Dissertação (Mestrado) - UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, 2020.

Referências Bibliográficas: pp. 120-131.

AGRADECIMENTOS

É muito gratificante encerrar este ciclo tão importante da minha história estando cercada (mesmo que de forma remota) de pessoas tão maravilhosas. Chegar ao fim de um mestrado é algo que não imaginava que seria possível nem nos meus sonhos mais audaciosos da infância.

Devo tudo isso primeiramente aos meus pais, que sempre fizeram o possível e o impossível para que eu tivesse acesso a uma educação que eles não tiveram a chance de ter. Agradeço também a minha irmã pela paciência e por todo o suporte ao longo dos anos.

Serei eternamente grata a meus orientadores, Luiz Claudio e Luiz Paulo, com os quais eu tenho a honra de aprender sobre ciência desde a graduação. Conhecê-los foi um grande presente da UFRJ. Sinto que fui abençoada por ter a chance de trabalhar com profissionais tão incríveis e que me ensinaram como a enxergar a minha formação em meteorologia de forma muito mais ampla.

Gostaria de agradecer também aos membros da banca por todas as sugestões feitas desde a qualificação. Graças a muitas destas sugestões este trabalho foi lapidado ao longo dos últimos meses para chegar no atual resultado.

Agradeço também aos meus queridos doutores Ian, Maurício, Nilton e Corbiniano por todas as contribuições que tornaram a realização deste trabalho possível. A oportunidade de aprender com vocês nos últimos anos foi maravilhosa. Vocês são profissionais incríveis e me inspiram demais!

Também gostaria aos profissionais envolvidos no Núcleo Computacional de Estudos da Qualidade do Ar (NCQAR), Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE) e Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) pela parceria e pela oportunidade de aprendizado concedida.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pelo apoio financeiro dado através da concessão de uma bolsa de Mestrado.

Por fim, agradeço as pessoas maravilhosas que ultrapassaram as fronteiras da minha vida acadêmica e tornam o meu dia-a-dia mais leve e mais feliz.

Aos meus amigos do Colégio Pedro II, Andreia, André, Chico, Daniel, Larissa, Luiza, Pedro e Teles pela parceria e pelos momentos incríveis que colecionamos juntos nestes 10 anos de amizade. Agradeço especialmente ao Victor, por estar ao meu lado em todos os momentos,

me consolando nos momentos de frustração e comemorando em parceria todas as conquistas dos últimos anos.

Aos amigos que o departamento de meteorologia UFRJ trouxe para a minha vida, Marina, Judith, Léo Lotsch, Hoffman, Mayara, Suellen, Jonatha, Denise, Ana Clara, Vitor Miranda, Bruno Dumas, Natasha e Marcely. A energia de vocês tornou/torna a experiência dentro da universidade mais divertida. Muito obrigada pelas horas de estudo em grupo, por todas as reuniões para jogar conversa fora nos horários das refeições, por todos os conselhos e, especialmente, obrigada por todas as festas.

RESUMO

SISTEMA INTEGRADO DE MODELAGEM AMBIENTAL DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE CENTRAIS NUCLEARES

Larissa de Freitas Ramos Jacinto

Dezembro/2020

A região da Baía de Ilha Grande tem sido alvo de diversos estudos devido a instalação da CNAAA e, assim exigiu maior conhecimento dos fenômenos ambientais como subsídio aos protocolos de segurança nuclear. Recentes estudos reforçam o papel dos avanços tecnológicos na área da computação de alto desempenho e sua inserção na modelagem integrada do meio ambiente a partir da simulação computacional, das técnicas de mineração de dados, da estatística aplicada e exploratória e do sistema de informações geográficas (SIG). Portanto, objetiva-se desenvolver um sistema modelagem ambiental integrada via modelagem determinística e estatística para a identificação e hierarquização das forçantes que modulam o regime de escoamento atmosférico na região da CNAAA. O monitoramento atmosférico e informações topográficas foram usados na caracterização observacional dos regimes predominantes de vento e das condições de estabilidade, sendo consideradas análises no domínio do tempo e da frequência. A investigação observacional permitiu avaliar a influência combinada dos efeitos do terreno e dos sistemas meteorológicos em multiescala sobre o regime de vento na CNAAA, cujo as principais direções identificadas foram N, NE, E, SE, S, SO, OSO e O. As energias correspondentes a fenômenos desde a microescala (horas) até a escala sinótica (dias) foram identificadas com confiança estatística de 95% nos espectros de ondeleta do vento. Os resultados obtidos para torre D15m demonstrou uma menor similaridade com relação as demais torres A, B e C. O parâmetro de estabilidade baseado no gradiente de temperatura teve predominâncias de situações neutras (D), ligeiramente estáveis (E) e fortemente instáveis (A), e o desvio padrão da direção do vento a 10m apontou predominância das classes A, D e B. As simulações do modelo WRF evidenciam a influência da resolução da base topográfica e da configuração do aninhamento de grade na habilidade do WRF em representar o escoamento local. Os melhores resultados do WRF foram para o período diurno sob a influência da circulação da brisa marítima.

ABSTRACT

The Ilha Grande Bay region has been the target of studies due to the installation of the CNAAA, requiring greater knowledge related to the dominant environmental phenomena to support the nuclear safety protocols. Recent studies reinforce the role of technological advances in the area of high-performance computing and their insertion in integrated modeling of the environment, combining computer simulation, data mining tools, exploratory statistics, and the geographic information system. Having identified the relevance of the integrated environmental analysis, the objective is to develop an integrated environmental modeling system via deterministic and statistical modeling for the identification and hierarchy of the forcing agents that modulate the atmospheric flow regime in the CNAAA region. Atmospheric monitoring and topographic information were used for the observational characterization of prevailing wind regimes and stability conditions, considering analyzes in the domain of time and frequency. The observational investigation allowed the evaluation of the combined influences of the terrain effects and the several meteorological systems on the wind regime at CNAAA. The main directions identified were N, NE, E, SE, S, SW, WSW, and W. Signals corresponding to phenomena from the microscale (hours) to the synoptic scale (days) were identified with 95% statistical confidence. Among the observational data analyzed, those obtained in the D15m tower showed less similarity in relation to the other monitoring sites evidenced in Towers A, B, and C. The parameters of stability based on the temperature gradient indicated a predominance of neutral situations (D), slightly stable (E) and strongly unstable (A). While the standard deviation of the wind direction at 10m has a predominance of A, D, and B classes. The WRF mesoscale model was used to perform simulations, which show the influence of the topographic base resolution and the grid nesting configuration on the model's ability to represent the local flow. The best results for the simulations were obtained for the daytime period under the influence of the sea breeze.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo geral	7
1.1.1	Objetivos específicos	7
2	Fundamentação teórica	8
2.1	Circulação do vento em regiões montanhosas	8
2.2	Conceito de Mineração de Dados	19
2.2.1	Descrição da Análise no Domínio da Frequência - A Técnica de Ondeleta	19
2.2.2	BoxPlot	21
2.2.3	Matriz de Correlação	22
2.3	Descrição da Modelagem Determinística Integrada - Sistema WRF	24
2.3.1	Sistema de coordenada vertical no WRF	26
2.3.2	Parametrizações voltadas para representação de atmosférica em regiões de topografia complexa	26
2.4	Descrição das bases topográficas	27
3	Revisão Bibliográfica	30
3.1	Estudos observacionais e de modelagem numérica em terrenos complexos	30
3.2	A presença da meteorologia no contexto do setor nuclear.	38
3.3	Estudos para a região da CNAAA: micrometeorologia e modelos computacionais de planejamento de emergência	40
4	Materiais e métodos	47
4.1	Aspectos da região de estudo	50
4.2	Dados	51
4.3	Caracterização observacional	52
4.4	Aplicação da técnica de ondeleta	54
4.5	Configuração do modelo WRF	57
4.5.1	Aninhamentos de grade no modelo WRF	57
4.5.2	Condições iniciais e de contorno	59
4.5.3	Estudo de caso	61
4.6	Análise visual dos efeitos de sombreamento	65
5	Resultados: Dados Observados	67
5.1	Caracterização da circulação local	67
5.2	Espectros de ondeleta	77
5.3	Efeitos de sombreamento	85
5.4	Avaliação da condição de estabilidade atmosférica	87

5.5 Análise da Correlação entre o vento e as Condições de Estabilidade da Atmosfera – Uso da Matriz de Correlação	89
6 Resultados: Modelo Numérico	93
6.1 Análise Sinótica	93
6.2 Condições de Contorno Estáticas	95
6.3 Validação Estatística	100
6.4 Campos espaciais	107
6.5 Meteogramas	110
7 Conclusões	116
7.1 Recomendações	118
Referências Bibliográficas	120
Anexo I	132
Anexo II	145
Anexo III	151

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Reportagem do sítio Exame em que são mencionados os planos do Governo para a indústria nuclear. (Fonte:exame.abril.com.br/economia/governo-estuda-construcao-de-seis-usinas-nucleares-ate-2050/)* 4
- Figura 2: Usinas nucleares em operação no mundo. 5
- Figura 3: Orientação e formato da barreira topográfica em relação ao escoamento atmosférico (Adaptado de Whiteman, 2000). 9
- Figura 4: Componentes do sistema de circulação diurna em terrenos montanhosos. O esquema acima ilustra as células de circulação associadas aos ventos de encosta, ventos ao longo do vale e ventos planície-montanha. Um modelo conceitual baseado nos Montes Apalaches (Whiteman, 2000). 11
- Figura 5: Esquema das forças envolvidas nos ventos (V) de encosta anabáticos e catabáticos (Barry, 2008). 12
- Figura 6: Escoamento ao longo do eixo do vale (Fonte: Adaptado de <https://commons>). 12
- Figura 7: Circulação perpendicular ao eixo do vale devido ao aquecimento assimétrico das encostas. A encosta iluminada pela radiação solar está indicada pela linha tracejada e a encosta onde há sombra é indicada pela linha sólida. As letras B e A representam as áreas de baixa e alta pressão, respectivamente. (Adaptado de Lehner et al, 2011) 13
- Figura 8: Na canalização dirigida pela pressão, os ventos são advectados ao longo do eixo do vale a partir da extremidade de alta pressão do vale até a extremidade de pressão mais baixa, enquanto os ventos superiores, fluem paralelamente às isóbaras. Em (a) o vento flui descendo o vale, em (b) o vento flui vale acima e em (c) o gradiente de pressão ao longo do vale é desprezível. Esquema idealizado para o hemisfério norte (Whiteman, 2000). 15
- Figura 9: Quatro mecanismos forçantes que relacionados para a interação entre os ventos locais e os ventos produzidos por componentes sinóticas. São eles: (a) termicamente induzida, (b) transporte de momentum, (c) canalização forçada e a (d) canalização dirigida pelo gradiente de pressão (Fonte: adaptado de Whiteman e Doran (1993)). 16
- Figura 10: Esquema conceitual das brisas (a)marítima e (b) terrestre (Fonte: Ahrens, 2009 - adaptado). 18
- Figura 11: Ondeleta complexa de Morlet dada pela parte real (azul) e imaginária (vermelho) no domínio do tempo. 21
- Figura 12: Esquema ilustrativo de um diagrama de boxplot. 22
- Figura 13: Diagrama da organização do modelo WRF com a disposição dos módulos utilizados neste estudo. 25
- Figura 14: Fluxograma composto pela metodologia proposta de um (a) sistema combinado de modelagem ambiental, com detalhamento das etapas propostas para caracterização da região de estudo, modelagem estatística, modelagem determinística e monitoramento meteorológico e (b) detalhamento de testes realizados no modelo regional WRF. Os elementos hachurados indicam a variável precipitação, que deve ser incluída em estudos futuros para um sistema de modelagem ambiental mais abrangente. 48
- Figura 15: Enquadramento geográfico e posicionamento das torres meteorológicas (A, B, C e D) e do complexo nuclear da CNAAA. São destacadas as regiões de floresta e de ocupação urbana ao longo da costa da Baía de Ilha Grande e da Baía de Sepetiba. 51
- Figura 16: Posicionamento das torres meteorológicas (A, B, C e D) da CNAAA e a topografia no seu entorno (Fonte: Oliveira-Júnior (2010)). 51
- Figura 17: Visualização gráfica da aplicação da técnica de ondeleta para uma série sintética com período constante de 1 dia. São indicados por seta os principais elementos da figura, são eles:

Espectro contínuo e a energia referente a série sintética, curvas de confiança estatística, média temporal do espectro global e cone de influência. (Fonte: Elaboração própria)	56
Figura 18: Domínios de 9km, 3km, e 1km utilizados nas simulações com o modelo WRF(G1).	57
Figura 19: Domínios de 4,5km, 1,5km e 500m utilizados nas simulações com o modelo WRF (G2).	59
Figura 20: Níveis verticais e alturas correspondentes.	60
<i>Figura 21: Localização geográfica (círculo) das torres A (vermelho), B (roxo), C (azul cyan) e D (amarelo) e ponto de grades correspondentes (estrelas). (a) G2 - GMTED2010, (b) G2 - ASTER (c) G2 - SRTM e (d) G1 - GMTED2010.</i>	65
Figura 22: Visualização aérea da CNAAA através da Plataforma Google Earth Pro. O recurso Luz Solar está sinalizado através do retângulo vermelho sinalizado pelo retângulo vermelho. A região demarcada pela elipse roxa corresponde a barra de opções do recurso Luz Solar.	66
Figura 23: Distribuição de frequência dos ventos para a torre A - 10m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.	68
Figura 24: Distribuição de frequência dos ventos para a torre A - 60m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.	69
Figura 25: Distribuição de frequência dos ventos para a torre A - 100m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.	70
Figura 26: Distribuição de frequência dos ventos para a torre B - 15m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.	71
Figura 27: Distribuição de frequência dos ventos para a torre C - 15m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.	71
Figura 28: Distribuição de frequência dos ventos para a torre D - 15m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.	73
Figura 29: Boxplot da velocidade média horária (m.s-1) para as torres meteorológicas (a) A10m, (b) A60m, (c) A100m, (d) B15m, (e) C15m e (f) D15m para o período de 1982 à 2001.	76
Figura 30: Boxplot da velocidade média mensal (m.s-1) para as torres meteorológicas (a) A10m, (b) A60m, (c) A100m, (d) B15m, (e) C15m e (f) D15m para o período de 1982 à 2001.	76
Figura 31: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em A10m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.	78
Figura 32: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em A60m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.	79
Figura 33: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional da componente (b) zonal do vento (m/s) em A100m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.	80
Figura 34: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em B15m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.	82

Figura 35: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em C15m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.	83
Figura 36: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em D15m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.	84
Figura 37: Evolução diurna das sombras sobre as encostas do entorno da CNAAA em um dia representativo para o verão (05/01/2020): (a) 07h30, (b) 13h00 e (c) 17h30.	86
Figura 38: Evolução diurna das sombras sobre as encostas do entorno da CNAAA em um dia representativo para o inverno (05/07/2020): (a) 08h30, (b) 13h00 e (c) 15h30.	87
Figura 39: Ocorrências de cada classe de Pasquill a partir de cada índice de estabilidade: (a) $\Delta T/\Delta z$, (b) SIG10.	89
Figura 40: Boxplot do ciclo diurno dos índices de estabilidade calculados com dados da torre meteorológica A para o ano de 2016 (a) $\Delta T/\Delta z$, (b) SIG10.	89
Figura 41: Matriz de Correlação entre os dados de vento e estabilidade.	91
Figura 42: Matriz de Correlação entre os dados de vento e estabilidade nos períodos da (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde e (d) noite.	92
Figura 43: Carta de pressão ao nível do mar referente ao dia 05/01/2016 às 12Z e imagem de satélite do canal de temperatura realçada do mesmo horário (Fontes: Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil e CPTEC/INPE).	94
Figura 44: Carta de pressão ao nível do mar referente ao dia 06/01/2016 às 12Z e imagem de satélite do canal de temperatura realçada do mesmo horário (Fontes: Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil e CPTEC/INPE).	94
Figura 45: Campos da variável LU_INDEX nas grades D3 de cada experimento. (a) G2 - GMTED2010, (b) G2 - ASTER (c) G2 - SRTM e (d) G1 - GMTED2010.	97
Figura 46: Campos da variável LANDMASK nas grades D3 de cada experimento. (a) G2 - GMTED2010, (b) G2 - ASTER (c) G2 - SRTM e (d) G1 - GMTED2010.	97
Figura 47: Campos da variável HGT nas grades D3 de cada experimento (a) G2 - GMTED2010, (b) G2 - ASTER (c) G2 - SRTM e (d) G1 - GMTED2010.	98
Figura 48: Diferença entre as bases topográficas nos domínios de 500m. (a) (G2 -GMTED2010) - (G2 -ASTER), (b) (G2 -GMTED2010) -(G2 - SRTM) e (c) (G2 -ASTER) - (G2 -SRTM).	98
Figura 49: Temperatura da Superfície do Mar - RTG ($^{\circ}C$) ao entre 31/12/2015 e 31/01/2016.	99
Figura 50: Diagramas de taylor da intensidade do vento do modelo WRF (estudo de caso) configurado com as bases topográficas G2 - ASTER (A), G2 - GMTED2010 (G), G1 - GMTED2010 (1km) e G2 - SRTM (S) em relação aos dados observados dos pontos de medição (a) A10m, (b) A60m, (c) A100m, (d) B15m, (e) C15m e (f) D15m.	102
Figura 51: Diagramas de taylor da intensidade do vento do modelo WRF (janeiro de 2016) configurado com as bases topográficas G2 - ASTER (A), G2 - GMTED2010 (G), G1 - GMTED2010 (1km) e G2 - SRTM (S) em relação aos dados observados dos pontos de medição (a) A10m, (b) A60m, (c) A100m, (d) B15m, (e) C15m e (f) D15m.	102
Figura 52: Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G2 - GMTED2010 para o dia 5 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAAA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h.	108

- Figura 53: Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G2 - GMTED2010 para o dia 6 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAAA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h. 109
- Figura 54: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre A10m. 111
- Figura 55: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre A60m. 112
- Figura 56: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre A100m. 113
- Figura 57: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre B15m. 114
- Figura 58: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre C15m. 115
- Figura 59: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre D15m. 115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Projetos de pesquisa voltados para a caracterização meteorológica de terrenos complexos.	31
Tabela 2: Estudos meteorológicos na região da CNAAA.	41
Tabela 3: Localização das torres meteorológicas da CNAAA com as alturas da base das torres em relação ao nível do mar e alturas do sensor (m).	52
Tabela 4: Classificação dos parâmetros de estabilidade e as classes correspondentes de acordo com as classes de Pasquill (CNEN, 1989).	53
Tabela 5: Configurações definidas para visualização dos espectros de ondeleta.	56
Tabela 6: Detalhamento acerca dos domínios aninhados de 9km, 3km e 1km (G1)	58
Tabela 7: Detalhamento acerca dos domínios aninhados de 4,5km, 1,5km e 500m (G2).	59
Tabela 8: Configuração do WRF nos quatro experimentos	60
Tabela 9: Parametrizações físicas utilizadas nos domínios	61
Tabela 10: Valor da elevação do terreno no local de instalação de cada torre e no ponto de grade atribuído para cada torre.	64
Tabela 11: Percentual (%) de calmaria das torres meteorológicas da CNAAA com respectivos períodos (madrugada, manhã, tarde e noite) e o total.	74
Tabela 12: Métricas estatísticas (RMSE, viés, EAM) referentes aos quatro experimentos numéricos nos seis pontos de medição no entorno da CNAAA referentes a avaliação da direção do vento (°) no estudo de caso.	103
Tabela 13: Métricas estatísticas (RMSE, viés, EAM, FOEX) referentes aos quatro experimentos numéricos nos seis pontos de medição no entorno da CNAAA referentes a avaliação da intensidade do vento (m/s) no estudo de caso.	104
Tabela 14: Métricas estatísticas (RMSE, viés, EAM) referentes aos quatro experimentos numéricos nos seis pontos de medição no entorno da CNAAA referentes a avaliação da direção do vento (°) em janeiro de 2016.	105
Tabela 15: Métricas estatísticas (RMSE, viés, EAM, FOEX) referentes aos quatro experimentos numéricos nos seis pontos de medição no entorno da CNAAA referentes a avaliação da intensidade do vento (m/s) em janeiro de 2016.	106

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ACM2** *Asymmetric Convective Model version 2 scheme*
- ARPS** *Advanced Regional Prediction System*
- ASTER** *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*
- CALMET** California Meteorological model
- CALPUFF** California Puff model
- CDED** *Canadian Digital Elevation Data*
- CFN** Comunidad Foral de Navarra
- CNAAA** Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
- CNEN** Comissão Nacional de Energia Nuclear
- COLPEX** *Cold-Air Pooling Experiment*
- DEM** *Digital Elevation Model*
- EAM** Erro Absoluto Médio
- FGP** Força do Gradiente de Pressão
- FOEX** fator de excedência
- GDEM** *Global Digital Elevation Model*
- GFS** Global Forecast System
- GMTED2010** Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010
- GTOPO30** Global 30 Arc-Second Elevation
- IAEA** *International Atomic Energy Agency*
- IBGE** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IBM** *Immersed Boundary Method*
- IPCC** *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- LAMCE/COPPE** Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia
- MAP** *Mesoscale Alpine Programme*
- MATERHORN** *Mountain Terrain Atmospheric Modeling and Observations Program*
- METCRAX** *Meteor Crater Experiment*
- METCRAX II** *Second Meteor Crater Experiment*
- MM5** Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model
- MODIS** Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- MYJ** Mellor–Yamada–Janjic scheme
- MYNN2** *Mellor–Yamada–Nakanishi–Niino level 2.5 scheme*
- NCEP** National Centers for Environmental Prediction

NRC *Nuclear Regulatory Commission*
QNSE *Quasi-Normal Scale Elimination scheme*
RRTM *Rapid Radiative Transfer Model*
RMSE *Raiz quadrada do erro-médio*
RASS *Radio Acoustic Sounding Systems*
SIG *Sistema de Informação Geográfica*
T-REX *Terrain-Induced Rotor Experiment*
TSM RTG *Real-Time Global Sea Surface Temperature*
VTMX *Vertical Transport and Mixing campaign*
YSU *Yonsei University scheme*
WPS *WRF Preprocessing System*
WRF *Weather Research and Forecast*

Capítulo 1

1 Introdução

De acordo com as projeções atuais do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) estima-se que a emissão de gases poluentes pode causar um aumento na temperatura global de pelo menos 1,5°C, em relação as temperaturas do período pré-industrial (Zhai et al., 2018). Dessa forma, para desacelerar este aquecimento é crucial que os desenvolvimentos industriais e tecnológicos estejam aliados com a mitigação dos impactos ambientais causados pelo aquecimento global. No setor energético, combustíveis fósseis como carvão e petróleo ainda são responsáveis pela maior parte da produção de energia elétrica no mundo. Estima-se que cerca de 65.9% do total da energia produzida em 2014 foi proveniente destes combustíveis. Contudo, estas fontes energéticas liberam durante o processo de produção de energia grandes quantidades de gases poluentes na atmosfera (EPE, 2017).

A fim de diminuir a liberação de poluentes no processo de geração de energia, as fontes energéticas consideradas limpas estão em crescimento no mercado energético mundial, dentre as quais pode-se citar: a energia hidrelétrica, eólica, solar e nuclear. No entanto, algumas dessas fontes estão suscetíveis às variações na geração de energia causadas por fatores ambientais, como a variação na disponibilidade de energia solar, variabilidade da intensidade dos ventos ou pela sazonalidade das chuvas (Queiroz et al. 2019; Velloso et al, 2019). Desta forma, fica evidente uma vantagem da fonte energética nuclear, que pode manter uma taxa de produção de energia constante, sem depender da variabilidade de fatores meteorológicos. Além disso, deve-se destacar também a limitação tecnológica ainda presente no contexto de exploração de outras fontes de energia. No caso da energia eólica, por exemplo, o processo de geração de energia ainda é muito recente e nem sempre é viável do ponto de vista econômico e logístico (Energy, 2020).

A energia nuclear é obtida através do processo de fissão nuclear, onde retira-se energia através da divisão do núcleo de um átomo como, por exemplo, o Urânio-235. Este processo não produz gases poluentes, no entanto, gera rejeitos radioativos que precisam ser tratados antes de serem liberados para o meio ambiente (EPE, 2007). Estes rejeitos radioativos são extremamente perigosos para o meio ambiente e seres vivos podem causar impactos ambientais por até milhares de anos. Devido a isto, a indústria nuclear necessita de grandes investimentos

em protocolos de segurança, tecnologia das instalações e treinamento de pessoal, visto que acidentes nucleares são caracterizados por sua severidade e impactos ambientais. Dentre os casos mais expressivos em relação aos impactos gerados destacam-se Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) e Fukushima (2011).

A ocorrência desses acidentes chamou a atenção da comunidade internacional sobre a necessidade de protocolos de segurança cada vez mais rígidos. E, o acidente mais recente registrado, Fukushima (2011), foi provavelmente o principal motivo para a redução quanto à construção de novas unidades nucleares tanto no Brasil, bem como em outros países no mundo (EPE, 2018), restringindo o uso da energia nuclear na matriz energética. Tais ações enfatizam que o problema relacionado à segurança tem sido uma das principais questões que precisam ser resolvidas no setor nuclear (IAEA, 2012).

A padronização destas normas de segurança a nível internacional é realizada pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA). Estes padrões buscam estabelecer os princípios, requisitos e as recomendações fundamentais a serem seguidos para garantir um alto nível de segurança para proteção de pessoas e do meio ambiente dos efeitos nocivos da radiação ionizante. Estas informações são publicadas nos chamados Safety Standards, e servem como a referência mundial a ser seguida pelas agências nacionais para garantir a segurança nuclear (IAEA, 2011; IAEA, 2019).

Dentre essas normas, foi publicado em 2011 o Guia de Segurança Específico para Avaliação de Riscos Meteorológicos e Hidrológicos em Instalações Nucleares. Em relação aos requisitos e recomendações gerais acerca dos dados meteorológicos é relevante destacar as seguintes instruções do relatório (IAEA, 2011):

- Os dados *in situ* devem ser coletados seguindo os padrões estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial. E, sua qualidade deve permitir a avaliação da ocorrência de valores extremos de variáveis meteorológicas e a detecção de fenômenos meteorológicos de ocorrência rara que podem oferecer riscos a uma instalação nuclear.
- Caso haja uma série histórica longa o suficiente, através destes dados deve-se extrair informações estatísticas climatológicas que incluam a ocorrência de valores extremos.
- Caso existam, outras fontes de dados e informações meteorológicas relevantes podem ser utilizadas. Como, por exemplo, análises históricas de outros institutos, dados reanálise e dados de estudos e projetos anteriores para a região.

Além disso, também foi destacado que podem ser utilizados produtos provenientes de técnicas de sensoriamento remoto.

Em relação a modelos numéricos de mesoescala, foi feita a seguinte recomendação no Guia:

"Modelos numéricos de mesoescala com resolução espacial adequada para resolver a características geofísicas, regionais e locais da região de interesse são úteis para simular a circulação atmosférica e outros parâmetros meteorológicos a nível regional e em escala local. Se tais modelos estiverem disponíveis, validados e com suporte adequado, eles devem ser usados como parte da avaliação meteorológica do local, sendo incluído para melhorar a compreensão das condições meteorológicas no local da usina em relação a região" (IAEA, 2011, p. 21, tradução nossa).

A agência responsável por regular o manuseio de compostos nucleares no Brasil é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Ao longo das últimas décadas, esta agência estabeleceu normas compostas por requisitos gerais básicos para uma instalação e operação de instalações nucleares, a fim de minimizar o risco de acidentes no setor. No entanto, grande parte destas normas não foram atualizadas desde as últimas décadas do século XX.

Em relação à escolha de locais para a instalação de reatores de potência, a Resolução CNEN 09/69 (CNEN, 1969) estabelece a necessidade de avaliar as características físicas do local, incluindo sismologia, meteorologia, geologia e hidrologia. Destacando em sob o ponto de vista das condições ambientais, entre outros atributos, a consideração das condições meteorológicas no local de instalação e nas áreas vizinhas. A fim de assegurar que os programas de meteorologia de apoio de usinas nucleares funcionem com um certo padrão de qualidade, foi publicada a Norma CNEN NE 1.22 (CNEN, 1989), onde estabeleceu-se requisitos mínimos para que os dados meteorológicos sejam confiáveis para: a) avaliação aceitável das consequências radiológicas e ambientais em situações operacionais e condições de acidente, e b) para serem considerados no planejamento e aplicação de medidas protetoras em situações de emergência. Contudo, esta norma não menciona o uso das ferramentas computacionais que existem atualmente para fornecer suporte ao programa de meteorologia para as usinas nucleares.

Apesar do Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007) prever inicialmente a construção de quatro a oito usinas nucleares no país, após o acidente de Fukushima em 2011, a expansão do setor nuclear restringiu-se a curto prazo apenas ao término da construção de Angra III. Contudo, destaca-se que o Ministério de Minas e Energia do governo eleito em 2018 enxerga um horizonte promissor no caminho da expansão do setor de geração de energia nuclear. O atual governo já demonstrou interesse em finalizar a construção de Angra III nos próximos anos e investir na construção de novas usinas (Figura 1), considerando um cenário para o futuro com aumento da demanda energética e esgotamento do potencial hidrelétrico.

Governo estuda construção de seis usinas nucleares até 2050

O Ministério de Minas e Energia afirmou que o governo estima investir US\$ 30 bilhões na construção das seis usinas

Por Agência Brasil
© 26 set 2019, 21h02

Figura 1: Reportagem do sítio Exame em que são mencionados os planos do Governo para a indústria nuclear. (Fonte: exame.abril.com.br/economia/governo-estuda-construcao-de-seis-usinas-nucleares-ate-2050/)

É notório que há diversas vantagens no uso da energia nuclear sobre outras formas de produção de energia e, seu, ainda, potencial de utilização no Brasil e no mundo. No entanto, também é evidente a necessidade de aumentar o rigor nas exigências e normas de segurança para operação das usinas nucleares.

Observa-se uma crescente tendência no desenvolvimento e aplicação de sistemas de resposta baseados na modelagem computacional da atmosfera e no geoprocessamento (Silva et al, 2013a, b; Manfré et al, 2018, Manfré et al, 2019). Estas ferramentas podem ser amplamente adotadas em conjunto com dados observados e modelos de dispersão para o planejamento de situações de emergência e para a avaliação espacial do impacto da emissão de radionuclídeos para a população situada no entorno da usina. Além disso este conjunto de informações pode fornecer suporte em tempo real para a tomada de decisão das autoridades competentes em um eventual acidente, fornecendo diagnósticos mais precisos da situação e previsões de distribuição da concentração nas horas subsequentes (Silva et al, 2018).

Atualmente, a única central nuclear brasileira é a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), localizada no município de Angra dos Reis, tendo em operação duas usinas nucleares, Angra I e II. O entorno da CNAAA é caracterizado por sua topografia complexa com diversos picos de diferentes altitudes e com alta declividade, e a sua adjacência à costa da Baía de Ilha Grande (Silva et al, 2013a). No entanto, a CNAAA não é a única central nuclear localizada em uma região de topografia heterogênea. De acordo com o mapeamento feito pela organização britânica Carbon Brief, até o ano de 2016 existiam 400 reatores nucleares em operação espalhados por 31 países ao redor do mundo (Carbon Brief, 2020). Entre estes, 89 estão em regiões costeiras, 41 em regiões com terreno complexo e 61 em regiões costeiras e com relevo complexo (Figura 2). As usinas nucleares de Cernavodă na Romênia (Gheorghe et al., 2014) e de Diablo Canyon nos Estados Unidos (Thuillier, 1992) são alguns exemplos de centrais nucleares citadas em artigos científicos como situadas em regiões com topografia heterogênea e próximos a corpos d'água.

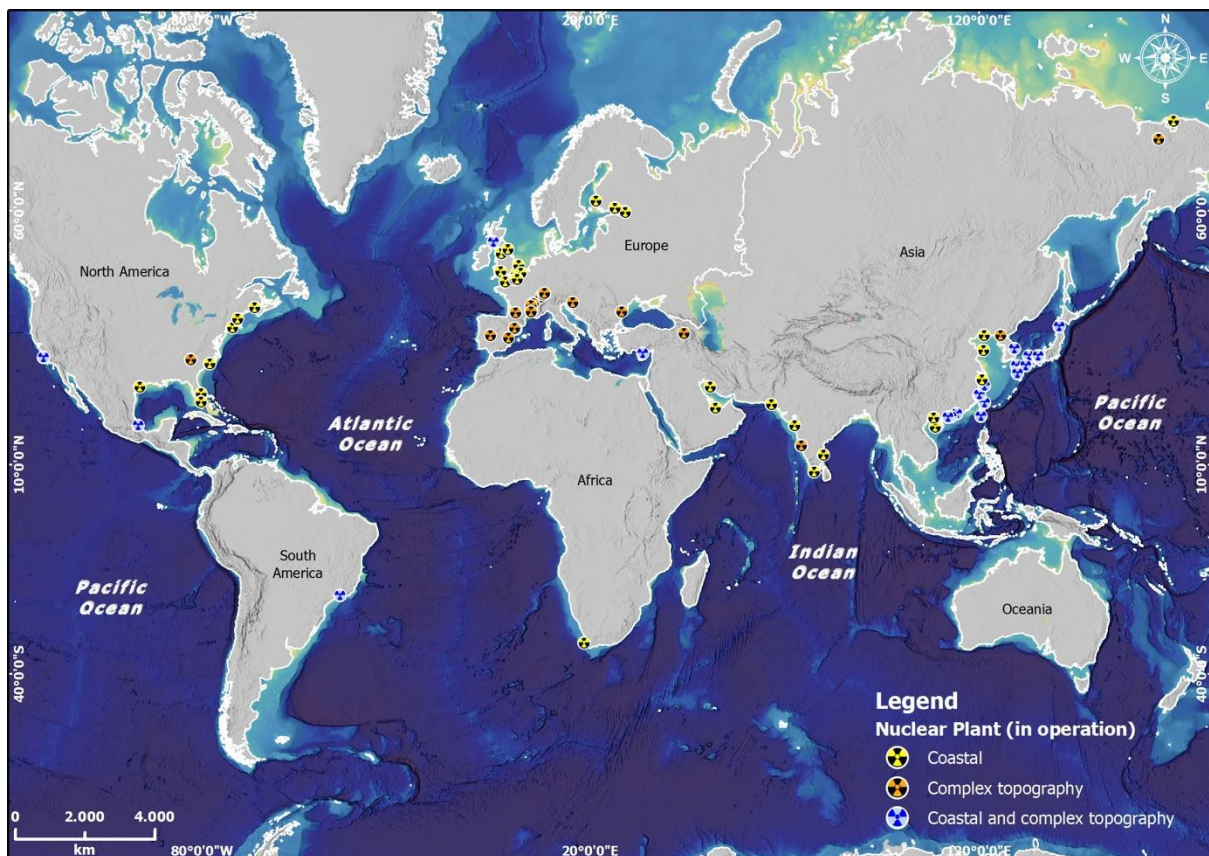


Figura 2: Usinas nucleares em operação no mundo.

As propriedades fisiográficas destas regiões tornam a simulação dos fenômenos meteorológicos em modelos numéricos com alta resolução um grande desafio. Simulações deste tipo neste local requerem um alto custo computacional e necessitam de condições de contorno bem resolutas que representem de forma fidedigna as nuances do seu relevo. Além disso, devido à alta declividade do relevo, pode-se encontrar problemas de origem numérica para a resolução dos processos físicos em uma região com relevo tão complexo (eg. Arthur et al, 2018). Além disso, o avanço computacional destas condições de contorno é diretamente correlacionado com a melhoria da representação dos fenômenos físicos que hoje são parametrizados. Contudo, apesar das dificuldades intrínsecas a implementação de um modelo numérico com tais características este método mostra-se bastante poderoso e promissor. Ter um modelo numérico capaz de simular de maneira satisfatória os processos meteorológicos em alta resolução traz um ganho no detalhamento das informações nas escalas espacial e temporal. Além de ser uma importante informação para a 'alimentação' de modelos que simulam a dispersão de radionuclídeos.

Assim, destaca-se a urgente necessidade na atualização dos protocolos e normas de segurança para o setor nuclear brasileiro, incorporando os avanços científicos e tecnológicos na área de modelagem e análise ambiental, como o geoprocessamento e a modelagem computacional determinística e estatística. A principal relevância do estudo, concentra-se no desenvolvimento deste tipo de sistema combinado como suporte ao planejamento da segurança operacional e/ou para o licenciamento ambiental de instalações nucleares em território nacional, bem como o subsídio à mitigação dos possíveis impactos ambientais e na saúde humana associados à atividade de geração de energia nuclear. O estudo desenvolvido recorreu a técnicas e plataformas universais e de domínio público, podendo avaliar o regime de vento, condições de estabilidade atmosférica e escala das forçantes do escoamento. Além disso, é possível incorporar nas análises a influência do regime de chuva e seus efeitos no deslizamento de terreno, possíveis trajetórias e estimativa de parâmetros associados a deposição seca e úmida de radionuclídeos emitidos acidentalmente. Outros estudos relevantes estão associados a avaliação da probabilidade da ocorrência de focos de calor e queimadas no entorno do sítio das instalações nucleares, avaliar a influência de variações na temperatura da superfície do mar sobre as condições de precipitação e circulação atmosférica e subsidiar um planejamento para a liberação das emissões rotineiras de radionuclídeos local e etc.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um sistema combinado de modelagem ambiental contemplado por métodos de modelagem determinística e modelagem estatística para a identificação e hierarquização das principais forçantes que modulam o regime do escoamento atmosférico em superfície na região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA).

1.1.1 Objetivos específicos

- Uso de técnicas no domínio do tempo via gráfico de rosa dos ventos e da frequência via ondeletas para estabelecer as direções predominantes do vento, regime de calmaria, classe de estabilidade atmosférica e os principais sistemas meteorológicos atuantes na região;
- Uso da técnica de estatística exploratória boxplot para avaliar a influência do ciclo diário e da sazonalidade na variação da intensidade do vento e identificar os horários de acoplamento entre diferentes sistemas meteorológicos;
- Uso da matriz de correlação para avaliar a relação entre o regime de vento e a condição de estabilidade da atmosfera;
- Implementar o modelo atmosférico *Weather Research and Forecast* (WRF) em alta resolução, de maneira adequada para a representação dos processos de microescala e mesoescala resultantes do escoamento sobre terrenos complexos e sob a influência marítima nas circunvizinhanças do local de instalação da CNAAA;
- Avaliar estatisticamente a habilidade do WRF para representar o escoamento atmosférico em superfície na região da CNAAA, evidenciando a influência da resolução das bases topográficas e da configuração de aninhamento de grade;
- Avaliar o efeito do sombreamento das encostas nas características do escoamento atmosférico na região da CNAAA.

Capítulo 2

2 Fundamentação teórica

Esta seção dispõe a fundamentação teórica destacando os principais conceitos de circulação do vento em regiões montanhosas. Em seguida são descritos brevemente alguns métodos utilizados para a modelagem numérica e para análise estatística neste estudo.

2.1 Circulação do vento em regiões montanhosas

Em uma região caracterizada pela presença de topografia complexa, o regime de vento está associado a dois diferentes processos. O primeiro consiste na interação do escoamento externo com o terreno e o segundo está relacionado com circulações geradas pelo gradiente de temperatura entre as montanhas e áreas planas adjacentes (Whiteman, 2000).

O resultado da interação entre um escoamento externo e uma montanha depende da estabilidade da parcela de ar em aproximação, da velocidade desse escoamento e das características geomorfológicas do terreno. Uma parcela de ar instável ou neutra é mais facilmente transportada sobre uma barreira topográfica, sem necessitar de ventos intensos para ser suspensa. Por outro lado, um ar estável apresentará maior resistência para se elevar sobre uma montanha devido a flutuabilidade negativa (Jackson et. al, 2013), necessitando de combinações específicas entre o grau de estabilidade da parcela, velocidade do seu escoamento e nas características fisiográficas do terreno para se deslocar sobre a montanha.

A estabilidade da parcela pode ser analisada através de diversos parâmetros já descritos na literatura como o número de Reynolds, os números de Richardson (*Richardson flux*, *Richardson gradient e Richardson Bulk*), número de Rossby, número de Froude, número de Rayleigh, comprimento de Monin-Obukhov, classes de Pasquill e classes de Pasquill-Gifford. Dentre estes, o número de Froude (Fr), dado pela equação 2.1, é o mais frequentemente utilizado para a avaliação da interação entre um escoamento de ar e uma barreira (Fernando et al., 2015). No entanto, para uma análise mais ampla de uma região recomenda-se a avaliação de vários parâmetros de estabilidade combinados (Oliveira Júnior, 2008; 2010).

$$Fr = \frac{U}{NH} \quad (2.1)$$

$$N = \left(\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

U é a velocidade do vento (m/s), N é Frequência de Brunt-Väisälä (1/s), H é a altura da barreira (m), θ é temperatura potencial (K) e z é a espessura da camada (m).

Em relação às características fisiográficas do terreno, propriedades como altura, extensão horizontal e a orientação da barreira topográfica em relação ao escoamento podem determinar o escoamento resultante. Montanhas mais altas tendem a desviar o escoamento para fluir ao seu redor ou bloqueá-lo. Assim como pode-se dizer que é necessária mais energia para uma parcela fluir em torno de uma barreira topográfica extensa do que em torno de um pico isolado. A respeito da orientação da barreira topográfica em relação ao escoamento atmosférico pode-se observar diferentes formas de interação (Figura 3). Se a barreira for paralela, oblíqua ou convexa, há maior probabilidade de o escoamento fluir ao redor do terreno. Para situações onde a barreira é côncava ou perpendicular a barlavento do escoamento, maior a chance de o escoamento ser induzido para se elevar, gerando as conhecidas ondas de montanha (Whiteman, 2000).

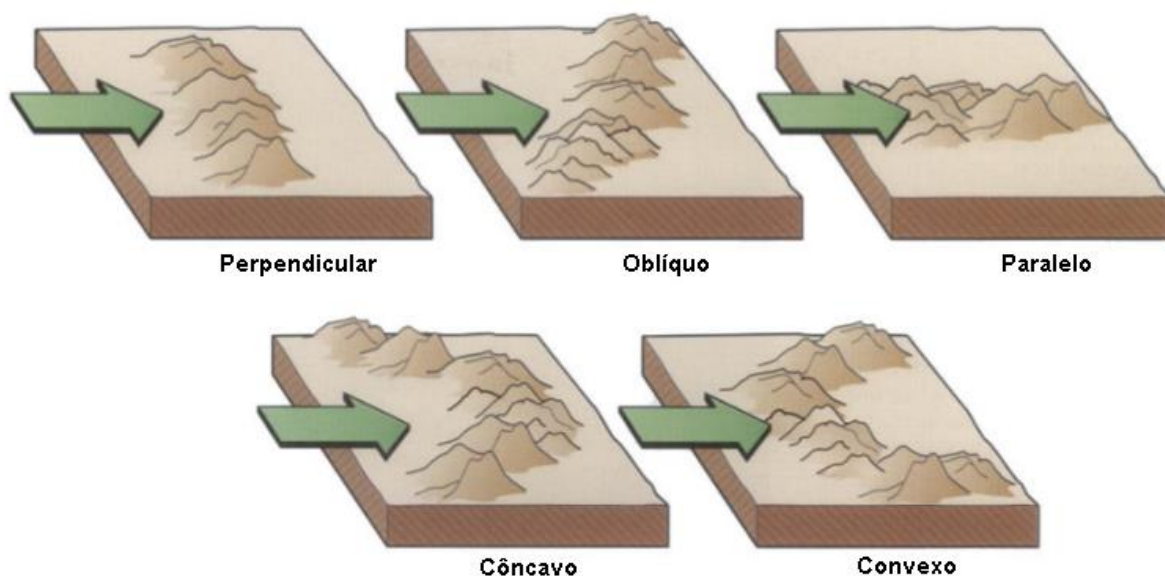


Figura 3: Orientação e formato da barreira topográfica em relação ao escoamento atmosférico (Adaptado de Whiteman, 2000).

A ascensão do escoamento sobre uma montanha pode ser verificada através da presença de certos tipos de nuvens como as lenticulares, *banner clouds* e *rotor clouds* (eg. Jiang et al., 2003; Jiang et al., 2005), através da suspensão de partículas de neve ou poeira próximas ao pico da montanha ou através da presença de ondas de montanha. Por outro lado, um escoamento que não ascende sobre uma montanha, pode fluir paralela ao seu eixo longitudinal, se dividir escoando pelo lado direito e esquerdo da montanha, ser canalizado através de fendas presentes no terreno ou ser bloqueado a barlavento (Whiteman, 2000; Jackson et. al, 2013).

As circulações diurnas de montanha são geradas por diferenças horizontais de temperatura que se desenvolvem em terrenos complexos. Estes gradientes de temperatura induzem gradientes de pressão resultantes, que por sua vez, induzem um escoamento próximo à superfície das áreas com pressões mais altas em direção às áreas com pressões mais baixas. Na região de baixa pressão, o ar converge e o escoamento retorna em níveis mais altos fechando a célula de circulação. De maneira geral, a circulação diurna de montanha transporta o ar da planície para a montanha durante o dia e inverte o sentido durante a noite. Este padrão é produzido por quatro componentes de circulação que compõem o sistema de circulação diurna de uma montanha (figura 4), são elas: ventos de encosta, ventos ao longo do vale, ventos perpendiculares ao eixo do vale e ventos planície - montanha (Whiteman, 2000).

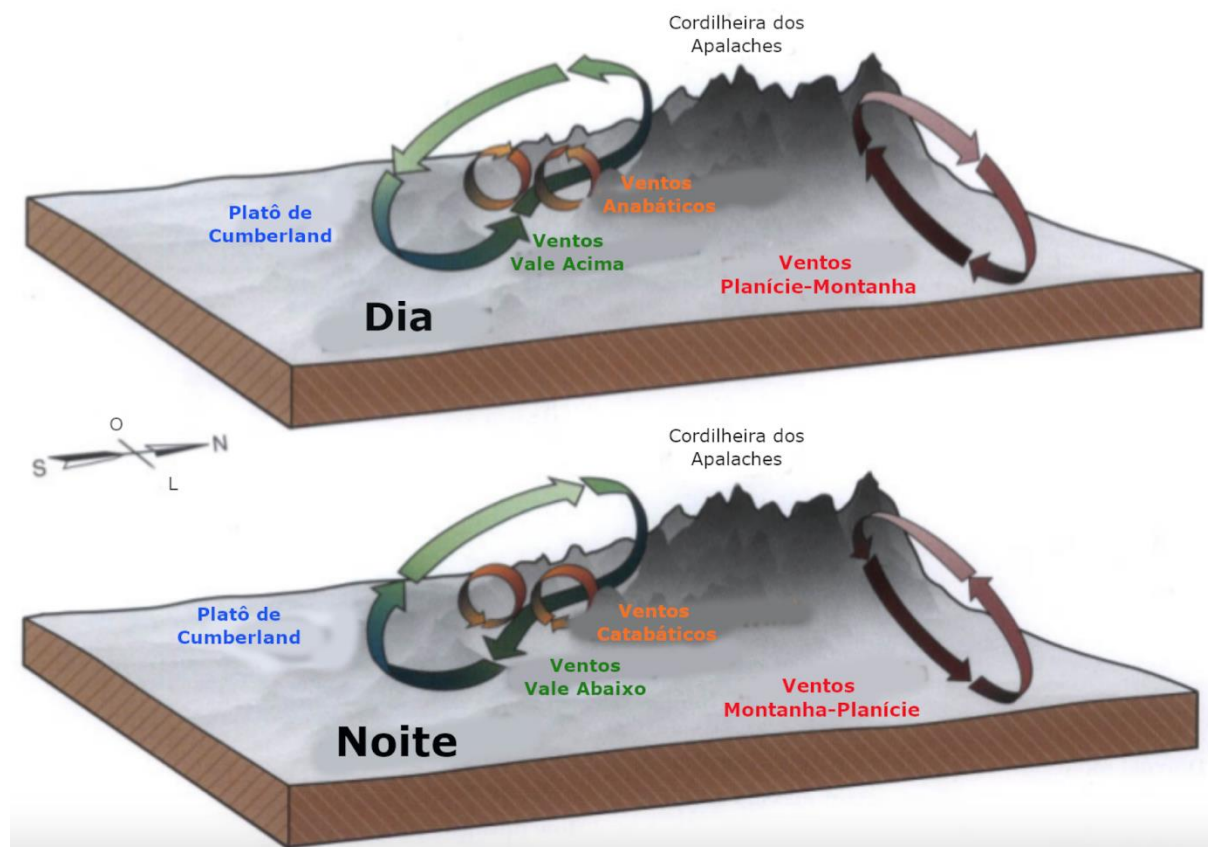


Figura 4: Componentes do sistema de circulação diurna em terrenos montanhosos. O esquema acima ilustra as células de circulação associadas aos ventos de encosta, ventos ao longo do vale e ventos planície-montanha. Um modelo conceitual baseado nos Montes Apalaches (Whiteman, 2000).

Os ventos de encosta são conduzidos por forças de fluabilidade induzidas pelos contrastes horizontais de temperatura entre o ar sobre uma encosta e o ar no mesmo nível sobre o centro do vale (Whiteman, 1990). Tipicamente, os ventos de encosta catabáticos fluem devido ao resfriamento radiativo noturno perto da superfície. Por outro lado, o escoamento de encosta anabático está associado ao aquecimento diurno da encosta e a fluabilidade induzida no processo (Barry, 2008). O esquema disposto na figura 5 ilustra a formação destes escoamentos como uma resultante entre fluabilidade, a aceleração da gravidade e a força do gradiente de pressão (FGP) na horizontal.

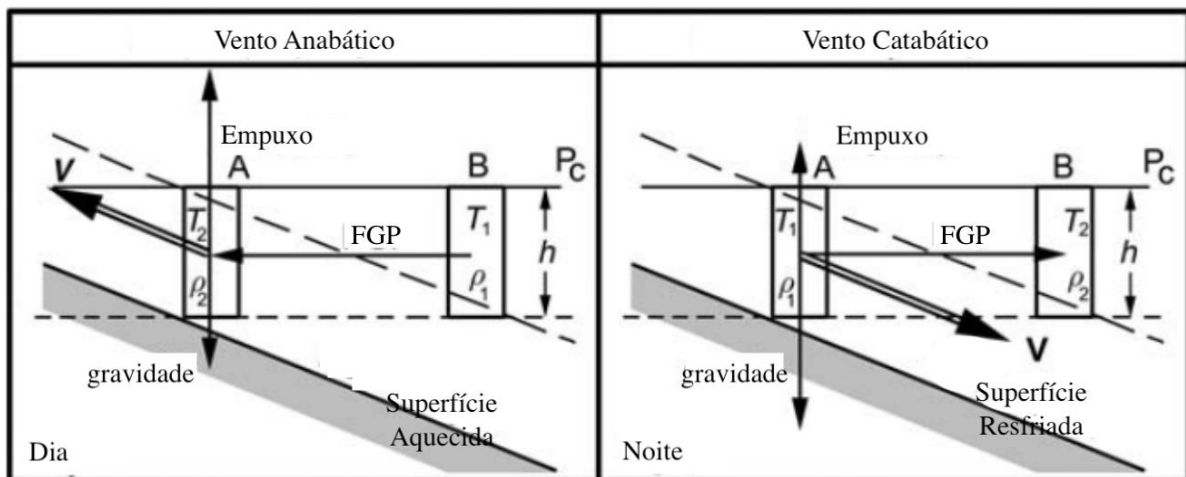


Figura 5: Esquema das forças envolvidas nos ventos (V) de encosta anabáticos e catabáticos (Barry, 2008).

Os ventos de vale correspondem ao escoamento no nível mais próximo a superfície da célula de circulação dos ventos de vale. Estes ventos fluem paralelamente ao eixo longitudinal do vale (Figura 6), induzidos pelas diferenças de temperatura horizontal entre o ar dentro de um vale e o ar sobre uma planície adjacente. Durante o dia, o ar sobre o vale aquece mais rapidamente que o ar sobre a planície, formando um gradiente de pressão horizontal entre o vale e a planície. Este gradiente induz um escoamento da planície para o vale. No vale, o escoamento ascende e retorna para a planície através do ramo superior da circulação fechada. Durante a noite, o vale esfria mais rápido do que a planície no mesmo nível, produzindo pressões mais altas e um escoamento do vale para a planície (Whiteman, 2000).

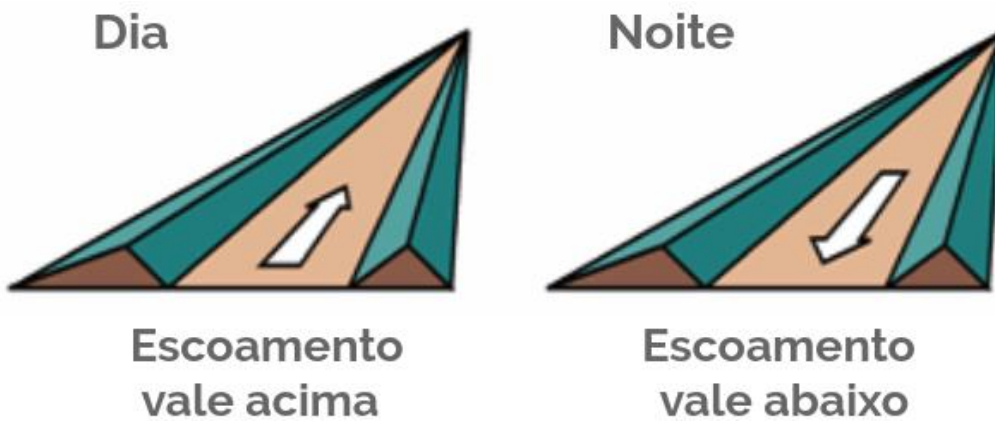


Figura 6: Escoamento ao longo do eixo do vale (Fonte: Adaptado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valley_winds.gif)

Os ventos perpendiculares ao eixo do vale são formados quando o ar acima de uma das paredes laterais do vale se torna mais quente que o ar acima da outra parede lateral (Figura 7). Barry (2008) utilizou como exemplo o vale de Brush Creek, em que foi atribuído à variação diurna da insolação solar e à propagação diurna das sombras no vale, a observação de um contraste entre os fluxos calor latente e sensível de duas encostas opostas. Este gradiente entre os fluxos de calor sensível e latente é responsável pela diferença no aquecimento e na umidade entre duas encostas opostas, produzindo a circulação entre as encostas opostas do vale. Nesta circulação, o escoamento próximo da superfície se desloca para a encosta mais aquecida. Enquanto alguns metros acima um escoamento compensatório retorna com o escoamento na direção oposta. De acordo com Whiteman (2000), os ventos associados a este processo geralmente são fracos (2 m/s ou menos). Contudo, em vales muito largos e em vales onde as diferenças de temperatura entre as paredes laterais opostas são pequenas os ventos registrados podem ser ainda mais fracos.

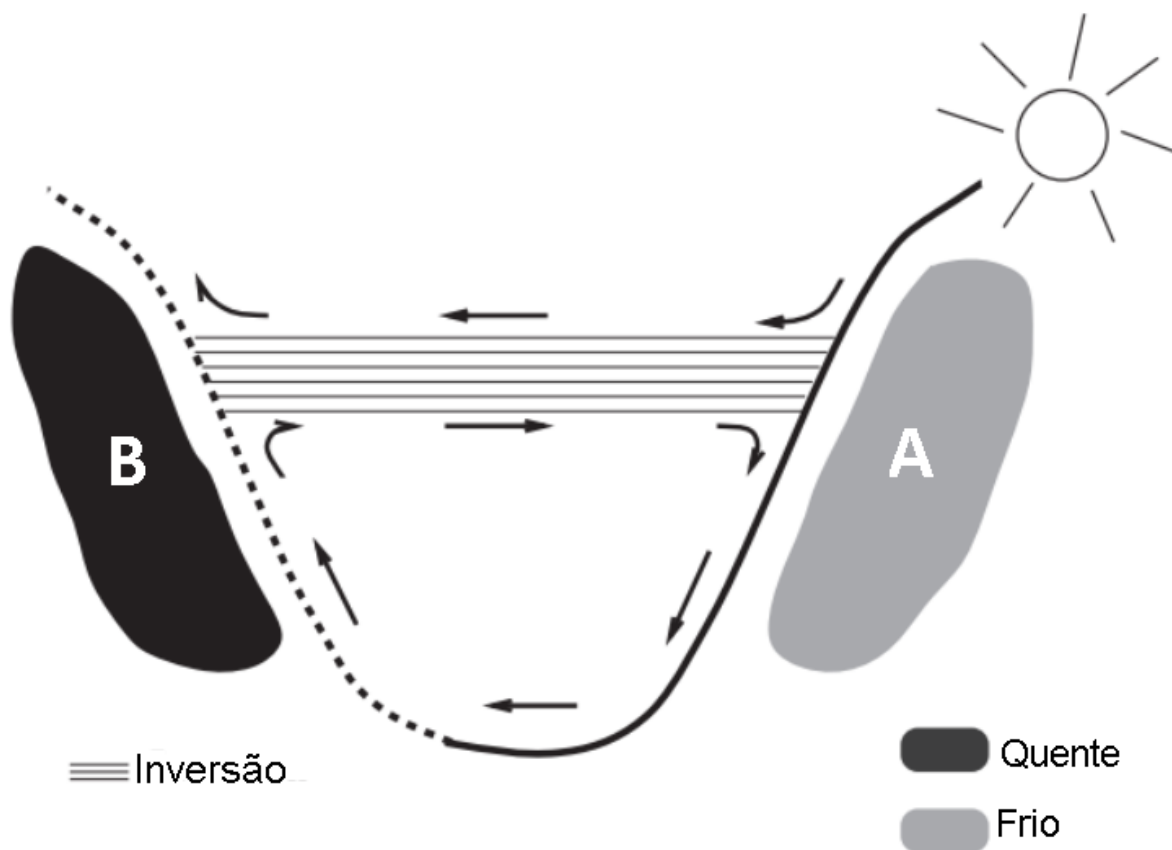


Figura 7: Circulação perpendicular ao eixo do vale devido ao aquecimento assimétrico das encostas. A encosta iluminada pela radiação solar está indicada pela linha tracejada e a encosta onde há sombra é indicada pela linha sólida. As letras B e A representam as áreas de baixa e alta pressão, respectivamente. (Adaptado de Lehner et al, 2011)

A célula de circulação planície-montanha se desenvolve acima das encostas de um maciço montanhoso em resposta às diferenças de temperatura entre o ar sobre as montanhas e o ar sobre as planícies próximas. Este gradiente de temperatura horizontal entre a planície e a região montanhosa origina um gradiente de pressão horizontal. Durante a noite, este gradiente de pressão induz um escoamento da montanha para as planícies e durante o dia ventos são advectados da planície para as montanhas. Apesar dos ventos associados a este processo serem predominantemente fracos ou muito fracos (<2 m/s). O escoamento planície-montanha está associado a ascensão do ar que produz nuvens e tempestades no período da tarde, e com o movimento subsidente associado a pouca nebulosidade no fim da tarde e durante a noite (Whiteman, 2000).

Estas quatro componentes ocorrem de forma acoplada dentro do sistema de circulação da montanha, o que torna difícil a observação de cada uma atuando de forma isolada (Whiteman, 2000). Além disso, sistema de ventos da montanha também pode ser perturbado

ou interrompido por escoamentos de maior escala (Whiteman, 2000; Barry, 2008) como frentes, brisa marítima, brisa lacustre ou até escoamentos de menor escala, como as correntes descendentes de tempestades.

Em um vale, os processos nos quais os ventos de escala sinótica interrompem o ciclo diurno do sistema de ventos da montanha são conhecidos como canalização forçada ou canalização dirigida pela pressão. A canalização forçada consiste em um processo cujo escoamento acima da montanha induz com mais frequência ventos intensos ao longo do eixo de um vale (Whiteman e Doran, 1993; Whiteman, 2000). Esses escoamentos ocorrem sob condições de escoamento sinótico mais intenso e não apresentam uma reversão no seu sentido duas vezes ao dia, como nos escoamentos forçados termicamente (Zardi and Whiteman, 2012).

A canalização forçada ocorre através da transferência de momentum dos ventos acima do terreno, induzindo um escoamento ao longo do eixo longitudinal do vale. Apesar desta canalização ser mais intensa quando o escoamento acima do terreno é paralelo ao eixo do vale, o escoamento em um ângulo oblíquo em relação ao eixo também pode ser canalizado (Zardi and Whiteman, 2012).

Na canalização dirigida pela pressão o escoamento é induzido pelas diferenças de pressão entre as duas extremidades de um vale. Os ventos resultantes desta canalização são advectados da extremidade de alta pressão do vale para a extremidade de baixa pressão (Figura 8). Assim, a direção do vento não depende da hora do dia, mas da localização dos centros de alta e baixa pressão em relação ao vale (Whiteman, 2000).

A influência destes escoamentos na circulação diurna da montanha irá depender da estabilidade atmosférica e da intensidade e direção dos ventos em relação ao eixo do vale. A atmosfera do vale é só é completamente dissociada dos escoamentos de grande escala somente quando os ventos de grande escala são fracos ou quando há uma inversão profunda e forte o suficiente para limitar troca vertical entre a atmosfera do vale e o ar superior (Whiteman, 2000).

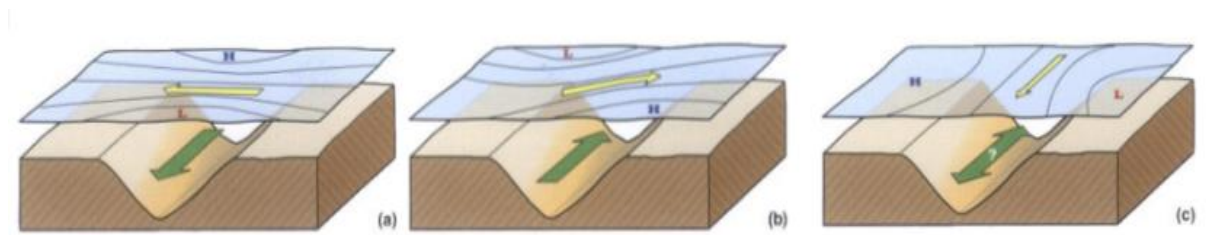


Figura 8: Na canalização dirigida pela pressão, os ventos são advectados ao longo do eixo do vale a partir da extremidade de alta pressão do vale até a extremidade de pressão mais baixa, enquanto os ventos superiores, fluem paralelamente às isóbaras. Em (a) o vento flui descendo

o vale, em (b) o vento flui vale acima e em (c) o gradiente de pressão ao longo do vale é desprezível. Esquema idealizado para o hemisfério norte (Whiteman, 2000).

Whiteman e Doran (1993) realizaram um estudo acerca do escoamento em uma região de vale. Segundo os autores, quatro mecanismos forçantes principais resultantes de distintas de interações entre os ventos locais e os ventos produzidos por componentes sinóticas atuam em uma região de vale, são eles: forçante térmica, transporte de momento horizontal dos ventos sinóticos, canalização forçada, canalização induzida pelo gradiente de pressão. O padrão observado para cada forçante foi ilustrado através um modelo conceitual (Figura 9) para um vale com orientação nordeste-sudoeste.

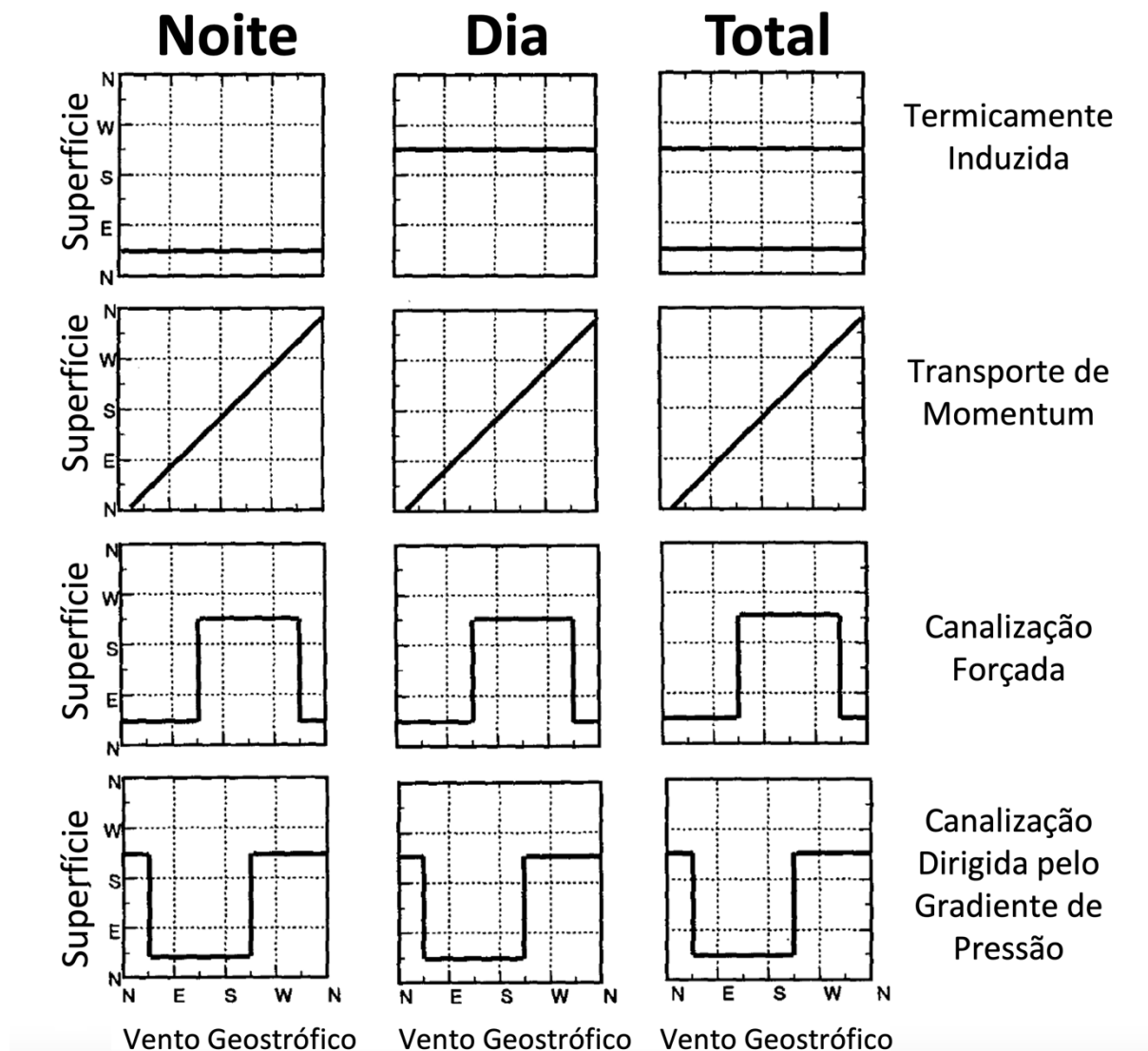


Figura 9: Quatro mecanismos forçantes que relacionados para a interação entre os ventos locais e os ventos produzidos por componentes sinóticas. São eles: (a) termicamente induzida,

(b) transporte de momentum, (c) canalização forçada e a (d) canalização dirigida pelo gradiente de pressão (Fonte: adaptado de Whiteman e Doran (1993)).

O primeiro mecanismo forçante está relacionado ao sistema de vento dirigido termicamente. O escoamento induzido por esta forçante está associado ao gradiente de temperatura formado ao longo do vale, e tem seu desenvolvimento observado especialmente em situações de fraco escoamento em escala sinótica. O segundo mecanismo é o transporte de momentum do escoamento acima do vale. Este mecanismo produz ventos dentro do vale com direções similares ao escoamento em escala sinótica. O transporte vertical de momentum irá depender das condições de estabilidade atmosférica e pode ser produzido através de difusão turbulenta ou por ondas de gravidade. Os dois últimos mecanismos são a canalização forçada e a canalização dirigida pelo gradiente de pressão. Na canalização forçada, a direção e intensidade do vento no vale dependem do sinal e magnitude da componente do escoamento sinótico ao longo do eixo do vale. Enquanto na canalização dirigida pelo gradiente de pressão, a direção e intensidade do vento no vale dependem do sinal, magnitude da força do gradiente de pressão ao longo do eixo do vale e do hemisfério analisado, dado que a força de Coriolis pode influenciar de formas diferentes o escoamento resultante (Whiteman e Doran, 1993).

Em regiões litorâneas, os contrastes horizontais de temperatura entre o mar e a terra induzem um escoamento próximo à superfície entre as duas regiões. Durante o dia, o continente é aquecido mais rapidamente que os corpos d'água adjacentes devido ao menor calor específico da terra em relação a água. Esta diferença no aquecimento entre duas regiões induz um gradiente de pressão responsável pela advecção do ar mais frio do mar para a terra, em um fenômeno conhecido como brisa marítima. (Figura 10a). No período da noite o continente se resfria mais rápido que a água e os gradientes de temperatura e pressão sobre as superfícies invertem. Dessa forma, o vento é advectado do continente para o mar e recebendo a nomenclatura de brisa terrestre (Figura 10b) (Ahrens, 2009; Varejão, 2006). A presença de montanhas ao longo de uma região costeira pode resultar na interação entre as brisas marítima e terrestre com ventos diurnos das montanhas. Entre as interações pode-se citar, a canalização da brisa marítima em vales ou em torno de montanhas isoladas, a formação de zonas de convergência na região a barlavento produzindo nebulosidade e precipitação (Whiteman, 2000).

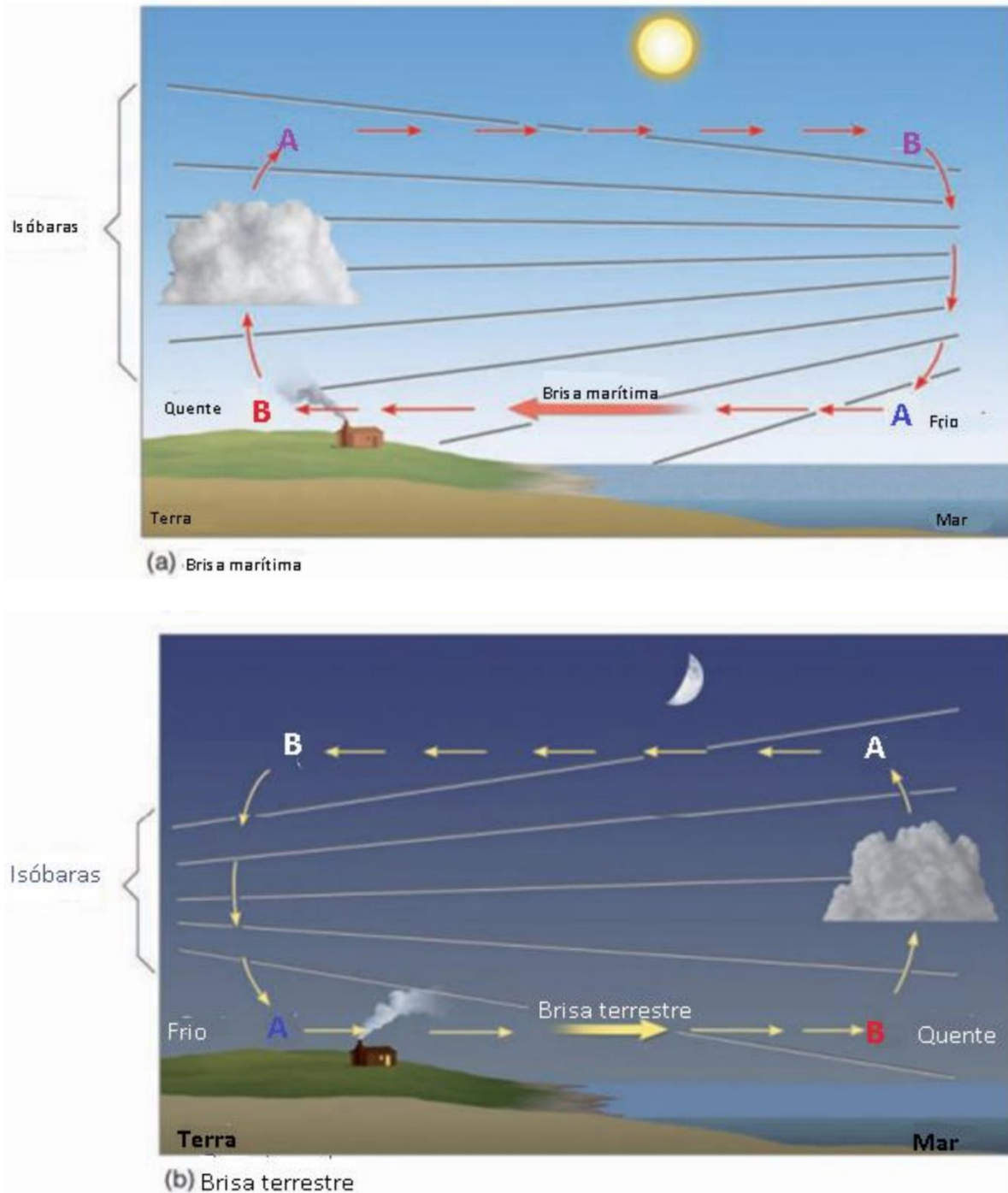


Figura 10: Esquema conceitual das brisas (a)marítima e (b) terrestre (Fonte: Ahrens, 2009 - adaptado).

Em um estudo realizado no Vale Central da Califórnia, Zhong et al (2004) capturaram o acoplamento entre o escoamento da brisa marítima e os ventos induzidos pela topografia. Os autores analisaram dados de vento e temperatura medidos por 22 *radio acoustic sounding systems* (RASS), distribuídos pela região de estudo. Os resultados mostraram que na região da

Baía de São Francisco predomina um escoamento de oeste gerado pelo gradiente de temperatura terra-mar. Este escoamento diverge na região de Sacramento, se deslocando paralelamente ao eixo do vale na direção das encostas norte e sul sem apresentar uma inversão na direção durante o ciclo diurno. Além disso, observou-se nas estações mais próximas às encostas a flutuação na direção do vento acompanham o ciclo de aquecimento e resfriamento das encostas adjacentes. A rede de monitoramento permitiu constatar que o padrão descrito acima é observado até aproximadamente 800–1000 m de altitude, com máximas intensidades do vento registradas, em média, nos primeiros 300 metros.

2.2 Conceito de Mineração de Dados

A mineração de dados tem como principal função extrair informação e conhecimento úteis de uma dada base de dados. Essas técnicas podem fornecer informações classificação dos dados, estimativa/regressão, agrupamento, sumarização e associação (Han et al, 2011). Dessa forma, cabe ao cientista de dados avaliar com clareza as metas desejadas para realizar a aplicação de uma técnica de mineração de dados. Em meteorologia, as técnicas de mineração de dados podem ser aplicadas para o estudo de um poluente (e.g. Soares da Silva, 2019), regionalização de padrões de vento (Jiménez et al, 2008), análise de dados no domínio da frequência (Guimarães, 2014), entre outros. A seguir serão abordados os principais conceitos associados às técnicas de mineração de dados aplicadas neste estudo: A análise de ondeleta, BoxPlot e Matriz de Correlação.

2.2.1 Descrição da Análise no Domínio da Frequência - A Técnica de Ondeleta

A análise de ondeleta permite a investigação de sinais não estacionários nos domínios do tempo e da frequência, sendo eficaz na localização de fenômenos que atuem simultaneamente em várias escalas de tempo. Este método se apresenta como uma alternativa a análise de Fourier, que apresenta limitações para a investigação de fenômenos não-estacionários ou que sofrem variações bruscas no sinal (Farge, 1992). Segundo Weng e Lau (1994) o termo ondeleta refere-se a um conjunto de funções formados de pequenas ondas geradas por dilatações e translações de uma função simples $\psi(t)$, chamada de ondeleta-mãe. Esta função pode dar origem a outras derivadas que são denominadas ondeletas filhas, ou ondeletas. Define-se matematicamente a função ondeleta filha, como:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.3)$$

Onde, os parâmetros ‘a’ e ‘b’ representam fatores de dilatação (escala) e translação, $\frac{1}{\sqrt{a}}$ é um fator utilizado para normalizar a energia de cada ondeleta, $\Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)$ é versão escalada e transladada da ondeleta mãe $(\Psi_0(\eta))$ e $\Psi_{a,b}(t)$ é a ondeleta filha calculada.

Entre as funções de ondeleta mãe conhecidas na literatura são pode-se citar: a ondeleta de Haar, ondeletas de Daubechies, ondeleta de Ricker (conhecida popularmente como chapéu mexicano), ondeleta de Morlet, entre outras (Torrence e Compo, 1998; Walker, 2008).

Dentre estas, a ondeleta de Morlet (eq. 3.4) destaca-se por ser uma função complexa capaz de retornar informações sobre um comportamento oscilatório tanto em sua parte real, quanto na parte imaginária (Torrence e Compo, 1998). Devido a esta propriedade a função é a mais comumente usada em estudos de meteorologia e oceanografia (Farge, 1992) e, por isso, será utilizada como ondeleta mãe neste estudo.

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (2.4)$$

Onde, ω_0 é a frequência não-dimensional e η é o parâmetro de tempo.

A representação da ondeleta complexa de Morlet é ilustrada na figura 11.

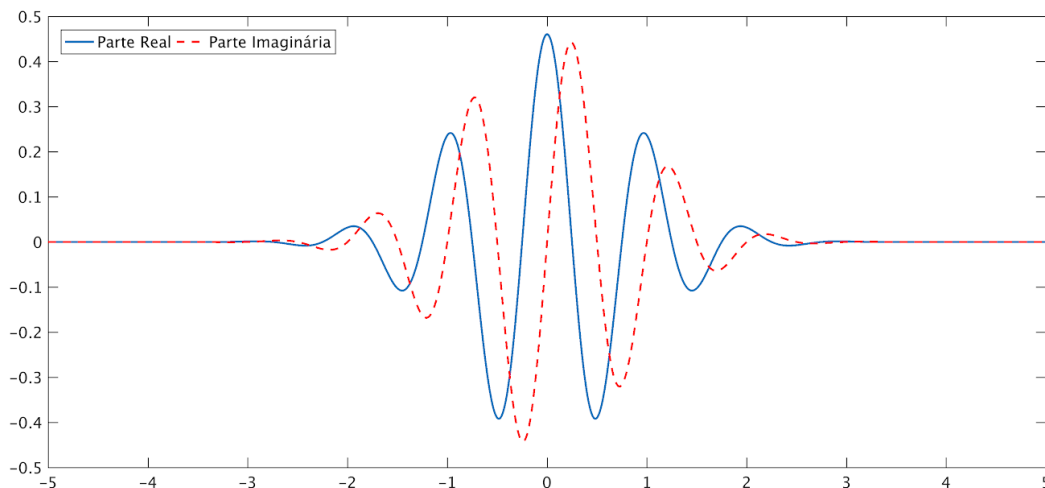


Figura 11: Ondeleta complexa de Morlet dada pela parte real (azul) e imaginária (vermelho) no domínio do tempo.

Após a definição da ondeleta mãe pode-se calcular a transformada de ondeleta contínua da série temporal. Este parâmetro é definido como a convolução de uma série de dados com a versão escalada e transladada da ondeleta $\psi_0(\eta)$ (equação 2.5).

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.5)$$

Onde, $f(t)$ é a função que constitui a série temporal

A transformada de ondeleta contínua é particularmente importante pois a partir do quadrado do seu valor absoluto temos o espectro de potência de ondeleta (Torrence e Compo, 1998).

2.2.2 BoxPlot

O boxplot é uma ferramenta gráfica amplamente usada para a análise da distribuição de um conjunto de dados e detecção de registros potencialmente anômalos (outliers), introduzida inicialmente em Tukey (1977). Um diagrama boxplot é composto por uma caixa que representa a distância interquartílica (IQR), isto é, a diferença entre o terceiro quartil ($q_{0.75}$) e o primeiro quartil ($q_{0.25}$). Dentro desta caixa há também uma linha que indica o valor da mediana da série de dados ($q_{0.5}$), o que possibilita a identificação de séries com distribuições assimétricas. As linhas nos extremos direito e esquerdo da caixa representam os dados registrados, respectivamente, entre os intervalos $q_{0.25} - 1.5IQR \leq x \leq q_{0.25}$ e $q_{0.75} \leq x \leq q_{0.75} + 1.5IQR$. Os registros externos a estes limiares são indicados por círculos e corresponde aos registros de outliers da série de dados (Wilks, 2006).

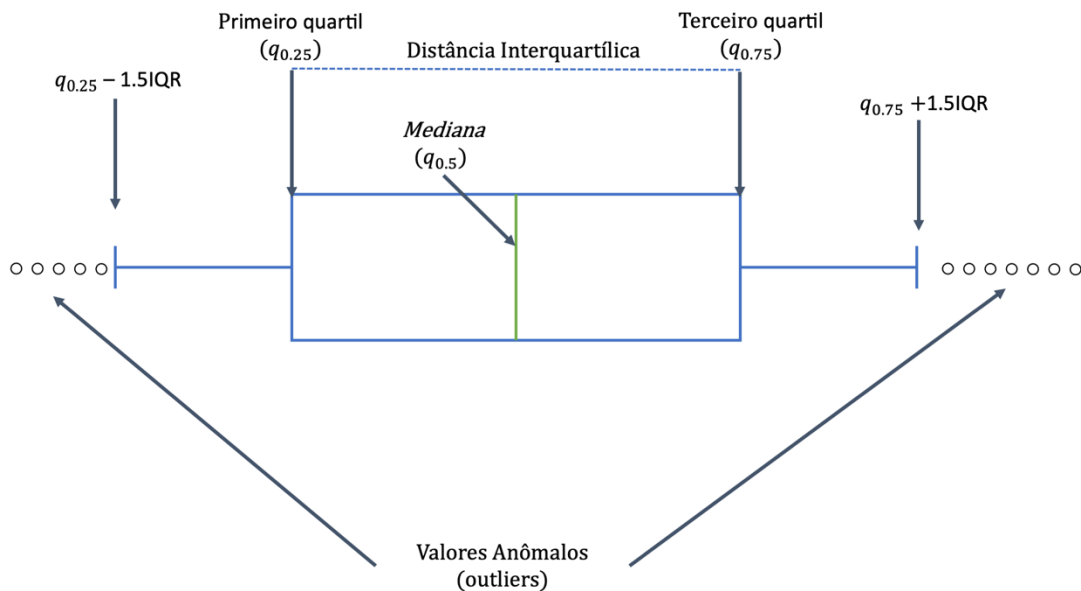


Figura 12: Esquema ilustrativo de um diagrama de boxplot.

2.2.3 Matriz de Correlação

A matriz de correlação é uma matriz cujos elementos são dados por coeficientes de correlação entre pares de variáveis. A análise de correlação entre duas variáveis é comumente realizada através do coeficiente de Pearson (Equação 2.7), dado pela razão entre a covariância de duas amostras ($Cov(x, y)$) e o produto dos desvios padrão de cada amostra. Assim, esta técnica expressa a correlação linear entre as variáveis analisadas.

$$\rho = \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.7)$$

Este parâmetro é capaz de destacar apenas relações lineares entre os dados. Dessa forma, uma grande deficiência deste coeficiente está na capacidade de capturar relações não lineares entre as duas variáveis. Apesar disso, este método pode fornecer importantes informações quando usada de forma combinada com outras técnicas estatísticas (Wilks, 2006). Este coeficiente de correlação varia no intervalo $[-1, 1]$, em que o valor 1 indica uma correlação positiva perfeita e o valor de -1 indica correlação negativa perfeita. Enquanto valores próximos de zero indicam uma fraca correlação entre os dados (Aggarwal, 2015). Além disso, tal

coeficiente não é adequado para estimar a correlação entre duas variáveis circulares ou entre variáveis circulares e lineares.

Jammalamadaka e Lund (2006) tiveram em seu estudo uma base de dados composta por dados lineares e circulares. A abordagem utilizada pelos autores foi variar o coeficiente de correlação aplicado dependendo de quantas variáveis relacionadas eram circulares. Quando nenhuma das variáveis era circular, foi aplicado o coeficiente de correlação de Pearson. Quando uma das variáveis era circular, a correlação foi estimada seguindo a metodologia de Mardia (1976), onde a relação entre uma variável linear e uma variável circular é dada por uma relação entre a variável linear e os valores de seno e cosseno da variável circular. O coeficiente de correlação circular-linear varia entre [0,1] (Lototzis et. al., 2017).

$$r_{x\theta} = \sqrt{\frac{r_{xc}^2 + r_{xs}^2 - 2r_{xc}r_{xs}r_{cs}}{1 - r_{cs}^2}} \quad (2.8)$$

Onde, x é o registro da variável linear, θ é um registro da variável circular e as variáveis r_{xc} , r_{xs} e r_{cs} são dadas pelas correlações de Pearson entre a variável x e

$$r_{xc} = \text{corr}(x, \cos \theta) \quad , \quad r_{xs} = \text{corr}(x, \sin \theta) \quad , \quad r_{cs} = \text{corr}(\cos \theta, \sin \theta)$$

E, por fim, quando as duas variáveis eram circulares, a correlação foi estimada utilizando um coeficiente próprio para correlação entre variáveis cíclicas (Jammalamadaka and Sarma, 1988; Papanastasiou et al., 2010). Tal o coeficiente é dado equação abaixo:

$$r_{c,n} = \frac{\sum_{i=1}^n \sin(\alpha_i - \underline{\alpha}) \sin(\beta_i - \underline{\beta})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \underline{\alpha})^2] [\sum_{i=1}^n (\beta_i - \underline{\beta})^2]}} \quad (2.9)$$

Onde, α_i são os registros da primeira variável circular, β_i são os registros da segunda variável circular, enquanto $\underline{\alpha}$ e $\underline{\beta}$ são a média dos ângulos medidos nas amostras dados pela relação:

$$S = \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \quad , \quad C = \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \quad , \quad R = \sqrt{C^2 + S^2}$$

$$\underline{\alpha} = \left\{ \left(\frac{S}{C} \right), \quad \text{se } C \geq 0 \quad (S/C) + \pi, \text{ se } C < 0 \text{ Indefinido}, \quad \text{se } R = 0 \right.$$

A disposição dos dados de correlação como uma matriz tem como grande vantagem o destaque visual dado para as correlações mais relevantes, facilitando a interpretação de um grande conjunto de dados.

2.3 Descrição da Modelagem Determinística Integrada - Sistema WRF

As simulações computacionais para representação da circulação atmosférica local serão desenvolvidas com o modelo atmosférico prognóstico de mesoescala WRF na versão 4 (Skamarock et al., 2019). O desenvolvimento do WRF é resultado da colaboração entre centros de pesquisa e agências governamentais dos Estados Unidos. No entanto, cientistas de universidades em todo o mundo participam de seu desenvolvimento devido ao código fonte ser disponibilizado gratuitamente em domínio público.

Conforme descrito por Shamarock et al. (2019), o WRF é um modelo de diferenças finitas, cujo a grade horizontal do modelo é dada pela grade C de Arakawa. O sistema de previsão numérica do tempo do WRF foi desenvolvido a partir das equações de conservação. Em conjunto, também são computadas parametrizações para alguns processos físicos em cada passo de tempo que podem ser definidas pelo usuário. São eles: radiação solar e terrestre, camada limite atmosférica, microfísica de nuvens, *cumulus* e solo.

O WRF é organizado em módulos responsáveis pelo pré-processamento, processamento e pós-processamento do modelo. Estes módulos podem ser configurados de acordo com a aplicação do estudo, podendo englobar, assimilação de dados (WRF-DA), química da atmosfera (WRF-CHEM), casos idealizados, acoplamento oceano-atmosfera, entre outros. Os módulos utilizados neste trabalho são descritos e estão dispostos no fluxograma a seguir (figura 13).

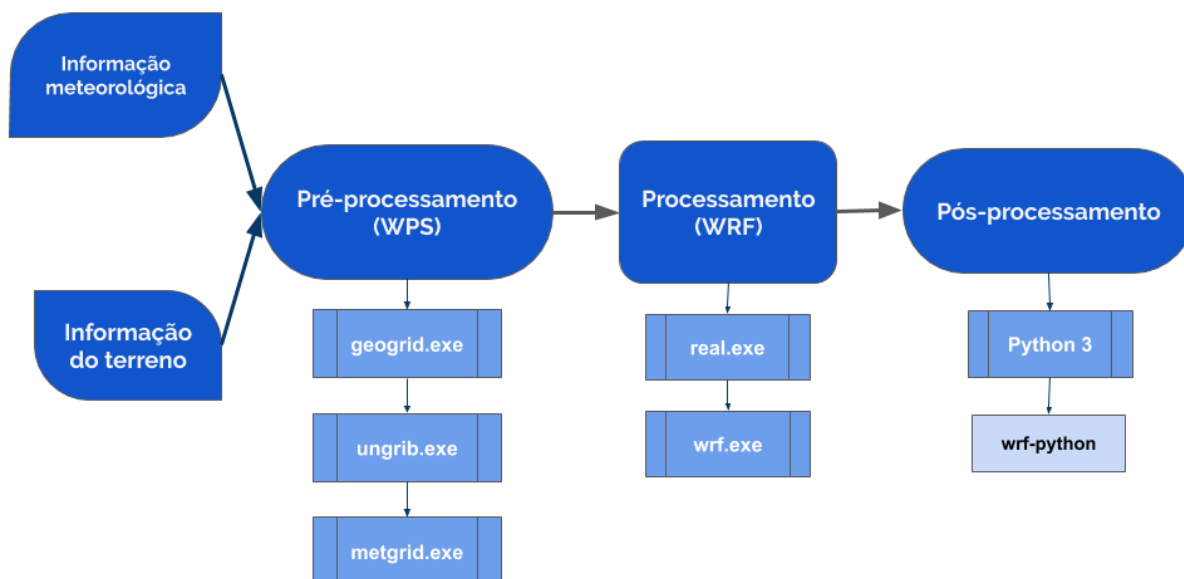


Figura 13: Diagrama da organização do modelo WRF com a disposição dos módulos utilizados neste estudo.

O WRF Preprocessing System (WPS) é responsável pela preparação dos dados de entrada para a realização das simulações. Este módulo é composto por 3 programas que são executados em sequência: geogrid, ungrib e metgrid. O geogrid é utilizado para definir os domínios do modelo e interpolar os dados geográficos nas grades. O ungrib extrai os campos meteorológicos que serão aplicados como condição inicial e de contorno. Enquanto o metgrid tem a função de interpolar horizontalmente os campos meteorológicos extraídos pelo ungrib para as grades modelo definidas pela geogrid. No módulo de processamento o programa real é executado para a preparação da simulação de um caso real. Nesta etapa os arquivos gerados no pré-processamento são interpolados verticalmente criando os arquivos de condição inicial e de contorno. Em seguida, o programa wrf, que contém toda a configuração do modelo, é executado para gerar os campos de previsão (Skamarock et al., 2019).

A etapa de pós-processamento e visualização dos dados pode ser feita através de diversas ferramentas de disponíveis gratuitamente como, por exemplo, o NCL, RIP4, ARWpost (GRADs), VAPOR, IDV e Python. Dentre estes, o Python destaca-se por ser a segunda linguagem de programação mais utilizada no mundo. Tendo como principal vantagem a gigantesca comunidade de usuários que está sempre construindo novas soluções para ciência e tecnologia através desta linguagem.

A biblioteca WRF-Python para a linguagem de programação Python na versão 3 é um exemplo de método desenvolvido para facilitar o trabalho de usuários do WRF que realizam o

pós-processamento e a visualização dos campos de previsão do modelo através do Python. Este pacote calcula variáveis, apresenta rotinas para interpolação e possui funções que facilitam a manipulação de saídas com modelo em conjunto com outras bibliotecas da linguagem. A documentação sobre a ferramenta e as instruções para a instalação estão disponíveis gratuitamente em um sítio da plataforma GitHub (<https://github.com/NCAR/wrf-python>) atualizada pelo pesquisador da ncar Bill Ladwig.

2.3.1 Sistema de coordenada vertical no WRF

O modelo fornece nesta versão a opção de configuração de uma coordenada vertical híbrida sigma-pressão. Neste caso, os níveis mais baixos da coordenada vertical seguem o contorno da topografia (AMS, 2019), enquanto o próximo ao todo do modelo coordenada vertical é dada pelas superfícies de pressão.

A coordenada vertical sigma utilizada nos primeiros níveis do modelo WRF apresenta como grande vantagem a possibilidade de simplificar de forma significativa a resolução das equações primitivas em relação a outras coordenadas verticais (AMS, 2019). No entanto, o uso desta coordenada está relacionado a alguns erros na estimativa da difusão horizontal em terrenos montanhosos causando viés de resfriamento nos vales e de aquecimento sobre as montanhas; além de subestimar os valores de umidade em vales e superestimar os valores de umidade acima das montanhas (Zängl, 2002).

2.3.2 Parametrizações voltadas para representação de atmosférica em regiões de topografia complexa

A fim de uma melhor representação dos escoamentos induzidos em regiões com topografia complexa, o modelo WRF apresenta algumas funções que podem ser habilitadas em suas simulações. Visando a correção dos erros numéricos causados pelo uso da coordenada sigma, Zängl (2002) propôs uma série de modificações para o modelo Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). A primeira modificação do autor foi aplicar uma interpolação vertical na coordenada sigma possibilitando que a difusão horizontal fosse calculada horizontalmente em todos os níveis do modelo sem cruzar a topografia. Além disso, o autor aplicou diferentes aproximações para o cálculo da difusão das variáveis de momentum,

umidade e temperatura. Para validar seus resultados o autor simulou a circulação do vento sobre o vale do Inn nos Alpes, utilizando o modelo MM5 com a configuração original e a versão modificada, e comparou os resultados com os dados observados. Verificou-se que o modelo modificado foi capaz de capturar todas as características essenciais da circulação do vale com resultados compatíveis com os dados observados. Enquanto o modelo original não reproduziu satisfatoriamente a circulação do vale. Dessa forma, a fim de computar de forma mais realística a difusão horizontal, este código foi introduzido no WRF para computar a difusão horizontal através dos gradientes horizontais aplicando no método numérico uma correção vertical usando mais pontos de grade. A possibilidade de corrigir o cálculo de difusão horizontal foi adicionada no WRF na versão 3 (Wang et al, 2009).

A partir da versão 3.2 do WRF foi possível incorporar na resolução do esquema de parametrização de ondas curtas Dudhia (Dudhia, 1989) os efeitos de encostas e de sombreamento no balanço radiativo na superfície. Para tal, é necessário habilitar as variáveis `slope_rad` e `topo_shading`, que são responsáveis, respectivamente, por modificar o fluxo de radiação solar na superfície a partir da inclinação da encosta na grade e por adicionar o efeito de sombreamento de um morro sobre as grades adjacentes. De acordo com os desenvolvedores do WRF, recomenda-se adicionar os efeitos de encosta (`slope_rad = 1`) apenas em domínios com resolução maior que 2 km. Enquanto os efeitos de sombreamento (`topo_shading = 1`) devem ser utilizados em grades com resolução maior que 1 km (Wang, 2017; Skamarock et al., 2019).

O esquema de parametrização da Yonsei University configurado para representar fenômenos físicos da camada limite planetária permite parametrizar o efeito de um terreno complexo no vento desde a versão 3.5 do WRF. Ao definir a variável `topo_wind` como 1 no `namelist.input` o modelo adiciona mais atrito sobre superfícies mais acidentadas, e corrige o efeito de circulação no topo de morros (Jimenez e Dudhia, 2012; Lorente-Plazas et al. 2016; Skamarock et al., 2019).

2.4 Descrição das bases topográficas

O *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010* (GMTED2010) é um conjunto de dados de elevação global disponível nas resoluções de 30s (~1km), 15s (~500m) e 7,5s (~250m). A base GMTED2010 foi criada a partir de 11 diferentes fontes de dados de elevação. A fonte principal de dados foi a base de elevação digital *Shuttle Radar Topography Mission*

(SRTM), A segunda versão da base SRTM corresponde a 69.92% dos dados encontrados no GMTED2010. Nas demais regiões, onde não havia a disponibilidade de dados do SRTMv2, foram utilizadas os dados: *Antarctica satellite radar and laser altimeter Digital Elevation Model* (DEM), SRTMv1, duas resoluções do *Canadian Digital Elevation Data* (CDED), *Greenland satellite radar altimeter DEM*, as duas bases de dados do *National Elevation Dataset* para o território continental dos Estados Unidos da América e para o Alasca, dados de 15s do *Satellite Pour l'Observation de la Terre* (SPOT 5), base de dados *Global 30 Arc-Second Elevation* (GTOPO30) e os dados do *9s GEODATA DEM* para o território australiano (Danielson e Gesch, 2011).

Os dados da terceira versão *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model* (ASTER GDEM v3) foram elaborados utilizando imagens coletadas pelo radiômetro ASTER instalado em um satélite da Nasa chamado Terra. Foram assimilados um total de 1.880.306 imagens com área de 60km x 60km e resolução horizontal de 15 metros, coletadas dentro do período de 1 de março de 2000 à 30 de novembro de 2013. As imagens coletadas passaram por algoritmos para mascaramento de nuvens e são processadas em conjunto para formar uma grande imagem com o máximo de informação possível das estimativas de topografia. No entanto, em alguns pontos a disponibilidade de amostras é baixo. Assim, para complementar a base de dados do ASTER, foram utilizados na dados dos modelos digitais de elevação SRTM V3, Alaska DEM, CDED e GMTED2010 (Abrams e Crippen, 2019).

O SRTM é um projeto resultante de uma colaboração internacional para mapear a topografia do globo terrestre. Neste projeto foram gerados dados topográficos digitais para todas as áreas entre 60°N e 56°S com resolução horizontal de aproximadamente 30 metros e com precisão vertical de 16 metros. Estes dados foram coletados através de dois radares, um radar de imagem banda C e outra radar de banda X, lançados a bordo em missões do ônibus espacial Endeavour. Neste caso, o cálculo de elevação foi estimado através da comparação entre o sinal recebido por duas antenas de radar dispostas em pontos distintos do ônibus espacial (Farr e Kobrick, 2000; USGS, 2020). A versão 3 da base SRTM, mais atual lançada, contém os dados estimados pelos sensores de radar na primeira versão do produto com avanço no preenchimento de falhas existentes no relevo com dados das bases ASTER GDEMv2, GMTED2010 e *United States Geological Survey* (USGS) NED (USGS, 2020).

Szabó et al (2015) compararam as bases topográficas SRTM-V2, SRTM-V3 e ASTER-V2 com dados cartográficos de referência da Hungria a fim de avaliar a grandeza no erro nas duas bases globais. Os valores de viés estimados entre as 3 bases topográficas e o dado de

referência ficaram entre 2.6 e 2.7m, em média. Além disso, os autores destacaram que a presença de vegetação induziu um erro na estimativa da elevação fornecida pelas bases SRTM-V2, SRTM-V3 e o ASTER-V2 em regiões florestadas.

Capítulo 3

3 Revisão Bibliográfica

Nesta seção é feita uma breve revisão da literatura sobre estudos observacionais e de modelagem numérica realizados em regiões de terrenos complexos ao redor mundo. Em seguida, há uma breve revisão sobre presença da meteorologia na história do setor nuclear. E, por fim, são abordados estudos que caracterizaram meteorologicamente a região da CNAAA.

3.1 Estudos observacionais e de modelagem numérica em terrenos complexos

Cadeias montanhosas, colinas e planaltos compõem aproximadamente 46% da superfície terrestre (Barry, 2008) e, conseqüentemente, abrigam grande parte da população mundial. Dessa forma, o conhecimento da fenomenologia associada aos padrões meteorológicos nestas regiões é de extrema importância para a sociedade, visto que possuem aplicações em dispersão de poluentes (Saide et al, 2011; Whiteman et. al, 2014), focos de incêndio (Lu et al, 2012), agrometeorologia (Kalthoff et. al, 2006), geração de energia (Belu e Koracin, 2013) entre outros.

Sabe-se que a circulação local pode ser preponderante, ser inibida ou pode acoplar com escoamentos externos para compor os ventos de uma região montanhosa (Whiteman e Doran, 1993). Deste modo, ao longo das últimas décadas foram realizados grandes projetos de pesquisa para a descrição observacional e modelagem do escoamento em regiões de terrenos complexos (Tabela 1). Grande parte da literatura recente associada a meteorologia de montanha resulta destes projetos, e alguns destes estudos são mencionados na seção abaixo.

Tabela 1: Projetos de pesquisa voltados para a caracterização meteorológica de terrenos complexos.

Projeto de pesquisa	Sigla	Região de Estudo	Principais Artigos
<i>Vertical Transport and Mixing campaign</i>	VTMX	<i>Salt Lake Valley, Utah - USA</i>	Doran et al. (2002); Zhong and Fast (2003)
<i>Mesoscale Alpine Programme</i>	MAP	<i>Riviera Valley - Switzerland</i>	Rotach et al. (2004); Weigel et al. (2007)
<i>Terrain-Induced Rotor Experiment</i>	T-REX	<i>Sierra Nevada, California - USA</i>	Grubisic et al. (2008)
<i>Meteor Crater Experiment</i>	METCRAX	<i>Arizona's Meteor Crater, Arizona - USA</i>	Whiteman et al. (2008)
<i>Second Meteor Crater Experiment</i>	METCRAX II	<i>Arizona's Meteor Crater, Arizona - USA</i>	Lehner et al. (2016)
<i>Cold-Air Pooling Experiment</i>	COLPEX	<i>Shropshire, United Kingdom</i>	Price et al. (2011)
<i>Mountain Terrain Atmospheric Modeling and Observations Program</i>	MATERHORN	<i>U.S. Army Dugway Proving Ground, Utah</i>	Fernando et al. (2015)

Rotach et al. (2004) descreveram o MAP como fruto de um esforço internacional para a realização de pesquisas na região dos Alpes. O programa tinha como foco a compreensão e previsão dos fluxos atmosféricos (Weigel and Rotach, 2004), precipitação e processos hidrológicos. Já o T-REX foi um projeto internacional focado principalmente em uma melhor compreensão e previsibilidade de ocorrência de onda de montanha, *atmospheric rotors* e da camada limite em terrenos complexos (Grubisic et al., 2008). Em Schmidli et al (2011), um estudo de modelagem resultante do projeto T-REX, foi realizada uma intercomparação entre o desempenho de nove modelos de mesoescala para a simulação do ciclo diurno do escoamento sobre uma superfície planície-vale idealizada. Em suas discussões, os autores apontaram as parametrizações de superfície e radiação como as maiores fontes de incerteza para a simulação das velocidades média do vento ao longo do vale. Além disso, o esquema de parametrização

de turbulência foi apontado como a componente mais importante para a simulação da estrutura vertical do escoamento.

Os experimentos METCRAX (Whiteman et al., 2008) e METCRAX II (Lehner et al., 2016) foram conduzidos na Cratera de Barringer localizada perto de Winslow - Arizona, em outubro de 2006 e outubro de 2013, respectivamente. O experimento de 2006 tinha como objetivos investigar a estrutura em microescala e mesoescala e a evolução da camada limite estável na cratera e seus arredores, a fim de compreender os processos que governam a evolução das piscinas de ar frio; e determinar se ondas estacionárias são produzidas dentro da cratera. O METCRAX II, realizado 7 anos depois que o primeiro experimento, tinha como foco investigar a causa de intensos fluxos intermitentes e turbulentos que causavam intrusões de ar quente para a parte sudoeste da cratera, e foram descobertos durante o primeiro experimento.

O projeto COLPEX consistia em um estudo motivado pelas grandes variações de temperatura sob regiões de terrenos complexos, focando especificamente em pequenos vales. Nestas regiões foi documentado que a ocorrência de fenômenos tais como, nevoeiro, geadas e piscinas de ar frio têm um grande impacto para a sociedade local (Sheridan et al. 2010; Price et al., 2011). Dessa forma, o projeto COLPEX foi estruturado para estudar estes fenômenos atmosféricos locais através de uma linha de pesquisa experimental e uma segunda linha de pesquisa com modelagem numérica (Price et al., 2011).

O projeto MATERHORN foi resultado da cooperação entre cinco universidades norte-americanas para a investigação dos fenômenos meteorológicos em terrenos complexos. Para tal estudo, o projeto foi dividido em quatro subprojetos que abordam a fenomenologia de uma região com terrenos complexos sob diferentes metodologias (Fernando et. al, 2015).

O primeiro subprojeto é o MATERHORN-M, que é a componente que estuda a previsibilidade na modelagem de mesoescala. O segundo subprojeto foi batizado de MATERHORN-X e consiste em campanhas experimentais e estudos baseados na análise de dados observados. O MATERHORN-T é a vertente relacionada com o desenvolvimento de novos instrumentos de medição, incluindo a instalação de sensores em drones. E, finalmente, o MATERHORN-P é o subprojeto responsável pelo desenvolvimento de novas parametrizações para representação de fenômenos em terrenos complexos (Fernando et. al, 2015; Di Sabatino, 2016).

Em um dos desdobramentos do projeto MATERHORN, Arthur et al (2018) avaliaram a capacidade do modelo WRF em reproduzir os efeitos topográficos na radiação, tais como o sombreamento topográfico e efeitos de inclinação no fluxo de calor. O modelo WRF foi

avaliado com seu método de discretização *default* e com a técnica de discretização alternativa chamada *immersed boundary method* (IBM). O IBM foi implementado anteriormente no modelo WRF por Lundquist et al. (2010) como um método alternativo para a adição da contribuição da condição de contorno associada ao terreno nas equações de conservação do modelo WRF. Este método apresentou em 2010 resultados promissores por suavizar erros e por ser uma proposta para eliminar a limitação do WRF *default* na representação de terrenos com encostas íngremes em alta resolução. No estudo de 2018, constatou-se que o modelo WRF foi avaliado com e sem o IBM em um caso idealizado com domínio de resolução horizontal de 200m. Neste caso, o modelo foi capaz de reproduzir os efeitos topográficos na radiação em ambas simulações. Contudo, na segunda parte do estudo, que consistia na simulação de um caso com resolução horizontal de 50m e resolução vertical de aproximadamente 8–27 m (próximo à superfície), não foi possível finalizar um experimento com o WRF *default* devido a limitações intrínsecas ao modelo. Enquanto com o WRF-IBM a simulação foi bem-sucedida sendo possível capturar de forma satisfatória a heterogeneidade nos fluxos de calor sensível à superfície medidos em um estudo de caso na região do estudo.

A consolidação de hipóteses levantadas acerca do escoamento observado em regiões de terrenos complexos, pode ser realizada através da caracterização observacional da região. Contudo, devido a estas áreas possuírem grande variabilidade nos ventos em superfície, há necessidade de uma densa distribuição espacial de estações meteorológicas para uma fidedigna identificação dos padrões de circulação (Lorente-Plazas et al., 2014). Nestes casos a extração de informações relevantes a partir destas bases de dados pode ser facilitada através de técnicas estatísticas para mineração de dados.

Kaufmann e Whiteman (1999) utilizaram a técnica de análise de Cluster em um estudo observacional para a região do Grand Canyon, nos Estados Unidos. Através dos dados medidos em 15 estações de superfície ao longo de 3 meses, os autores identificaram 12 padrões de ventos típicos para o inverno. De maneira geral, foi constatado que os padrões estão associados a diferentes condições meteorológicas, representadas por medidas de velocidade do vento local, vento ambiente, pressão e gradiente de temperatura vertical. Os autores observaram que a maior parte dos padrões estão associados a um ciclo diurno induzido termicamente pela interação com a topografia. Evidenciando que o escoamento termicamente forçado na região não é facilmente sobreposto pelo escoamento em escala sinótica.

Jiménez et. al (2008) realizaram a regionalização do vento em superfície em uma região de topografia complexa no norte da Espanha com potencial eólico. Para tal, foi utilizada uma

rede de dados observados com 35 estações meteorológicas distribuídas na região de estudo. A base de dados foi analisada através técnicas estatísticas - análise de componentes principais, análise de cluster e análise das componentes principais rotacionadas - e de análise espectral. Os autores analisaram as primeiras componentes principais de cada estação e atribuíram a maior parte da variabilidade do vento na região ao processo de canalização (66.8% da variabilidade). A análise de cluster realizada para componentes principais dos dados e para componentes principais rotacionadas permitiu o agrupamento de estações com padrões similares. Em relação a análise espectral, foi destacado o domínio do sinal associado ao ciclo anual.

Um ano depois, Jiménez et. al (2009) utilizaram a técnica de análise de cluster para mapear os padrões de circulação do vento na mesma região de estudo. A similaridade espacial dos campos de vento foi utilizada para a identificação de seis padrões de vento, dos quais destacaram-se as direções noroeste e sudeste, induzidas por efeitos orográficos. Estes padrões de vento foram associados com campos meteorológicos de reanálise do ECMWF, possibilitando a identificação os padrões de vento associados com a advecção de ar frio e seco e com advecção de ar quente e úmido. Além da identificação do padrão circulação responsável pela precipitação intensa na parte norte da região de estudo.

A observação das circulações geradas pela interação das barreiras topográficas com a atmosfera é um desafio, visto que a instalação de estações meteorológicas em pontos representativos nem sempre é viável. Em regiões montanhosas próximas a corpos d'água esta tarefa é ainda mais complexa, visto que a interação entre o gradiente terra/mar e a circulação de montanha adiciona complexidade a este problema (Whiteman, 2000). A fim de suprir esta falta de informações em alguns pontos, a modelagem atmosférica em alta resolução tem sido uma ferramenta muito utilizada ao longo dos últimos anos. As simulações geradas são aplicadas como complemento em estudos observacionais fornecendo com uma melhor resolução espacial informações acerca dos processos atmosféricos atuantes em terrenos complexos.

Após o embasamento acerca da fenomenologia da região através da análise estatística dos dados observados, o grupo de pesquisa responsável por Jiménez et. al (2008) e Jiménez et. al (2009), passaram avaliar a representatividade do modelo WRF para a região de estudo. Em Jimenez et al (2010) o WRF foi aplicado para analisar a variabilidade média diurna do escoamento próximo à superfície. O WRF na versão 2.1.2 foi configurado com 4 domínios com aninhamento *two-way* indo de 54 km até 2km de resolução horizontal e 31 níveis verticais. Os dados topográficos e de uso de solo foram obtidos da base de dados do *U.S. Geological Survey*

(USGS). E, os esquemas de parametrização utilizados foram: *Rapid Radiative Transfer Model* (RRTM) (Mlawer et al., 1997) e Dudhia (Dudhia, 1989), Old Kain-Fritsch, (Kain e Fritsch, 1990; 1993), Yonsei University (YSU) (Hong, Noh e Dudhia, 2006), esquema *single-moment six-class* (Lin et al., 1983), modelo de superfície de 5 camadas baseado em Dudhia (1996). Com esta configuração o modelo foi capaz de representar bem o sinal da circulação induzido pelas grandes cadeias montanhosas. No entanto, o modelo apresentou um menor desempenho na representação dos efeitos de circulação resultantes de menores escalas.

Anos depois foi publicado por Jiménez et al (2013) uma segunda avaliação do desempenho do modelo WRF na representação dos padrões de circulação na Comunidad Foral de Navarra (CFN) em dois experimentos numéricos. Em ambos experimentos, o modelo foi configurado com aninhamento *two-way* com uma grade mais resolvida de 2 km, uma discretização vertical com 31 níveis e as mesmas parametrizações utilizadas em Jimenez et al (2010). As principais diferenças entre os experimentos consistiram na versão do modelo e nas condições iniciais e de contorno utilizadas. O primeiro experimento, chamado de CFN1 foi realizado com a versão 2.1.2 utilizando como condição de contorno os dados de reanálise ERA-40 ($1 \times 1^\circ$). Enquanto o segundo experimento foi feito utilizando a versão 3.1.1 e a reanálise ERA-Interim ($0.75 \times 0.75^\circ$) como condição de contorno. De forma geral, foi identificado que os padrões de vento foram reproduzidos satisfatoriamente pelo WRF. No entanto, houve um pior desempenho nos pontos localizados em vales com topografia mais complexa. Indicando que apesar da alta resolução horizontal empregada (2 km) ainda existia um viés associado a dificuldade para reproduzir as características topográficas sobre a região. Também foi apontado que, apesar da representação satisfatória dos padrões de circulação, a subestimativa de alguns sistemas nas reanálises utilizadas como condições de contorno no WRF, especialmente no ERA-40, pode ter influenciado em partes no viés da representação.

Também no ano de 2013, Jimenez e Dudhia (2013) publicaram a avaliação da representação da direção do vento pelo modelo WRF na região CFN. Destacam-se entre os resultados que os piores resultados para os índices estatísticos foram encontrados em estações localizados em áreas com terrenos mais heterogêneos com raiz quadrada do erro médio (RMSE) igual a 80° , estações localizadas em uma região predominantemente plana apresentaram RMSE igual a 60° , enquanto nas estações localizadas no topo de montanhas o modelo apresentou os melhores resultados com RMSE de aproximadamente 50° . Além disso, foi encontrado uma relação direta entre a intensidade do vento e o erro na estimativa da direção. Os autores apontaram que em situações de vento mais intenso, que na região de estudo

correspondem a situações sob atuação de forçantes sinóticas no escoamento, o erro na estimativa da direção do vento é menor.

A representação do WRF para condições atmosféricas próximas da superfície em diferentes terrenos também foi avaliada por Zhang et. al (2013). Neste estudo foram analisados dois casos sob diferentes condições sinóticas. No primeiro caso houve a atuação de um sistema frontal e de um jato de baixos níveis, enquanto no segundo caso houve a atuação de um sistema de alta pressão que contribuiu na manutenção de uma persistente inversão térmica. A avaliação do modelo foi realizada através de testes de sensibilidade a fim de avaliar o impacto das mudanças da parametrização de camada limite e da resolução vertical na representação dos campos de temperatura à 2m e vento à 10m. Os cinco esquemas de camada limite comparados foram: YSU, Mellor–Yamada–Janjic (MYJ) TKE PBL *scheme*, *Quasi-Normal Scale Elimination* (QNSE), *Asymmetric Convective Model version 2* (ACM2) e o *Mellor–Yamada–Nakanishi–Niino level 2.5* (MYNN2). Enquanto as parametrizações fixadas foram Kain-Fritsch (Cumulus), Noah (superfície), RRTM e Dudhia (radiação). Além disso, os níveis verticais testados foram 37 (experimento de controle) e 70. Os resultados indicaram que nenhum dos esquemas comparados apresentou grandes melhorias em relação aos demais, e os dois níveis verticais testados apresentaram performances quase idênticas. Dessa forma, a escolha dos esquemas o MYJ e YSU como configurações nos experimentos de controle foi justificada pelo uso frequente dessas parametrizações em aplicações anteriores e pela representação satisfatória dos campos de temperatura e vento sob estas configurações. Em relação a avaliação estatística do modelo aplicada neste estudo, destaca-se que o índice erro absoluto médio (EAM) variou entre aproximadamente 1,25 e 2,0m/s e 38 e 68 para as variáveis intensidade do vento e direção do vento, respectivamente.

Em um estudo motivado pela sensibilidade de videiras à variações de temperatura do ar e pela importância econômica deste cultivo para a região do Cabo Ocidental na África do Sul. Soltanzadeh et al. (2016) realizaram dois experimentos numéricos para avaliar a habilidade do WRF em representar duas condições meteorológicas que geraram registros de temperatura do ar consideravelmente acima (8°C) e abaixo (7°C) da climatologia das estações. O modelo meteorológico foi configurado com 4 domínios, sendo o mais resoluto de 500m, com 38 níveis verticais em todos os domínios. Além disso, os conjuntos de parametrizações utilizados foi compostos pelos seguintes esquemas: WRF Single-Moment 6-class, RRTM e Dudhia, Monin-Obukhov, YSU, NOAH LSM e Updated Kain-Fritsch (nos domínios de 24 e 6km). A validação das simulações foi realizada com a comparação dos resultados da grade de 500m com dados de temperatura a 2m, umidade relativa e vento das estações meteorológicas da região.

Observou-se que o WRF teve um bom desempenho na reprodução das observações, apresentando uma maior habilidade de representar as temperaturas máximas em relação às temperaturas mínimas. Além disso, o modelo não foi capaz de reproduzir um evento de inversão térmica sobre a região e subestimou a umidade em praticamente todos os pontos. Em relação ao vento, foi apontado que o modelo não foi capaz de capturar efeitos de circulação locais associados a topografia. Em compensação, as circulações de brisa foram capturadas pelo WRF.

Conforme mencionado anteriormente, os modelos numéricos em alta resolução tem sido utilizados amplamente como uma ferramenta de estudo dos fenômenos físicos em regiões de topografia complexa (Lundquist et al.,2010; Jiménez et al., 2013; Paiva et. al, 2014; Zhang et. al,2013; Soltanzadeh et al. 2016). No entanto, ao refinar a resolução horizontal e vertical do modelo cria-se a necessidade de assimilar dados fisiográficos mais resolutos para representar a região de estudo. Com isso, foram elaborados ao longo dos últimos anos alguns estudos com a proposta de avaliar o ganho da assimilação de dados de topografia mais resolutos em modelos numéricos de mesoescala (eg. Monaghan et al, 2013; Nunalee et al.,2015; Göndöcs et al, 2017). E, assim diminuir o erro associado a uma baixa resolução dos dados de topografia.

O trabalho de Paiva et. al (2014) é um exemplo de aplicação do *Advanced Regional Prediction System* (ARPS) para estudos de modelagem em altíssima resolução para o estado do Rio de Janeiro. Os autores chegaram a refinar a resolução horizontal do modelo para 300m e apontaram o grande desafio de representar de sistemas de circulação atmosférica local considerando a complexidade da distribuição topográfica, a variação no uso do solo e a presença de corpos d'água no entorno da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. As saídas do modelo foram comparadas com dados de estações meteorológicas de superfície através dos índices estatísticos RMSE e viés. Nos pontos avaliados, o índice RMSE variou entre 1,12 a 4,26 para a intensidade do vento e entre 59,73 a 105,11 na direção do vento. Enquanto o viés nos pontos avaliados variou entre 0,03 a 3,18 na intensidade do vento e entre 2,56 a -36,47 para a direção do vento.

Um dos estudos realizados para o modelo WRF foi realizado por Nunalee et al. (2015). Neste artigo os autores realizaram simulações para ilhas cuja topografias são bastante heterogêneas localizadas na Espanha e no Caribe. A grade mais refinada tinha resolução horizontal de 1km e as informações de topografia inseridas no módulo WPS do WRF foram provenientes das bases GTOPO30, SRTM e GMTED2010, todos com resolução horizontal de 30s (~1km). Enquanto as demais configurações dos experimentos foram idênticas. Nos resultados observou se que a base GTOPO30 subestimou a altura das elevações topográficas

nas duas regiões de estudo. Enquanto as bases SRTM e GMTED2010 apresentaram perfis topográficos mais próximos da realidade. Como consequência, os campos de vento nos experimentos com as bases SRTM e GMTED2010 apresentaram um padrão mais próximo da realidade. Além disso, os autores destacaram que o fato dos dados SRTM e GMTED2010 terem sido degradados para resolução de 30s antes de serem adicionados ao WRF os permitiu defender que os diferentes campos de topografia estão associados a diferenças no dado e, neste caso, não estariam relacionados com a resolução horizontal dos dados de topografia assimilados.

3.2 A presença da meteorologia no contexto do setor nuclear.

O início da exploração tecnologia nuclear foi possível devido as descobertas realizadas no ramo da física quântica e teorização da fissão nuclear no início do século XX. Somado a esta recente descoberta, a situação geopolítica do mundo em um contexto de duas guerras mundiais em menos de 50 anos impulsionou uma corrida científica para o domínio da tecnologia nuclear visando a fabricação de armas para a guerra e posteriormente a geração de energia elétrica. Após o domínio prático da tecnologia de fissão nuclear, diversos reatores nucleares entraram em operação para a geração de energia elétrica. Contudo, devido ao potencial de severidade de um acidente nuclear, sempre foi considerado essencial estar sempre atento ao aperfeiçoamento dos protocolos de segurança, a fim de antecipar qualquer evento adverso ou, em um eventual acidente, mitigar os impactos causados pela dispersão de radionuclídeos para o meio ambiente e sociedade (Tavares, 2015).

Neste contexto, o conhecimento dos padrões meteorológicos no local de instalação de uma usina nuclear é apontado como algo mandatório dentro dos protocolos de segurança nuclear nacionais (CNEN, 1989) e internacionais (IAEA, 2011). Em um relatório publicado no ano de 1968, a IAEA destacou a importância do trabalho de meteorologistas em dar suporte para o aprimoramento da segurança em diversos cenários contidos no dia-a-dia da indústria nuclear. desde a instalação dos primeiros reatores nucleares. A escolha do local de instalação e ao longo do processo de construção de um reator nuclear, o suporte na rotina operação e o planejamento de protocolos para situações de emergência, são alguns dos exemplos de situações em que a análise de fatores meteorológicos pode auxiliar em tomadas de decisão (IAEA, 1968).

De forma geral, a ocorrência de acidentes dentro de usinas e centrais nucleares, foi um fator determinante para o constante aperfeiçoamento nos protocolos de segurança internacionais da indústria nuclear. Desde que esta tecnologia começou a ser explorada foram registrados alguns eventos adversos associados a falhas em reatores nucleares (Globo, 2020). Dentre estes, os acidentes mais lembrados pela sociedade em geral e mais utilizados como exemplo em trabalhos científicos foram os de Three Miles Island (1979), Chernobyl (1986) e Fukushima (2011).

O acidente de Three Miles Island, Pensilvânia em 1979 causou grande preocupação para a sociedade devido ao potencial transporte de radiação através do vento para as regiões mais povoadas no entorno da usina. possibilidade de liberação. Estudos oficiais do governo dos Estados Unidos da América afirmaram que a quantidade de radiação liberada neste acidente era muito pequena para causar danos à saúde da população. No entanto, estes dados são questionados por muitos pesquisadores que enxergam um viés político nestas afirmações (Beyea e Decicco, 1992). Com esta motivação, diversos estudos exploraram o transporte desta radiação na atmosfera e os possíveis impactos na saúde da população. Em Wahlen et al. (1980) relatou-se que na cidade de Albany, Nova Iorque há 315 quilômetros de Three Miles Island foram encontrados na atmosfera a presença de Xenon-133 devido ao acidente. Hatch et al (1990) investigaram a possibilidade de o acidente ter aumentado a taxa de incidência de alguns tipos de câncer dentro da população. No entanto, não foi encontrado neste estudo evidências convincentes de que as emissões de radiação desta usina possam ter aumentado a incidência da doença.

Alguns anos depois, em 1986, o trágico acidente de Chernobyl, na atual Ucrânia, causou uma grande liberação radiação na atmosfera. A poluição radioativa foi transportada pelo escoamento atmosférico atingindo grande parte da Europa, chegando a ser detectada até em outros continentes (Puhakka et al., 1990). Os impactos de Chernobyl no meio ambiente e na saúde da população foram gigantes, (Steinshausen et al., 2014), estimaram que a quantidade de elementos radioativos liberada na atmosfera devido a este acidente foi na aproximadamente quatro vezes maior que o registrado posteriormente em Fukushima. Com isto, tal evento motivou diversos estudos focados em explorar como se deu o transporte e a deposição desta radiação ao longo do tempo. (Persson et al., 1987; Puhakka et al., 1990). Nestes estudos, a estimativa do transporte da poluição radioativa a partir de Chernobyl, deu-se através dados de concentração de elementos radioativos, dados meteorológicos, combinados com formulação teórica de dispersão atmosférica (Persson et al., 1987).

No caso de Fukushima, o acidente deu-se devido um terremoto de aproximadamente 9.0 graus de magnitude na costa do Japão, que resultou em um grande tsunami. Tal tsunami resultou na perda de energia elétrica resultante na usina nuclear de Fukushima, resultando na liberação de radioatividade na atmosfera (Chino et al, 2011). Assim como nos acidentes anteriores, Fukushima motivou uma série de estudos focados em meteorologia e dispersão de radionuclídeos realizados ao redor do mundo tanto no Japão, quanto em outros países com usinas nucleares em operação. Contudo, com o avanço tecnológico dos últimos anos, os estudos motivados por este acidente tiveram uma gama muito maior de dados meteorológicos in situ e de satélite disponíveis em relação as décadas anteriores. Permitindo o uso de técnicas de mineração de dados mais sofisticadas (Yoshikane e Yoshimura, 2018). Além da possibilidade do uso de modelos numéricos para a espacialização em alta resolução das variáveis meteorológicas de interesse e estimativa de padrão de dispersão (Lee et al., 2014; Stohl et al, 2012; Draxler et al., 2015).

3.3 Estudos para a região da CNAAA: micrometeorologia e modelos computacionais de planejamento de emergência

O local de instalação da CNAAA é caracterizado por variações na cobertura do solo, configuração escarpada da topografia e a proximidade com o oceano. Propiciando o desenvolvimento de circulações atmosféricas produzidas por forçantes de origem mecânica e térmica. Além disso, as interações da atmosfera local com o escoamento forçado por sistemas em outras escalas podem inibir o escoamento local e alterar a configuração do escoamento observado. A fim de compreender os fenômenos meteorológicos atuantes no entorno da CNAAA, diversos estudos foram conduzidos desde a construção da primeira usina.

A tabela 2 lista os principais trabalhos realizados para a caracterização meteorológica do entorno da CNAAA. E, em seguida, alguns destes estudos são descritos.

Tabela 2: Estudos meteorológicos na região da CNAAA.

Autor	Ano	Título	Fonte
Leão	1976	Atividades Desenvolvidas para Complementação dos Estudos Micrometeorológicos do Sítio de Angra dos Reis.	Relatório Técnico

Nicolli	1981	Persistência das condições de difusão atmosférica em Angra dos Reis.	Relatório Técnico
Biagio	1982	Análise comparativa de três sistemas de coeficientes de dispersão atmosférica na região de Angra dos Reis	Dissertação de M. Sc.
Nicolli	1982	Correlação de direções de vento em Angra e correlação de gradiente vertical de temperatura com amplitude de variação da direção do vento	Relatório Técnico
Nicolli	1986	Primeira campanha de experimento de difusão atmosférica na área da Central Nuclear de Angra dos Reis – análise de resultados	Relatório Técnico
Leão	1998	Cenários Ambientais em Centrais Nucleares: Integração da Meteorologia Local com outros fatores Ambientais por meio do Sistema de Informações Geográficas.	Dissertação de M. Sc.
Martano e Paschoa	1997	Dispersion Modelling Studies: the 1984 Experiment in Angra dos Reis	Artigo: Revista
Oliveira Junior et al.	2005	Avaliação da Altura da Camada Limite Atmosférica na região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto sob Diferentes Forçantes Sinóticas via MM5.	Artigo: Ciência e Natura
Soares	2006	Caracterização da Precipitação na Região de Angra dos Reis e a sua Relação com a Ocorrência de Deslizamentos de Encostas.	Tese de D. Sc.
Oliveira Junior	2008	Estudo da Camada Limite Atmosférica na Região de Angra dos Reis Através do Modelo de Mesoescala MM5 e Dados Observacionais.	Tese de D. Sc.
Oliveira Junior et al.	2010	Critérios de Estabilidade Atmosférica para a Região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis-RJ	Artigo: RBMET
Silva et al	2013a	GIS as a Decision Support Tool in the Area of Influence of the Nuclear Complex Angra dos Reis, Brazil	Artigo: JGIS
Silva et al	2013b	Geo-Environmental aspects integrated into GIS database to support emergency planning of the nuclear power plant Angra do Reis-RJ, Brazil.	Artigo: IJARS
Silva	2013	Modelagem Lagrangeana da Dispersão Atmosférica de Radionuclídeos e Sistemas de Informação Geográfica como Ferramentas de Suporte ao Planejamento de Emergência na Área de Influência do Complexo Nuclear de Angra dos Reis – RJ.	Tese de D. Sc.
Aguiar et al.	2014	Impact Assessment of Beyond Design-Basis Accident	Capítulo de Livro

Aguiar	2015	Avaliação do Impacto de um Acidente Severo na Usina de Angra dos Reis com Liberação dos Radionuclídeos para a Atmosfera	Tese de D. Sc.
Aguiar et al.	2015	Station Blackout in unit 1 and analysis of the wind field in the region of Angra dos Reis.	Artigo: Annals of Nuclear Energy
Figueiredo et al.	2016	Climatologia no Entorno da Central Nuclear de Angra dos Reis, RJ	Artigo: RBMET
Silva et al	2017	Supportive elements to the decision-making process in the emergency planning of the Angra dos Reis Nuclear Power Complex, Brazil.	Artigo: Environ Earth Sci.
Silva et al	2018a	Fatores de Vulnerabilidade ao Planejamento de Emergência do Complexo Nuclear de Angra dos Reis – RJ	Artigo: Anuário do Instituto de Geociências
Manfré et al	2018	Landslide hazard mapping near the Admiral Álvaro Alberto nuclear complex.	Artigo: Bulletin of Geodetic Sciences
Silva et al	2018b	Computational Decision Support Systems Applied to Decision-Making Process in the Emergency Planning of the Angra dos Reis Nuclear Power Complex - Brazil	Artigo: Anuário do Instituto de Geociências
Manfré et al	2020	Urban Settlements and Road Network Analysis on the Surrounding Area of the Almirante Alvaro Alberto Nuclear Complex, Angra dos Reis, Brazil	Artigo: Appl. Spatial Analysis

Nicolli (1981) elaborou um relatório técnico abordando as condições de difusão atmosférica na CNAAA, utilizando dados meteorológicos medidos durante a construção da usina Angra 1 na década de 1970. De acordo com um critério de classes de Pasquill modificado que também é sugerido em CNEN (1989), o autor relacionou a variação vertical da temperatura com os critérios de estabilidade. O estudo apontou que a classe E corresponde a 33% das observações, seguida pelas as categorias D e F com mais de 20% cada uma. Enquanto as classes A, B e C estão associadas a cerca de 17% dos dados. No entanto, o autor aponta a necessidade da utilização de outros métodos de estimativa de estabilidade para uma intercomparação, o que foi feito décadas depois em Oliveira Júnior (2008) e Oliveira Júnior et. al (2010). Em relação ao regime de ventos, foi apontado que o escoamento está associado com fatores locais, especialmente a proximidade com o mar e presença de montanhas. De acordo com Biagio (1982), as classes de estabilidade na CNAAA predominantes no período noturno são as classes E (mais frequente) e F, enquanto período diurno as classes D (mais frequente), E e A foram as

mais frequentes. Na composição total de todo o período diurno, as classes D, E (mais frequente) e F concentraram mais que 75% das condições de estabilidade na região.

Nicolli (1982) analisou escoamento e estabilidade local na região de Itaorna correlacionando os dados de direção do vento de 4 torres meteorológicas entre si, e correlacionando o gradiente vertical de temperatura com o vento. Em relação ao padrão de escoamento, o autor observou que as direções dos ventos possuem grande variabilidade vertical e horizontal, apresentando até direções opostas em algumas observações. Durante a noite foi constatado uma alta frequência de observações de vento com velocidades inferiores a 2m/s, enquanto durante o dia há uma frequência elevada de ventos com intensidade de 2 a 3m/s e baixa frequência de ventos fracos ou calmos. Neste estudo não foi encontrada uma correlação significativa entre a flutuação da direção do vento nas torres com gradiente vertical de temperatura, o que foi atribuído à complexidade do terreno e predominância de ventos fracos.

Alguns anos depois foi publicada a norma CNEN (1989) que menciona como padrão o uso dos métodos ΔT (gradiente vertical de temperatura) e $\sigma\theta$ (flutuação da direção do vento) para determinação da estabilidade atmosférica. O método ΔT é indicado para medir a contribuição térmica para a intensidade da turbulência e permite uma categorização simples dentro das classes de estabilidade atmosférica de Pasquill. De acordo com a Nuclear Regulatory Commission (NRC, 1983) este método é vantajoso por depender de uma variável que pode ser medida de forma relativamente simples. Além disso, este método foi apontado em uma atualização das normas norte-americanas (NRC, 2007) como o principal para a determinação das classes de estabilidade de Pasquill em licenciamentos da indústria nuclear por ser um indicador eficaz para condições estáveis (classes E, F e G), que correspondem aos piores cenários no ponto de vista nuclear. O método $\sigma\theta$ consiste em medir a contribuição da turbulência mecânica através da flutuação da direção do vento (desvio padrão). A CNEN (1989) recomenda que $\sigma\theta$ seja aplicado apenas quando a velocidade do vento é maior ou igual a 0,5m/s. A relação entre ΔT , $\sigma\theta$ e as categorias de Pasquill está disposta na no capítulo 4 (Tabela 4). Destaca-se também que originalmente o critério de estabilidade de Pasquill (Pasquill, 1962) foi idealizado com seis classes de estabilidade classificadas de A (mais instável) até F (mais estável). No entanto, devido ao cenário crítico que situações muito estáveis podem causar em um eventual acidente nuclear, optou-se por adotar em estudos ambientais voltados para a indústria nuclear uma sétima classe correspondente a situações extremamente estáveis, que é assinalada pela letra G (NRC, 1983).

Em um estudo focado no padrão de dispersão no entorno da CNAAA, Martano e Paschoa (1997) simularam os campos de vento e dispersão para o período correspondente a

uma série de campanhas observacionais realizadas no ano de 1984 e compararam os campos com os dados observados. Acerca de monitoramento da CNAAA, os autores apontaram a necessidade do aumento da resolução espacial dos pontos de coleta de dados observados. A fim de mapear outros pontos estratégicos do relevo e melhorar a resolução vertical dos dados.

Em sua dissertação de mestrado Leão (1998) avaliou a dispersão atmosférica de radionuclídeos no entorno da CNAAA através da aplicação de um modelo de difusão atmosférica sob diferentes cenários ambientais. A determinação destes cenários foi realizada considerando duas situações extremas de precipitação, uma valores mínimos e outra com máximos para cada estação do ano. Em seguida, a avaliação de todos os cenários foi realizada com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) que agrupou toda as informações de topografia, cobertura do solo, o padrão médio meteorológico de cada cenário e o modelo de dispersão em um único produto. O autor apontou importância dos os padrões de vento em cada estação ano para a caracterização da dispersão no local. Além disso, a atuação da topografia como uma barreira para a dispersão foi apontada como responsável pelos menores valores de dispersão em um raio de até 3km da CNAAA.

A tese de doutorado de Oliveira Junior (2008) investigou a atmosfera local da CNAAA utilizando de forma inédita vinte e seis anos de dados observados continuamente na região. Através da análise climatológica dos dados de vento, as forçantes térmicas responsáveis pela formação do vento de encosta e brisas marítima-terrestre foram apontadas como responsáveis pelas direções observadas em A10 (N, NNE, SSO e SO) e B (N e S). Enquanto as forçantes térmicas associadas ao vento de encosta, brisas marítima-terrestre e a forçante dinâmica associada a canalização forçada pelo terreno foram atribuídas a direções observadas em A60 e A100 (O, SO, OSO, SSO, NE e ENE), C (N, E, SSE, S e NNO) e D (O, OSO e NE). A avaliação da estabilidade atmosférica na região da CNAAA foi realizada através das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford e dos números de Richardson Global e de Froude. Foram utilizados dados medidos em uma torre meteorológica instalada na central nuclear, que realiza medições em 3 níveis. O autor observou através do critério de Pasquill-Gifford a predominância das classes D, E e F. O número de Richardson Global apontou a predominância da condição de estabilidade estática, seguida pela instável e neutra. Enquanto o número de Froude permitiu associar a condição de estabilidade atmosférica predominante com um regime de ventos fracos, forte estabilidade e ar estagnado, evidenciando a baixa capacidade da região para a dispersão de poluentes. Além disso, os horários sob o regime de brisa marítima foram associados com condições de estabilidade neutra e levemente estável, enquanto que o regime de ventos de encosta está relacionado com condições levemente estável e moderadamente estável. Os

resultados acerca da estabilidade atmosférica no local foram explorados e publicados em Oliveira Junior et. al (2010). Além da análise observacional, foram realizados dois experimentos numéricos para avaliar o desempenho modelo numérico MM5 num estudo de caso sob a atuação da ASAS. Duas combinações entre modelos de solo e esquemas de camada limite Eta/NOAH e GS/MULTI-LAYER foram avaliados na comparação e apresentaram algumas diferenças em relação aos dados observados. A fim de melhorar a representação da circulação local, foi sugerido que as resoluções das bases topográficas e das categorias de uso de solo sejam aumentadas, além do acoplamento de um modelo de solo mais sofisticado, incorporação de dados mais realísticos de ocupação do solo.

Figueiredo et al (2016) elaboraram um estudo médio a partir de dados de 8 anos de dados observados nas quatro torres instaladas na região da CNAAA. Com relação ao vento, os autores observaram o sinal da brisa marítima se estendendo até o sensor a 100 m de altura, atingindo uma intensidade máxima em torno de 15h. Além disso, os autores apontaram uma possível relação com os ventos mais intensos no nível mais baixo da torre A (10 m) durante a madrugada e manhã, como um possível indicador da interação entre a brisa terrestre com o vento catabático que é mais eficiente nos baixos níveis. Observou-se que em relação à estabilidade estática da atmosfera predominam condições de estabilidade entre 60-10 m, durante os períodos da noite e madrugada em todas as estações do ano. Devido ao aquecimento diurno, esta condição de estabilidade é interrompida e a atmosfera torna-se condicionalmente instável (no verão, outono e inverno) ou instável (na primavera).

Outros importantes estudos para a região da CNAAA tiveram como foco a aplicação de sistemas de resposta baseados no monitoramento e modelagem computacional da atmosfera, associados com as tecnologias de geoprocessamento (Silva, 2013; Silva et al., 2013a, b; Silva et al., 2017; Silva et al., 2018a, b; Manfré et al, 2018, Manfré et al, 2020). O principal objetivo foi desenvolver um sistema de resposta baseados no monitoramento e modelagem computacional da atmosfera, associados com as tecnologias de geoprocessamento para subsidiar o planejamento de segurança para a operação de centrais nucleares. Essas ferramentas podem ser adotadas em conjunto com o conhecimento geobiofisiográfico da região, oriundo do monitoramento ambiental, através dos registros de séries temporais e espaciais de dados observados, e o uso de modelos de dispersão de radionuclídeos, como suporte à rápida e segura tomada de decisão em um eventual acidente, e ainda contribuir para a posterior análise do nível de impacto ambiental causado pela emissão de poluentes radioativos na área de influência de instalações nucleares.

Aguiar et al. (2014; 2015) e Aguiar (2015) avaliaram o impacto de um acidente severo (Station Blackout) na usina de Angra 1. Na investigação foi considerada a emissão e dispersão atmosférica de Iodo (^{131}I), onde, com base na estimativa da concentração e cálculo da dose dose de inalação da pluma, pode-se verificar se os resultados estariam de acordo com o apontado pelo Plano de Emergência da Usina no que tange à Zona de Impacto e de Controle. Na modelagem atmosférica e da dispersão de radionuclídeos foi utilizado o sistema combinado WRF/CALMET/CALPUFF. Segundo os autores, é evidente que existe uma lacuna no estudo da modelagem atmosférica e da dispersão de poluentes para a região, ou seja, não existe um modelo matemático relativamente complexo que possa representar e descrever os fenômenos atmosféricos multiescala característicos da região.

Capítulo 4

4 Materiais e métodos

O sistema combinado de modelagem ambiental proposto neste estudo é idealizado na combinação entre o uso de ferramentas de modelagem estatística, modelagem determinística, monitoramento meteorológico e sistema de informação geográfica. A estrutura da metodologia aplicada está disposta no fluxograma abaixo (Figura 14), onde apresenta-se os constituintes deste sistema integrado de modelagem ambiental dos fenômenos de transporte na atmosfera. Destaca-se que os blocos hachurados correspondem a modelos computacionais e variáveis que não foram exploradas neste estudo, mas que podem ser incorporadas ao sistema:

Resultados numéricos do WRF e dados monitorados de precipitação para avaliação de deslizamentos de terreno, chuvas extremas, definição de rotas de fuga e estimativa dos parâmetros usados na modelagem dos processos de deposição úmida de radionuclídeos no entorno da CNAAA; Resultados numéricos da temperatura da superfície do mar via modelos oceânicos e sensoriamento remoto/SIG para assimilação no WRF, objetivando aprimorar a modelagem dos sistemas de brisa terra/mar; O uso do sistema de informação geográfica para auxiliar na melhor representação do terreno e seus efeitos sobre o escoamento atmosférico, como a elaboração de bases de dados de uso e ocupação do solo e da topografia para a inserção no modelo WRF; Uso do sistema de informações geográficas para a análise ambiental integrada, combinando os resultados numéricos para o escoamento atmosférico com elementos biofisiográficos, permitindo avaliar preliminarmente o transporte de radionuclídeos emitidos em um possível acidente na usina da CNAAA e seus impactos sobre corpos d'água, vegetação, áreas de proteção ambiental, população e etc.

Visando alcançar os objetivos propostos, serão utilizados os dados observados da rede meteorológica da CNAAA. Os dados serão utilizados para análise observacional descritiva, avaliação das simulações com o modelo determinístico e como base para a modelagem estatística. Este procedimento encontra-se esquematizado nos fluxogramas dispostos na figura 14.

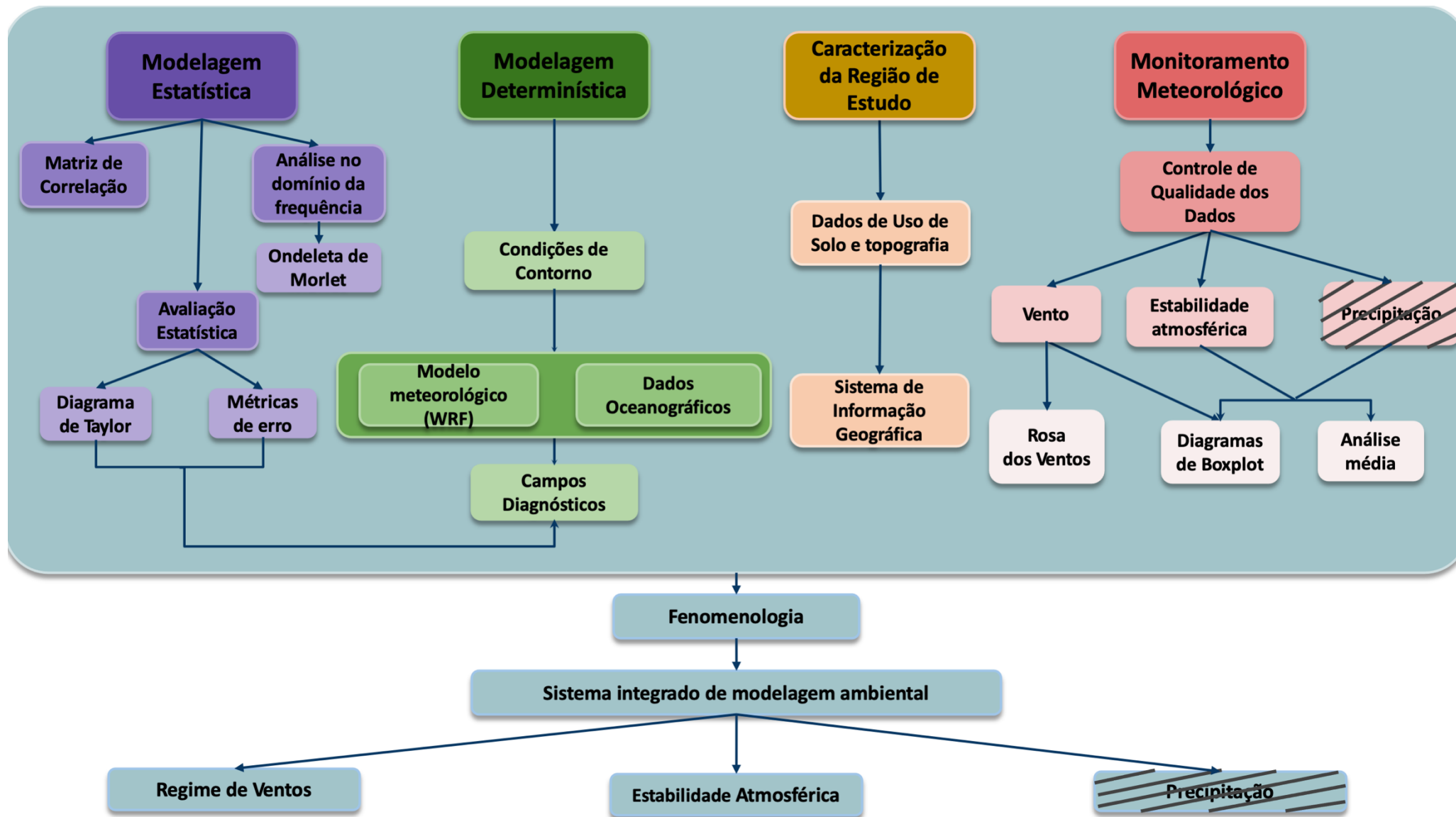


Figura 14: Fluxograma composto pela metodologia proposta de um (a) sistema combinado de modelagem ambiental, com detalhamento das etapas propostas para caracterização da região de estudo, modelagem estatística, modelagem determinística e monitoramento meteorológico e (b) detalhamento de testes

realizados no modelo regional WRF. Os elementos hachurados indicam a variável precipitação, que deve ser incluída em estudos futuros para um sistema de modelagem ambiental mais abrangente.

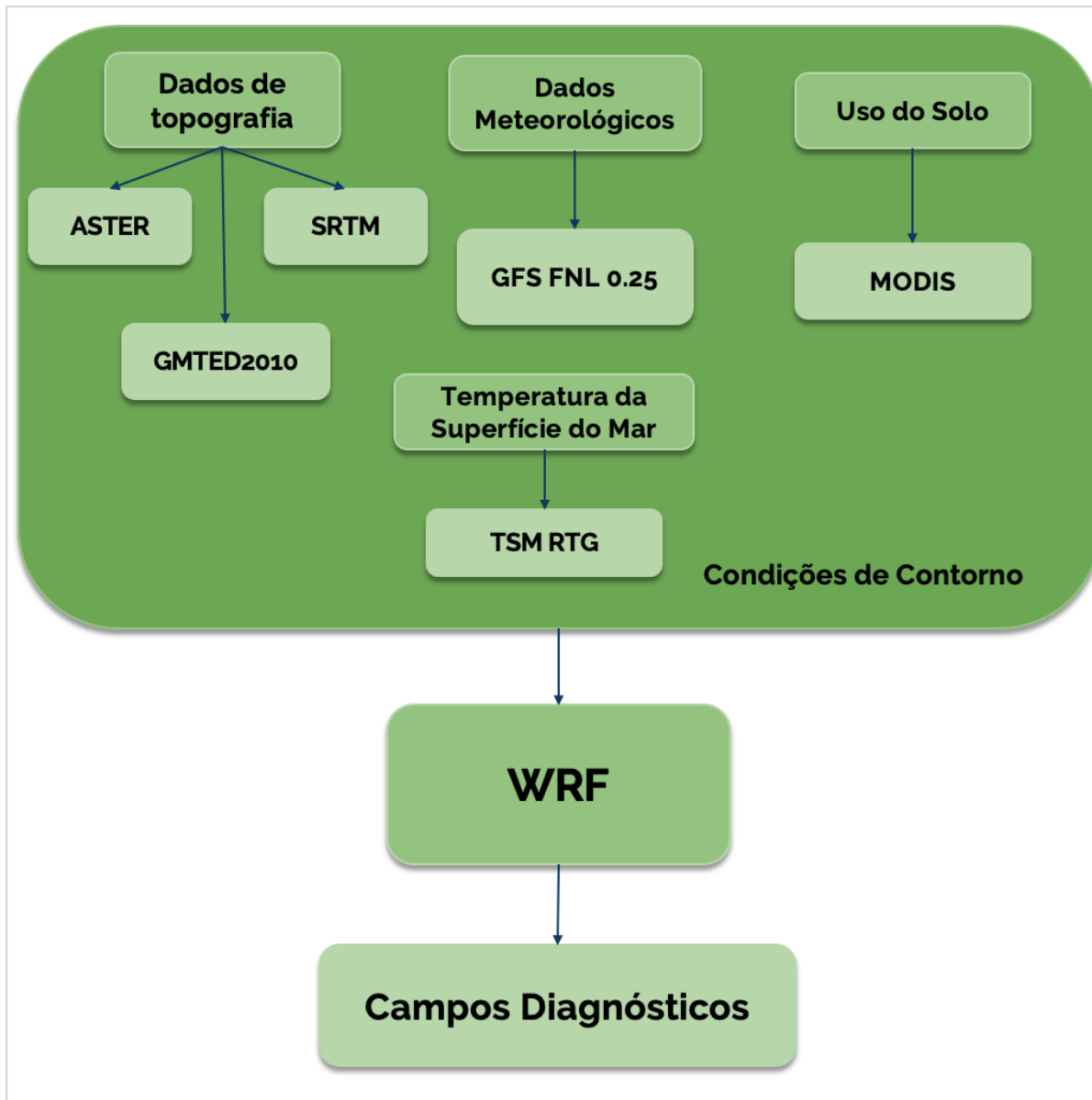


Figura 14: Continuação

4.1 Aspectos da região de estudo

O município de Angra dos Reis está localizado no extremo sul do estado do Rio de Janeiro. Sua população estimada é de 200.407 habitantes (IBGE, 2018) distribuídos em uma área total é de 819 km², 626 km² correspondentes à porção continental e 193 km² à porção insular (Soares, 2006). A cidade abriga a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), onde estão instaladas as duas únicas usinas nucleares em operação no país, Angra 1 e Angra 2, além de uma terceira usina nuclear que está em construção.

A CNAAA está instalada na praia de Itaorna, em uma estreita faixa continental no fundo baía da Ilha Grande (Fig. 15). Além disso, a presença da Serra do Mar é responsável por uma topografia marcada por montanhas elevadas e morros com alta declividade no entorno da central nuclear (Silva et al, 2013a). As características fisiográficas da região propiciam a formação das circulações locais de brisa marítima/terrestre e vale/montanha, além de ondas de gravidade de origem orográfica (Oliveira Junior, 2008). Além disso, a atmosfera local também pode com o escoamento de outras escalas modificando o padrão de circulação diurna na região.



Figura 15: Enquadramento geográfico e posicionamento das torres meteorológicas (A, B, C e D) e do complexo nuclear da CNAAA. São destacadas as regiões de floresta e de ocupação urbana ao longo da costa da Baía de Ilha Grande e da Baía de Sepetiba.

4.2 Dados

A rede meteorológica da CNAAA é composta por quatro torres meteorológicas (A, B, C e D) instaladas em diferentes pontos em seu entorno. As torres estão posicionadas em diferentes altitudes em relação ao nível médio do mar, e o posicionamento de cada uma em relação a topografia complexa pode ser observado na Figura 16. Destaca-se que as medições na torre A são feitas em 3 alturas em relação a sua base, 10m, 60m e 100m; enquanto nas demais torres as medidas foram realizadas na altura de 15m em relação a base da torre (tabela 3).

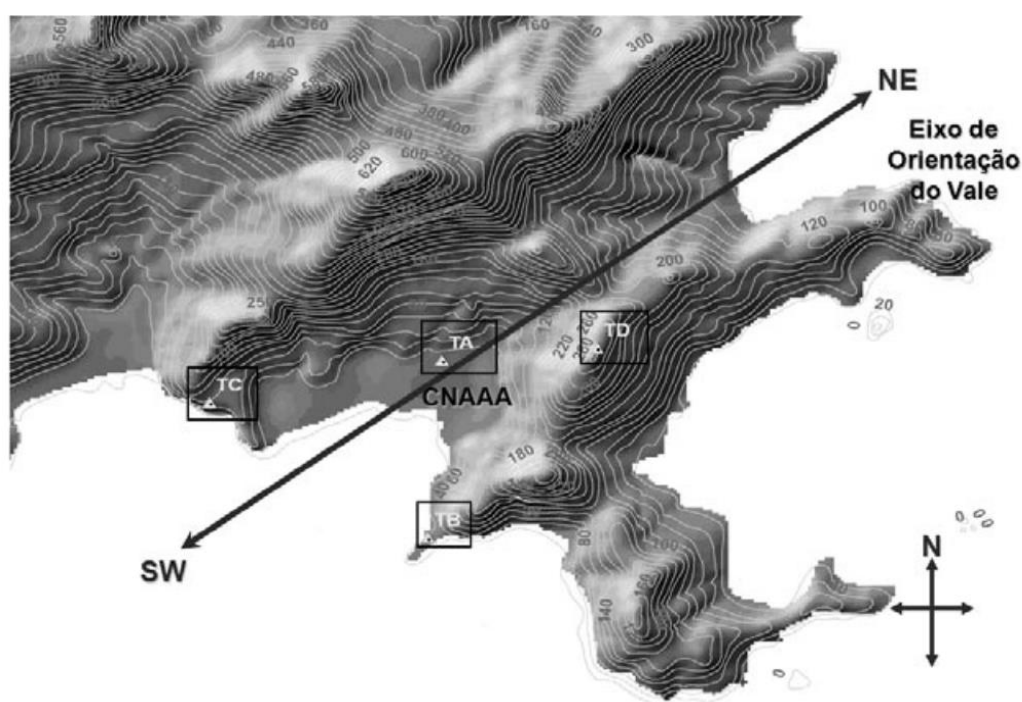


Figura 16: Posicionamento das torres meteorológicas (A, B, C e D) da CNAAA e a topografia no seu entorno (Fonte: Oliveira-Júnior (2010)).

Os dados utilizados neste estudo foram cedidos pela Eletronuclear e compreendem dois períodos distintos. O primeiro período compreende o período de 05/01/1982 à 01/01/2002, com dados de vento com frequência temporal de 1 hora. O segundo conjunto de dados compreende todo o ano de 2016 com dados de vento e temperatura (Torre A) em resolução temporal de 15 minutos.

Fiebrich et al. (2010) propuseram alguns procedimentos gerais para se garantir o controle de qualidade de dados meteorológicos. Dentre estes pode-se citar a proposta de verificação baseada nos limiares do sensor ou no intervalo variabilidade estimado a partir da

climatologia (Hubbard, 2001) e avaliação da magnitude dos dados entre dois intervalos consecutivos. Neste estudo o tratamento da base de dados consistiu na aplicação de filtros para retirada de dados potencialmente inconsistentes. Estabeleceu-se o limiar entre -10 °C e 50 °C para validação de um dado de temperatura, a partir dos limiares recomendados em CNEN (1989) para o sensor. No vento aplicou-se um filtro para detecção de ausência de variabilidade em dados consecutivos. Com isto, foram removidos registros onde a intensidade e a direção do vento permaneceram estáticas por mais de 2 horas. O percentual de dados válidos no período de 1982 a 2001 foi acima de 61% em todas as torres. Enquanto no ano de 2016, o percentual de dados válidos foi maior que 96%.

Tabela 3. Localização das torres meteorológicas da CNAAA com as alturas da base das torres em relação ao nível do mar e alturas do sensor (m).

Torre meteorológica	Latitude (°)	Longitude (°)	Altura da base da torre (m)	Altura do sensor na torre (m)
A	-23,004100	-44,458682	50	10, 60 e 100
B	-23,015842	-44,458596	10	15
C	-23,007864	-44,471470	80	15
D	-23,004445	-44,448893	290	15

Além da caracterização observacional, os dados de 2016 foram utilizados na avaliação dos resultados das simulações com o modelo atmosférico de mesoescala WRF (Skamarock et al., 2019).

4.3 Caracterização observacional

A caracterização atmosférica foi baseada na análise de séries temporais de dados registrados na rede meteorológica da CNAAA nos períodos de 1982 à 2001 e para o período de 2016. Neste estudo foram utilizados dados em horário local (GMT -3). Os dados de vento dos períodos de 1982 à 2001 foram utilizados para a caracterização da circulação na região da CNAAA através do padrão médio para os quatro períodos do dia: madrugada (0h até 5 h), manhã (6h até 11h), tarde (12h até 17h) e noite (18h até 23h). Além da composição total de todos os horários do dia (0h até 23 h). Visando uma melhor visualização destes dados de ventos, os valores do eixo de frequência foram fixados em 30%, 40% e 54% de acordo com os valores da direção de maior predominância a padronização dos gráficos de rosas dos ventos. Como complemento foi avaliada a distribuição diurna e a composição total dos regimes de calmaria

(intensidade do vento menor que 0,515 m.s-1) e as velocidades médias do vento nas quatro torres.

E, por fim, foi analisada a distribuição dos dados de cada ponto através do gráfico *boxplot*. O *boxplot* é uma ferramenta gráfica que onde é possível observar o comportamento médio e a distribuição de uma determinada série de dados. A partir dele pode-se retirar valores como mediana da série de dados, a distância interquartil, além dos possíveis *outliers* (Wilks, 2006).

Os dados de vento do ano de 2016 foram aplicados na elaboração de rosas dos ventos para todos os horários de observação entre 00h e 23h45. Os valores do eixo de frequência foram fixados em 50% (torre A) e 35% (torres B, C e D), de acordo com os valores da direção de maior predominância para a padronização dos gráficos. A caracterização da circulação a partir dos dados de 1982 a 2001 é discutida no capítulo 5 e os resultados encontrados para o ano de 2016 encontram-se no Anexo I.

A base de dados do ano de 2016 também foi utilizada para análise dos índices de estabilidade atmosférica baseados no gradiente vertical de temperatura e no desvio padrão das flutuações da direção de vento. A correspondência entre os intervalos dos valores nos índices de estabilidade e as classes de Pasquill foi aplicada conforme a Norma da CNEN para o programa de Meteorologia (CNEN, 1989). Estes limiares estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4: Classificação dos parâmetros de estabilidade e as classes correspondentes de acordo com as classes de Pasquill (CNEN, 1989).

Classes de estabilidade	Gradiente Vertical de Temperatura (°C/100m)	Sigma (°)	Definição
A	$\Delta T / \Delta z \leq -1,9$	$\sigma_{10} \geq 22,5$	Fortemente instável
B	$-1,9 < \Delta T / \Delta z \leq -1,7$	$22,5 > \sigma_{10} \geq 17,5$	Moderadamente instável
C	$-1,7 < \Delta T / \Delta z \leq -1,5$	$17,5 > \sigma_{10} \geq 12,5$	Ligeiramente instável
D	$-1,5 < \Delta T / \Delta z \leq -0,5$	$12,5 > \sigma_{10} \geq 7,5$	Neutra
E	$-0,5 < \Delta T / \Delta z \leq 1,5$	$7,5 > \sigma_{10} \geq 3,8$	Ligeiramente estável
F	$1,5 < \Delta T / \Delta z \leq 4,0$	$3,8 > \sigma_{10} \geq 2,1$	Moderadamente estável
G	$4,0 \leq \Delta T / \Delta z$	$2,1 > \sigma_{10}$	Fortemente estável

Onde, $\Delta T / \Delta z$ é o Gradiente Vertical de Temperatura e σ_{10} é o desvio padrão das flutuações da direção de vento.

A distribuição dos parâmetros de estabilidade atmosférica foi realizada através de gráficos *boxplot*, que forneceu informações a respeito do comportamento médio e da distribuição dos dados. A utilização de rosas dos ventos do *boxplot* permitiram uma avaliação

diurna do padrão das variáveis meteorológicas. Além de produzir uma descrição do padrão local do regime de vento e estabilidade, fornecendo subsídios para a identificação de forçantes mecânicas e térmicas do escoamento.

A análise de correlação foi a técnica selecionada para a verificação de uma possível relação entre os padrões de vento e estabilidade medidos na região da CNAAA. Devido a base de dados ser composta por uma combinação entre variáveis lineares e circulares/angulares, foram utilizados três coeficientes de correlação descritos na literatura.

O coeficiente de correlação de Pearson (eq. 2.7) foi a técnica selecionada para avaliação de similaridade entre variáveis lineares (eg. Temperatura e intensidade do vento). O coeficiente de correlação circular-linear (eq. 2.8) foi utilizado para avaliação da relação entre uma variável circular com uma variável linear (eg. temperatura e direção do vento). Enquanto o coeficiente de correlação circular-circular (eq. 2.9) indica o grau de similaridade entre duas variáveis circulares (eg. direção do vento e sigma). Os valores de correlações medidos foram dispostos através da interface gráfica de uma matriz de correlação, permitindo uma análise rápida e intuitiva dos dados. Nesta aplicação, foram utilizados dados de vento, estabilidade estática e sigma das torres meteorológicas da CNAAA medidos ao longo do ano de 2016.

Todas as rotinas de pré-processamento da base de dados e para a visualização dos dados em rosas dos ventos e do padrão médio da estabilidade foram escritas na linguagem de programação Python. As principais bibliotecas utilizadas foram: pandas (McKinney, 2010), numpy (Oliphant, 2006; Walt et al., 2011) e matplotlib (Hunter, 2007). As rotinas elaboradas para gerar os resultados desta dissertação estão disponíveis em repositório aberto no GitHub: <https://github.com/Larissafjrj>

4.4 Aplicação da técnica de ondeleta

A análise de ondeleta de Morlet será aplicada utilizando como base o algoritmo em python escrito pela pesquisadora Evgeniya Predybaylo para reproduzir os resultados de Torrence e Compo (1998). Além disso, o método aplicado apresentará a correção da transformada de ondeleta em função das escalas correspondentes conforme o proposto por Liu et al. (2007). O algoritmo escrito por Evgeniya Predybaylo está disponível na plataforma GitHub em: <https://github.com/chris-torrence/wavelets>. E, a modificação feita no algoritmo inicialmente proposto está disponível em: <http://ocgweb.marine.usf.edu/~liu/wavelet.html>.

A partir destes algoritmos foram elaborados dois tipos de gráficos:

1) Espectros de potência de ondeleta (espectro contínuo): consiste em um gráfico cujo eixo y representa as escalas (ou frequências) da série, o eixo x representa a variação temporal da série, e, por último, as cores identificam a energia associada a cada escala dada pela equação 4.3. Há um traçado em linhas pretas que correspondem a 95% do nível de confiança, e um cone de influência que delimita a análise para as regiões onde erros causados por efeitos de borda podem ser desprezados (Torrence e Compo, 1998).

$$P_{\Psi} = |W_n(s)|^2 \quad (4.3)$$

Onde, P_{Ψ} é a potência do espectro de ondeleta; W_n é a transformada de ondeleta contínua; e s é a escala do fenômeno.

2) Espectros globais de ondeleta: consiste em um gráfico cujo eixo y representa as frequências da série e o eixo x representa os valores de potência dos dados. O traçado de linhas cheias pretas aponta os valores médios de energia para cada frequência, obtidos na equação 4.4. O traçado vermelho tracejado delimita quais frequências apresentam energias estatisticamente significativas.

$$\overline{W}^2(s) = \sigma^2 \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)|^2 \quad (4.4)$$

Um exemplo da aplicação da técnica de ondeleta para uma série sintética $s1 = \text{sen}\left(\frac{2\pi}{24} t\right)$, com a visualização gráfica dos espectros de potência de ondeleta e global para esta série está disposto a seguir na figura 17.

A visualização dos espectros de ondeleta requer a escolha de parâmetros para a configuração dos períodos a serem observados. Neste estudo, as escalas visualizadas variam entre 2 horas e aproximadamente 64 dias. Os parâmetros para análise dos dados estão dispostos na tabela 5.

A avaliação da confiança estatística dos sinais de potência de ondeleta foi aplicada assumindo um nível de confiança estatística de 95%, conforme o limiar utilizado em estudos anteriores (Torrence e Compo, 1998; Guimarães, 2014).

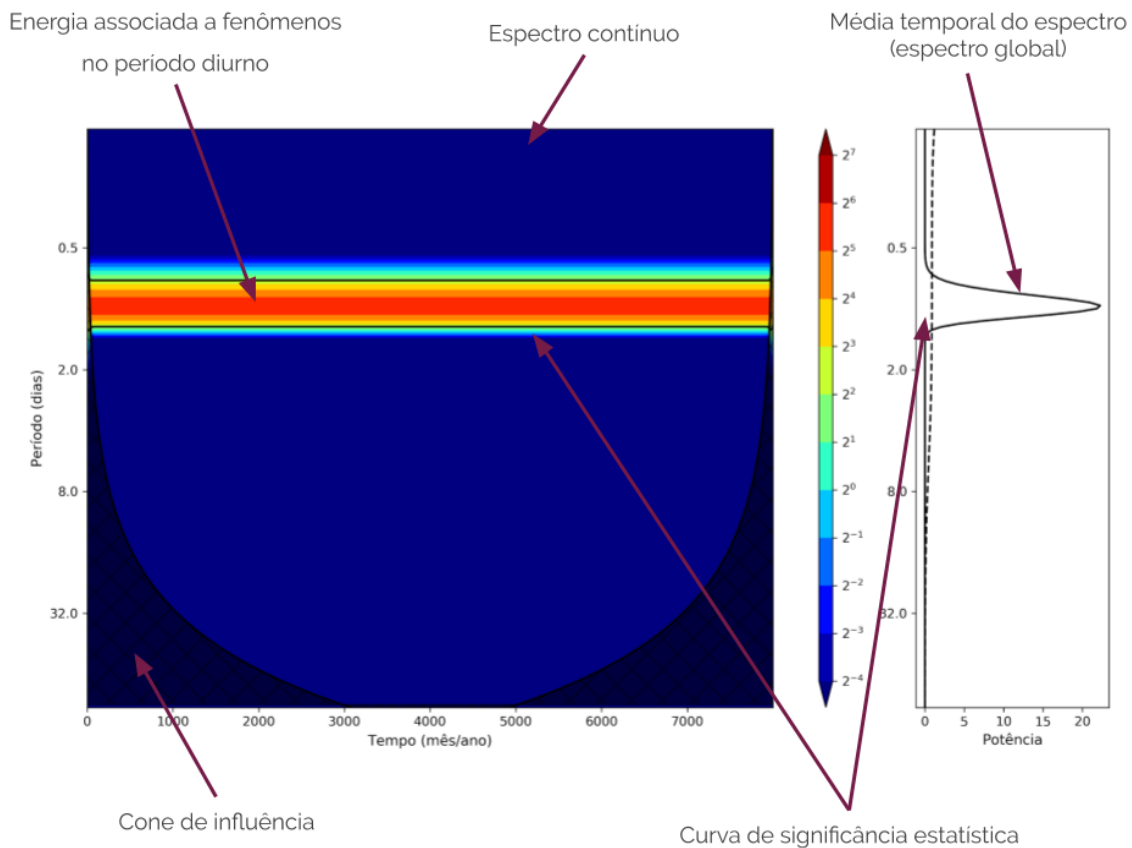


Figura 17: Visualização gráfica da aplicação da técnica de ondeleta para uma série sintética com período constante de 1 dia. São indicados por seta os principais elementos da figura, são eles: Espectro contínuo e a energia referente a série sintética, curvas de confiança estatística, média temporal do espectro global e cone de influência. (Fonte: Elaboração própria)

Tabela 5: Configurações definidas para visualização dos espectros de ondeleta.

Parâmetro	Valor definido na rotina	Descrição
dj	0.05	Define o espaçamento entre escalas (resolução da interpolação entre as escalas).
s0	$2*dt$	Define o menor período que será visualizado no espectro de ondeleta.
j1	175	Define a quantidade máxima de períodos que serão visualizados no gráfico.

Nesta aplicação, foram utilizados dados de vento coletados nas torres meteorológicas da CNAAA medidos durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985 e ao longo do ano de 2016. Estes períodos foram selecionados por não apresentar períodos longos com falha nos dados em

nenhuma das torres. A aplicação da ondeleta para o período entre 1984 e 1985 é discutida no capítulo 5 e os gráficos elaborados para o ano de 2016 encontram-se no Anexo II.

4.5 Configuração do modelo WRF

4.5.1 Aninhamentos de grade no modelo WRF

As simulações com o modelo regional foram realizadas utilizando duas configurações de grade distintas, ambas compostas por três domínios aninhados. Na primeira configuração, foi utilizada uma configuração (G1) com três domínios, uma grade mãe de 9km e dois domínios aninhados de 3km e 1km (Tabela 6; Figura 18). A fim de avaliar o desempenho do modelo utilizando um padrão de aninhamento de grade utilizado em estudos anteriores de modelagem para o estado do Rio de Janeiro (eg. Silva, 2013; Dragaud et al, 2018).

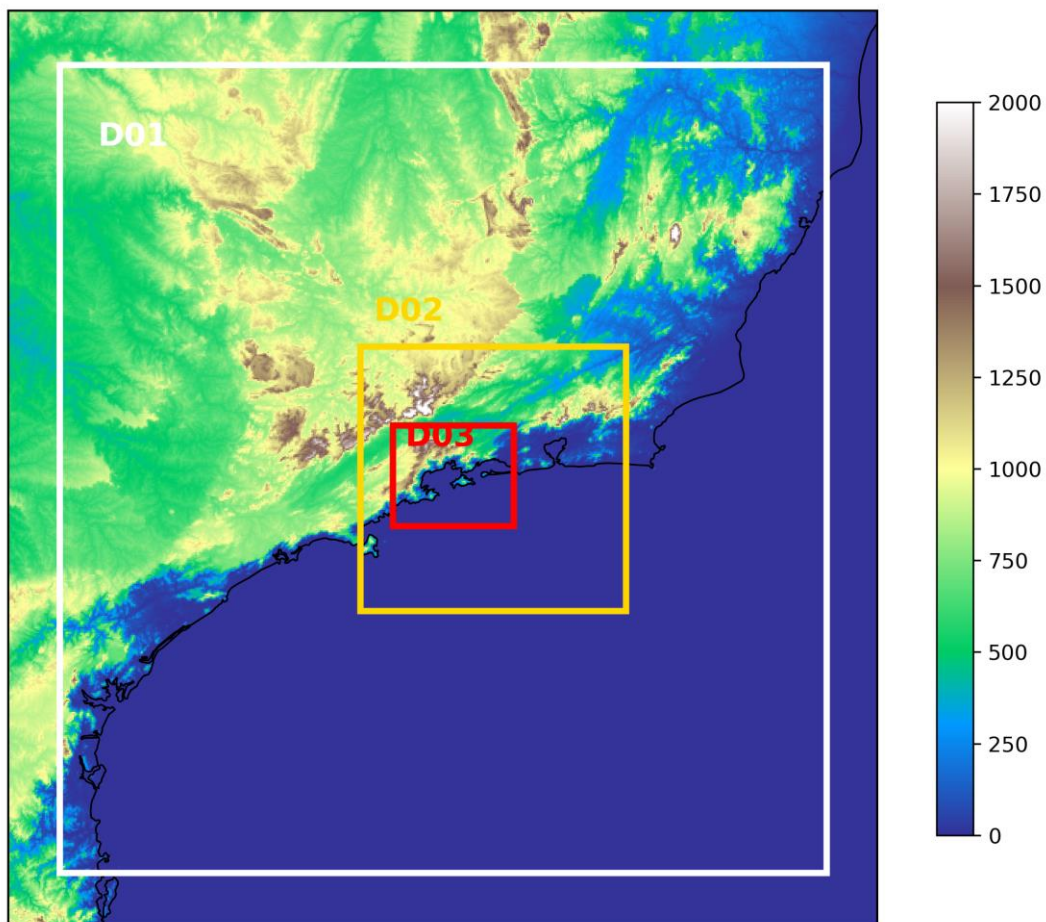


Figura 18: Domínios de 9km, 3km, e 1km utilizados nas simulações com o modelo WRF(G1).

Tabela 6: Detalhamento acerca dos domínios aninhados de 9km, 3km e 1km (G1)

Domínio	Resolução Horizontal	Quantidade de Pontos	Resolução Vertical
D1	9km	102x108	40
D2	3km	106x106	40
D3	1km	145x121	40

A segunda configuração (G2) consiste em três grades com resoluções horizontais de 4,5km, 1,5km e 500m (Tabela 7; Figura 19). A grade mais abrangente, com resolução horizontal de 4.5km, está centrada próxima à CNAAA e abrange parte dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. Os três domínios abrangem a baía de Ilha grande e as regiões com topografia acentuada, assim, espera-se capturar os gradientes causados pelas circulações locais.

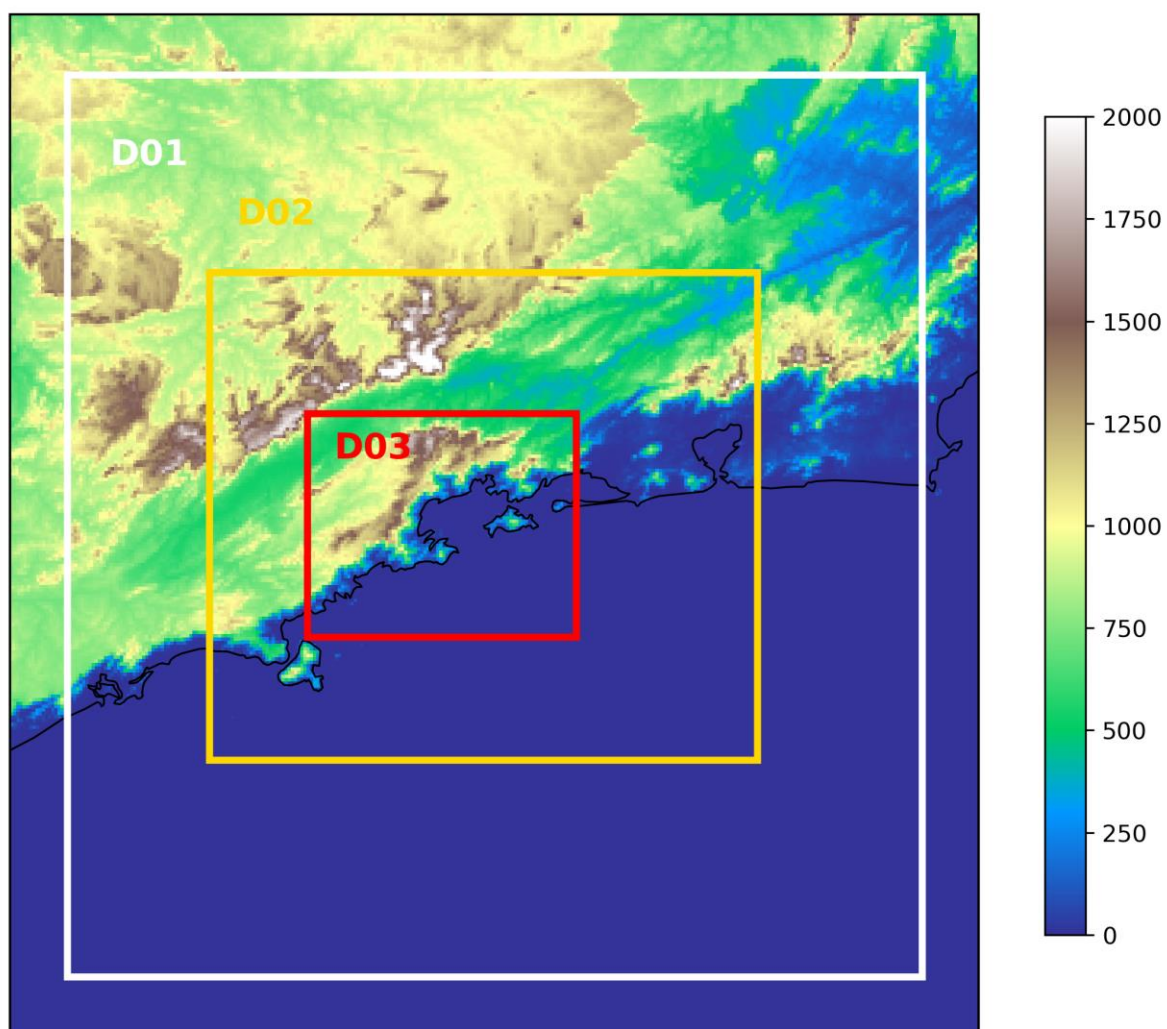


Figura 19: Domínios de 4,5km, 1,5km e 500m utilizados nas simulações com o modelo WRF (G2).

Tabela 7: Detalhamento acerca dos domínios aninhados de 4,5km, 1,5km e 500m (G2).

Domínio	Resolução Horizontal	Quantidade de Pontos	Resolução Vertical
D1	4.5km	102x108	40
D2	1.5km	196x175	40
D3	500m	289x241	40

Todas as simulações foram configuradas com 40 níveis verticais. Os nove primeiros níveis estavam distribuídos entre a superfície e a altura de 1025m. A distribuição dos níveis verticais com a altura está ilustrada na figura 20.

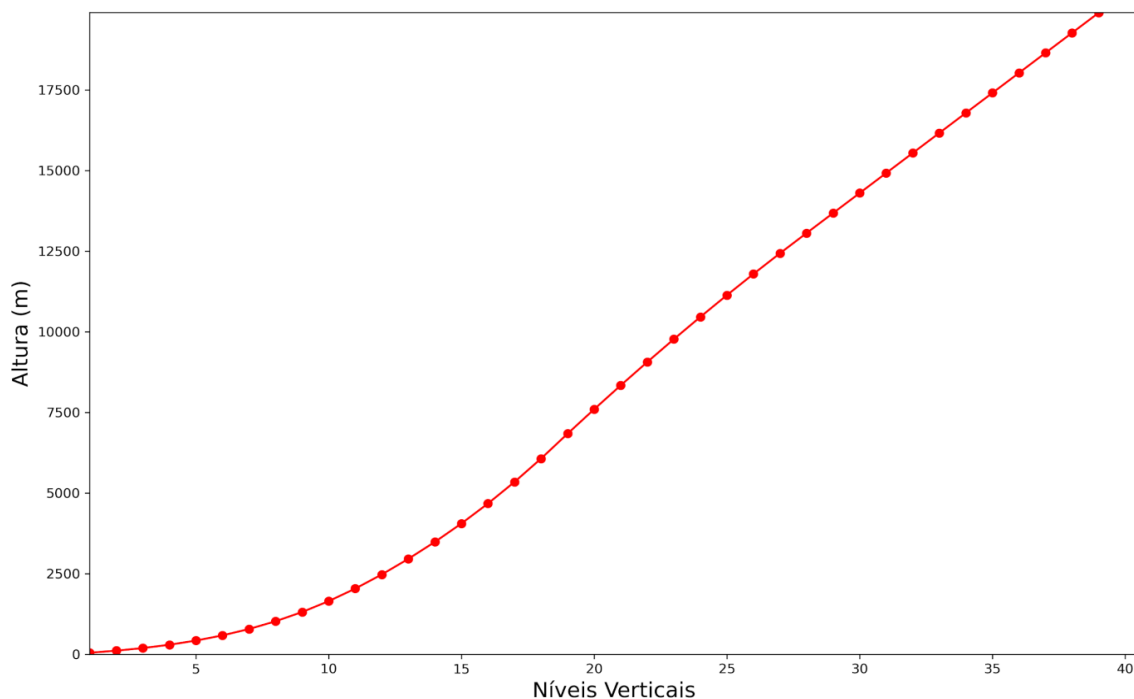


Figura 20: Níveis verticais e alturas correspondentes.

4.5.2 Condições iniciais e de contorno

O modelo WRF foi inicializado com os campos do modelo global *Global Forecast System* (GFS) como informações meteorológicas de condição inicial e de contorno. Estes dados estão dispostos em grades com resolução horizontal de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Os campos de análise

desse modelo são disponibilizados pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) operacionalmente nos horários de 00z, 06z, 12z e 18z (<https://rda.ucar.edu/>).

O conjunto de categorias de uso do solo baseado na classificação de uso do solo Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), com 500m de resolução e 20 categorias de uso do solo conforme a configuração default do modelo. Em relação às bases topográficas, nas simulações com grades 9km x 3km x 1km foram definidos como condição de contorno topográficas os dados GMTED2010 do USGS nos domínios D1 (9km), D2 (3km) e D3 (1km), conforme o padrão do modelo. Nas simulações com grades 4,5km x 1,5km x 500m os dados topográficos GMTED2010 do USGS foram fixados nos domínios D1 (4,5km) e D2 (1,5km). Enquanto no domínio D3 (500m), além da base GMTED2010 (utilizada por padrão no WRF), também foram realizadas simulações utilizando os dados do projeto SRTM e dados do repositório ASTER GDEM, ambos originalmente com 30m de resolução horizontal. A diferença na representação do vento entre estas quatro configurações (Tabela 8) do modelo WRF é mostrada qualitativamente através de meteogramas e quantitativamente na análise estatística, ambos no capítulo 6.

Tabela 8: Configuração do WRF nos quatro experimentos

Experimento	Tipo de decaimento	Base topográfica
G1 - GMTED2010	D1(9 km)	D1, D2 e D3 - GMTED2010 / USGS
	D2(3km)	
	D3(1 Km)	
G2 - GMTED2010	D1(4,5 km)	D1, D2 e D3 - GMTED2010 / USGS
	D2(1,5km)	
	D3(0,5 Km)	
G2 - SRTM	D1(4,5 km)	D1 - GMTED2010 / USGS
	D2(1,5km)	D2 - GMTED2010 / USGS
	D3(0,5 Km)	D3 - SRTM
G2 -ASTER	D1(4,5 km)	D1 - GMTED2010 / USGS
	D2(1,5km)	D2 - GMTED2010 / USGS
	D3(0,5 Km)	D3 - ASTER GDEM

A conversão dos dados SRTM e ASTER do formato GeoTiff para um arquivo de entrada compatível com o WRF foi realizada através da linha de comando *convert_geotiff* disponível em https://github.com/openwfm/convert_geotiff. Este método para conversão de dados de entrada para o WRF foi referenciada em estudos que utilizaram dados de foco de calor

em estudos com WRF-Fire (Dobrinkova, 2018; Open Wildland Fire Modeling Community, 2020).

Além disso, foi utilizada em todos os domínios a condição de contorno de Temperatura da Superfície do Mar, os dados de análise da *Real-Time Global Sea Surface Temperature High-Resolution* (TSM RTG) com resolução espacial horizontal de 0.083° e resolução temporal diurna. A TSM RTG é uma análise resultante da interpolação dos dados de boias e navios, dados de TSM e de cobertura de gelo marinho recuperados por satélite (NWS, 2020).

O conjunto de parametrizações físicas utilizadas no estudo foi definido com base na literatura de esquemas aplicados ao redor do momento da estudos de meteorologia de montanha (eg. Jimenéz et al, 2010; Zhang et. al, 2013; Soltanzadeh et. al, 2016). As parametrizações físicas aplicadas estão listadas na Tabela 9.

Tabela 9: Parametrizações físicas utilizadas nos domínios

Parametrização	Opção
Microfísica	<i>WRF Single-Moment 6-class</i>
Cumulus	<i>Kain-Fritsch</i>
Radiação de Onda Longa	<i>RRTM</i>
Radiação de Onda Curta	<i>Dudhia</i>
Camada Limite Planetária	<i>Yonsei University (YSU)</i>
Camada Superficial Atmosférica	<i>Revised MM5 surface layer</i>
Superfície terrestre	<i>Noah-MP Land Surface Model</i>

4.5.3 Estudo de caso

O estudo de caso será realizado para avaliar se a modelagem computacional é capaz de representar adequadamente os comportamentos dinâmicos e termodinâmicos da região.

O mês de janeiro de 2016 foi um período muito diverso de sistemas sinóticos atuantes. O que torna este mês interessante para a análise do desempenho do modelo WRF na representação do escoamento local sob diversas condições sinóticas em um período de tempo relativamente curto. No entanto, devido ao custo computacional destas rodadas, foi necessário escolher um período ainda mais curto para está análise preliminar.

Considerando que sob a influência da ASAS no estado do Rio de Janeiro, onde predominam condições de céu claro ou pouca nebulosidade, (Dereczynski e Menezes, 2015) estudos anteriores documentaram que é possível observar influência de forçantes de microescala e de mesoescala na circulação dos ventos próximos à superfície (Oliveira-Júnior, 2008, Pimentel et al., 2014). Foram escolhidos dias 5 e 6 de janeiro justamente devido a influência deste sistema sinótico, que manteve o tempo estável sobre a região de Angra dos Reis. Assim, pôde-se discutir a habilidade do modelo em capturar diferentes padrões do vento associados a forçantes de mesoescala e microescala.

Foram realizados quatro experimentos numéricos com diferentes configurações de grade para o período especificado, como descritos na tabela 8 (G1 - GMTED2010, G2 - GMTED2010, G2 - SRTM e G2 - ASTER). Na primeira simulação (G1) a grade mais resolvida (D3) apresentou 1km de resolução horizontal e recebeu como condição de contorno os dados de topografia GMTED2010. Nas três demais simulações a grade D3 foi configurada com 500m de resolução horizontal e foram testados dados de contorno de topografia GMTED2010 (G2 - GMTED2010), ASTER (G2 - ASTER) e SRTM (G2 - SRTM).

A avaliação estatística dos quatro experimentos numéricos com o modelo WRF foi feita com base nos dados observados de séries temporais de vento registrados na rede meteorológica da CNAEA em 2016. Os índices estatísticos utilizados para a avaliação da habilidade do WRF com base nos dados monitorados nas Torres A, B, C e D foram o viés (eq. 4.5), erro absoluto médio (EAM) (eq. 4.6), fator de excedência (FOEX) (eq. 4.7), raiz do erro quadrático centrado na média (eq. 4.8), desvio padrão (eq. 4.9) e coeficiente de correlação (eq. 4.10), conforme também aplicado para validação de modelos por Hanna e Yang (2001), Jimenez e Dudhia (2013), Zhang et. al. (2013) e Paiva et al. (2014). Os valores correspondentes a estas métricas estão dispostos tanto em tabelas e graficamente através do diagrama de Taylor.

O diagrama de Taylor (Taylor, 2001) consiste em um gráfico que pode ser utilizado para comparar diferentes dados de previsão com um conjunto de dados de referência através das métricas estatísticas raiz do erro quadrático centrado na média, desvio padrão e coeficiente de correlação. Este gráfico é teorizado com base na lei dos cossenos e possui três coordenadas que correspondem às três métricas estatísticas calculadas. A visualização de cada conjunto de dados é dada por um ponto posicionado de acordo com os valores de correlação, desvio padrão e raiz do erro quadrático centrado na média. Assim, é possível avaliar a habilidade de previsão de cada conjunto visualmente admitindo que quanto mais próximo os pontos correspondentes a previsão se posicionarem em relação ao ponto de referência, maior a similaridade entre estas séries de dados.

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_i P_i - O_i \quad (4.5)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_i |P_i - O_i| \quad (4.6)$$

$$FOEX = \left[\frac{N_{(P_i > O_i)}}{N} - 0,5 \right] \times 100 \quad (4.7)$$

$$CRMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i ((P_i - \bar{P}) - (O_i - \bar{O}))^2} \quad (4.8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (O_i - \bar{O})^2} \quad (4.9)$$

$$COR = \frac{Cov(P, O)}{\sigma_P \cdot \sigma_O} \quad (4.10)$$

Os dados das torres meteorológicas da CNAAB foram utilizados para avaliar o desempenho do modelo na representação do vento. Para tal comparativo elegeu-se como ponto mais representativo de cada torre, o ponto de grade mais próximo da localização real da torre que cumpriu a duas condições básicas:

- 1- Ter neste ponto como valor da variável elevação do terreno (HGT) deveria ser o mais próximo possível do real.
- 2- Este ponto de grade deveria estar localizado sobre o continente, de acordo com a máscara de classificação terra-mar (LANDMASK).

A figura 21 apresenta o comparativo entre o posicionamento das torres (círculo) e os pontos de grade eleitos como representativos (estrelas). A tabela 10 o comparativo entre a elevação onde está instalada cada torre e os valores da variável elevação do terreno para cada torre em cada um dos quatro experimentos.

Tabela 10: Valor da elevação do terreno no local de instalação de cada torre e no ponto de grade atribuído para cada torre.

Torre	Elevação do Terreno (m)
-------	-------------------------

	Altura na torre	G1 - GMTED2010	G2 - GMTED2010	G2 - ASTER	G2 - SRTM
A	50	104,61	55,78	63,58	65,28
B	10	25,4	16,3	9,92	10,31
C	80	65,13	41,97	38,37	37,48
D	290	91,33	132,56	172,04	170,93

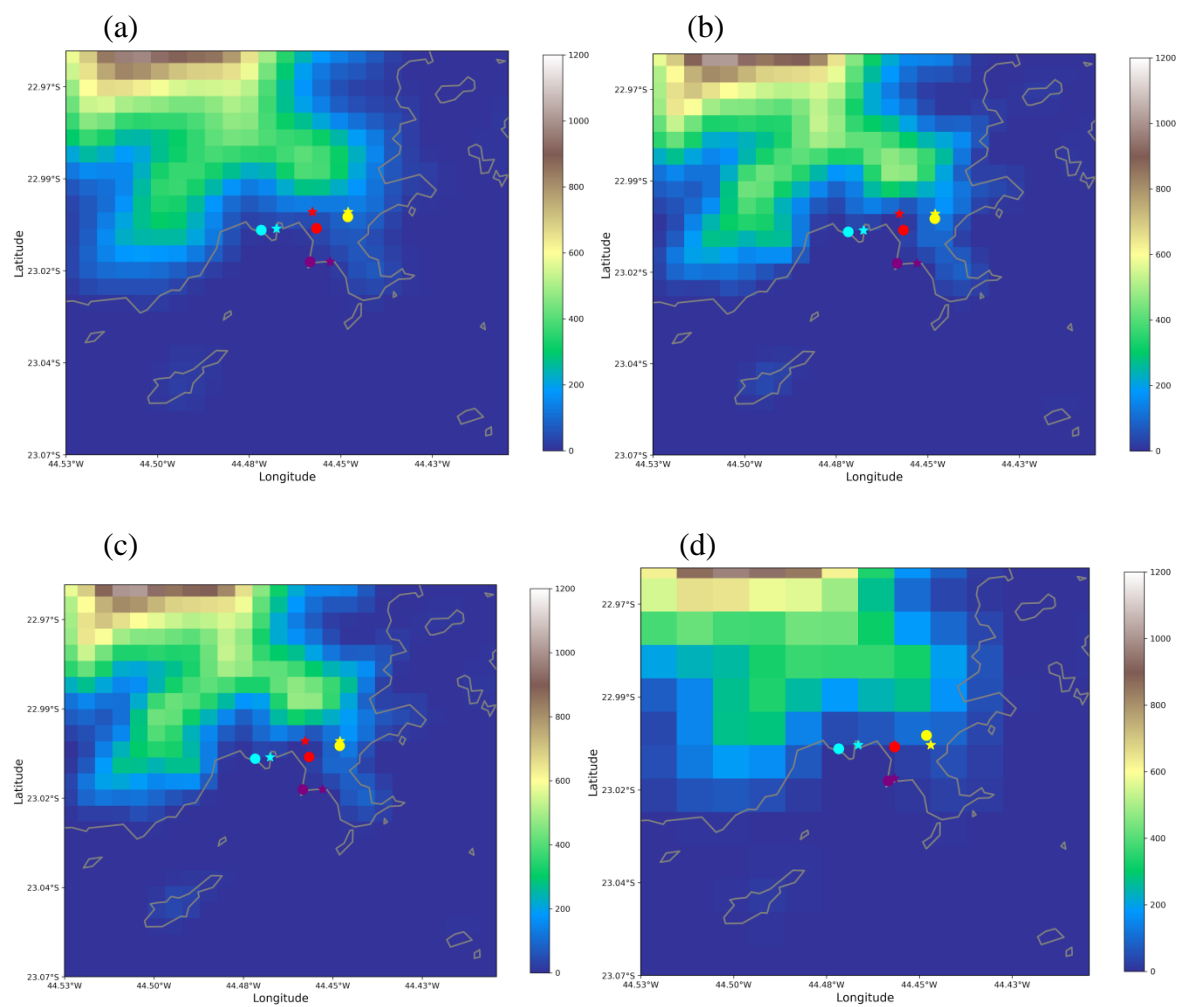


Figura 21: Localização geográfica (círculo) das torres A (vermelho), B (roxo), C (azul cyan) e D (amarelo) e ponto de grades correspondentes (estrelas). (a) G2 - GMTED2010, (b) G2 - ASTER (c) G2 - SRTM e (d) G1 - GMTED2010.

A simulação da região de estudo com o modelo regional será realizada utilizando o supercomputador Lobo Carneiro instalado na sede do Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE/COPPE). Este cluster apresenta uma arquitetura computacional voltada para computação de alto desempenho, que viabilizou a realização do estudo dentro do prazo para a defesa de dissertação. As configurações do computador Lobo Carneiro estão disponíveis em: <https://portal.nacad.ufrj.br/recurso-icex.html>

4.6 Análise visual dos efeitos de sombreamento

Uma breve avaliação da disposição das sombras sobre as encostas no entorno da CNAAA foi realizada através da plataforma desenvolvida pela Google chamado Google Earth Engine. Esta plataforma foi desenvolvida para realização de análises geoespaciais em escala planetária visando aplicações que se estendem de estudos socioambientais (Gorelick et al., 2017).

A atual versão disponível do Google Earth Pro possui uma ferramenta chamada Luz Solar (Figura 22), a partir da qual é possível acompanhar o ciclo diurno da insolação em um determinado ponto do globo e em uma determinada época do ano. Este recurso possui uma interface simplificada, permitindo ao usuário investigar os efeitos do sombreamento na região de análise, associadas a construções e terrenos montanhosos em um campo tridimensional. Essa análise permite avaliar o aquecimento e resfriamento radiativo na área florestada e de topografia acidentada no entorno da CNAAA.

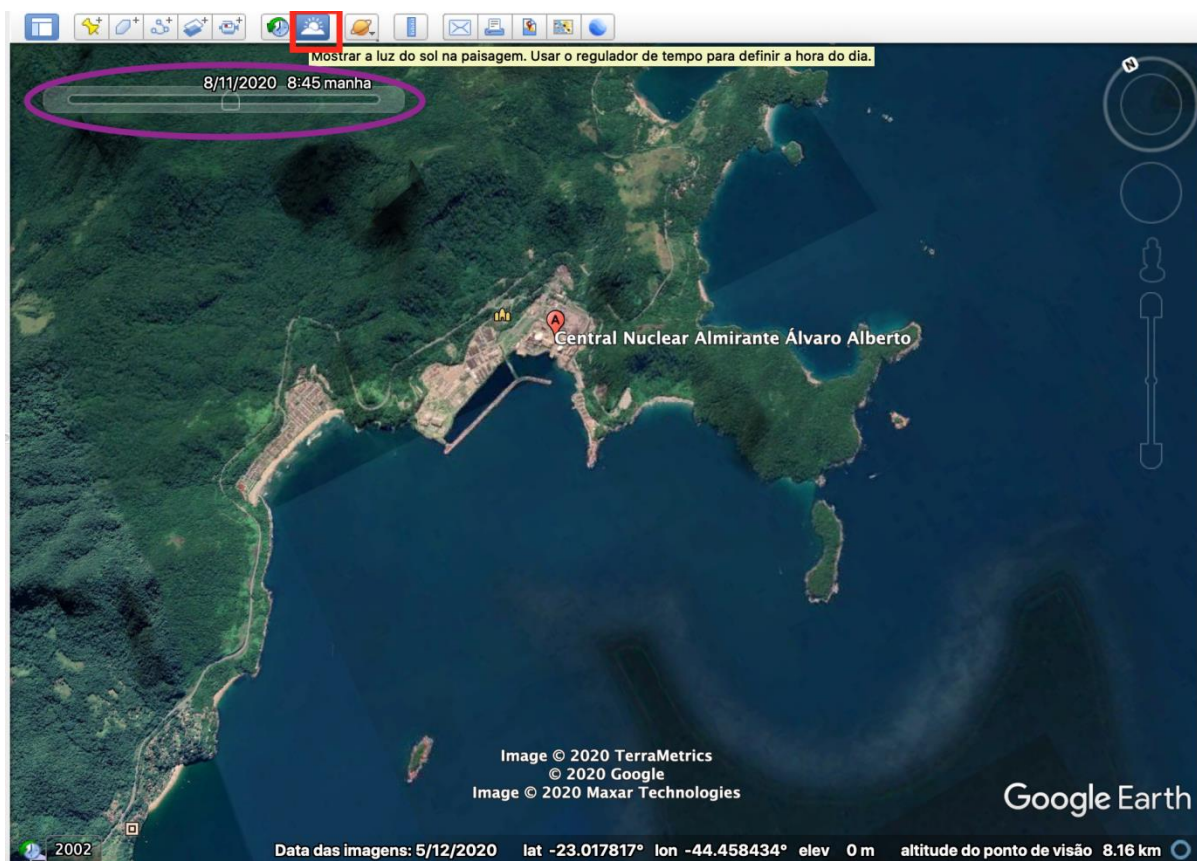


Figura 22: Visualização aérea da CNAAA através da Plataforma Google Earth Pro. O recurso Luz Solar está sinalizado através do retângulo vermelho sinalizado pelo retângulo vermelho. A região demarcada pela elipse roxa corresponde a barra de opções do recurso Luz Solar.

Capítulo 5

5 Resultados: Dados Observados

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a análise observacional dos dados de vento e estabilidade atmosférica das torres meteorológicas da CNAAA. Além disso, é apresentada uma análise do padrão de sombreamento nas encostas do entorno da CNAAA.

5.1 Caracterização da circulação local

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o regime diurno climatológico nas torres da CNAAA.

A composição total dos ventos para a torre A10m (figura 23e) apresentou uma predominância dos setores N, NE SO e SSO. Observou-se durante a madrugada a ocorrência de uma destacada predominância do setor N (54%), seguida da direção NNE (18%), com ventos entre 1 a 3m/s. Provavelmente, a primeira predominância está relacionada à forçante térmica associada ao processo de resfriamento da cadeia montanhosa, originando o vento catabático. A segunda predominância, além da influência da forçante térmica local, pode estar associada com uma contribuição do escoamento sinótico da ASAS que induz ventos do setor NE na Região Sudeste do Brasil (Dereczynski e Menezes, 2015).

Com a evolução do ciclo diário, no período da manhã, verifica-se ainda a permanência da direção N (20%) e NNE (12%) em combinação com as direções SSO (18%) e SO (12%), com ventos entre 1 – 3 m/s. Esse padrão registrado pela manhã aponta para um período de transição onde ocorre o acoplamento entre o escoamento atmosférico do setor Norte – Nordeste associado ao vento catabático e a atuação do SAP e a formação da brisa marítima, com vento do setor SO. No período da tarde evidencia-se a predominância da brisa marítima com vento do setor SSO (em torno de 30%) e SO (20%) e um ligeiro aumento na intensidade do vento, atingindo cerca de 4 m/s. A noite nota-se novamente o aumento da frequência do setor norte com intensidade inferior a 3 m/s.

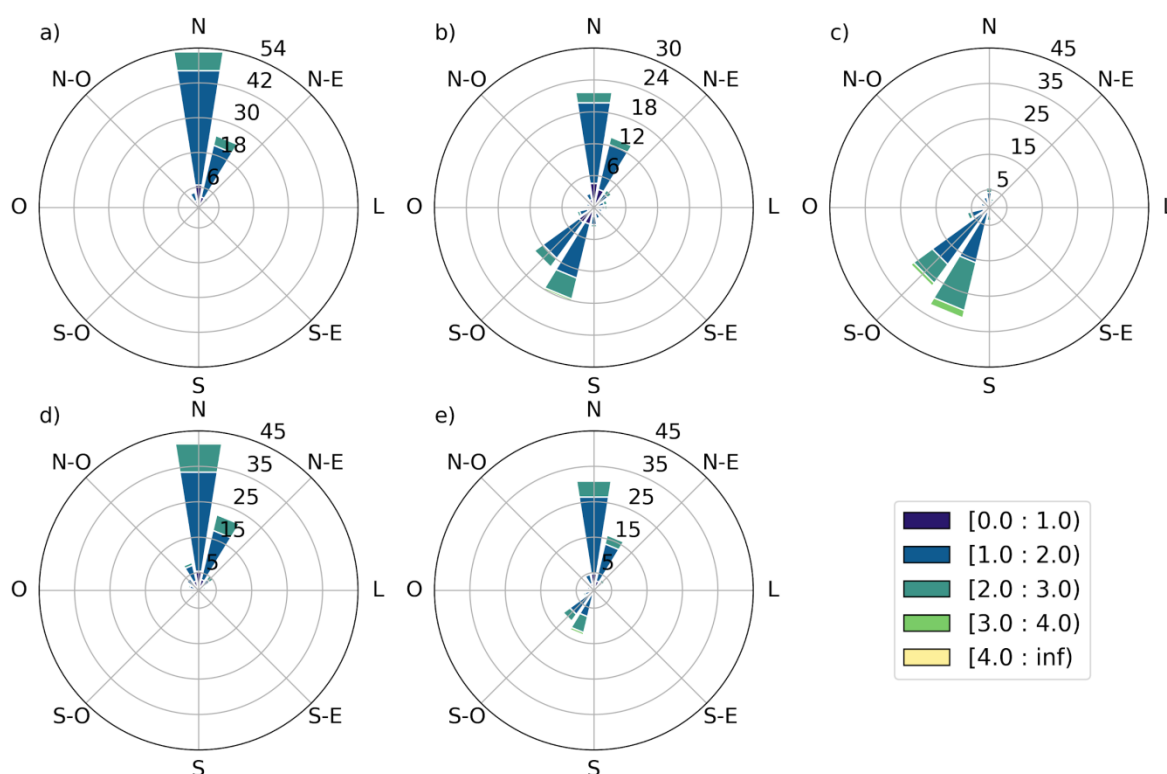


Figura 23: Distribuição de frequência dos ventos para a torre A - 10m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.

Nos níveis de 60m e 100m referente a torre A o regime de vento é similar, como destacado nas figuras 24 e 25. No período da noite e madrugada o escoamento é caracterizado por uma maior predominância de ventos de NE, seguido por uma segunda predominância de ventos de O e OSO, com intensidade entre 1 – 3 m/s. A partir do período da manhã e ao longo da tarde, há uma maior predominância de SO, seguido por SSO e OSO, com intensidade ligeiramente superior ao período da noite e madrugada. Deve-se destacar nesses níveis de altura (60 metros e 100 metros) que a principal diferença para o nível de 10 m é a ocorrência de vento do setor oeste com as direções O/OSO presentes nos períodos da madrugada, manhã e noite, enquanto no nível mais próximo à superfície tais direções não são registradas com tal frequência. Além disso, os ventos em A60m e A100m diferem do padrão na superfície por apresentarem maiores predominâncias no setor norte de ventos de NE/NEE, enquanto em A10m predominam neste setor ventos de N/NE.

A influência direta do escoamento sinótico nas predominâncias de O/OSO foi descartada em Oliveira Júnior (2008) através da comparação com o escoamento predominante

na altura de 1500m na Reanálise - NCEP. Enquanto a contribuição da componente de leste foi atribuída a atuação da ASAS e interações deste escoamento com a topografia.

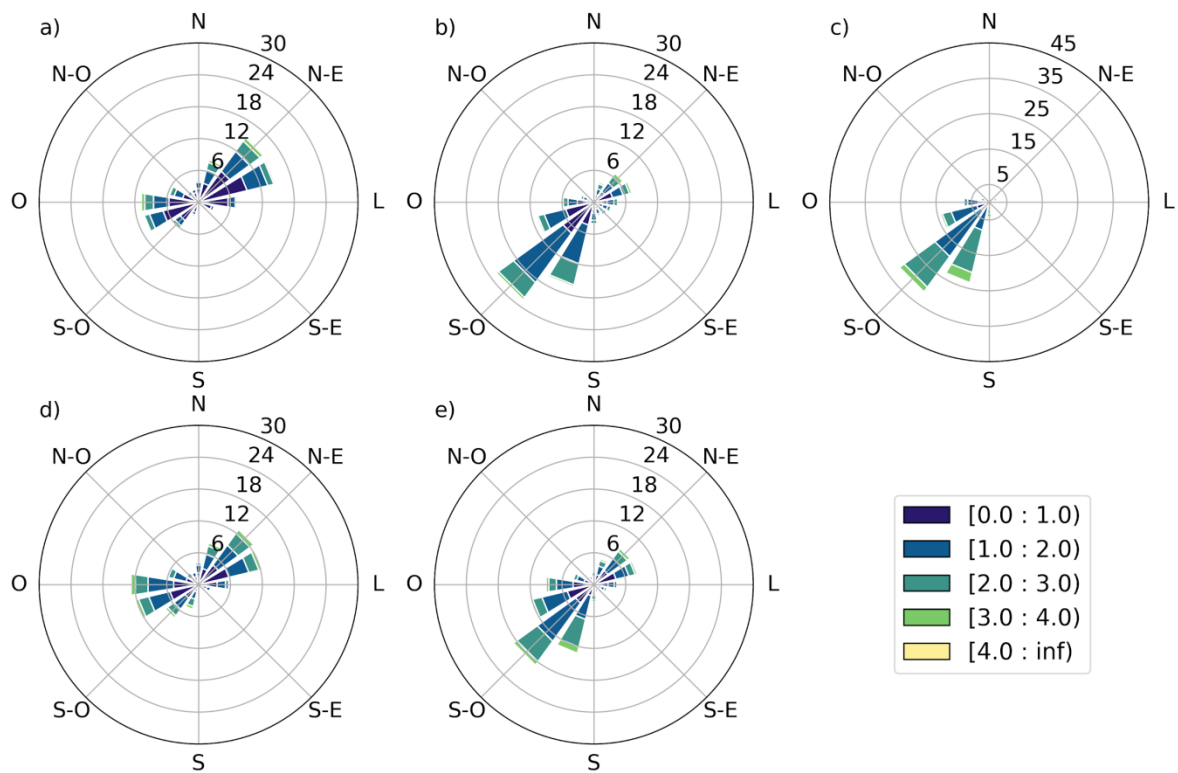


Figura 24: Distribuição de frequência dos ventos para a torre A - 60m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.

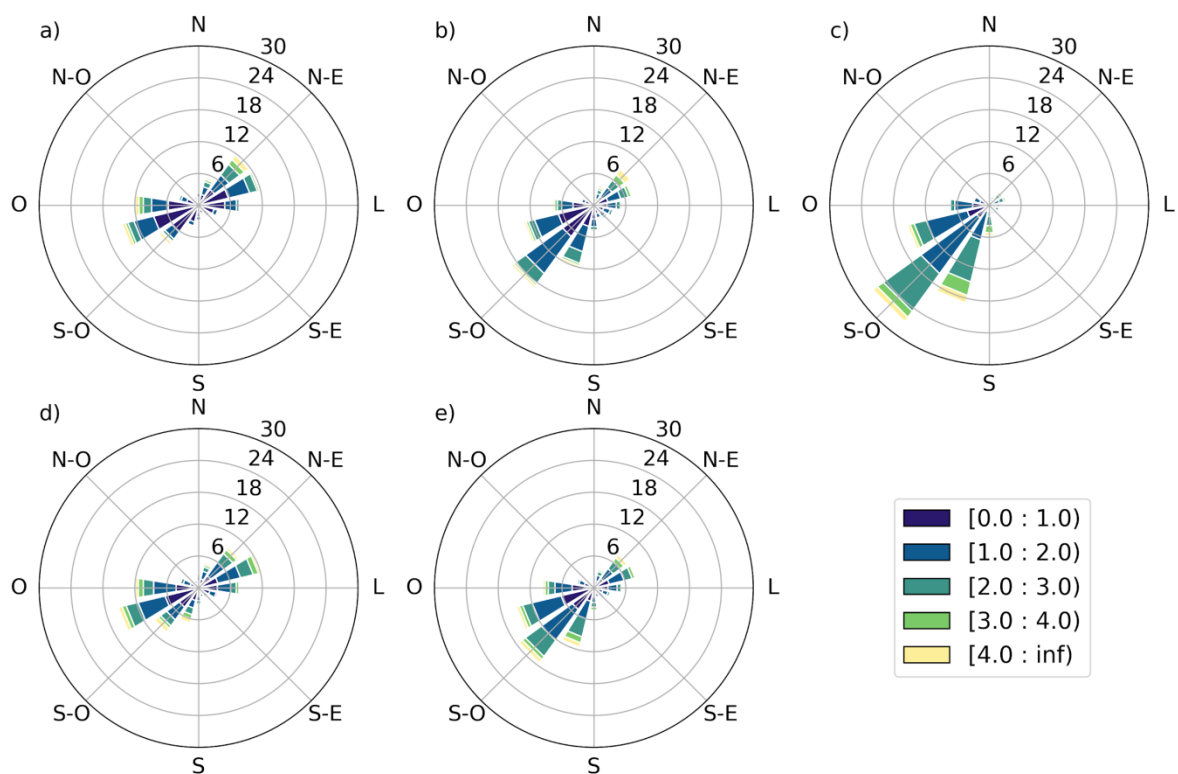


Figura 25: Distribuição de frequência dos ventos para a torre A - 100m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.

Na torre B15m (figura 26) observa-se um escoamento com padrão de direção distribuído em todos os setores com frequências ligeiramente maiores em N e S. Nos períodos da noite e madrugada há uma maior frequência de ventos do setor norte, com um pico em N. Enquanto período da manhã as direções predominantes estão nos setores N e S. As maiores intensidades do vento ocorrem no período da tarde, com intensidade da ordem de 4 m/s e predominância de direção do setor S. Na torre C15m (figura 27) também há uma distribuição do vento em todas as direções, com um ligeiro destaque nas direções NNO, L e SSE no período da noite e madrugada. No período da manhã observa-se a predominância do setor NNO, L e SSE. Nota-se nestes dois pontos um padrão de escoamento similar com o observado na torre A10m, com predominância de ventos fracos de N no período da madrugada, associados ao vento catabático. Em seguida, nos períodos da manhã e à tarde, há uma diminuição da frequência de ocorrência do setor N e o progressivo aumento da direção e S e SE nas Torres B e C, respectivamente, indicando o giro do vento e o início da atuação da componente de brisa marítima. A hipótese acerca da contribuição da forçante térmica no escoamento das torres A10m, B15m e C15m, defendida em estudos anteriores (Nicolli, 1981; Oliveira Junior, 2008; Figueiredo, 2016), pode ser reforçada com a análise do ciclo diurno do escoamento nas rosas dos ventos com a figura de topografia (figura 15) e pelos picos de energia na escala diurna das ondeletas das componentes meridionais destes 3 pontos (seção 5.2). Vale ressaltar, que além das circulações de brisa outros fatores contribuem para a variação do escoamento em B15m e C15m.

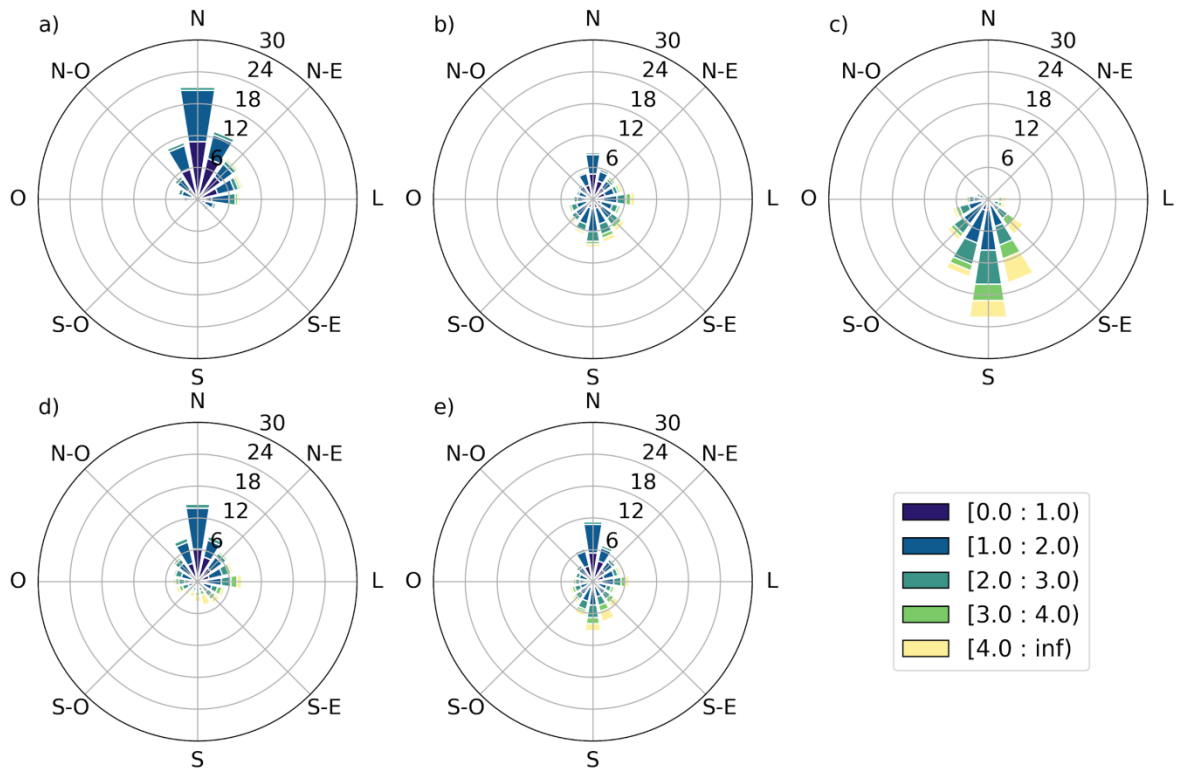


Figura 26: Distribuição de frequência dos ventos para a torre B - 15m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.

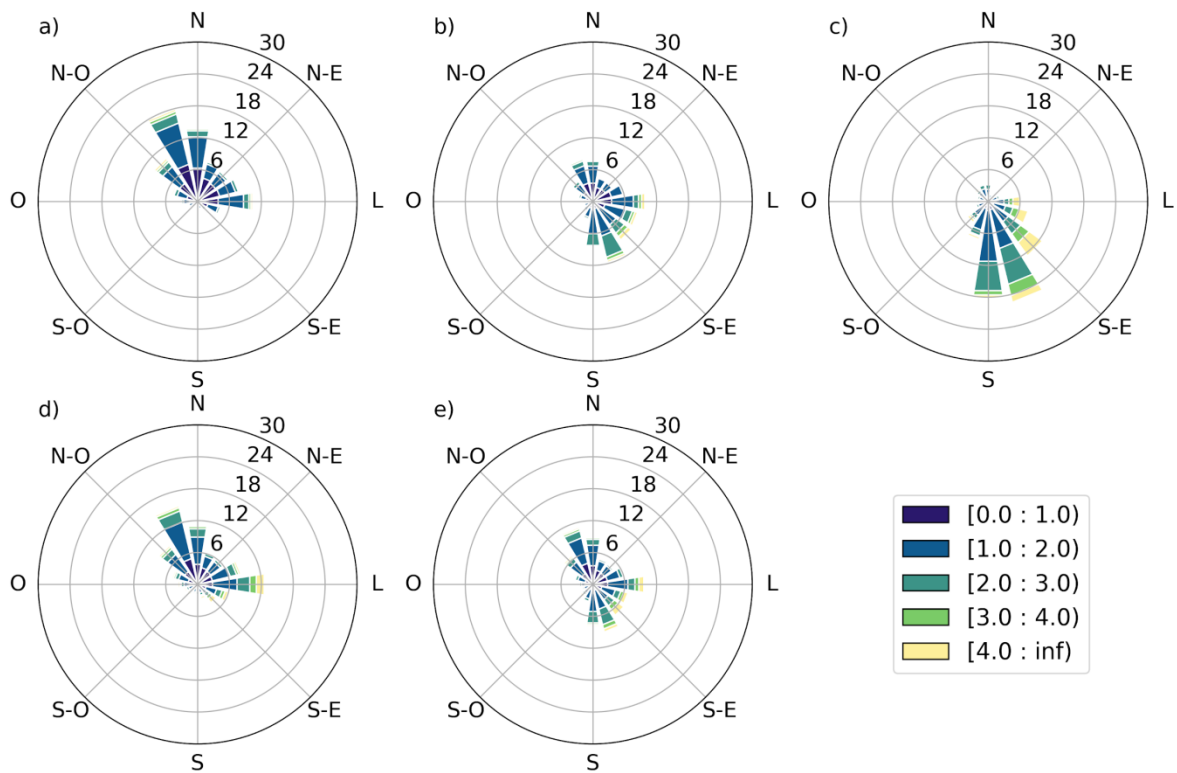


Figura 27: Distribuição de frequência dos ventos para a torre C - 15m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.

A torre D15m (figura 28) possui um padrão total de vento caracterizado pelas direções oeste (O) e nordeste (NE), com velocidades que chegam a ultrapassar 4 m.s-1. Nos períodos da madrugada e noite a predominância da direção é de O e N/NE. Com a evolução diurna nota-se um aumento gradativo da frequência de ocorrência do vento de O e diminuição nas frequências de N/NE, resultando na predominância de ventos de oeste (ONO, O e OSO) entre 12 e 18 horas. Estas direções foram atribuídas por Oliveira Júnior (2008) a combinação entre efeitos de mesoescala, sinóticas e locais. Assim, atribui-se ao escoamento de montanha a predominância de NE durante os períodos da madrugada, manhã e noite, enquanto para a direção predominante de SSO durante a manhã e tarde há uma contribuição escoamento da brisa marítima.

A direção O aparece em todos os períodos, no entanto, a ocorrência desta componente experimenta um aumento significativo no período de maior aquecimento (tarde). Esta observação indica a possibilidade de diversos mecanismos forçantes induzirem direção o escoamento de direção O neste ponto. Assim como apontado no caso dos pontos A60m e a A100m o escoamento de O em D15m pode estar associado a contribuição do escoamento entre as encostas (seção 5.3) e interação do escoamento com as barreiras topográficas, como, por exemplo, a possibilidade de uma canalização forçada pelo terreno (Whiteman e Doran, 1993). Além disso, devido ao posicionamento deste ponto a 305m de altitude, deve-se considerar um possível giro com a altura da direção predominante gerada pelas células de circulação termicamente induzidas. Isto poderia explicar uma possível contribuição para a predominância de O/OSO no horário da tarde (brisa marítima) na torre D15m, enquanto nos demais pontos, a brisa marítima é atribuída, em geral, às direções de SO, SSO e S. Assim, pode-se dizer que comportamento bimodal da direção do vento na Torre D15m, que sofre pouca influência no padrão NE/O ao longo do ciclo diurno, é influenciado pela combinação de mecanismos térmicos e dinâmicos que afetam o regime de vento no ponto.

Vale ressaltar que as rosas dos ventos de todos os pontos (Figs. 23 a 28) apresentam registros de direções do vento entre NNE e E. Além da contribuição de fatores locais (processos de canalização e circulações de brisa) citadas anteriormente, tais direções também podem estar associadas a uma eventual contribuição do ASAS, que induz ventos dentro do primeiro quadrante no estado do Rio de Janeiro (Dereczynski e Menezes, 2015; Dragaud et al., 2018).

A contribuição de fatores locais nas diferentes direções predominantes da CNAAA e a heterogeneidade dos padrões de circulação observados entre os pontos foram apontados em

estudos anteriores para a região (Nicolli, 1981; Oliveira-Junior, 2008, Figueiredo, 2016). Em tempo, vale ressaltar que os padrões de ciclo diurno descritos para todos os pontos acima através dos dados de 1982-2001, também são observados nos dados do ano de 2016 (Anexo I).

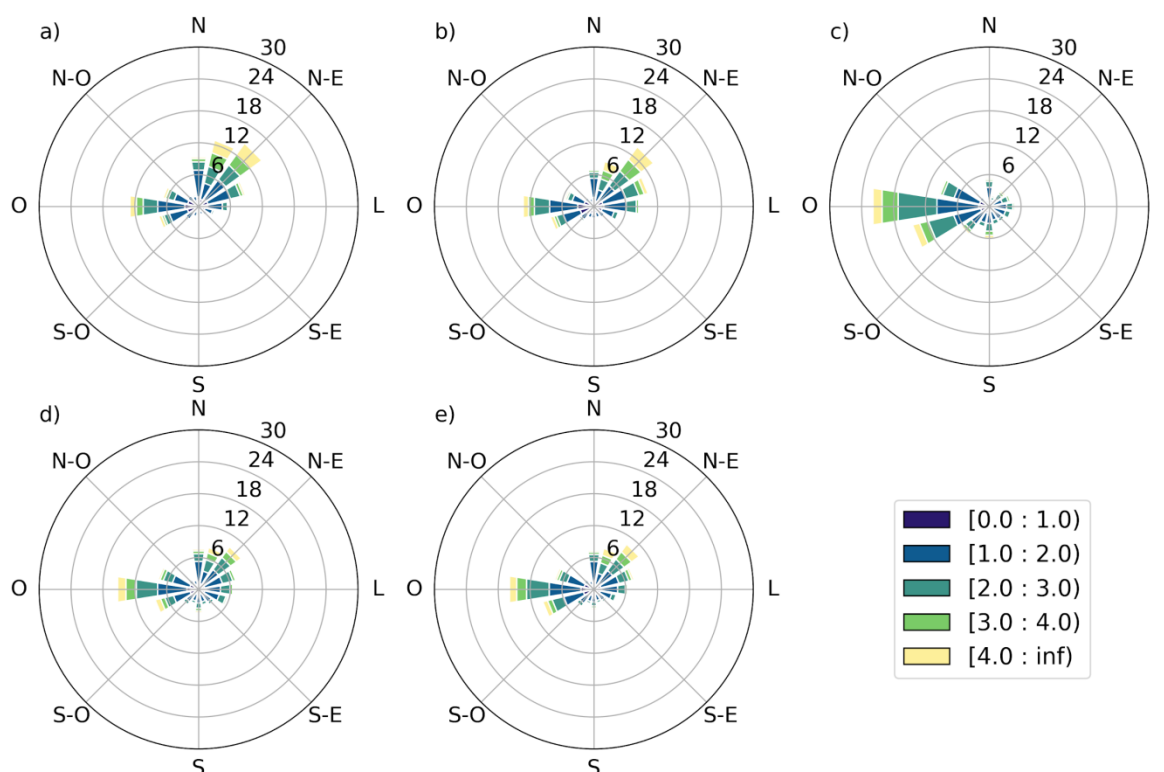


Figura 28: Distribuição de frequência dos ventos para a torre D - 15m, referentes a: (a) madrugada, (b) manhã, (c) tarde, (d) noite e (e) composição total.

Na Tabela 11 estão dispostos os percentuais de calmaria nos seis pontos considerados. Em relação ao percentual total, a torre A60m apresenta o maior percentual de calmaria com um total de 12,58%, seguido pela A100m com 11,86%. Por outro lado, o nível mais baixo da torre A (A10m) apresenta um menor percentual de calmaria (4,07%) em relação aos níveis 60m e 100m. Tais percentuais indicam que apesar do escoamento resultante ser predominantemente fraco ($<2\text{m/s}$), o padrão persistente do vento catabático tem grande importância nos menores registros de calmaria próximo à superfície.

Em relação ao ciclo diurno, os maiores percentuais de calmaria ocorrem durante a madrugada, exceto em A10m e D15m em que o maior percentual de calmaria ocorre durante a manhã. Neste período os pontos A60m e A100m apresentam novamente os maiores percentuais

com 24,24% e 20,26%, respectivamente. De maneira geral, o percentual de calmaria apresenta maiores valores durante a madrugada, diminui significativamente com os menores valores no período da tarde e aumento gradativo no período da noite.

Tabela 11: Percentual (%) de calmaria das torres meteorológicas da CNAAA com respectivos períodos (madrugada, manhã, tarde e noite) e o total.

Torre meteorológica / nível da medição	Madrugada (%)	Manhã (%)	Tarde (%)	Noite (%)	Total (%)
A10m	3,41	6,97	2,73	3,35	4,07
A60m	24,24	13,46	3,34	14,74	12,58
A100m	20,26	13,78	4,15	12,89	11,86
B15m	8,75	6,97	1,95	5,99	5,84
C15m	9,36	6,87	2,92	6,49	6,32
D15m	5,39	5,56	2,87	3,88	4,41

A Figura 29 ilustra a distribuição horária das intensidades do vento para cada um dos 6 pontos nas torres meteorológicas da CNAAA via boxplot. De forma geral, todos os pontos e horários possuem a mediana das distribuições menor que 2 m.s^{-1} ao longo do dia e em pelo menos 75% dos registros (3º quartil) os valores de intensidade abaixo de 3 m.s^{-1} . Além disso, destaca-se a diferença na velocidade média registrada ao longo do dia. Nos períodos da madrugada e início da manhã registram-se os menores valores de velocidade nas torres A (10m, 60m e 100m), B15m e C15m, a exceção foi a torre D15m. Nota-se também em A60m, A100m, B15m, C15m através da mediana dos dados que há uma distribuição assimétrica dos registros, indicando e apesar dos dados haver registros acima de 3 m/s nestes pontos, metade dos registros estão aproximadamente abaixo de 1 m/s . Ainda em A100m, B15m e C15m há uma menor visível uma menor variabilidade nos valores encontrados entre o percentil 25 e o percentil 75.

A partir das 07h, as velocidades começam a se intensificar até o meio da tarde. Atribui-se este aumento nas velocidades à circulação da brisa marítima, e devido ao posicionamento na interseção entre a superfície continental e a superfície marítima, as torres B15m e C15m apresentaram as maiores velocidades médias (2.4 m.s^{-1} e 2 m.s^{-1} , respectivamente) no período da tarde. Após este período as velocidades registradas passam a apresentar um decréscimo ao longo da noite e madrugada, quando o escoamento nestes pontos possui grande contribuição dos ventos de encosta.

A distribuição dos dados às 8h em A10m indica que há uma maior proporção de ventos abaixo de 1m/s neste horário em comparação aos demais horários do dia. Este resultado corrobora com a tabela 11, que aponta uma maior incidência de calmaria em A10m no período da manhã. Esta maior frequência de ventos ainda mais fracos no início da manhã, com uma gradual elevação nos registros a partir das 9h está possivelmente relacionada com o processo de desintensificação da brisa de encosta no início da manhã e processo de formação e intensificação da brisa marítima ao longo da manhã.

Na torre D15m há pouca alteração na velocidade do vento dentro do ciclo diurno. Esse comportamento distinto em relação ao observado nas demais torres podem ser devido à altura onde está posicionado o sensor (305m), onde os ventos tendem a ser mais intensos devido ao menor atrito com a superfície. Os resultados de calmaria e velocidade média corroboram com o descrito por Nicolli (1982) e Oliveira Júnior (2008), onde foi observada a predominância de ventos mais fracos durante a noite, com uma ligeira aceleração do vento e menores percentuais de calmaria durante o dia. Segundo Oliveira Júnior (2008) a predominância dos regimes de calmaria e ventos fracos deve-se a influência da topografia local que atua como uma barreira ao escoamento na região.

Os valores de ventos mais intensos que foram indicados pelo boxplot como outliers. Estes valores de vento mais intensos podem estar associados a atuação de outros sistemas, como sistemas frontais, ciclones ou, tempestades locais que geram ventos intensos sobre a região (Brito et al., 2017). Destaca-se que os valores máximos registrados são de aproximadamente 30m/s (108km/h) e correspondem a ventos muito fortes, com potencial para danos em vegetações e alguns tipos de construções (WMO, 2014). Ventos desta magnitude são raros na série de dados e são menos intensos que os observados em eventos de furacão. Por outro lado, destaca-se a predominância de ventos fracos, o que é excepcionalmente preocupante no contexto de segurança nuclear por corresponder a um cenário pouco efetivo para a dispersão de poluentes.

A análise sazonal também mostrou a predominância de ventos de baixa intensidade em todos os meses do ano, com distribuição mediana inferior a 2 m.s-1 (Fig. 30). Destacam-se os pontos A-10m e D-15m, onde não houve variação sazonal evidente (Fig. 30a, f). Nos demais pontos, nota-se através da variação mensal da mediana e do 3º quartil, que a velocidade do vento tem uma distribuição nos dados mais concentrada em ventos menos intensos durante o inverno e uma maior ocorrência de valores de ventos mais intensos em o verão e a primavera (Fig. 30b-e). Pode-se atribuir a esse padrão sazonal à variabilidade ao no número de horas

diárias longo do ano, que está diretamente associada a quantidade de horas sob o regime de circulação da brisa do marítima.

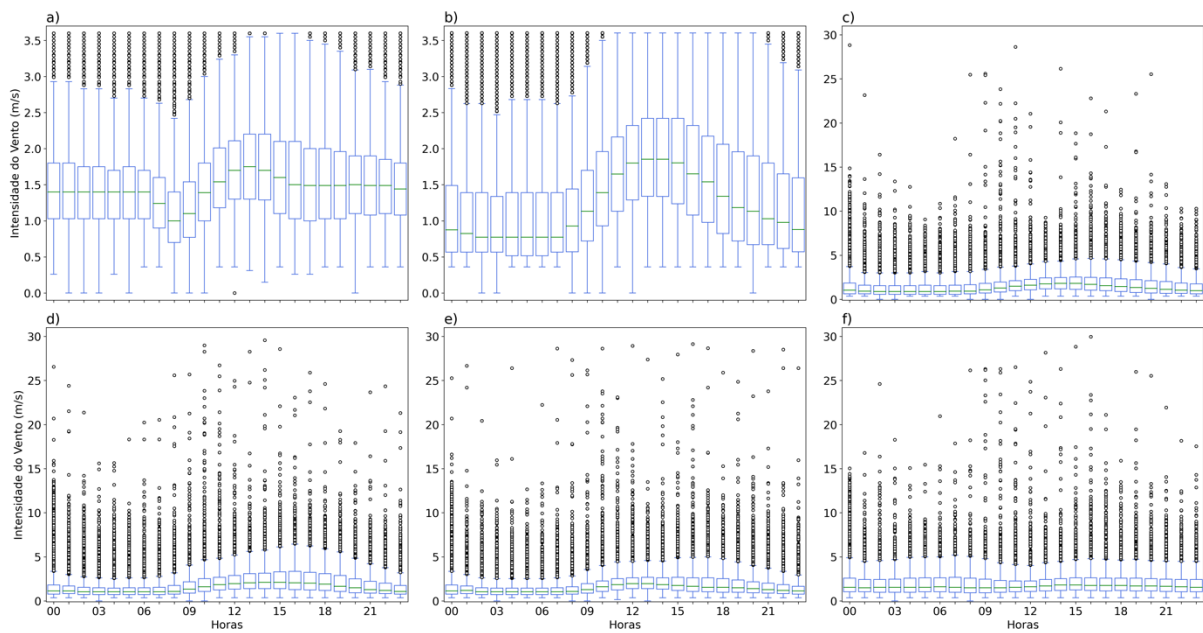


Figura 29: Boxplot da velocidade média horária (m.s-1) para as torres meteorológicas (a) A10m, (b) A60m, (c) A100m, (d) B15m, (e) C15m e (f) D15m para o período de 1982 à 2001.

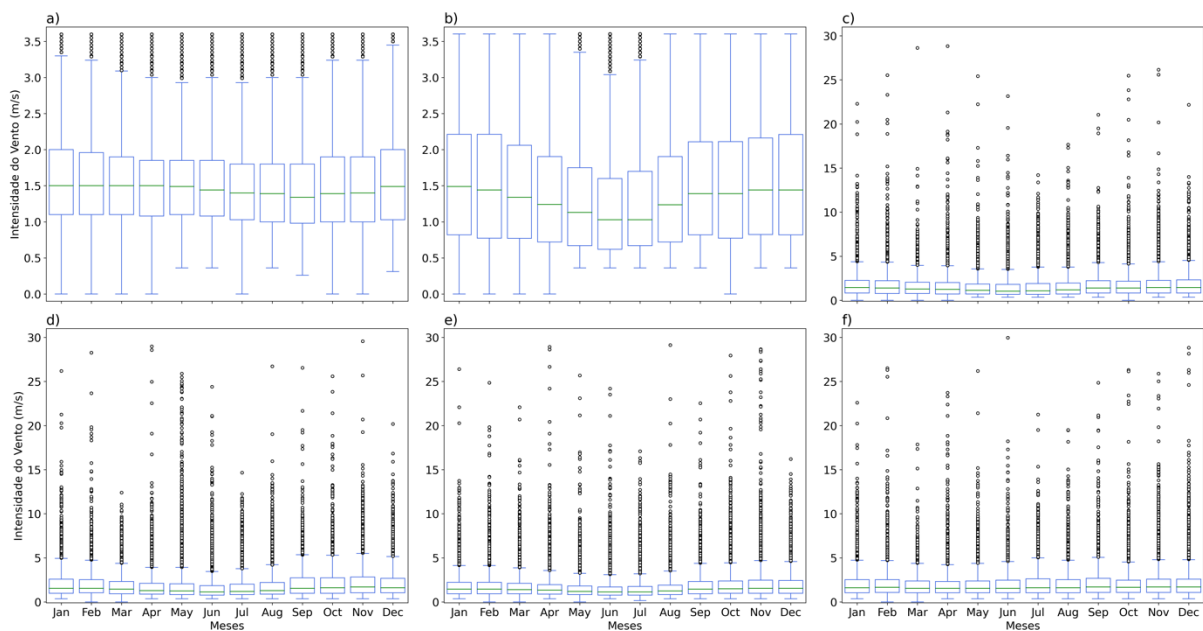


Figura 30: Boxplot da velocidade média mensal (m.s-1) para as torres meteorológicas (a) A10m, (b) A60m, (c) A100m, (d) B15m, (e) C15m e (f) D15m para o período de 1982 à 2001.

5.2 Espectros de ondeleta

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise de ondeletas para as torres dispostas na CNAAA. Os resultados estão dispostos em gráficos de espectros de potência de ondeleta (ondeletas contínuas e espectro global) para as componentes zonal e meridional do vento.

Nota-se nos resultados correspondentes a todas as torres (figuras 31 à 36) a presença de sinais marcantes de potência com nível de 95% de confiança estatística na escala de 1 dia em todas as alturas. Esse sinal está provavelmente relacionado com a atuação das circulações termicamente induzidas de montanha e marítima-terrestre na região. Conforme observado em Guimarães (2014) para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Tal resultado reforça a discussão apresentada na seção 5.1 em relação influência da forçante térmica nas direções predominantes do vento. A partir dos espectros de ondeleta contínua também verifica-se que o nível 95% de confiança estatística e a potência associada aos sinais com período diurno não são constantes. Ao longo do ano são observados momentos com intensificação do sinal, indicando períodos onde as circulações de brisa são intensificadas, e horários onde o sinal apresenta menor intensidade, evidenciando uma interrupção da circulação diurna por fenômenos atmosféricas em diferentes escalas (Guimarães, 2014).

Sinais com período semidiurno (0.5 dia) relacionados à maré atmosférica aparecem com confiança estatística em alguns horários do espectro contínuo de todas as torres. Contudo, a frequência de observações deste sinal com confiança estatística não é suficiente para este período apresentar confiança estatística no gráfico médio (espectro global) em alguns dos pontos analisados.

Em relação a torre A, os espectros de potência para o vento no nível de 10m (fig. 31) caracterizam-se por pouca (fig. 31b) ou nenhuma (fig. 31a) energia com confiança estatística com períodos entre 4 a 16 dias. No entanto, nota-se que nos níveis de 60m (fig. 32) e 100m (fig. 33) os sinais com confiança estatística na escala de tempo sinótica aumentam em relação ao nível mais baixo da torre A, especialmente na componente zonal. Este padrão pode estar relacionado com uma interação do escoamento sinótico predominante do ASAS com a topografia e com a passagem de sistemas transientes (sistemas frontais, ZCAS, ciclones, entre outros) pela cidade de Angra dos Reis conforme descrito por Oliveira Júnior (2008).

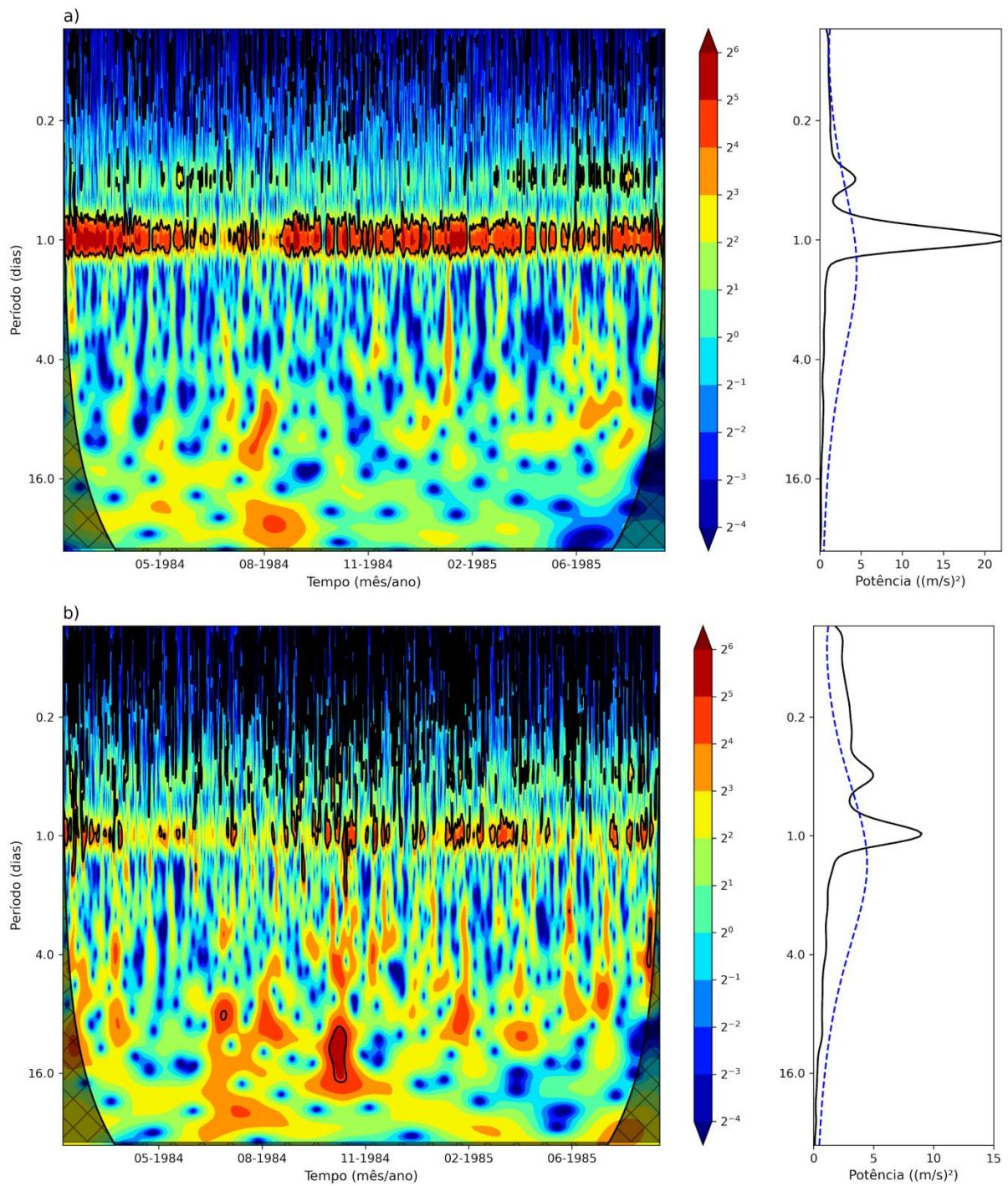


Figura 31: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em A10m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.

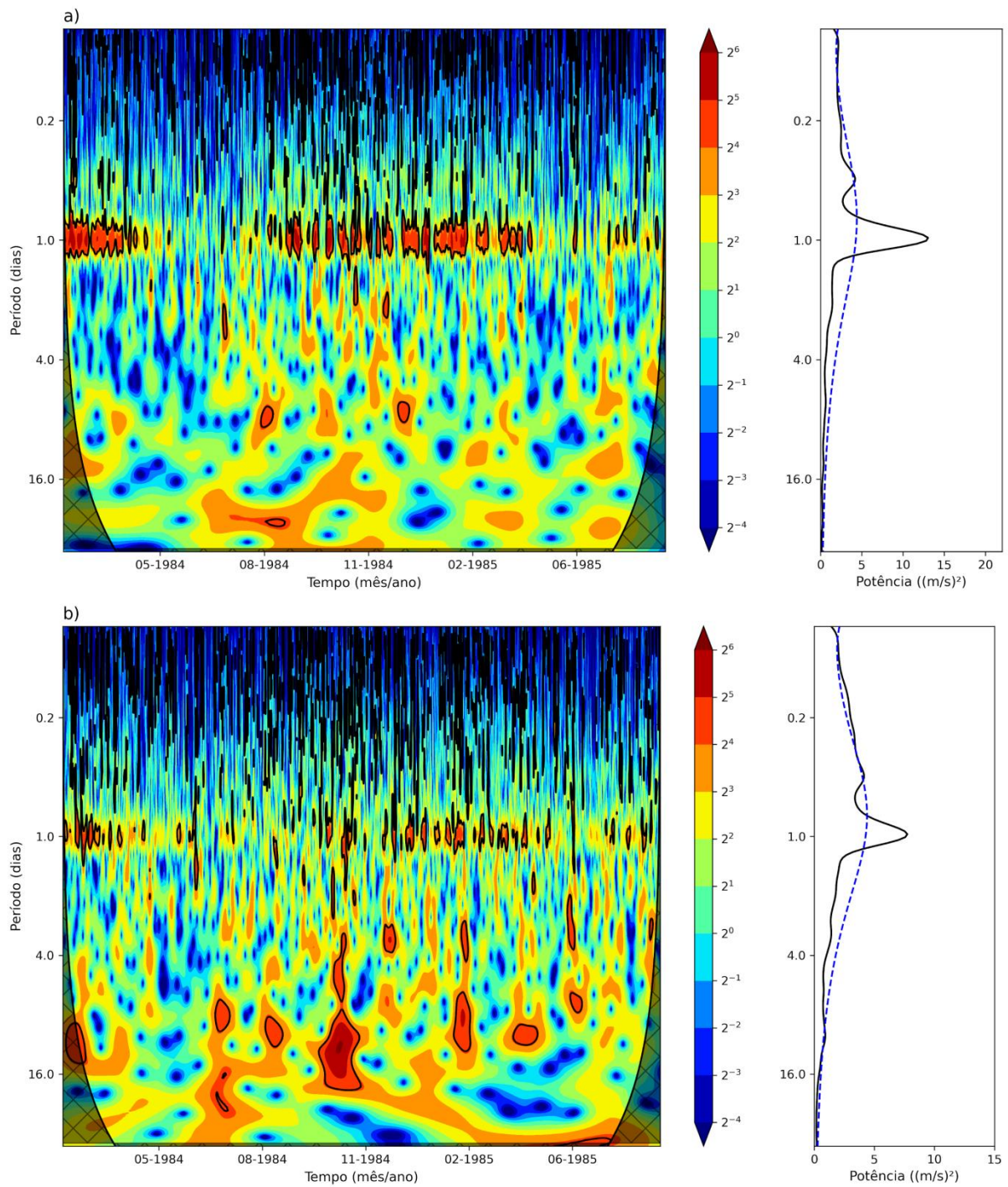


Figura 32: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em A60m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.

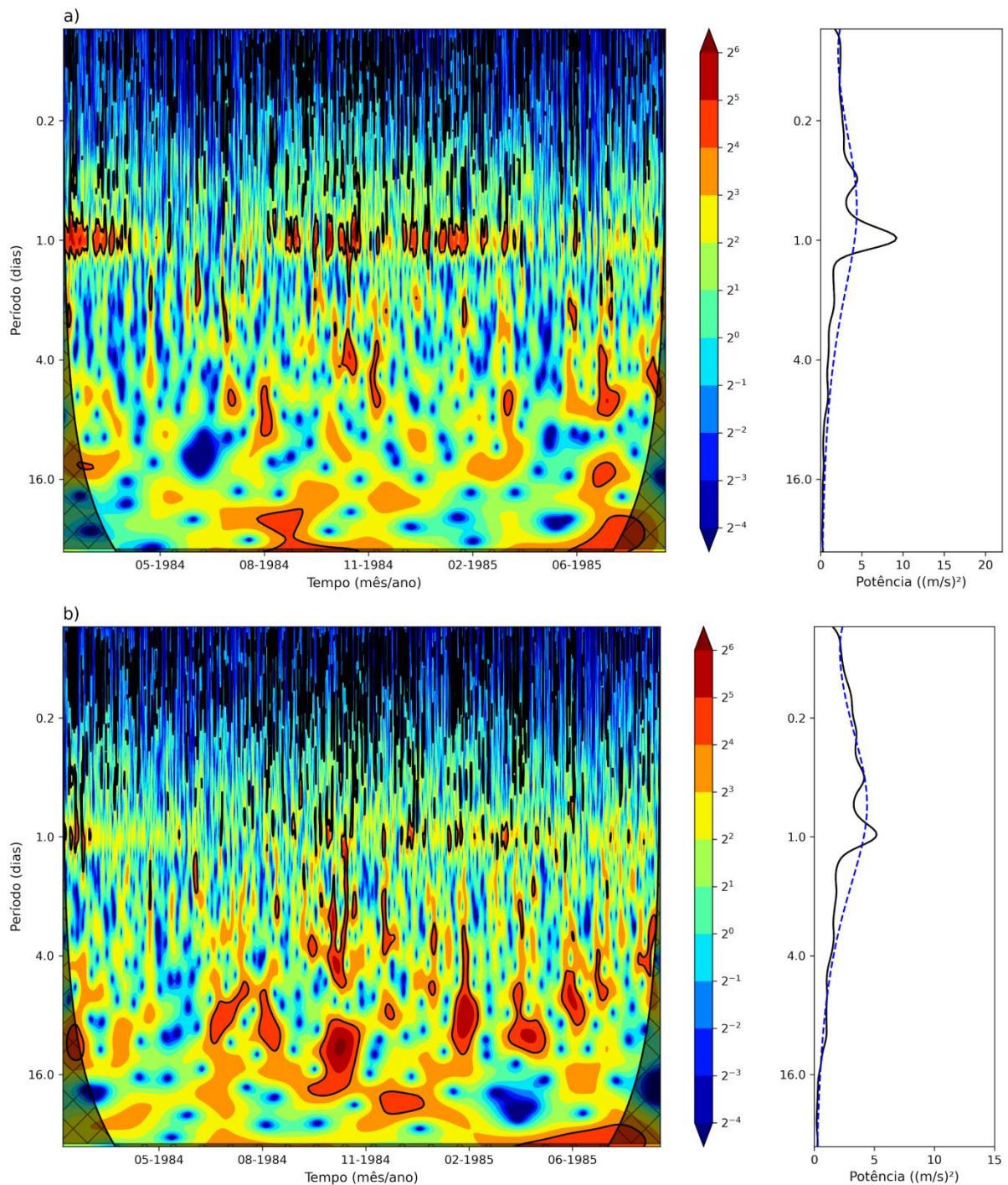


Figura 33: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional da componente (b) zonal do vento (m/s) em A100m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.

A componente zonal do vento da torre B15m destaca-se por apresentar um padrão diferente no espectro global em relação as demais variáveis. Na figura 34b, a curva apresenta um formato aproximado de um platô acima do limiar de confiança estatística de 95% ao longo dos períodos referentes a escala de horas. No entanto, no período de 1 dia, a variável não apresenta um pico característico do ciclo diurno conforme visto nos demais pontos. Tal padrão pode ser atribuído a grande variabilidade da componente zonal ao longo do dia em B15m, conforme visto na seção 5.1.

Os espectros contínuos das componentes zonal e meridional das torres B15m (Fig. 34) e C15m (Fig. 35) também apresentam sinais com confiança estatística para os períodos entre 4 a 16 dias. A respeito dos espectros globais destaca-se que o sinal nesses períodos apenas tangencia a linha de confiança.

A torre D15m (Fig. 36), assim como os resultados de distribuição de frequência dos ventos, os espectros de ondeleta apresentam um padrão diferente dos demais pontos. O espectro da componente meridional apresenta uma maior quantidade de interrupções do sinal associado ao ciclo diurno (95% de confiança) em relação as outras torres. Vale ressaltar que sinais com períodos entre 4 e 16 dias aparecem com confiança estatística nos espectros contínuo e global desta variável.

Assim como na Torre A, foram detectados sinais correspondentes a escala sinótica nos espectros de ondeleta das componentes zonais das Torres B15m, C15m e D15m. Tais sinais possivelmente estão associadas às modulações no eixo leste-oeste observadas na seção 1, que não que correspondem a variação esperada das circulações de brisa. Com isso, devido ao período de variação destes sinais entre 4 a 16 dias, acredita-se que estão relacionados com interrupção da circulação local causada atuação de sistemas em escala sinótica na região.

Vale ressaltar os padrões apresentados nos sinais com períodos de 2 horas a 6 horas em cada um dos pontos. Através do espectro contínuo, nota-se que em todos os pontos há sinais com confiança estatística entre estes períodos. No entanto, no espectro global de algumas variáveis este sinal apenas tangencia a linha de confiança estatística. Enquanto nas componentes u em A60m, A100m, B15m, C15m e D15m de nota-se a presença destes sinais acima da curva de confiança estatística. Esta energia pode estar associada com a atuação de circulações locais induzidas pela interação com a topografia conforme descrito em Whiteman (2000). Além disso, podem explicar as observações frequentes de ventos mais zonais nestes pontos, que não estão associados a uma forçante de brisa.

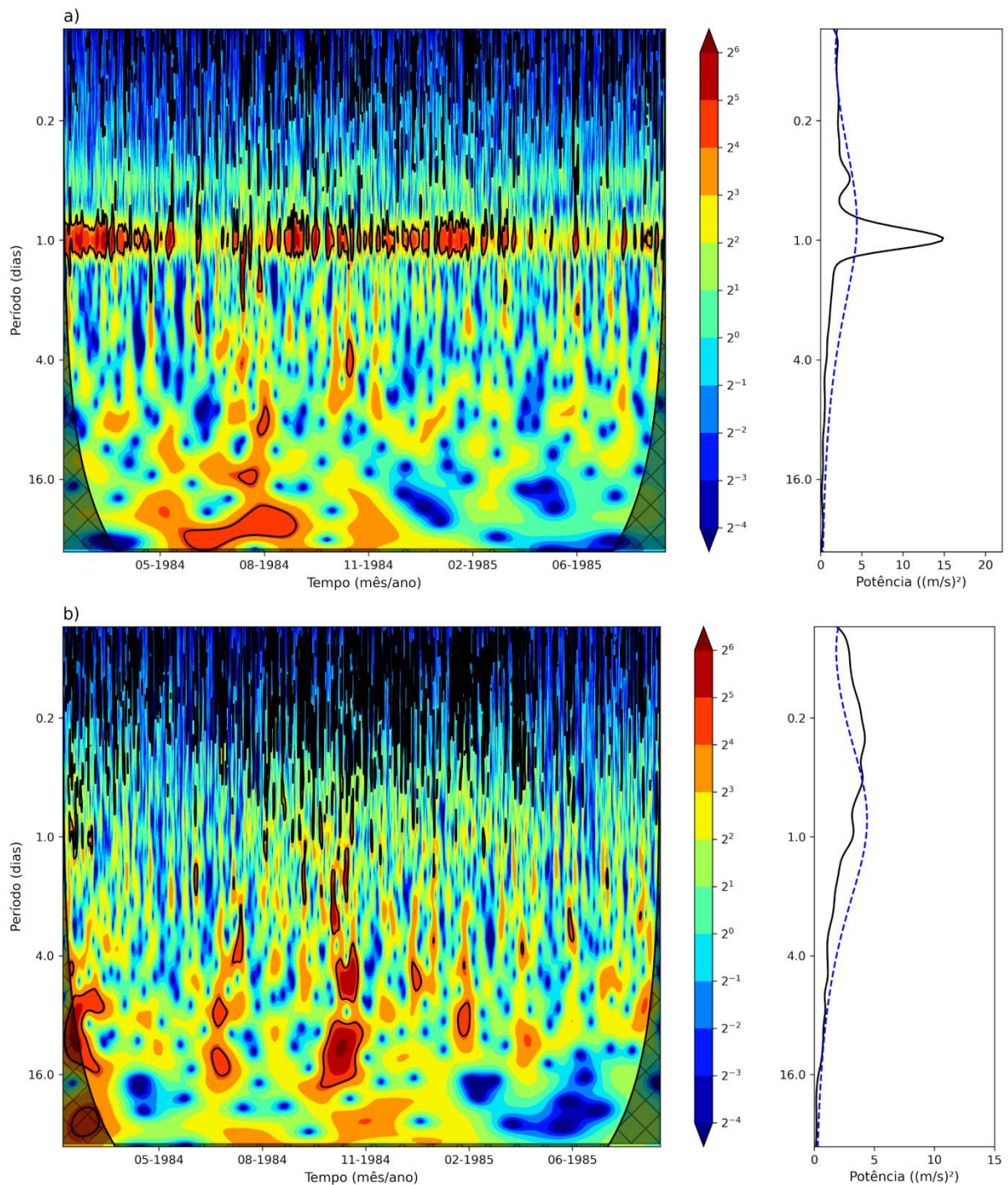


Figura 34: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em B15m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.

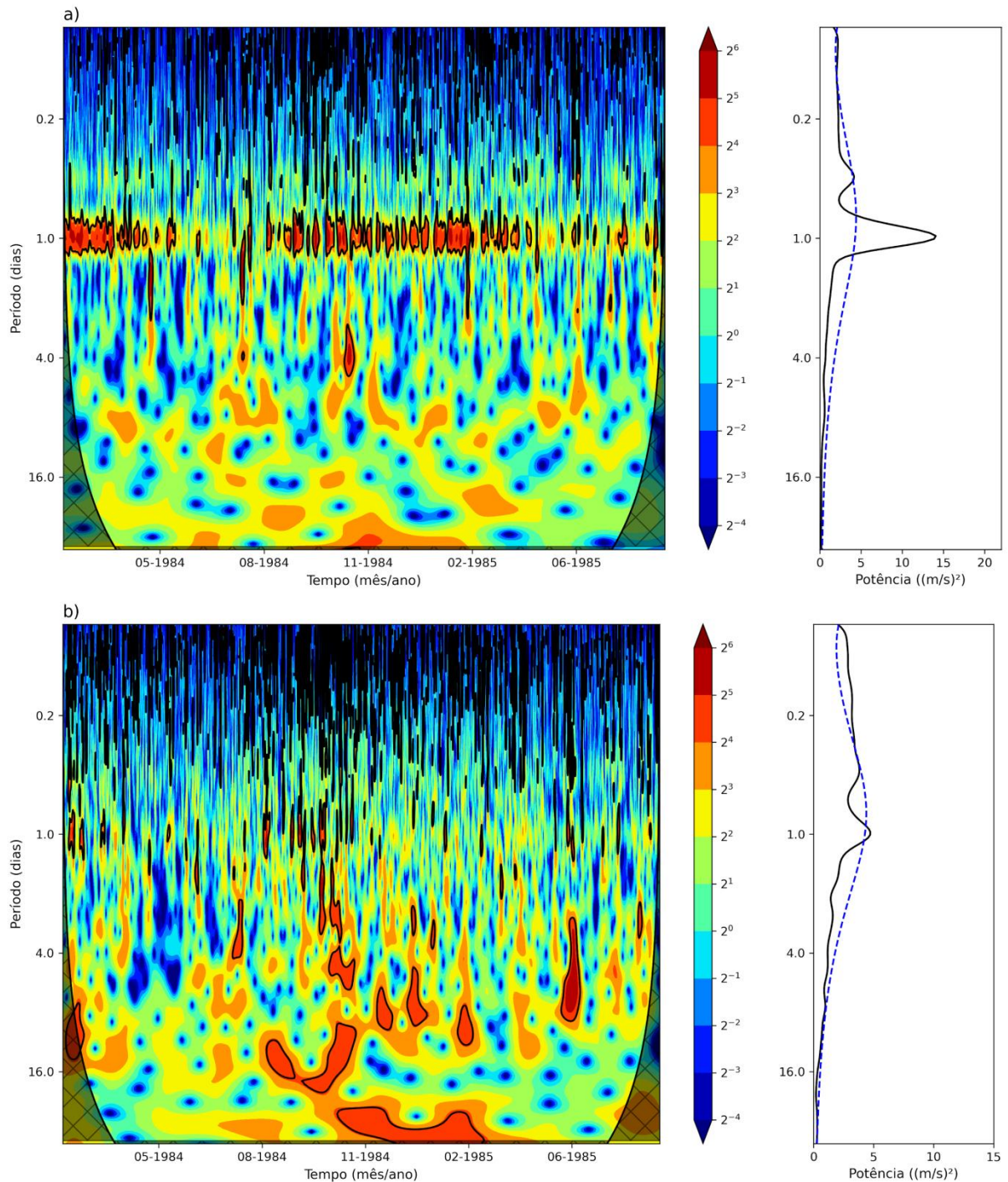


Figura 35: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em C15m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.

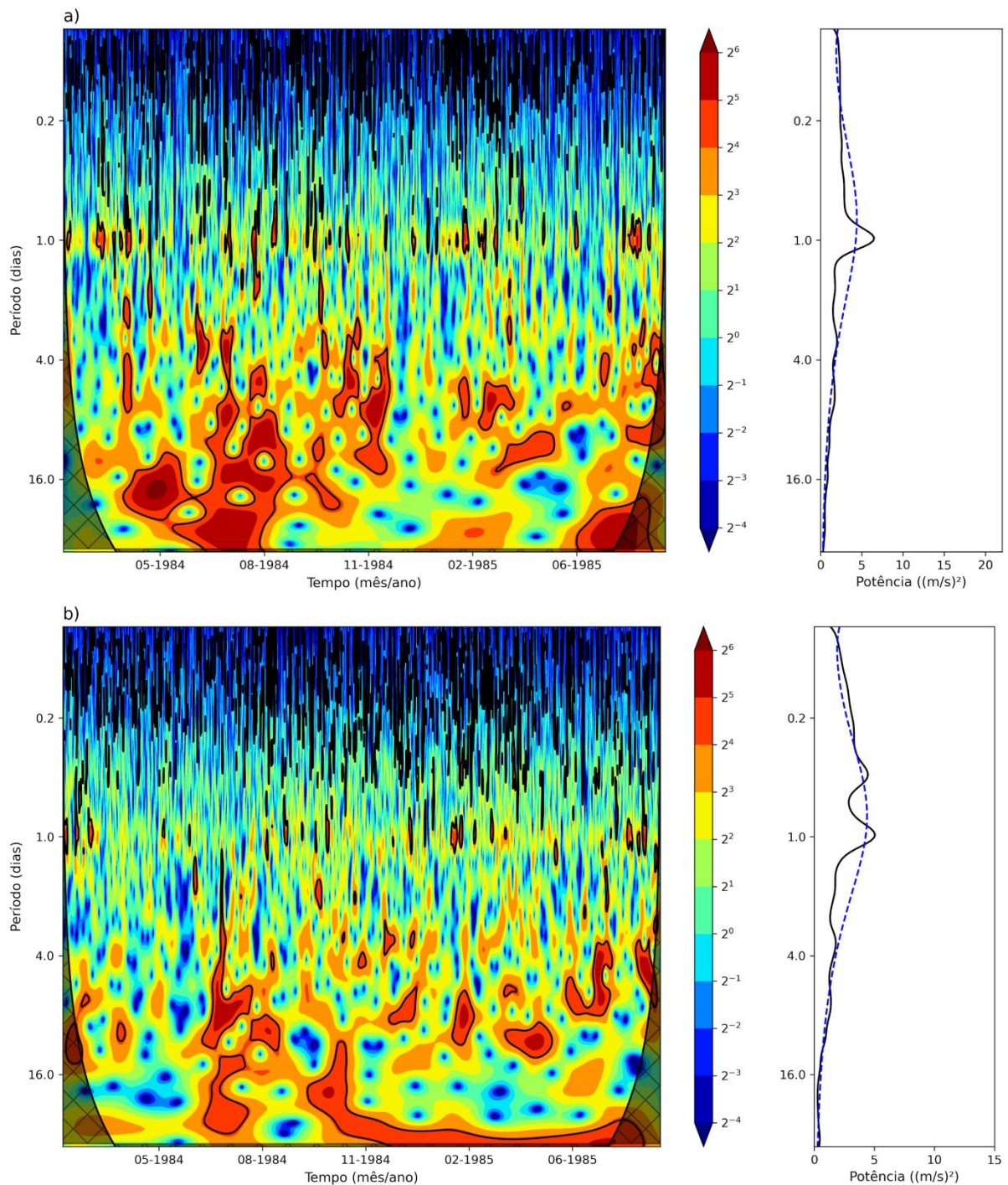


Figura 36: Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) em D15m durante o período de 01/02/1984 à 01/09/1985. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.

5.3 Efeitos de sombreamento

As figuras 37 e 38 ilustram a evolução diurna nas encostas ao redor da CNAAA em um dia representativo para o verão e um segundo dia representativo para o inverno. De maneira geral, nota-se que nas primeiras horas da manhã as sombras se posicionam nas encostas voltadas para oeste (figuras 37a e 38a) enquanto as encostas voltadas para leste recebem radiação diretamente. Em alguns pontos voltados para oeste, as sombras permanecem nas primeiras horas da manhã, até aproximadamente 8h no verão e 9h no inverno. Após estes horários, não há efeito de sombreamento entre as encostas com faces zonais até o meio no período da tarde, quando o posicionamento do sol à oeste no céu, gera sombras nas encostas voltadas para leste. No inverno, as primeiras sombras começam a surgir após às 15h, enquanto no verão as primeiras sombras são observadas após as 16h. Em relação a variação sazonal das sombras, destaca-se que no inverno algumas encostas voltadas para o Sul apresentam sombras mesmo nos horários em que o Sol está em sua posição mais alta no céu.

Assim, segundo o esquema de circulação perpendicular ao eixo do vale devido ao aquecimento assimétrico das encostas ilustrado em (Lehner et al, 2011). Durante as primeiras horas da manhã, esta forçante estaria associada com um escoamento de leste para oeste nos primeiros metros da superfície, com um escoamento compensatório alguns metros acima de oeste para leste. Enquanto no período da tarde, esta célula apresentaria um padrão inverso com escoamento de oeste para leste nos primeiros metros e um escoamento compensatório de leste para oeste.

Dessa forma, a variação do posicionamento das sombras ao longo das encostas no entorno da CNAAA pode estar associada a algumas modulações do vento, especialmente na componente zonal. Tal forçante estaria diretamente associada a alguns dos registros de ventos de oeste no início da manhã e escoamentos de leste no fim da tarde nos pontos A60m, A100m e D15m, conforme disposto nos gráficos de rosa dos ventos (seção 5.1).

Destaca-se ainda que o ciclo anual do posicionamento do Sol e a diferença entre os horários de nascer e pôr do Sol ao longo do ano causam uma sazonalidade na disposição e nos horários de ocorrência das sombras nas encostas do entorno da CNAAA. Consequentemente, deve-se investigar como a variação destas variáveis ao longo do ano influencia nos efeitos de sombreamento e na importância que esta componente terá no escoamento resultante em diferentes épocas do ano. Um estudo mais detalhado que explore esta ferramenta na Serra do

Mar pode trazer grandes contribuições para o entendimento das nuances do escoamento nesta região.

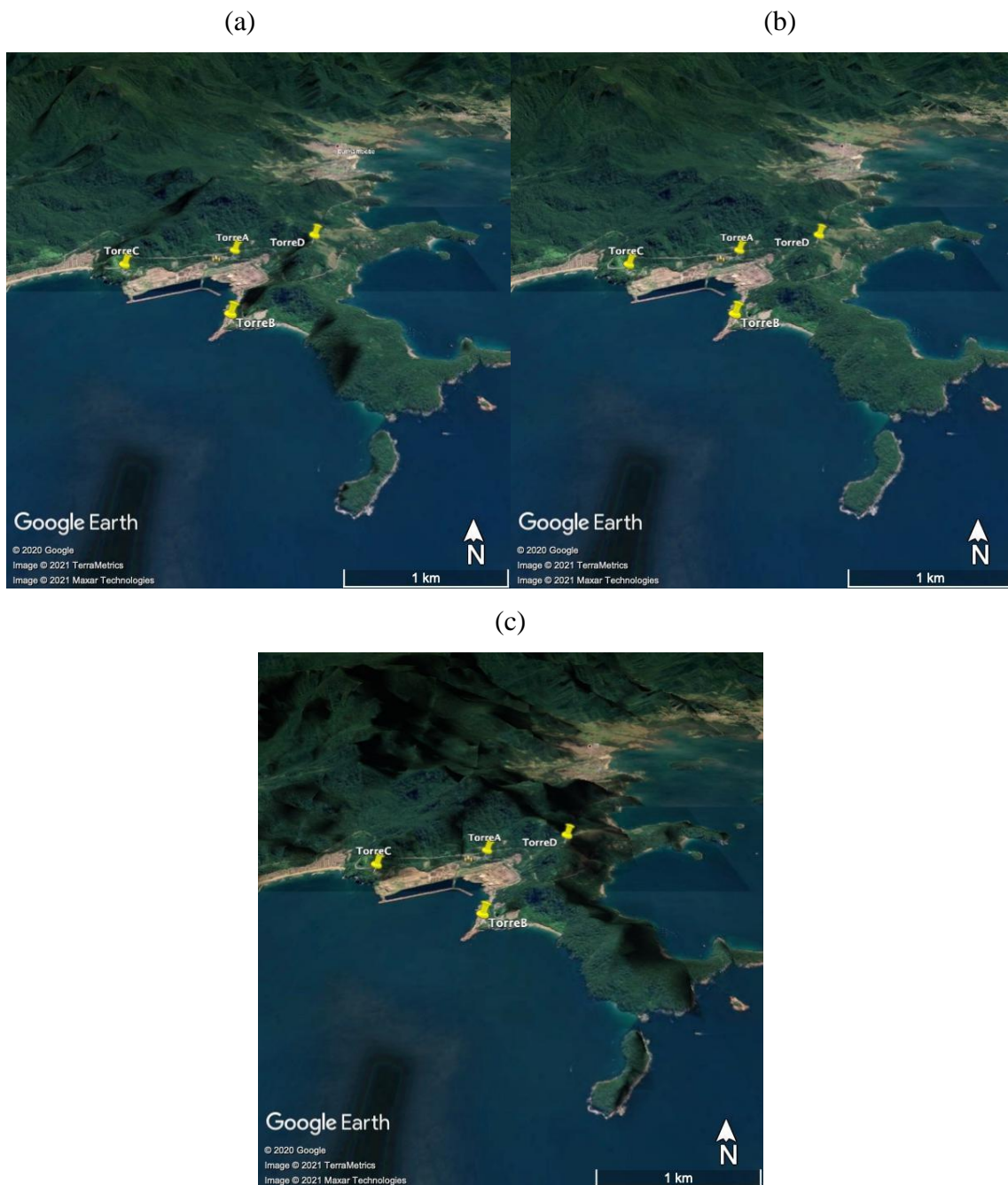


Figura 37: Evolução diurna das sombras sobre as encostas do entorno da CNAAA em um dia representativo para o verão (05/01/2020): (a) 07h30, (b) 13h00 e (c) 17h30.

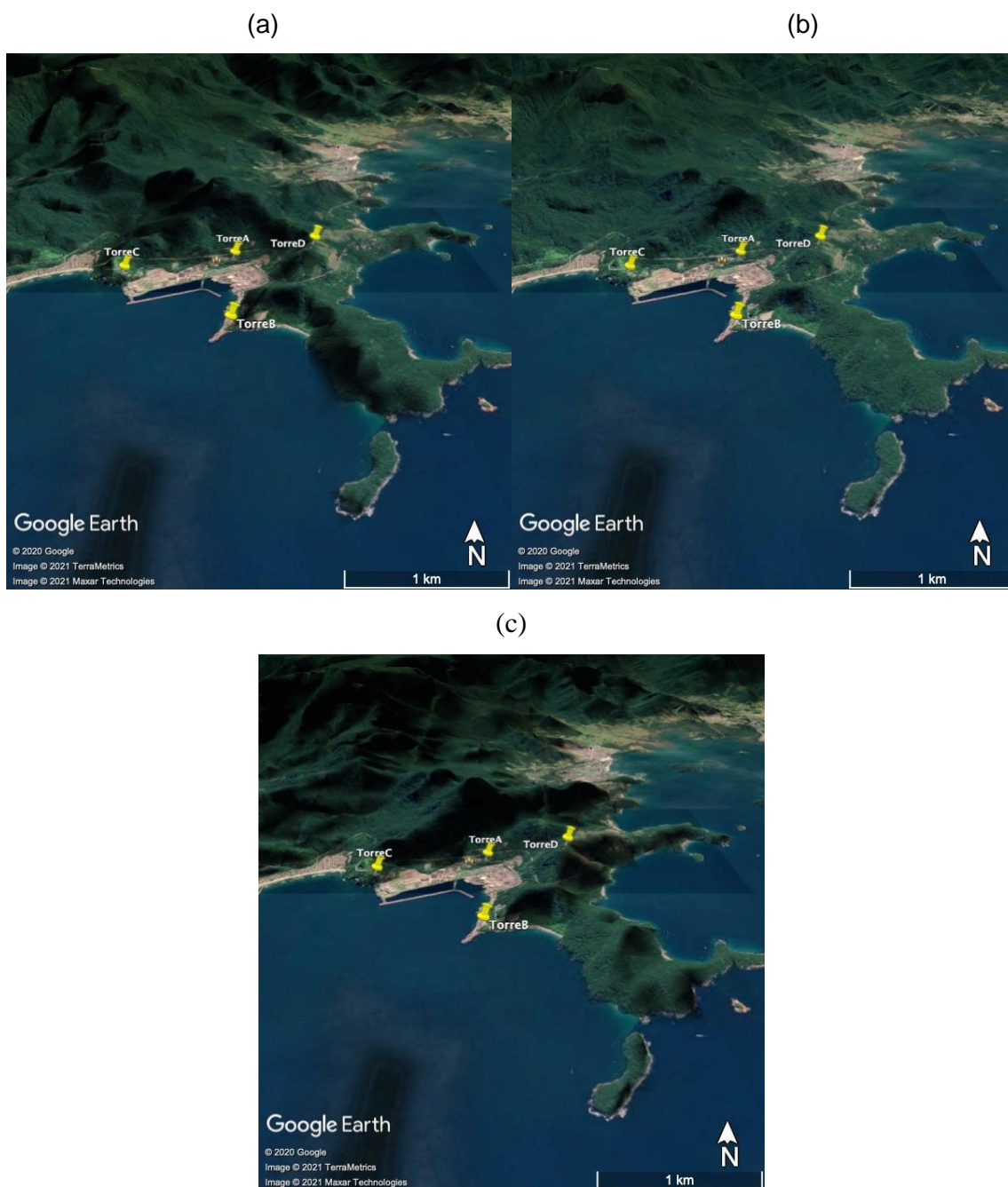


Figura 38: Evolução diurna das sombras sobre as encostas do entorno da CNAAA em um dia representativo para o inverno (05/07/2020): (a) 08h30, (b) 13h00 e (c) 15h30.

5.4 Avaliação da condição de estabilidade atmosférica

A análise da estabilidade é realizada através dos dados dos parâmetros baseados no gradiente vertical de temperatura e desvio padrão da direção do vento calculados partir dos dados da torre A. Nota-se na figura 39a que no parâmetro de estabilidade estática são

observadas maiores ocorrências das classes de Pasquill E (33,5%) e D (25,1%), que correspondem, respectivamente, a predominância de situações neutras ou ligeiramente estáveis. Este resultado corrobora com estudos anteriores de Nicolli (1981), Oliveira Júnior (2008) e Oliveira Júnior et. al (2010), em relação a predominância de condições estáveis no entorno da CNAAA. No entanto, há a terceira maior ocorrência da classe A, que corresponde a situações fortemente instáveis, diverge em relação a proporção de situações instáveis observadas em estudos anteriores. O aumento de condições instáveis em relação aos estudos das últimas décadas possivelmente está associado a mudanças no uso do solo no entorno da torre A, que está diretamente correlacionado com um maior aquecimento superficial nas adjacências da torre.

Em relação à distribuição horária do parâmetro de estabilidade estática, nota-se que a mediana dos dados apresenta uma pequena variação ao longo do dia, decrescendo seu valor pela manhã e atingindo os menores valores durante a tarde. Este padrão é um indicativo de que a tarde, período em que há um maior aquecimento da superfície, são observadas mais ocorrências de instabilidade estática. Além disso, os horários da tarde apresentam os diagramas de boxplot com a menor variabilidade nos valores encontrados entre o primeiro e terceiro quartil.

O desvio padrão da direção do vento (figura 39b) fornece um panorama de estabilidade diferente do aferido pelo gradiente vertical de temperatura. Neste parâmetro, a classe de Pasquill mais frequente é a A (fortemente instável) com 52,3% das ocorrências, seguida pelas classes D, B, C e E. Além disso, na distribuição horária deste parâmetro há um ciclo diurno mais bem marcado (figura 40b). Ao longo da madrugada os diagramas de boxplot apresentam distribuição assimétrica com valores de mediana menores (próximos de 10). Isto indica que nestes horários metade das ocorrências correspondem a situações neutras e estáveis. Ao amanhecer do dia, nota-se que a mediana vai alcançando valores maiores atingindo o seu máximo ao longo da tarde. Neste período mais da metade dos registros de SIG10 são maiores que $22,5^\circ$ e, assim, correspondem a condições fortemente instáveis. A partir do fim da tarde os valores de mediana voltam a decrescer e uma proporção maior de situações mais estáveis volta a ser observada. Com isso, de acordo com a categorização do parâmetro σ_θ em CNEN (1989), o ciclo diurno observado no boxplot indica que há uma maior turbulência mecânica nos períodos da tarde, quando o escoamento em superfície da região é comumente forçado pela brisa marítima. Conforme mencionado anteriormente por Oliveira Junior (2008), uma maior turbulência mecânica dentro da camada limite está diretamente relacionada com a altura máxima da propagação da frente de brisa.

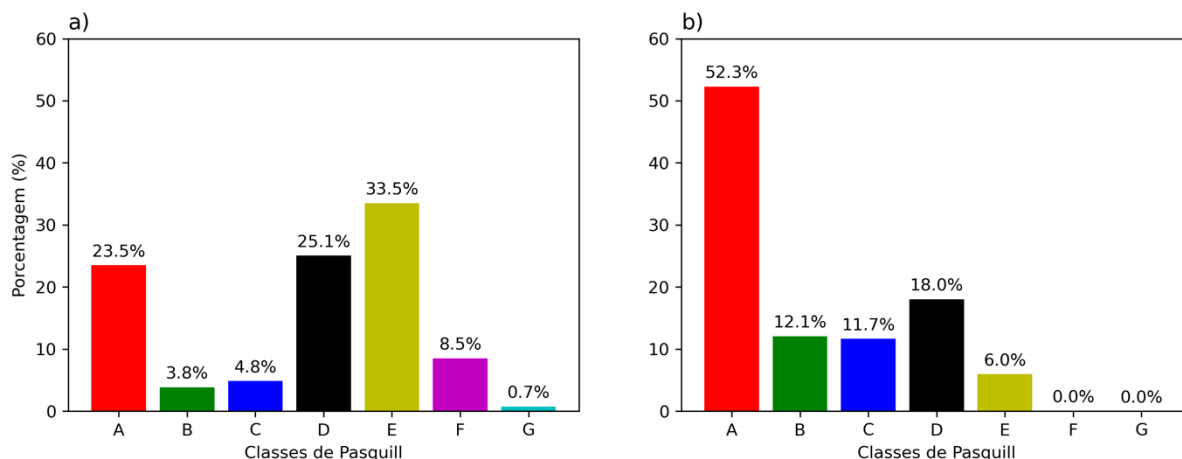


Figura 39: Ocorrências de cada classe de Pasquill a partir de cada índice de estabilidade: (a) $\Delta T/\Delta z$, (b) SIG10.

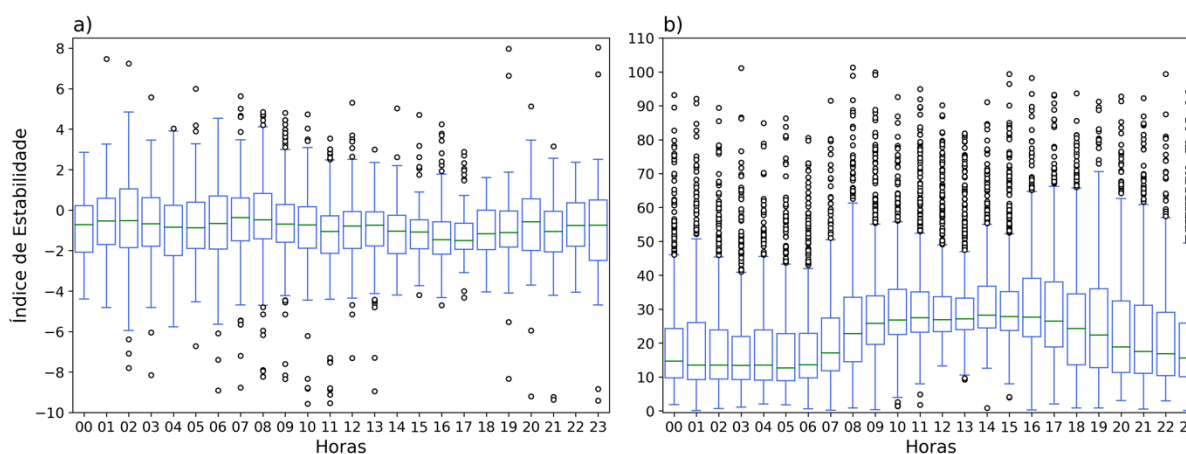


Figura 40: Boxplot do ciclo diurno dos índices de estabilidade calculados com dados da torre meteorológica A para o ano de 2016 (a) $\Delta T/\Delta z$, (b) SIG10.

5.5 Análise da Correlação entre o vento e as Condições de Estabilidade da Atmosfera – Uso da Matriz de Correlação

A figura 41 ilustra a matriz de correlação entre os dados de vento e de estabilidade atmosférica nos 6 pontos de medição distribuídos no entorno da CNAAA. De forma geral, nota-se que a maior parte das correlações calculadas são positivas.

Em relação aos parâmetros de instabilidade, observou-se que o parâmetro de estabilidade estática apresentou correlações abaixo de 20% (em módulo) com os dados de vento. A variável σ_{10} apresentou correlações acima de 30% com a velocidade do vento dos

pontos A60m, A100m, B15m e C15m, e correlações abaixo de 21% com as demais variáveis (figura 41).

Em relação ao ciclo diurno, destaca-se que a variável σ_{10} é negativamente correlacionada com a variação das direções do vento durante os períodos da noite e madrugada, quando há as maiores quantidades de registros de condições estáveis. Nos períodos da manhã e tarde, quando os registros de σ_{10} correspondem majoritariamente a situações instáveis, a variável é positivamente correlacionada com as direções do vento das torres da CNAAA. Destaca-se que as correlações de σ_{10} com os dados de vento se mostraram mais fortes que as correlações do parâmetro $\Delta T/\Delta z$ com os mesmos dados ao longo do ciclo diurno (figura 42). Tal resultado, possivelmente deve-se ao σ_{10} estar diretamente relacionado a variabilidade do vento, enquanto $\Delta T/\Delta z$ considera em sua formulação apenas a variação da temperatura na vertical.

Constatou-se ainda uma alta correlação entre alguns dados de vento medidos nas torres. A correlação entre as velocidades do vento em A60m e A100m foi de 96% e a correlação entre os dados de direção do vento destes dois pontos foi de 73% (Figura 41). A correlação entre os dados de A60m e A100m manteve-se elevada nas quatro matrizes de correlação decompostas por ciclo diurno, com correlação acima de 93% entre as velocidades do vento e acima de 66% nas direções do vento (Figura 42). O resultado bastante similar da distribuição do vento entre estes dois pontos também foi observado nos gráficos de distribuição de frequência dos ventos (seção 5.1) e nos espectros de ondeleta (seção 5.2). Com isso, estas correlações reforçam que o escoamento nestes dois pontos é induzido pelas mesmas forçantes em grande parte do período analisado.

Destaca-se ainda as correlações entre de 43% e 73% entre os pares de direção do vento medidas em A10m, A60m e A100m, B15m e C15m. Indicando novamente um certo grau de similaridade entre estes 4 pontos, reforçando que o padrão de rotação da direção do vento possivelmente responde às mesmas forçantes em horários específicos (Figura 41).

Por outro lado, a direção do vento em D15m apresenta correlações abaixo de 32% com as direções dos ventos das outras torres (Figura 41). Tal resultado reforça que a torre D15m tem o padrão de variação que mais difere dos demais pontos no entorno da CNAAA. Contudo, destaca-se que em relação a intensidade do vento, o ponto D15m apresenta correlações de 54% e 63% com as intensidades do vento medidas em A60m e A100m.

Em relação às matrizes de correlação correspondentes a cada período do dia, destaca-se que não há grandes diferenças nos valores na grandeza da maior parte das variáveis mais correlacionadas (figura 42). Contudo, nota-se que o período da tarde (figura 42c) apresenta, em

geral, os maiores valores de correlação positiva entre os dados de vento, horário em que atribui-se o escoamento predominante à brisa marítima (seção 5.1). Tal resultado reforça a hipótese de que a forçante de brisa marítima atua sobre todos os pontos neste período do dia, causando padrões de rotação na direção do vento que apresentam um elevado grau de similaridade.

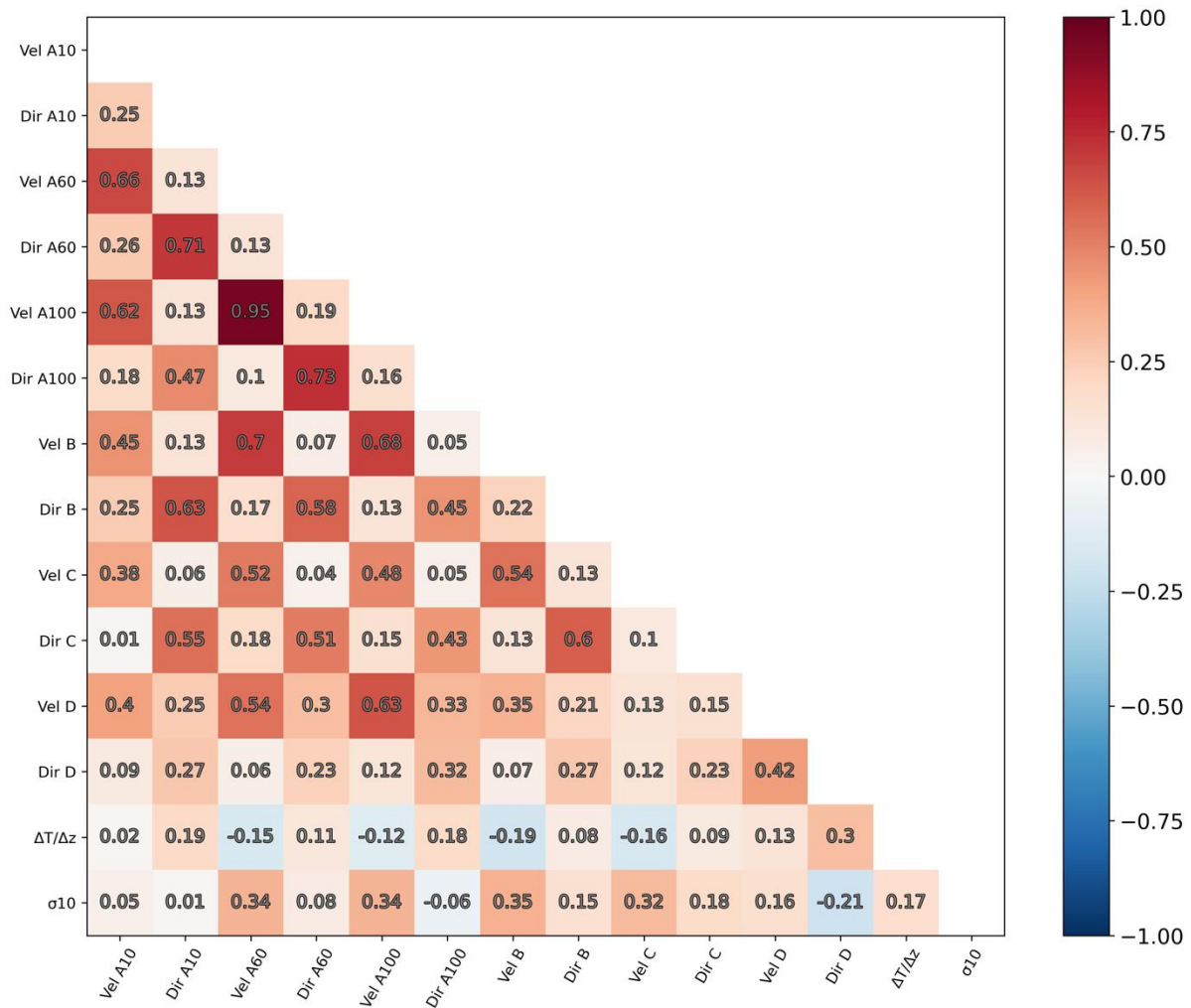


Figura 41: Matriz de Correlação entre os dados de vento e estabilidade.

Capítulo 6

6 Resultados: Modelo Numérico

6.1 Análise Sinótica

A análise das condições sinóticas do mês de janeiro de 2016 em Angra dos Reis foi realizada através da inspeção de cartas sinóticas elaboradas pela Marinha do Brasil e imagens do satélite Geostationary Operational Environmental Satellite - 13 (GOES-13). A partir desta investigação pode-se observar que diferentes forçantes sinóticas influenciaram no escoamento da região de estudo ao longo deste período. Além da situação estável, onde há o predomínio do ASAS sobre o estado do RJ, também foram observadas passagens de sistemas transientes como, sistemas frontais, anticiclones pós-frontais, um episódio de ZCAS, ciclones e cavados.

Dentre estes dias destacam-se os dias 05/01/2016 e 06/01/2016, onde houve a atuação de um sistema de alta pressão no estado do Rio de Janeiro (Figuras 43a e 44a). Nestes dias também se registrou a atuação de uma depressão subtropical (segundo a Marinha do Brasil), que neste período esteve localizada no oceano entre as latitudes da costa do Espírito Santo e da Bahia. Em relação às imagens de satélite (Figuras 43b e 44b), observou-se que nos dias 05/01/2016 e 06/01/2016 às 12z houve pouca nebulosidade sobre o estado do Rio de Janeiro.

Vale ressaltar, que o período de verão austral entre 2015/2016 foi marcado pela por um episódio de El Niño histórico, com o *Oceanic Niño Index* igual a 2.5 no trimestre Dezembro-Janeiro-Fevereiro. Tal valor foi um dos maiores registrados para um trimestre com El Niño de acordo com a série histórica (NOAA, 2020).

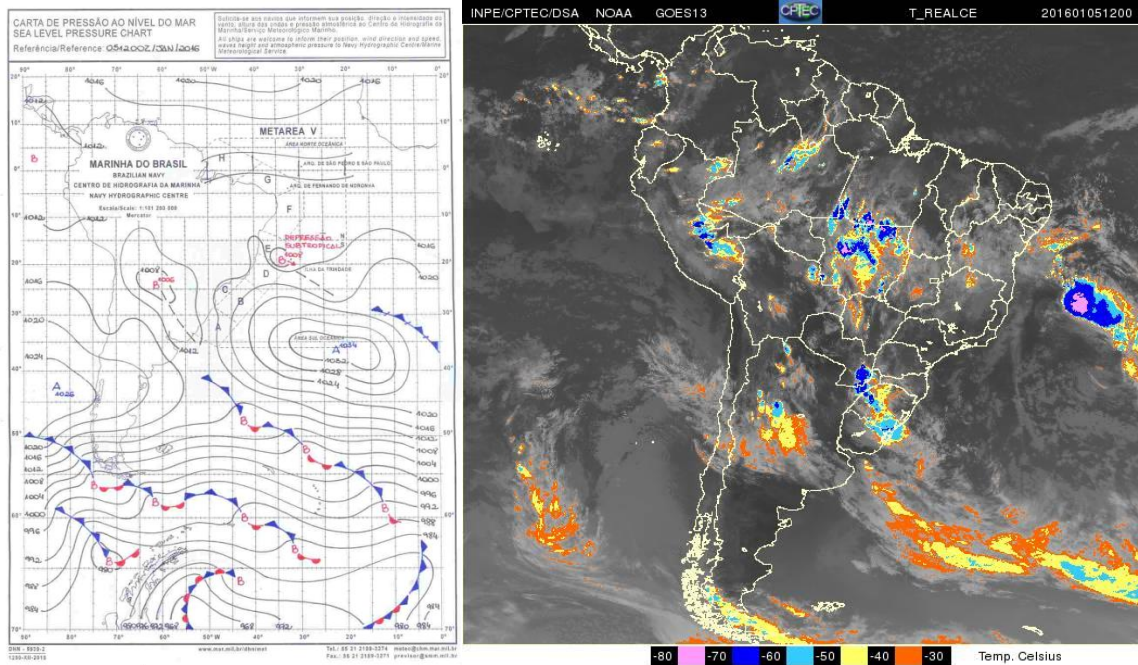


Figura 43: Carta de pressão ao nível do mar referente ao dia 05/01/2016 às 12Z e imagem de satélite do canal de temperatura realçada do mesmo horário (Fontes: Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil e CPTEC/INPE).

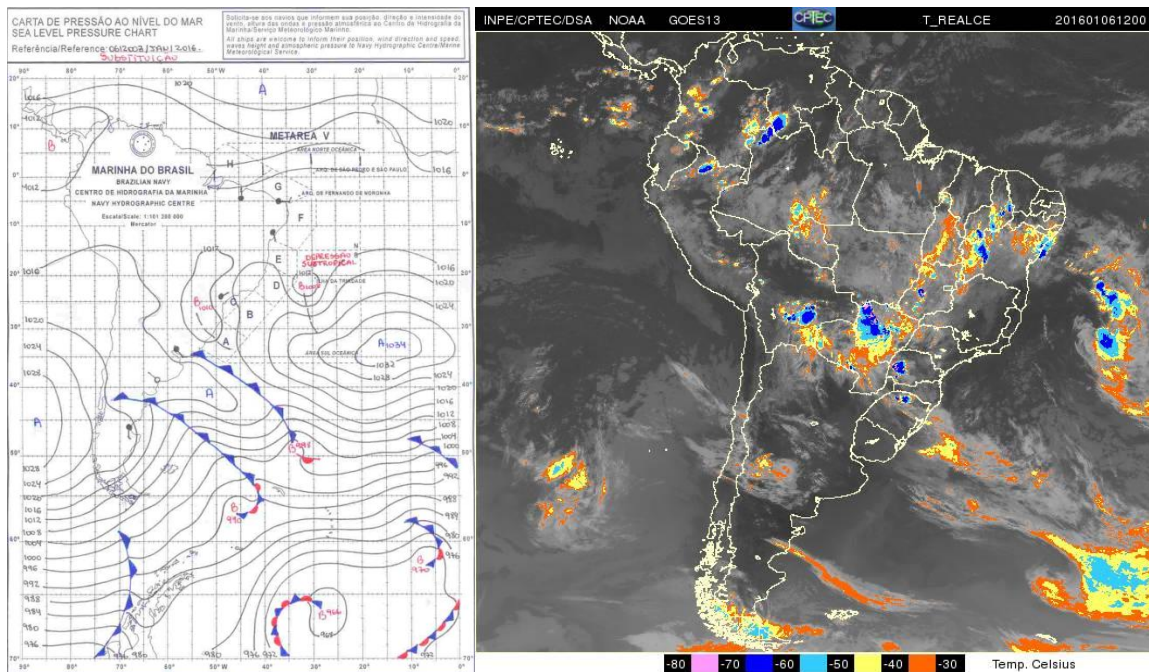


Figura 44: Carta de pressão ao nível do mar referente ao dia 06/01/2016 às 12Z e imagem de satélite do canal de temperatura realçada do mesmo horário (Fontes: Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil e CPTEC/INPE).

6.2 Condições de Contorno Estáticas

As figuras 45, 46 e 47 ilustram os campos das variáveis de contorno estáticas que foram adicionadas nas grades mais resolutas de cada experimento do WRF. Na categorização do uso do solo (Figura 45) todas as grades receberam como contorno os dados categorizados da base MODIS cuja a melhor resolução é de 500m. Neste caso, as principais categorias de uso do solo do entorno da CNAAA foram 2 (vinho), 10 (amarelo) e 17 (azul esverdeado), que correspondem respectivamente a *evergreen broadleaf forest*, *grassland* e *water*. A variável LANMASK (Figura 46), correspondente a máscara que diferencia as superfícies terrestres dos corpos d'água também foi a mesma em todos os experimentos. A maior diferença entre as grades de 500m e 1km nas duas variáveis é observada nas adjacências entre o continente e o oceano. Dado que a grade de 1km tem uma representação mais degradada do uso do solo e da máscara terra-mar, especialmente ao longo do contorno da linha da costa.

Por outro lado, a variável de elevação do terreno (HGT) recebeu um tratamento especial neste estudo (Figura 47). Nos quatros experimentos foram testadas três diferentes bases de dados topográficas para a região. Os dados GMTED2010 com resolução de aproximadamente 1km, e os dados ASTER e SRTM com resolução de aproximadamente 30m. Os dados GMTED2010 foram adicionados nos domínios de 500m (G2 – GMTED2010) e 1km (G1 – GMTED2010) (Figura 47(a) e (d)) e os dados das bases ASTER e SRTM foram adicionados em experimentos nos domínios de 500m (G2 – ASTER e G2 - SRTM) (Figura 47(b) e (c)). O impacto da mudança nas bases topográficas pôde ser mensurado através dos campos de diferença entre a variável HGT nos 3 experimentos com grade D3 de 500m (Figura 48).

A diferença entre a topografia entre G2 - GMTED2010 com as topografias estimadas em G2 - ASTER e G2 - SRTM chega a atingir até valores maiores que 100m. Além disso, nota-se que os maiores valores de diferença entre G2 - GMTED2010 e as demais bases estão ao longo das encostas. O que pode ser um indicativo da deficiência da base topográfica original na representação da elevação em regiões montanhosas. É importante destacar que as topografias estimadas em G2 - ASTER e G2 - SRTM apresentam maior similaridade, em Figura 48c nota-se que diferença entre as duas bases é menor que 30m (em módulo) na maior parte da grade.

A figura 49 apresenta os valores de TSM utilizados como condição de contorno superficial sobre os corpos d'água. De acordo com esta base, entre o período de 31 de dezembro de 2020 e 31 de janeiro de 2020, os dados de TSM variaram entre 24°C e 27°C ao longo da costa do estado do Rio de Janeiro. Apesar dos dados da base TSM RTG apresentarem melhor resolução temporal e melhor resolução horizontal em relação aos dados nativos do GFS. Esta base apresenta deficiências para representação de águas frias quando há ocorrência do fenômeno de ressurgência costeira da costa sudeste do Brasil (Matos et al., 2009 *apud* Dragaud, 2014). Além disso, esta base foi descontinuada em fevereiro de 2020 pelo NCEP (https://polar.ncep.noaa.gov/sst/rtg_high_res/). Com isso, pesquisadores atualmente estão em busca de alternativas para uma condição de contorno de superfície do mar. Uma alternativa promissora é a base de dados TSM MUR, que já foi aplicada anteriormente em um estudo para o estado do Rio de Janeiro (Dragaud, 2018).

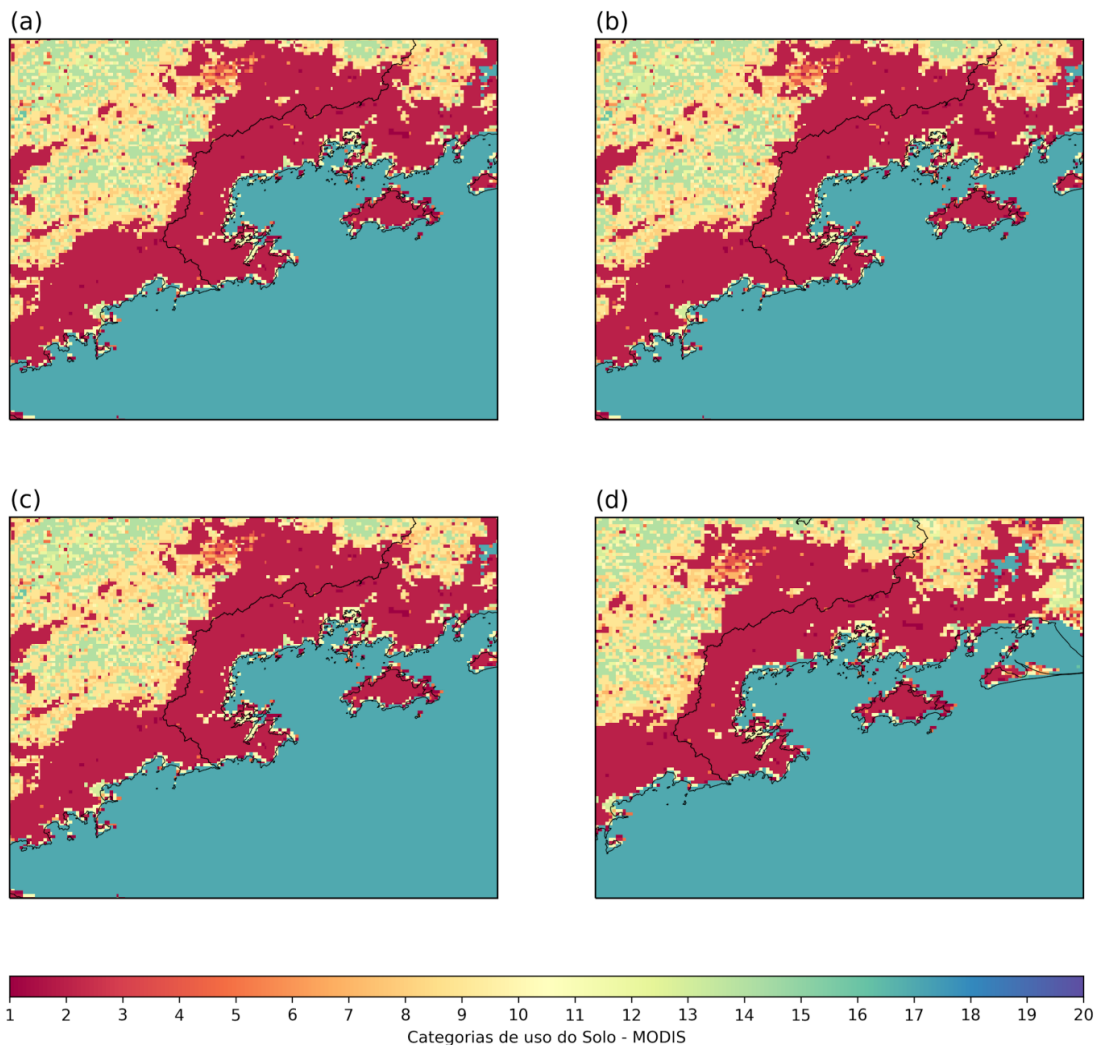


Figura 45: Campos da variável LU_INDEX nas grades D3 de cada experimento. (a) G2 - GMTED2010, (b) G2 - ASTER (c) G2 - SRTM e (d) G1 - GMTED2010.

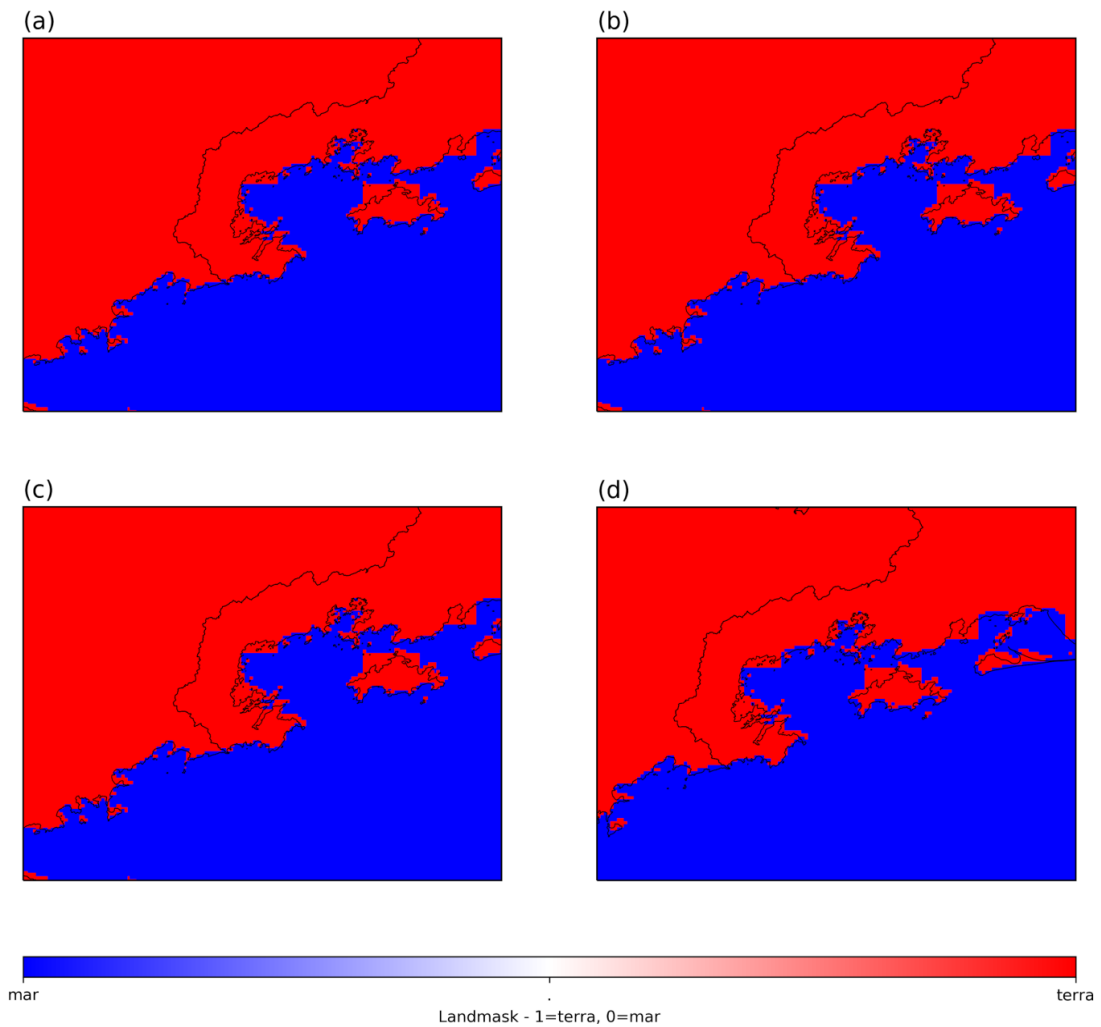


Figura 46: Campos da variável LANDMASK nas grades D3 de cada experimento. (a) G2 - GMTED2010, (b) G2 - ASTER (c) G2 - SRTM e (d) G1 - GMTED2010.

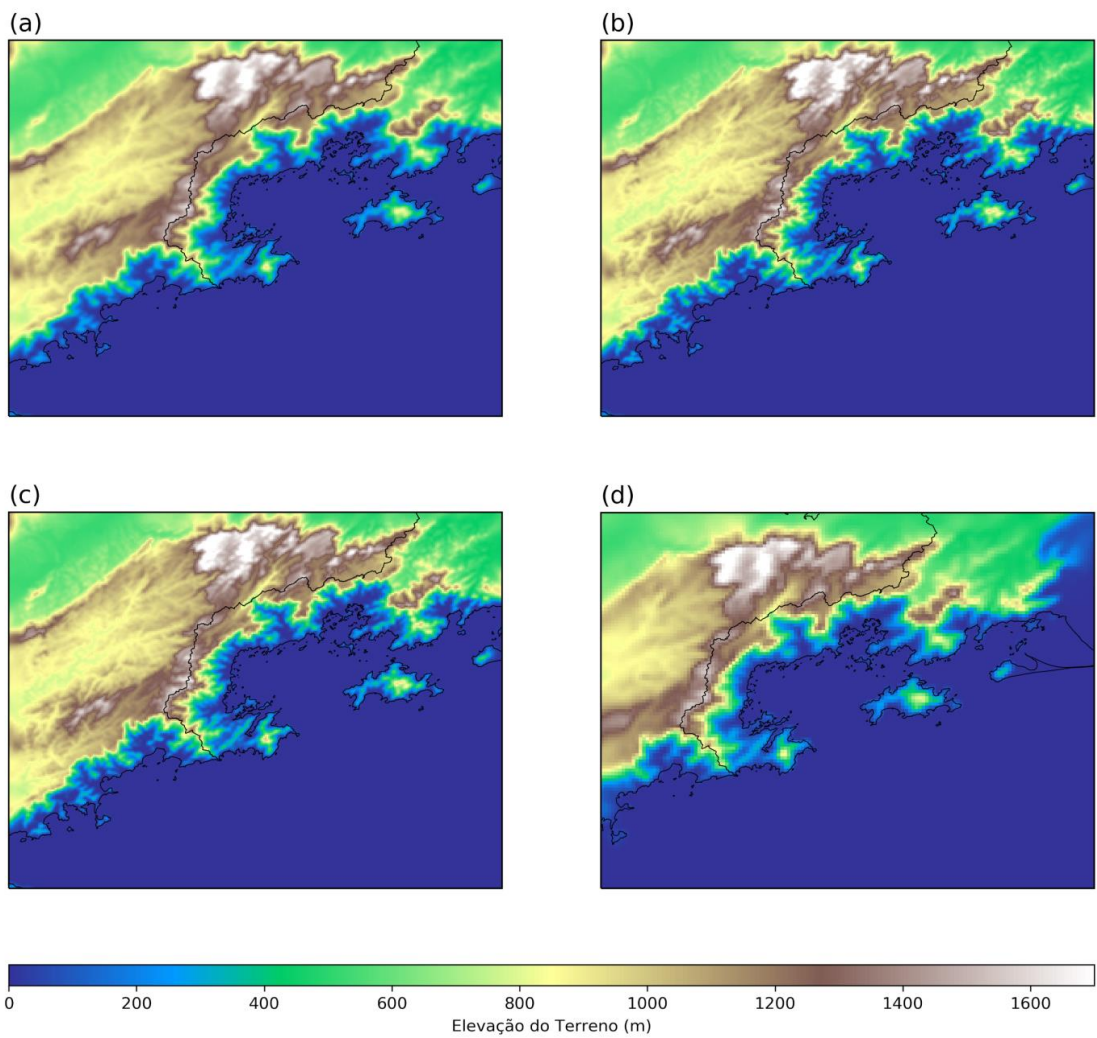


Figura 47: Campos da variável HGT nas grades D3 de cada experimento (a) G2 - GMTED2010, (b) G2 - ASTER (c) G2 - SRTM e (d) G1 - GMTED2010.

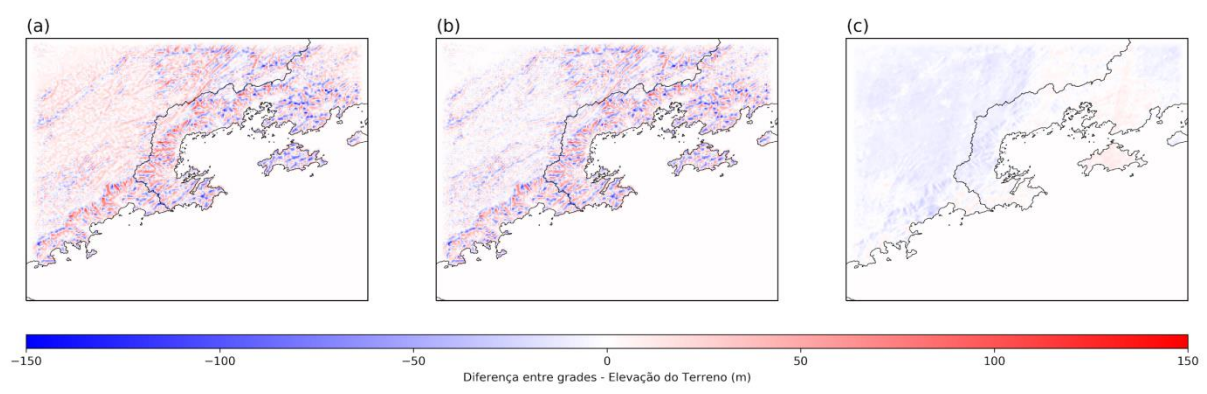


Figura 48: Diferença entre as bases topográficas nos domínios de 500m. (a) (G2 - GMTED2010) - (G2 - ASTER), (b) (G2 - GMTED2010) - (G2 - SRTM) e (c) (G2 - ASTER) - (G2 - SRTM).



Figura 49: Temperatura da Superfície do Mar - RTG (°C) ao entre 31/12/2015 e 31/01/2016.

6.3 Validação Estatística

Os diagramas de Taylor encontram-se nas figuras 50 e 51 ilustram a habilidade de cada experimento numérico do WRF (G2 - ASTER, G2 - GMTED2010, G1 - GMTED2010 e G2 - SRTM) na representação das intensidades do vento medidas no entorno da CNAAA no estudo de caso de dois dias e na simulação para janeiro de 2016 (Figuras 50 e 51). A correlação entre os dados observados de intensidade do vento e os dados simulados variou entre 70% e 82% no estudo de caso para A60m, A100m, B15m e C15m. No entanto, tal índice não ultrapassou 45% quando o período de análise foi estendido para 31 dias. Nos pontos A10m e D15m foram inferiores que 30% e 10% no estudo de caso e na análise mensal, respectivamente. Isso indicou que apesar do WRF ter representado satisfatoriamente a intensidade do vento em um caso, onde houve predomínio de circulações locais. A qualidade na representação do vento diminuiu significativamente quando houve influência de outras forçantes e outros sistemas sinóticos.

De forma geral, a análise conjunta dos índices estatísticos coeficiente de correlação, erro quadrático médio e desvio padrão calculados para os 4 experimentos numéricos apresentaram valores próximos em todos os pontos analisados. No período do estudo de caso - quando há atuação de um sistema de alta pressão em escala sinótica e condição favorável para predominância da brisa - os experimentos G2 - ASTER (melhor resultado) e G2 - SRTM apresentaram uma melhor representação da intensidade do vento em A10m, A60m A100m e D15m. Em B15m e C15m o experimento melhor com desempenho foi G1 - GMTED2010. Nas métricas estatísticas referentes às intensidades do vento simuladas o longo de todo o mês de 2016, nota-se que os experimentos com resolução horizontal de 500m apresentaram melhores resultados em A10m, A60m A100m, B15m e D15m. Enquanto o experimento G1 - GMTED2010 manteve um melhor desempenho em C15m.

Como valores de referência, a avaliação da representação da intensidade do vento em Zhang et. al (2013), em um estudo para os Estados Unidos, o índice EAM variou entre aproximadamente 1,25 a 2,0m/s. Enquanto em Paiva et. al (2014), realizado para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, os índices RMSE e viés, variaram entre 1,12 a 4,26 e 0,03 a 3,18, respectivamente. Nota-se a partir das métricas de erro dispostas nas tabelas 13 e 15 que as simulações apresentaram valores de EAM menores que o observado no estudo de Zhang et. al (2013) na maior parte dos pontos (exceto D15m).

Os índices viés e FOEX indicaram que há uma superestimativa nos dados de vento em A10m (ligeiramente) e D15m, e uma subestimativa na intensidade do vento em B15m e C15m em todos os experimentos numéricos. Assim, como no diagrama de Taylor, o experimento GMTED2010 - 1km apresenta melhores resultados em B15m (apenas no período de 2 dias) e em C15m. Destaca-se também que na maior parte dos pontos, os resultados dos índices RMSE e viés foram melhores ou próximos ao observado em trabalhos anteriores de Hanna e Yang (2001) e Paiva et. al (2014).

Estes resultados indicam que a adoção de um domínio mais refinado no modelo WRF resultou numa melhor representação da intensidade do vento em pelo menos cinco dos seis pontos analisados. Em relação às simulações com 500m de resolução e diferentes bases topográficas. A assimilação de uma base topográfica mais resolvida (G2 - ASTER e G2 - SRTM) diminuiu o erro em relação ao dado de topografia padrão (G2 - GMTED2010) apenas nos pontos A10m, A60m e A100m (RMSE e EAM).

Adicionalmente, verificam-se nas tabelas 12 e 14 desvios significativos entre os dados observados de direção do vento e as simulações com o modelo WRF. De maneira geral, o experimento G1 - GMTED2010 apresentou melhores resultados para direção do vento a partir das métricas de erro RMSE, EAM e viés. Este resultado indica que o aumento da resolução não trouxe necessariamente uma melhoria na representação da direção do vento no entorno da CNAAA.

A métrica EAM indica que o erro na estimativa é de aproximadamente um quadrante (90°) em todos os pontos. Enquanto o erro estimado pelo RMSE indica valores por volta de 100°. De forma geral, estes valores são ligeiramente maiores que os encontrados na literatura em Paiva et al. (2014), Jimenez e Dudhia (2013) e Zhang et. al. (2013). Pode-se atribuir a este resultado, a deficiência de modelos numéricos em representar a alta variabilidade do vento em regiões com terrenos complexos e ventos predominantemente fracos (Jimenez e Dudhia, 2013; Paiva et al., 2014). Além disso, da complexidade intrínseca à reprodução da variável direção do vento, que é uma das variáveis mais difíceis de ser reproduzida com precisão por qualquer modelo (Paiva et al., 2014).

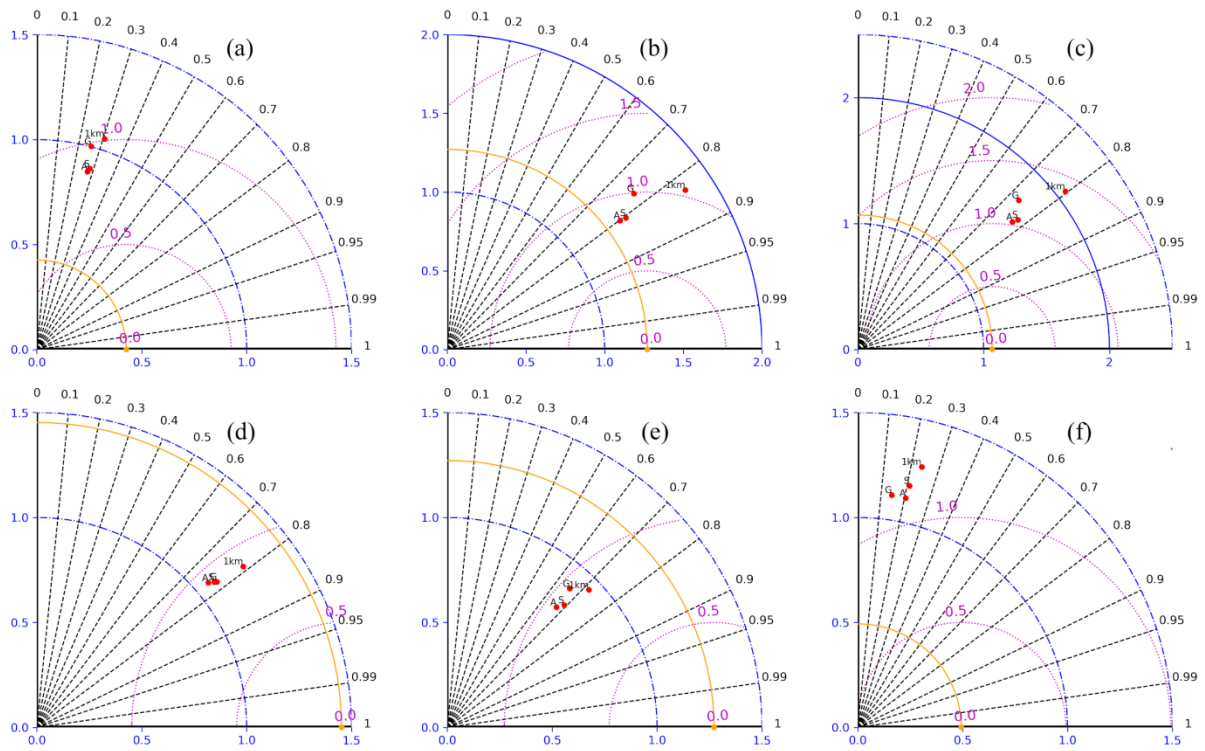


Figura 50: Diagramas de taylor da intensidade do vento do modelo WRF (estudo de caso) configurado com as bases topográficas G2 - ASTER (A), G2 - GMTED2010 (G), G1 - GMTED2010 (1km) e G2 - SRTM (S) em relação aos dados observados dos pontos de medição (a) A10m, (b) A60m, (c) A100m, (d) B15m, (e) C15m e (f) D15m.

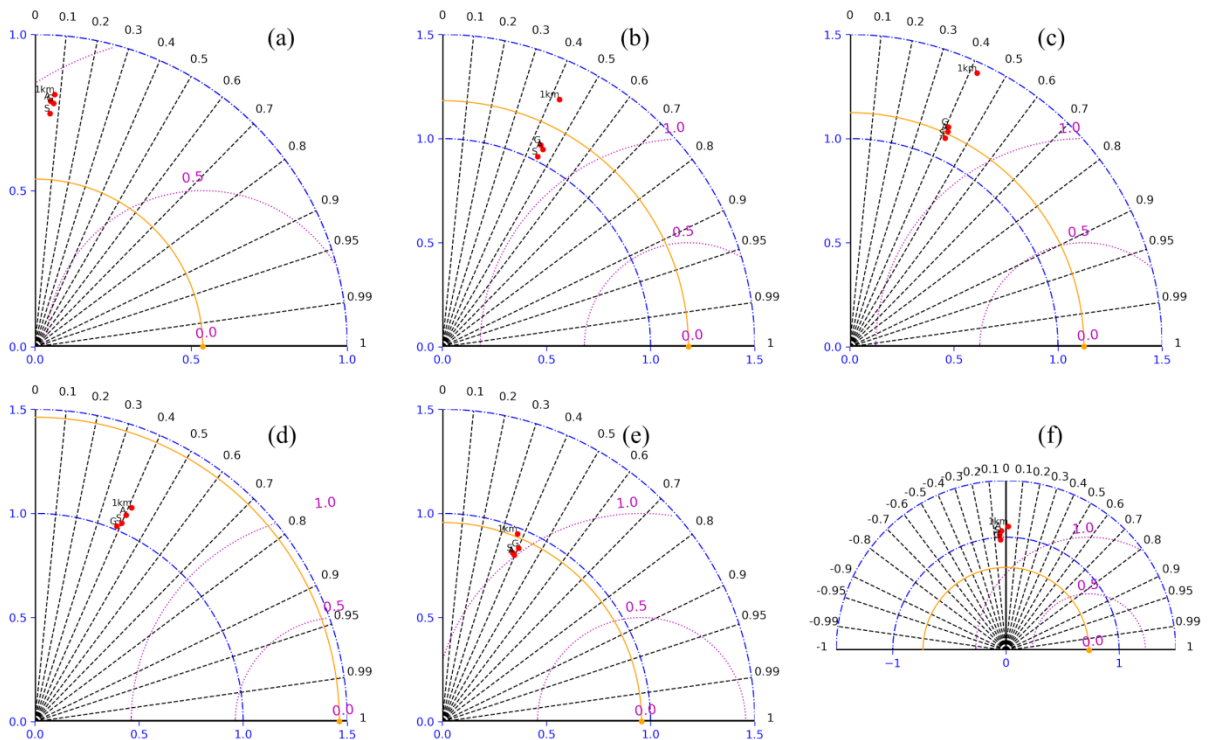


Figura 51: Diagramas de taylor da intensidade do vento do modelo WRF (janeiro de 2016) configurado com as bases topográficas G2 - ASTER (A), G2 - GMTED2010 (G), G1 -

GMTED2010 (1km) e G2 - SRTM (S) em relação aos dados observados dos pontos de medição (a) A10m, (b) A60m, (c) A100m, (d) B15m, (e) C15m e (f) D15m.

Tabela 12: Métricas estatísticas (RMSE, viés, EAM) referentes aos quatro experimentos numéricos nos seis pontos de medição no entorno da CNAAA referentes a avaliação da direção do vento (°) no estudo de caso.

Pontos de Medição	Métricas Estatísticas	Direção do Vento			
		G2 - ASTER	G2 - GMTED2010	G1 - GMTED2010	G2 - SRTM
A10m	RMSE	89,60	86,39	78,43	91,10
	viés	2,91	-18,55	-33,84	-4,61
	EAM	67,00	61,94	57,62	67,54
A60m	RMSE	94,80	93,01	82,80	97,23
	viés	-7,40	-8,28	-17,85	-6,40
	EAM	69,23	68,43	63,85	72,78
A100m	RMSE	85,56	85,26	82,32	92,61
	viés	-14,73	-7,07	-33,40	-11,34
	EAM	63,81	64,17	63,96	70,96
B15m	RMSE	82,96	87,78	77,62	95,34
	viés	-14,85	-15,25	-19,25	-16,12
	EAM	53,95	55,47	49,48	60,05
C15m	RMSE	89,67	98,67	91,80	103,00
	viés	-31,32	-31,08	-30,66	-32,73
	EAM	55,85	61,42	59,01	64,76
D15m	RMSE	84,93	99,16	87,72	92,25
	viés	-18,21	-20,98	-31,70	-21,35
	EAM	68,51	79,69	71,83	73,56

Tabela 13: Métricas estatísticas (RMSE, viés, EAM, FOEX) referentes aos quatro experimentos numéricos nos seis pontos de medição no entorno da CNAAA referentes a avaliação da intensidade do vento (m/s) no estudo de caso.

Pontos de Medição	Métricas Estatísticas	Intensidade do Vento			
		G2 - ASTER	G2 - GMTED2010	G1 - GMTED2010	G2 - SRTM
A10m	RMSE	0,87	0,98	1,02	0,88

	viés	-0,04	0,06	0,17	-0,06
	EAM	0,76	0,87	0,91	0,78
	FOEX	2,49	4,14	9,12	0,28
	RMSE	0,85	0,99	1,10	0,87
A60m	viés	-0,15	-0,02	0,34	-0,21
	EAM	0,63	0,74	0,86	0,67
	FOEX	-14,64	-4,70	8,01	-12,43
	RMSE	1,03	1,20	1,46	1,06
A100m	viés	-0,07	0,05	0,47	-0,13
	EAM	0,82	0,97	1,10	0,87
	FOEX	-16,30	-9,67	3,04	-16,30
	RMSE	1,12	1,09	1,02	1,13
B15m	viés	-0,62	-0,59	-0,44	-0,64
	EAM	0,86	0,85	0,83	0,87
	FOEX	-25,14	-24,03	-17,40	-26,24
	RMSE	1,11	1,08	0,95	1,10
C15m	viés	-0,58	-0,50	-0,31	-0,61
	EAM	0,85	0,85	0,76	0,85
	FOEX	-23,48	-22,93	-15,75	-26,24
	RMSE	1,75	1,73	1,93	1,77
D15m	viés	1,16	1,09	1,25	1,11
	EAM	1,42	1,42	1,55	1,44
	FOEX	27,90	24,59	25,69	25,14

Tabela 14: Métricas estatísticas (RMSE, viés, EAM) referentes aos quatro experimentos numéricos nos seis pontos de medição no entorno da CNAAA referentes a avaliação da direção do vento (°) em janeiro de 2016.

Pontos de Medição	Métricas Estatísticas	Direção do Vento			
		G2 - ASTER	G2 - GMTED2010	G1 - GMTED2010	G2 - SRTM
	RMSE	101,24	100,60	98,16	100,21
A10m	viés	-28,00	-33,51	-34,50	-28,27
	EAM	79,04	79,03	77,18	78,52
A60m	RMSE	101,39	99,20	96,80	100,75
	viés	-24,72	-24,03	-26,08	-24,25

	EAM	77,05	75,19	74,37	76,97
	RMSE	99,93	98,87	99,24	99,89
A100m	viés	-28,39	-29,91	-35,09	-27,32
	EAM	75,74	75,10	77,01	76,04
	RMSE	115,72	115,92	111,82	114,90
B15m	viés	-31,49	-32,71	-30,65	-29,56
	EAM	87,63	87,06	85,00	87,07
	RMSE	114,00	113,91	110,25	111,05
C15m	viés	-28,14	-25,52	-25,16	-25,60
	EAM	86,91	87,59	85,92	84,34
	RMSE	107,39	108,93	103,09	107,84
D15m	viés	-31,97	-32,96	-32,56	-30,75
	EAM	83,03	84,91	81,52	83,13

Tabela 15: Métricas estatísticas (RMSE, viés, EAM, FOEX) referentes aos quatro experimentos numéricos nos seis pontos de medição no entorno da CNAAA referentes a avaliação da intensidade do vento (m/s) em janeiro de 2016.

Pontos de Medição	Métricas Estatísticas	Intensidade do Vento			
		G2 - ASTER	G2 - GMTED2010	G1 - GMTED2010	G2 - SRTM
A10m	RMSE	0,93	0,93	0,96	0,89
	viés	0,04	0,15	0,22	0,01
	EAM	0,75	0,76	0,77	0,74
	FOEX	0,29	5,48	7,81	0,08
A60m	RMSE	1,18	1,20	1,39	1,17
	viés	-0,06	0,09	0,38	-0,11
	EAM	0,89	0,91	1,04	0,88
A100m	FOEX	-0,56	4,97	12,53	-1,64
	RMSE	1,23	1,24	1,45	1,22
	viés	-0,13	0,02	0,33	-0,19
	EAM	0,92	0,93	1,07	0,91

	FOEX	-4,74	0,52	9,39	-7,37
	RMSE	1,44	1,44	1,44	1,43
B15m	viés	-0,18	-0,20	-0,15	-0,23
	EAM	1,10	1,10	1,08	1,09
	FOEX	-3,15	-3,09	-2,95	-4,54
	RMSE	1,14	1,13	1,16	1,16
C15m	viés	-0,54	-0,47	-0,42	-0,56
	EAM	0,90	0,87	0,88	0,90
	FOEX	-23,83	-21,23	-19,01	-24,44
	RMSE	1,42	1,35	1,47	1,39
D15m	viés	0,54	0,52	0,66	0,52
	EAM	1,12	1,08	1,16	1,10
	FOEX	13,41	13,20	16,81	14,32

6.4 Campos espaciais

Nas figuras 52 e 53 são apresentados gráficos compostos por combinações entre campos de temperatura do ar em dois metros, vento em dez metros e topografia resultantes das simulações do modelo com a configuração G2 - GMTED2010 para os dias 5 e 6 de janeiro de 2016. Os campos espaciais referentes às demais topografias estão dispostos no Anexo III. Às 03h observa-se valores de temperatura mais baixos no continente e na Ilha Grande em relação aos simulados na Baía de Ilha Grande (Figura 52a e 53a). Destaca-se também os valores mais baixos de temperaturas nos picos das montanhas, que chegam a 12°C em alguns pontos mais altos. Este é um sinal de que o modelo representou de forma coerente os gradientes térmicos locais associados às diferenças de uso do solo e diferenças de elevação que foram fornecidas como condição de contorno. Em relação ao vento, nota-se a representação de ventos catabáticos e da brisa terrestre ao longo da costa através da divergência do vento no topo das montanhas em direção a regiões mais planas continentais, como Vale do Paraíba e as regiões mais baixas da costa dos estados do Rio de Janeiro e de São Paulo.

Com o decorrer do aquecimento diurno o campo de temperatura se torna mais aquecido. A porção continental do domínio apresenta valores mais altos nos vales e tem os seus valores máximos registrados no período da tarde. Nos campos referentes às 9h e 15h (Figs. 52b, 52c, 53b e 53c) é possível observar um padrão inverso no escoamento da superfície em relação a madrugada. Nestes horários o escoamento predominante é modulado pelas brisas marítima e pela brisa de vale. A intensidade dos ventos registrada no continente é ligeiramente mais intensa nos períodos da manhã e da tarde em relação aos simulados no período da madrugada. No horário das 21h (Figs. 52d e 53d), nota-se que a força do escoamento marítimo perdeu intensidade. No entanto, a brisa terrestre não está bem configurada neste horário. Como resultado, o modelo induz na linha de costa a predominância um escoamento de leste forçado pela circulação sinótica da ASAS.

O comportamento mais zonal do vento forçado pelo ASAS na região onde a linha de costa do Estado do Rio é voltada para Sul já foi reproduzido em simulações com o WRF (Figura 4.16, Dragaud, 2014) e com o ARPS (Paiva et al. 2014) em estudos anteriores realizados para o estado. Dentro da Baía de Ilha Grande esta característica mais zonal em relação observado na costa leste do estado possivelmente deve-se às forçantes de brisa, eixo predominante da ilha de costa e barreiras topográficas no continente. Além de ilustrar que os modelos representam o padrão geral do escoamento de brisa nos dois dias analisados. Pode-se levantar a hipótese de que as predominâncias de ventos de leste detectados nas rosas dos ventos em todas as torres na seção 5.1 e em trabalhos anteriores (Oliveira Junior, 2008) estão associados com o escoamento forçado pela componente sinótica.

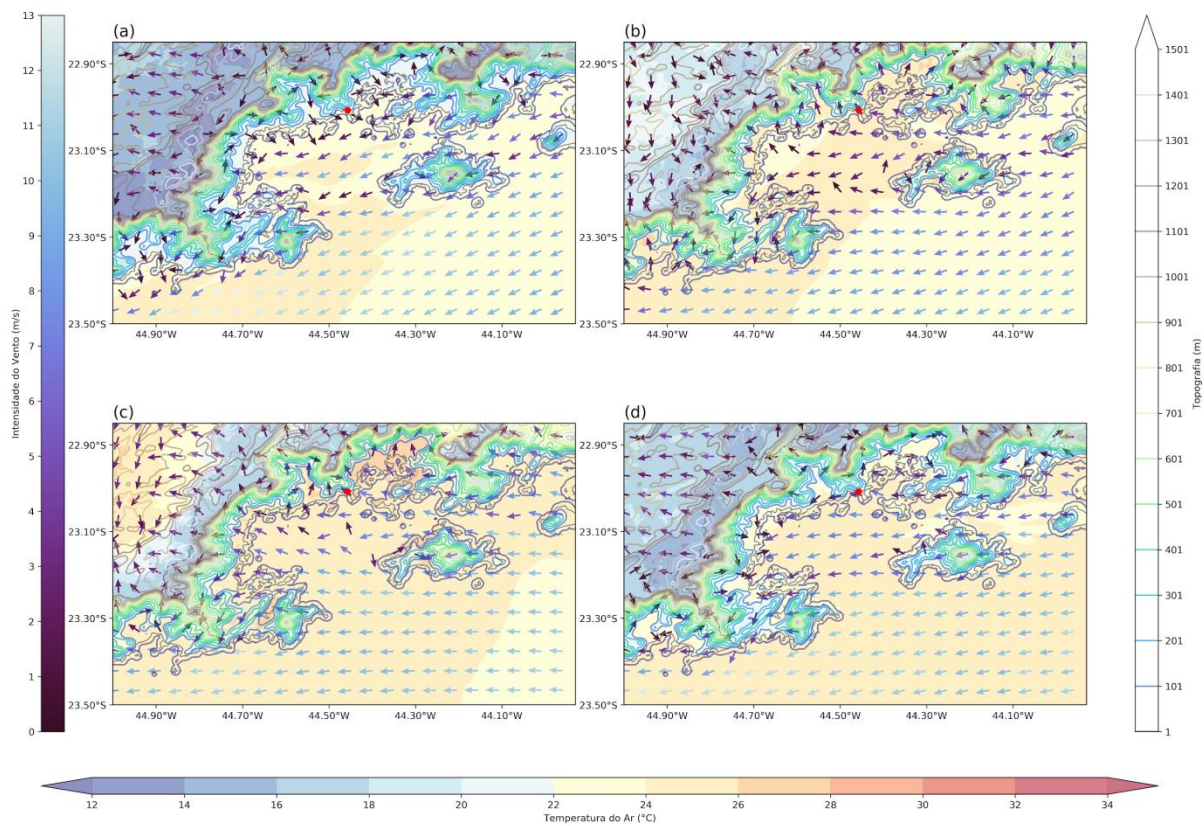


Figura 52: Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G2 - GMTED2010 para o dia 5 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAEA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h.

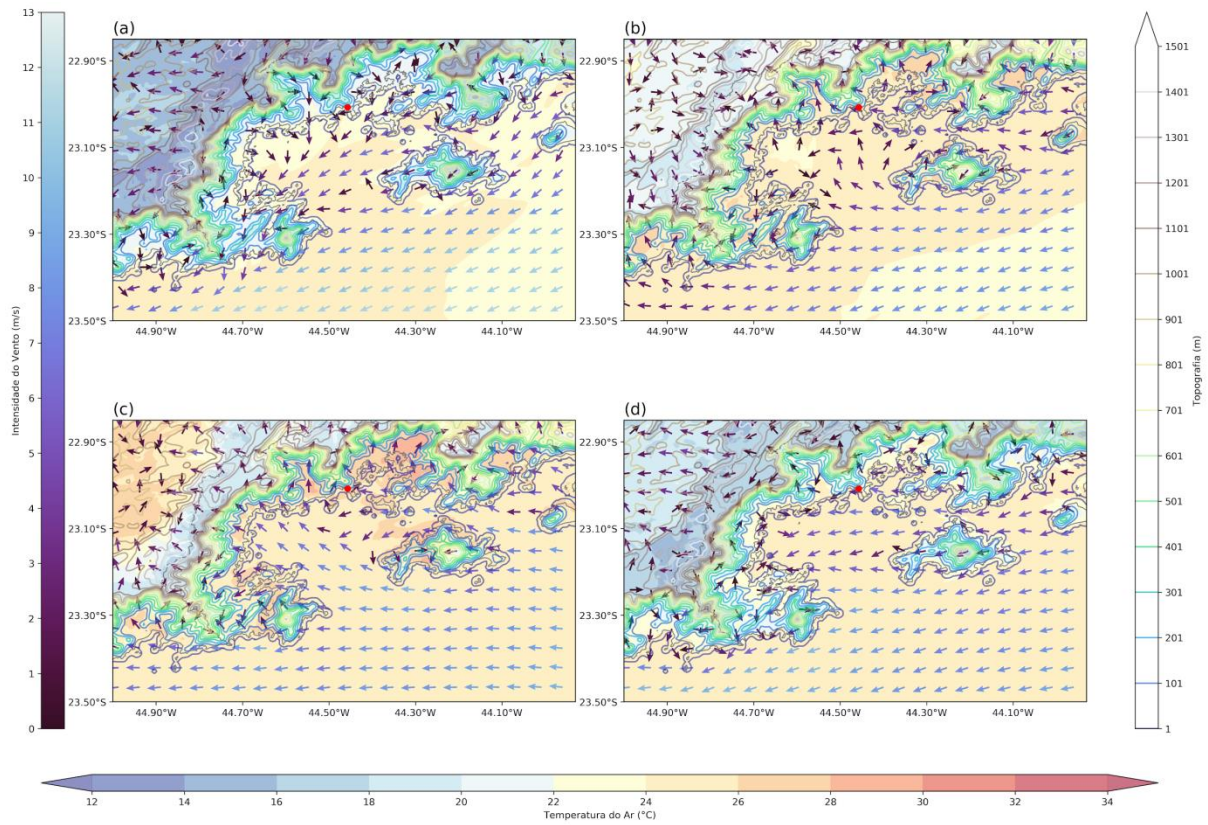


Figura 53: Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G2 - GMTED2010 para o dia 6 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAAA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h.

6.5 Meteogramas

Os resultados obtidos das simulações realizadas com as três diferentes bases topográficas foram comparados com os dados de vento observados. As comparações foram realizadas nos pontos de grade próximos da localização das torres (Figura 21).

Em relação aos dados de vento obtidos da torre A10m (Figura 54e), a direção do vento nos períodos da noite e madrugada foi predominantemente de N. Destaque para o dia 6, sendo a direção de NE nas primeiras horas da noite. Nos meteogramas, nas primeiras horas após o amanhecer há mudança na direção dos ventos com predominância nas direções S e SW nos períodos da manhã e tarde.

De forma geral, as quatro simulações representaram significativamente as predominâncias dos setores N e S nos períodos da manhã e da tarde do 1º dia. No entanto, a partir das 18h do dia 5 até às 6h do dia 6, o WRF não conseguiu representar a direção N característica do vento catabático na região. Neste período foi observada a ocorrência de ventos predominantes de N e com intensidade de aproximadamente 1.5 m.s-1, sendo que as três simulações caracterizaram a aceleração e persistência de ventos de W ao longo da noite e as direções variáveis ao longo da madrugada.

Nos períodos da manhã e tarde do dia 6, o WRF apresentou novamente a predominância de S, direção característica da circulação da brisa marítima e no início o giro do vento no período da noite. Nesta última faixa de horário o G2 - ASTER (Figura 54c) simulou os ventos de NE, enquanto os demais testes simularam ao longo da madrugada os ventos zonais entre E e ENE. Em relação à intensidade do vento (Figura 54), as simulações subestimaram os ventos (< 1 m.s-1) na primeira madrugada. No restante do período, as simulações apresentaram superestimativa nos períodos da manhã e da tarde.

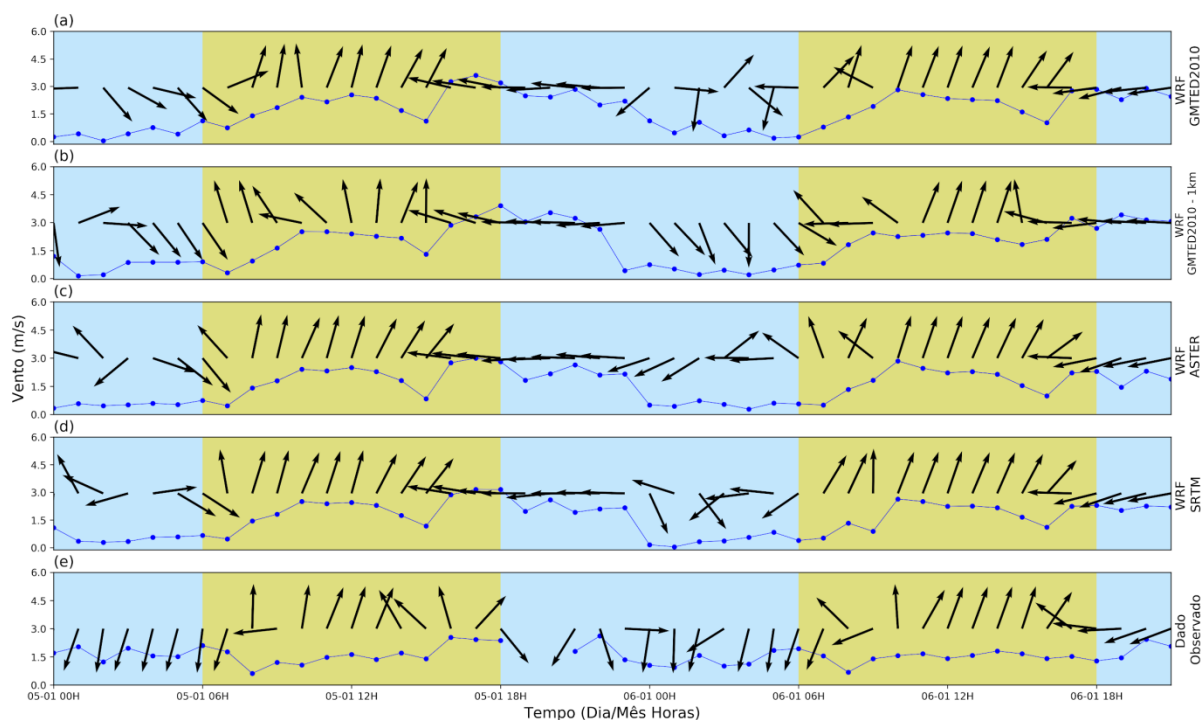


Figura 54: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre A10m.

Os dados simulados nas torres A60 e A100 apresentaram um padrão similar aos dados observados. As séries obtidas de A60m e A100m (Figuras 55e e 56e) registraram nas madrugadas dos dias 5 e 6 uma alternância nas direções predominantes e intensidade dos ventos fraca nestes períodos. Destaca-se que os ventos registrados ao longo das madrugadas em A100m foram caracterizados zonais do que os ventos registrados em A60m. Após, as primeiras horas da manhã a atuação da circulação da brisa marítima nas direções S e SE foram intensas e por horas consecutivas. O predomínio da componente S, somente é interrompido, após o pôr do sol, quando as forçantes do terreno passam a induzir os ventos de N/NE (noite do dia 5) e ENE/E (noite do dia 6). A observação de mais de uma direção predominante em A60m e A100m nos períodos da noite e madrugada corrobora com o observado nas rosas dos ventos destes dois pontos (seção 5.1).

Os quatro experimentos foram capazes de capturar a componente de brisa marítima, indicando um predomínio da componente meridional positiva em parte do período da manhã e à tarde. No período da madrugada, os modelos falham ao capturar as direções observadas nos dois dias na maior parte dos horários. É importante destacar que os experimentos capturam a desaceleração do vento neste período do dia e, de certa forma, representam que há uma alternância entre ventos de diferentes direções na madrugada. Tanto na noite do dia 5 quanto no dia 6, foram simulados ventos de E/ENE nos quatro experimentos do WRF. Assim, nenhum dos modelos foi capaz de representar bem a componente de norte dos ventos de N/NE observados na noite do dia 5, mas capturaram a predominância de E/ENE no dia 6.

Contudo, o fato de o WRF ter simulado a alternância entre ventos de diferentes direções durante a madrugada e ter capturado a componente de leste na noite do dia 6 não significa que a circulação local de montanha é bem resolvida. É necessário avaliar com mais cautela as forçantes que o modelo está considerando nestes horários.

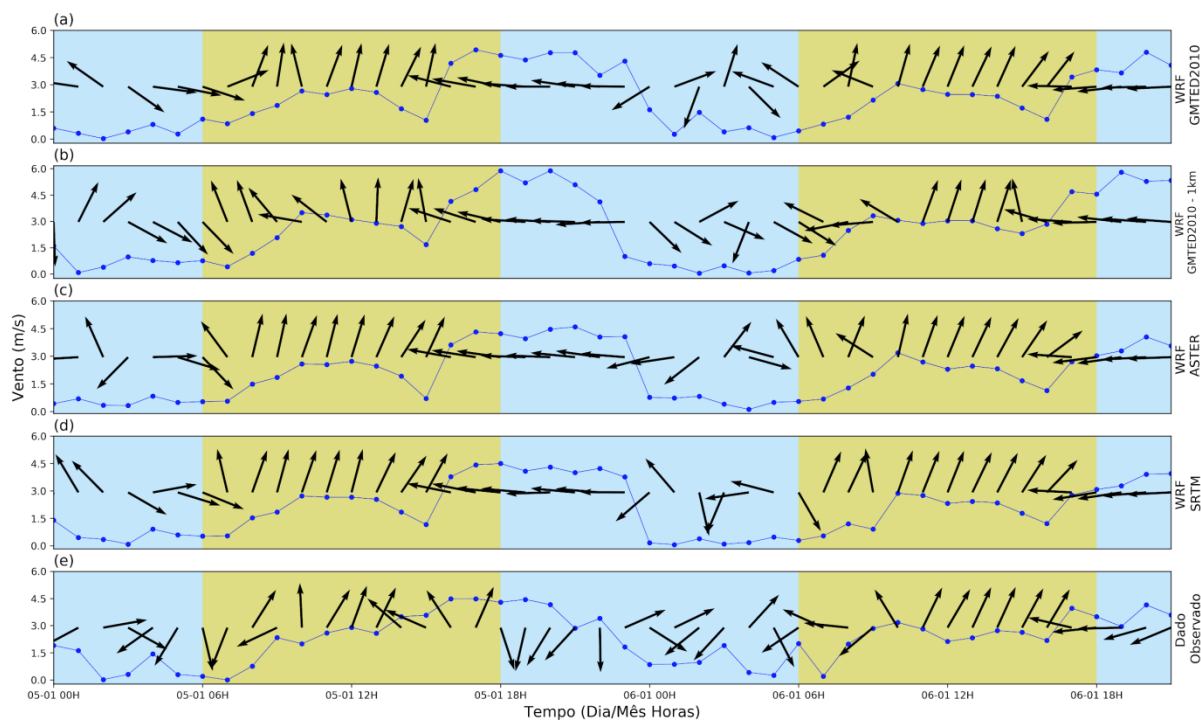


Figura 55: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre A60m.

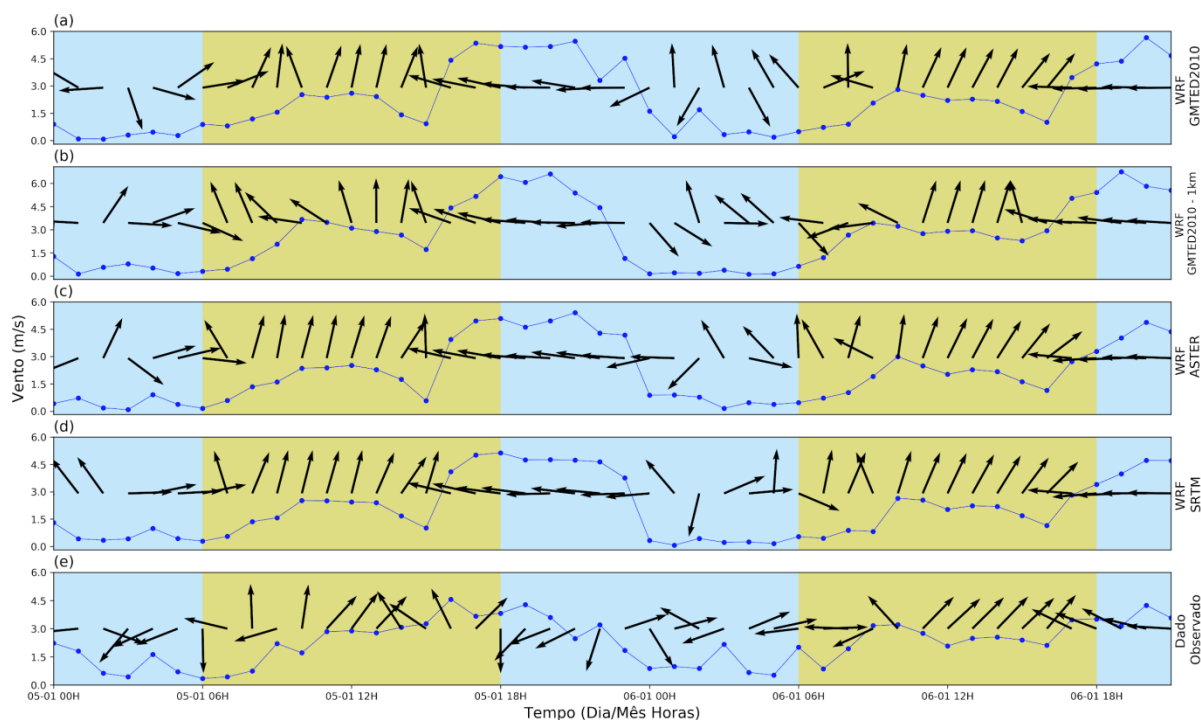


Figura 56: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre A100m.

As torres B e C (figuras 57 e 58) registraram nos dias um ciclo diurno marcado por três tipos padrões de escoamento. Na madrugada os ventos foram fracos com direções N e L, nas primeiras horas da manhã ocorreu o giro do vento seguido pela persistência de ventos de sul ligeiramente mais intensos até parte do período da tarde. Horas antes do fim da tarde e no período da noite a direção predominante foi zonal com ventos de leste que chegaram a ultrapassar 4m/s. Os três experimentos capturaram este padrão nos pontos representativos às duas torres.

Os dados de vento da torre D (figura 59) registraram na primeira madrugada direções predominantes que variaram entre leste e nordeste, direções induzidas pelo escoamento de brisa terrestre e pela circulação em escala sinótica. Com o avanço do período diurno as direções do vento observadas entre a manhã e à tarde foram SE, S e L. Enquanto a noite os ventos predominantes foram de S. O escoamento do vento segundo dia apresentou uma importante diferença em relação aos registros do dia 5. Na madrugada e na tarde do dia 6 foram registradas horas consecutivas com ventos de O e SO.

Conforme observado nos pontos anteriores, o modelo capturou a influência da componente brisa marítima na componente meridional positiva simulada nos períodos da manhã e tarde. Contudo, em nenhum dos três experimentos, os ventos nos períodos da noite e madrugada foram bem reproduzidos. Destaca-se também em nenhum dos experimentos foi capturada a interação na circulação do vento que resultou na contribuição da componente de O observada no dia 6 durante a madrugada e a manhã. A respeito da intensidade do vento, os dados registrados tiveram intensidade de até 2m/s. Nas simulações os ventos foram superestimados, especialmente nos períodos da manhã e da tarde.

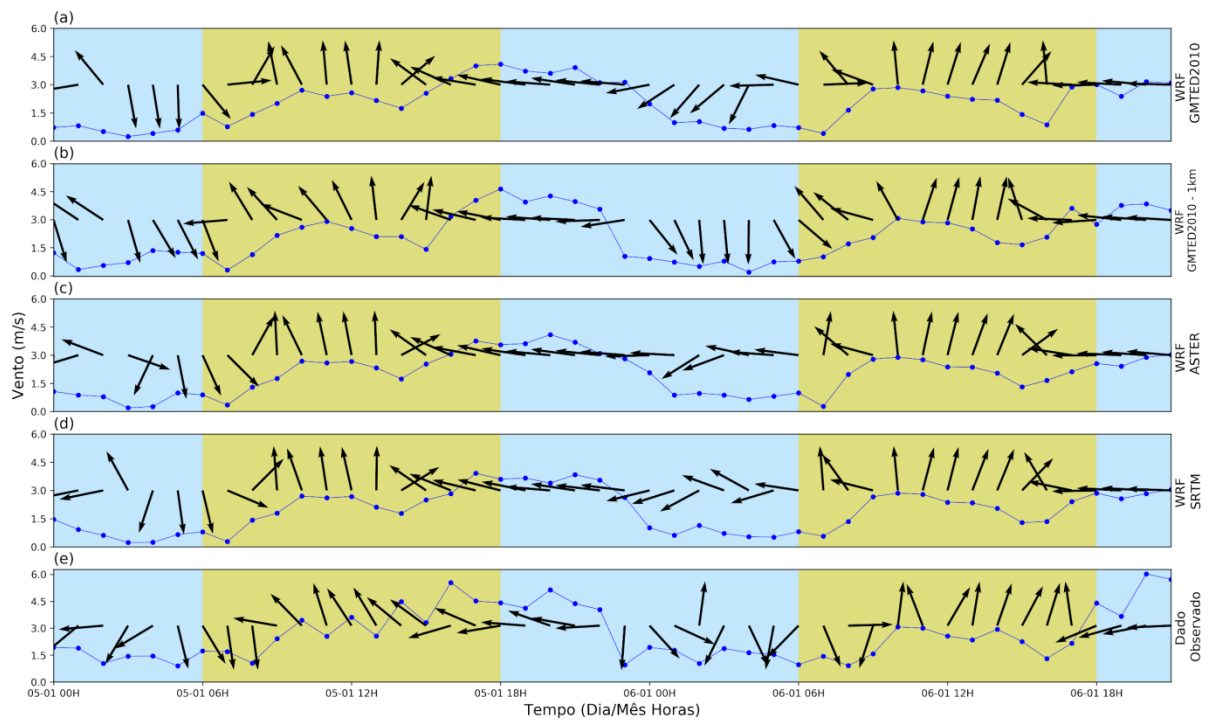


Figura 57: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre B15m.

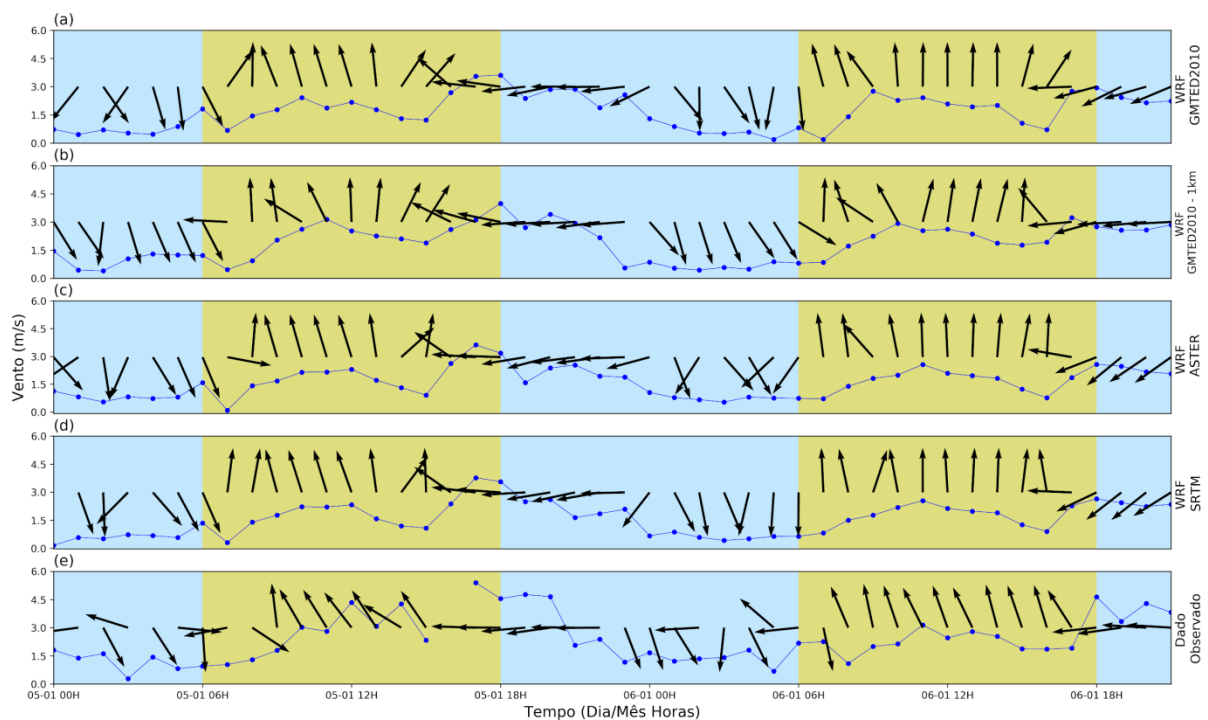


Figura 58: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre C15m.

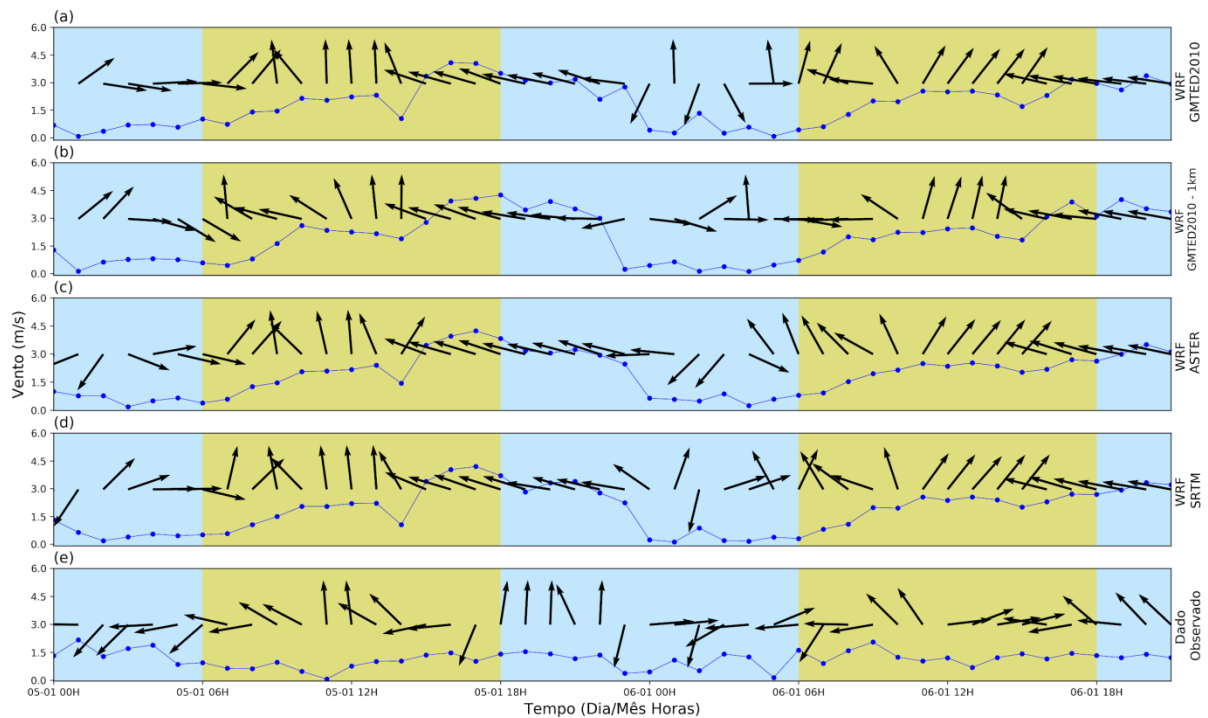


Figura 59: Séries temporais dos dados de direção e intensidade do vento observados e estimados (WRF) entre o período de 05 a 06 de janeiro de 2016. (a) G2 - GMTED2010, (b) G1 - GMTED2010, (c) G2 - ASTER, (d) G2 - SRTM e (e) Torre D15m.

Capítulo 7

7 Conclusões

Os dados observados da rede meteorológica da CNAAA em conjunto com a topografia da região são utilizados na caracterização observacional dos regimes predominantes do vento via análises médias, espectros de ondeleta e matriz de correlação. As direções predominantes do vento no entorno da CNAAA têm como principais forçantes atribuídas a combinação entre sistemas termicamente induzidos devido à heterogeneidade do (circulações de brisa vale/montanhas), a presença da Baía de Ilha Grande (circulações de brisa terra/mar) e a atuação dos sistemas sinóticos e forçantes mecânicas (desvios no escoamento forçados pela barreira topográfica).

Com relação à intensidade, duas classes são predominantes na CNAAA: calmaria e ventos entre 1-3 m.s-1. Além disso, para o aumento significativo dos ventos no período da tarde, devido a circulação da brisa marítima. Estes resultados corroboram com o padrão observado em estudos realizados anteriormente por Nicolli (1981), Oliveira-Junior (2008) e Figueiredo (2016).

A contribuição das forçantes em diferentes escalas na composição das direções do vento registradas é reforçada pelas energias nos espectros de potência de ondeleta, com significância estatística em períodos com escalas temporais em multiescala, da microescala (horas) até a escala sinótica (dias).

A análise visual da evolução diurna do padrão de sombreamento sobre as encostas do entorno da CNAAA sugeriu que nas primeiras horas da manhã esta forçante estaria associada com um escoamento de leste para oeste nos primeiros metros da superfície e com um escoamento compensatório alguns metros acima de oeste para leste. No final da tarde, esta forçante estaria associada com um escoamento de oeste para leste nos primeiros metros da superfície e com um escoamento compensatório leste para oeste, em níveis mais elevados. Destacou-se também a necessidade de uma investigação mais profunda acerca da sazonalidade do sombreamento sobre as encostas de região e importância que esta componente tem no escoamento resultante ao longo do ano.

Em relação à estabilidade estática, as classes de Pasquill frequentes são D (neutra), E (ligeiramente estável) e A (fortemente instáveis). Em relação ao parâmetro desvio padrão da direção do vento a classe A (fortemente instável) é destaque, seguida pelas classes D, B, C e E, que correspondem as situações neutras ou ligeiramente estáveis na região. Vale ressaltar que

tais resultados diferem dos estudos realizados anteriormente por Nicolli (1981), Oliveira Júnior (2008) e Oliveira Júnior et. al (2010), ao mostrar uma maior proporção na classe A. Destaca-se a necessidade de análises criteriosas com base em uma série histórica com maior período de tempo, a fim de se avaliar tal discrepância em relação aos estudos desenvolvidos por Nicolli (1981) e Oliveira Júnior (2008). No entanto, deve-se destacar que a região sofreu um processo de desmatamento e mudança no uso e ocupação do solo, devido ao início da construção da unidade de ANGRA III na CNAAA.

A matriz de correlação mostra correlação significativa entre A10m, A60m, A100m, B15m e C15m, reforçando que há similaridade no regime de vento observado nestes pontos. Contudo, os dados da torre D15m possuem menor similaridade em relação aos demais pontos de monitoramento na CNAAA, com correlações inferiores a 40% com a maior parte das demais variáveis. Isso reforça o padrão de escoamento distinto neste ponto em relação as demais torres meteorológicas.

Com relação aos resultados de simulação numérica, a variável HGT foi assimilada a partir das bases GMTED2010, ASTER e SRTM pelo WRF no domínio de 500m. Os campos de diferença entre esta variável nos 3 experimentos ilustraram que a mudança do dado de entrada para ASTER e SRTM trouxe um ganho na representação ao longo das encostas por volta de 100m (em módulo).

De maneira geral, as simulações capturaram satisfatoriamente o campo de temperatura, representando algumas características básicas da região, como os gradientes térmicos locais associados às diferenças de uso do solo e diferenças de elevação que foram fornecidas como condição de contorno. O padrão geral de escoamento na região é representado satisfatoriamente nos domínios resolutos entre os quatro experimentos nos períodos da madrugada, manhã e tarde. Destaque para predominância de ventos catabáticos e da circulação da brisa terrestre de menor intensidade durante a madrugada, seguida pela mudança na direção do escoamento com a representação do predomínio das circulações de brisas marítima e de vale entre as primeiras horas da manhã até o fim da tarde. Porém, no período da noite, horário das 21h, o vento predominante simulado ao longo da costa da Baía de Ilha Grande é de leste, devido a forçante sinótica da ASAS.

Na comparação entre as torres e os experimentos via meteogramas, destaca-se que as simulações representaram satisfatoriamente a componente da circulação da brisa marítima, com um predomínio da componente meridional positiva em parte do período da manhã e à tarde. No período da madrugada, há maior variabilidade nas direções registradas em ambos os

dados observados e simulados. Com isto, o modelo WRF apresenta neste período uma menor habilidade (maior erro) na representação horária da direção do vento na CNAAA, devido a uma limitação já documentada do modelo numérico em representar ventos mais fracos.

De forma geral, todos os experimentos apresentaram métricas estatísticas muito próximas. Destaca-se que na intensidade do vento, o refinamento da grade para 500m aprimorou a representação desta variável na maior parte dos pontos. No entanto, para a direção do vento o experimento G1 - GMTED2010, apresentou melhores resultados para as métricas RMSE, EAM e viés, indicando que o aumento da resolução e melhores condições de contorno não trouxeram necessariamente uma melhoria na representação da direção do vento no entorno da CNAAA.

O WRF foi uma ferramenta importante para a espacialização do campo de vento na CNAAA e pode subsidiar os relatórios de análise de segurança (RAS) e os programas de planejamento de segurança na CNAAA. Apesar de alguns erros de representação, o modelo WRF complementa a análise observacional acerca do escoamento predominante no local e, ainda contribui no entendimento da circulação atmosférica local.

7.1 Recomendações

Sugerem-se para trabalhos futuros as seguintes linhas de investigação:

- Realizar estudos de caso em períodos sob diferentes condições sinóticas, visando avaliar entre escalas e o escoamento resultante;
- Ampliar a série temporal histórica e, assim aprimorar a caracterização observacional com as técnicas de mineração de dados (data mining);
- Avaliar se há relação entre o escoamento nas torres da CNAAA e o escoamento em baixos níveis na escala sinótica simulado pelo dado de reanálise ERA-5. Seguindo a metodologia já aplicada em Whiteman e Doran (1993) e Oliveira Júnior (2008).
- Inclusão de outras variáveis no sistema integrado e, assim investigar diferentes cenários sob aspecto observacional e numérico;
 - Análise dos dados desta variável obtidos em estações meteorológicas de superfície através de ferramentas de mineração de dados;

- Realização de testes de sensibilidade com o modelo numérico a fim de avaliar a capacidade de representação do modelo e suas parametrizações em diferentes cenários.
- Adicionar dois experimentos numéricos com modelo WRF inserindo as bases SRTM e ASTER na grade com aninhamento de 9km x 3km x 1km.
- Aplicação do produto TSM MUR como condição de contorno na superfície do mar, visto que a TSM foi descontinuada em fevereiro de 2020;
- Aplicação de um acoplamento entre modelos oceânicos e atmosféricos e avaliação do ganho estatístico e eventual custo computacional deste método;
- Exploração da ferramenta Luz Solar disponível na plataforma Google Earth ou demais plataformas de dados georeferenciadas para estudos acerca dos efeitos de sombreamento ao longo das encostas da Serra do Mar;
- Aplicação de alguma técnica de clusterização nos dados de 2016 da rede meteorológica da CNAAA para identificação de padrões de ventos típicos. Sugere-se como referência os trabalhos de Kaufmann e Whiteman (1999) e Jiménez et. al (2009);
- Realização de testes de sensibilidade do modelo numérico a diferentes disposições de aninhamento de grade e combinação de parametrizações físicas. A análise visaria avaliar se os resultados das simulações estão convergidos e quantificar uma eventual fonte de discrepância entre a observação e a modelagem computacional devido a configuração de razão de decaimento no procedimento de aninhamento de grade no modelo. Além disso, permitiria avançar na análise da influência dos processos físicos subgrade nos resultados das simulações.
- Utilização do sistema de modelagem ambiental para análise dos processos de dispersão e deposição de radionuclídeos emitidos acidentalmente do complexo nuclear da CNAAA.

Referências Bibliográficas

- ABRAMS, M. e CRIPPEN R. **ASTER GDEM V3 (ASTER Global DEM)**. User Guide. California Institute of Technology v. 1, 2019.
- AGGARWAL, C. C. **Data mining: the textbook**. Tradução . [s.l.] Springer, 2015.
- AHRENS, C. D. **Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment**. Belmont, CA: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2009.
- AGUIAR, A. S.; SIMÕES FILHO, F. F. L.; ALVIM, A. C. M.; PIMENTEL, L. C. G.; MORAES, N. O. Impact Assessment of Beyond Design-Basis Accident:. In: Prasad, R.; Sivakumar, S.; Sharma, U.C., Org. **Application to Angra Dos Reis Nuclear Power Plants**, USA, Nuclear Science, Studium Press LLC, 4, 424-448, 2014.
- AGUIAR, A. S.. **Avaliação do Impacto de um Acidente Severo na Usina de Angra dos Reis com Liberação dos Radionuclídeos para a Atmosfera**. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) - Programa de Engenharia Nuclear, COPPE, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- AGUIAR, A.S; Filho, F. F. L. S.; ALVIM, A. C. M.; PIMENTEL, L. C. G.; MORAES, N. O. Station Blackout in unit 1 and analysis of the wind field in the region of Angra dos Reis. **Annals of Nuclear Energy**, v. 78, p. 93-103, 2015.
- AMS - American Meteorological Society. 2019. **Sigma Vertical Coordinate** Disponível em: <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Sigma_vertical_coordinate>. Acesso em: 11 de dezembro de 2019.
- ARTHUR, R. S.; et al Topographic Effects on Radiation in the WRF Model with the Immersed Boundary Method: Implementation, Validation, and Application to Complex Terrain. **Mon. Wea. Rev.**, vol. 146, p. 3277–3292, 2018. doi.org/10.1175/MWR-D-18-0108.1
- BARRY, R. G. **Mountain weather and climate**. Cambridge, Cambridge University Press, 2008.
- BRITO, T. T.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; LYRA, G. B.; GOIS, G.; Zeri, M. Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 129, p. 469-478, 2016.
- BELU, R.; KORACIN, D. Statistical and Spectral Analysis of Wind Characteristics Relevant to Wind Energy Assessment Using Tower Measurements in Complex Terrain. **Journal of Wind Energy**, v. 2013, p. 1–12, 2013.

BEYEA, J.; DECICCO, J. Re-estimating the noble gas releases from the Three Mile Island accident. **Health Phys**, 1992.

CHINO, M. et al. Preliminary estimation of release amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. **Journal of nuclear science and technology**, v. 48, n. 7, p. 1129-1134, 2011.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Normas para Escolha de Locais para Reatores de Potência**, Resolução 09/69, Rio de Janeiro, Brasil, 1969.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Programas de Meteorologia de Apoio de Usinas Nucleoelétricas (Portaria CNEN DEx-I 04/89)**, Norma CNEN NE 1.22, Brasil, 1989.

DANIELSON, J. J.; GESCH, D. B. **Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010)**. USGS Publications Warehouse. U.S. Geological Survey, 2011.

DERECZYNSKI, C.P.; MENEZES, W.F. Meteorologia da Bacia de Campos. In: Martins, R.P., Grossmann-Matheson, G.S., editores. **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, v. 2. p. 1-54, 2015.

DI SABATINO, S. Boundary-Layer Atmospheric Processes in Mountainous Terrain: Results from MATERHORN-X. **Boundary-Layer Meteorol.** vol. 159, p. 465–467, 2016. doi.org/10.1007/s10546-016-0131-3

DORAN, J. C., FAST J. D., and HOREL J. The VTMX 2000 campaign. **Bound.-Layer Meteor.** 83, 537–551, 2002.

DRAGAUD, I. C. D. V. **A Influência da Temperatura da Superfície do Mar na Simulação Computacional da Circulação Atmosférica na Região Costeira do Estado do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

DRAXLER, R. et al. World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. **Journal of environmental radioactivity**, v. 139, p. 172-184, 2015.

DRAGAUD, I. C. D. V. et al. The impact of SST on the wind and air temperature simulations: a case study for the coastal region of the Rio de Janeiro state. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 2018.

DOBRINKOVA, Wildfire Optimizations in Modeling and Calibrations for Bulgarian Test Cases. In: Fidanova, S., editora. Recent Advances in Computational Optimization. Springer, 1, 25-40, 2018.

DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. **J. Atmos. Sci.**, vol. 46, p. 3077–3107, 1989.

DUDHIA, J. A multilayer soil temperature model for MM5. **Preprints - Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop**, Boulder, CO, PSU/NCAR, p. 49–50, 1996.

Energy, 2020. **Advantages and Challenges of Wind Energy**. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy>

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017—Ano Base 2016**, Rio de Janeiro: EPE, 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. NOTA TÉCNICA PR 04/18, Rio de Janeiro: EPE, 2018.

FARR, T. G. e KOBRICK, M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. **Eos Trans. AGU**, vol. 81, no. 48, p. 583– 585, 2000. 10.1029/EO081i048p00583.

FERNANDO, H. J. S.; PARDYJAK, E. R.; DI SABATINO, S.; *et al.* The MATERHORN: Unraveling the Intricacies of Mountain Weather. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 96, no. 11, p. 1945–1967, 2015.

FARGE, M. Wavelet Transforms And Their Applications To Turbulence. **Annual Review of Fluid Mechanics**, vol. 24, no. 1, p. 395–457, 1992.

FIGUEIREDO, J. B. A.; CHAN, C. S.; DEREZYNSKI, C. P.; *et al.* Climatologia no Entorno da Central Nuclear de Angra dos Reis, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 31, no. 3, p. 298–310, 2016.

GLOBO, 2020. **Maiores acidentes nucleares da história**. Disponível em: <http://educacao.globo.com/artigo/maiores-acidentes-nucleares-da-historia.html> Acesso em: 10 de novembro de 2020.

GÖNDÖCS, J.; *et. al.* Urban heat island mesoscale modelling study for the Budapest agglomeration area using the WRF model. **Urban Climate**, vol. 21, p. 66-86, 2017. doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.005

GUIMARÃES, J. M. **Circulações locais na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Aspectos observacionais**. 2014. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

GRUBIŠIĆ, V.; DOYLE, J. D.; KUETTNER, J.; *et al.* The Terrain-Induced Rotor Experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 89, no. 10, p. 1513–1534, 2008.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI J. **Data mining: concepts and techniques**. [s.l.]: Elsevier, 2011.

HANNA, S. R. Confidence limits for air quality model evaluations, as estimated by bootstrap and jackknife resampling methods. **Atmospheric Environment (1967)**, vol. 23, no. 6, p. 1385–

1398, 1989.

HATCH, M. C. et al. Cancer near the Three Mile Island nuclear plant: radiation emissions. *American Journal of Epidemiology*, v. 132, n. 3, p. 397-412, 1990.

HONG, S-Y.; NOH Y. e Dudhia, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. **Mon. Wea. Rev.**, vol. 134, p. 2318–2341, 2006.

IAEA - International Atomic Energy Agency. 1968. Application of Meteorology to Safety at Nuclear Plants. Disponível em:

https://gnssn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_029_1968.pdf

IAEA - International Atomic Energy Agency. 2011. **Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations**. Disponível em: <<https://www.iaea.org/publications/8635/meteorological-and-hydrological-hazards-in-site-evaluation-for-nuclear-installations>>.

IAEA - International Atomic Energy Agency. 2012. **Nuclear Technology Review 2012**. Disponível em: <<http://www.iaea.org/Publications/Reports/>>.

IAEA - International Atomic Energy Agency. 2019. **Safety Standards** Disponível em: <<https://www.iaea.org/resources/safety-standards>>. Acesso em: 26 de outubro de 2019

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Angra dos Reis**. cidades.ibge.gov.br. 2018. Disponível em: <[ibge.gov.br/brasil/rj/angra-dos-reis/panorama](http://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/angra-dos-reis/panorama)>.

JACKSON, P. L.; MAYR, G.; VOSPER, S. Dynamically-Driven Winds. In: CHOW, F.; DeWEKKER, S. F. J. and SNYDER B. (Orgs.). **Mountain Weather Research and Forecasting**. Dordrecht: Springer, 2013.

JAMMALAMADAKA, S. R. and SARMA, Y. R. A correlation coefficient for angular variables. In: Matusita, K. (ed). **Statistical theory and data analysis II**. Elsevier (North Holland), 1988.

JAMMALAMADAKA, S. R.; LUND, U. J. The effect of wind direction on ozone levels: a case study. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 13, n. 3, p. 287-298, 2006.

JIANG, Q.; SMITH, Ronald B. and DOYLE, J. The nature of the mistral: Observations and modelling of two MAP events. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, vol. 129, no. 588, p. 857–875, 2003.

JIANG, Q.; DOYLE, J. D. and SMITH, R. B. Blocking, descent and gravity waves: Observations and modelling of a MAP northerly föhn event. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, vol. 131, no. 606, p. 675–701, 2005.

JIMÉNEZ, P. A.; GARCÍA-BUSTAMANTE, E.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; *et al.* Surface Wind Regionalization in Complex Terrain. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, vol. 47, no. 1, p. 308–325, 2008.

JIMÉNEZ, P. A.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; MONTÁVEZ, J. P.; *et al.* Climatology of wind patterns in the northeast of the Iberian Peninsula. **International Journal of Climatology**, vol. 29, no. 4, p. 501–525, 2009.

JIMÉNEZ, P. A., *et al.* Surface Wind Regionalization over Complex Terrain: Evaluation and Analysis of a High-Resolution WRF Simulation. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, vol. 49, p. 268–287, 2010. doi.org/10.1175/2009JAMC2175.1.

JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J. Improving the Representation of Resolved and Unresolved Topographic Effects on Surface Wind in the WRF Model. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, vol. 51, p. 300–316, 2012. doi.org/10.1175/JAMC-D-11-084.1

JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; *et al.* An evaluation of WRF's ability to reproduce the surface wind over complex terrain based on typical circulation patterns. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, vol. 118, no. 14, p. 7651–7669, 2013.

JIMÉNEZ, P. A. e DUDHIA, J. On the Ability of the WRF Model to Reproduce the Surface Wind Direction over Complex Terrain. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, vol. 52, p. 1610–1617, 2013. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0266.1.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. **J. Atmos. Sci.** vol. 47, p. 2784–2802, 1990.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain–Fritsch scheme. The Representation of Cumulus Convection in Numerical Model. **Meteor. Monogr. Amer. Meteor. Soc.**, no. 46, p. 165–170, 1993.

KALTHOFF, N. *et al.* The energy balance, evapo-transpiration and nocturnal dew deposition of an arid valley in the Andes. **Journal of Arid Environments**, v. 65, n. 3, p. 420–443, 2006.

KAUFMANN, P. and WHITEMAN, C. D. Cluster-Analysis Classification of Wintertime Wind Patterns in the Grand Canyon Region. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 38, no. 8, p. 1131–1147, 1999.

LEÃO, I.L.B.; PEREIRA, J.F. **Atividades Desenvolvidas para Complementação dos Estudos Micrometeorológicos do Sítio de Angra dos Reis**. Relatório Técnico 551.1 - L 433a, Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1976.

LEÃO, I. L. B. **Cenários Ambientais em Centrais Nucleares: Integração da Meteorologia Local com outros fatores Ambientais por meio do Sistema de Informações Geográficas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), IME, Rio de Janeiro, 1998.

- LEE, J. K. et al. Assessment of wind characteristics and atmospheric dispersion modeling of ¹³⁷Cs on the Barakah NPP area in the UAE. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 46, n. 4, p. 557-568, 2014.
- LEHNER, M.; WHITEMAN, C. D. and HOCH, S. W. Diurnal Cycle of Thermally Driven Cross-Basin Winds in Arizona's Meteor Crater. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, vol. 50, no. 3, p. 729–744, 2011.
- LEHNER, M.; WHITEMAN, C. D.; HOCH, S. W.; *et al.* The METCRAX II Field Experiment: A Study of Downslope Windstorm-Type Flows in Arizona's Meteor Crater. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 97, no. 2, p. 217–235, 2016.
- LIN, Y-L.; FARLEY, R. D. e ORVILLE, H. D. Bulk parameterization of the snow field in cloud model. **J. Climate Appl. Meteor.** vol. 22, p. 1065–1092, 1983.
- LIU, Y.; LIANG, X. S. and WEISBERG, R. H. Rectification of the bias in the Wavelet Power Spectrum. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, vol. 24, no. 12, p. 2093–2102, 2007.
- LORENTE-PLAZAS, R.; MONTÁVEZ, J. P.; JIMENEZ, P. A.; *et al.* Characterization of surface winds over the Iberian Peninsula. **International Journal of Climatology**, vol. 35, no. 6, p. 1007–1026, 2014.
- LU, W. et al. WRF simulation over complex terrain during a southern California wildfire event. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D5, 2012.
- LUNDQUIST, K. A.; CHOW, F. K. e LUNDQUIST, J. K. An immersed boundary method for the Weather Research and Forecasting Model. **Mon. Wea. Rev.**, vol. 138, p. 796–817, 2010. doi.org/10.1175/2009MWR2990.1
- MARDIA, K. V. Linear-circular correlation coefficients and rhythmometry. **Biometrika**, p. 403-405, 1976.
- MANFRÉ, L. A. et al. Landslide hazard mapping near the Admiral Álvaro Alberto nuclear complex. **Bulletin of Geodetic Sciences**, Vol. 24, no.1, p. 125-141, 2018.
- MANFRÉ, L.A., CRUZ B. B. e QUINTANILHA, J. A. Urban Settlements and Road Network Analysis on the Surrounding Area of the Almirante Alvaro Alberto Nuclear Complex, Angra dos Reis, Brazil. **Appl. Spatial Analysis**, 13, 209–221, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12061-019-09299-2>
- MARTANO, P. e PASCHOA, A. Dispersion Modelling Studies: the 1984 Experiment in Angra dos Reis. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, Vol.12, no. 4, 1997
- MLAWER, E. J.; et. al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **J. Geophys. Res.**, vol. 102, p. 16663–16682, 1997.

MONAGHAN, A. J.; et. al. Overlapping Interests: The Impact of Geographic Coordinate Assumptions on Limited-Area Atmospheric Model Simulations. **Mon. Wea. Rev.** vol. 141, p. 2120–2127, 2013. doi.org/10.1175/MWR-D-12-00351.1

NICOLLI, D. **Persistência das condições de difusão atmosférica em Angra dos Reis**, dezembro, Relatório Técnico da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) -n° 02/81, p. 41, 1981.

NICOLLI, D. **Correlação de direções de vento em Angra e correlação de gradiente vertical de temperatura com amplitude de variação da direção do vento**, agosto, Relatório Técnico da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) -n° 02/82, p. 66, 1982.

NICOLLI, D. **Primeira campanha de experimento de difusão atmosférica na área da Central Nuclear de Angra dos Reis – análise de resultados**, julho, Relatório Técnico da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) - n° 133, p. 100, 1986.

NUNALEE, C; et. al. High resolution numerical modeling of mesoscale island wakes and sensitivity to static topographic relief data. **Geoscientific Model Development Discussions**. v. 8, p. 2973-2990, 2015. 10.5194/gmdd-8-2973-2015.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F., PIMENTEL, L.C.G., LANDAU, L. Avaliação da Altura da Camada Limite Atmosférica na região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto sob diferentes forçantes sinóticas via MM5. **Ciência e Natura**, v.4, p.353-356, 2005.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.F. **Estudo da Camada Limite Atmosférica na Região de Angra dos Reis Através do Modelo de Mesoescala MM5 e Dados Observacionais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; PIMENTEL, L.C.G.; LANDAU, L. Critérios de Estabilidade Atmosférica para a Região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis-RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 270-285. 2010.

OPEN WILDLAND FIRE MODELING COMMUNITY, 2020. **WPS with GeoTIFF support**. Disponível em: https://www.openwfm.org/wiki/WPS_with_GeoTIFF_support

PAPANASTASIOU, D. K.; MELAS, D.; LISSARIDIS, I. Study of wind field under sea breeze conditions; an application of WRF model. **Atmospheric Research**, v. 98, n. 1, p. 102-117, 2010.

PERSSON, C.; RODHE, H.; DE GEER, L. The Chernobyl accident: A meteorological analysis of how radionuclides reached and were deposited in Sweden. **Ambio**, p. 20-31, 1987.

PIMENTEL, L.C.G.; MARTON, E.; SOARES da SILVA, M.; JOURDAN, P. Caracterização do regime de vento em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.19, n.2, pp. 121-132. 2014.

PRICE, J. D.; VOSPER, S.; BROWN, A.; *et al.* COLPEX: Field and Numerical Studies over a Region of Small Hills. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 92, no. 12, p. 1636–1650, 2011.

PUHAKKA, T.; *et al.* Meteorological Factors Influencing the Radioactive Deposition in Finland after the Chernobyl Accident. **J. Appl. Meteor.**, 29, 813–829, 1990. doi.org/10.1175/1520-0450(1990)029<0813:MFITRD>2.0.CO;2.

QUEIROZ A. R.; FARIA V. A. D.; LIMA L. M. M. LIMA J. W. M. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil. **Renew Energy**. vol.133, pp. 873–882, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.050>

ROTACH, M. W.; CALANCA, P.; GRAZIANI, G.; *et al.* Turbulence Structure and Exchange Processes in an Alpine Valley: The Riviera Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 85, no. 9, p. 1367–1386, 2004

SKAMAROCK W. C. *et al.* **A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4**. NCAR Technical Note. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 2019.

SAIDE, P. E. *et al.* Forecasting urban PM10 and PM2.5 pollution episodes in very stable nocturnal conditions and complex terrain using WRF–Chem CO tracer model. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 16, p. 2769–2780, 2011.

SILVA, C.; LANDAU, L.; PIMENTEL, L. C. G.; *et al.* GIS as a Decision Support Tool in the Area of Influence of the Nuclear Complex Angra dos Reis, Brazil. **Journal of Geographic Information System**, vol. 05, no. 01, p. 13–23, 2013a.

SILVA, C. ; PIMENTEL, L. C. G. ; LANDAU, Luiz ; HEILBRON FILHO, P. F. L. Geo-Environmental aspects integrated into GIS database to support emergency planning of the nuclear power plant Angra do Reis-RJ, Brazil. **International Journal or Advancement in Remote Sensing, GIS and Geography**, v. 1, p. 18, 2013b.

SILVA, C. **Modelagem Lagrangeana da Dispersão Atmosférica de Radionuclídeos e Sistemas de Informação Geográfica como Ferramentas de Suporte ao Planejamento de Emergência na Área de Influência do Complexo Nuclear de Angra dos Reis – RJ**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

Silva, C.; Pimentel, L. C. G; Landau, L.; Heilbron Filho, P. F. L.; Gobbo, F. G. R.; Sousa, P. J. Supportive elements to the decision-making process in the emergency planning of the Angra dos Reis Nuclear Power Complex, Brazil. **Environ Earth Sci**, 76, 133-149, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6450-y>

SILVA C. et al; Fatores de Vulnerabilidade ao Planejamento de Emergência do Complexo Nuclear de Angra dos Reis – RJ. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, vol. 41, no. 2, p. 448-460, 2018a.

Silva, C., et al. Computational Decision Support Systems Applied to Decision-Making Process in the Emergency Planning of the Angra dos Reis Nuclear Power Complex - Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, 3, 292-304, 2018b.

SOARES, P.S. **Caracterização da Precipitação na Região de Angra dos Reis e a sua Relação com a Ocorrência de Deslizamentos de Encostas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SOARES DA SILVA, M. **Investigação dos processos de formação e destruição do ozônio troposférico na RMRJ: Abordagem teórica e numérica**. 2019. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Programa de Engenharia Mecânica, COPPE, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SOLTANZADEH, I.; et al. Assessment of the ARW-WRF model over complex terrain: the case of the Stellenbosch Wine of Origin district of South Africa. **Theor Appl Climatol**. 129, 1407, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1857-z>

STEINHAUSER, G.; BRANDL, A.; JOHNSON, T. E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: a review of the environmental impacts. **Science of the total environment**, v. 470, p. 800-817, 2014.

STOHL, Andreas et al. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. **Atmos. Chem. Phys.**, 12, 2313–2343, 2012

SZABÓ, G.; SINGH, S. K.; SZABÓ, S. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases, **Physics and Chemistry of the Earth**, 2015. [dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.06.003](https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.06.003)

TAVARES, O. A. P. Fissão nuclear: energia farta disponível para a humanidade. **Ciência e Sociedade**, 3 (2), 1-34, 2015.

TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, **J. Geophys. Res.** vol. 106, p. 7183–7192, 2001. doi:10.1029/2000JD900719.

TORRENCE, C. and COMPO G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of American Meteorological Society**, 79, 61-78, 1998.

USGS - United States Geological Survey. 2020. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Disponível em:

<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: Versão digital, 2006.

VELLOSO, M. F. A.; MARTINS, F. R. PEREIRA, E. B. Case study for hybrid power generation combining hydro- and photovoltaic energy resources in the Brazilian semiarid region. **Clean Techn Environ Policy**. vol. 21, no. 5, pp 941–952,2019.

<https://doi.org/10.1007/s10098-019-01685-1>

WAHLEN, M. et al. Radioactive plume from the Three Mile Island accident: xenon-133 in air at a distance of 375 kilometers. **Science**, v. 207, n. 4431, p. 639-640, 1980.

WALKER, J. **A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications**. Chapman & Hall, 2008. doi.org/10.1201/9781584887461.

WANG W. 2017. Considerations for Designing an Numerical Experiment [PowerPoint slides]. Disponível em:

<https://www.climatescience.org.au/sites/default/files/WRF_best-practices.pdf>. Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

WENG, H. and LAU, K-M. Wavelets, Period Doubling, and Time–Frequency Localization with Application to Organization of Convection over the Tropical Western Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, vol. 51, no. 17, p. 2523–2541, 1994.

WHITEMAN, C. D. Observations of Thermally Developed Wind Systems in Mountainous Terrain. In: BLUMEN W. (Org.) **Atmospheric Processes Over Complex Terrain**. Boston: American Meteorological Society., 1990. p. 5-42.

WHITEMAN, C. D. and DORAN, J. C. The Relationship between Overlying Synoptic-Scale Flows and Winds within a Valley. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 32, no. 11, p. 1669–1682, 1993.

WHITEMAN, C. D. **Mountain meteorology: fundamentals and applications**. [s.l.]: Oxford University Press, 2000.

WEIGEL, A. P.; CHOW, F. K. and ROTACH, M. W. On the nature of turbulent kinetic energy in a steep and narrow Alpine valley. **Boundary-Layer Meteorology**, vol. 123, no. 1, p. 177–199, 2006.

WHITEMAN, C. D.; MUSCHINSKI, A.; ZHONG, S.; *et al.* Metcrax 2006. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 89, no. 11, p. 1665–1680, 2008

WHITEMAN, C. D. *et al.* Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley. **Atmospheric Environment**, v. 94, p. 742–753, 2014.

WILKS, Daniel S. **Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction**. [s.l.]: Academic Press, Elsevier, 2006.

WMO - World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). 7th edn. Geneva, 2014.

YOSHIKANE, T.; YOSHIMURA, K. Dispersion characteristics of radioactive materials estimated by wind patterns. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1-9, 2018.

ZÄNGL, G. An Improved Method for Computing Horizontal Diffusion in a Sigma-Coordinate Model and Its Application to Simulations over Mountainous Topography. **Mon. Wea. Rev.**, vol. 130, p. 1423–1432, 2002.
doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1423:AIMFCH>2.0.CO;2

ZARDI, D. and WHITEMAN, C. D. Diurnal Mountain Wind Systems. In: CHOW, F. K.; DeWEKKER, S. F. J. and SNYDER B. (Orgs.). **Mountain Weather Research and Forecasting**. Berlin: Springer, 2012.

ZHAI, P. *et al.* Global Warming of 1.5 OC: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018.

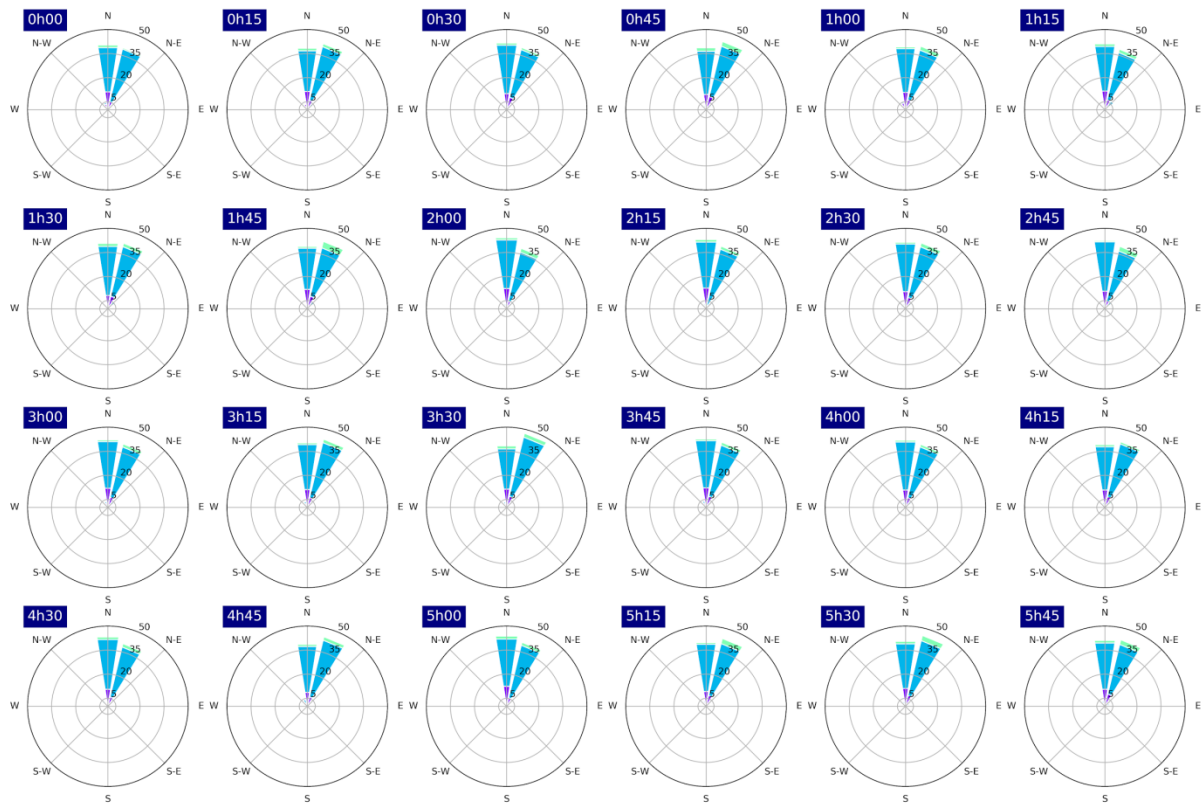
ZHANG, H.; PU, Z. and ZHANG, X. Examination of Errors in Near-Surface Temperature and Wind from WRF Numerical Simulations in Regions of Complex Terrain. **Weather and Forecasting**, vol. 28, no. 3, p. 893–914, 2013.

ZHONG, S. e FAST, J.. An Evaluation of the MM5, RAMS, and Meso-Eta Models at Subkilometer Resolution Using VTMX Field Campaign Data in the Salt Lake Valley. **Monthly Weather Review**, vol. 131, no. 7, p. 1301–1322, 2003

ZHONG, S.; WHITEMAN, C. D. and BIAN, X. Diurnal Evolution of Three-Dimensional Wind and Temperature Structure in California's Central Valley. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 43, no. 11, p. 1679–1699, 2004

Anexo I

Neste anexo constam rosas dos ventos elaboradas com os dados de vento medidos nas quatro torres da rede meteorológica da CNAAA no ano de 2016. Durante este período os dados foram disponibilizados com uma resolução temporal de 15 minutos, e a percentagem de dados válidos medidos foi superior a 99% em todos os pontos.



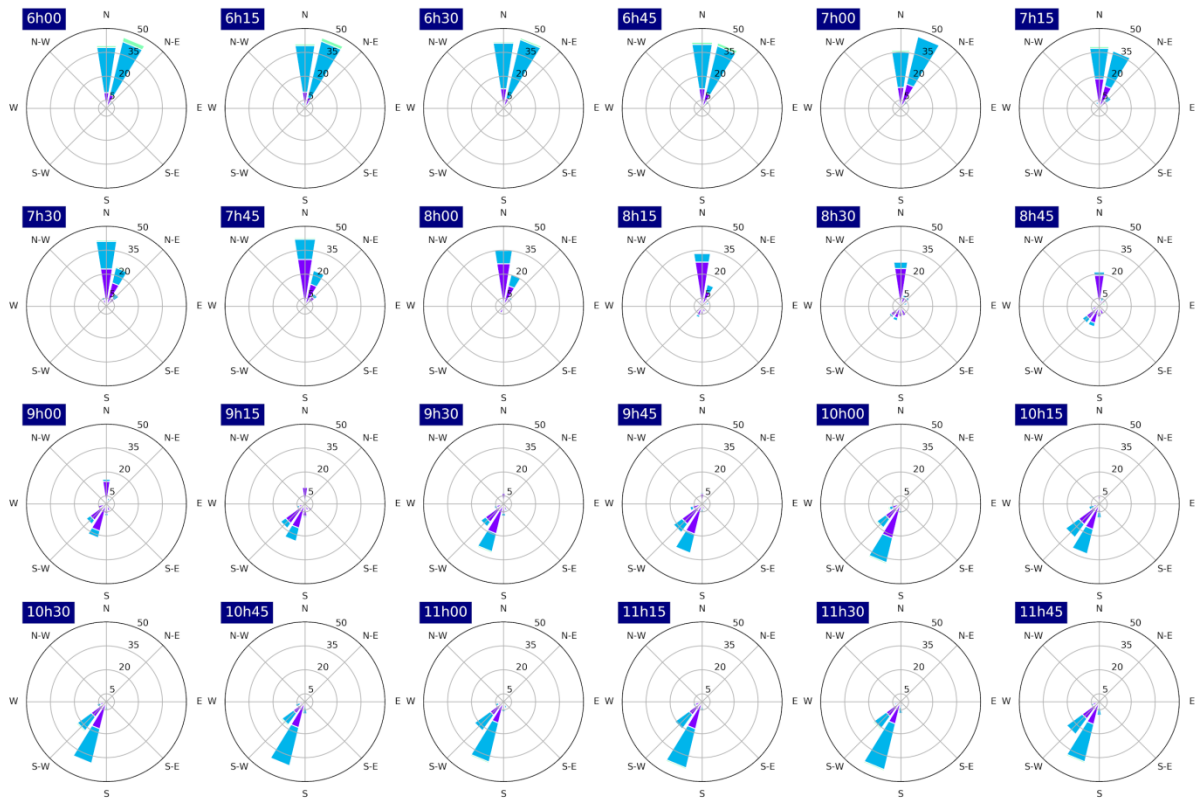
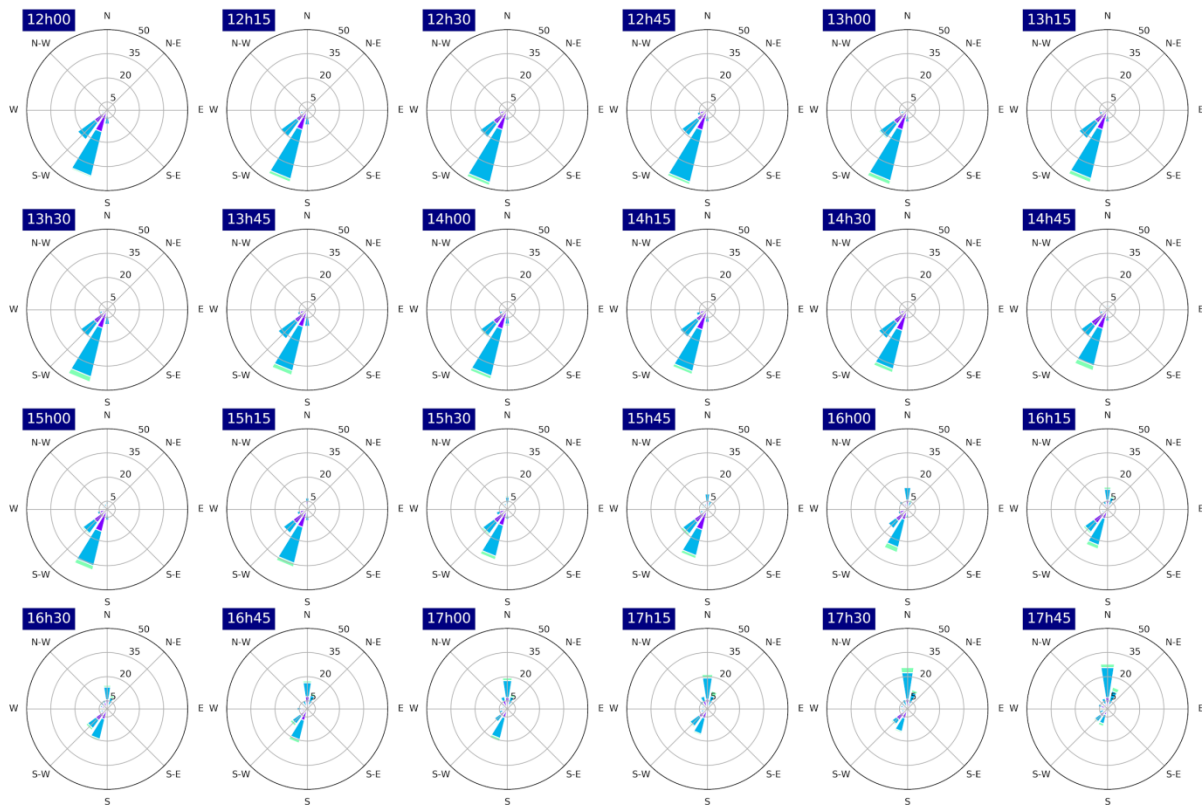


Figura 1: Distribuição de frequência dos ventos para a torre A - 10m para os horários de 00h00 à 23h45 a cada 15 minutos.



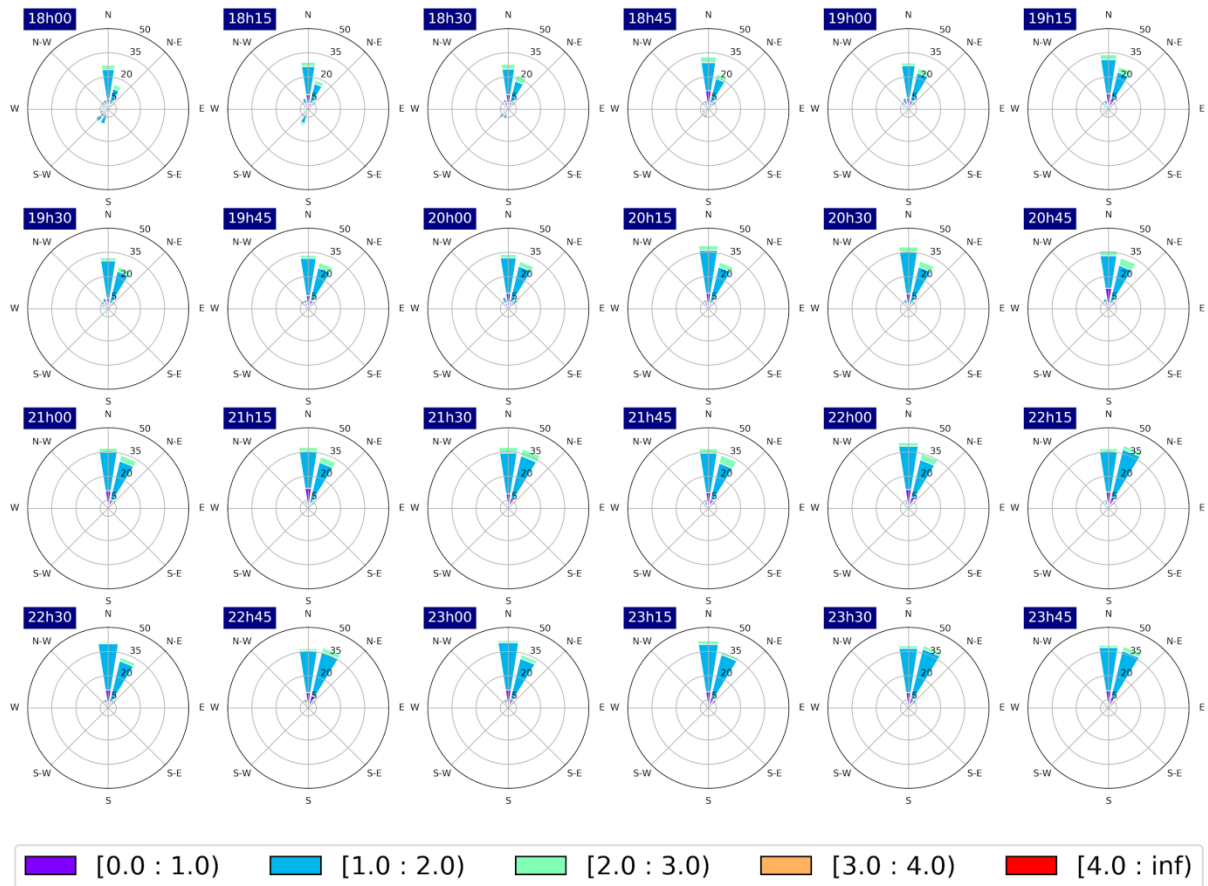
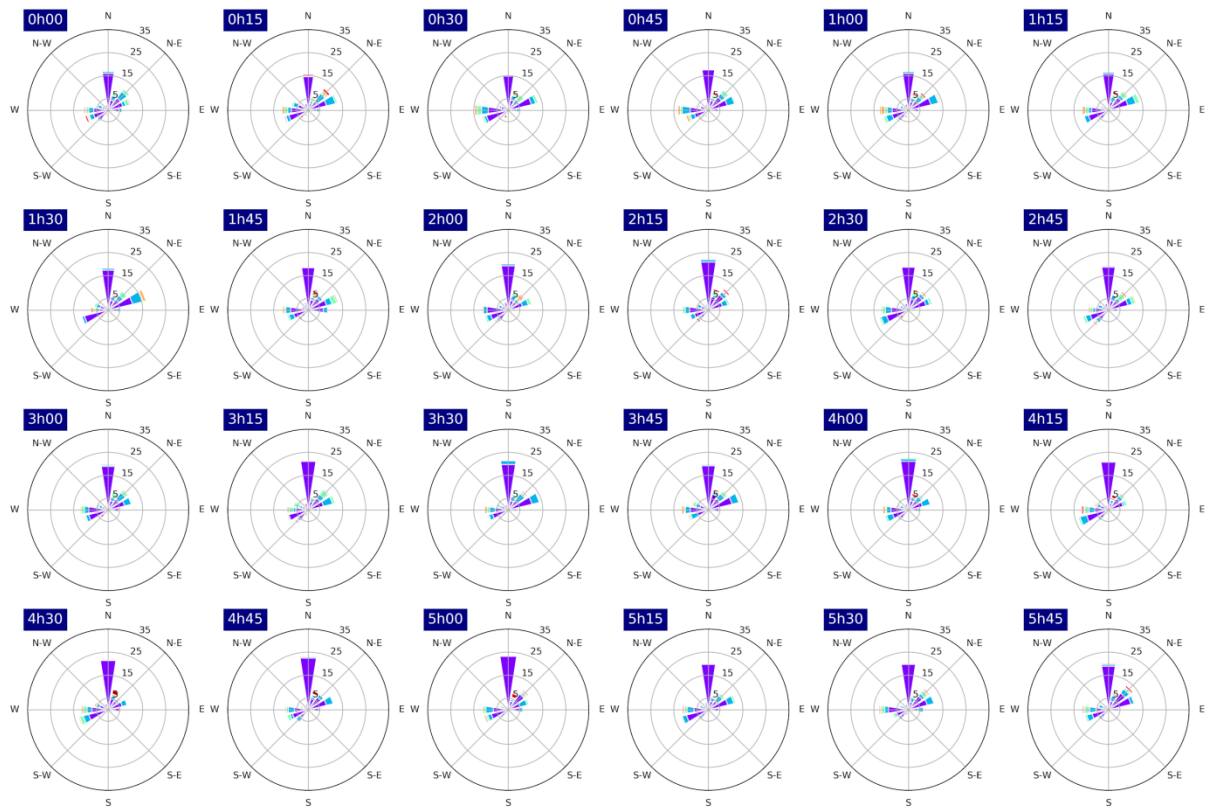


Figura 1 :Continuação



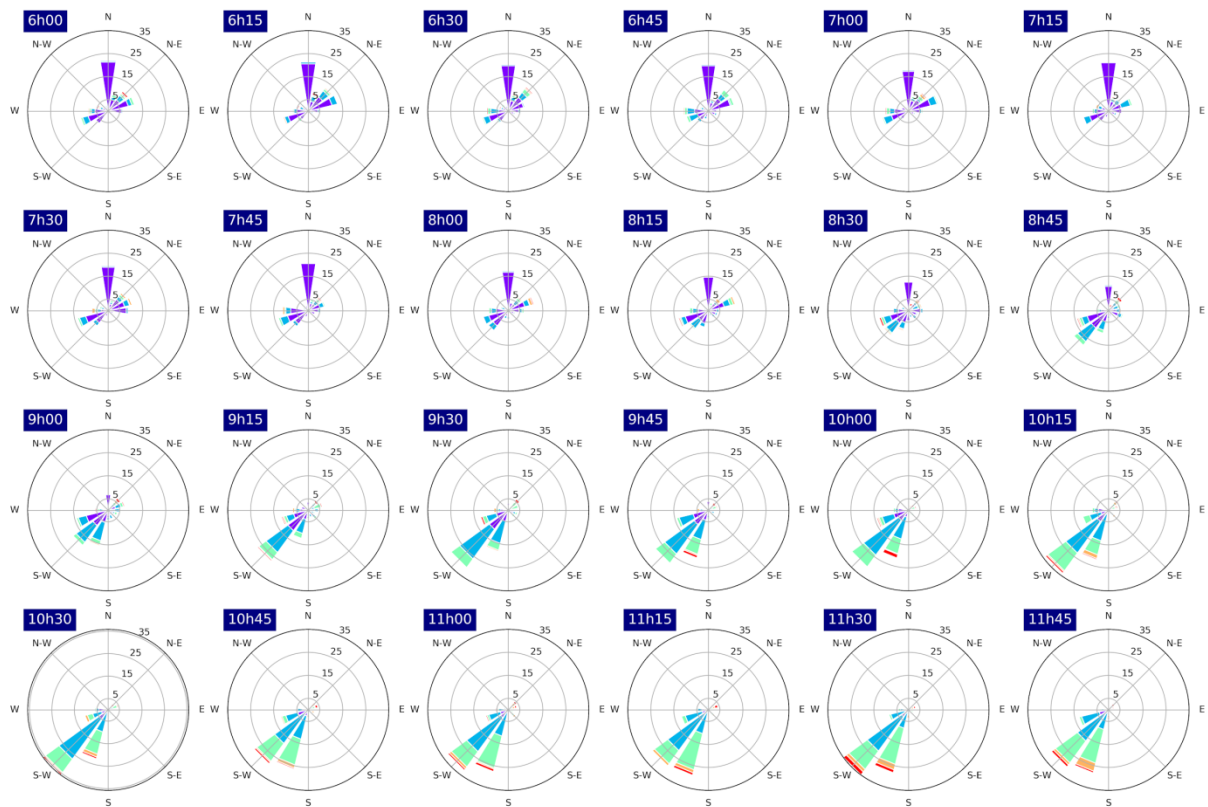


Figura 2: Distribuição de frequência dos ventos para a torre A - 60m para os horários de 00h00 à 23h45 a cada 15 minutos.

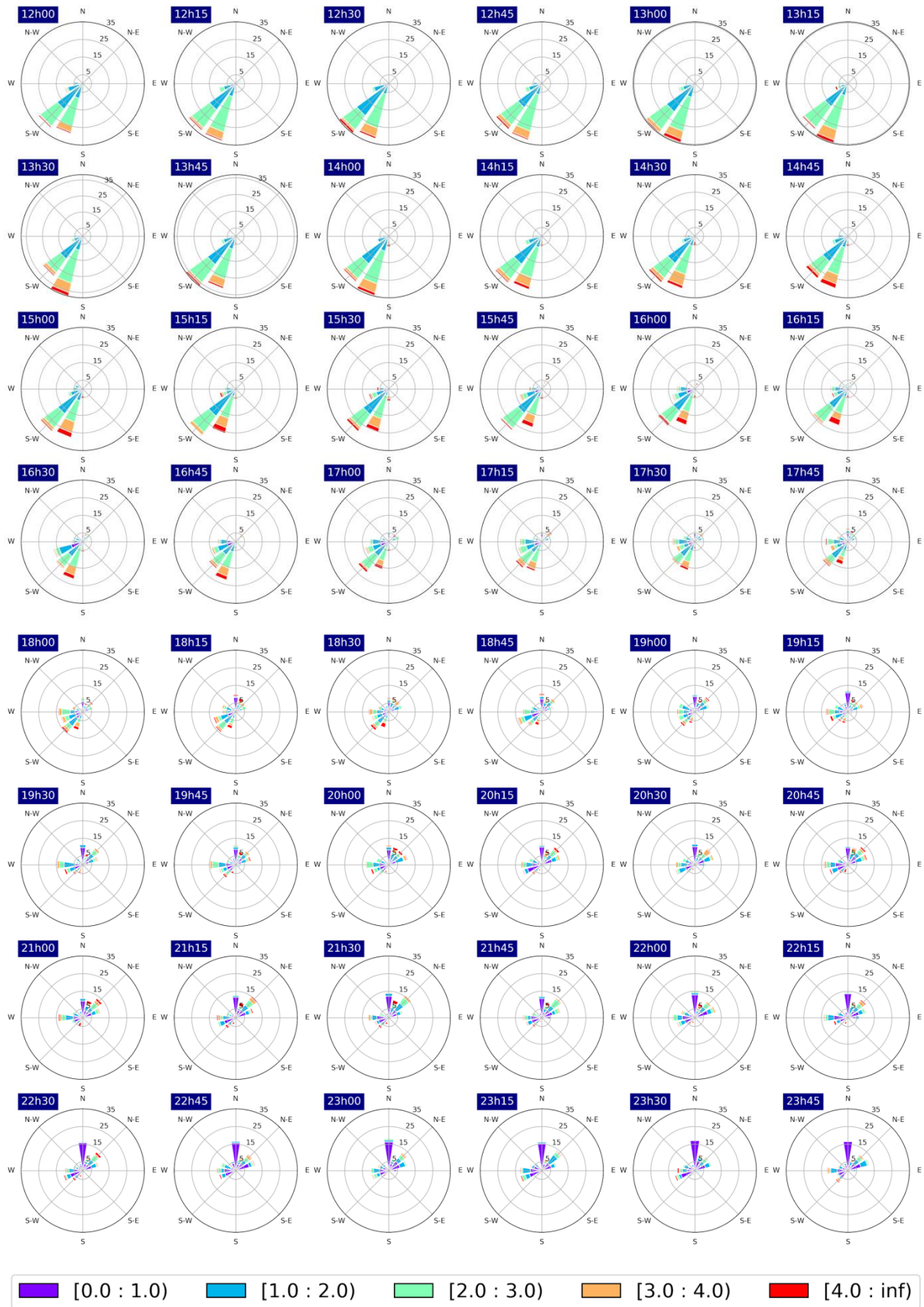


Figura 2: Continuação

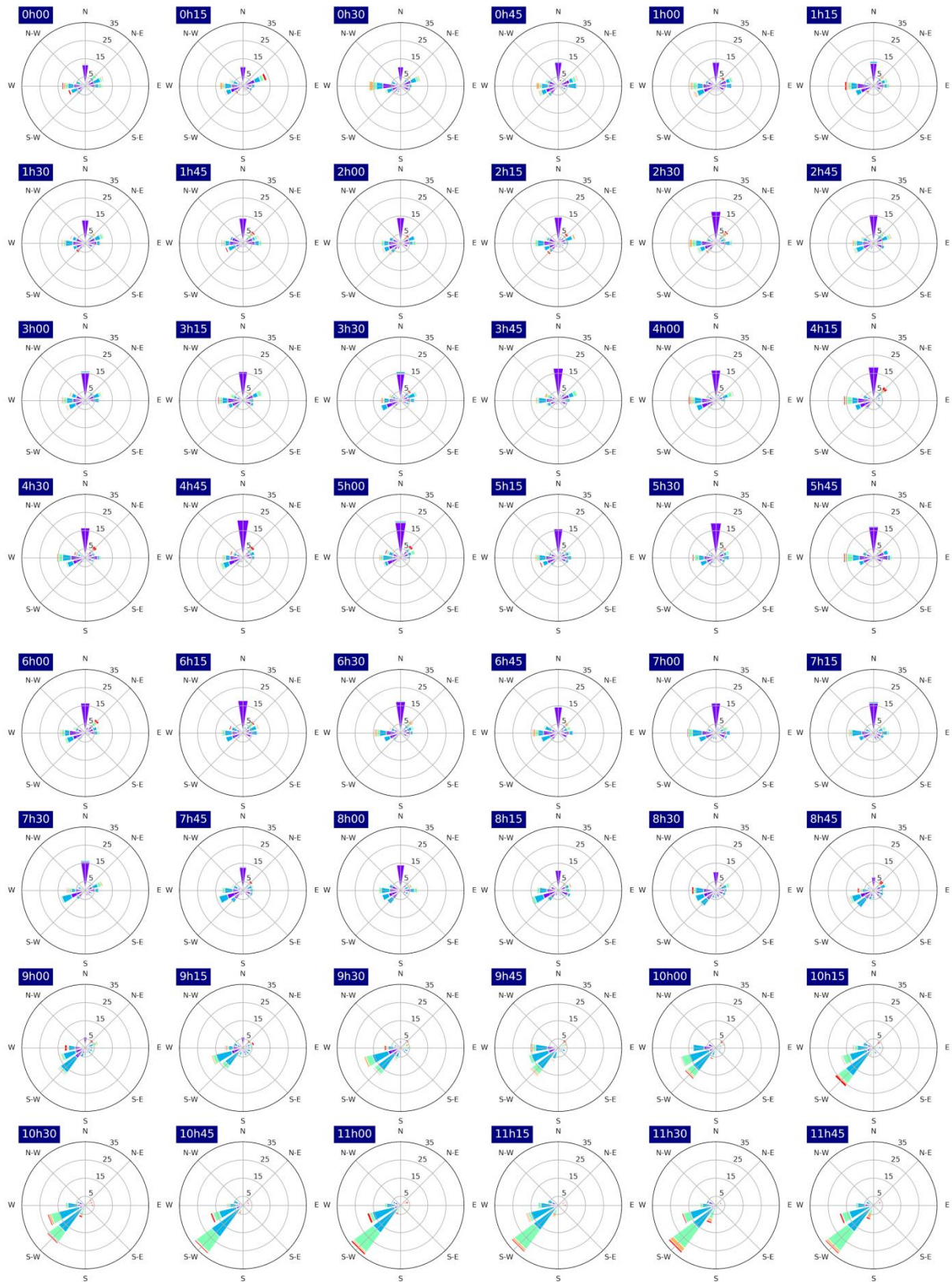


Figura 3: Distribuição de frequência dos ventos para a torre A - 100m para os horários de 00h00 à 23h45 a cada 15 minutos.

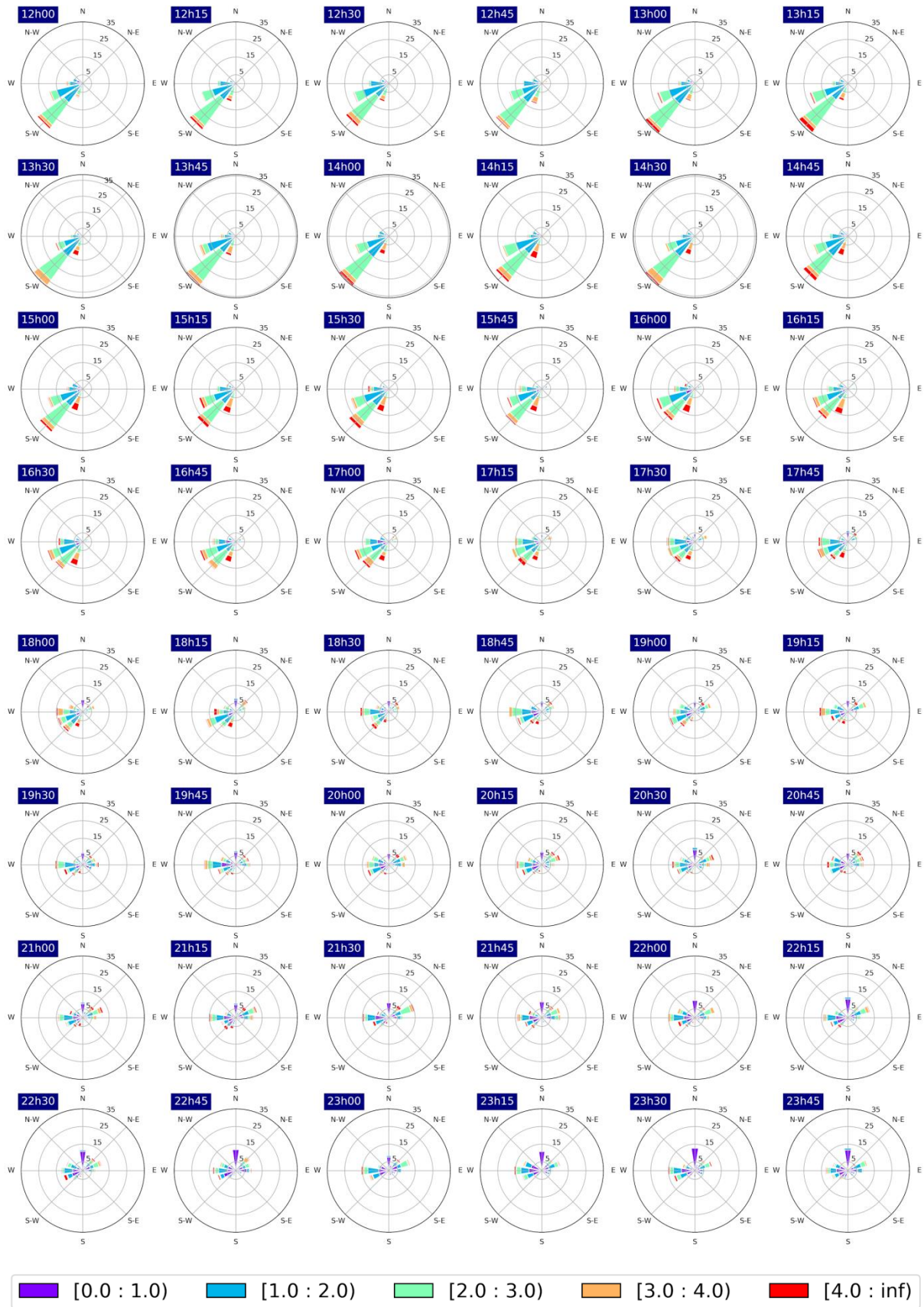


Figura 3: Continuação

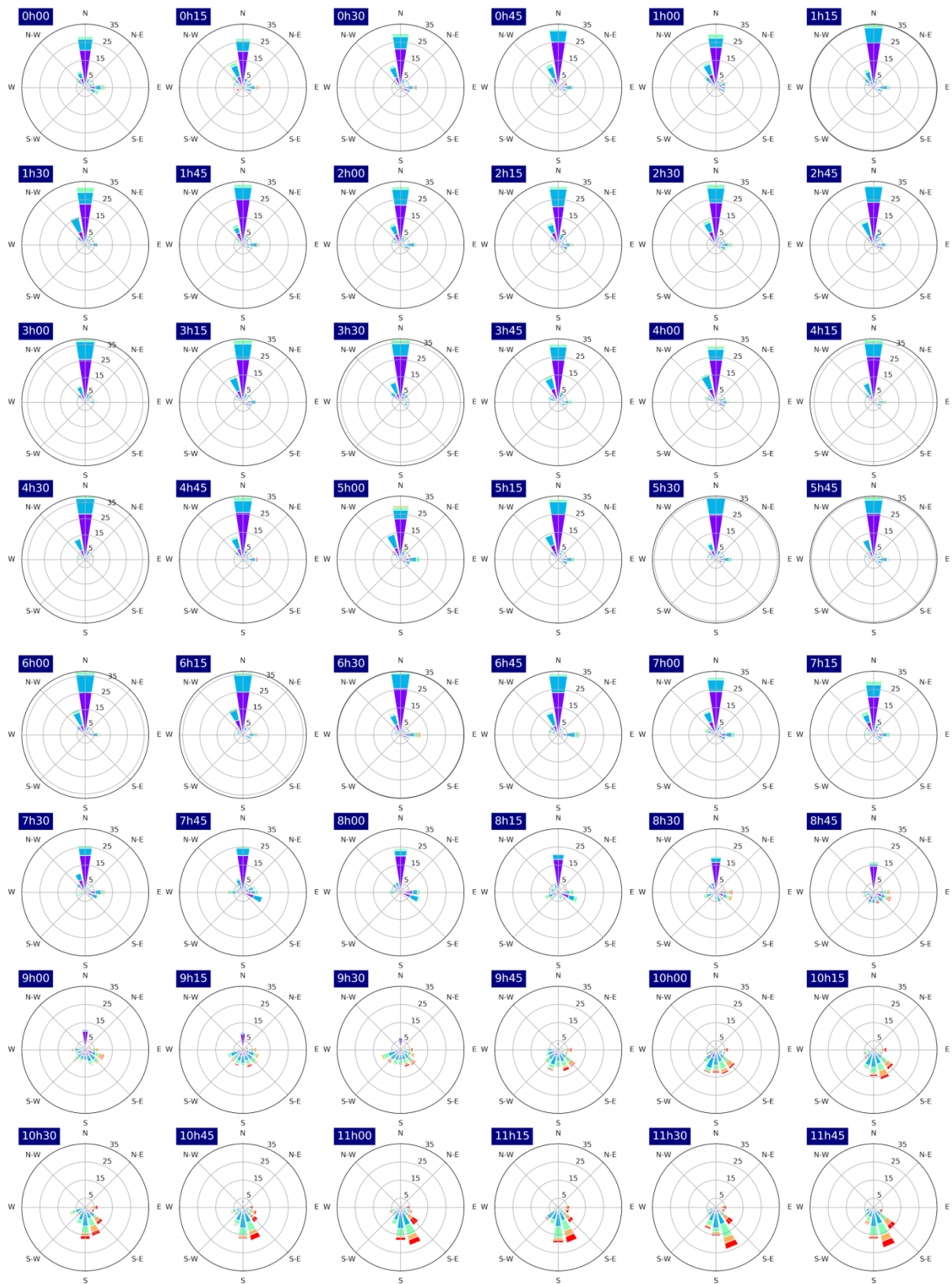


Figura 4: Distribuição de frequência dos ventos para a torre B para os horários de 00h00 à 23h45 a cada 15 minutos.

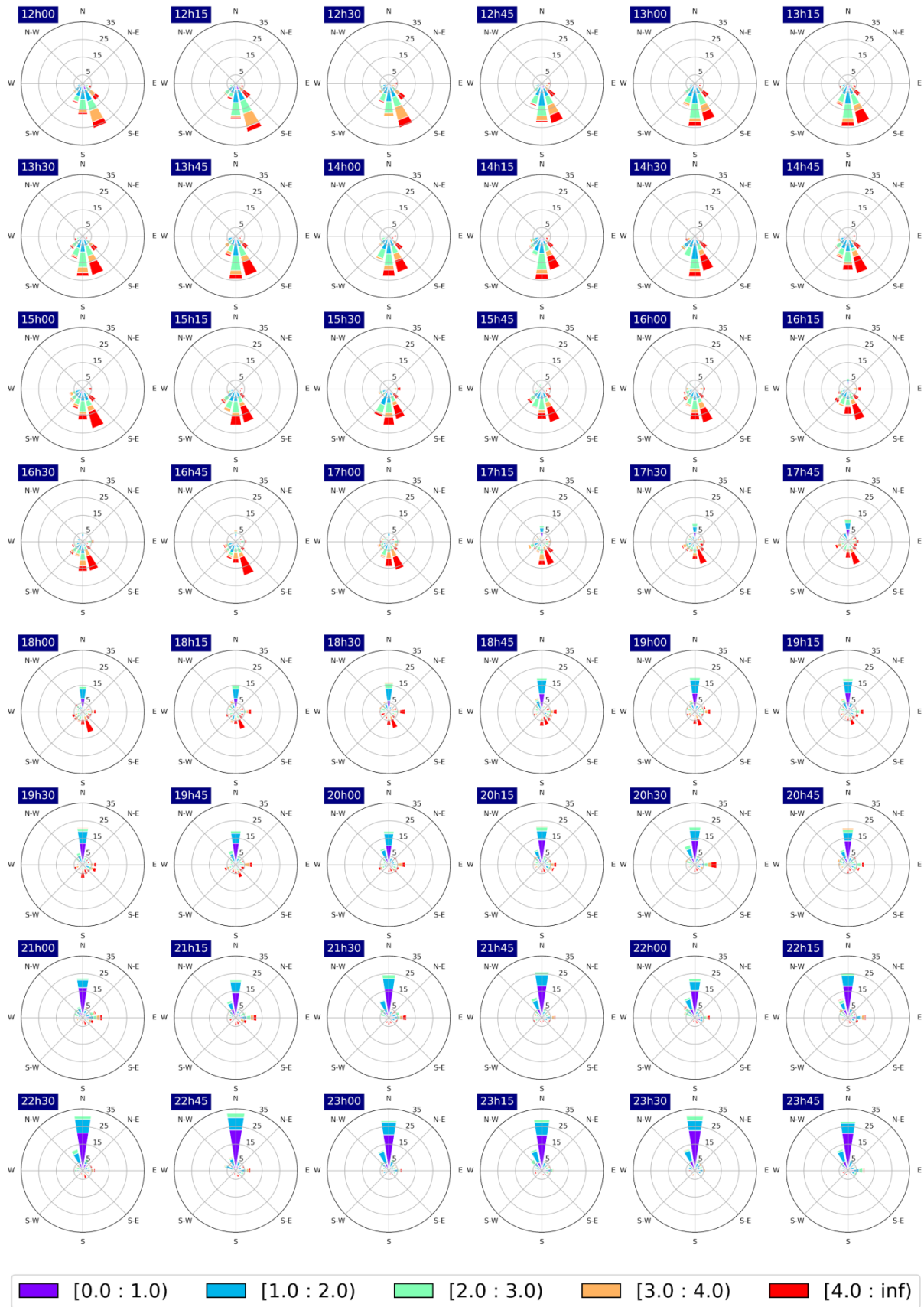


Figura 4: Continuação

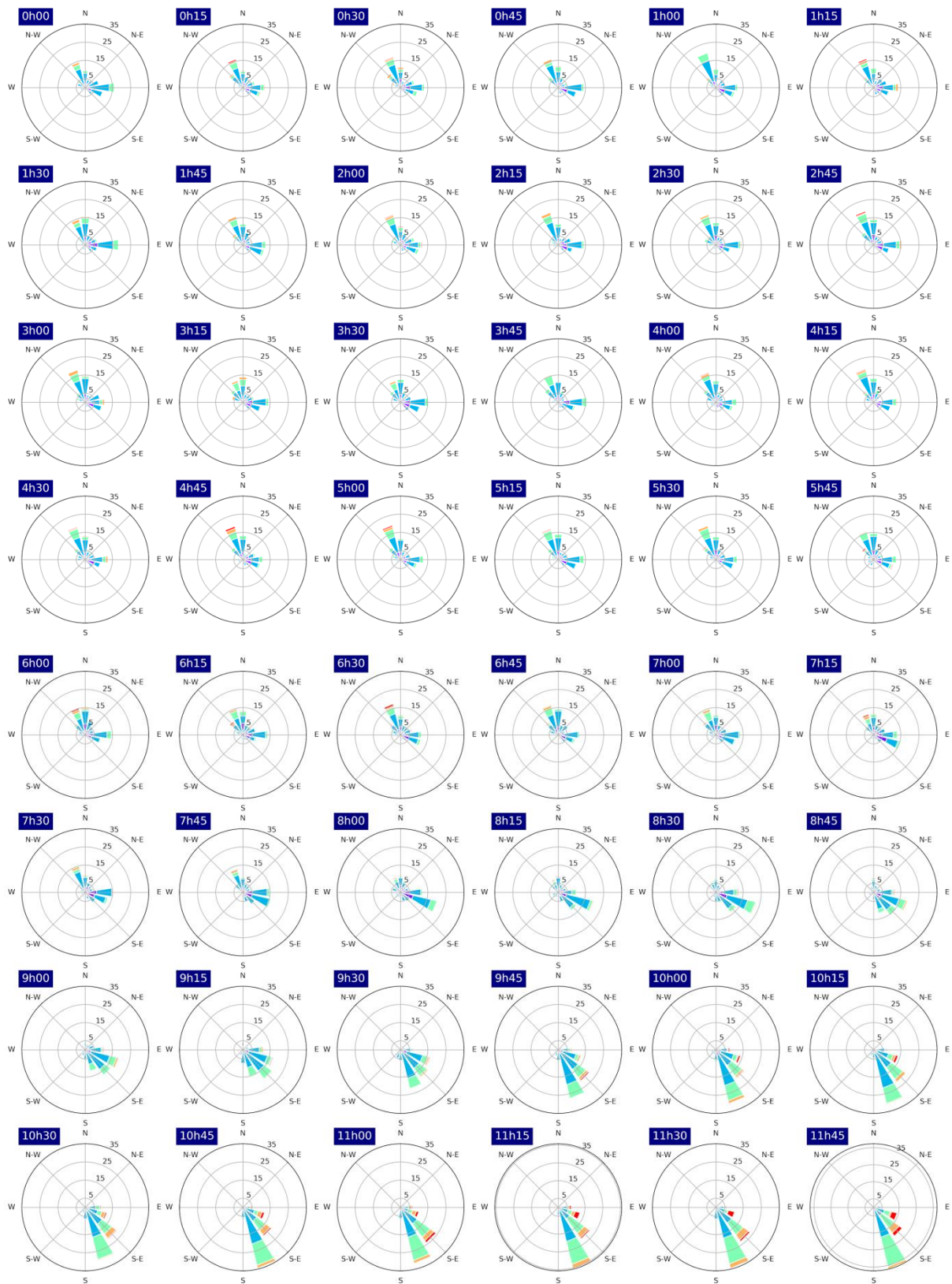


Figura 5: Distribuição de frequência dos ventos para a torre C para os horários de 00h00 à 23h45 a cada 15 minutos.

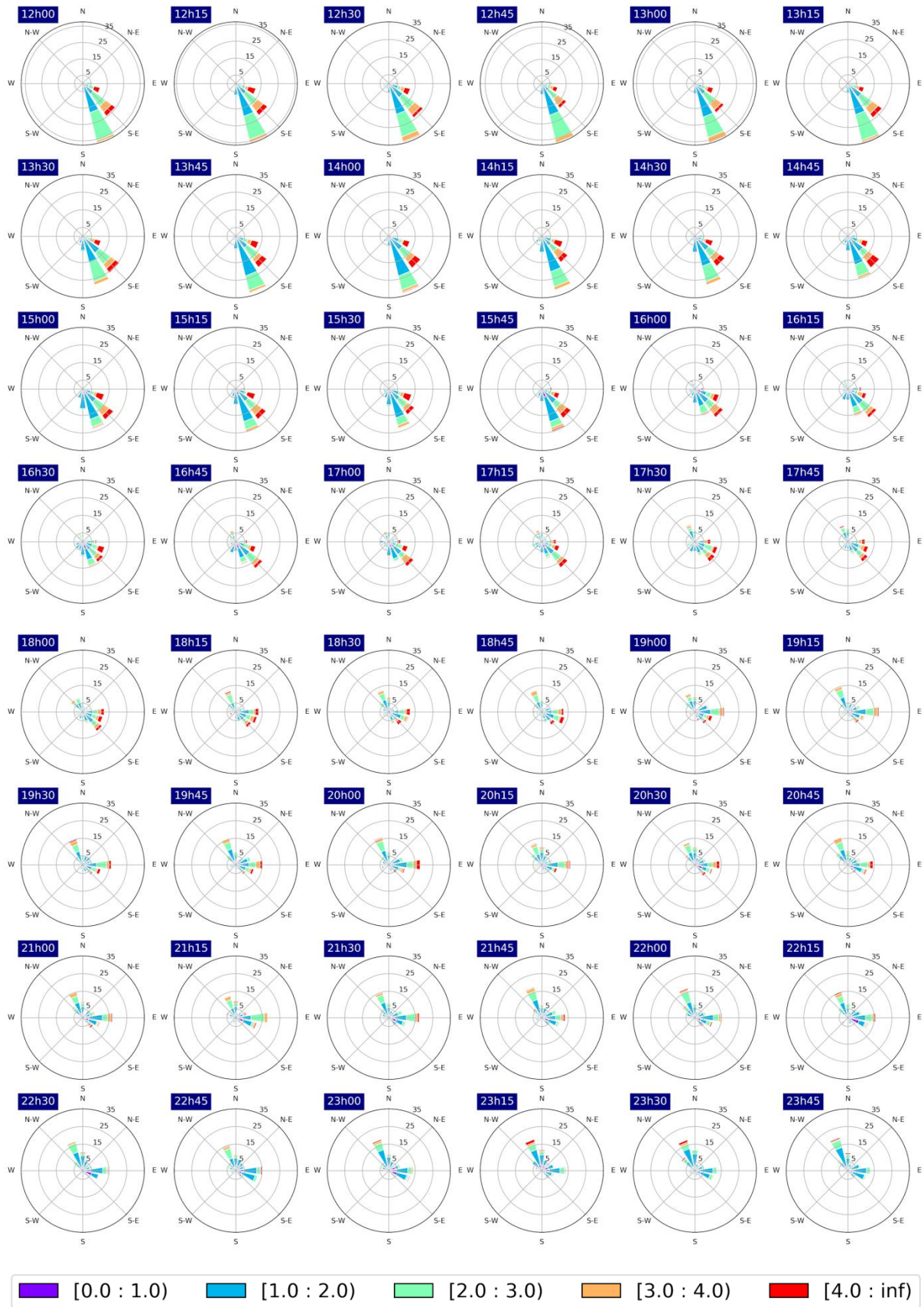


Figura 5: Continuação

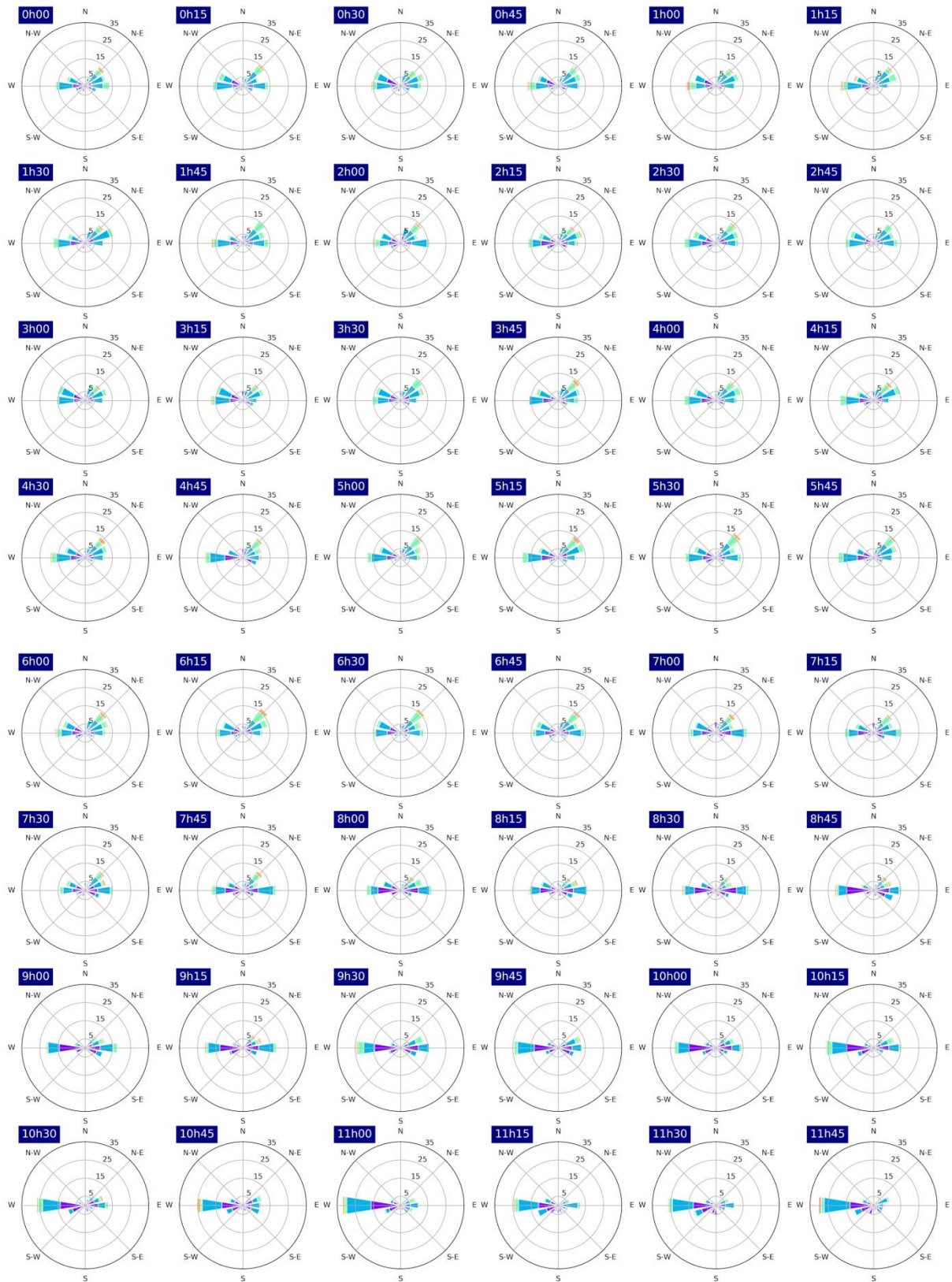


Figura 6: Distribuição de frequência dos ventos para a torre D para os horários de 00h00 à 23h45 a cada 15 minutos.

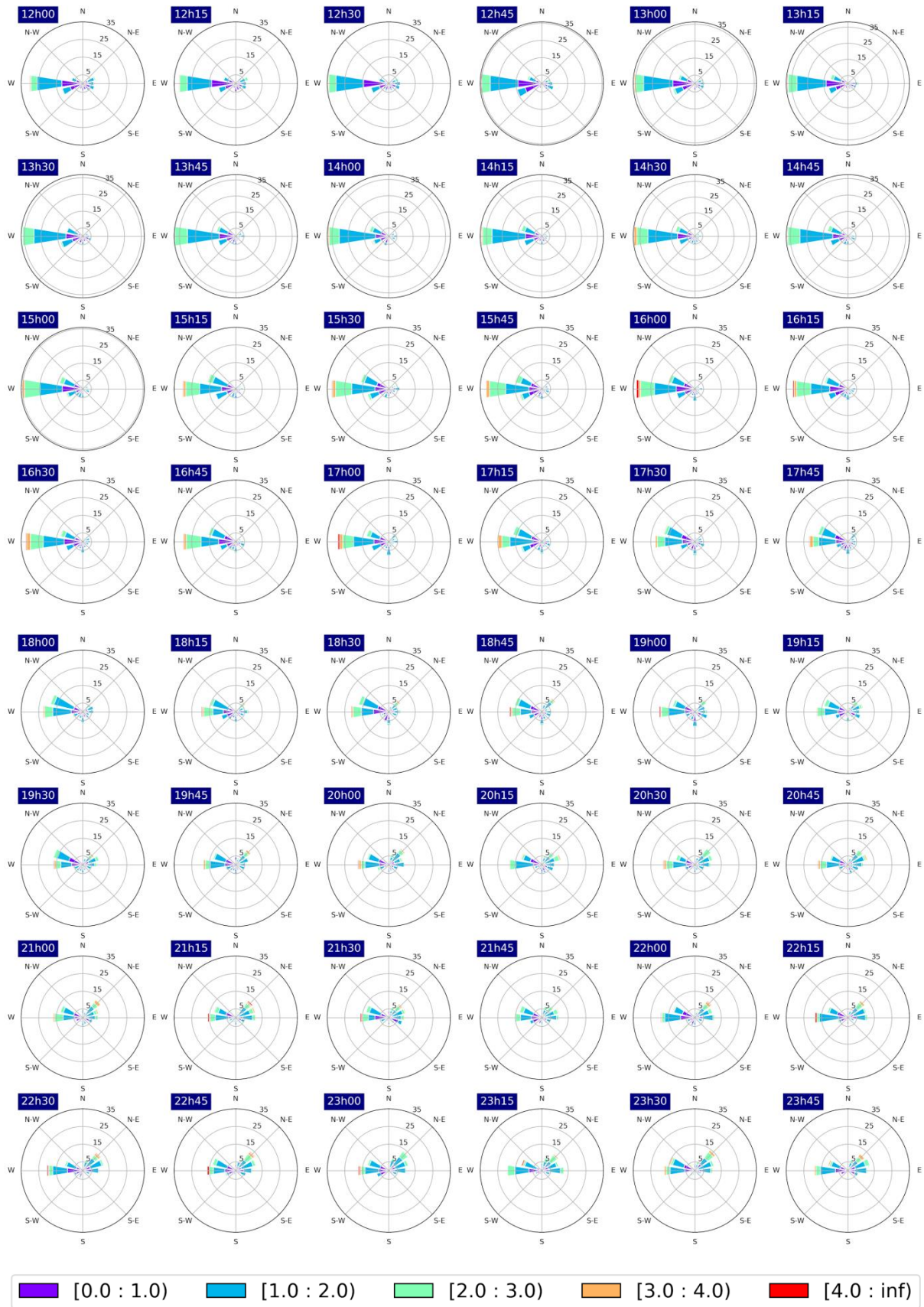
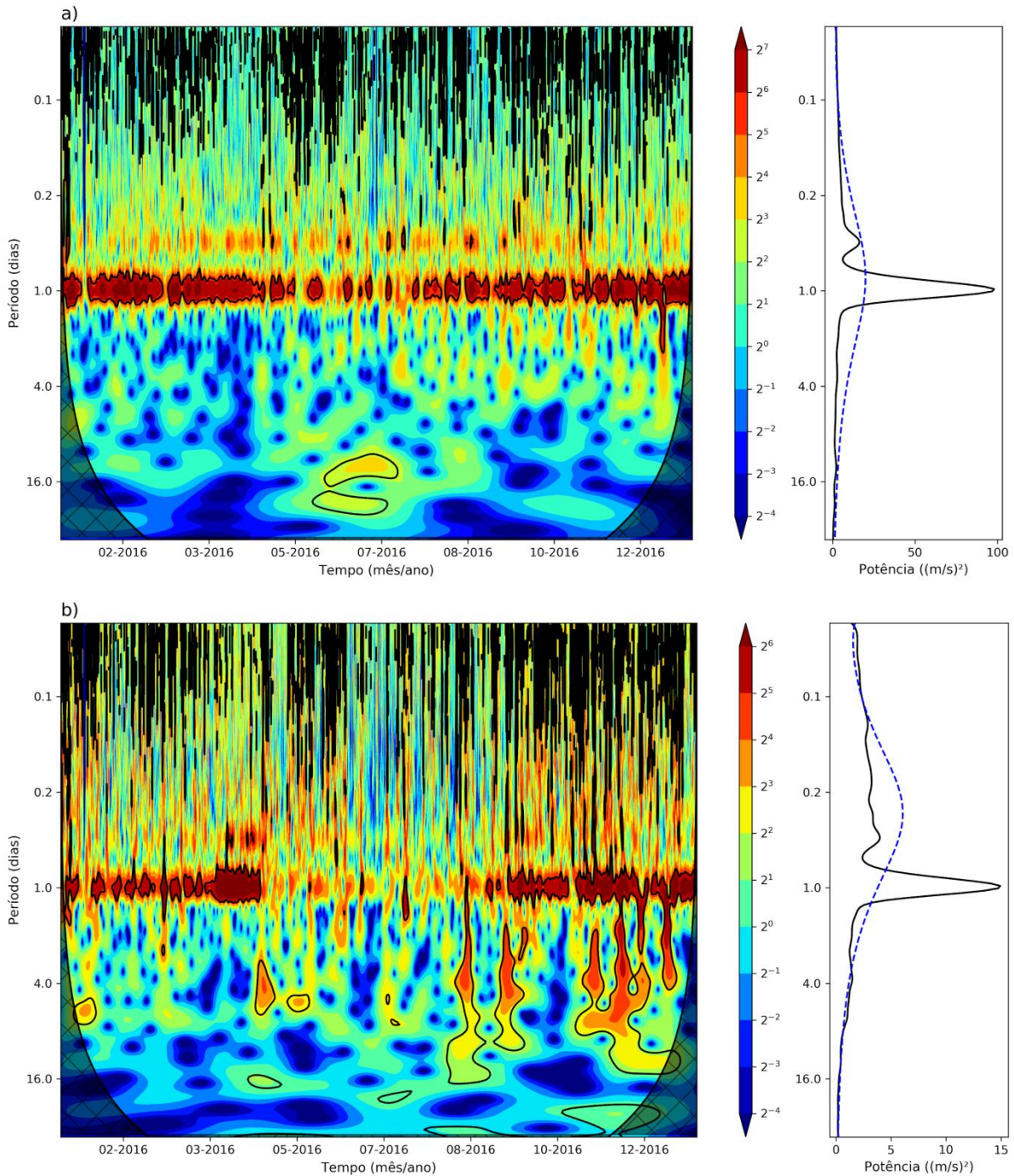
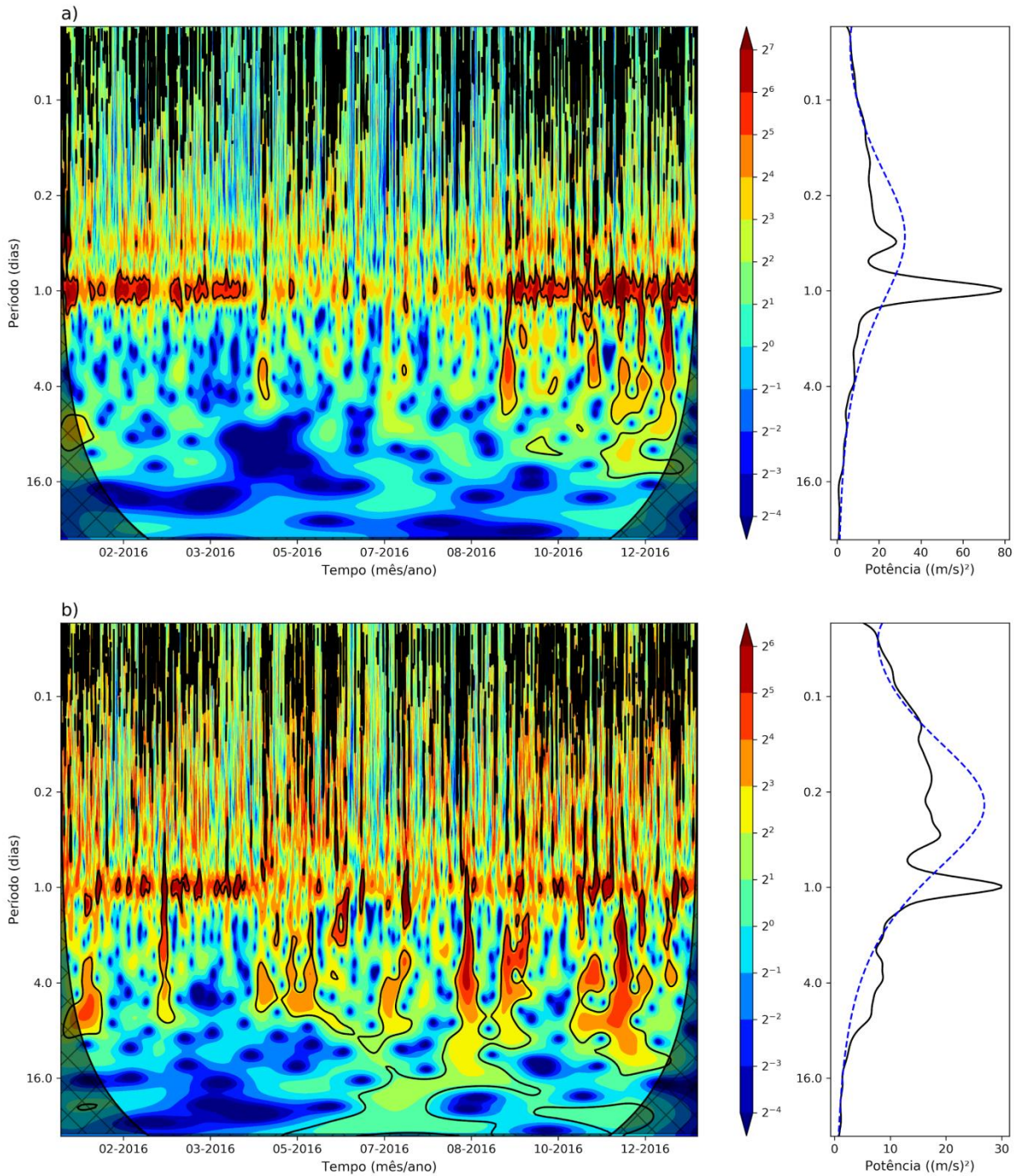


Figura 6: Continuação

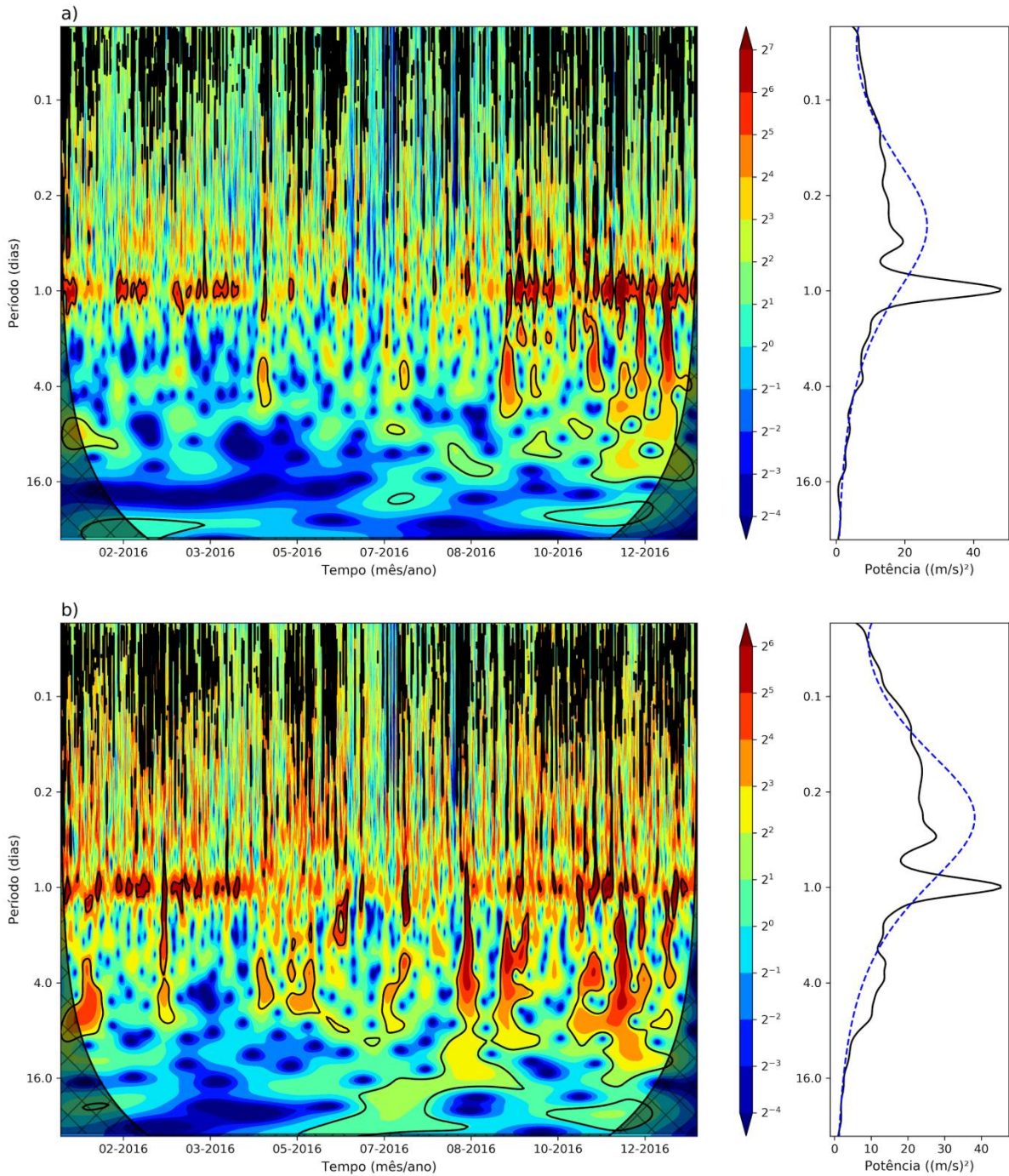
Anexo II



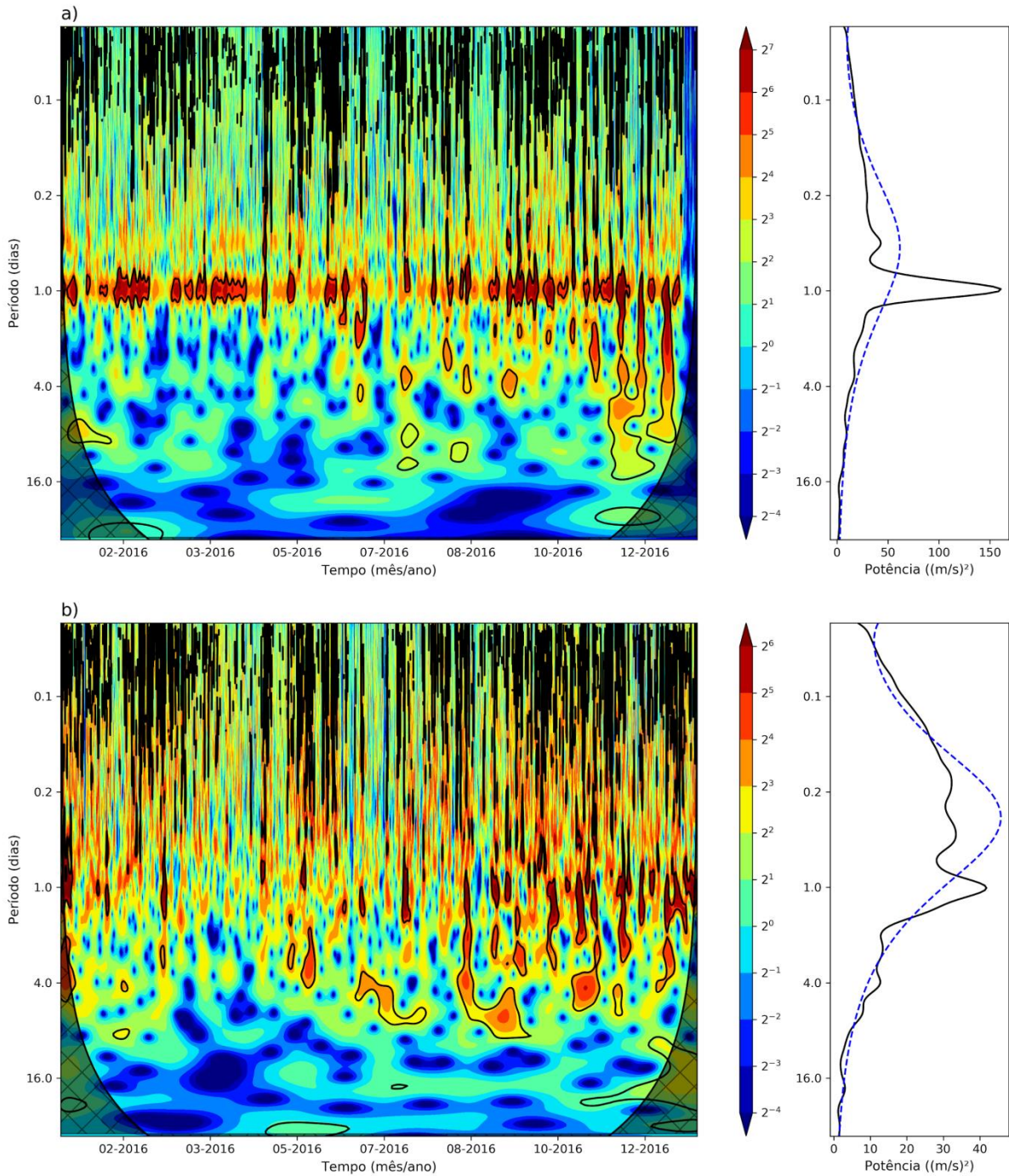
Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da da componente (b) zonal do vento (m/s) na Torre A - 10m durante o ano de 2016. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.



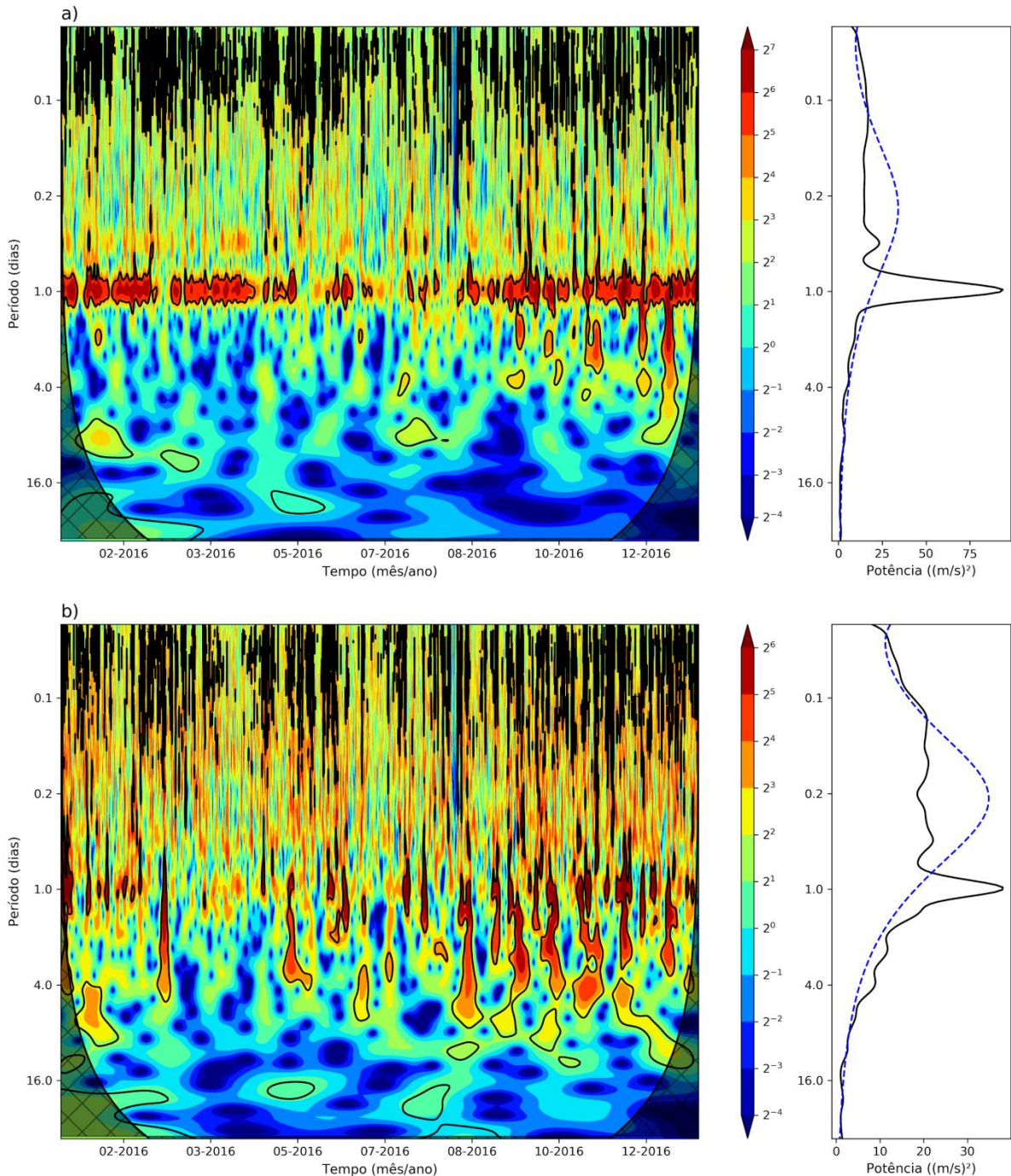
Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) na Torre A - 60m durante o ano de 2016. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.



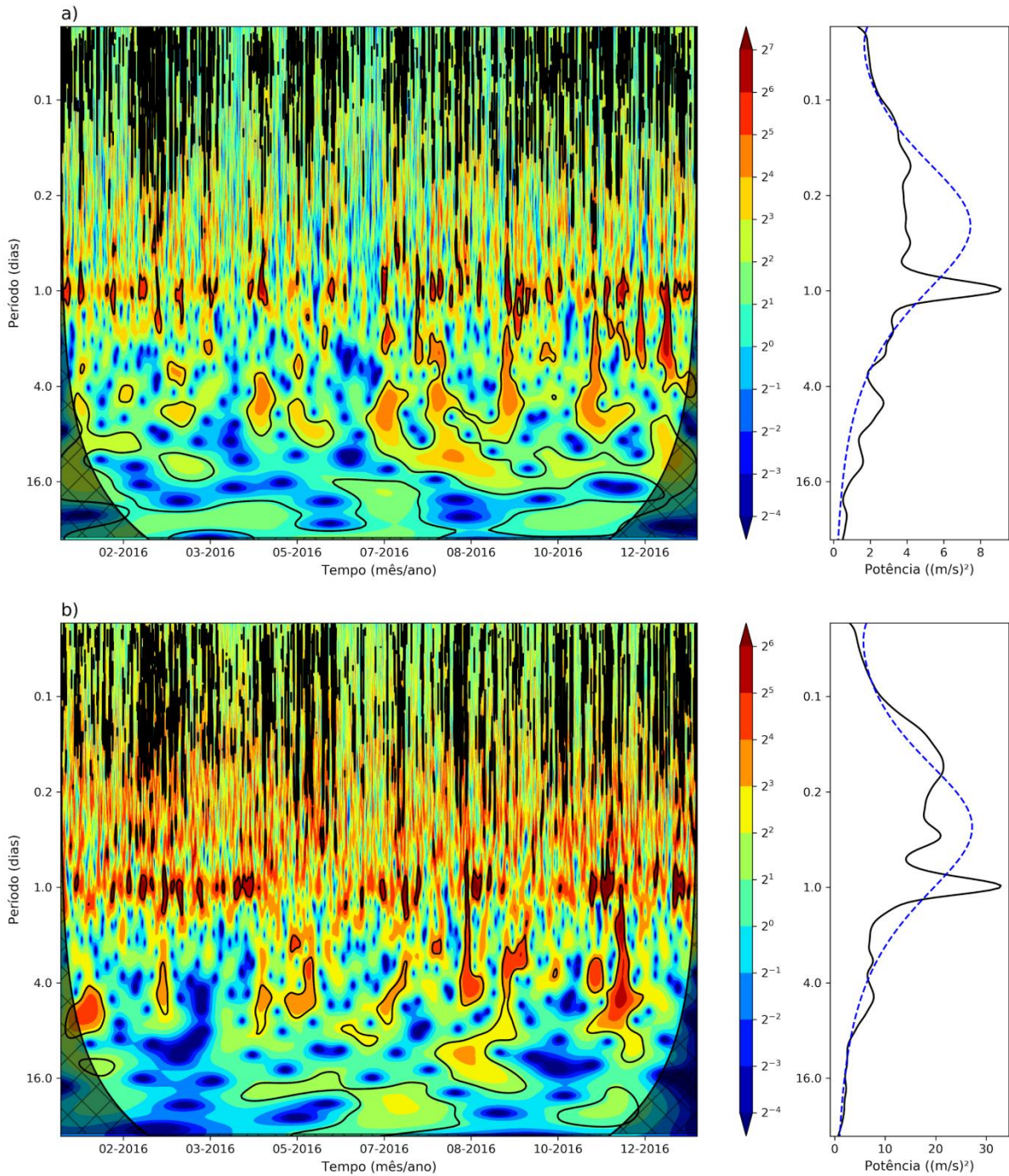
Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) na Torre A - 100m durante o ano de 2016. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.



Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) na Torre B - 15m durante o ano de 2016. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.

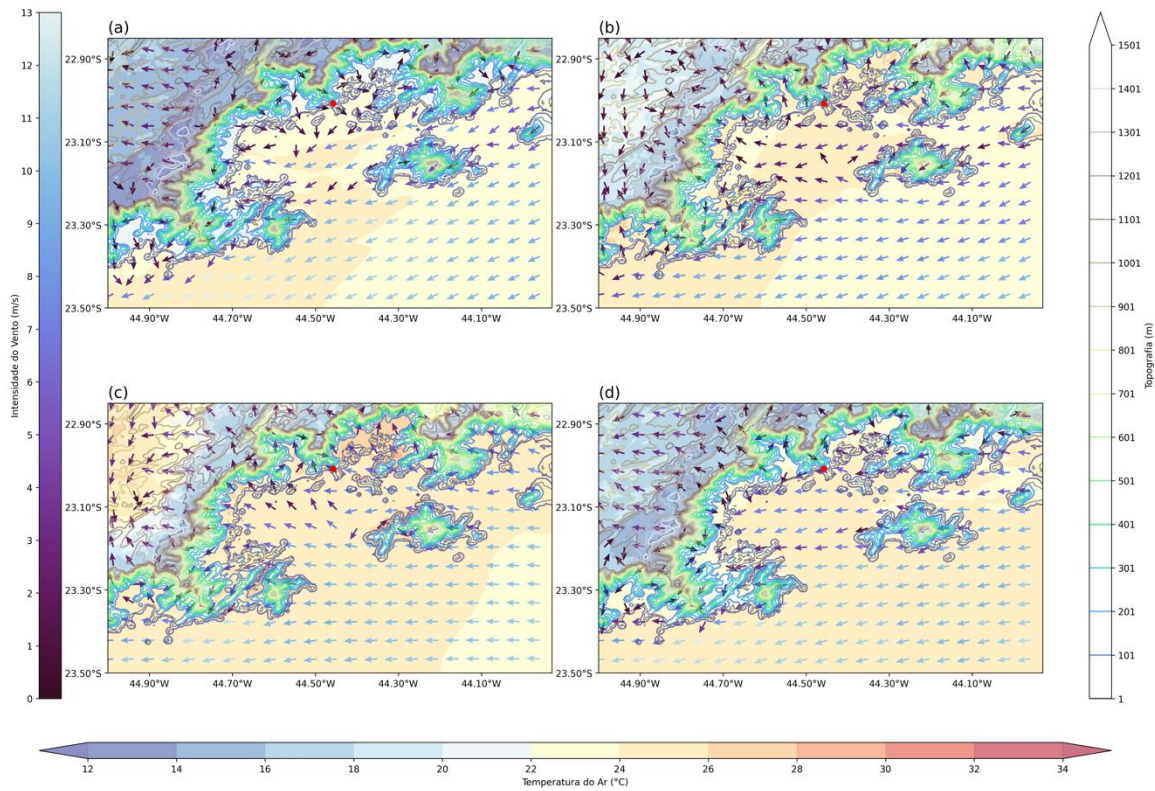


Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) na Torre C - 15m durante o ano de 2016. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.

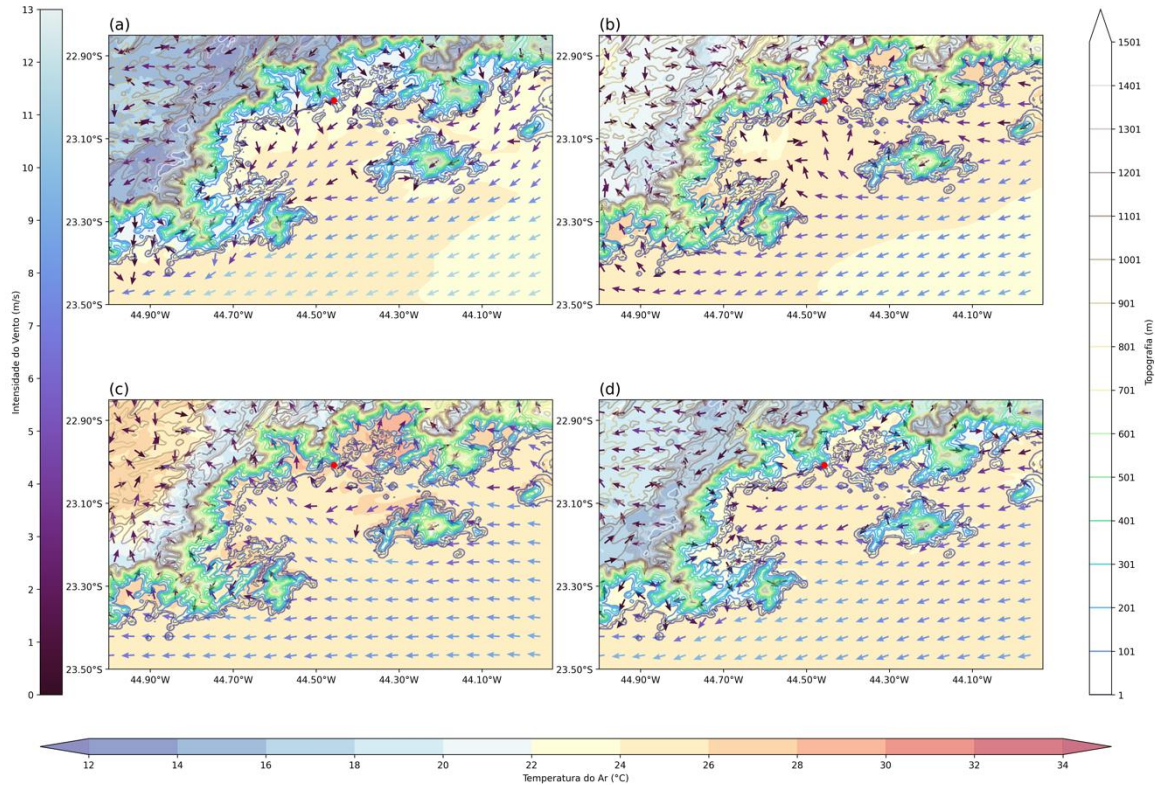


Espectros de potência de ondeleta contínua (sem unidade) e de ondeleta global (m^2/s^2) da componente (a) meridional e da componente (b) zonal do vento (m/s) na Torre D - 15m durante o ano de 2016. A linha tracejada azul no espectro global e as linhas cheias pretas no espectro contínuo representam o nível de confiança estatística de 95%, e a região hachurada delimita o cone de influência.

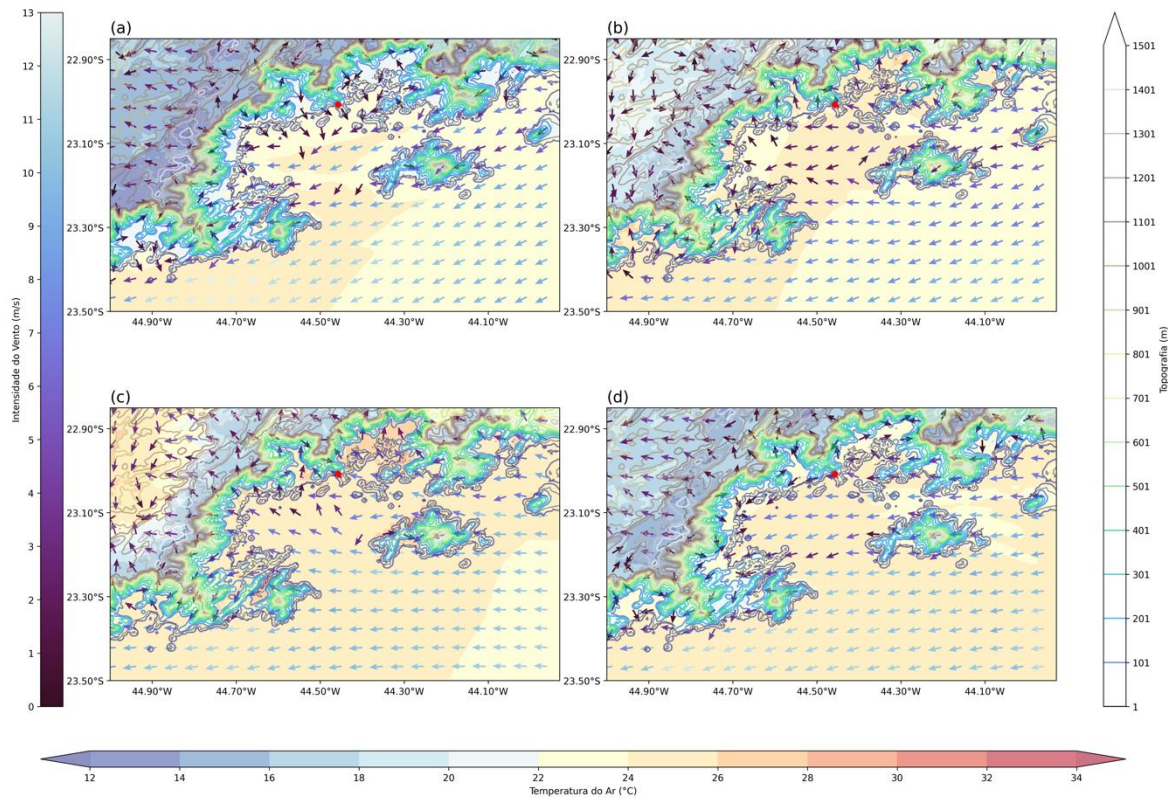
Anexo III



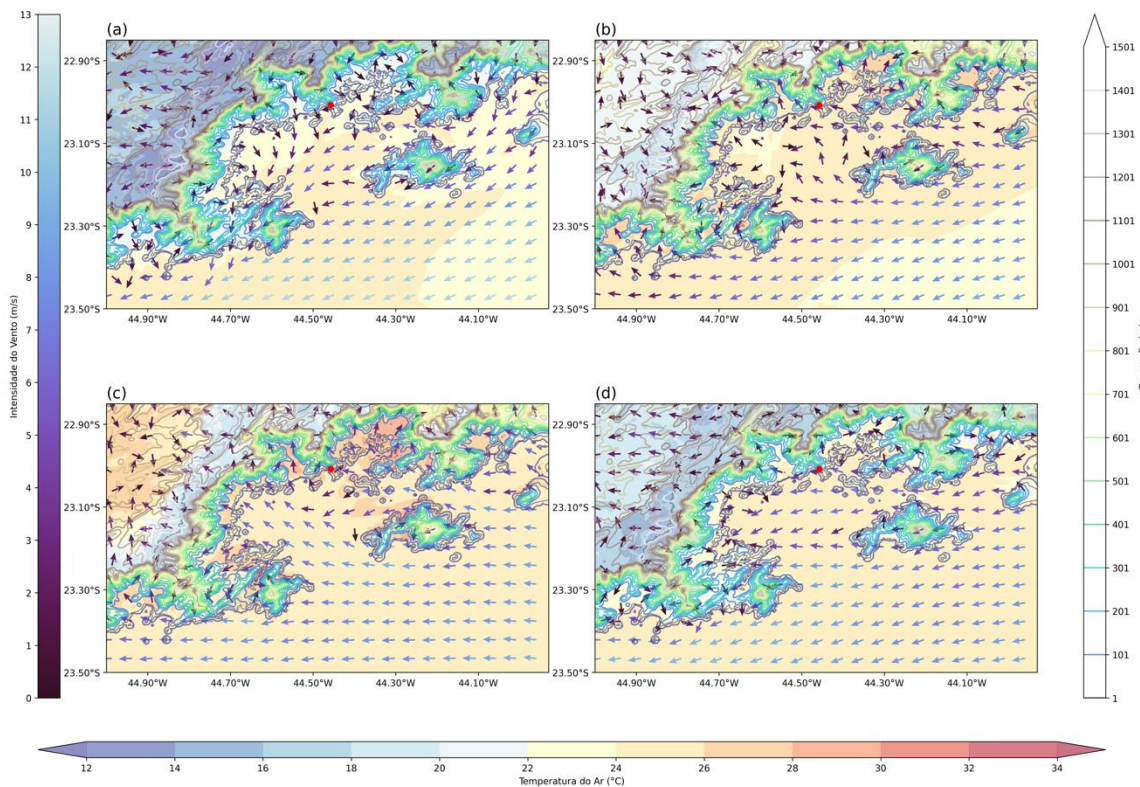
Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G2 - ASTER para o dia 5 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAAA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h.



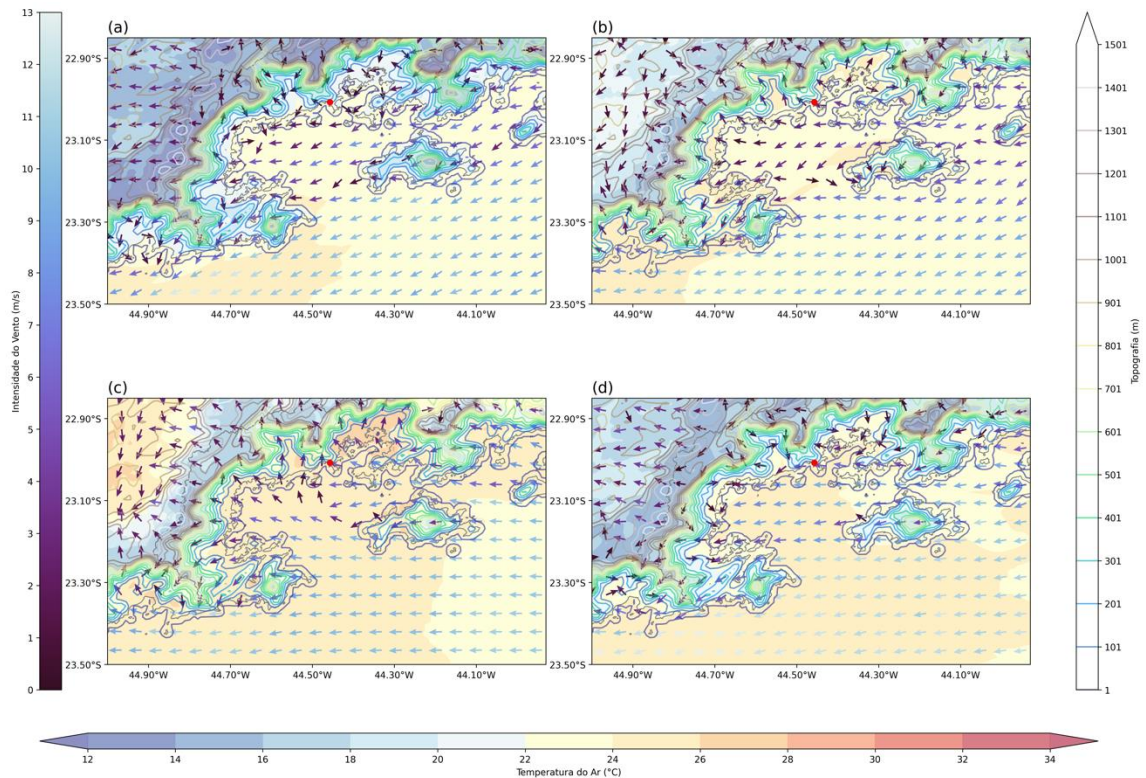
Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G2 - ASTER para o dia 6 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAAA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h.



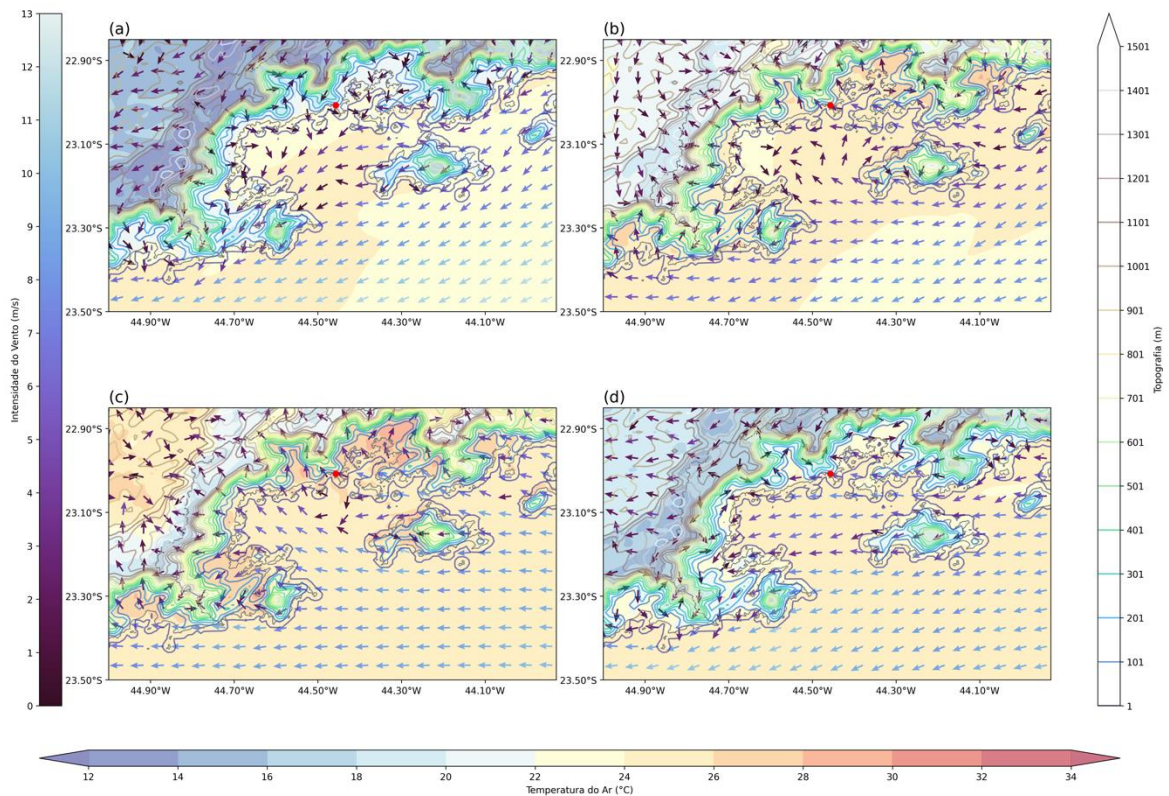
Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G2 - SRTM para o dia 5 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAAA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h.



Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G2 - SRTM para o dia 6 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAAA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h.



Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G1 – GMTED2010 para o dia 5 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAAA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h.



Campos compostos pela temperatura do ar à 2 metros (contorno preenchido), vento à 10 metros (setas coloridas) e topografia (isolinhas coloridas) resultantes do experimento G1 – GMTED2010 para o dia 6 de janeiro de 2016. O ponto vermelho indica a localização da da CNAAA. Cada campo corresponde aos seguintes horários: (a) 03h, (b) 09h, (c) 15h e (d) 21h.