



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Meteorologia

**CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE NEVOEIROS INTENSOS EM
RIO GRANDE (RS) UTILIZANDO O MODELO WRF EM ALTA
RESOLUÇÃO**

Judith Rodrigues Cardoso

Rio de Janeiro

Outubro, 2022

CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE NEVOEIROS INTENSOS EM RIO GRANDE
(RS) UTILIZANDO O MODELO WRF EM ALTA RESOLUÇÃO

Judith Rodrigues Cardoso

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(es): Edilson Marton, D.Sc

Flávia Rodrigues Pinheiro, Ph.D

Rio de Janeiro

Outubro de 2022

CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE NEVOEIROS INTENSOS EM RIO GRANDE (RS) UTILIZANDO O MODELO WRF EM ALTA RESOLUÇÃO

JUDITH RODRIGUES CARDOSO

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).



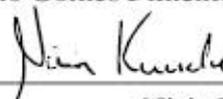
Edilson Marton – PPGM/UFRJ
(Orientador)



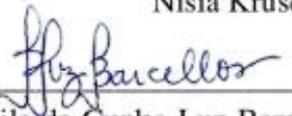
Flávia Rodrigues Pinheiro – Marinha do Brasil
(Orientadora)



Luiz Cláudio Gomes Pimentel – PPGM/UFRJ



Nisia Krusche – FURG



Priscila da Cunha Luz Barcellos – UFF

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO 2022

CIP - Catalogação na Publicação

C268c Cardoso, Judith Rodrigues
 Caracterização e simulação de nevoeiros intensos em Rio Grande (RS) utilizando o modelo WRF em alta resolução / Judith Rodrigues Cardoso. -- Rio de Janeiro, 2022.
 304 f.

 Orientador: Edilson Marton.
 Coorientadora: Flávia Rodrigues Pinheiro.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, 2022.

 1. Nevoeiro. 2. Modelagem Numérica. 3. WRF. I. Marton, Edilson, orient. II. Pinheiro, Flávia Rodrigues, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Agradecimentos

À minha família pela torcida e apoio incondicionais desde que sou capaz de lembrar.

À minha avó (*in memorian*), minha Judith preferida no mundo, que me ensinou muitas coisas, mas principalmente a perceber que sempre há motivos pra gente agradecer.

À minha mãe, que é a representação mais linda de amor e cuidado. Obrigada por tudo desde sempre! Te amo e te admiro muito!

Ao meu irmão Miguel, por ser a minha companhia diária, pela compreensão e preocupação comigo e por deixar a nossa casa um lugar muito mais divertido.

Às minhas tias e madrinhas que me inspiram, me emocionam e me incentivam e aos meus tios e padrinhos por me cercarem de carinho o tempo inteiro.

Em especial, gostaria de lembrar minha Tia Bá (*in memorian*), que sempre foi meu “amuleto de sorte” e de quem tive que me despedir poucos dias antes do início oficial desta jornada. Nunca vou cansar de agradecer pela nossa parceria imbatível e por sempre ter deixado minha vida mais leve e colorida.

Aos meus primos e à minha afilhada Maria Alice, que são as pessoas com quem divido a tarefa da continuidade da história da nossa família e que sempre celebram junto comigo cada nova etapa.

A todos os professores que passaram por minha vida, por toda a dedicação e por possibilitarem minha formação.

Aos meus orientadores por terem aceitado caminhar comigo nesta etapa, pelo incentivo de sempre e por tudo que me ensinam e me permitem aprender.

Nisia, Priscila e Professor Luiz Cláudio, agradeço por todas as sugestões, dicas e apontamentos desde o exame de qualificação. Professor Luiz Cláudio, em especial, agradeço imensamente por ter disponibilizado as máquinas que foram utilizadas em todas as simulações deste estudo.

A três amigos que foram muito importantes para o desenvolvimento deste trabalho: Nilton, Larissa e William. Nilton, agradeço por cada lição de meteorologia em tantas conversas, pela companhia em muitos plantões e por toda a ajuda com o WRF. Larissa, nossa amizade já vem desde os primeiros dias da graduação e eu só tenho a agradecer por sua presença em minha vida e pelas aulas particulares de Python que foram maravilhosas. E, William, obrigada por sempre estar presente, por cada discussão, conversa e aprendizado que me proporcionou ao longo

desses anos de amizade. E, claro, por ser o responsável por me mostrar a beleza de estudar os nevoeiros!

A todos os meus amigos que torceram para que este momento chegasse, que ouviram os medos e angústias e que participaram desta etapa comigo. Agradeço também aos amigos incríveis que fiz na UFRJ, aos que seguiram comigo desde a graduação, aos que dividiram e dividem o ambiente de trabalho e às amigas que ganhei ao iniciar o mestrado. Larissa, Matheus, Marina, Alessandra, Camila, Marcely, Marcolino, Ana Clara, Bruno, Raquel, Giselle, Christiane, Barbara Hanna, Louise Aguiar e Denise, muito obrigada!

À Sanmey, pelo suporte nos momentos mais conturbados e pela escuta profissional e acolhedora desde o primeiro momento.

Às meninas do Movimento Online, que fizeram o último ano muito mais feliz, divertido e completo. Nossos encontros (presenciais e virtuais) me inspiram e motivam sempre e em diversos âmbitos!

À Praticagem da Barra do Rio Grande, pela disponibilização da base de dados para realização deste trabalho e também pela experiência maravilhosa de vivenciar a rotina operacional da sua equipe, inclusive em um dia de nevoeiro intenso.

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

CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE NEVOEIROS INTENSOS EM RIO GRANDE (RS) UTILIZANDO O MODELO WRF EM ALTA RESOLUÇÃO

Judith Rodrigues Cardoso

Outubro/2022

Orientadores: Edilson Marton

Flávia Rodrigues Pinheiro

Programa de Pós-graduação em Meteorologia

Nevoeiros são fenômenos atmosféricos caracterizados por restrição de visibilidade horizontal para 1000 metros ou menos e, desta maneira, podem ter impacto em diversas áreas e atividades. Dentre elas, o setor de transporte é considerado um dos mais afetados pela ocorrência deste fenômeno. Na cidade de Rio Grande (RS) encontra-se um dos principais portos do Brasil e a ocorrência de nevoeiros nesta localidade pode ocasionar diversos transtornos, como a suspensão das atividades portuárias e elevação dos custos operacionais. Assim, entender melhor os processos de formação e dissipação de nevoeiros, bem como obter uma previsão mais precisa de tais fenômenos, se torna de fundamental importância para as atividades portuárias na região. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a habilidade do modelo *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) na simulação/previsão de nevoeiros na cidade de Rio Grande. Para tal, foram realizadas simulações de eventos de nevoeiro na região a partir de uma configuração do modelo WRF em alta resolução. A metodologia do *Fog Stability Index* (FSI), o número de Richardson e duas estimativas de visibilidade horizontal foram avaliadas na representação do evento e de condições favoráveis à sua ocorrência. Adicionalmente, buscou-se fazer uma breve caracterização da ocorrência de nevoeiros na região de estudo. Os resultados destacaram a maior frequência de ocorrência do fenômeno em Rio Grande entre os meses de maio e setembro. Os campos, séries temporais e perfis verticais das variáveis em estudo obtidos a partir das simulações com o modelo WRF apresentaram resultados promissores, mostrando a habilidade do modelo em identificar/prognosticar a ocorrência do nevoeiro na área de interesse deste estudo, bem como representar aspectos de seus processos de formação e dissipação e caracterizar sua estrutura, evolução e deslocamento.

Palavras chave: Nevoeiro; modelagem; WRF.

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

CHARACTERIZATION AND SIMULATION OF DENSE FOGS IN RIO GRANDE (RS)
USING THE WRF MODEL WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

Judith Rodrigues Cardoso

October/2022

Advisors: Edilson Marton

Flávia Rodrigues Pinheiro

Department: Meteorology

Fogs are atmospheric phenomena characterized by horizontal visibility restriction to 1000 meters or less and, in this way, can impact several areas and activities. The transport area is considered one of the most affected by the occurrence of this phenomenon. One of the main ports in Brazil is located in Rio Grande city and fog occurrences in this location cause several inconveniences, such as the suspension of port activities and the increase in operating costs. Thus, a better understanding of fog formation and dissipation processes, as well as obtaining a more accurate prediction of such phenomena, becomes of fundamental importance for port activities in that region. In this way, the main objective of this work is to evaluate the ability of the Weather Research and Forecasting Model (WRF) in the simulation and forecast of fog in Rio Grande city. For this, simulations of fog events were performed in the region from a high-resolution WRF model configuration. The methodology of the Fog Stability Index (FSI), the Richardson number, and two estimates of horizontal visibility was evaluated in the representation of the event and favorable conditions for its occurrence. Additionally, a brief characterization of the occurrence of fog in Rio Grande city was performed. The results highlighted the higher frequency of occurrence of the phenomenon in Rio Grande between May and September. The meteorological fields, time series, and vertical profiles of the variables under study obtained from the simulations with the WRF model showed promising results, showing the model's ability to identify the occurrence of fog in the area of interest of this study, as well as to represent aspects of its formation and dissipation processes and to characterize its structure, evolution, and displacement.

Key words: Fog; numerical modeling; WRF.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema das subdivisões da camada limite ao longo do ciclo diurno em regiões sob a influência de centros de alta pressão (adaptada de Stull (1997))..... | 29 |
| Figura 2- Fluxograma destacando a metodologia proposta para a realização deste estudo. | 52 |
| Figura 3- Localização geográfica da cidade de Rio Grande (em vermelho). | 53 |
| Figura 4- Período de abrangência dos dados utilizados no presente estudo, com o intervalo comum a todas as fontes de dados destacado pelo retângulo vermelho. | 57 |
| Figura 5 - Localização dos pontos de observação das variáveis meteorológicas e oceanográficas em Rio Grande. | 59 |
| Figura 6- Coordenada vertical no ARW (fonte: SKAMAROCK et al., 2019) | 62 |
| Figura 7 - Diagrama esquemático da execução do modelo WRF (adaptado de SKAMAROCK et al., 2019) | 63 |
| Figura 8 - Interações entre os esquemas físicos do modelo WRF (adaptado de SKAMAROCK et al., 2019). | 65 |
| Figura 9 - Disposição das grades aninhadas para simulações com o modelo WRF. Os valores na escala de cores são referentes à topografia, em metros. | 66 |
| Figura 10 - Perfil vertical teórico considerando a localização da nuvem (a), razão de mistura (b), temperatura potencial equivalente (c), temperatura potencial virtual (d), razão de mistura da água líquida (e) e número de gotas (f) para nuvens Stratocumulus (adaptado de Stull (1997)). | 75 |
| Figura 11 - Localização dos pontos representativos para avaliação da evolução temporal das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF. O ponto central (cruz vermelha) está localizado nas coordenadas da estação meteorológica da Praticagem e o ponto do Porto de Rio Grande está marcado em azul. | 75 |
| Figura 12 – Frequências (em dias) anual e mensal de nevoeiros na cidade de Rio Grande. | 79 |
| Figura 13 - Histograma do horário de retorno à condição de Praticabilidade após restrição de visibilidade na cidade de Rio Grande. As cores das colunas são referentes à estação do ano. | 80 |
| Figura 14 - Vento (m/s) em Rio Grande - RS para todos os conjuntos de dados disponíveis, sendo (a) referente à estação meteorológica da Praticagem e (b), (c), (d) e (e) referentes às boias RS-2, RS-3, RS-4 e RS-5, respectivamente. | 84 |

| | |
|--|----|
| Figura 15 - Corrente (m/s) em Rio Grande - RS para todos os conjuntos de dados disponíveis, sendo (a) referente ao ADCP da Praticagem e (b), (c), (d) e (e) referentes às boias RS-2, RS-3, RS-4 e RS-5, respectivamente..... | 85 |
| Figura 16 - Vento (m/s) nos eventos de nevoeiro de longa duração em Rio Grande-RS, sendo (a) referente a todas as observações disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (c) às observações nos horários mais próximos ao horário de registro do início e do fim da restrição de visibilidade, respectivamente..... | 87 |
| Figura 17 - Vento (m/s) nos eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS entre agosto de 2018 e agosto de 2019, sendo (a) referente a todas as observações disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (c) às observações nos horários mais próximos ao horário de registro do início e do fim da restrição de visibilidade, respectivamente..... | 89 |
| Figura 18 - Corrente (m/s) nos eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS entre agosto de 2018 e agosto de 2019, sendo (a) referente a todas as observações disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (c) às observações nos horários mais próximos ao horário de registro do início e do fim da restrição de visibilidade, respectivamente..... | 90 |
| Figura 19 - Vento (m/s) e corrente (m/s) na boia RS-2 para os eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS durante o período de operação da mesma, sendo (a) e (c) referentes a todas as observações de vento e corrente disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (d) às observações de vento e corrente nos horários mais próximos ao registro do fim da restrição de visibilidade, respectivamente. | 91 |
| Figura 20 - Vento (m/s) e corrente (m/s) na boia RS-3 para os eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS durante o período de operação da mesma, sendo (a) e (c) referentes a todas as observações de vento e corrente disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (d) às observações de vento e corrente nos horários mais próximos ao registro do fim da restrição de visibilidade, respectivamente. | 91 |
| Figura 21 - Vento (m/s) e corrente (m/s) na boia RS-4 para os eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS durante o período de operação da mesma, sendo (a) e (c) referentes a todas as observações de vento e corrente disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (d) às observações de vento e corrente nos horários mais próximos ao registro do fim da restrição de visibilidade, respectivamente. | 92 |
| Figura 22- Vento (m/s) e corrente (m/s) na boia RS-5 para os eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS durante o período de operação da mesma, sendo (a) e (c) referentes a todas as | |

| | |
|--|-----|
| observações de vento e corrente disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (d) às observações de vento e corrente nos horários mais próximos ao registro do fim da restrição de visibilidade, respectivamente. | 92 |
| Figura 23-Cartas Sinóticas do dia 17/07/2019 às 00UTC (a) e às 12UTC (b) e do dia 18/07/2019 às 00UTC (c) e às 12UTC (d), ilustrando a situação sinótica na região de estudo. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). | 95 |
| Figura 24 - Imagens horárias de satélite entre as 21h (hora local) do dia 16/07/2019 e as 06h (hora local) do dia 17/07/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE). | 96 |
| Figura 25 - Imagens horárias de satélite entre as 18h (hora local) do dia 17/07/2019 e as 06h (hora local) do dia 18/07/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE). | 97 |
| Figura 26 - Séries temporais de vento (direção e intensidade) e temperaturas do ar e da água observadas durante o evento de nevoeiro ocorrido entre os dias 16 e 18 de julho de 2019. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada..... | 99 |
| Figura 27 - Distribuição de níveis verticais do modelo (vermelho) e variação de espessura entre os níveis (azul) para a configuração do teste 1. A linha tracejada vermelha marca a altura de 1000m e a linha preta contínua destaca a altura de 100m. | 100 |
| Figura 28 - Distribuição de níveis verticais do modelo (vermelho) e variação de espessura entre os níveis (azul) para a configuração do teste 2. A linha tracejada vermelha marca a altura de 1000m e a linha preta contínua destaca a altura de 100m. | 100 |
| Figura 29 - Distribuição de níveis verticais do modelo (vermelho) e variação de espessura entre os níveis (azul) para a configuração do teste 3. A linha tracejada vermelha marca a altura de 1000m e a linha preta contínua destaca a altura de 100m. | 101 |
| Figura 30 - Séries temporais de vento a 10 metros (direção e intensidade) para os testes 1 (a), 2 (b) e 3 (c) simuladas pelo modelo WRF para o ponto de grade mais próximo à torre de controle da Praticagem. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. | 103 |

| | |
|---|-----|
| Figura 31 - Séries temporais de velocidade do vento a 10 metros (a), umidade relativa do ar a 2 metros (b), temperaturas do ar (c), conteúdo de água líquida (d), razão de mistura (e), FSI (f) e estimativas de visibilidade(g e h) simuladas pelo modelo WRF para o ponto de grade mais próximo à torre de controle da Praticagem a partir das configurações dos testes 1(em azul), 2 (em verde) e 3 (em vermelho). O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada..... | 106 |
| Figura 32 - Cartas Sinóticas do dia 09/07/2019 às 00UTC (a) e às 12UTC (b) e do dia 10/07/2019 às 00UTC (c) e às 12UTC (d), ilustrando a situação sinótica na região de estudo. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (CHM)..... | 108 |
| Figura 33 - Imagens horárias de satélite entre 00h e 06h (hora local) do dia 09/07/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE). | 109 |
| Figura 34 - Imagens horárias de satélite entre 18h (hora local) do dia 09/07/2019 e 06h (hora local) do dia 10/07/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE). | 110 |
| Figura 35 - Séries temporais de vento (direção e intensidade) e temperaturas do ar e da água observadas durante o intervalo compreendido entre a madrugada de 09 de julho e tarde de 10 de julho de 2019. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada..... | 111 |
| Figura 36 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 00h (hora local). | 113 |
| Figura 37- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 03h (hora local). | 115 |
| Figura 38 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal | |

| | |
|---|-----|
| do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 10h (hora local). | 117 |
| Figura 39 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 10h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 118 |
| Figura 40 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 15h (hora local). | 120 |
| Figura 41 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 15h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 121 |
| Figura 42 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 23h (hora local) | 123 |
| Figura 43 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 23h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 124 |
| Figura 44 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 10h (hora local). | 125 |
| Figura 45 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 10h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 126 |
| Figura 46- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 13h (hora local). | 128 |
| Figura 47 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 13h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 129 |
| Figura 48 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 15h (hora local). | 130 |

| | |
|--|-----|
| Figura 49 - Séries temporais de vento a 10 metros (direção e intensidade) para o ponto mais próximo à Torre de Controle da Praticagem (a) e demais pontos representativos (b,c,d e e) simuladas pelo modelo WRF para o período B. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada..... | 132 |
| Figura 50 - Séries temporais de velocidade do vento a 10 metros (a), umidade relativa do ar a 2 metros (b), temperatura do ar (c), conteúdo de água líquida (d) e razão de mistura (e) simuladas pelo modelo WRF para o período B. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. | 134 |
| Figura 51 - Séries temporais do FSI (a) e das estimativas de visibilidade de Kunkel (b) e do FSL (c) obtidas a partir do modelo WRF para o período B. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada..... | 136 |
| Figura 52 - Séries temporais do número de Richardson em diferentes níveis obtidos a partir da simulação do modelo WRF para o período B para o ponto de grade mais próximo à torre de controle da Praticagem. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. As linhas coloridas marcam limiares característicos das classes de estabilidade de Pasquill. | 137 |
| Figura 53 - Cartas Sinóticas do dia 28/08/2019 às 00UTC (a) e 12UTC (b), ilustrando a situação sinótica na região de estudo durante o período com registros de nevoeiros intensos na região de estudo. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). | 138 |
| Figura 54 - Imagens horárias de satélite entre as 21h (hora local) do dia 27/08/2019 e as 06h (hora local) do dia 28/08/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE). | 139 |
| Figura 55 - Séries temporais de vento (direção e intensidade) e temperaturas do ar e da água observadas durante o intervalo compreendido entre a madrugada e a tarde de 28 de agosto de 2019. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. | 140 |

| | |
|--|-----|
| Figura 56 - Diagrama ilustrativo da ocorrência do nevoeiro na cidade de Rio Grande no dia 28/08/2019. A localização aproximada do local de registro de cada fotografia é destacado na figura, bem como a localização do Porto de Rio Grande (cruz preta)..... | 142 |
| Figura 57 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 27/08/2019 às 21h (hora local). | 145 |
| Figura 58 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 27/08/2019 às 21h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 146 |
| Figura 59 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 01h (hora local). | 148 |
| Figura 60 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 01h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 149 |
| Figura 61 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 07h (hora local). | 151 |
| Figura 62 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 07h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 152 |
| Figura 63 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08//2019 às 11h (hora local). | 154 |
| Figura 64 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 11h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 155 |
| Figura 65- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 15h (hora local). | 156 |

| | |
|---|-----|
| Figura 66 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 15h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa. | 157 |
| Figura 67 - Séries temporais de vento a 10 metros (direção e intensidade) para o ponto mais próximo à Torre de Controle da Praticagem (a) e demais pontos representativos (b,c,d e e) simuladas pelo modelo WRF para o período D. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. | 159 |
| Figura 68 - Séries temporais de velocidade do vento a 10 metros (a), umidade relativa do ar a 2 metros (b), temperatura do ar (c), conteúdo de água líquida (d) e razão de mistura (e) simuladas pelo modelo WRF para o período D. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. | 161 |
| Figura 69 - Séries temporais do FSI (a) e das estimativas de visibilidade de Kunkel (b) e do FSL (c) obtidas a partir do modelo WRF para o período D. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. | 163 |
| Figura 70 - Séries temporais do número de Richardson em diferentes níveis obtidos a partir da simulação do modelo WRF para o período D para o ponto de grade mais próximo à torre de controle da Praticagem. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. As linhas coloridas marcam limiares característicos das classes de estabilidade de Pasquill. | 164 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Critério de Estabilidade Estática da Atmosfera..... | 26 |
| Tabela 2 - Critério de Estabilidade Condicional da Atmosfera..... | 26 |
| Tabela 3 - Critério de Estabilidade atmosférica para o ar úmido | 27 |
| Tabela 4 - Dados aplicados na caracterização da ocorrência de nevoeiros em Rio Grande..... | 56 |
| Tabela 5 - Especificidades dos domínios definidos para simulações com o modelo WRF. | 66 |
| Tabela 6 - Parametrizações adotadas para as simulações com o modelo WRF. | 67 |
| Tabela 7 - Configurações de parâmetros referentes à resolução vertical do modelo WRF utilizada nos testes de sensibilidade realizados neste estudo (* Parâmetros não utilizados na configuração do teste 1)..... | 70 |
| Tabela 8 - Classes de estabilidade atmosférica de acordo com o número de Richardson..... | 72 |
| Tabela 9-Intervalos de simulação computacional e eventos avaliados neste estudo..... | 73 |
| Tabela 10 - Frequência mensal de dias com restrição de visibilidade na cidade de Rio Grande - RS entre abril de 2004 e agosto de 2019 | 77 |
| Tabela 11 - Eventos de restrição de visibilidade de longa duração ocorridos na cidade de Rio Grande-RS entre abril de 2004 e agosto de 2019. | 81 |
| Tabela 12 - Descrição detalhada de eventos de restrição de visibilidade de longa duração ocorridos na cidade de Rio Grande-RS entre abril de 2004 e agosto de 2019. | 82 |
| Tabela 13 - Intensidade do vento e classificação adotada neste estudo. | 83 |
| Tabela 14 -Síntese dos resultados obtidos a partir da análise dos dados das boias do Projeto SiMCosta para os eventos de nevoeiro ocorridos na cidade de Rio Grande durante o período de operação das mesmas..... | 93 |
| Tabela 15 - Métricas estatísticas para a previsão de nevoeiros intensos em Rio Grande a partir do modelo WRF. | 165 |

Sumário

| | |
|--|----|
| Lista de Figuras | 9 |
| Lista de Tabelas | 17 |
| 1 INTRODUÇÃO | 22 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 25 |
| 2.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA..... | 25 |
| 2.1.1 Estabilidade atmosférica..... | 25 |
| 2.1.2 Características da camada limite atmosférica..... | 28 |
| 2.2 NEVOEIROS..... | 31 |
| 2.2.1 Nevoeiros de resfriamento..... | 32 |
| 2.2.2 Nevoeiros de acréscimo de vapor d'água | 34 |
| 2.2.3 Processo dissipativo do nevoeiro..... | 35 |
| 2.3 MÉTODOS DE PREVISÃO DE NEVOEIROS | 35 |
| 2.3.1 Métodos objetivos e estatísticos | 36 |
| 2.3.2 Modelagem numérica | 39 |
| 2.3.2.1 Modelos 1-D: | 40 |
| 2.3.2.2 Modelos 3-D: | 41 |
| 2.3.2.3 Métodos Combinados: | 45 |
| 2.4 NEVOEIROS EM RIO GRANDE E EM SUAS PROXIMIDADES | 49 |
| 3 METODOLOGIA | 51 |
| 3.1 REGIÃO DE ESTUDO | 53 |
| 3.2 DADOS | 56 |
| 3.3 CARACTERIZAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE NEVOEIROS EM RIO GRANDE | 59 |
| 3.3.1 Climatologia | 59 |
| 3.3.2 Avaliação observacional da ocorrência de nevoeiros..... | 60 |
| 3.4 MODELAGEM NUMÉRICA | 61 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.4.1 | O modelo WRF..... | 61 |
| 3.4.2 | Configurações do WRF | 65 |
| 3.4.2.1 | Resolução Vertical:..... | 68 |
| 3.4.2.2 | Métodos de estimativas de visibilidade e outros parâmetros avaliados a partir das saídas do modelo WRF: | 70 |
| 3.4.1.3 | Estudos de Caso:..... | 72 |
| 3.4.1.4 | Avaliação estatística: | 76 |
| 4 | RESULTADOS I : ASPECTOS OBSERVACIONAIS DE NEVOEIROS EM RIO GRANDE | 77 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE NEVOEIROS | 77 |
| 4.1.1 | Breve caracterização do regime de vento e de correntes..... | 82 |
| 4.1.2 | Nevoeiros em Rio Grande | 85 |
| 4.1.2.1 | Nevoeiros de longa duração..... | 86 |
| 4.1.2.2 | Nevoeiros entre agosto de 2018 e agosto de 2019: | 87 |
| 5 | RESULTADOS II: SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE NEVOEIROS EM RIO GRANDE | 94 |
| 5.1 | TESTE DE SENSIBILIDADE DO MODELO WRF À RESOLUÇÃO VERTICAL ... | 94 |
| 5.1.1 | Descrição observacional – Período C..... | 94 |
| 5.1.2 | Descrição vertical do modelo | 99 |
| 5.1.3 | Sensibilidade do modelo WRF aos parâmetros de resolução vertical..... | 101 |
| 5.2 | SIMULAÇÕES COM A MELHOR CONFIGURAÇÃO DO MODELO WRF..... | 107 |
| 5.2.1 | Período B | 107 |
| 5.2.1.1 | Descrição observacional | 107 |
| 5.2.1.2 | Resultados numéricos | 112 |
| 5.2.2 | Período D..... | 138 |
| 5.2.2.1 | Descrição observacional | 138 |
| 5.2.2.2 | Resultados numéricos | 143 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.2.3 | Avaliação estatística da previsão numérica de nevoeiros intensos pelo modelo WRF | 164 |
| 6 | CONCLUSÕES | 166 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 170 |
| | APÊNDICES | 183 |
| | APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PELAS CONDIÇÕES INICIAIS (GFS) E PELO MODELO WRF | 183 |
| | APÊNDICE B – AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA PREVISÃO NUMÉRICA DE NEVOEIROS INTENSOS PELO MODELO WRF A PARTIR DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE VISIBILIDADE E DO <i>FOG STABILITY INDEX</i> | 185 |
| | APÊNDICE C - ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA ESTAÇÃO DA PRATICAGEM DA BARRA DE RIO GRANDE..... | 188 |
| | APÊNDICE D - ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA BOIA RS-2 | 190 |
| | APÊNDICE E- ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA BOIA RS-3 | 192 |
| | APÊNDICE F - ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA BOIA RS-4 | 194 |
| | APÊNDICE G - ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA BOIA RS-5 | 196 |
| | APÊNDICE H – ANÁLISE ESPACIAL DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE DO MODELO WRF AOS PARÂMETROS DE RESOLUÇÃO VERTICAL – PERÍODO C | 198 |
| | H.1. Formação do fenômeno..... | 198 |
| | H.2. Dissipação do fenômeno | 206 |
| | APÊNDICE I – RESULTADOS TESTES DE SENSIBILIDADE DO MODELO WRF À PARÂMETROS DE RESOLUÇÃO VERTICAL – PERÍODO C | 214 |
| | APÊNDICE J – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COM O MODELO WRF PARA O PERÍODO A (DOMÍNIO 3) | 230 |
| | J.1. Descrição observacional..... | 230 |

| | |
|--|-----|
| J.2. Resultados numéricos..... | 236 |
| APÊNDICE K - CAMPOS E PERFIS VERTICAIS SIMULADOS PELO MODELO WRF PARA O PERÍODO A (DOMÍNIO 3)..... | 262 |
| APÊNDICE L - CAMPOS E PERFIS VERTICAIS SIMULADOS PELO MODELO WRF PARA O PERÍODO B (DOMÍNIO 3)..... | 282 |
| APÊNDICE M - CAMPOS E PERFIS VERTICAIS SIMULADOS PELO MODELO WRF PARA O PERÍODO D (DOMÍNIO 3)..... | 298 |

1 INTRODUÇÃO

Nevoeiros são fenômenos que se caracterizam por restrição da visibilidade horizontal para 1000 metros ou menos e, desta forma, podem ter impactos significativos em diversas atividades humanas. Há estudos que relatam a influência do fenômeno do ponto de vista histórico, se mostrando como elemento determinante em diversos eventos da história mundial, afetando o resultado de diferentes operações militares, como em algumas batalhas da Primeira e da Segunda Guerras Mundiais (TARDIF, 2007), e favorecendo, por exemplo, a invasão de tropas francesas na cidade do Rio de Janeiro (MARTINS E FILGUEIRAS, 2011). A influência do fenômeno também é evidenciada em outras áreas como na qualidade do ar, na saúde humana e de diferentes ecossistemas e na economia (TARDIF, 2007). Além disso, há estudos que mostram a influência da ocorrência e da previsão de nevoeiro no planejamento da geração de energia solar (NILO et al., 2020) e na captação de água potável para consumo da população em áreas desérticas (OLIVIER, 2004).

O setor de transportes é altamente afetado pela ocorrência do fenômeno, podendo resultar em impactos como acidentes, atrasos e suspensões de atividades, ocasionando perdas econômicas significativas. Estudos anteriores descreveram e relataram impactos da ocorrência de nevoeiro nas atividades dos setores de transporte aéreo, marítimo e rodoviário (CROFT; DARBE; GARMON, 1995; CROFT, 1997; TARDIF, 2007; KULKARNI *et al.*, 2019, entre outros). Acidentes de grande magnitude já foram causados pela ocorrência do fenômeno, como o naufrágio do navio Titanic após a colisão com um iceberg envolto por um nevoeiro (TARDIF, 2007) e um extenso engavetamento na Rodovia dos Imigrantes, em São Paulo, em setembro de 2011, envolvendo cerca de 270 carros e afetando o trânsito nesta via por mais de 22 horas consecutivas (CARDILLI E MACEDO, 2011), entre outros.

De acordo com Croft, Abe e Garmon (1995), operações marítimas de transporte, quando interrompidas, reduzem a movimentação de carga e, conseqüentemente, diminuem o faturamento. Adicionalmente, os autores destacam que a persistência do nevoeiro por longo tempo, abrangendo o horizonte de dias, provocam perdas econômicas onerosas. Tais perdas se amplificam considerando também gastos operacionais diários e atrasos em outros portos devido às mudanças na operação de uma região portuária devido à atuação do fenômeno.

Desta forma, em cidades portuárias, como o município de Rio Grande, localizado no estado do Rio Grande do Sul, estudar e conhecer melhor as características de formação e dissipação

dos nevoeiros é de extrema importância. O porto desta cidade é considerado o segundo principal do país para o desenvolvimento do comércio internacional (SUPERINTENDÊNCIA DOS PORTOS, c2019). A cada ocorrência registrada do fenômeno na região, há a possibilidade da interrupção da entrada de navios ao canal de acesso ao porto, elevando os custos operacionais e implicando em atrasos do serviço portuário (REBOITA E KRUSCHE, 2000).

Destaca-se também a importância do transporte rodoviário no estado do Rio Grande do Sul, que tem fronteiras com Uruguai e Argentina, com dependência deste tipo de transporte pelos setores de agricultura e pecuária (GOMES, 2011). Assim, a previsão de nevoeiros em Rio Grande pode contribuir na diminuição e prevenção de acidentes marítimos e rodoviários, possibilitar a contenção de prejuízos no setor portuário e de transporte de cargas e, conseqüentemente, propiciar a redução do custo operacional (GOMES;KRUSCHE;ROCHA, 2011; GOMES, 2011).

A previsão de nevoeiros é uma tarefa desafiadora. Apesar dos esforços dos pesquisadores, este prognóstico apresenta significativa complexidade devido à variabilidade no espaço e no tempo do próprio fenômeno e dos fatores que levam ao seu desenvolvimento, além do incompleto entendimento e da dificuldade de representar processos físicos em diferentes escalas inerentes à sua formação e a interação entre tais mecanismos (GULTEPE et al, 2007; NILO et al, 2020).

Diferentes metodologias de previsão de nevoeiros vêm sendo desenvolvidas e são constantemente aprimoradas. Dentre elas, destacam-se os métodos objetivos, estatísticos e modelagem numérica. Métodos objetivos são baseados no conhecimento da climatologia da ocorrência de nevoeiros em determinada região, aliado à experiência do previsor (FRANÇA, 2008). Métodos baseados em estatísticas demandam uma extensa gama de dados e podem abranger um conjunto de técnicas das mais tradicionais, como a regressão linear, até mais sofisticadas, como aplicação de redes neurais e algoritmos de árvores de decisão, por exemplo (GULTEPE *et al.*, 2007). A modelagem numérica permite a avaliação dos processos físicos envolvidos na formação dos nevoeiros (FRANÇA, 2008) e tem sido amplamente utilizada para o estudo do fenômeno.

O modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF) é um sistema de modelagem atmosférica de código aberto que foi projetado para uso em pesquisas e na previsão do tempo (SKAMAROCK *et al.*, 2019). O modelo abrange uma vasta gama de possibilidades de aplicações em meteorologia, atendendo a diferentes escalas espaciais, e apresenta uma ampla comunidade de usuários. Com relação aos nevoeiros, é possível destacar que o WRF tem sido extensivamente utilizado por diversos autores para estudar o fenômeno nos últimos anos (PANG *et al.*, 2010; GOMES, 2011; STEENEVELD;RONDA;HOLTSLAG, 2015, entre outros), apresentando resultados promissores no que diz respeito a entender melhor os mecanismos de formação e manutenção e a obter melhorias no prognóstico dos mesmos.

Desta forma, o principal objetivo deste estudo é avaliar a habilidade do modelo WRF na simulação/previsão de nevoeiros na cidade de Rio Grande (RS). Como objetivos específicos, destacam-se:

- Caracterização da ocorrência de nevoeiros no município de Rio Grande a partir de dados observados;
- Configurar o modelo atmosférico *Weather Research and Forecast* (WRF) de forma adequada para a caracterização e simulação de nevoeiros na área de estudo;
- Avaliar a influência de parâmetros de resolução vertical na simulação de eventos de nevoeiro;
- Verificar particularidades e diferenças entre estimativas de visibilidade e avaliar parâmetros relevantes à ocorrência de nevoeiro a partir dos resultados de modelagem numérica;
- Realização de estudos de caso de eventos de intensa restrição de visibilidade na cidade de Rio Grande a partir de abordagem observacional e numérica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

Nevoeiro é um fenômeno de camada limite atmosférica (CLA) (COTTON E ANTHES, 1989; STULL, 1997) e que apresenta variabilidade horizontal e temporal em escalas tipicamente consideradas como o domínio da meteorologia de mesoescala (COTTON E ANTHES, 1989). Desta maneira, é importante caracterizar alguns aspectos da CLA.

2.1.1 Estabilidade atmosférica

O conceito de estabilidade atmosférica é um elemento importante no estudo da camada limite. De acordo com Arya (2001), variações verticais de temperatura e umidade levam à estratificação da densidade do ar na CLA. Desta forma, uma parcela de ar com movimentos ascendentes ou descendentes na atmosfera entrará em contato com ar ambiente de diferente densidade. Estas diferenças, considerando a gravidade, irão dar origem à uma força de flutuação que atuará sobre a parcela, acelerando ou retardando seu movimento vertical.

Se após um deslocamento vertical há tendência de distanciamento da parcela de sua posição original ou seu ponto de equilíbrio, o ambiente é denominado instável. Em contrapartida, quando a tendência da parcela é de retorno para a posição de origem, a atmosfera encontra-se em uma condição de estabilidade (ROGERS E YAU, 1996; ARYA, 2001). Quando não há nenhuma força de flutuação exercida pela atmosfera sobre a parcela, a atmosfera é considerada neutra (ARYA, 2001).

De maneira geral, os processos de estabilidade atmosférica são estudados de acordo com o tipo de atmosfera avaliado. Considerando a atmosfera seca, ou seja, sem ocorrência de condensação no deslocamento vertical da parcela, a mudança de temperatura da mesma pode ser razoavelmente presumida como adiabática, porque a energia térmica transferida entre a parcela e seu ambiente é por difusão ou radiação, sendo ambos processos lentos (LAMB E VERLINDE, 2011). O deslocamento adiabático de uma parcela conserva a temperatura potencial. Desta forma, a flutuabilidade de uma parcela deslocada e, portanto, sua estabilidade, podem ser determinadas comparando sua temperatura potencial com a do ambiente em qualquer altura (LAMB E VERLINDE, 2011).

Assim, o critério de estabilidade estática (para o ar seco) pode ser avaliado da seguinte forma (ROGERS E YAU, 1996):

Tabela 1 - Critério de Estabilidade Estática da Atmosfera

| Condição | Classificação – Estabilidade Estática |
|--------------------------|--|
| $\frac{d\theta}{dz} > 0$ | Estável |
| $\frac{d\theta}{dz} = 0$ | Neutra |
| $\frac{d\theta}{dz} < 0$ | Instável |

onde θ é a temperatura potencial do ambiente e z a altura.

Quando uma parcela está saturada e/ou ocorre condensação ou evaporação como resultado do deslocamento vertical, a energia liberada pela mudança de fase impacta a taxa de variação vertical da temperatura (LAMB E VERLINDE, 2011). Esta taxa é afetada pela quantidade de água que muda de fase, que, por sua vez, depende da temperatura. Ou seja, esta taxa de variação vertical de temperatura para o ar úmido é variável (LAMB E VERLINDE, 2011).

Para o ar saturado, a temperatura potencial equivalente saturada é utilizada na avaliação da estabilidade (estabilidade condicional), de modo que:

Tabela 2 - Critério de Estabilidade Condicional da Atmosfera

| Condição | Classificação – Estabilidade Condicional |
|-------------------------------|---|
| $\frac{d\theta_{es}}{dz} > 0$ | Estável |
| $\frac{d\theta_{es}}{dz} = 0$ | Neutra |
| $\frac{d\theta_{es}}{dz} < 0$ | Instável |

onde θ_{es} é a temperatura potencial equivalente saturada do ambiente e z a altura.

Para o ar úmido, o critério combinado a seguir é adotado na verificação da estabilidade atmosférica:

Tabela 3 - Critério de Estabilidade atmosférica para o ar úmido

| Condição | Classificação – Critério Combinado |
|--|---|
| $\frac{d\theta}{dz} > 0$ e $\frac{d\theta_{es}}{dz} > 0$ | Absolutamente Estável |
| $\frac{d\theta}{dz} > 0$ e $\frac{d\theta_{es}}{dz} < 0$ | Condicionalmente Instável |
| $\frac{d\theta}{dz} < 0$ e $\frac{d\theta_{es}}{dz} < 0$ | Absolutamente Instável |
| $\frac{d\theta}{dz} = 0$ | Neutra não saturada |
| $\frac{d\theta_{es}}{dz} = 0$ | Neutra Saturada |

2.1.2 Características da camada limite atmosférica

A CLA é definida como a porção da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície terrestre e que responde às forçantes desta superfície em uma escala de tempo de cerca de uma hora ou menos (STULL, 1997). Tais forçantes incluem atrito, transferência de calor, modificação do fluxo induzido pelo terreno, entre outros.

De acordo com Arya (2001), a CLA também pode ser definida como a camada de fluido imediatamente acima de uma determinada superfície, onde ocorrem trocas significativas de *momentum*, calor e massa e é formada como consequência das interações entre a atmosfera e a superfície. O autor destaca a influência do atrito e do aquecimento e também que as transferências de *momentum*, massa e calor ocorrem de maneira eficiente através do mecanismo de turbulência.

A espessura da CLA é altamente variável no tempo e no espaço, variando de dezenas de metros a alguns quilômetros (STULL, 1997; ARYA, 2001) e depende de alguns fatores, como por exemplo, da taxa de aquecimento/resfriamento da superfície, intensidade do vento, rugosidade, topografia, advecção horizontal de calor e umidade (ARYA, 2001).

Sobre os oceanos, a CLA tende a apresentar pouca variação espacial e temporal devido à elevada capacidade térmica da água (STULL, 1997; ARYA, 2001). Sobre essas regiões, a maior parte das alterações na profundidade da CLA é ocasionada por processos de escala sinótica e de mesoescala que promovem movimento vertical e/ou advecção de diferentes massas de ar sobre a superfície do oceano (STULL, 1997). Adicionalmente, Stull (1997) destaca que em regiões próximas ao encontro de duas correntes oceânicas de temperaturas diferentes também pode haver variações da espessura.

Variações na altura e na estrutura da CLA podem ser decorrentes do desenvolvimento e/ou passagem de sistemas de escala sinótica e de mesoescala (ARYA, 2001). De acordo com Stull (1997), a tendência é de que a CLA seja menos espessa em regiões sob domínio de sistemas de alta pressão que em regiões de baixa pressão, tanto em superfícies terrestres, quanto oceânicas. A subsidência e divergência horizontal em baixos níveis da atmosfera associadas aos sistemas de alta pressão favorecem este padrão (STULL, 1997; ARYA, 2001). Em contrapartida, em regiões influenciadas por sistemas de baixa pressão são associados a movimentos ascendentes, favorecendo transporte de ar da camada limite para níveis superiores,

tornando difícil definir um topo da camada limite para tais situações (STULL, 1997; ARYA, 2001).

A CLA apresenta evolução também de acordo com o ciclo diurno, respondendo ao aquecimento e resfriamento da superfície (ARYA, 2001). De acordo com Stull (1997), é melhor definida em superfícies terrestres e sob domínio de sistemas de alta pressão e, sob estas condições, a CLA pode ser subdividida em 4 componentes principais (Figura 1):

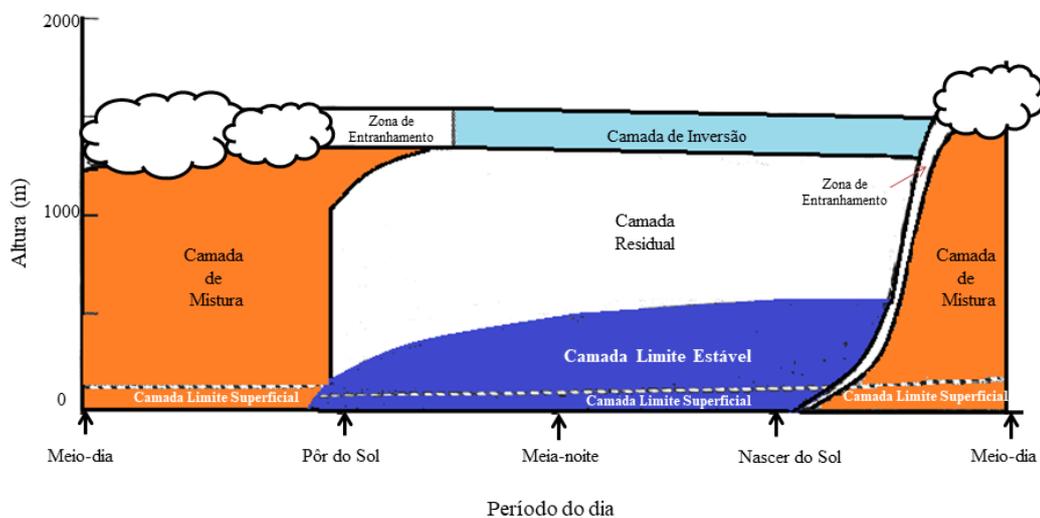


Figura 1 - Esquema das subdivisões da camada limite ao longo do ciclo diurno em regiões sob a influência de centros de alta pressão (adaptada de Stull (1997)).

a) Camada de Mistura ou Convectiva: Nesta camada, a turbulência predominantemente é gerada pelo mecanismo de convecção, ou seja, por forçantes térmicas, embora uma camada bem misturada também possa ser formada em regiões de vento forte (STULL, 1997). É caracterizada por mistura intensa em uma situação estaticamente instável, onde os gradientes verticais de parâmetros meteorológicos são praticamente nulos (STULL, 1997).

Em dias de céu claro, a evolução desta camada com o ciclo diurno está relacionada ao aquecimento da superfície devido à radiação solar. Este processo tem início cerca de meia hora após o nascer do sol, onde é iniciado o crescimento da camada de mistura e a mesma atinge sua altura máxima no final da tarde (STULL, 1997).

Em dias com maior cobertura de nuvens, há redução da quantidade de radiação que chega ao solo, o que pode resultar em um desenvolvimento mais lento da camada de mistura ou tornar a mesma não turbulenta ou apresentando estratificação neutra (STULL, 1997).

No topo da camada de mistura pode ser verificada uma camada estável, onde a turbulência é suprimida (ARYA, 2001). Esta é a chamada zona de entranhamento, que atua como uma tampa para os movimentos ascendentes (STULL, 1997) e onde ocorre o entranhamento de ar mais quente e seco na camada de mistura (ARYA, 2001). Nunes (2008) destaca que a zona de entranhamento delimita verticalmente a camada limite atmosférica, atuando como interface entre a mesma e a atmosfera livre.

b) Camada Residual: Esta camada é observada após o pôr do sol, quando há um decaimento da turbulência predominante na camada de mistura. Recebe este nome pois suas variáveis de estado médio e variáveis de concentração iniciais são as mesmas da camada de mistura recentemente decaída (STULL, 1997). Apresenta estratificação neutra, de modo que a turbulência apresenta-se quase de igual intensidade em todas as direções (STULL, 1997).

A camada residual não apresenta contato direto com o solo, não sendo afetada diretamente pelo transporte turbulento de propriedades relacionadas à superfície, uma vez que a camada limite estável aumenta de espessura durante a noite, modificando a base da camada residual (STULL, 1997).

c) Camada Limite Estável ou Noturna: À medida que as horas noturnas avançam, a parte inferior da camada residual é transformada em camada limite estável devido ao contato com o solo que sofre resfriamento radiativo. Desta maneira, esta camada é caracterizada por ar estaticamente estável e turbulência menos intensa. Adicionalmente, destaca-se que forçantes de mesoescala e escala sinótica são importantes para o desenvolvimento desta camada (STULL, 1997).

Embora os ventos em superfície sejam comumente calmos ou fracos à noite, os ventos em altitude podem apresentar aumento de magnitude, caracterizando o fenômeno conhecido como jato de baixo nível ou jato noturno (STULL, 1997). O ar estaticamente estável tende a inibir a turbulência, enquanto o jato noturno em desenvolvimento aumenta o cisalhamento do vento e tende a gerar turbulência (STULL, 1997).

De acordo com Stull (1997), o equilíbrio entre a geração mecânica de turbulência e o amortecimento por estabilidade varia para cada caso individualmente, possibilitando a observação de camadas limites estáveis que variam de bem misturadas a não turbulentas. Como resultado dessa complexidade, esta camada é difícil de descrever e modelar. Durante os períodos não turbulentos, o fluxo superior da camada limite fica essencialmente desacoplado da superfície.

Ao contrário da camada de mistura, a camada limite estável não apresenta um topo bem definido, se misturando com a camada residual logo acima (STULL, 1997). Com relação à altura, Arya (2001) aponta que a camada limite estável se apresenta consideravelmente menos espessa que a camada de mistura.

Destaca-se que esta camada também pode se formar e ser observada durante o período diurno, por advecção de ar mais quente sobre uma superfície relativamente mais fria (STULL, 1997). Estas condições propícias podem ser observadas, por exemplo, após a passagem de uma frente fria ou em regiões costeiras.

Na camada limite estável ocorrem processos importantes para a formação e desenvolvimento de nevoeiros, como mistura turbulenta, fluxos de radiação, processos de condensação e evaporação (PINHEIRO, 2006). Além disso, o complexo equilíbrio entre turbulência e estabilidade é relevante para a formação de nevoeiro e nos processos de dissipação, espessamento ou elevação do mesmo (STULL, 1997).

d) Camada Superficial: Pode ser definida como a porção inferior da CLA, representando o décimo mais baixo da mesma (STULL, 1997; ARYA, 2001). É muito influenciada pela CLA como um todo e não apresenta um topo muito bem definido (ARYA, 2001). Dentro desta camada existe uma subcamada bem fina, chamada interfacial, onde o transporte molecular domina o transporte turbulento (STULL, 1997).

Na camada superficial, ocorrem as mais significativas variações verticais de parâmetros meteorológicos e, conseqüentemente, as mais expressivas trocas de *momentum*, calor e massa (ARYA, 2001).

2.2 NEVOEIRO

Nevoeiro pode ser definido por uma nuvem estratiforme que se forma sobre uma superfície ou muito próximo a ela (BINHUA, 1985). A Organização Meteorológica Mundial (WMO, da sigla em inglês para *World Meteorological Organization*) define o fenômeno como a suspensão de gotículas de água muito pequenas no ar, geralmente microscópicas, que resultam na redução de visibilidade horizontal na superfície para uma distância inferior a mil metros (WMO, 2017).

De acordo com Gultepe *et al.* (2007), a formação e a dissipação de um nevoeiro resultam de complexas interações entre processos microfísicos, termodinâmicos e dinâmicos.

Os nevoeiros podem ser classificados de acordo com o seu processo de formação, que tem início quando a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho se aproximam do mesmo valor. Tal processo pode ocorrer a partir do resfriamento do ar ou pelo incremento na quantidade de vapor d'água (AHRENS, 2001).

O processo de resfriamento do ar pode ser decorrente de perda radiativa, da advecção de ar sobre uma superfície fria, da evaporação e também de um processo de elevação de uma parcela de ar. Em contrapartida, o processo de acréscimo de vapor d'água se dá pela precipitação, por advecção de umidade e também pela evaporação em superfícies líquidas.

2.2.1 Nevoeiros de resfriamento

O mecanismo de resfriamento é responsável pela formação dos principais tipos de nevoeiros: os de radiação e os de advecção, assim como os de radiação-advecção (PINHEIRO, 2006).

Os nevoeiros de radiação são fenômenos exclusivamente terrestres (VAREJÃO-SILVA, 2005) e são formados a partir do resfriamento radiativo. Em condições noturnas estáveis (céu claro e ventos calmos ou fracos), a liberação de radiação de ondas longas pela superfície terrestre promove o resfriamento da superfície e, conseqüentemente, da camada de ar acima desta. Desta forma, a temperatura do ar tende a diminuir progressivamente e, ao atingir a temperatura do ponto de orvalho e, conseqüentemente, a condição de saturação, se estabelece

o desenvolvimento do nevoeiro a partir da condensação do vapor d'água ao redor dos núcleos de condensação presentes na atmosfera (AHRENS, 2001; OLIVEIRA;VIANELLO; FERREIRA, 2001).

Ahrens (2001) destaca que, quanto mais longa for a noite, maior o tempo de resfriamento e maior a probabilidade de ocorrência do fenômeno. Adicionalmente, o autor destaca que as condições de céu claro e ventos fracos podem ser associadas à atuação de sistemas de alta pressão. Desta maneira, destaca-se que o fenômeno é mais comum no final do outono e durante o inverno.

Varejão-Silva (2005) destaca que ventos fracos, capazes de gerar turbulência, podem contribuir para uma ampliação da espessura da camada que sofre resfriamento e, conseqüentemente, para um aumento da espessura do nevoeiro.

De acordo com Varejão-Silva (2005), em áreas com significativas concentrações de poluentes, partículas higroscópicas presentes na atmosfera podem atuar como núcleos de condensação, promovendo uma formação antecipada e/ou uma dissipação mais lenta de nevoeiros de radiação.

Adicionalmente, em regiões com topografia acentuada, o ar que se resfria em contato com o solo tende a escoar pelas encostas e a se acumular nos vales, aumentando a probabilidade de ocorrência de nevoeiros de radiação nestas áreas mais baixas (VAREJÃO-SILVA, 2005). Além disso, em terrenos inclinados, ar úmido e estável pode ser elevado ao longo de uma encosta e expandir-se, resfriando-se adiabaticamente até atingir a saturação, favorecendo formação de nevoeiros (VAREJÃO-SILVA, 2005). Ahrens (2001) destaca que estes nevoeiros, quando formados sobre áreas muito extensas, podem se mostrar muito duradouros, perdurando por dias.

Os nevoeiros de advecção são formados a partir do deslocamento de uma camada de ar quente e úmida sobre uma superfície mais fria. O contato entre o ar mais quente e a superfície favorece o resfriamento progressivo da camada, até que as temperaturas do ar e do ponto de orvalho se igualem, dando origem à condição de saturação e ao processo de condensação do vapor d'água (OLIVEIRA;VIANELLO;FERREIRA, 2001). Para a ocorrência desse tipo de nevoeiro é necessário que o ar esteja em movimento (AHRENS, 2001). Desta forma, é

importante que o ar se desloque com determinada velocidade, pois uma velocidade alta tende a dispersar as gotículas d'água formadas anteriormente e uma velocidade muito baixa não favorece é o desenvolvimento do nevoeiro em dimensão e espessura. (PINHEIRO, 2006). A velocidade do vento também irá influenciar no aumento da espessura do nevoeiro, de modo que esta pode aumentar com a elevação da magnitude do vento (VAREJÃO-SILVA, 2005).

Os nevoeiros de advecção ocorrem tanto sobre superfícies terrestres quanto sobre marítimas (AHRENS, 2001). Alguns estudos apontam dentre seus resultados a importância do processo de resfriamento para a ocorrência deste tipo de nevoeiro (NAKANISHI E NIINO, 2006; LIU *et al.*, 2016)

Os nevoeiros de radiação-advecção possuem características dos dois tipos de nevoeiros supracitados. Inicialmente são formados sobre superfícies continentais pelo processo radiativo e, após sua formação, são advectados para áreas marítimas seguindo o escoamento local predominante (BINHUA, 1985 apud. PINHEIRO, 2006). Também podem se formar através do resfriamento radiativo noturno sobre o continente de ar oriundo de superfícies líquidas relativamente quentes, conseqüentemente com elevada disponibilidade de umidade, durante o dia (AHRENS, 2001). Os nevoeiros deste tipo são muito estáveis e densos (PÉREZ-DÍAZ *et al.*, 2017).

2.2.2 Nevoeiros de acréscimo de vapor d'água

Os nevoeiros formados pelo processo de adição de vapor d'água podem pertencer a duas categorias: nevoeiros frontais ou nevoeiros de evaporação.

Os nevoeiros frontais são associados às zonas frontais e também às passagens de sistemas frontais. Este tipo de nevoeiro pode ser subdividido em 3 classes: pré-frontal quente, pós-frontal frio e de passagem frontal (COTTON E ANTHERS, 1989).

A ocorrência de fenômenos das duas primeiras classes é causada pelo efeito da precipitação "quente" em uma massa de ar mais frio, causando a evaporação de parte da água líquida, incrementando a razão de mistura da parcela e, conseqüentemente, elevando a temperatura do ponto de orvalho (AHRENS, 2001). Desta forma, a parcela pode atingir mais facilmente a saturação e, possivelmente, formar o nevoeiro sem que haja um processo de

resfriamento da camada de ar inferior. Alguns autores também mencionam estes tipos de fenômeno como nevoeiros de precipitação (AHRENS, 2001; TARDIF E RASMUSSEN, 2007).

Os nevoeiros de passagem frontal podem ocorrer quando há a mistura de massas de ar quase saturadas com diferentes temperaturas na zona frontal (interface entre duas massas de ar de diferentes temperaturas e densidades) ou quando o ar relativamente quente é subitamente resfriado sobre um solo úmido após a passagem de uma frente fria (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2012).

Os nevoeiros de evaporação são comuns em latitudes médias, próximos a lagos e rios (PÉREZ-DÍAZ *et al*, 2017). De acordo com Oliveira, Vianello e Ferreira (2001), este tipo de nevoeiro ocorre a partir do deslocamento de uma parcela de ar frio sobre uma superfície líquida mais quente, promovendo assim a evaporação da água superficial. A partir deste processo, há um incremento de vapor d'água no ar, aumentando a razão de mistura e favorecendo a formação do nevoeiro.

2.2.3 Processo dissipativo do nevoeiro

A dissipação dos nevoeiros acontece a partir da redução da disponibilidade de umidade e/ou pelo aquecimento do ar. De acordo com Pinheiro (2006), outros fatores também podem influenciar e contribuir para a dissipação do fenômeno, como por exemplo, aumento da intensidade do vento, precipitação e elevação da temperatura da superfície do mar, entre outros.

O processo dissipativo do nevoeiro se inicia, usualmente, pelas bordas da nuvem. O tempo necessário para a sua dissipação depende da espessura e da altura da camada de inversão de temperatura do nevoeiro (OLIVEIRA, 2002).

2.3 MÉTODOS DE PREVISÃO DE NEVOEIROS

Apesar do crescente desenvolvimento de ferramentas e estudos visando uma melhor previsão dos nevoeiros, ainda existem limitações para a realização de tal tarefa. Gultepe *et al*. (2007) reitera o incompleto entendimento de processos importantes para formação do

fenômeno, como a microfísica de nuvens, química atmosférica e o papel dos aerossóis, radiação, turbulência, dinâmica em diferentes escalas atmosféricas, entre outros.

De acordo com França (2008), métodos objetivos de previsão da ocorrência de nevoeiro foram elaborados com auxílio de climatologia local do fenômeno. Aliado à climatologia, a experiência de previsores locais é relevante para a aplicação de tais métodos. Os principais objetivos da aplicação da climatologia são entender melhor a natureza do nevoeiro e aplicar esse entendimento para realizar um melhor prognóstico da sua ocorrência (GULTEPE *et al*, 2007).

França (2008) também evidencia que é possível destacar, dentre diversas ferramentas que podem ser utilizadas na previsão de nevoeiro, a estatística e a modelagem numérica. De uma maneira geral, o autor aponta que a estatística pode ser aplicada em uma previsão local do fenômeno, sendo necessário desenvolver novos estudos em diferentes localidades, limitando a aplicação dos resultados obtidos previamente. Já a modelagem se apresenta como uma forma de análise do nevoeiro do ponto de vista dinâmico, além de permitir o estudo da física envolvida em seu processo de formação. Segundo o autor, a limitação deste método está relacionada à complexidade de solução das equações dos modelos numéricos e às simplificações adotadas para representar numericamente alguns processos físicos, dinâmicos e termodinâmicos que são parametrizados.

Adicionalmente, há metodologias desenvolvidas em que diferentes modelos numéricos são acoplados para a previsão de nevoeiros, bem como existem aquelas em que resultados de modelos numéricos são considerados preditores em métodos estatísticos e de mineração de dados.

2.3.1 Métodos objetivos e estatísticos

De uma forma geral, é possível evidenciar a necessidade de uma gama suficientemente extensa de dados para realizar a aplicação de métodos objetivos e estatísticos no prognóstico de nevoeiros. Gultepe *et al*. (2007) destacam que previsão estatística pode abranger um conjunto de técnicas desde as metodologias tradicionais, como regressão linear, até métodos

computacionais, como a aplicação de redes neurais artificiais (RNA), por exemplo. De acordo com Wantuch (2001) tais métodos apresentaram resultados promissores em estudos pretéritos.

O *Fog Stability Index* (FSI) é um método desenvolvido na Alemanha na década de 1970 e indica a probabilidade de ocorrência de nevoeiro de radiação (FREEMAN E PERKINS, 1998). É um índice definido pela seguinte equação:

$$FSI = 2(T_{sfc} - T_{850}) + 2(T_{sfc} - T_{d_{sfc}}) + U_{850}, \quad (1)$$

Onde T_{sfc} é a temperatura em superfície, T_{850} a temperatura do ar no nível de 850 hPa, $T_{d_{sfc}}$ a temperatura do ponto de orvalho em superfície e U_{850} a velocidade do vento no nível de 850 hPa.

De acordo com TRIGG (2000), esta equação mostra a importância da velocidade do vento e das temperaturas em níveis superiores para a previsão de nevoeiros. O primeiro termo representa a estabilidade da atmosfera, enquanto o segundo termo fornece informações a respeito da disponibilidade de umidade próximo à superfície (ARUN, 2018). Além destes dois aspectos, o índice também leva em consideração a mistura pelo vento (WANTUCH, 2001).

Valores de FSI superiores a 55 indicam probabilidade baixa de ocorrência do fenômeno, valores entre 55 e 31 indicam probabilidade moderada e valores inferiores a 31 indicam probabilidade alta de ocorrência de nevoeiro de radiação em uma localidade. Holtslag, Steeneveld e Holtslag (2010) mencionam que o FSI evidencia que a formação de nevoeiros de radiação é favorecida por elevada umidade, estabilidade e baixa velocidade do vento.

O FSI foi avaliado em comparação com métodos numéricos mais atuais, ou seja, modelagem numérica, na região de Cabauw, na Holanda, no estudo proposto por Holtslag, Steeneveld e Holtslag. (2010). Neste trabalho, apresentou bons resultados na forma da equação (1) e, posteriormente, foi otimizado com base nos dados da região e apresentou resultados superiores aos obtidos por modelagem numérica.

Oliveira (2002) buscou desenvolver uma ferramenta estatística com o objetivo de auxiliar nas previsões de nevoeiro para o Aeroporto de Guarulhos, em São Paulo. Para tal, o autor avaliou regressões lineares simples e múltiplas e empregou a regressão linear múltipla

visando obter um prognóstico de visibilidade a partir das observações provenientes dos códigos METAR e TEMP, além de considerar o cálculo do FSI como um dos preditores. Os resultados obtidos para o conjunto de dados de validação se mostraram satisfatórios.

O estudo desenvolvido por Tiwari *et al.* (2011) visa relacionar a visibilidade com a concentração de aerossóis em Nova Deli, na Índia. Os autores avaliam dois episódios de nevoeiro ocorridos na região e confirmam a correlação negativa entre as duas variáveis, com maior concentração de aerossóis associada a uma redução da visibilidade. Modelos de regressão linear foram avaliados para dois eventos de nevoeiro e, ao considerar a concentração de aerossóis (em diferentes faixas de tamanho) e a diferença entre a temperatura do bulbo úmido e a temperatura do ponto de orvalho como preditores da visibilidade, foi possível a obtenção de boas previsões.

Pulugurtha *et al.* (2019) também desenvolveram um modelo de previsão de visibilidade utilizando regressão linear para o estado da Carolina do Norte, nos Estados Unidos, com foco em localidades próximas às principais rodovias da região. Foram utilizados métodos dos mínimos quadrados simples e de forma ponderada e os modelos foram avaliados com base em diversas métricas estatísticas e para diferentes faixas de visibilidade pré-estabelecidas e também levou em consideração a elevação do terreno. O modelo mais bem ajustado para a faixa de visibilidade correspondente ao nevoeiro considerou todas as amostras, independente da elevação e mostrou que a cobertura de nuvens é correlacionada negativamente com a redução de visibilidade, reforçando uma das condições conceitualmente conhecidas para a formação de nevoeiros de radiação. Temperatura do ar, velocidade do vento, precipitação, temperatura do ponto de orvalho e cobertura de nuvens foram os preditores deste modelo.

Diferentes métodos de mineração de dados podem ser utilizados também na previsão de ocorrência de nevoeiros, como por exemplo, as redes neurais e algoritmos de árvores de decisão (GULTEPE *et al.*, 2007).

A pesquisa realizada por Dutta e Chaudhuri (2014) utilizou um algoritmo de árvore de decisão para identificação dos principais parâmetros que afetam a visibilidade durante o inverno em Calcutá, na Índia. A partir desta seleção, um modelo baseado em RNAs foi desenvolvido para a previsão de restrições de visibilidade com até 6 horas de antecedência. Os autores

verificaram que a previsão de visibilidade a partir de RNA foi possível e o modelo apresentou melhores resultados em casos de nevoeiros muito densos (visibilidade menor que 50 metros).

Um método objetivo baseado na climatologia da ocorrência de nevoeiros em Guarulhos, São Paulo, foi comparado a modelos de rede neural em Pereira (2016) para previsão de curto prazo do fenômeno (até 3 horas de antecedência). O autor também avaliou a técnica de persistência no modelo objetivo. Como resultados, a previsão do fenômeno através de climatologia apresentou índices bastante inferiores aos obtidos através da técnica de persistência e do modelo de RNA. Estes últimos apresentaram desempenhos equivalentes, mas destaca-se que os resultados provenientes do emprego da RNA foram ligeiramente superiores.

Colabone *et al.* (2015) propuseram um método de previsão de nevoeiros por meio de RNAs na Academia da Força Aérea (AFA), em Pirassununga, São Paulo. Os autores utilizaram uma base de dados de 19 anos e concluíram que a metodologia proposta foi eficiente e poderá servir de subsídio ao planejamento de atividades de voo na região.

No estudo de Cordeiro *et al.* (2021), dados meteorológicos foram aplicados para treinamento e validação de métodos de aprendizado de máquina visando previsão de curto prazo de visibilidade para o Aeroporto Santos Dumont, na cidade do Rio de Janeiro. Dentre os principais resultados, os autores destacam que os métodos propostos identificaram as restrições de visibilidade e teto, se apresentando como ferramentas importantes para introduzir melhorias nas previsões de curto prazo de até 1 hora destes parâmetros.

2.3.2 Modelagem numérica

Gulpepe *et al.* (2007) destacam que uma previsão numérica de nevoeiro bem sucedida depende do tipo de nevoeiro a ser prognosticado. Os autores evidenciam que eventos em que a ocorrência é dominada por processos que não sejam dinâmicos, como por exemplo, os de radiação, a previsão numérica pode apresentar um maior grau de dificuldade.

Outro ponto a ser considerado é a complexidade dos modelos e esquemas de parametrizações utilizados para representar processos importantes para a formação do nevoeiro.

2.3.2.1 Modelos 1-D:

Os modelos unidimensionais de camada limite atmosférica tem como premissa a homogeneidade horizontal das variáveis termodinâmicas, sendo a evolução do nevoeiro impulsionada por campos como o de radiação e mistura turbulenta e pelos fluxos de calor e umidade na superfície (GULTEPE *et al*, 2007). Processos dinâmicos, como por exemplo, a advecção horizontal, geralmente não são considerados.

Gultepe *et al.* (2007) apontam algumas fontes de incertezas nas simulações unidimensionais e fazem uma revisão de estudos anteriores que discutiram tais limitações e possíveis soluções. A seguir são listados os principais pontos levantados pelos autores:

- a. A suposição de homogeneidade horizontal não é válida. Erros na evolução temporal da simulação dos nevoeiros podem ser introduzidos ao se desconsiderar gradientes horizontais das variáveis termodinâmicas.
- b. As nuvens podem não ser representadas corretamente. Tal fator pode afetar o resultado das simulações, uma vez que o resfriamento radiativo é altamente afetado pela cobertura de nuvens.
- c. Em superfícies heterogêneas, os fluxos de calor e umidade podem não ser representados da forma mais adequada.
- d. Problemas na representação da turbulência atmosférica, principalmente em condições de forte estabilidade.

Bergot (2007) destaca que os processos que ocorrem em superfície e na camada limite atmosférica são fundamentais no ciclo de vida de um nevoeiro e que os efeitos destes ainda não são bem parametrizados nos modelos operacionais de previsão de tempo. Adicionalmente, ressalta o fato de que as resoluções vertical e horizontal nestes modelos devem ser adequadas para representar a escala correspondente ao nevoeiro. Desta forma, nevoeiros e nuvens baixas que são impulsionados por forçantes locais podem ser mal previstos operacionalmente. O autor

destaca que modelos de coluna única são capazes de superar essas deficiências, apesar da estimativa simplória das heterogeneidades horizontais.

Diversos autores avaliaram resultados de modelos unidimensionais na simulação e previsão de nevoeiros (BERGOT *et al.*, 2005; AFONSO, 2016; SILVA, 2018; PINHEIRO, 2006; AFONSO; LEVIT ;FEDOROVA, 2019; entre outros).

O estudo desenvolvido por Bergot (2007) destaca que modelos unidimensionais com alta resolução vertical e utilizando parametrizações físicas detalhadas podem representar de maneira razoável as principais características do ciclo de vida de um nevoeiro. O autor utiliza o modelo COBEL (da sigla em francês para *Code de Brouillard à l'échelle locale*) acoplado com um esquema de vegetação chamado ISBA (da sigla em inglês para *Interactions Soil Biosphere Atmosphere*) para avaliar previsões de nevoeiro em Paris, França, e obtém como resultado que as melhores previsões são as que compreendem o intervalo até 6 horas à frente e quando o modelo é inicializado no período da noite.

Adicionalmente, dentre as conclusões do estudo de Piva e Anabor (2008) destaca-se a possibilidade de empregar modelos unidimensionais de camada limite, como o COBEL, que representam bem os processos na camada limite noturna, na previsão operacional de nevoeiros.

Afonso, Levit e Fedorova (2019) avaliaram o modelo numérico *Parameterized Fog* (PAFOG) proposto por Bott e Trautmann (2002) com diferentes conjuntos de dados de inicialização para o Aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Os autores avaliaram o ambiente sinótico e termodinâmico e fizeram simulações numéricas de eventos utilizando dados observados de radiossondagem e também análises do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR). De maneira geral, os resultados obtidos pelos autores foram considerados satisfatórios e mostraram um grande potencial para o uso do modelo unidimensional na região. Entretanto, evidenciam que é necessário o desenvolvimento de mais estudos para adaptar melhor o modelo às condições climatológicas de nevoeiro de radiação na área.

2.3.2.2 Modelos 3-D:

Gultepe *et al.* (2007) destacam que as previsões numéricas de nevoeiro a partir de modelos operacionais de previsão de tempo apresentam dificuldades, uma vez que tais modelos

podem não resolver padrões de superfície com detalhamento necessário dependendo de suas resoluções horizontal e vertical. Ou seja, as simulações e previsões a partir de modelos 3D são fortemente dependentes de boa resolução vertical e horizontal. Os autores ainda mencionam que outros pontos relevantes para um bom prognóstico do fenômeno incluem a representação pertinente de heterogeneidades horizontais (solo, vegetação, relevo) da área de estudo e o fato de existir uma sensibilidade das simulações de nevoeiros às condições iniciais e ao tempo de inicialização do modelo.

Adicionalmente, destaca-se que a formação, manutenção e dissipação de um evento de nevoeiro resulta de complexas interações de processos microfísicos, termodinâmicos e dinâmicos e, devido a tais interações, é necessário um modelo tridimensional preciso para se obter uma boa previsão do fenômeno (GULTEPE *et al.*, 2007). Outro ponto que pode ser ressaltado é o fato da modelagem numérica 3-D ter potencial para simulação/previsão de nevoeiros que apresentam características dinâmicas, como os de advecção.

Metodologias baseadas em modelos numéricos tridimensionais foram aplicadas por diversos autores para avaliar a simulação e previsão de nevoeiros.

O estudo de França (2008) avaliou as previsões de nevoeiro e as estimativas de visibilidade horizontal do modelo regional Eta. Foram realizados experimentos numéricos alterando parâmetros, como a condição inicial de umidade do solo e o algoritmo de condensação do modelo, para três aeroportos do Brasil (Afonso Pena em Curitiba, Salgado Filho em Porto Alegre e Guarulhos). A resolução horizontal adotada foi de 4km, foram considerados 60 níveis verticais e o esquema de parametrização de microfísica de nuvens deste modelo foi proposto por Ferrier (2002). Além disso, o FSI foi avaliado neste estudo a partir das observações nos aeródromos e também dos resultados das simulações. Os resultados obtidos apontam para uma superestimativa do conteúdo de água líquida pelo modelo Eta e, desta maneira, os valores de visibilidade horizontal calculados pelo modelo se apresentaram inferiores aos observados. O FSI apresentou coerência na maior parte dos casos avaliados, podendo ter desempenho considerado satisfatório. O autor concluiu que, de maneira geral, o modelo Eta nesta configuração pode ser utilizado como uma ferramenta útil para indicar probabilidade de ocorrência de nevoeiro em determinado local ou região, bem como para prognosticar a visibilidade horizontal.

Em Piva e Anabor (2008), os autores destacam a dificuldade dos modelos atmosféricos em representar o processo de resfriamento noturno que é fundamental para a formação do nevoeiro de radiação. A partir deste fato, tal trabalho é desenvolvido, onde são avaliadas opções de parametrizações e outros parâmetros numéricos relacionados à turbulência no modelo BRAMS utilizado para previsão operacional pelo Grupo de Modelagem Atmosférica (GRUMA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) para um evento de nevoeiro de radiação ocorrido na cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul. Os autores avaliaram, entre outros parâmetros, a quantidade de domínios, resoluções vertical e horizontal e esquemas de cálculos do coeficiente de difusão vertical. Dentre alguns dos resultados obtidos, destaca-se que um aumento no número de níveis verticais dentro da camada limite foi capaz de produzir melhorias nas simulações no que diz respeito à temperatura e magnitude do vento para o evento de nevoeiro.

Pang *et al.* (2010) destacam a limitação atual dos modelos numéricos no prognóstico da ocorrência de nevoeiros. Os autores utilizaram o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para simular e prever um evento de nevoeiro ocorrido no norte da China, além de buscarem avaliar as equações de visibilidade. Foram adicionados níveis verticais dentro da camada limite atmosférica, melhorando a resolução vertical abaixo de 500m. Como principal resultado, foi apontado o potencial do modelo WRF para previsão de eventos de restrição de visibilidade na região de estudo, com boa concordância dos resultados obtidos em comparação com as observações.

Nobre *et al.* (2020) desenvolveram uma ferramenta para estimativa de valores de visibilidade (FogVIS v1.0) no Aeroporto Zumbi dos Palmares, em Maceió, Alagoas. Os autores utilizaram dados provenientes das saídas do modelo WRF e estimaram os valores de visibilidade a partir da relação apresentada por Gultepe, Muller e Boybeyi (2006), além de avaliar a eficácia do FSI, para 5 casos de nevoeiro. O modelo WRF foi configurado pelas parametrizações de microfísica *WRF single-moment 6-class* (WSM6) (HONG E LIM, 2006) e de superfície Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino 2.5 (MYNN) (NAKANISHI E NIINO, 2006). Adicionalmente, foi feita uma comparação e avaliação dos resultados obtidos pela ferramenta proposta e pelo PAFOG com relação aos dados observados. De maneira geral, o FogVIS v1.0 usando os dados do WRF apresentou melhor desempenho em relação ao modelo PAFOG. Adicionalmente, o FSI não detectou probabilidade alta de ocorrência de nevoeiro na região e

este fator é explicado pelo predomínio de eventos de restrição de visibilidade na região tropical sob um perfil termodinâmico dominado por instabilidade condicional entre 1000-850hPa. Em 80% dos casos avaliados neste estudo, o FSI detectou probabilidade moderada de ocorrência de nevoeiros, sendo considerado eficaz pelos autores.

Steenefeld, Ronda e Holtslag (2015) buscaram avaliar a habilidade de dois modelos de mesoescala na previsão da ocorrência e do desenvolvimento de nevoeiros de radiação em uma área plana da Holanda. Os autores avaliaram os modelos HARMONIE (sucessor do modelo HIRLAM - *High Resolution Limited Area Model*) e WRF, utilizando as mesmas condições iniciais e de contorno, para dois eventos de nevoeiro na região de Cabauw. Como resultado desta comparação, foi possível perceber que o modelo WRF conseguiu representar de maneira razoável o início da ocorrência do fenômeno, entretanto não conseguiu representar corretamente a profundidade da camada de nuvens com relação aos dados observados, sendo menos espessa. Desta forma, o horário de dissipação dos nevoeiros foi adiantado pelo modelo. Em contrapartida, o modelo HARMONIE apresentou resultados inferiores ao WRF, não conseguindo representar bem a ocorrência de nevoeiro nesta região, tanto do ponto de vista do processo de formação, quanto em sua espessura. Os autores destacam que os balanços de radiação e energia e estrutura vertical diferem significativamente nos dois modelos avaliados e que a previsão de nevoeiros continua sendo uma tarefa desafiadora.

Outro ponto abordado pelo estudo citado anteriormente diz respeito à sensibilidade do modelo WRF na previsão de nevoeiros em relação a diferentes parametrizações e também a outros aspectos técnicos como tamanho de domínio, resolução espacial e aninhamento de grades. Foram realizados experimentos relativos às parametrizações de camada limite e microfísica, com os esquemas da *Yonsei University Scheme* (YSU) (HONG; NOH; DUDHIA, 2006) e *WRF double-moment 6-class* (WDM6) (LIM E HONG, 2010) selecionados como referência, respectivamente. Os testes de sensibilidade avaliaram o esquema de camada limite de MYNN e as parametrizações de microfísica WSM6 e *WRF single-moment 3-class* (WSM3) (HONG; DUDHIA; CHEN, 2004). Como principais resultados desta avaliação, foi detectado que os esquemas WSM3 e WSM6 preveem valores de conteúdo de água líquida inferiores ao WDM6, enquanto o esquema YSU fornece como resultados campos de nevoeiros mais difundidos espacialmente e com conteúdo de água líquida superior ao obtido por MYNN.

Paula *et al.* (2017) objetivaram avaliar o comportamento de duas parametrizações de camada limite disponíveis no WRF na simulação de nevoeiros na região central do Rio Grande do Sul, na cidade de Santa Maria. As parametrizações avaliadas foram YSU e *Mellor-Yamada-Janjic Scheme* (MYJ) (JANJIC, 2002). Os autores fizeram 2 abordagens, sendo uma voltada para previsão e outra para simulação do evento. A evolução temporal das variáveis de superfície não apontou diferença significativa entre os resultados das simulações e previsões e, dentre os esquemas avaliados, MYJ apresentou os resultados mais bem correlacionados com os dados observados. Além disso, os autores destacaram que as condições iniciais tiveram efeito direto nos resultados deste estudo, de modo que apresentaram discrepâncias expressivas em relação aos dados observados. Desta forma, não foi possível simular de forma correta a duração do fenômeno.

Yadav *et al.* (2022) aplicaram o modelo WRF em alta resolução na avaliação de um evento de nevoeiro intenso no Aeroporto Internacional Indira Gandhi, na Índia. Os autores consideraram dois conjuntos de domínios, sendo o primeiro com 2 km de resolução horizontal e o segundo incluindo duas grades aninhadas, com resoluções horizontais de 4 e 1,3 km. Foram definidos 60 níveis verticais, sendo 19 abaixo de 1000 metros e 14 abaixo de 300 metros. Os esquemas de parametrização física considerados incluem o esquema de camada limite MYNN e o de microfísica WSM6. Dentre os principais resultados, evidenciou-se que o modelo WRF com resolução de 1,3 km inicializado com dados do GFS do Instituto Indiano de Meteorologia Tropical apresentou um bom desempenho na região de estudo. O modelo simulou bem a formação e evolução do nevoeiro intenso, além de representar processos físicos importantes para o fenômeno e as interações entre eles. Os autores destacam também a necessidade de mais estudos voltados para o assunto a fim de se obter uma previsão operacional mais precisa do fenômeno.

2.3.2.3 Métodos Combinados:

Bartok, Bott e Gera (2012) destacam que nevoeiros de radiação, que ocorrem em situações atmosféricas estáveis e pouco dinâmicas, podem ser simulados com sucesso por modelos unidimensionais. Entretanto, tais modelos podem não ser aplicados em situações mais dinâmicas, onde o fenômeno é impulsionado por heterogeneidades horizontais, como por

exemplo, os nevoeiros de advecção. Desta forma, os autores mencionam que várias tentativas da comunidade científica foram feitas para lidar com as dificuldades inerentes a estes tipos de modelo e suas limitações e citam a inclusão de modelos 1D em modelos 3D, bem como o acoplamento entre ambos, sendo a segunda numericamente eficiente, onde o modelo tridimensional fornece perfis verticais de variáveis termodinâmicas para a execução do modelo unidimensional.

Pinheiro, Peterson e Cossich (2006) utilizaram 2 modelos para simular eventos de nevoeiro na cidade do Rio de Janeiro: *Fifth-Generation Mesoscale Model* (MM5) e COBEL. Os autores evidenciaram a dificuldade de representação do fenômeno de estudo a partir de modelos de mesoescala e buscaram avaliar o MM5 a fim de se obter resultados que possam fornecer dados de inicialização para o modelo COBEL. Inicialmente, foi feita uma avaliação das simulações pelo modelo de mesoescala MM5 e, em seguida, as variáveis de saída provenientes deste modelo foram utilizadas para inicializar o modelo COBEL. O MM5 apresentou dificuldades de representar propriedades relacionadas à formação do fenômeno. Foi verificado que, embora não tenha se apresentado como uma ferramenta ideal para previsão de nevoeiros, o MM5 mostrou potencial de fornecimento de dados para inicialização de um modelo de alta resolução para prognosticar o fenômeno. Adicionalmente, o modelo COBEL apresentou habilidade de representação da evolução da camada limite e do perfil de umidade de forma coerente, bem como se mostrou muito sensível aos dados de inicialização fornecidos.

O modelo COBEL foi acoplado ao modelo WRF em alta resolução para simular a ocorrência de um denso nevoeiro de radiação-advecção registrado no Aeroporto de Thessaloniki, na Grécia (STOLAKI; PYTHAROULIS; KARACOSTAS, 2012). Neste estudo, previsões horárias do modelo WRF são utilizados como dados de entrada para o COBEL. Além disso, é realizada uma comparação entre os modelos WRF e WRF-COBEL. Os resultados mostram que o acoplamento dos dois modelos se mostrou bem sucedido na previsão da ocorrência deste evento de nevoeiro e que o WRF-COBEL apresentou um desempenho superior ao WRF em termos de identificar as características físicas do nevoeiro, horário de início e dissipação do fenômeno e estrutura vertical. Outro ponto destacado é a sensibilidade do WRF-COBEL às condições iniciais e a pequenas variações em parâmetros como temperatura e umidade.

Um acoplamento dos modelos WRF e PAFOG (WRF-PAFOG) foi empregado para avaliar e prognosticar eventos de nevoeiro em uma região costeira de Dubai, próximo a uma rodovia (BARTOK; BOTT; GERA, 2012). A região é bastante afetada por nevoeiros nos meses de inverno e a ocorrência deste fenômeno é bastante influenciada pela circulação local. É importante destacar que o acoplamento se deu de modo que o modelo PAFOG foi inicializado a partir de observações e de perfis verticais termodinâmicos obtidos pelo WRF. O WRF-PAFOG foi testado em dois experimentos: um avaliando a previsão de 84 episódios de nevoeiros em comparação com observações e imagens de satélite e outro executando-o em modo operacional por um período de 2 meses. Os resultados mostram que, de maneira geral, o acoplamento foi capaz de captar as principais características termodinâmicas da região estudada, bem como prognosticar a formação e dissipação do nevoeiro. Através de uma avaliação estatística, chegou-se à conclusão de que o WRF-PAFOG é capaz de prever um evento de nevoeiro com razoável confiabilidade, tendo as melhores habilidades de previsão a partir da sexta hora de prognóstico, entretanto apresenta considerável taxa de alarme falso. Os autores sugerem, entre outras opções, a aplicação de métodos de mineração de dados (redes neurais, árvores de decisão, regressão linear) para melhorar os resultados nas cinco primeiras horas de previsão.

Dando continuidade ao estudo de Bartok, Bott e Gera (2012), um modelo de previsão de nevoeiros foi desenvolvido a partir de uma abordagem de aprendizado de máquina para a mesma região (BARTOKOVÁ *et al.*, 2015). O modelo buscou focar em produzir melhorias na qualidade da previsão nas primeiras horas de evento, utilizando um algoritmo de árvore de decisão. Como preditores, foram utilizados parâmetros físicos observados por estações meteorológicas e que são importantes para avaliação do nevoeiro, como temperatura do ar, umidade relativa, visibilidade, direção e intensidade do vento e temperatura e umidade do solo. Em um segundo momento, a previsão de nevoeiro pelo WRF-PAFOG foi adicionada como preditor para o algoritmo. A qualidade das previsões foi avaliada por métricas estatísticas e foi possível verificar que os melhores resultados foram obtidos quando as medições *in situ* foram combinadas com os dados do WRF-PAFOG, produzindo alta probabilidade de detecção e índice de acerto, associado a uma pequena taxa de alarme falso. Os autores concluem que nas primeiras horas de previsão, o algoritmo baseado na técnica de mineração de dados/aprendizado de máquina produz o melhor prognóstico da ocorrência de nevoeiro, enquanto depois os resultados do WRF-PAFOG (BARTOK; BOTT;GERA, 2012) são superiores.

O estudo de Hacker e Bott (2017) visou o desenvolvimento de um modelo numérico tridimensional com eficiência na previsão de nevoeiros, com base em um modelo de mesoescala, para aplicação para a região do deserto de Namibe, no continente africano. Os autores implementaram a parametrização microfísica do modelo unidimensional PAFOG ao modelo de mesoescala tridimensional *CO*nsortium for *S*mall-scale *MO*deling (COSMO). Dessa forma, os processos dinâmicos, como advecção e difusão, são calculados pelo COSMO e os microfísicos, como mudanças de fase, são resolvidos pelo PAFOG. Inicialmente, o modelo foi testado e comparado com observações no oeste da Alemanha, para posteriormente ser aplicado e adaptado à região desértica de interesse. O modelo COSMO-PAFOG conseguiu reproduzir a extensão horizontal do nevoeiro de maneira satisfatória e esta configuração apresentou melhores resultados que o modelo utilizando a microfísica padrão do modelo COSMO na Alemanha. Adicionalmente, foi observado que a visibilidade obtida pelo modelo avaliado foi coerente com as observações.

Outra metodologia combinada de simulação numérica já utilizada no estudo de nevoeiro consiste na aplicação da chamada *Large Eddy Simulation* (LES) em conjunto com outros modelos numéricos. De acordo com Zhiyin (2015), a técnica LES atualmente é a ferramenta numérica mais viável e promissora para a simulação de fluxos turbulentos e consiste em uma abordagem de modelagem/resolução da turbulência em que apenas os movimentos de grande escala dentro de um fluxo turbulento são calculados efetivamente.

Estudos anteriores destacam que LES apresenta eficiência em introduzir melhorias em simulações e previsões de nevoeiro de radiação, representando mais detalhadamente feições na camada limite atmosférica (CUI *et al*, 2019). O estudo de Cui *et al* (2019) buscou avaliar e comparar as habilidades dos modelos WRF e WRF-LES na simulação de um evento de nevoeiro de radiação. Os autores evidenciam que o modelo WRF consegue fornecer as informações necessárias para a execução de um modelo LES. A configuração adotada nesta pesquisa consiste em 5 domínios, com resoluções horizontais de 27, 9, 3, 1 e 0,33 km, sendo apenas o último contemplado com aplicação do modelo LES. Além disso, os autores utilizaram parametrização microfísica WDM6 (LIM E HONG, 2010) e, para camada limite, o esquema MYNN (NAKANISHI E NIINO, 2006). Como principal resultado, o modelo WRF-LES apresentou significativa melhoria na simulação das características meteorológicas próximas à superfície. Desta maneira, foram verificadas também melhorias na simulação do evento, tanto em sua evolução e estrutura, e na representação da evolução da camada limite atmosférica.

2.4 NEVOEIROS EM RIO GRANDE E EM SUAS PROXIMIDADES

A cidade de Pelotas e suas proximidades são caracterizadas como planície costeira do estado do Rio Grande do Sul, ou seja, zona de transição entre oceano e continente. Assim, nessas áreas encontram-se os banhados, os quais são responsáveis pelo aumento da oferta de umidade, componente que favorece a ocorrência de nevoeiros (CASTRO E NUNES, 2012). Oliveira e Fedorova (1998a,b,c,d) e Oliveira (1998) apresentaram uma análise climatológica da ocorrência de nevoeiros e, posteriormente, uma proposta de método de previsão de nevoeiros em Pelotas com base em dados observados e análises sinótica, estatística e termodinâmica. Os autores constataram que a maior ocorrência destes fenômenos acontece no outono, seguido do inverno, e a menor no verão e destacam que a maioria dos eventos de nevoeiro ocorre sob a atuação de um anticiclone.

De acordo com Reboita e Krusche (2000), na cidade de Rio Grande, os nevoeiros de radiação e advecção são os que ocorrem com maior frequência. Os autores destacam que os nevoeiros de advecção na região ocorrem principalmente por conta da presença de corpos d'água margeando o município, de modo que ocorre deslocamento de ar relativamente quente e úmido proveniente destes sobre uma superfície continental mais fria.

Ainda em Reboita e Krusche (2000), é observado que a maior frequência de ocorrência de nevoeiros, independente do horário de formação do fenômeno, se dá nos meses de outono e inverno. Junho é o mês que apresenta uma maior frequência de nevoeiros na região e os autores apontam como uma provável explicação a atuação mais frequente de altas de bloqueio sobre a área. Adicionalmente, através de um estudo utilizando a técnica de Análise de Componentes Principais, evidenciou-se que as variáveis temperatura do ar, umidade específica e pressão atmosférica de dois e um dia anteriores ao evento de nevoeiro são bem correlacionadas com o mesmo.

O estudo de Gomes *et al.* (2009) investigou as condições atmosféricas e oceanográficas que favorecem a formação de nevoeiros de advecção na região de Rio Grande. Os autores destacam que, por ocorrerem mais frequentemente durante o dia, nevoeiros deste tipo causam maiores prejuízos econômicos. Os resultados confirmam o mês de junho com maior número de ocorrências de nevoeiro observadas na região de estudo, seguidos de maio e julho. A partir de

composições dos campos de pressão ao nível médio do mar em todos os dias de nevoeiro e apenas nos dias de registro de nevoeiros de advecção, foi possível extrair algumas características. Foi evidenciado o posicionamento de um sistema de alta pressão próximo à costa do estado do Rio Grande do Sul, com a borda deste sistema mais próxima da região de estudo em dias de nevoeiro de advecção.

Gomes, Krusche e Rocha (2011) e Gomes *et al.* (2012) buscaram simular numericamente os nevoeiros de advecção que ocorrem no litoral sul do país. Os autores utilizaram o modelo WRF para realizar um estudo de caso de um nevoeiro detectado pela Praticagem no porto de Rio Grande, em que as atividades portuárias foram suspensas por conta da baixa visibilidade. Na simulação realizada, foi possível detectar feições conceitualmente conhecidas para a formação deste tipo de fenômeno, como um gradiente entre as temperaturas do ar e da superfície do mar (aproximadamente 3°C) e ventos moderados (entre 8 e 10m/s) e constantes e a formação de nuvens no local de estudo.

No estudo realizado por Gomes (2011), foram considerados nevoeiros registrados em 3 pontos distintos da cidade de Rio Grande, com o objetivo de caracterizar os fenômenos observados na região e determinar as condições para a ocorrência utilizando o modelo WRF. Foi adotado um esquema microfísico de momento simples e o esquema de camada limite planetária YSU. Destaca-se que no intervalo temporal comum a todas as fontes de dados, poucos eventos de nevoeiro foram simultâneos nos 3 pontos, apontando a possibilidade de haver predominância de tipos distintos de nevoeiro em cada localidade.

Adicionalmente, nas simulações realizadas através do WRF por Gomes (2011), foi possível verificar que o modelo identificou a formação de nevoeiros sobre a cidade de Rio Grande. Observou-se que os fenômenos caracterizados por uma restrição de visibilidade mais intensa ou com maior extensão territorial tiveram melhor representação pelo modelo do que os menos intensos.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho será apresentada neste capítulo e cada etapa será descrita detalhadamente nos tópicos a seguir. De maneira geral, destacam-se duas vertentes: a identificação dos principais aspectos observacionais da ocorrência de nevoeiro na cidade de Rio Grande (Parte I) e a aplicação da modelagem numérica (Parte II). A figura 2 consiste em um diagrama que sintetiza a estrutura metodológica deste estudo, evidenciando os principais estágios e as interações entre os dois eixos destacados.

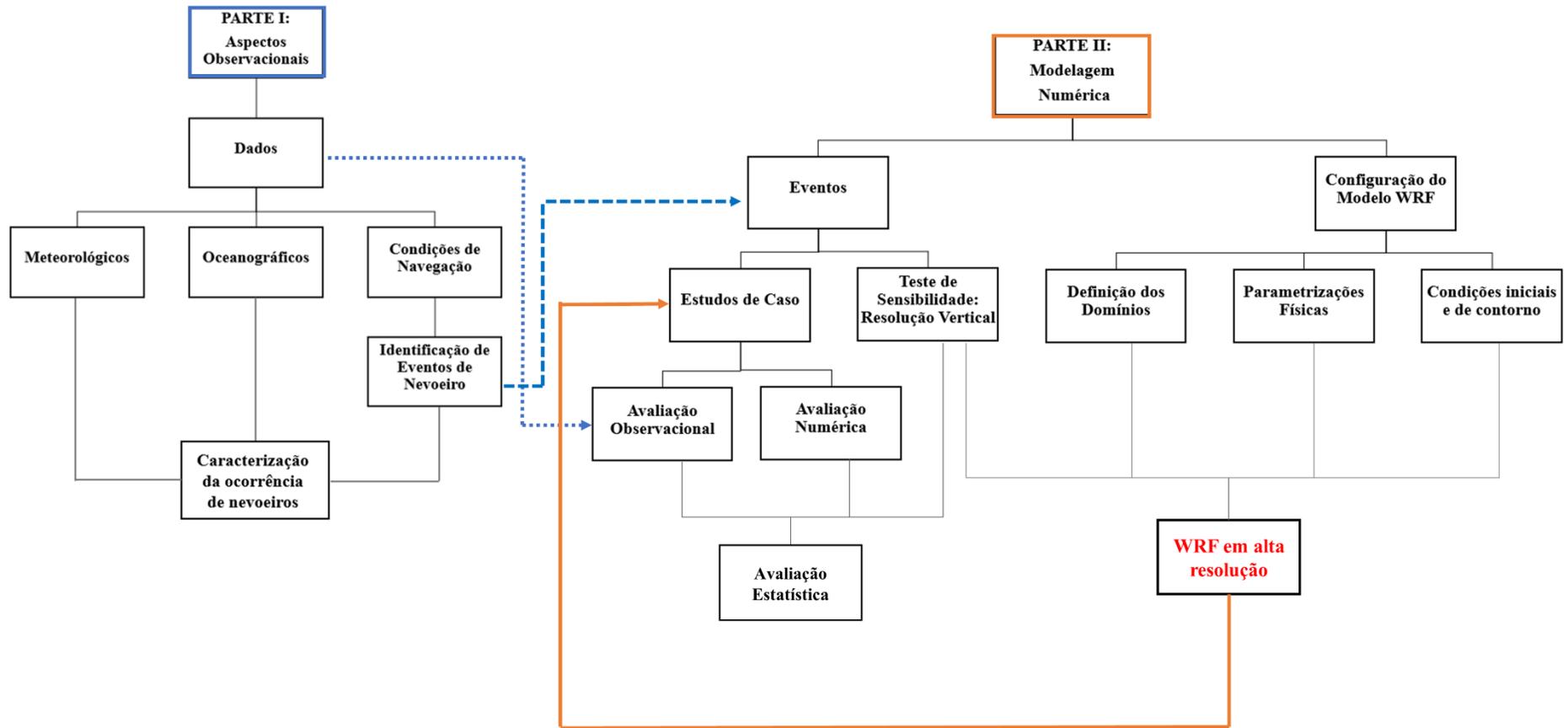


Figura 2- Fluxograma destacando a metodologia proposta para a realização deste estudo.

3.1 REGIÃO DE ESTUDO

Rio Grande é uma cidade litorânea do estado do Rio Grande do Sul (Figura 3) e se localiza em uma região de baixa altitude, com máxima elevação de 11 metros acima do nível do mar (GOMES, 2011). Consiste em uma localidade margeada por corpos d'água, na região estuarina da Lagoa dos Patos. O estuário é caracterizado pela região onde acontecem processos de mistura de água doce e salgada (MARQUES, 2006).

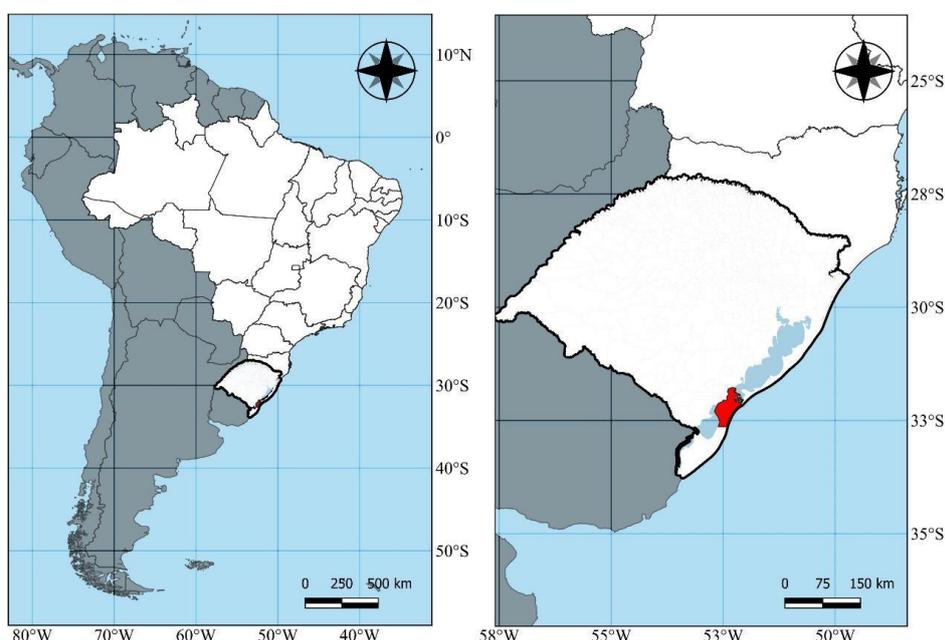


Figura 3- Localização geográfica da cidade de Rio Grande (em vermelho).

A Lagoa dos Patos é considerada uma das maiores lagunas do mundo, é formada por águas salobras e está conectada com o oceano através de um canal em sua extremidade sul, na barra de Rio Grande (COPPE, 2019). Possui extensão de aproximadamente 250 km e largura de 60 km, abrangendo uma área de aproximadamente 10.360 km² (FILGUERAS, 2009). Seu canal de acesso ao oceano é delimitado por molhes e possui cerca de 22 km de extensão e 2 km de largura, sendo considerada uma lagoa “estrangulada” (MARQUES, 2006).

Trata-se de uma região complexa e que apresenta diversas particularidades do ponto de vista meteorológico e oceanográfico. A dinâmica desta área é consideravelmente afetada por

diversos fatores, como o regime de ventos e precipitação, as marés, salinidade, descarga fluvial, entre outros.

De acordo com Reboita e Krusche (2018), o clima nesta região pode ser definido como temperado úmido e com verão quente de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (Cfa) ou subtropical úmido pela classificação de Strahler. Outro ponto destacado pelos autores é o predomínio de ventos de nordeste na cidade na maior parte do ano, característica também mencionada por Möller *et al.* (2001) para a região estuarina da Lagoa dos Patos. Estudos anteriores também ressaltam que durante outono e inverno, há um aumento na frequência de ventos de quadrante sul, mais especificamente de sudoeste, devido à maior penetração de sistemas frontais na área de estudo (FILGUERAS, 2009).

A corrente na área de estudo é resultado de uma série de interações e é afetada por diversos fatores como a ação do vento e das marés, entre outros. Diversos autores apontam o vento como um dos principais mecanismos a atuar na descarga de águas da Lagoa dos Patos (MARQUES *et al.*, 2006). Resultados obtidos por Marques *et al.* (2006) e Möller *et al.* (1996) destacam que ventos de nordeste favorecem o transporte de águas da Lagoa em direção ao oceano, enquanto ventos associados à passagem de sistemas frontais, de quadrante sul, na região atuam como forçantes para a entrada de águas marinhas em direção à região estuarina.

Com relação à intensidade das correntes na Lagoa dos Patos, Möller *et al.* (2001) destacam que há diferenças nos processos dinâmicos entre as regiões central e estuarina da Lagoa, sendo apresentadas correntes mais rápidas na região sul. Os autores citam estudos observacionais que identificaram valores próximos a 2,0 m/s na entrada do canal (ao sul), enquanto outros verificaram que nas áreas mais a norte da Lagoa, os valores máximos medidos foram cerca de 0,20 m/s em situação de vento forte. Este aumento na intensidade das correntes próximo ao canal pode estar associado à redução da área da seção transversal em direção ao oceano (MÖLLER *et al.*, 1996).

Outra característica desta laguna é a profundidade média de 5 m (MARQUES, 2006; ZANOTTA;GONÇALVES;DUCATI, 2009), sendo o valor máximo deste parâmetro cerca de 18 m na região do estuário, bem próximo ao canal de acesso ao oceano (CARNEIRO, 2009). Tal fator é relevante, uma vez que corpos d'água relativamente rasos apresentam uma resposta mais rápida a processos de aquecimento e resfriamento e também à ação de ondas (SMITH,

1994). Assim, esta característica pode ser relevante para determinar feições referentes à temperatura da água na região.

Zanotta, Gonçalves e Ducati (2009) visaram obter uma estimativa da temperatura superficial da Lagoa dos Patos através do sensoriamento remoto e obtiveram como resultado que esta variável pode ser influenciada por diversos fatores, como a dinâmica da laguna afetada pela batimetria e regime de ventos e descargas fluviais. Os autores também verificaram que, de maneira geral, as áreas mais ao norte apresentam temperaturas mais elevadas em comparação com as áreas mais próximas ao estuário (ao sul).

Do ponto de vista da ocorrência de nevoeiros na região é relevante destacar a contribuição dos parâmetros direção e intensidade do vento e de corrente e temperatura da água para formação do fenômeno na região.

Conforme apontado no capítulo anterior, ventos calmos ou fracos favorecem a formação de nevoeiros de radiação. Em contrapartida, nevoeiros de advecção e radiação-advecção também são fortemente dependentes da intensidade do vento para ter sua formação, uma vez que a mesma se dá a partir do deslocamento de ar sobre uma superfície mais fria. Adicionalmente, a velocidade do vento pode ser um parâmetro importante na determinação da espessura do nevoeiro, bem como fator decisivo para a dissipação do mesmo.

As correntes podem atuar favorecendo o transporte de águas mais frias ou mais aquecidas para determinada região. Conforme mencionado no capítulo anterior, alguns tipos de nevoeiro (advecção, radiação-advecção e evaporação, por exemplo) dependem da diferença de temperatura do ar e da superfície sobre a qual este ar se desloca. Desta maneira, na formação dos fenômenos sobre a superfície líquida avaliada, a corrente pode atuar de maneira significativa, contribuindo para a formação de um gradiente entre a temperatura do ar e a temperatura da água na área.

Assim, é importante obter a caracterização destes parâmetros durante a ocorrência de nevoeiros na cidade de Rio Grande. Tal etapa será descrita a seguir.

3.2 DADOS

Neste estudo foram aplicados dados disponibilizados pela Praticagem de Rio Grande e pelo Projeto “Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira” (SiMCosta). Desta forma, consistem em informações de diferentes fontes e períodos de abrangência, conforme ilustrado na tabela 4 e na figura 4. Destaca-se que o único período comum a todos os conjuntos de dados corresponde ao intervalo entre fevereiro e março de 2019 (retângulo vermelho na figura 4).

Tabela 4 - Dados aplicados na caracterização da ocorrência de nevoeiros em Rio Grande.

| Dados | Latitude/Longitude | Fonte | Variáveis | Período |
|-------------------------------|---------------------------|------------|--|--|
| Estação Meteorológica (Vento) | 32°08.2S/52°06.2W | Praticagem | Direção e Intensidade do Vento | 01/04/2003 a 28/08/2019 |
| Estação Meteorológica | 32°08.2S/52°06.2W | | Temperatura do Ar, Pressão, Umidade Relativa, Temperatura do Ponto de Orvalho e Precipitação | 01/01/2007 a 28/08/2019 |
| Condições da Barra | - | | Condições de navegação | 22/04/2004 a 28/08/2019 |
| Corrente - ADCP | 32°08.161'S/52°06.126'W | | Componentes u e v da corrente | 10/08/2018 a 23/08/2019 |
| RS-1 (Oceanográficos) | 32°01'25" S / 52°06'20" W | SiMCosta | Temperatura da Água | 23/11/2018 a 02/02/2020 |
| RS-2 (Oceanográficos) | 32°08'04" S / 52°05'53" W | | Temperatura da Água e Direção e Intensidade da Corrente | 11/02/2019 a 16/01/2020 |
| RS-3 (Oceanográficos) | 32°11'42" S / 52°04'46" W | | | 21/02/2019 a 12/10/2019 |
| RS-4 (Oceanográficos) | 32°14'44" S / 52°05'44" W | | | 21/02/2019 a 16/01/2020 |
| RS-5 (Oceanográficos) | 32°17'59" S / 52°01'22" W | | | 08/12/2016 a 21/03/2019 |
| RS-2 (Meteorológicos) | 32°08'04" S / 52°05'53" W | | | Temperatura do Ar, Pressão, Umidade Relativa, Temperatura do Ponto de Orvalho, Direção e Intensidade do Vento e Radiação Solar |
| RS-3 (Meteorológicos) | 32°11'42" S / 52°04'46" W | | 21/02/2019 a 12/10/2019 | |
| RS-4 (Meteorológicos) | 32°14'44" S / 52°05'44" W | | 21/02/2019 a 16/01/2020 | |
| RS-5 (Meteorológicos) | 32°17'59" S / 52°01'22" W | | 08/12/2016 a 21/03/2019 | |

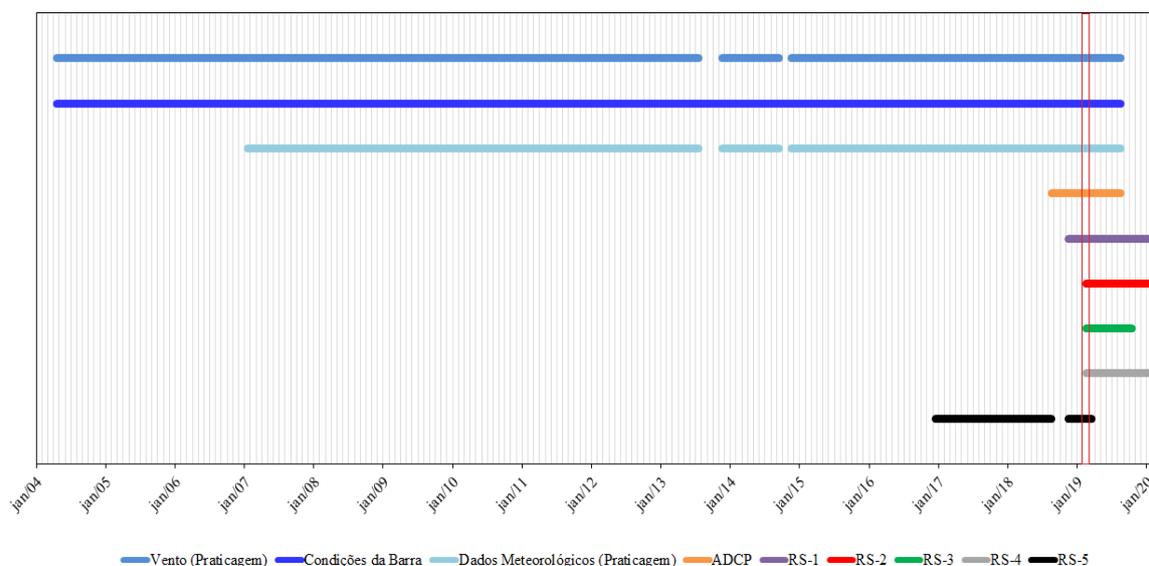


Figura 4- Período de abrangência dos dados utilizados no presente estudo, com o intervalo comum a todas as fontes de dados destacado pelo retângulo vermelho.

As informações de condições da Barra de Rio Grande foram disponibilizadas na forma de registros em planilha das condições meteorológicas e de navegação na região portuária de Rio Grande. Tais registros possibilitaram a identificação de eventos de nevoeiros que afetaram as atividades de Praticagem. Estes dados são classificados basicamente nas situações “Praticável”, “Impraticável”, “Praticabilidade em análise” e “Impraticabilidade em análise”, referente às atividades de manobras de navios na região portuária de Rio Grande, e são acompanhadas do motivo que causou as alterações em tais condições. Vale ressaltar que, a mudança de condição é realizada pela Capitania dos Portos quando algum fenômeno afeta a manobra de navios, sendo assim um registro subjetivo, uma vez que depende do local (dentro da área portuária) e tipo de manobra, bem como da abrangência do fenômeno que está afetando a atividade.

Neste estudo, foi feito um levantamento de eventos em que houve mudança de condição de navegação e manobra devido à restrição de visibilidade. Destaca-se que, apesar da definição de nevoeiro cuja redução da visibilidade horizontal se dá a 1 km ou menos, os registros obtidos compreendem eventos cuja visibilidade horizontal se reduziu a menos de 500 jardas (aproximadamente 457 m). Desta maneira, os eventos de nevoeiro estudados aqui são

caracterizados como intensos, pois estão associados a uma restrição de visibilidade significativa.

Com relação aos dados das boias do projeto SiMCosta, dois tipos de instrumentos são utilizados para medição da variável temperatura da água. O primeiro deles é o CTD (do inglês, *Conductivity, Temperature and Depth*), que é o instrumento-padrão utilizado em Oceanografia para a obtenção de perfis verticais de profundidade, condutividade (salinidade) e temperatura (MÖLLER E ABE, 2011). O segundo, ADCP (do inglês, *Acoustic Doppler Current Profiler*), é um perfilador acústico que mede a direção e a velocidade de correntes através da transmissão de um sinal sonoro de alta frequência, que é refletido de volta para o aparelho pelas partículas em suspensão na água. A velocidade e a direção são determinadas pelo desvio *doppler* da frequência do sinal que retorna ao aparelho (MÖLLER JUNIOR E ABE, 2011). A medição de temperatura da água pelo ADCP se dá através de um sensor de temperatura na extremidade de transdutores que compõem o equipamento (FERREIRA, 2016).

Os dados de vento utilizado neste estudo são provenientes de diferentes anemômetros, localizados em alturas distintas. Os sensores das boias do projeto SiMCosta estão localizados a uma altura de 3,0m, enquanto o da estação da Praticagem localiza-se a 24,5m de altura.

A localização das bóias do projeto SiMCosta, do ADCP e da estação meteorológica da Praticagem está disposta na figura 5, bem como a localização do aeroporto de Pelotas (SBPK) e da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na cidade de Rio Grande, utilizadas para complementar a análise dos eventos estudados (ver seção 3.3.1).

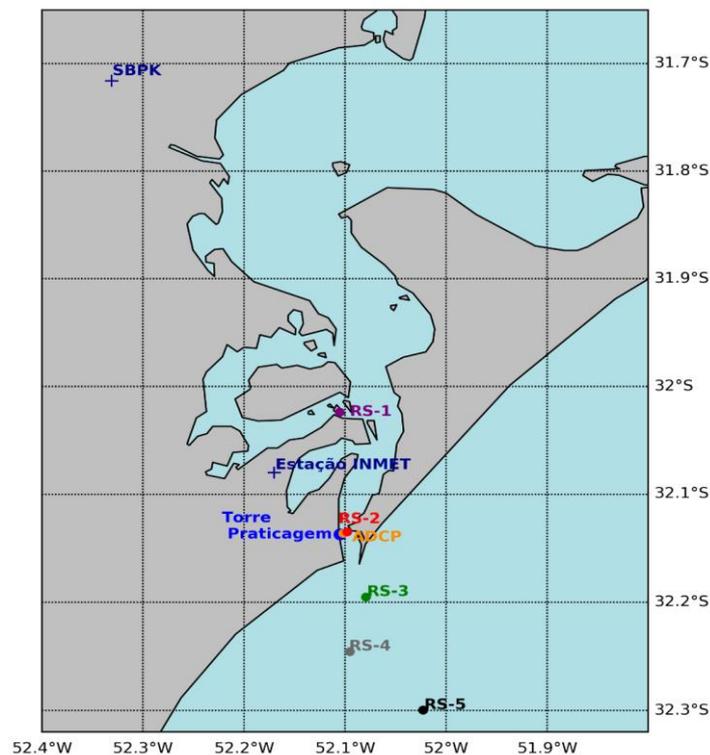


Figura 5 - Localização dos pontos de observação das variáveis meteorológicas e oceanográficas em Rio Grande.

A partir do levantamento dos dados, foi possível a caracterização da ocorrência de nevoeiros na região de estudo.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE NEVOEIROS EM RIO GRANDE

3.3.1 Climatologia

Conforme mencionado anteriormente, foram identificados os dias em que foi registrada a ocorrência de restrições de visibilidade que afetaram as atividades na região portuária de Rio Grande. Ressalta-se que os dias em que foi observada a ocorrência de nevoeiro concomitantemente a observações de precipitação foram descartados, uma vez que nessas condições, a restrição de visibilidade poderia estar associada à ocorrência da precipitação, que se trata de partículas de água em queda na atmosfera, divergindo da definição de nevoeiro que se resume a partículas de água em suspensão na atmosfera, próximas ou junto à superfície.

Por conta dos dados de precipitação terem sido introduzidos após os dados de condições da Barra e também por algumas falhas existentes na base de dados da estação meteorológica da Praticagem, não foi possível avaliar a ocorrência simultânea de precipitação em 53 casos de visibilidade restrita identificados. Entretanto, dados da estação meteorológica do INMET (A802-Rio Grande) e registros METAR no Aeroporto João Simões Lopes Neto, localizado em Pelotas, cidade próxima a Rio Grande, foram utilizados para complementar esta etapa do estudo. Desta forma, em apenas 5 eventos de nevoeiro reportados não foi possível realizar uma avaliação da ocorrência simultânea de precipitação. Tais eventos foram desconsiderados.

Ressalta-se que, ao ser reportada a redução de visibilidade, considerou-se a duração do evento de restrição até o horário de retorno para a condição “Praticável”. Entretanto, não é possível definir precisamente o horário de início e fim de cada evento de nevoeiro, uma vez que os registros são altamente subjetivos e referentes a restrições de visibilidade abaixo de 457 metros.

Posteriormente, foram realizadas análises para verificar a frequência mensal da ocorrência do fenômeno em Rio Grande, bem como o número total de eventos, dias e horas em que a visibilidade afetou as atividades portuárias e o horário mais frequente de retorno às condições de “Praticabilidade”.

A partir dos resultados desta etapa foi possível identificar os eventos de restrição de visibilidade de longa duração (acima de 24 horas), estipular um período para uma avaliação do regime de ventos e corrente durante a ocorrência de nevoeiros na região, além de selecionar os períodos para simulação numérica neste estudo.

3.3.2 Avaliação observacional da ocorrência de nevoeiros

Tendo em vista as diferenças de períodos de abrangência entre os conjuntos de dados, foi realizada uma avaliação da ocorrência de nevoeiros durante o intervalo temporal compreendido entre agosto de 2018 e agosto de 2019, período comum aos dados da Praticagem (meteorológicos e de corrente).

Foram identificados os eventos de nevoeiros ocorridos neste período e, posteriormente, foi realizada uma análise das variáveis vento e corrente (intensidade e direção de ambos os parâmetros) para os dias de ocorrência de nevoeiro e também para os horários mais próximos do retorno para a condição de “Praticabilidade”, ou seja, condição que marca uma melhoria nas condições de visibilidade. Para avaliar o comportamento dos campos destas variáveis em dias de nevoeiro na cidade de Rio Grande, foram elaboradas rosas dos ventos e de correntes.

Apesar de compreenderem períodos distintos e, conseqüentemente, não se referirem exatamente os mesmos eventos, uma verificação complementar com os dados das boias do projeto SiMCosta foi realizada. Os procedimentos e metodologia aplicada foram semelhantes ao do estudo preliminar supracitado, entretanto, foram avaliados os dias de nevoeiros registrados dentro do intervalo de operação de cada uma das boias com informações disponíveis.

A partir do melhor entendimento da climatologia dos eventos de nevoeiro e do comportamento de determinados parâmetros durante a ocorrência do fenômeno na região de estudo, os passos seguintes se dedicaram à modelagem numérica.

3.4 MODELAGEM NUMÉRICA

3.4.1 O modelo WRF

O *Weather Research and Forecast Model* (WRF) é um modelo atmosférico de mesoescala projetado para pesquisa e previsão numérica de tempo e é resultado da colaboração de diversos órgãos e centros de pesquisa americanos. De acordo com o *Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory* do *National Center for Atmospheric Research* (MMM/NCAR), o modelo pode ser aplicado a diferentes escalas meteorológicas, abrangendo fenômenos da ordem de dezenas de metros a milhares de quilômetros (MMM, c2021). De acordo com Nilo (2020), é um dos modelos numéricos mais utilizados no mundo. Possui dois núcleos dinâmicos, o *Advanced Research WRF* (ARW) e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM).

O núcleo dinâmico NMM foi desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Já o ARW foi produzido em grande parte e é mantido pelo MMM/NCAR

e será utilizado neste estudo na versão 4.1. Desta forma, serão abordadas a seguir algumas características deste núcleo dinâmico.

O ARW é um subconjunto do sistema de modelagem WRF que possibilita a escolha de parâmetros físicos, opções numéricas e dinâmicas nas simulações/previsões, além de englobar um pacote de assimilação de dados. Adicionalmente, fornece possibilidade de aplicações voltadas para química da atmosfera (WRF-Chem), modelagem hidrológica (WRF-Hydro) e modelagem de incêndios florestais (WRF-Fire) (SKAMAROCK *et al.*, 2019).

Com relação à coordenada vertical, o modelo utiliza coordenada híbrida (sigma-pressão), seguindo o terreno nos níveis mais baixos da atmosfera (Figura 6). Desta forma, a influência do terreno é removida mais rapidamente com o aumento da altura acima da superfície em comparação com as versões anteriores do ARW (SKAMAROCK *et al.*, 2019). As variáveis são distribuídas horizontalmente em grade C de Arakawa.

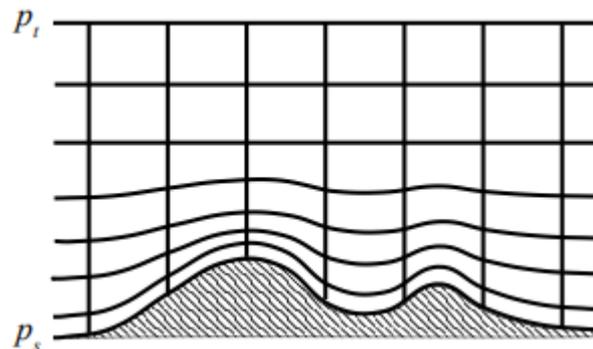


Figura 6- Coordenada vertical no ARW (fonte: SKAMAROCK *et al.*, 2019)

Para a simulação de eventos e previsão de tempo a partir do modelo WRF, as condições iniciais e de contorno devem ser pré-processadas para inserção no modelo e execução do mesmo. O *WRF Preprocessing System* (WPS) consiste em um conjunto de programas que prepara dados terrestres e meteorológicos para entrada no pré-processador de dados do ARW. Os programas que compõem o WPS são: *geogrid*, *ungrib* e *metgrid*. No *geogrid* são definidos o domínio do modelo, os domínios aninhados (caso seja necessário), projeção cartográfica, resoluções, entre outros. Também recebe e interpola os dados estáticos da simulação (topografia, uso do solo, tipo de superfície). A partir da execução do programa *ungrib*, dados

meteorológicos em formato GRIB são reformatados em um formato binário específico do modelo WRF. Tais dados são interpolados horizontalmente pelo programa *metgrid* para os domínios definidos previamente, cuja saída também é disponibilizada de forma tridimensional (SKAMAROCK *et al.*, 2019).

Resumidamente, o pacote WPS é executado e a saída fornecida por ele é passada para o pré-processador de dados reais do ARW, o programa *real*, que gera as condições iniciais e de contorno para o modelo. A figura 7 ilustra de forma simplificada o processo de pré-processamento e execução do WRF.

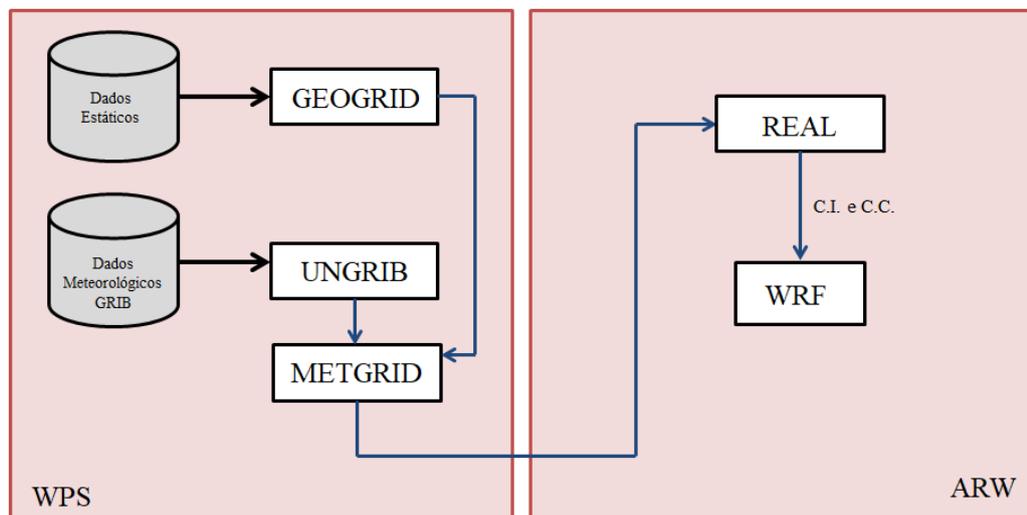


Figura 7 - Diagrama esquemático da execução do modelo WRF (adaptado de SKAMAROCK *et al.*, 2019)

Para a execução do núcleo dinâmico do modelo WRF, são definidos os esquemas de parametrizações a serem considerados na simulação/previsão. As categorias de opções físicas e parametrizações no modelo WRF são: microfísica, *cumulus*, camada limite planetária, camada de superfície, superfície terrestre (solo) e radiação (SKAMAROCK *et al.*, 2019). Dentro de cada categoria dessas, existem diversas opções a serem definidas pelo usuário de acordo com as especificidades demandadas por sua pesquisa e/ou região de aplicação.

Apesar das parametrizações serem definidas de forma separada, elas interagem muito entre si (SKAMAROCK *et al.*, 2019). A seguir, são descritas algumas características de cada esquema de acordo Skamarock *et al.* (2019), bem como interações entre os mesmos.

- a) A microfísica resolve os processos de vapor d'água, nuvens e precipitação. Na versão 4.1 do ARW, esta etapa é a última a ser calculada a cada passo de tempo. Desta forma, não fornece tendências, mas atualiza variáveis importantes para os cálculos a serem realizados no passo de tempo seguinte pelos demais esquemas.
- b) Os esquemas de parametrização *cumulus* descrevem os efeitos de nuvens convectivas e/ou nuvens menos profundas que ocorrem em escala sub-grade. Eles visam representar fluxos verticais decorrentes de correntes ascendentes e descendentes não resolvidos dentro das nuvens e movimentos compensatórios fora delas.
- c) Os esquemas de camada de superfície calculam as velocidades de fricção e os coeficientes de troca turbulenta que permitem obter os fluxos de calor e umidade pelos modelos de superfície terrestre e da tensão superficial pelo esquema de camada limite planetária.
- d) Os modelos de superfície terrestre usam as informações supracitadas dos esquemas de camada de superfície, forçantes radiativas dos esquemas de radiação, precipitação dos esquemas de microfísica e convectivos, em conjunto com informações acerca das propriedades da superfície terrestre, para fornecer os fluxos de calor e umidade. Tais fluxos são importantes para o transporte vertical nos esquemas de camada limite planetária.
- e) Os esquemas de camada limite planetária resolvem os fluxos verticais em escala sub-grade em decorrência do transporte turbulento em toda a coluna atmosférica. Determinam perfis dentro da camada de mistura e também da camada estável, fornecendo previsões de temperatura, umidade, e *momentum* em toda a coluna atmosférica.
- f) Os esquemas de radiação fornecem como resultado tendências de temperatura devido à divergência do fluxo radiativo e à influência dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa no balanço de calor no solo. Na atmosfera, a radiação é sensível à cobertura de nuvens e distribuição de vapor d'água previstas pelo modelo e das concentrações de alguns componentes como dióxido de carbono, ozônio e gases traços. Alguns esquemas podem considerar aerossóis.
- g) A radiação é a primeira opção física a ser calculada por conta dos fluxos radiativos necessários para executar o esquema de superfície. O esquema de superfície também necessita de parâmetros relacionados à precipitação provenientes da microfísica e da parametrização de

cumulus (relativos ao passo de tempo anterior, uma vez que o esquema de superfície é acionado pelo núcleo dinâmico antes dos esquemas *cumulus* e microfísico). Após o cálculo dos fluxos de calor e umidade pelo esquema de superfície, o esquema de camada limite é executado.

A figura 8 ilustra de forma sucinta tais interações entre os esquemas físicos do modelo WRF.

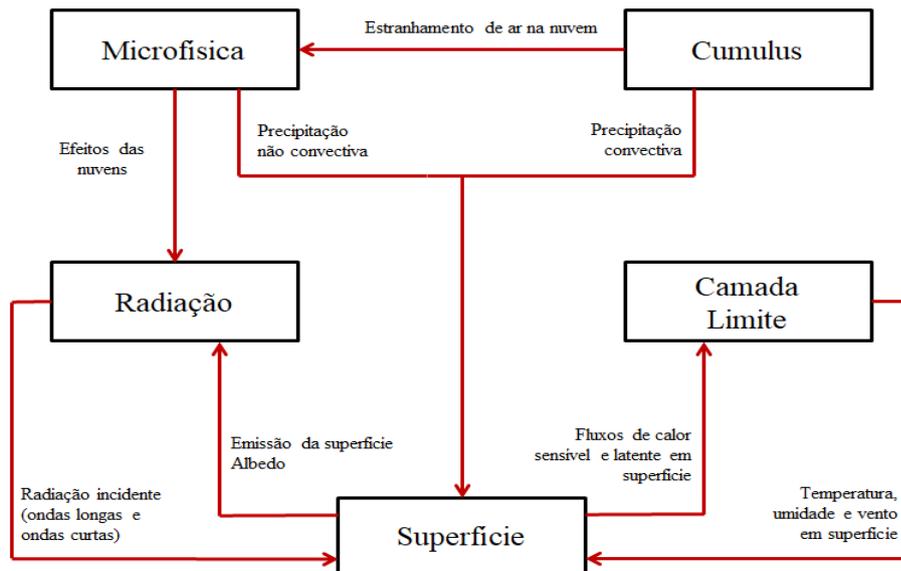


Figura 8 - Interações entre os esquemas físicos do modelo WRF (adaptado de SKAMAROCK et al., 2019).

3.4.2 Configurações do WRF

Como evidenciado no tópico anterior, a versão 4.1 do modelo WRF foi utilizada para a simulação realizada neste estudo. A figura 9 e a tabela 5 apresentam a configuração horizontal dos domínios utilizados, que consistem em 3 grades, sendo os domínios 02 e 03 aninhados a partir do 01 (aninhamento *one-way*, sem influência dos domínios menores em relação aos maiores). Ressalta-se que os domínios 01 e 03 encontram-se centrados nas coordenadas referentes à torre de controle da Praticagem da Barra do Rio Grande, onde localiza-se a estação meteorológica.

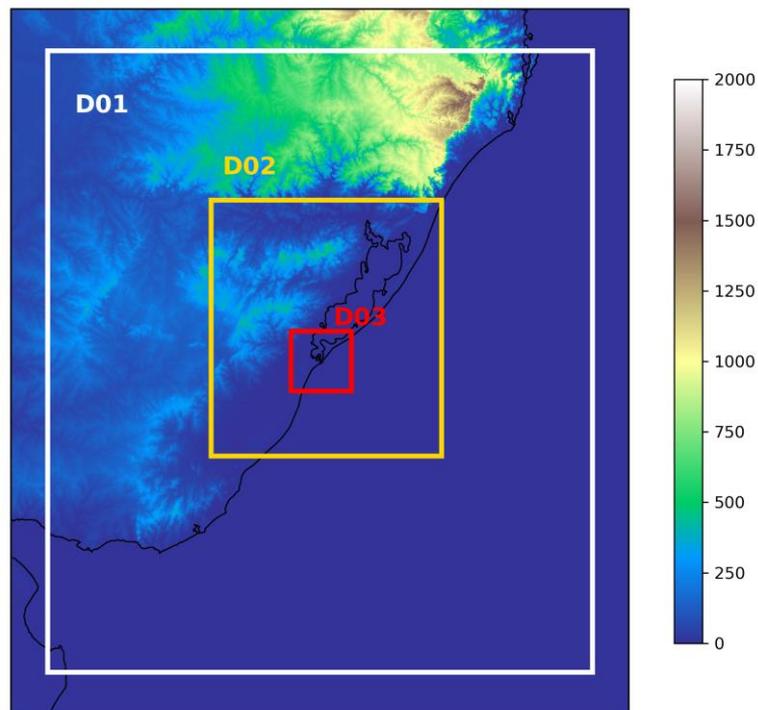


Figura 9 - Disposição das grades aninhadas para simulações com o modelo WRF. Os valores na escala de cores são referentes à topografia, em metros.

Tabela 5 - Especificidades dos domínios definidos para simulações com o modelo WRF.

| Domínio | Resolução Horizontal (km) | Pontos (x,y) |
|----------------|----------------------------------|---------------------|
| D01 | 9 | 100x115 |
| D02 | 3 | 127x142 |
| D03 | 1 | 100x100 |

A projeção utilizada foi a *Lambert Conformal Conic*, devido à localização da área de estudo, e os dados de condições iniciais e de contorno foram provenientes das análises do NCEP/ *Global Data Assimilation System* (GDAS)/FNL, com resolução de $0,25^\circ$ (ver Apêndice A). O conjunto de esquemas físicos adotado para as simulações realizadas neste estudo encontra-se na tabela 6 e foi definido de acordo com o utilizado por estudos anteriores presentes na literatura.

Tabela 6 - Parametrizações adotadas para as simulações com o modelo WRF.

| Processo | Esquema utilizado | Referência |
|--------------------------|---|-----------------------------|
| Radiação de Ondas Longas | <i>Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)</i> | MLAWER <i>et al.</i> ,1997 |
| Radiação de Ondas Curtas | MM5 (Dudhia) | DUDHIA, 1989 |
| Superfície | <i>Revised MM5 similarity theory</i> | JIMENEZ <i>et al.</i> ,2012 |
| Solo | <i>Noah Land Surface Model</i> | CHEN E DUDHIA,2001 |
| Cumulus | Kain-Fritsch | KAIN, 2004 |
| Camada Limite Planetária | <i>Yonsei University (YSU) Planetary Boundary Layer</i> | HONG, NOH E DUDHIA, 2006 |
| Microfísica | <i>WRF Double-Moment 6-class (WDM6)</i> | LIM E HONG, 2010 |

De acordo com os resultados obtidos por Steeneveld, Ronda e Holtslag (2015), a parametrização de camada limite se mostrou muito relevante para previsão da formação de nevoeiro, enquanto o esquema de microfísica apresentou-se como um elemento importante para a dispersão/dissipação do fenômeno.

O esquema YSU é sucessor da parametrização de camada limite planetária do *Medium Range Forecast Model* (MRF), com algumas correções para camadas de mistura profundas e abordagem não-local (KNIEVEL, 2008). Tem, dentre suas especificidades, um termo de mistura vertical impulsionada por processos radiativos que é importante para o ciclo de vida de nuvens estratiformes, incluindo nevoeiros (SKAMAROCK *et al.*, 2019). Yang et al. (2019) mencionam estudos anteriores que destacam que a modelagem da formação e evolução de nevoeiros advectivos são mais sensíveis aos esquemas de camada limite em comparação com a microfísica, sendo o esquema YSU apontado como um dos mais habilidosos.

Steeneveld, Ronda e Holtslag (2015) constataram que o esquema microfísico de momento duplo (WDM6) mostrou desempenho superior aos de momento simples avaliados neste estudo para a opção microfísica. Os esquemas de microfísica de momento simples possuem uma equação para previsão de massa (kg/kg) dos parâmetros microfísicos, enquanto

os de momento duplo adicionam a este conjunto uma equação prognóstica para concentração em número de determinados parâmetros, como por exemplo, a concentração de gotas (DUDHIA, 2014). O modelo WDM6 tem como variáveis de prognóstico as concentrações de gotas de nuvem e chuva, além de ser sensível à concentração de núcleos de condensação, incluindo os processos de advecção dos mesmos (SKAMAROCK *et al.*, 2019).

3.4.2.1 Resolução Vertical

A resolução vertical e a altura do primeiro nível do modelo são parâmetros importantes no estudo numérico de fenômenos de camada limite, como os nevoeiros. Desta forma, estes parâmetros foram alvo de uma investigação neste trabalho e a metodologia adotada nesta etapa do estudo será descrita a seguir, bem como aspectos teóricos relevantes para esta análise.

O nível vertical mais baixo do modelo (z_1) é uma parte da configuração da resolução vertical na parte inferior da atmosfera e desempenha um papel muito importante na resolução dos processos próximos à superfície (YANG *et al.*, 2019). Pode ser considerado a interface de troca de energia e massa entre a superfície e a camada limite atmosférica (YANG *et al.*, 2019).

Shin, Hong e Dudhia (2012) destacam que, de maneira geral, assume-se que a altura do nível vertical mais baixo de um modelo numérico encontra-se dentro da camada de superfície e que este parâmetro influencia no comportamento do esquema de camada limite. Esta característica pode refletir no desempenho do modelo. Os autores avaliaram os impactos desta variável em 3 esquemas de parametrização de camada limite no modelo WRF, incluindo o YSU, que é utilizado neste estudo e o mesmo apresentou sensibilidade ao valor de z_1 . Em experimentos com valores de z_1 abaixo de 40m, foi verificado um menor espaçamento vertical nos primeiros metros da atmosfera e este espaçamento tende a se tornar menor à medida que z_1 diminui.

Este menor espaçamento entre as camadas e, conseqüentemente, um aumento do número de níveis verticais é realizado para evitar um salto repentino entre a primeira e a segunda camada. A definição de uma camada de pequena espessura perto da superfície requer mais camadas de modelo dentro da camada de superfície para resolvê-la melhor (SHIN;HONG;DUDHIA,2012).

Yang *et al.* (2019) buscaram realizar a avaliação da sensibilidade do modelo WRF configurado com o esquema de camada limite YSU a z1 para um evento de nevoeiro de advecção no Mar Amarelo, localizado entre o leste da República Popular da China e o oeste da Coreia do Norte e da Coreia do Sul. Os autores mencionam que estudos pretéritos verificaram melhorias na simulação de nevoeiro sobre a região do estudo a partir de um incremento na resolução vertical dentro da camada limite, atribuindo este resultado a uma maior resolução de conteúdo de água líquida no topo do nevoeiro.

Yang *et al.* (2019) realizaram simulações considerando z1 em diversas alturas, variando entre 0,4 m e 28 m. Como principais resultados, os autores concluíram que uma altura z1 moderada é essencial para reproduzir de forma realística o horário de início do nevoeiro e sua área de abrangência. Valores mais baixos podem levar a um adiantamento da formação do nevoeiro e uma área de abrangência simulada menor, enquanto um z1 mais alto pode atrasar a formação e o desenvolvimento do fenômeno. O melhor resultado neste trabalho foi obtido para o valor de 8 m.

Do ponto de vista prático, o modelo WRF permite a realização de ajuste nestes parâmetros. É possível definir o número de camadas verticais e também a forma como estes níveis serão distribuídos pelo modelo. Neste estudo, foi utilizado um método para a distribuição de níveis verticais que considera fatores de alongamento distintos para as porções inferiores e superiores da atmosfera (dz_stretch_s e dz_stretch_u, respectivamente). A partir da definição do nível mais baixo do modelo (dzbot), a disposição de níveis vertical se dá de acordo com uma distribuição log p, considerando tais fatores de alongamento.

Também é definido o valor máximo permitido para a espessura entre duas camadas (max_dz). Este valor define quando a taxa de alongamento irá transitar do valor inferior (dzstretch_s) para o valor superior (dzstretch_u), sendo esta transição realizada quando a espessura entre as camadas atinge a metade da máxima espessura permitida (MMM, 2019).

Neste estudo, a sensibilidade do modelo WRF aos parâmetros resolução vertical e altura do primeiro nível do modelo foram avaliados a partir de 3 testes de sensibilidade. A configuração destes testes, no que diz respeito aos parâmetros alterados, é destacada na tabela 7. Foram realizadas simulações com o modelo para um evento de nevoeiro ocorrido na cidade

de Rio Grande-RS e uma avaliação do impacto dos ajustes destes elementos foi feita e será apresentada na seção 5.1

Tabela 7 - Configurações de parâmetros referentes à resolução vertical do modelo WRF utilizada nos testes de sensibilidade realizados neste estudo (* Parâmetros não utilizados na configuração do teste 1)

| Teste | dzbot (m) | max_dz (m) | dz_streth_s | dz_streth_u | Níveis Verticais |
|-------|-----------|------------|-------------|-------------|------------------|
| 1 | 50 | * | * | * | 33 |
| 2 | 20 | 1000 | 1,3 | 1,1 | 50 |
| 3 | 10 | 1000 | 1,3 | 1,1 | 50 |

3.4.2.2 Métodos de estimativas de visibilidade e outros parâmetros avaliados a partir das saídas do modelo WRF

A visibilidade é o principal parâmetro para avaliar a ocorrência ou não de um nevoeiro. Além da observação, existem outros métodos de estimativa deste fator.

Kunkel (1984) propôs a seguinte relação empírica para obter a estimativa de visibilidade para nevoeiro a partir do conteúdo de água líquida (LWC, da sigla em inglês para *liquid water content*).

$$VIS_K(km) = \frac{-\ln(0,02)}{144,7(LWC)^{0,88}} \quad (2),$$

onde LWC é o conteúdo de água líquida em g/m³.

Existem também métodos que consideram parâmetros de mais simples obtenção do ponto de vista observacional, como o desenvolvido pelo *Forecast Systems Laboratory* (FSL), que utiliza as variáveis temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e umidade relativa (equação 3).

$$VIS_{FSL}(milhas) = 6000 \left(\frac{T-Td}{UR^{1,75}} \right) \quad (3),$$

onde T é a temperatura e Td a temperatura do ponto de orvalho, ambas em °C, e UR a umidade relativa em %.

Neste trabalho propõe-se avaliar estes métodos para a estimativa de visibilidade horizontal VIS_K e VIS_{FSL} em dias de nevoeiro na cidade de Rio Grande a partir das saídas do modelo WRF, como indicado nos estudos de Fita *et al* (2019) e Bang, Lee e Hong (2008), respectivamente. Adicionalmente, apesar de não se tratar de um método de estimativa do parâmetro visibilidade, o índice FSI também será avaliado para a região de estudo, uma vez que representa a probabilidade de ocorrência do fenômeno.

Outro indicador acerca da estabilidade atmosférica que será avaliado neste estudo é o número de Richardson-Bulk, dado pela seguinte equação (STULL,1997):

$$Ri_B = \frac{g \overline{\Delta \theta_v} \Delta z}{\overline{\theta_v} [(\overline{\Delta U})^2 + (\overline{\Delta V})^2]} \quad (4),$$

onde θ_v é a temperatura potencial virtual, g a aceleração da gravidade, U e V as componentes zonal e meridional do vento e z a altura.

As diferenças finitas são calculadas da seguinte forma:

$$\Delta X = X(z) - X(z_0) \quad (5),$$

onde z e z0 são, respectivamente, as alturas do topo e da base da camada considerada.

Na tabela 8 estão relacionadas as classes de estabilidade de Pasquill de acordo com os limiares para o número de Richardson (WOODWARD,1998). Tal classificação será considerada neste trabalho.

Tabela 8 - Classes de estabilidade atmosférica de acordo com o número de Richardson

| Categoria de Estabilidade Atmosférica | Classificação de Estabilidade de Pasquill | Nº de Richardson-Bulk |
|---------------------------------------|---|------------------------|
| A | Muito instável | $Ri_B < -0,86$ |
| B | Instável | $-0,86 < Ri_B < -0,37$ |
| C | Moderadamente instável | $-0,37 < Ri_B < -0,10$ |
| D | Neutro | $-0,10 < Ri_B < 0,053$ |
| E | Estável | $0,053 < Ri_B < 0,134$ |
| F | Muito estável | $0,134 < Ri_B$ |

3.4.1.3 Estudos de Caso

A partir da configuração do modelo WRF descrita anteriormente, foram realizadas simulações de eventos de nevoeiro ocorridos na cidade de Rio Grande. A tabela 9 mostra os períodos considerados neste estudo, bem como os eventos de nevoeiros ocorridos nestes intervalos e as suas durações.

Um aspecto importante a se destacar é o tempo de *spin-up* do modelo. Um modelo de mesoescala necessita deste tempo para ajustar as condições iniciais fornecidas ao seu sistema de equações não lineares e, por conta disso, os prognósticos nos primeiros instantes de integração não são representações reais das condições atmosféricas (BASSO; MACEDO; YAMASAKI, 2014).

Assim como evidenciado na tabela 9, o tempo mínimo de antecedência para a análise dos resultados do modelo nas simulações realizadas neste estudo foi de 12 horas (períodos A, B e D). O máximo adotado para o mesmo parâmetro foi de 24 horas (período C) por ter sido o primeiro intervalo a ser simulado durante a realização deste estudo. Destaca-se que este tempo se mostra superior ao que vem sido adotado em alguns estudos numéricos voltados para o estudo de nevoeiros, que utilizaram o horizonte de 6 horas (ROMÁN-CASCÓN et al, 2016; NILO, 2020). Desta forma, o modelo apresenta uma configuração que garante a estabilidade das simulações com relação às condições iniciais.

Tabela 9-Intervalos de simulação computacional e eventos avaliados neste estudo.

| Período | Nº de eventos | Simulação | | Eventos intensos | |
|---------|---------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| | | Início (data e hora) | Fim (data e hora) | Início (data e hora) | Fim (data e hora) |
| A | 3 | 17/06/2018 09:00 | 20/06/2018 09:00 | 18/06/2018 00:00 | 18/06/2018 15:00 |
| | | | | 19/06/2018 00:30 | 19/06/2018 05:00 |
| | | | | 19/06/2018 18:15 | 19/06/2018 22:30 |
| B | 2 | 08/07/2019 09:00 | 10/07/2019 21:00 | 09/07/2019 03:00 | 09/07/2019 09:30 |
| | | | | 09/07/2019 23:30 | 10/07/2019 10:00 |
| C | 2 | 15/07/2019 21:00 | 18/07/2019 21:00 | 16/07/2019 23:30 | 17/07/2019 13:30 |
| | | | | 17/07/2019 20:30 | 18/07/2019 03:00 |
| D | 1 | 27/08/2019 09:00 | 28/08/2019 21:00 | 28/08/2019 07:00 | 28/08/2019 11:15 |

Para a avaliação destes estudos de caso foram utilizados dados observados na estação meteorológica da Praticagem, dados das boias do Projeto SiMCosta, carta sinóticas do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) do Brasil e imagens de satélite do destaque “Nevoeiro” da Divisão de Satélites Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE).

O produto de imagens de satélite utilizado neste estudo é disponibilizado entre às 18h e às 06h (horário local) no site da DSA/INPE (<http://satelite.cptec.inpe.br/nevoeiro/>). Desta forma, tem seu foco em nevoeiros com formação noturna, como tipicamente ocorrem os nevoeiros de radiação.

Um dos produtos de sensoriamento remoto que visa identificar a ocorrência noturna de nevoeiros utiliza diferença entre as temperaturas de brilho nos canais 10,3 μm e 3,9 μm (LINDSTROM, 2017). Esta diferença é utilizada à noite para possibilitar a identificação de nuvens compostas por gotas de água, uma vez que não emitem radiação no comprimento de onda de 3,9 μm , mas a radiação de 10,3 μm é emitida por essas nuvens quase como se elas

fossem um corpo negro (LINDSTROM, 2017). Desta maneira, esta diferença assume valores positivos na detecção de nuvens estratiformes no período da noite (LINDSTROM, 2017).

Para uma análise do desempenho do modelo WRF na simulação destes eventos foram produzidos campos de variáveis meteorológicas relevantes para a formação de nevoeiro. Foram avaliados conteúdo de água líquida, razão de mistura, vento, umidade relativa e temperatura do ar próximos à superfície, além das estimativas de visibilidade citadas anteriormente.

Adicionalmente, foi realizada uma análise pontual de variáveis meteorológicas, tendo como ponto central a localização aproximada da estação meteorológica da Praticagem. Nesta avaliação, foram produzidos perfis verticais e séries temporais de variáveis meteorológicas a fim de verificar a estrutura vertical do fenômeno e a sua evolução temporal.

Para a avaliação vertical, foi utilizada como referência o perfil vertical teórico ilustrado na figura 10, adaptada de Stull (1997). De acordo com o mesmo autor, ela representa perfis médios idealizados para uma camada de nuvens stratocumulus, com topo na camada de mistura e localizadas em determinada altura. Apesar de não se tratar especificamente de um nevoeiro, este perfil teórico aponta aspectos relevantes à presença de nuvens com características estratiformes na atmosfera.

Stull (1997) destaca algumas características deste perfil idealizado:

- a) Temperatura potencial equivalente e razão de mistura total constantes com a altura devido à definição de que as nuvens estão inseridas dentro da camada de mistura;
- b) Temperatura potencial virtual seguindo a taxa adiabática úmida dentro da camada de nuvens;
- c) Conteúdo de água líquida aumenta quase linearmente com a altura acima da base da nuvem em condições sem precipitação;
- d) Variações no teor de água líquida (ou razão de mistura) são esperadas devido à entrada de ar mais seco de cima, com o topo da nuvem apresentando significativamente menos água líquida;
- e) A densidade do número de gotas é aproximadamente constante, sugerindo que as gotas são maiores perto do topo da nuvem.

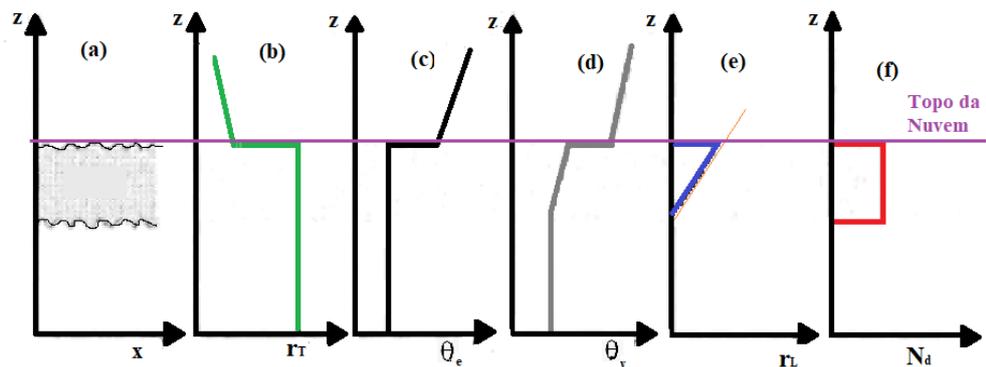


Figura 10 - Perfil vertical teórico considerando a localização da nuvem (a), razão de mistura (b), temperatura potencial equivalente (c), temperatura potencial virtual (d), razão de mistura da água líquida (e) e número de gotas (f) para nuvens Stratocumulus (adaptado de Stull (1997)).

Em um perfil voltado para a ocorrência de nevoeiro, espera-se que a presença da nuvem seja identificada próximo ao solo.

Na avaliação da evolução temporal foram selecionados, além do ponto central, 4 pontos representativos, de acordo com a figura 11. Esta análise permitiu comparar os resultados do modelo WRF com os dados observados em mais um ponto, além de obter uma caracterização mais detalhada da simulação do fenômeno, obtendo informações espaciais complementares.

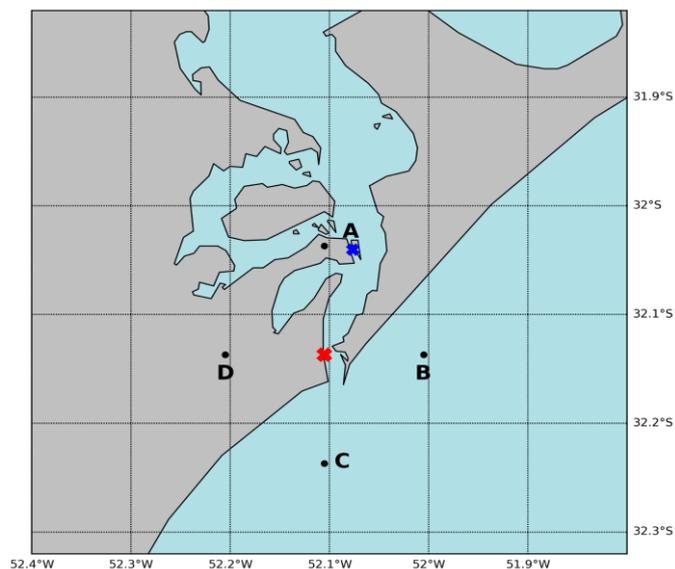


Figura 11 - Localização dos pontos representativos para avaliação da evolução temporal das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF. O ponto central (cruz vermelha) está localizado nas coordenadas da estação meteorológica da Praticagem e o ponto do Porto de Rio Grande está marcado em azul.

3.4.1.4 Avaliação estatística

A verificação da previsão da ocorrência de nevoeiros a partir do modelo WRF foi realizada a partir da aplicação de uma tabela de contingência 2x2. Foram utilizados 3 conjuntos de dados de previsão, que consistem nas estimativas de visibilidade do FSL e de Kunkel e o FSI. O conjunto de observação considerado compreendem os registros das condições de navegação da Praticagem.

Os dados (previsão e observação) foram categorizados em 2 classes: nevoeiro intenso (1) e não-nevoeiro (0). Assim como destacado anteriormente, o registro de nevoeiro intenso neste estudo compreende ocorrências do fenômeno associadas a restrições de visibilidade abaixo de 500 jardas ou 457 metros. Desta forma, o limiar adotado neste estudo para definir a presença ou a simulação de nevoeiro intenso foi o mesmo (457 metros).

Destaca-se que a avaliação do FSI se deu de forma distinta, uma vez que o parâmetro não fornece saídas de visibilidade, apenas indica a probabilidade de formação de nevoeiro. Para este índice, o método adotado foi considerar como ocorrência de nevoeiro a indicação de probabilidade alta de formação do fenômeno ($FSI < 31$).

Os dados da previsão dos 3 parâmetros (FSL, Kunkel e FSI) foram provenientes das saídas horárias do modelo WRF nos períodos de simulação considerados nesse estudo. Assim, a avaliação contemplou um total de 244 previsões horárias.

As métricas estatísticas consideradas nesta avaliação foram Acurácia ou Proporção Correta (PC), *Threat Score* (TS) ou Índice Crítico de Sucesso (CSI), *Odds Ratio* (θ), Viés ou *Bias* (B), Razão de Alarme Falso (FAR), *Hit Rate* (H) ou Probabilidade de Detecção (POD) e Probabilidade de Falsa Detecção (POFD). Tais parâmetros estão descritos em detalhes no Apêndice B.

4 RESULTADOS I : ASPECTOS OBSERVACIONAIS DE NEVOEIROS EM RIO GRANDE

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE NEVOEIROS

Foram identificados de abril de 2004 a agosto de 2019, 241 registros de alteração das condições de operação da Barra do Rio Grande por conta da redução de visibilidade horizontal para menos de 500 jardas. Em termos de horas, foi constatada a influência da visibilidade restrita nas atividades portuárias em 1444 horas e 06 minutos.

Com relação ao número de dias afetados por restrição de visibilidade a partir dos dados analisados, foi identificado um total de 258 dias. A tabela 10 mostra a quantidade de dias com registro de restrição da visibilidade horizontal agrupados por mês. Ressalta-se que há registros de ocorrências de eventos com duração superior a 24 horas podendo afetar a visibilidade por 2 ou 3 dias e também eventos que começaram a influenciar nas atividades portuárias no final da tarde e da noite e permaneceram durante o início da madrugada seguinte, contabilizando 2 dias.

Tabela 10 - Frequência mensal de dias com restrição de visibilidade na cidade de Rio Grande - RS entre abril de 2004 e agosto de 2019

| Mês | Dias Afetados |
|------------|----------------------|
| Janeiro | 1 |
| Fevereiro | 1 |
| Março | 3 |
| Abril | 12 |
| Maiο | 27 |
| Junho | 53 |
| Julho | 51 |
| Agosto | 45 |
| Setembro | 38 |
| Outubro | 17 |
| Novembro | 7 |
| Dezembro | 3 |

É possível destacar que a maior frequência de dias afetados por eventos de nevoeiro na cidade de Rio Grande é observada entre os meses de maio e setembro, com máximos em junho e julho. Tal resultado corrobora com o observado por Reboita e Krusche (2000).

A figura 12 evidencia a maior frequência de nevoeiros entre os meses de maio e setembro na cidade de Rio Grande e possibilita uma avaliação da frequência anual do fenômeno. Os anos de 2004 e 2019 não foram considerados nesta análise por não possuir registro das condições de navegação em todos os meses. O ano de 2016, dentro da série de dados disponíveis, foi o ano que apresentou maior número de registros de eventos de restrição de visibilidade, enquanto o ano de 2015 apresentou menor número.

Destaca-se que, entre esses anos, foi observada a configuração de um evento de El Niño (EN) classificado como muito forte pelo *Oceanic Niño Index* (ONI) (PEREIRA;REBOITA;AMBRIZZI, 2017). Tal metodologia é utilizada pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e os valores do índice por trimestre estão disponíveis para consulta desde a década de 1950 através do link https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Durante todo o ano de 2015, foram observadas condições de EN e a partir do trimestre abril-maio-junho de 2016, foi verificada um período de transição para La Niña (LN).

No estudo de Pereira, Reboita e Ambrizzi (2017) são apresentados alguns dos impactos de eventos de EN já documentados na literatura sobre a região sul do Brasil. Dentre eles, contribuição para anomalias positivas de precipitação e aumento da ocorrência de ciclones na faixa latitudinal que compreende a cidade de Rio Grande. Além disso, os autores destacam que entre setembro de 2014 e julho de 2016, a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) apresentava-se em sua fase positiva, o que pode ter contribuído com a intensificação do evento de EN. Dessa forma, a configuração deste evento EN pode ter contribuído para baixa frequência de nevoeiros no ano de 2015.

Em contrapartida, a elevada frequência em 2016 pode estar associada ao início de um evento de LN se iniciando no trimestre julho-agosto-setembro, de acordo com índice ONI. De acordo com estudos pretéritos, sob estas condições há anomalias negativas de precipitação

sobre a região Sul durante os meses de primavera (GRIMM *et al*, 1996). Desta forma, há possibilidade desta característica ter impacto sobre a frequência de nevoeiros nesta região.

Outro aspecto possível de destacar é a ocorrência de nevoeiros durante os meses de verão, pouco frequente, mas destacada nos anos de 2011 e 2012.

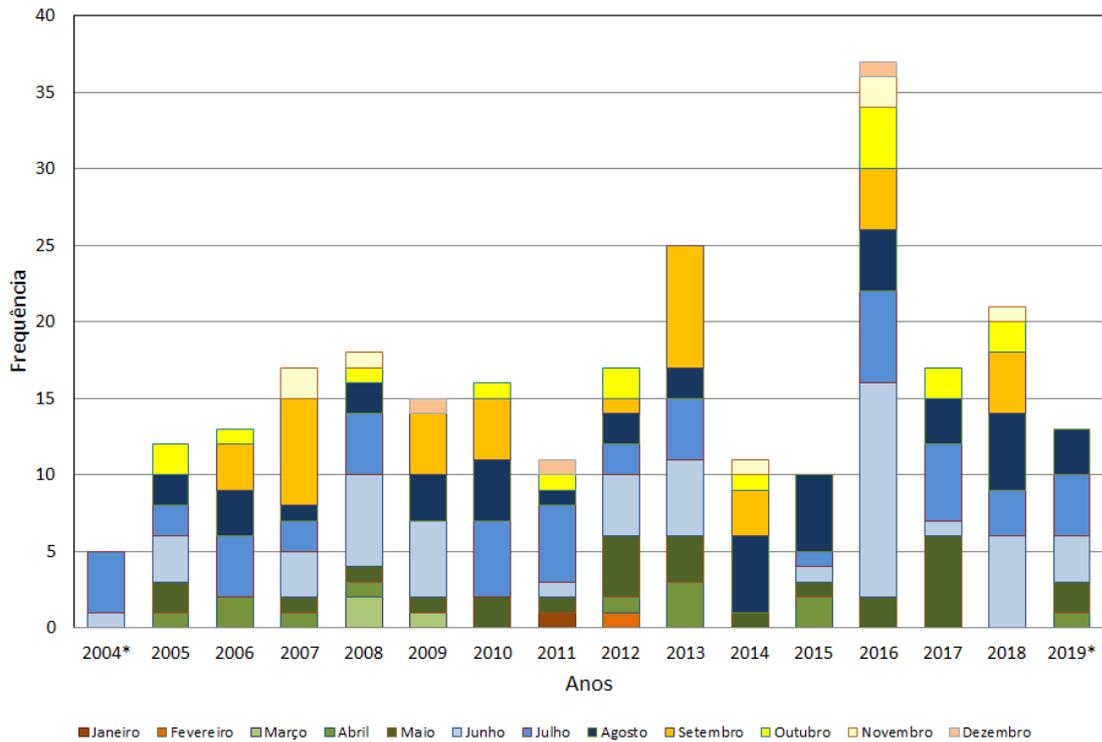


Figura 12 – Frequências (em dias) anual e mensal de nevoeiros na cidade de Rio Grande.

Com relação ao retorno à condição de Praticabilidade, ou seja, início da melhoria das condições de visibilidade para a navegação, é possível verificar que o horário mais frequente compreende o intervalo entre 8 e 11 horas local em nevoeiros ocorridos em todas as estações do ano (Figura 13). A maior frequência de eventos de nevoeiro entre os meses de junho e agosto também é evidenciada através desta figura. Destaca-se que os nevoeiros ocorridos nos meses de verão apresentaram horário indicativo de dissipação entre 07h e 10h.

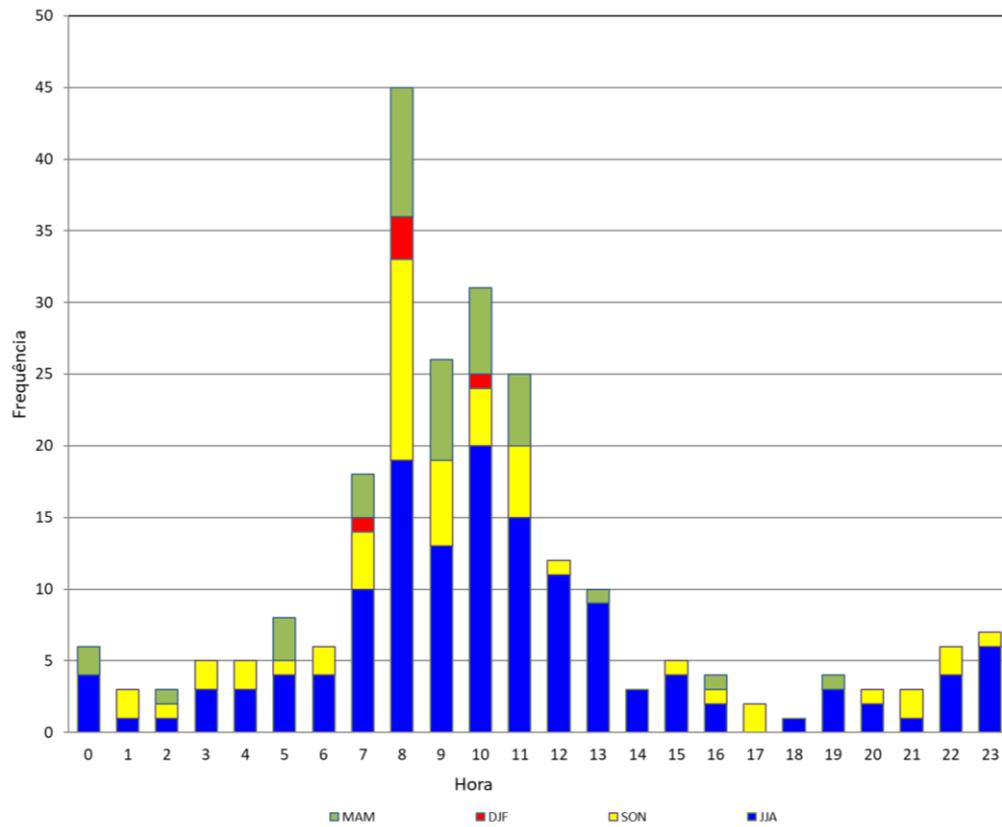


Figura 13 - Histograma do horário de retorno à condição de Praticabilidade após restrição de visibilidade na cidade de Rio Grande. As cores das colunas são referentes à estação do ano.

Durante o período de estudo foram identificados 7 eventos com duração igual ou superior a 24 horas (Tabela 11). Dentre eles, 3 foram observados no mês de julho, enquanto os meses de abril, junho, setembro e outubro apresentaram 1 evento cada.

Tabela 11 - Eventos de restrição de visibilidade de longa duração ocorridos na cidade de Rio Grande-RS entre abril de 2004 e agosto de 2019.

| Evento | Início (data e hora) | Fim (data e hora) | Duração (horas) |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 02/07/2004 03:41 | 03/07/2004 03:41 | 24:00 |
| 2 | 16/04/2013 07:00 | 17/04/2013 09:00 | 26:00 |
| 3 | 01/09/2013 21:00 | 03/09/2013 07:30 | 34:30 |
| 4 | 26/06/2016 22:30 | 28/06/2016 11:30 | 37:00 |
| 5 | 26/07/2017 18:30 | 28/07/2017 07:00 | 36:30 |
| 6 | 08/10/2018 05:45 | 09/10/2018 08:30 | 26:45 |
| 7 | 16/07/2019 23:30 | 18/07/2019 13:15 | 37:45 |

Como mencionado anteriormente, os registros obtidos são altamente subjetivos e dependem de diversos fatores como a demanda de manobras, o tipo de manobra a ser realizada, o local (dentro da zona portuária) onde a atividade irá ocorrer e também da abrangência do fenômeno que afeta as atividades. Durante alguns eventos registrados com duração de 24 horas ou mais, houve registros de mudança para condição de Praticabilidade por serem verificadas condições favoráveis para realizar determinado tipo de manobra em um ponto específico da zona portuária. Desta forma, serão descritos na tabela 12 os intervalos onde ocorreram tal alternância de condições de navegação dentro dos eventos de nevoeiro com duração superior a 24 horas.

Tabela 12 - Descrição detalhada de eventos de restrição de visibilidade de longa duração ocorridos na cidade de Rio Grande-RS entre abril de 2004 e agosto de 2019.

| Evento | Início (data e hora) | Fim (data e hora) | Condição |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|
| 1 | 02/07/2004 03:41 | 02/07/2004 05:45 | IMPRATICÁVEL |
| | 02/07/2004 05:45 | 02/07/2004 09:30 | PRATICÁVEL |
| | 02/07/2004 09:30 | 02/07/2004 11:40 | IMPRATICÁVEL |
| | 02/07/2004 11:40 | 03/07/2004 03:41 | PRATICÁVEL |
| 5 | 26/07/2017 18:30 | 27/07/2017 00:30 | IMPRATICÁVEL |
| | 27/07/2017 00:30 | 27/07/2017 00:59 | PRATICÁVEL |
| | 27/07/2017 01:00 | 27/07/2017 14:00 | IMPRATICÁVEL |
| | 27/07/2017 14:00 | 27/07/2017 18:15 | PRATICÁVEL |
| | 27/07/2017 18:15 | 28/07/2017 05:30 | IMPRATICÁVEL |
| | 28/07/2017 05:30 | 28/07/2017 07:00 | PRATIC. EM ANÁLISE |
| | 28/07/2017 07:00 | 28/07/2017 07:00 | PRATICÁVEL |
| 7 | 16/07/2019 23:30 | 17/07/2019 13:30 | IMPRATICÁVEL |
| | 17/07/2019 13:30 | 17/07/2019 20:30 | PRATICÁVEL |
| | 17/07/2019 20:30 | 18/07/2019 03:00 | IMPRATICÁVEL |
| | 18/07/2019 03:00 | 18/07/2019 13:15 | PRATICÁVEL |

A partir da análise de dados meteorológicos e oceanográficos foi possível perceber outras características inerentes às ocorrências de nevoeiro registradas na cidade de Rio Grande.

4.1.1 Breve caracterização do regime de vento e de correntes

A classificação da intensidade do vento adotada neste estudo é mostrada na tabela 13, tendo sido baseada na classificação da escala Beaufort, com algumas adaptações. Ressalta-se que existem classificações de ventos de magnitudes superiores nesta escala, entretanto a

variável não excedeu a classificação de intensidade moderada nas análises realizadas neste estudo.

Tabela 13 - Intensidade do vento e classificação adotada neste estudo.

| Classificação | Intensidade do Vento (m/s) | Intensidade do Vento (KT) |
|---------------|----------------------------|---------------------------|
| Calmaria | < 0,5 | < 1,0 |
| Fraco | 0,5 - 5,1 | 1,0 - 10,0 |
| Moderado | 5,2 - 13,9 | 10,1 - 27,0 |
| Forte | 14,0 - 17,0 | 27,1 - 33,0 |
| Muito Forte | > 17,0 | > 33,0 |

A partir da elaboração de rosas dos ventos, foi possível perceber alguns aspectos relevantes sobre o regime de ventos na região de estudo. A figura 14 apresenta as rosas dos ventos para todas as horas do dia para todos os dados da Praticagem (a) e das boias RS-2 (b), RS-3 (c), RS-4 (d) e RS-5 (e) do projeto SiMCosta. Ressalta-se que os períodos de abrangência dos dados utilizados nesta etapa do trabalho encontram-se evidenciados na tabela 4. Os gráficos para os turnos madrugada (00h-05h), manhã (06h-11h), tarde (12h-17h) e noite (18h-23h) em cada uma das fontes de dados estão disponíveis nos Apêndices C, D, E, F e G.

Foi possível verificar e confirmar através dos dados da Praticagem o predomínio de ventos de Nordeste próximos à região estuarina da Lagoa dos Patos, assim como verificado em estudos anteriores (REBOITA E KRUSCHE, 2018; MÖLLER *et al.*, 2001). Apesar de compreenderem um intervalo temporal inferior aos dados da Praticagem, as boias do projeto SiMCosta também evidenciaram uma frequência significativa de ventos dentro do quadrante NE, corroborando com o resultado obtido para os dados citados anteriormente.

Destaca-se ainda a verificação de ventos mais intensos na estação da Praticagem em comparação com os dados das boias do projeto SiMCosta, de maneira geral. Tal característica pode ser resultante da diferença de altura entre os anemômetros dispostos em cada ponto de observação, conforme descrito anteriormente.

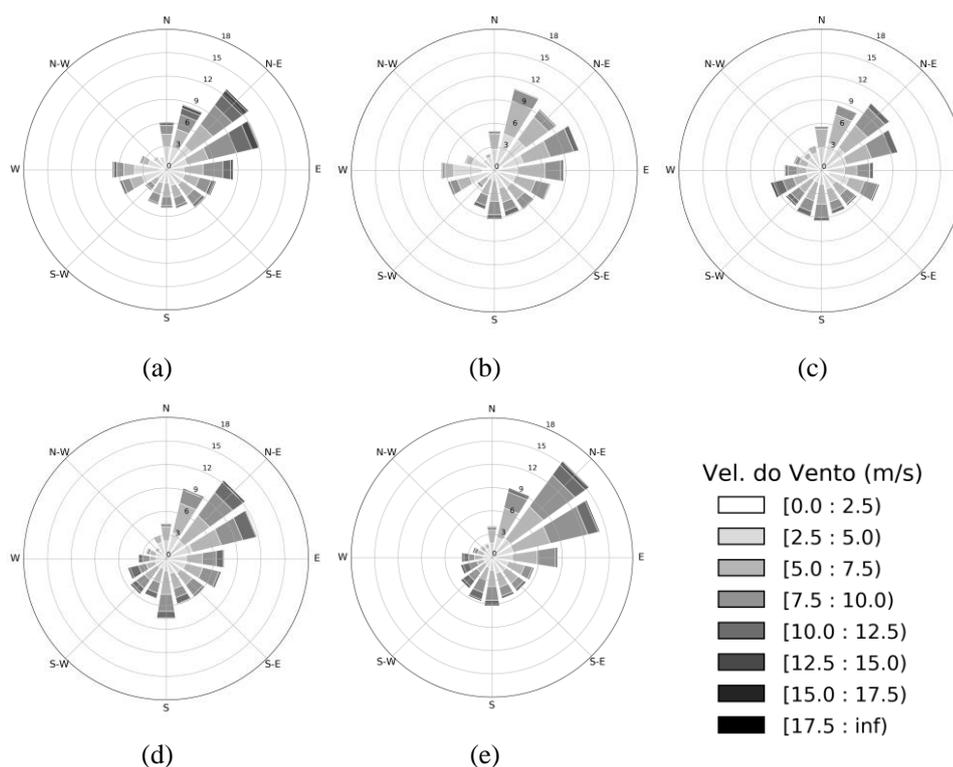


Figura 14 - Vento (m/s) em Rio Grande - RS para todos os conjuntos de dados disponíveis, sendo (a) referente à estação meteorológica da Praticagem e (b), (c), (d) e (e) referentes às boias RS-2, RS-3, RS-4 e RS-5, respectivamente.

Os dados de corrente são apresentados na mesma configuração gráfica que os de vento na figura 15. Os gráficos detalhados em turnos também são apresentados nos apêndices C, D, E, F e G. Destaca-se que, as figuras de corrente elaboradas a partir dos dados do ADCP da Praticagem apresentam escala percentual e valores de distribuição de frequência da direção do vento distinta em relação aos gráficos obtidos para os dados das boias do Projeto SiMCosta, devido à predominância em uma determinada direção. Assim, é necessária uma análise atenta do resultado a seguir tendo em vista este detalhe.

É possível evidenciar que os sensores mais próximos ao canal (ADCP-Praticagem e RS-2) detectaram correntes com predominância para uma determinada direção, possivelmente justificável por um efeito de canalização na região devido à geografia costeira. O ADCP apontou para o predomínio de correntes para S e WSW, enquanto os resultados da boia RS-2 indicam corrente predominantemente para SE e ESE.

Adicionalmente, foi possível perceber a presença de correntes mais intensas nas proximidades do canal (ADCP, RS-2 e RS-3), com valores próximos e, por vezes, superiores a

2,0m/s, conforme destacado na literatura (MÖLLER *et al.*, 2001). Em contrapartida, as boias RS-4 e RS-5 apresentaram valores menos intensos deste parâmetro. A boia RS-5, que se encontra mais distante da costa, apresentou uma maior distribuição na direção das correntes.

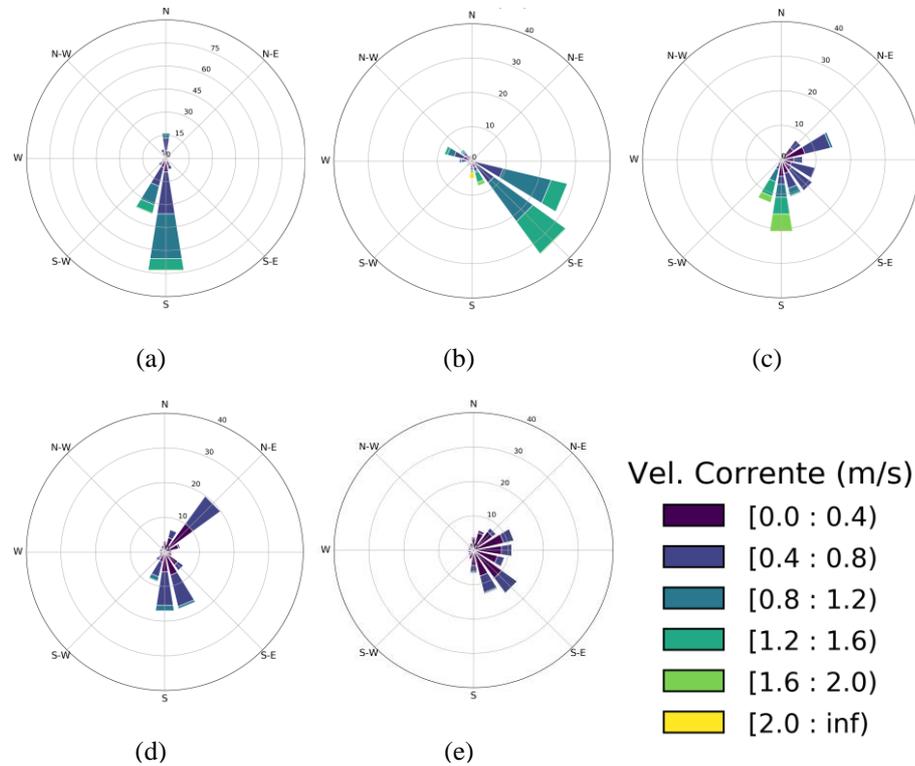


Figura 15 - Corrente (m/s) em Rio Grande - RS para todos os conjuntos de dados disponíveis, sendo (a) referente ao ADCP da Praticagem e (b), (c), (d) e (e) referentes às boias RS-2, RS-3, RS-4 e RS-5, respectivamente.

4.1.2 Nevoeiros em Rio Grande

A seguir são apresentados resultados referentes a eventos de nevoeiro ocorridos na cidade de Rio Grande. Destaca-se que os gráficos de corrente e vento apresentam escala percentual e valores de distribuição de frequência da direção de tais parâmetros fixos, mas diferentes para cada variável.

Inicialmente são apresentados os resultados para as ocorrências de nevoeiro de longa duração, ou seja, que persistiram por 24 horas ou mais. Em seguida são apresentados os resultados para os nevoeiros ocorridos em Rio Grande entre agosto de 2018 e agosto de 2019 a partir dos dados da Praticagem e para os eventos ocorridos durante o período de operação de cada uma das boias do projeto SiMCosta.

4.1.2.1 Nevoeiros de longa duração

Conforme mencionado anteriormente, foram identificados 7 eventos de nevoeiro com duração igual ou superior a 24 horas na cidade de Rio Grande no período de dados disponíveis. A figura 16 compreende as rosas dos ventos durante as horas de registro de restrição de visibilidade (a), para o horário mais próximo do início (b) e do fim (c) do evento de acordo com o registro de condições de navegação.

Foi possível perceber o predomínio de ventos no quadrante NE, com maior frequência de ventos de NNE e ENE, durante as horas de nevoeiro de longa duração em Rio Grande. Ventos nestas direções apontam para uma contribuição da Lagoa dos Patos para a área de estudo, advectando ar da laguna e favorecendo aporte de umidade e a persistência do fenômeno por horas seguidas. Tal evidência pode ser reforçada a partir da maior frequência de ventos de N no horário mais próximo do fim da restrição de visibilidade, interrompendo este aporte de umidade.

Dentre os registros de vento durante a ocorrência de nevoeiros de longa duração na cidade de Rio Grande, 3,2% foram classificados como situação de calmaria, 66,0% como ventos fracos e 30,8% de ventos moderados. A identificação de ventos de intensidade moderada durante estes eventos de nevoeiro levantou a possibilidade de alguns destes fenômenos apresentarem caráter advectivo.

No horário mais próximo ao início do registro da restrição de visibilidade não foi possível obter uma caracterização da direção do vento. Entretanto, foi possível destacar que, de maneira geral, as intensidades são inferiores que no momento de dissipação, o que pode sugerir que ventos fracos garantem condições estáveis para iniciar o processo de formação do fenômeno. Após o início do desenvolvimento, a atuação de ventos de intensidade moderada pode contribuir para mistura e adensamento do nevoeiro.

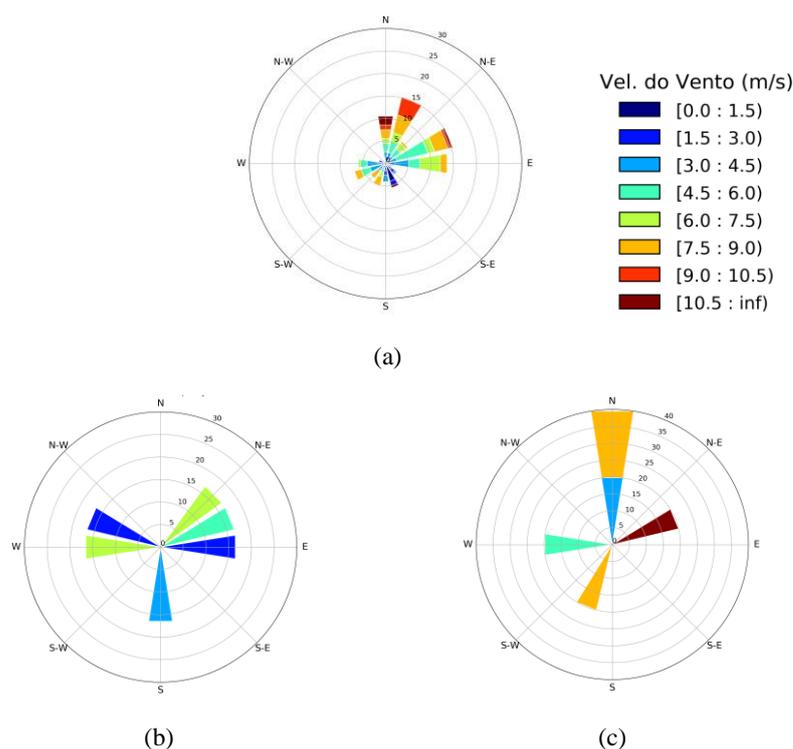


Figura 16 - Vento (m/s) nos eventos de nevoeiro de longa duração em Rio Grande-RS, sendo (a) referente a todas as observações disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (c) às observações nos horários mais próximos ao horário de registro do início e do fim da restrição de visibilidade, respectivamente.

4.1.2.2 Nevoeiros entre agosto de 2018 e agosto de 2019:

Os resultados a seguir são apresentados para os nevoeiros ocorridos entre agosto de 2018 e agosto de 2019, período coincidente entre os dados meteorológicos e de corrente da Praticagem da Barra do Rio Grande. Neste intervalo foram registrados 20 eventos de restrição de visibilidade na região de estudo. As figuras 17 e 18 compreendem gráficos de vento e corrente, respectivamente, para as horas de registro de restrição de visibilidade (a), para o horário mais próximo do início (b) e do fim (c) do evento de acordo com o registro de condições de navegação.

As rosas dos ventos para os eventos de nevoeiro na região de estudo (Figura 17), assim como no caso anterior, apontaram para um predomínio de ventos dentro do quadrante NE e apresentaram registros de ventos de intensidade moderada ao longo da ocorrência do fenômeno. Foi possível avaliar que há registros de ventos mais intensos durante o nevoeiro do que em seus horários aproximados de início e fim.

Nos horários mais próximos do início do evento, é possível perceber predomínio de ventos de NE, SE e NW (Figura 17b). Ventos de NE podem estar associados a uma contribuição da Lagoa dos Patos para formação de nevoeiros na área de estudo, advectando ar da laguna e favorecendo aporte de umidade. Adicionalmente, ventos de SE podem representar uma contribuição da umidade oceânica no aporte de umidade na região.

Dentre os registros de vento durante os nevoeiros avaliados neste estudo preliminar, 5,4% foram considerados calma e 53,3% foram classificados como ventos fracos. Ventos moderados corresponderam a 41,3% das observações de vento durante a ocorrência de nevoeiros em Rio Grande.

No momento próximo à melhoria das condições de visibilidade (Figura 17c), percebeu-se um sinal mais significativo de ventos de N e S. Ventos de N na dissipação do fenômeno podem representar uma interrupção do aporte de umidade proveniente da Lagoa dos Patos (favorecido por ventos de NE e E) e não foram observados no horário próximo ao início do fenômeno (Figura 17b), sugerindo um não favorecimento desta direção (de N) na formação de nevoeiros nesta região.

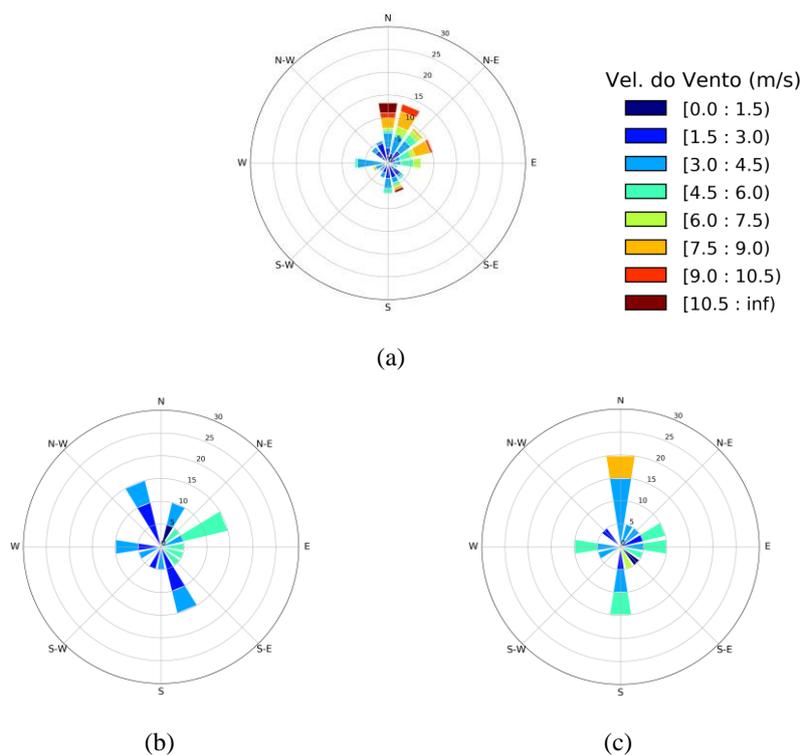


Figura 17 - Vento (m/s) nos eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS entre agosto de 2018 e agosto de 2019, sendo (a) referente a todas as observações disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (c) às observações nos horários mais próximos ao horário de registro do início e do fim da restrição de visibilidade, respectivamente.

A figura 18 evidencia que o padrão encontrado para as correntes seguiu o observado para todo o período de dados disponíveis do ADCP, com predominância de correntes para sul, tanto durante as horas de restrição de visibilidade quanto no momento de início do evento e de retorno à condição de Praticabilidade da navegação marítima. Com relação à intensidade, correntes menos intensas se apresentaram mais frequentes no momento próximo à dissipação do nevoeiro do que durante toda a duração do evento. Embora pouco frequentes, foi possível verificar a presença de correntes com magnitudes entre 1,6 m/s e 2,0 m/s neste estágio do fenômeno.

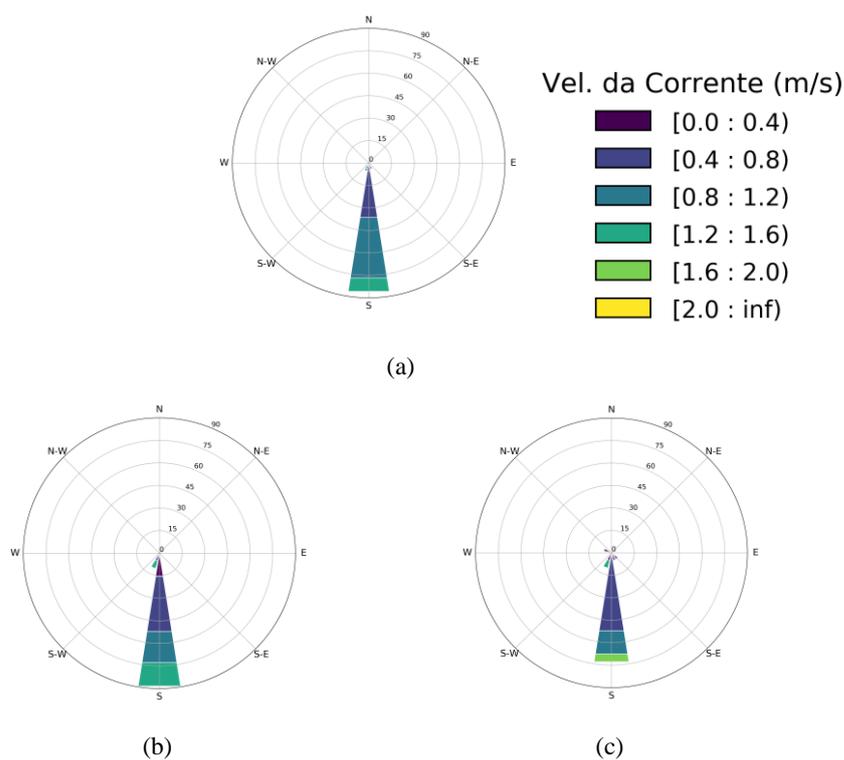


Figura 18 - Corrente (m/s) nos eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS entre agosto de 2018 e agosto de 2019, sendo (a) referente a todas as observações disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (c) às observações nos horários mais próximos ao horário de registro do início e do fim da restrição de visibilidade, respectivamente.

A seguir, são apresentados em sequência os resultados obtidos através da mesma análise para os eventos de nevoeiro ocorridos durante os intervalos de operações das boias RS-2, RS-3, RS-4 e RS-5 (figuras 19, 20, 21, 22, respectivamente, e tabela 14).

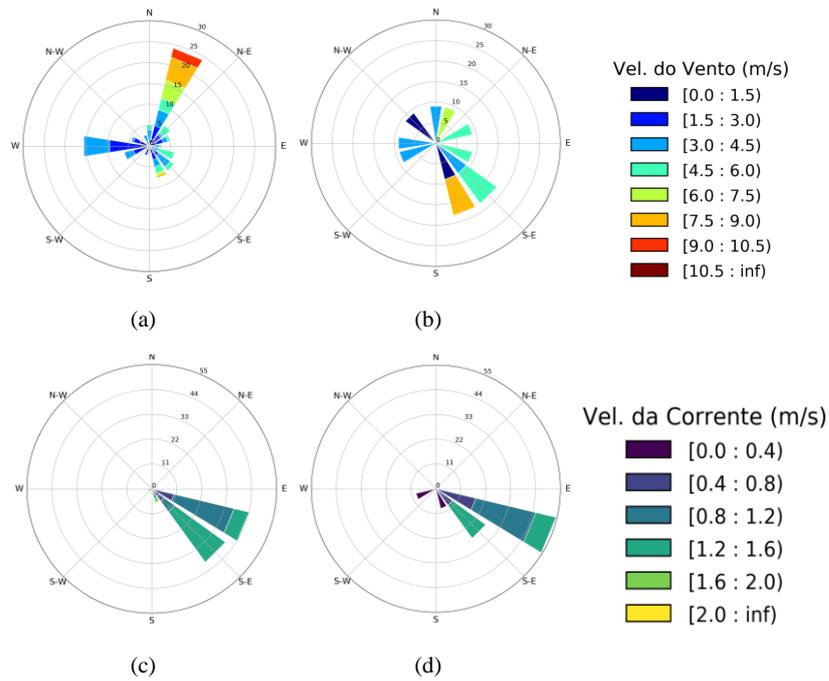


Figura 19 - Vento (m/s) e corrente (m/s) na boia RS-2 para os eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS durante o período de operação da mesma, sendo (a) e (c) referentes a todas as observações de vento e corrente disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (d) às observações de vento e corrente nos horários mais próximos ao registro do fim da restrição de visibilidade, respectivamente.

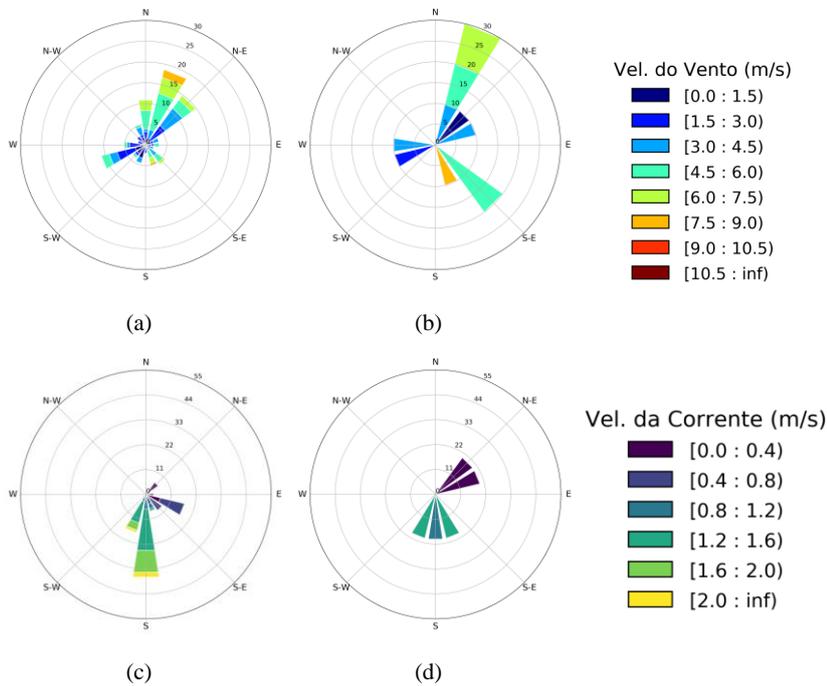


Figura 20 - Vento (m/s) e corrente (m/s) na boia RS-3 para os eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS durante o período de operação da mesma, sendo (a) e (c) referentes a todas as observações de vento e corrente disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (d) às observações de vento e corrente nos horários mais próximos ao registro do fim da restrição de visibilidade, respectivamente.

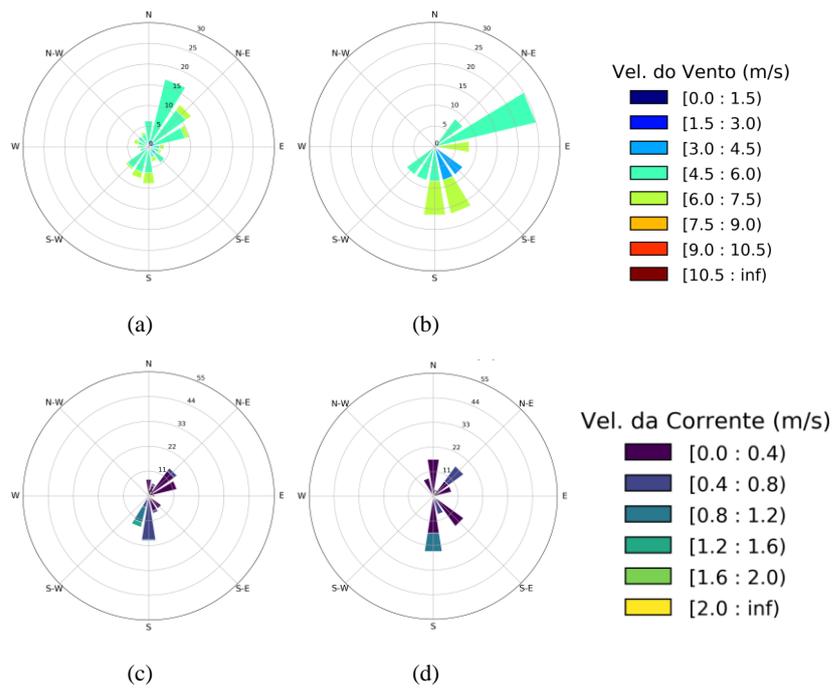


Figura 21 - Vento (m/s) e corrente (m/s) na boia RS-4 para os eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS durante o período de operação da mesma, sendo (a) e (c) referentes a todas as observações de vento e corrente disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (d) às observações de vento e corrente nos horários mais próximos ao registro do fim da restrição de visibilidade, respectivamente.

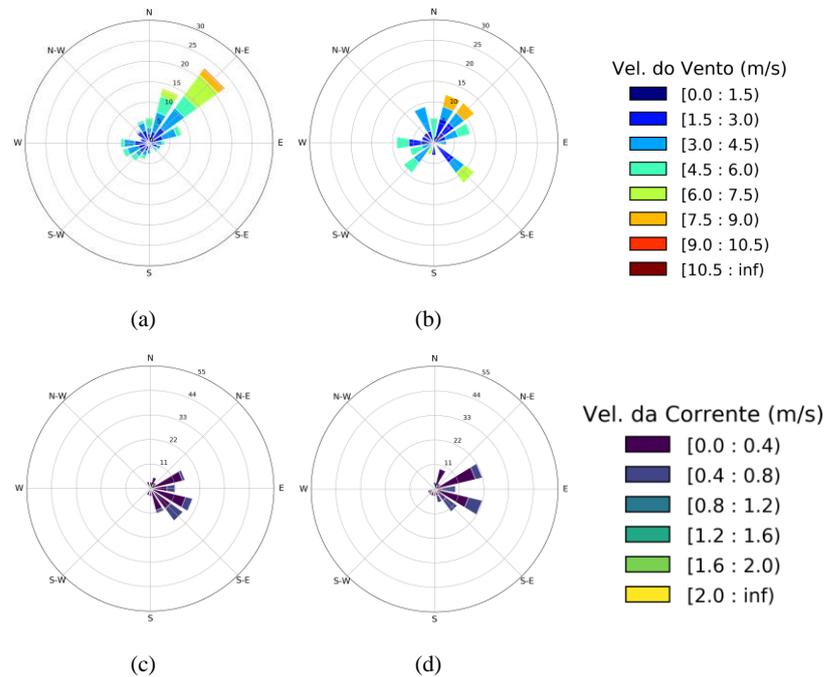


Figura 22- Vento (m/s) e corrente (m/s) na boia RS-5 para os eventos de nevoeiro ocorridos em Rio Grande-RS durante o período de operação da mesma, sendo (a) e (c) referentes a todas as observações de vento e corrente disponíveis durante a ocorrência do fenômeno e (b) e (d) às observações de vento e corrente nos horários mais próximos ao registro do fim da restrição de visibilidade, respectivamente.

Tabela 14 - Síntese dos resultados obtidos a partir da análise dos dados das boias do Projeto SiMCosta para os eventos de nevoeiro ocorridos na cidade de Rio Grande durante o período de operação das mesmas.

| Equipamento | | RS-2 | RS-3 | RS-4 | RS-5 |
|------------------------------|-----------------------------------|-------------|----------------------|--------------|---------------|
| Vento | Calmaria | 2,8% | - | - | - |
| | Ventos fracos | 78,7% | 74,8% | 19,5% | 78,2% |
| | Ventos moderados | 18,5% | 25,2% | 80,5% | 21,8% |
| | Direção predominante (durante) | NNE e W | NNE e NE | ENE e NE | NNE e NE |
| | Direção predominante (dissipação) | SE e SSE | NNE e SE | ENE, SSE e S | - |
| Corrente | Direção predominante (durante) | SE e ESE | S | NE, S e SSW | ENE, ESE e SE |
| | Direção predominante (dissipação) | SE e ESE | NE, ENE, SSE, S, SSW | S | ENE e ESE |
| Total de eventos de nevoeiro | | 12 | 10 | 12 | 33 |

Destacou-se o predomínio de ventos de NE e NNE durante a ocorrência de nevoeiros. Esta configuração pode representar, de maneira geral, influência do aporte de umidade proveniente da Lagoa dos Patos. Além disso, a ocorrência de nevoeiros concomitante a ventos moderados reforça condições favoráveis à presença de fenômenos de caráter advectivo na região.

De maneira geral, foi verificado que há uma maior frequência de ventos com magnitudes menores nos horários próximos à dissipação do nevoeiro em relação ao observado durante todo o evento de restrição de visibilidade. Outro aspecto relevante consiste na verificação de ventos de SE próximo ao horário de dissipação do fenômeno, que podem estar associados à advecção do nevoeiro em direção ao continente, propiciando o retorno à condição PRATICÁVEL no porto.

Com relação à corrente, foi possível perceber correntes menos intensas no horário próximo à dissipação em comparação com a duração do nevoeiro. As boias RS-4 e RS-5, mais afastadas do ponto de registro da ocorrência de nevoeiros, apresentam um predomínio de correntes mais fracas que nos demais pontos.

5 RESULTADOS II: SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE NEVOEIROS EM RIO GRANDE

5.1 TESTE DE SENSIBILIDADE DO MODELO WRF À RESOLUÇÃO VERTICAL

O período avaliado nesta etapa do estudo ocorreu entre os dias 16 e 18 de julho de 2019 na cidade de Rio Grande e corresponde ao intervalo C de simulação, conforme evidenciado na tabela 9. O nevoeiro começou a afetar as atividades da Praticagem às 23h30 do dia 16 e permaneceu influenciando até às 13h15 do dia 18 (hora local), com alguns intervalos onde foi possível a realização de manobras. Reitera-se que os registros se dão para situações quando a visibilidade é inferior a 457 metros (500 jardas) e são subjetivos, não sendo possível informar com precisão o horário de início e fim do fenômeno.

A seguir, são apresentados resultados obtidos a partir de dados observados durante a ocorrência do nevoeiro, uma breve caracterização das condições sinóticas, bem como uma discussão do desempenho do modelo WRF na simulação deste evento e a sua sensibilidade aos parâmetros de resolução vertical.

5.1.1 Descrição observacional – Período C

A partir da análise das cartas sinóticas do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) do Brasil (Figura 23) entre às 21h do dia 16 e às 09h do dia 18 de julho de 2019 (hora local), foi possível verificar que a região de estudo encontrava-se nas proximidades da borda de um sistema de alta pressão. Tal configuração pode favorecer a ocorrência de ventos de NE na região. Adicionalmente, vale ressaltar que atuação de sistema de alta pressão, principalmente sua área mais central, é um fator favorável à formação de nevoeiros por resfriamento, uma vez que tal sistema é associado a condições de céu claro e ventos pouco intensos.

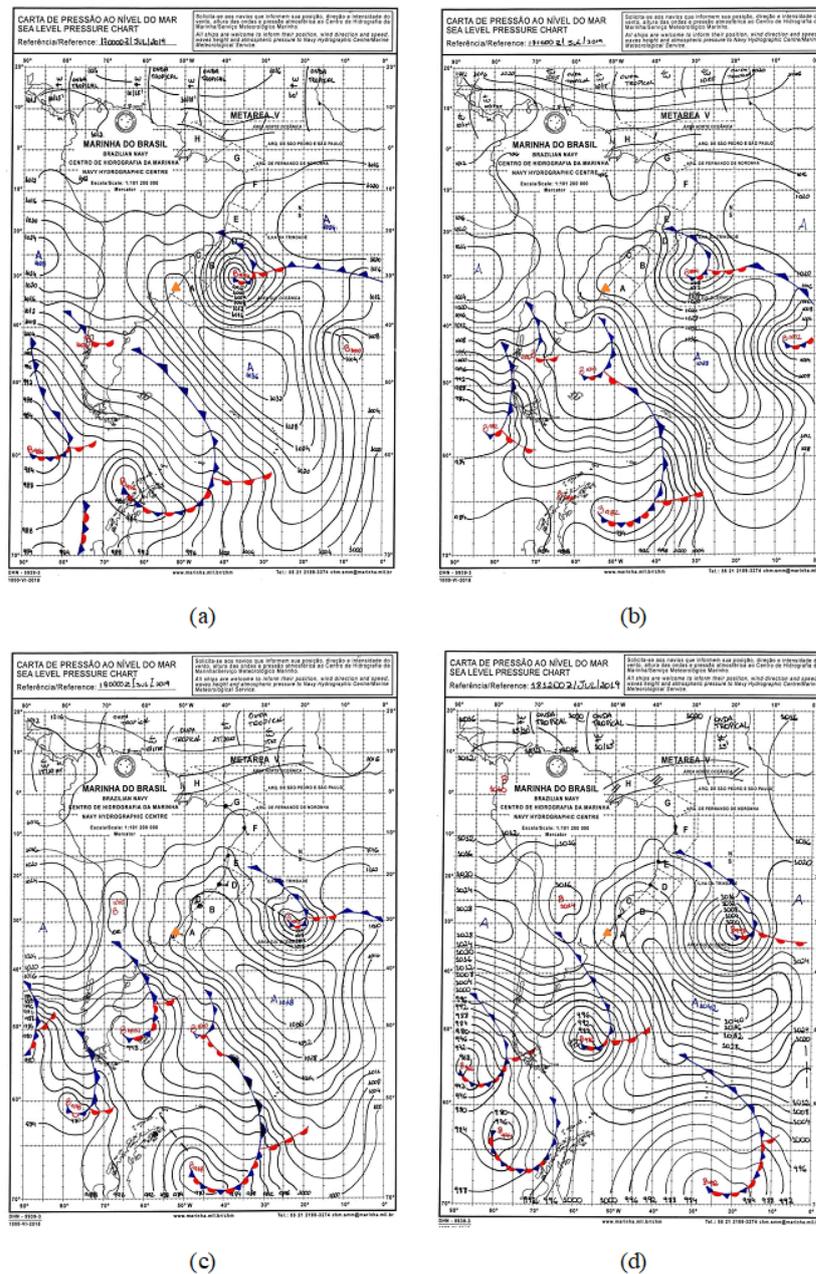


Figura 23-Cartas Sinóticas do dia 17/07/2019 às 00UTC (a) e às 12UTC (b) e do dia 18/07/2019 às 00UTC (c) e às 12UTC (d), ilustrando a situação sinótica na região de estudo. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

Nas figuras 24 e 25 estão dispostas as imagens de satélite do destaque “Nevoeiro” da Divisão de Satélites Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE). Através delas, foi possível perceber a presença de nuvens baixas sobre a região de interesse deste estudo desde o início da madrugada do dia 17 de julho (Figura 24). A área de detecção de

nevoeiro/nuvem baixa pelo produto se estendeu sobre toda a Lagoa dos Patos e também ao extremo sul do estado do Rio Grande do Sul.

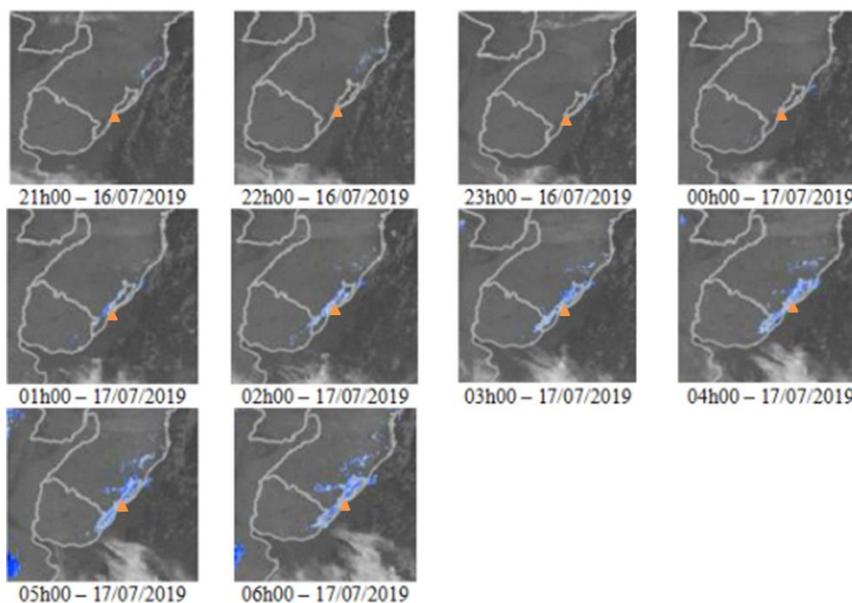


Figura 24 - Imagens horárias de satélite entre as 21h (hora local) do dia 16/07/2019 e as 06h (hora local) do dia 17/07/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE).

Ao início da noite do mesmo dia, foi possível perceber uma redução desta área de abrangência de nuvens baixas/nevoeiros detectados (Figura 25). Entretanto, com o passar das horas, verificou-se a evolução do fenômeno avaliado, aumento da cobertura de nuvens baixas próximo à região de estudo ainda na noite do dia 17 de julho. A partir do início da madrugada do dia 18 de julho, há indicativos de que o fenômeno adquiriu um aspecto dinâmico, apresentando deslocamento para sul/sudeste, em direção ao extremo sul do estado do Rio Grande do Sul.

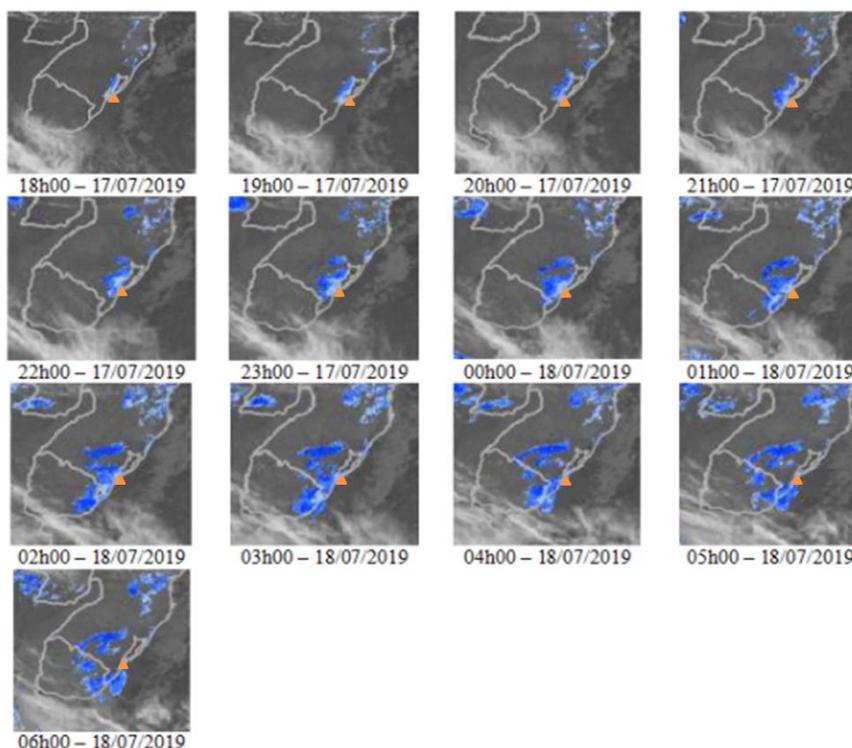


Figura 25 - Imagens horárias de satélite entre as 18h (hora local) do dia 17/07/2019 e as 06h (hora local) do dia 18/07/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE).

Os dados observados na estação da Praticagem e nas boias do projeto SiMCosta durante a ocorrência deste fenômeno são apresentados na figura 26. Nesta figura, o intervalo temporal destacado em cinza refere-se aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

No início da restrição de visibilidade reportada, foi possível observar a presença de ventos fracos e direção sul, que podem ter contribuído para um aporte de umidade do oceano, favorecendo a formação do nevoeiro. A partir da tarde do dia 17 de julho, o vento adquiriu componente norte. Tal configuração, em conjunto com a elevação da temperatura do ar pode ter contribuído para um enfraquecimento momentâneo do nevoeiro, corroborando com o registros de condições praticáveis de navegação.

No entanto, as condições de Impraticabilidade voltaram a ser observadas na noite do dia 17 de julho, ao mesmo tempo em que se observou um aumento da velocidade do vento e uma redução das temperaturas do ar. Assim, a intensificação da restrição de visibilidade coincide

com o momento em que a temperatura do ar passou a ser inferior à temperatura da água, o que sugere um transporte de ar continental de mais frio sobre a região, proporcionando um aumento da umidade relativa na área de estudo e deixando o nevoeiro mais denso. Ressalta-se que ventos de nordeste na região de estudo podem ter favorecido um incremento de umidade proveniente da Lagoa dos Patos.

Na madrugada do dia 18 de julho, foi verificado o retorno para condições de Praticabilidade, indicando melhores condições de visibilidade para navegação. Neste intervalo, a temperatura do ar apresentou-se superior à temperatura da água e foram observados ventos de intensidade moderada.

Outro aspecto importante de se destacar é que a direção do vento observada na estação da Praticagem corroborou com o deslocamento evidenciado das nuvens detectadas pelo produto de satélite, indicando que o nevoeiro se deslocou de acordo com a direção predominante do vento na região. Tal fator, em conjunto com a informação obtida da ocorrência de ventos de intensidade moderada neste intervalo de tempo, é indicativo de caráter advectivo do fenômeno neste estágio. Este deslocamento do fenômeno pode ter contribuído para o restabelecimento de condições de visibilidade favoráveis à navegação na região da Praticagem.

Tais fatores apontaram para a possibilidade do evento de nevoeiro avaliado neste estudo de caso se tratar de um nevoeiro de radiação-advectação, com formação a partir de um processo de resfriamento por perda radiativa (nevoeiro de radiação), adquirindo aspecto dinâmico em determinado estágio do seu ciclo de vida. A partir deste momento, as nuvens baixas foram advectadas sobre uma superfície líquida mais fria que o ar sobrejacente, seguindo a direção do vento local.

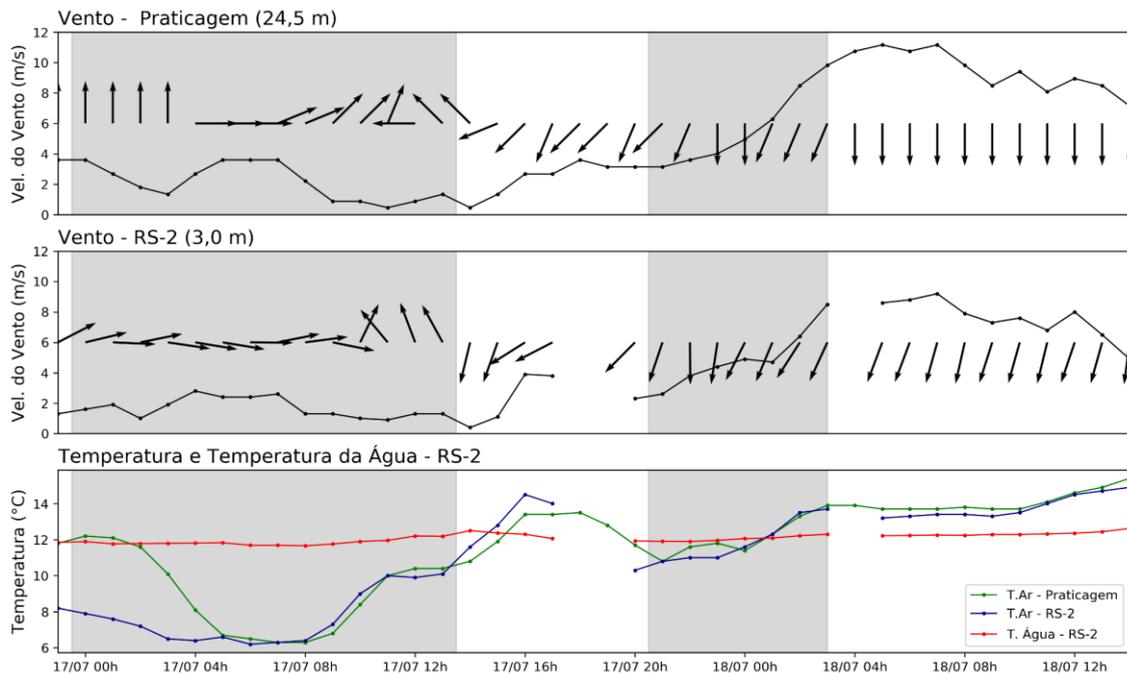


Figura 26 - Séries temporais de vento (direção e intensidade) e temperaturas do ar e da água observadas durante o evento de nevoeiro ocorrido entre os dias 16 e 18 de julho de 2019. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada

5.1.2 Descrição vertical do modelo

As figuras a seguir apresentam a disposição vertical dos níveis do modelo WRF em cada um dos testes de sensibilidade realizados. A curva em vermelho é referente aos níveis verticais e a curva em azul corresponde à espessura entre duas camadas. A linha horizontal na cor preta delimita a altura de 100 metros e a linha horizontal tracejada na cor vermelha marca a altura de 1000 metros.

Conforme mencionado anteriormente, o teste de sensibilidade 1 tem 33 níveis verticais, sendo os 5 primeiros nas alturas de 50 m, 113,9 m, 195,2 m, 298,0 m e 427,2 m (Figura 27). Desta forma, apresenta apenas 1 nível abaixo dos 100 primeiros metros da atmosfera e 7 níveis abaixo de 1000 metros. Com relação à espessura entre as camadas, foi possível verificar que seu valor máximo ultrapassou o valor de 1000 metros (1081,7 metros).

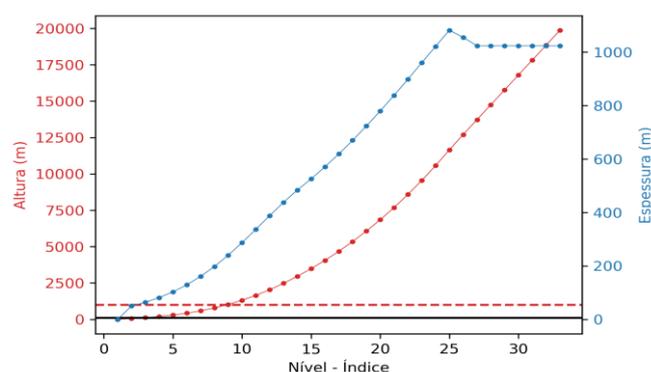


Figura 27 - Distribuição de níveis verticais do modelo (vermelho) e variação de espessura entre os níveis (azul) para a configuração do teste 1. A linha tracejada vermelha marca a altura de 1000m e a linha preta contínua destaca a altura de 100m.

O teste de sensibilidade 2 apresenta 50 níveis verticais, sendo o primeiro localizado a 20 metros de altura (Figura 28). Os quatro seguintes níveis verticais são localizados nas alturas de 45,8 m, 79,1 m, 121,9 m e 176,7 m. Sendo assim, a configuração obtida através deste teste apresenta 3 níveis verticais abaixo de 100 metros de altura e 11 níveis abaixo de 1000 metros. O valor máximo de espessura entre as camadas neste teste está abaixo de 700 metros, mais especificamente 623,9 metros.

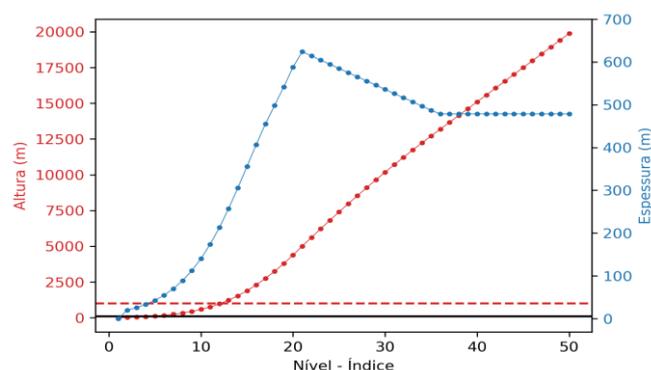


Figura 28 - Distribuição de níveis verticais do modelo (vermelho) e variação de espessura entre os níveis (azul) para a configuração do teste 2. A linha tracejada vermelha marca a altura de 1000m e a linha preta contínua destaca a altura de 100m.

A configuração do terceiro teste é a que apresenta uma maior discretização vertical da atmosfera em sua porção inferior, com 50 níveis verticais, sendo 13 abaixo de 1000 metros e 5

abaixo de 100 metros (10,0 m, 23,0 m, 39,7 m, 61,4 m e 89,4 m). A espessura máxima entre as camadas é de 670,3 metros. Tais características são evidenciadas pela figura 29.

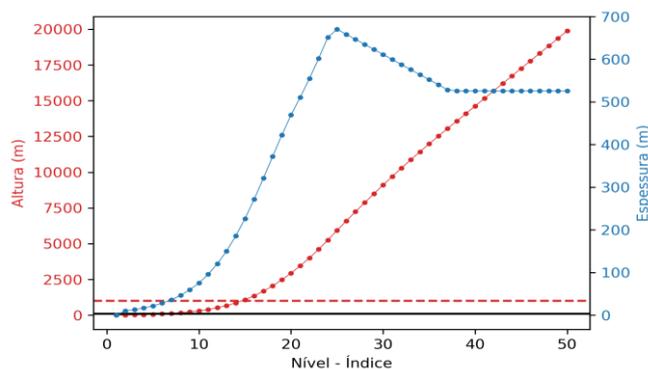


Figura 29 - Distribuição de níveis verticais do modelo (vermelho) e variação de espessura entre os níveis (azul) para a configuração do teste 3. A linha tracejada vermelha marca a altura de 10000m e a linha preta contínua destaca a altura de 100m.

5.1.3 Sensibilidade do modelo WRF aos parâmetros de resolução vertical

A seguir, serão mostrados os resultados obtidos a partir do modelo para os testes de sensibilidade evidenciados na tabela 7.

As figuras 30 e 31 apresentam uma análise pontual das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF em cada um dos testes. Nesta avaliação, é possível verificar a evolução temporal dos parâmetros meteorológicos no ponto de grade mais próximo à estação meteorológica da Praticagem. As linhas azuis representam as variáveis simuladas pelo WRF com a configuração do teste 1, as verdes são referentes ao teste 2 e vermelhas correspondem ao teste 3. Os gráficos são referentes ao intervalo compreendido entre 18h do dia 16 de julho e 20h do dia 18 de julho. Da mesma forma que na figura 25, os intervalos temporais destacados em cinza correspondem aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. Além disso, limiares relevantes para a análise do FSI e das estimativas de visibilidade foram marcados e serão melhor evidenciados posteriormente (Figuras 31f, 31g e 31h).

Destaca-se que a análise espacial dos parâmetros meteorológicos simulados pelo modelo WRF em cada um dos testes encontra-se no Apêndice H. Adicionalmente, as figuras

referentes a toda a duração do evento estão disponíveis para consulta no Apêndice I em intervalos de 6 em 6 horas.

As séries temporais simuladas de vento a 10 metros (Figuras 30 e 31a) mostraram significativa concordância entre si para os 3 testes. De maneira geral, o modelo WRF conseguiu representar a direção e também a tendência da intensidade do vento no ponto avaliado em relação aos dados observados (Figura 26), identificando o aumento da magnitude deste parâmetro durante a madrugada do dia 18 de julho. Desta forma, ventos fracos e de quadrante S foram simulados no início da série e, a partir da madrugada de 18 de julho, ventos de intensidade moderada e de quadrante N predominam no ponto avaliado. Destaca-se que para todos os testes foi verificada divergência na direção do vento com relação ao dado observado durante a manhã do dia 17 de julho.

É importante ressaltar que as magnitudes do vento simuladas pelo modelo se apresentaram inferiores que as observadas na estação meteorológica da Praticagem. Como destacado anteriormente, as variáveis estão sendo avaliadas em alturas diferentes, sendo o vento simulado a 10m e o sensor de vento da Praticagem localizado a uma altura de 24,5m.

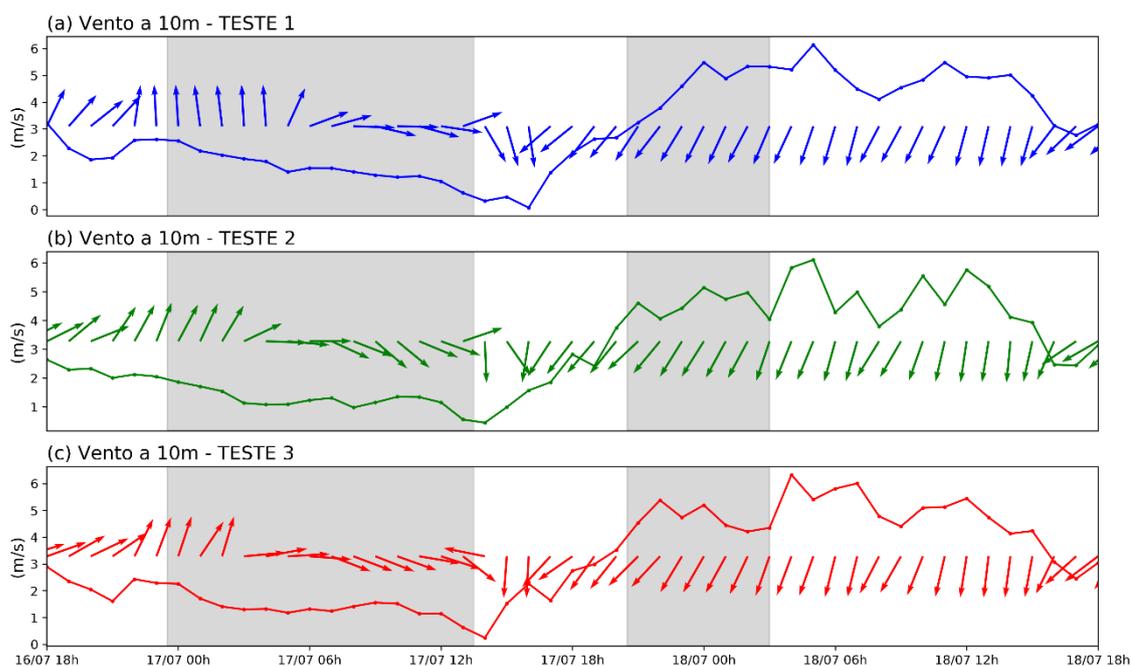


Figura 30 - Séries temporais de vento a 10 metros (direção e intensidade) para os testes 1 (a), 2 (b) e 3 (c) simuladas pelo modelo WRF para o ponto de grade mais próximo à torre de controle da Praticagem. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

As séries temporais de umidade relativa do ar a 2 metros apontaram para valores elevados deste parâmetro durante todo o evento de nevoeiro avaliado (Figuras 31b e 31c). Os resultados para os testes 2 e 3 convergiram, indicando valores de umidade iguais ou muito próximos a 100% no período da noite do dia 16 de julho. Já o teste 1 apresentou um atraso com relação aos demais testes e também ao registro de condições de navegação, uma vez que evidenciou limiares de umidade relativa característicos da presença de nevoeiro apenas no final da madrugada do dia 17 de julho. A partir da manhã deste dia, os resultados para os 3 testes representaram o mesmo padrão, caracterizando umidade elevada no ponto de avaliação até a madrugada do dia 18 de julho. Próximo ao horário de retorno à condição de Praticabilidade, foi possível perceber um declínio desta variável nas 3 configurações, sendo acentuado a partir da tarde. Adicionalmente, o declínio foi mais significativo na série temporal referente ao teste 1 do que nas demais.

As séries temporais simuladas de conteúdo de água líquida e razão de mistura (Figuras 31d e 31e) analisadas em conjunto ilustraram o processo de conversão de vapor d'água em água líquida mencionado na análise espacial. Foi iniciado um processo de aumento do conteúdo de

água líquida, acompanhado de uma sutil tendência de decréscimo da variável razão de mistura por todos os testes. Entretanto, assim como observado para a umidade, o teste 1 apresenta uma tendência de atraso com relação aos demais testes. Desta forma, o padrão sugestivo da formação de nevoeiro tem início na noite do dia 16 de julho nos testes 2 e 3 e no fim da madrugada para o teste 1. A partir da tarde do mesmo dia, o sinal oposto foi observado para todas as configurações. Apesar disso, é importante ressaltar que o modelo WRF simulou a presença de água líquida em seu primeiro nível até a madrugada do dia 18 de julho em todos os testes, quando foi observado o retorno definitivo da condição de Praticabilidade.

A evolução temporal do FSI (Figura 31f) apresentou resultados promissores do ponto de vista do prognóstico de nevoeiros em Rio Grande. O índice se apresentou sensível à presença do fenômeno, indicando ao longo de praticamente toda a duração do evento uma probabilidade alta ($FSI < 31$, linha laranja tracejada) de formação de nevoeiro na região. Durante a manhã e no início da tarde, a probabilidade de ocorrência de nevoeiro passou a moderada, indicando a sensibilidade do índice neste caso. De maneira geral, as 3 configurações apresentaram resultados equivalentes para este parâmetro. Destaca-se que o teste 1 apresentou uma diferença maior entre os demais, entretanto, os resultados de todas as configurações ainda caracterizam a mesma categoria de probabilidade. Desta forma, foi possível perceber que tal índice tem potencial para fornecer indicativos da ocorrência de nevoeiros em configurações que demandam menor custo computacional.

As estimativas de visibilidade horizontal de Kunkel e do FSL foram avaliadas (Figuras 31g e 31h, respectivamente). O limiar de 1 km foi evidenciado nas séries temporais de tais parâmetros (linha preta contínua) a fim de perceber os intervalos de tempo que o modelo identificou em suas simulações a presença de nevoeiros na região de interesse. Adicionalmente, destaca-se que a linha preta tracejada denota o limiar de 500m de visibilidade, possibilitando perceber os períodos em que o WRF simulou restrições de visibilidade mais intensas, conforme registrado pelos dados de condição de navegação.

A estimativa de visibilidade de Kunkel (Figura 31g), dada pela equação 2 e calculada a partir da saída do modelo WRF conforme descrito em Fita *et al.* (2019), é em função do conteúdo de água líquida. Como a série temporal de tal variável apresentou valores nulos ou

bem próximos a 0, o cálculo da estimativa de visibilidade foi afetado, apresentando falhas. Entretanto, no período em que foi possível calcular este parâmetro, notou-se relativa sensibilidade ao que foi descrito pelas condições de navegação. Em todos os testes, a série temporal deste parâmetro apontou valores de visibilidade abaixo de 500 metros e apresentou uma tendência de aumento da visibilidade e, conseqüentemente, melhorias nas condições de navegação a partir da madrugada de 18 de julho, quando ocorreu o retorno à Praticabilidade.

Por outro lado, a estimativa do FSL não apresenta dependência dos dados de conteúdo de água líquida. Tal variável, dada pela equação 3, também apresentou resultados relevantes (Figura 31h). Assim como verificado anteriormente, o teste 1 apresentou atraso na caracterização do evento de nevoeiro. Ou seja, os testes 2 e 3 identificaram valores de visibilidade inferiores a 1km desde a noite do dia 16 de julho, enquanto o teste 1 apenas no início da manhã do dia 17 de julho. Todas as configurações verticais avaliadas neste estudo foram capazes de identificar a presença de nevoeiro a partir desta estimativa. Entretanto, os testes 2 e 3 apresentaram desempenho superior que o teste 1, tanto na caracterização da intensidade do evento, quanto com relação ao horário de formação.

O teste 1 apresentou persistência de valores de visibilidade próximos a 500m apenas no segundo intervalo de Impraticabilidade. Além disso, foi a única configuração que caracterizou um limiar de visibilidade favorável ao retorno à Praticabilidade durante a tarde do dia 17 de julho. A configuração 2 apontou valores próximos a 500m durante quase todo o intervalo entre a noite de 16 e a madrugada de 18 de julho, enquanto o teste 3 foi o único que evidenciou visibilidade inferior a este limiar. Todos os testes conseguiram representar de forma coerente o retorno à Praticabilidade, uma vez que indicaram aumento da visibilidade a partir da madrugada de 18 de julho.

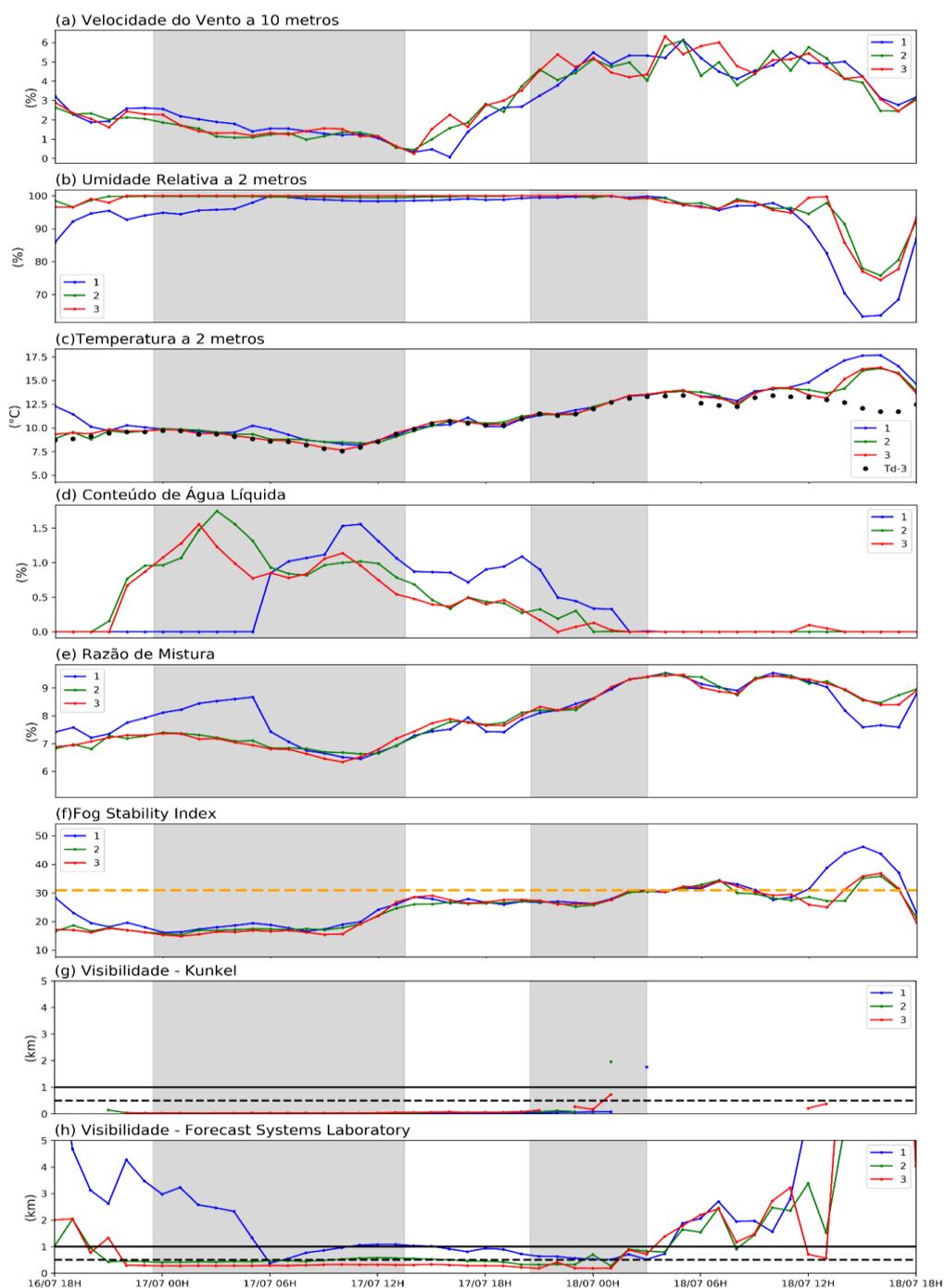


Figura 31 - Séries temporais de velocidade do vento a 10 metros (a), umidade relativa do ar a 2 metros (b), temperaturas do ar (c), conteúdo de água líquida (d), razão de mistura (e), FSI (f) e estimativas de visibilidade (g e h) simuladas pelo modelo WRF para o ponto de grade mais próximo à torre de controle da Praticagem a partir das configurações dos testes 1 (em azul), 2 (em verde) e 3 (em vermelho). O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

A análise destes resultados evidenciou que o incremento da resolução vertical, aliado a uma redução na altura do primeiro nível do modelo, produziu uma formação antecipada do nevoeiro no ponto avaliado. Este aspecto representa uma melhoria na caracterização do

fenômeno de estudo, uma vez que se mostra mais coerente com o registro observacional. Adicionalmente, a altura do primeiro nível do modelo apresentou potencial influência na avaliação da intensidade da restrição de visibilidade associada ao fenômeno, sendo valores mais baixos deste parâmetro associados à simulação de visibilidade mais restrita.

5.2 SIMULAÇÕES COM A MELHOR CONFIGURAÇÃO DO MODELO WRF

Nos próximos tópicos serão apresentados os resultados das simulações obtidas através do modelo WRF na configuração do teste 3. Ressalta-se que esta combinação de parâmetros de resolução vertical foi selecionada por ter tido um bom desempenho na simulação das condições atmosféricas durante o período C e por apresentar a maior discretização vertical da atmosfera, tendo potencial para descrever mais detalhadamente os processos ocorridos em seus primeiros metros. Tal característica se mostra importante para o estudo dos nevoeiros, uma vez que são fenômenos que ocorrem sobre a superfície terrestre ou muito próximo a ela.

Os resultados das avaliações espacial e pontual da simulação para o período A (Tabela 9) e os campos meteorológicos referentes a toda a duração deste período estão disponíveis para consulta nos Apêndices J e K, respectivamente.

5.2.1 Período B

Conforme descrito pela tabela 9, o período de simulação B compreende 2 eventos de nevoeiros intensos registrados pela Praticagem (B-1 e B-2). A seguir serão apresentados os resultados obtidos para este intervalo.

5.2.1.1 Descrição observacional

O posicionamento de um sistema de alta pressão sobre o oceano e próximo à costa da região Sul do Brasil influenciou as condições de tempo na cidade de Rio Grande e suas adjacências entre a noite do dia 08 de julho e a manhã do dia 10 de julho de 2019 (Figura 32).

Foi possível perceber que a região de estudo encontrava-se nas proximidades da borda deste sistema e tal posicionamento se mostra favorável à ocorrência de ventos de nordeste na região.

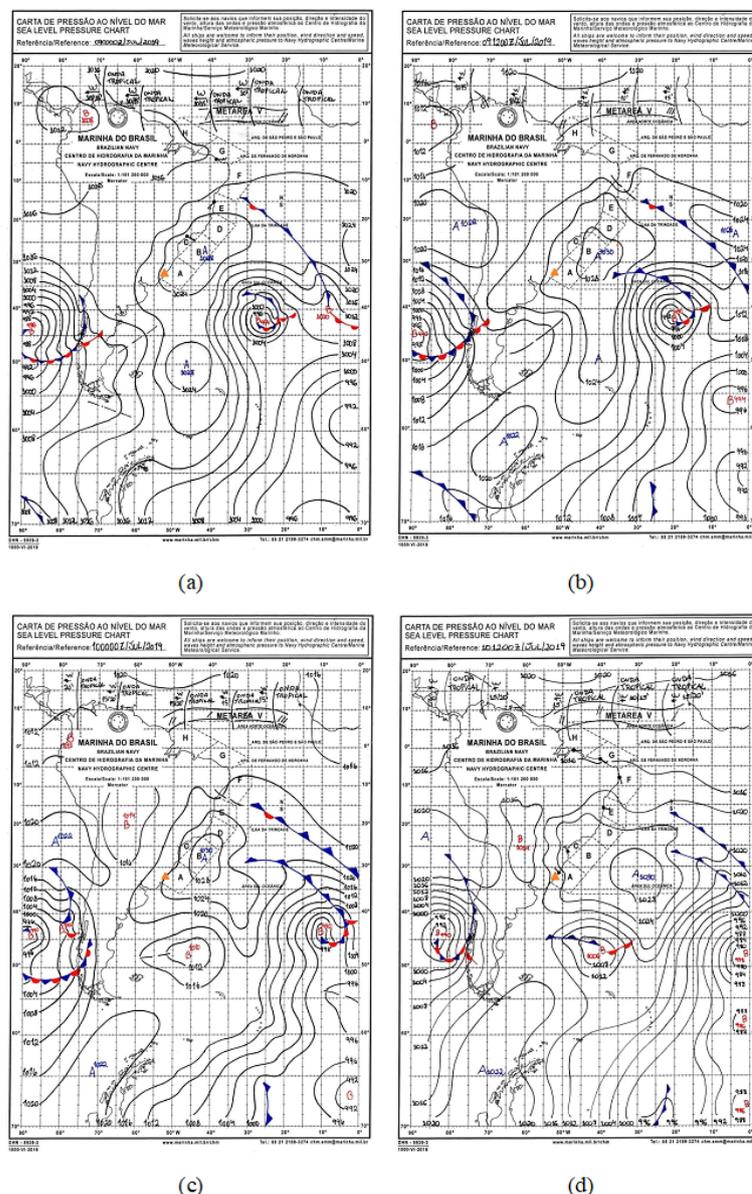


Figura 32 - Cartas Sinóticas do dia 09/07/2019 às 00UTC (a) e às 12UTC (b) e do dia 10/07/2019 às 00UTC (c) e às 12UTC (d), ilustrando a situação sinótica na região de estudo. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

O produto de imagens de satélite voltado para a detecção de nevoeiros não identificou a presença de nuvens baixas na região de estudo durante o intervalo temporal do período B (Figuras 33 e 34). Tal resultado possivelmente foi influenciado pela cobertura de nuvens altas evidenciada pelas figuras.

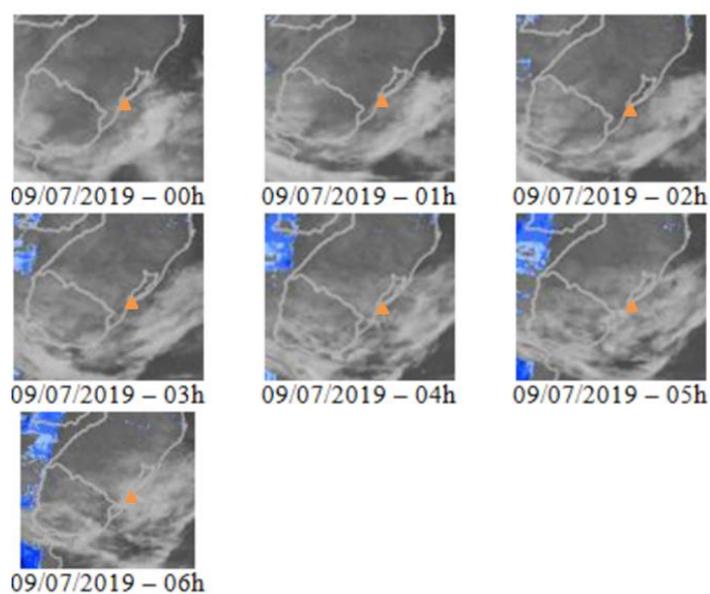


Figura 33 - Imagens horárias de satélite entre 00h e 06h (hora local) do dia 09/07/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande.
Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE).

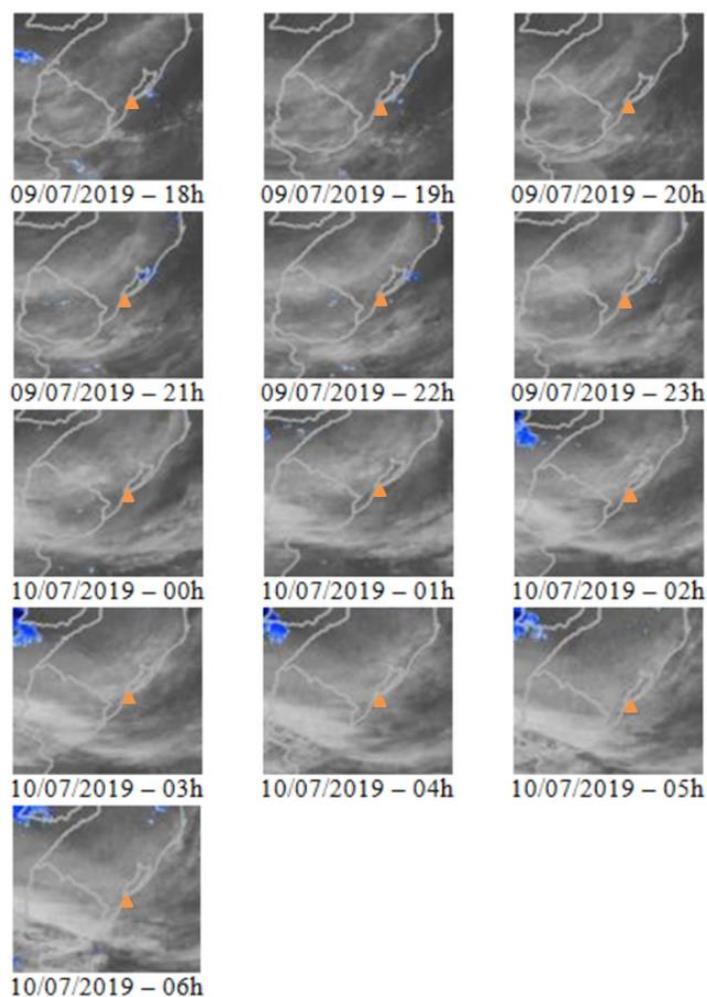


Figura 34 - Imagens horárias de satélite entre 18h (hora local) do dia 09/07/2019 e 06h (hora local) do dia 10/07/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE).

Os dados observados na estação meteorológica da Praticagem e na boia meteoceanográfica RS-2 destacaram a ocorrência de ventos fracos ao longo do intervalo compreendido entre a madrugada do dia 09 de julho e o início da tarde do dia 10 de julho de 2019 (Figura 35). Este resultado se mostrou relevante, pois caracteriza condição favorável à ocorrência de nevoeiro.

Com relação à direção do vento, foi possível verificar diferenças entre as medidas provenientes dos 2 sensores avaliados durante os eventos de visibilidade restrita. Tal parâmetro mostrou maior variabilidade durante o primeiro evento de nevoeiro na boia RS-2, enquanto na estação meteorológica da Praticagem, o predomínio de ventos de quadrante norte foi destacado. Por outro lado, durante o segundo intervalo de restrição de visibilidade, a boia RS-2 também

apontou predomínio de ventos de quadrante norte, ao passo que a estação meteorológica identificou ocorrência de vento de quadrante sul nas horas iniciais do evento. Ventos de nordeste foram evidenciados nos dois pontos de observação antes do registro da restrição de visibilidade. É importante ressaltar que ventos nesta direção podem favorecer aporte de umidade da Lagoa dos Patos, bem como ventos de quadrante sul podem contribuir fornecendo o incremento de umidade proveniente do oceano.

Analisando a série temporal da temperatura do ar em conjunto com os dados de temperatura da água, foi possível verificar uma inversão de padrão durante os eventos de restrição de visibilidade. Durante os intervalos de Impraticabilidade, foram constatadas medições de temperaturas do ar inferiores à temperatura da água, enquanto o oposto prevaleceu em condição de Praticabilidade.

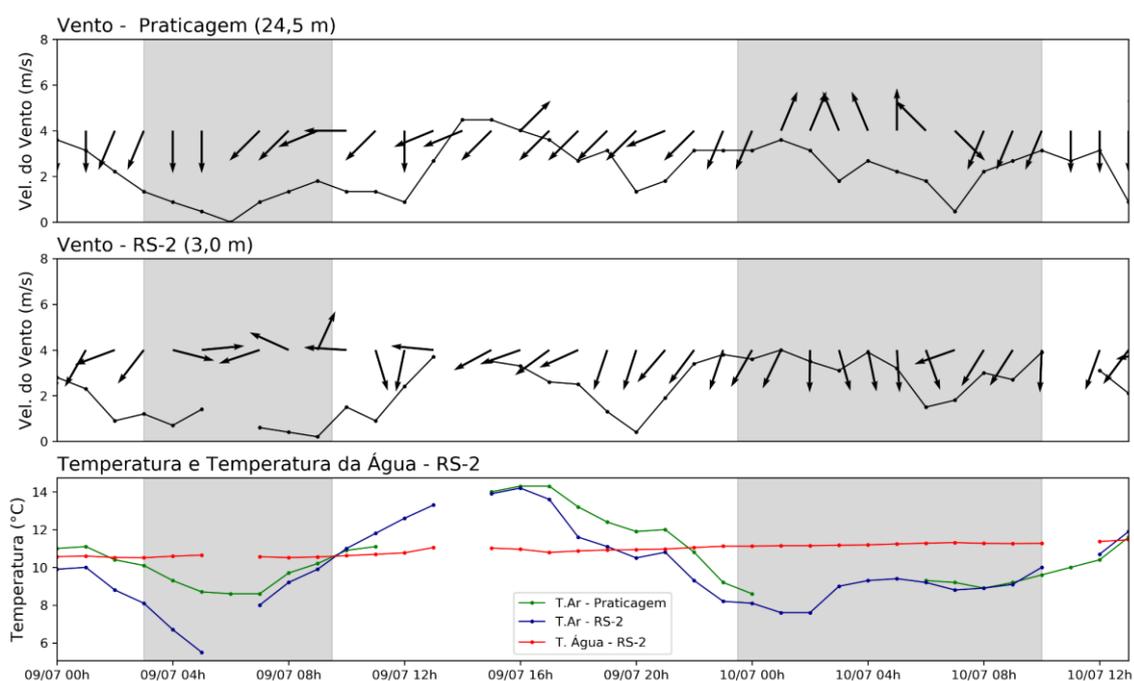


Figura 35 - Séries temporais de vento (direção e intensidade) e temperaturas do ar e da água observadas durante o intervalo compreendido entre a madrugada de 09 de julho e tarde de 10 de julho de 2019. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

5.2.1.2 Resultados numéricos

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos a partir das simulações com o modelo WRF para o período B. Os campos são relativos ao domínio 3, com resolução horizontal de 1km. Foram selecionados horários representativos dos diferentes estágios de desenvolvimento dos nevoeiros, obtidos a partir dos registros de condição de navegação. Além da avaliação espacial a partir destes campos, serão apresentados perfis verticais para o ponto de grade mais próximo da estação meteorológica da Praticagem. As figuras referentes a toda a duração do período B estão disponíveis para consulta no Apêndice L em intervalos de 3 em 3 horas.

EVENTO B-1

O primeiro intervalo de Impraticabilidade reportado durante o período B se deu entre 03h e 09h30 (hora local) do dia 09 de julho de 2019, conforme evidenciado anteriormente.

A partir dos resultados dispostos na figura 36 foi possível perceber que o modelo WRF identificou a formação e a presença de nevoeiro na região de estudo no início da madrugada do dia 09 de julho. No horário de 00h, foram simulados ventos de intensidade fraca e de nordeste na área de estudo, bem como evidenciado pela estação meteorológica da Praticagem (Figura 36c). Adicionalmente, valores significativos de conteúdo de água líquida próximo à superfície e elevada umidade relativa (a partir de 99%) foram identificados sobre o continente e em uma pequena área a norte do canal de entrada da Lagoa dos Patos, apontando indicativos da presença de nevoeiro na região de estudo (Figuras 36a e 6c).

Os campos de estimativas de visibilidade corroboram com o cenário exposto previamente, indicando restrições deste parâmetro para 1km ou menos nas mesmas áreas (Figuras 36e e 36f). Assim como observado em outros casos, a visibilidade de Kunkel (Figura 36f) se mostrou mais restrita que a estimada pela metodologia do FSL (Figura 36e).

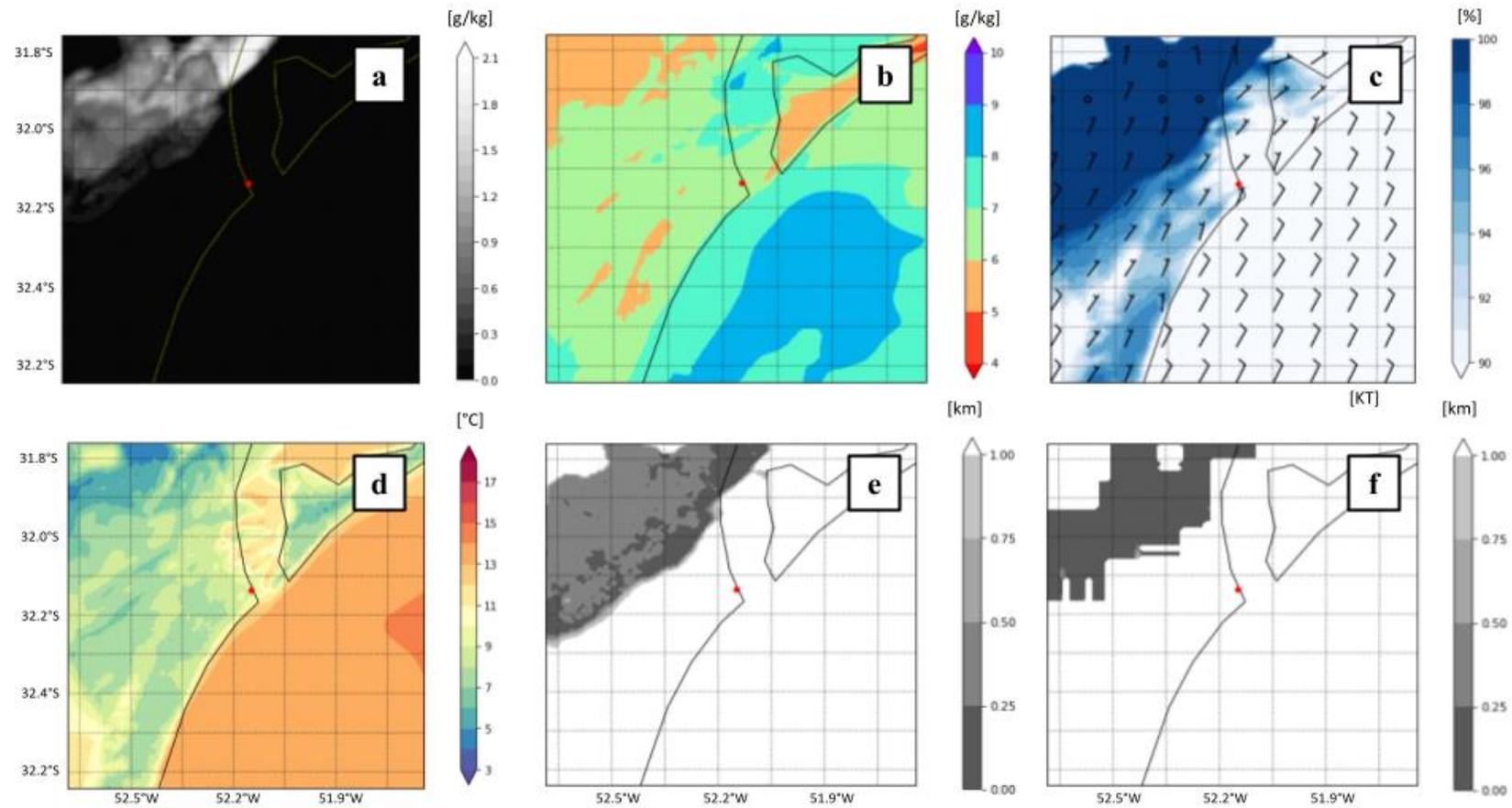


Figura 36 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 00h (hora local).

No horário das 03h do mesmo dia, momento de definição da condição de Impraticabilidade, os indicativos da presença do fenômeno da região de estudo permaneceram evidenciados pelos campos meteorológicos (Figura 37). Tal resultado mostrou-se de acordo com o registro das condições de navegação, destacando a presença de água líquida próximo à superfície (Figura 37a), umidade elevada (Figura 37c) e ventos fracos (Figura 37c), além de visibilidade restrita para 500 metros ou menos no domínio avaliado (Figuras 37e e 37f).

A partir da comparação entre os campos deste horário com os do início da madrugada (Figura 36), foi possível perceber a evolução do fenômeno. Foi verificado um deslocamento para sudeste e um aumento de sua extensão espacial ao longo da madrugada. Destaca-se que este deslocamento simulado pelo modelo pode ter sido fator determinante para definição de condição de Impraticabilidade próximo à Praticagem.

Os campos de visibilidade, como dito anteriormente, caracterizaram bem a condição de navegação, identificando valores iguais ou inferiores a 500 metros em toda a área de estudo (Figuras 37e e 36f). Entretanto, foi possível perceber novamente a diferença entre as duas estimativas avaliadas, com maior restrição percebida pela de Kunkel (Figura 37f).

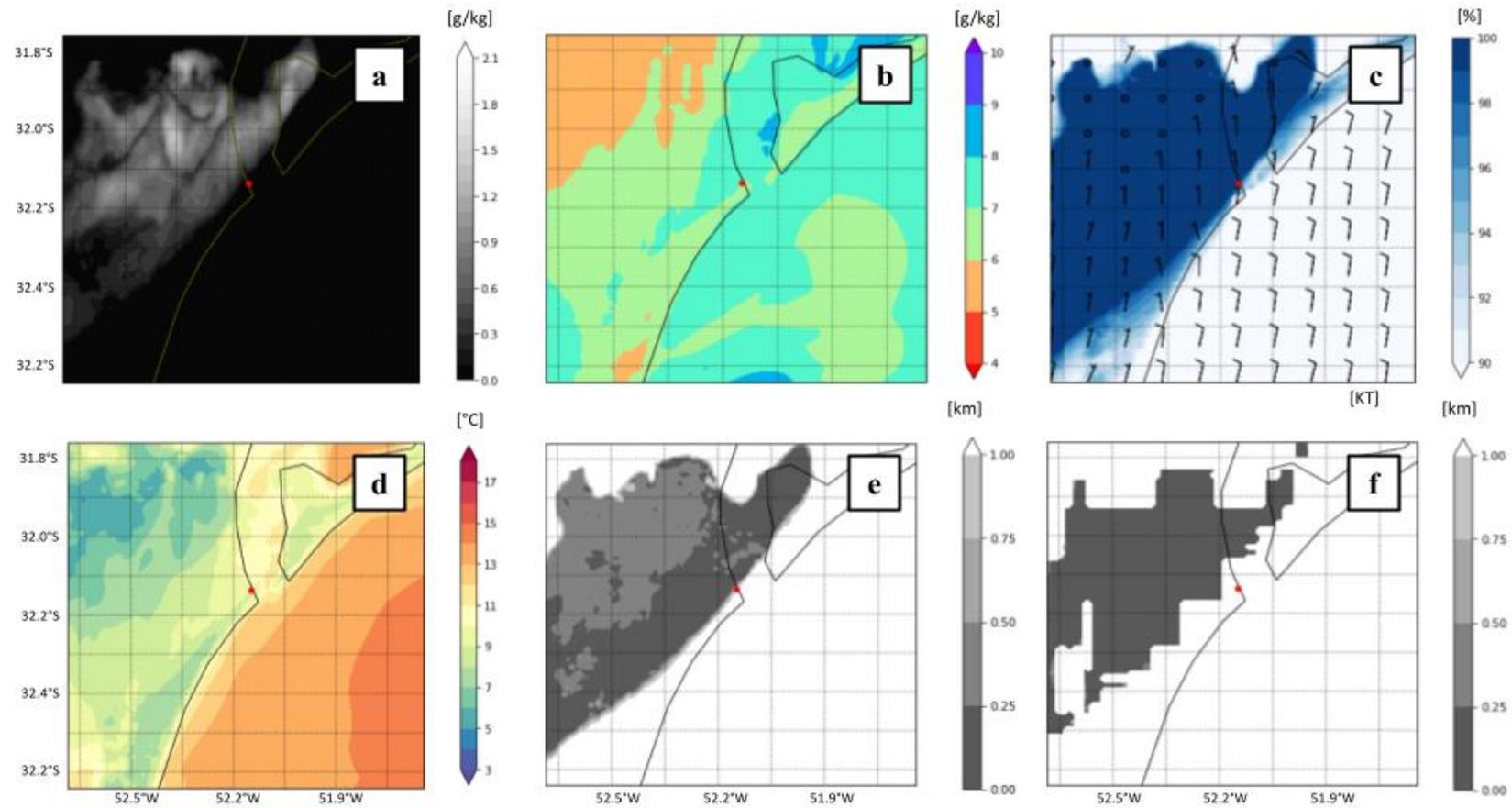


Figura 37- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 03h (hora local).

Às 10h do dia 09 de julho, horário logo após ao retorno à condição de Praticabilidade, o nevoeiro simulado pelo modelo WRF ainda apresentou-se em desenvolvimento, sem indicativos de seu processo dissipativo (Figura 38). Em comparação com os horários anteriores, foi possível verificar um aumento em sua área de atuação, abrangendo a região costeira da cidade. Adicionalmente, foram percebidas evidências de resfriamento sobre a área continental a noroeste da estação da Praticagem (Figuras 38a, 38b e 38d).

Assim como nos instantes avaliados acima, a presença do nevoeiro foi evidenciada e identificada a partir da simulação de presença de água líquida em níveis baixos da atmosfera (Figura 38a), valores muito elevados de umidade relativa (Figura 38c), ventos fracos (Figura 38c) e visibilidade igual ou inferior a 500 metros (Figuras 38e e 38f).

Novamente a restrição de visibilidade de Kunkel (Figura 38f) se mostrou mais intensa que a do FSL (Figura 38e). Entretanto, a partir da estimativa do FSL notou-se que, dentro do canal de acesso à Lagoa dos Patos, houve uma melhoria nas condições de visibilidade do ponto de vista das atividades operacionais da Praticagem. Na madrugada do dia 09 de julho, foram simulados valores de visibilidade predominantemente abaixo de 250m (Figura 37), enquanto às 10h do mesmo dia, percebeu-se valores entre 250 e 500m (Figura 38e), corroborando com registro de melhoria nas condições de visibilidade.

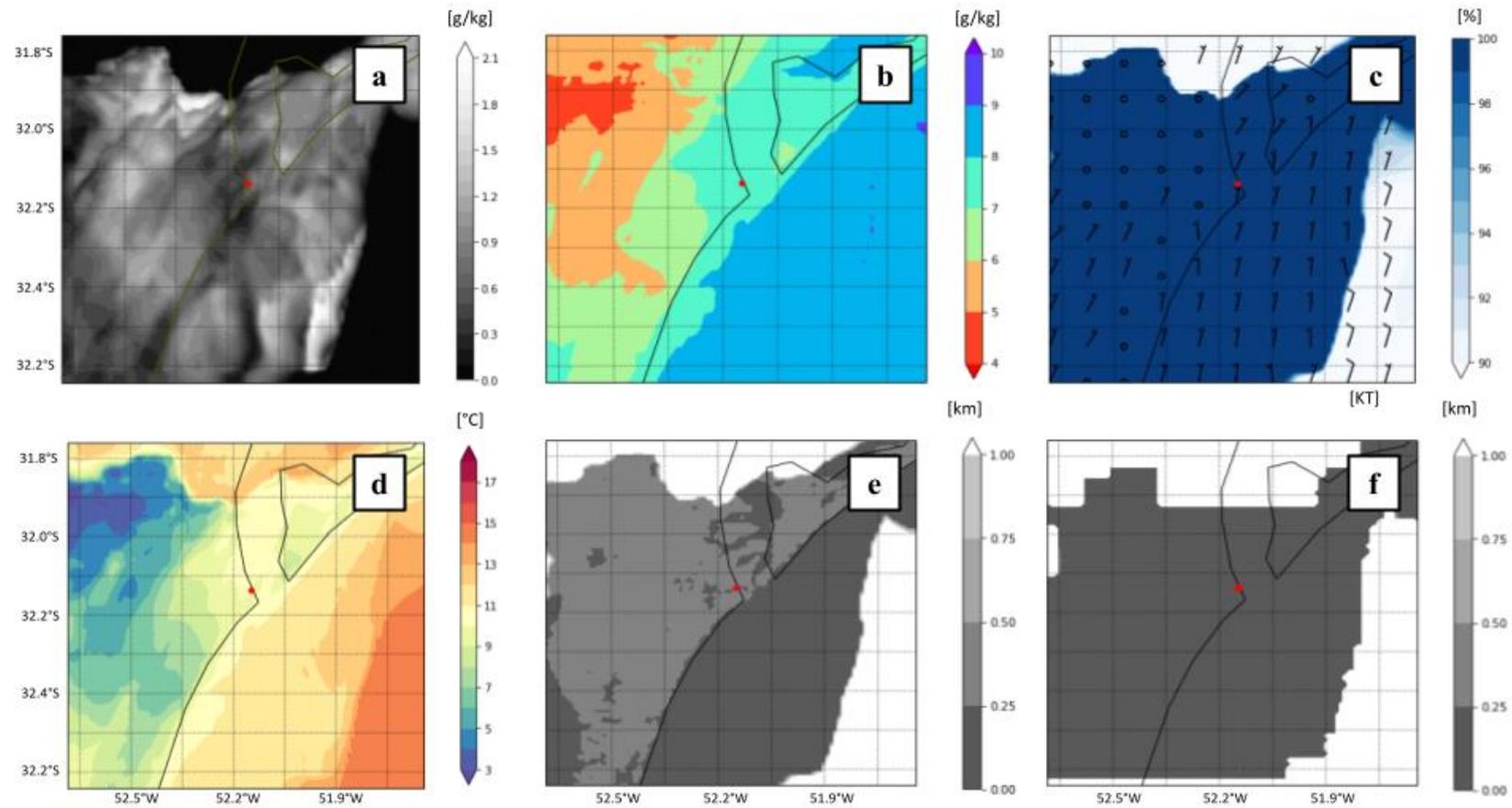


Figura 38 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 10h (hora local).

A figura 39 apresenta o perfil vertical da atmosfera no mesmo horário (10h de 09 de julho). Foi possível identificar nos primeiros 100 metros da atmosfera condições de elevada umidade e a presença de água líquida e gotas de nuvem (Figuras 39a, 39e e 39f). O topo teórico desta camada de nuvem estratiforme foi percebido no nível de 89,4m.

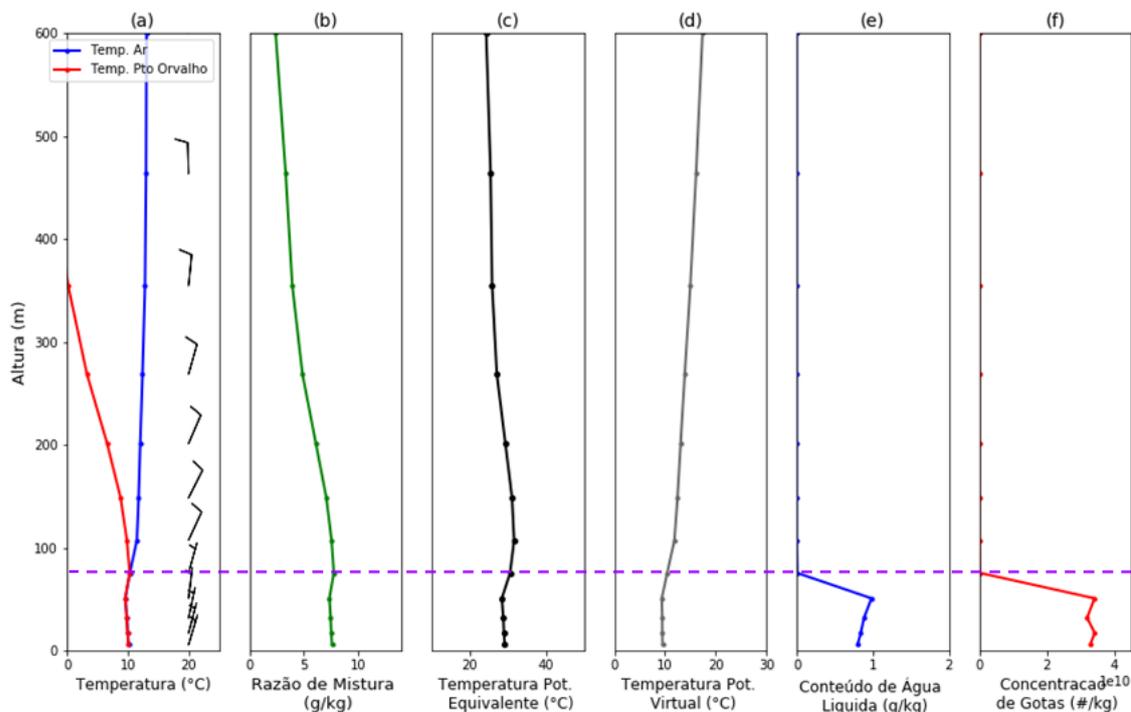


Figura 39 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 10h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

Conforme mencionado anteriormente, os registros de condição de navegação não indicam o horário exato de formação e dissipação total dos nevoeiros estudados. Neste período B, a simulação numérica deu indicativos de que o intervalo de Praticabilidade compreendido entre os eventos de restrição intensa de visibilidade não foi sinônimo de uma completa dissipação do fenômeno de estudo. Entretanto, algumas circunstâncias podem ter se mostrado favoráveis à realização de manobra em alguns pontos da zona de atuação da Praticagem, subsidiando esta mudança para condições de Praticabilidade.

No horário de 15h do dia 09 de julho, horas após o retorno à condição de Praticabilidade, foi possível verificar a continuidade de deslocamento do fenômeno de estudo para a área costeira (Figura 40). Foram identificadas evidências da presença do nevoeiro sobre o oceano,

restringindo a visibilidade principalmente no canal de acesso à Lagoa dos Patos e, conseqüentemente, à zona portuária de Rio Grande.

Elevada disponibilidade de umidade (Figuras 40b e 40c), conteúdo de água líquida próximo à superfície (Figura 40a) e o predomínio de ventos fracos (Figura 40c) na região de estudo seguiram evidenciados nesta simulação.

Os campos de visibilidade, neste instante, apresentaram significativa concordância em termos espaciais e de intensidade para as duas metodologias de cálculo deste parâmetro (Figuras 40e e 40f). Foram simulados valores de visibilidades iguais ou inferiores a 250m sobre o oceano, próximo à entrada do canal de acesso à Lagoa dos Patos. Destaca-se que o modelo neste horário forneceu uma simulação consistente com a condição de Praticabilidade visando a realização de manobras dentro da zona portuária, uma vez que o Porto de Rio Grande localiza-se em uma área não afetada pelo nevoeiro simulado neste horário.

A estrutura vertical simulada pelo modelo WRF para o mesmo horário evidencia disponibilidade de umidade e ventos fracos nos primeiros metros da atmosfera (Figura 41) próximos ao ponto da estação meteorológica da Praticagem. Entretanto, outros elementos como conteúdo de água líquida e concentração de gotas não caracterizam a presença de nevoeiros neste ponto. Tal informação corrobora com o resultado obtido através dos campos.

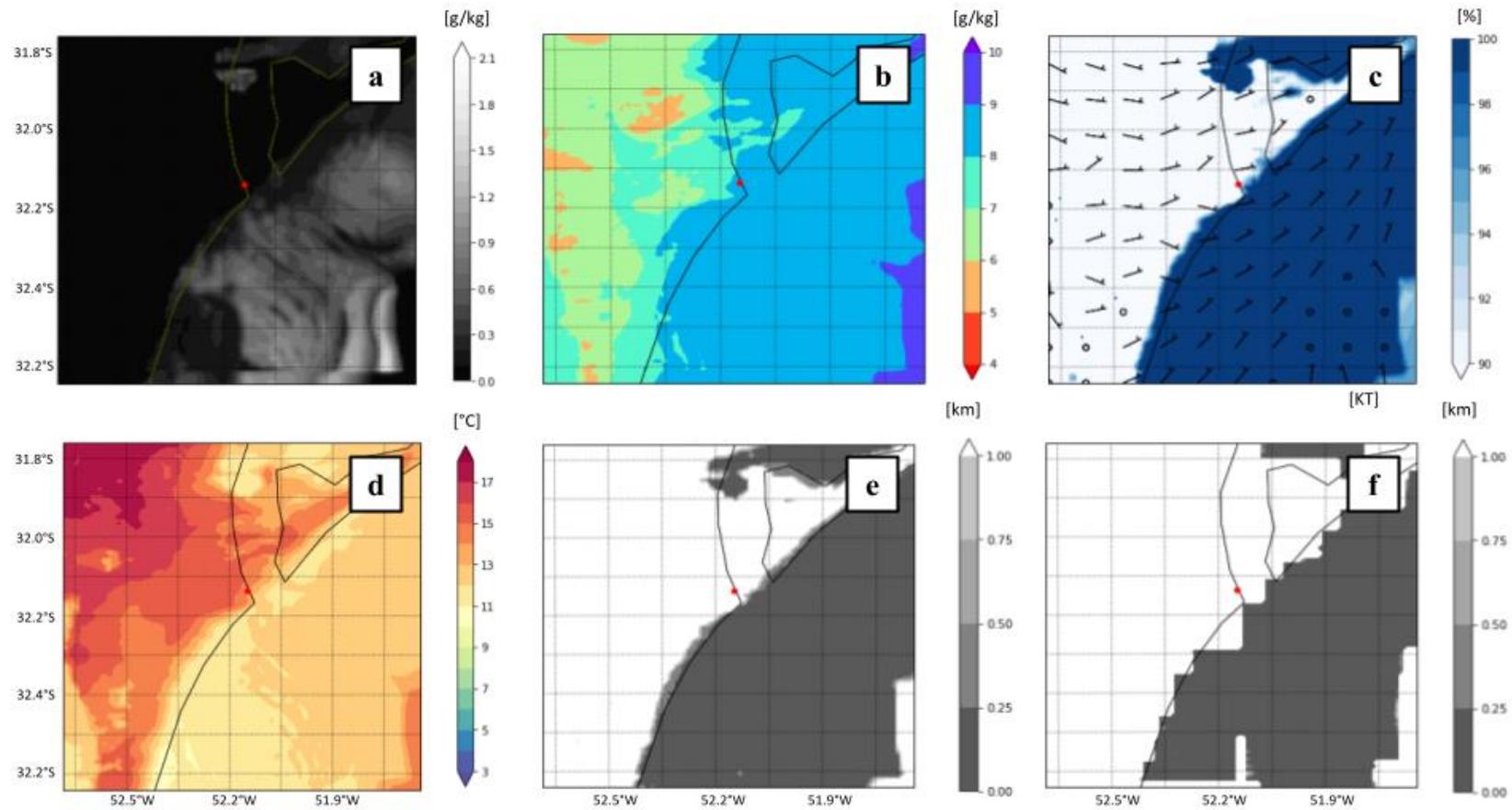


Figura 40 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 15h (hora local).

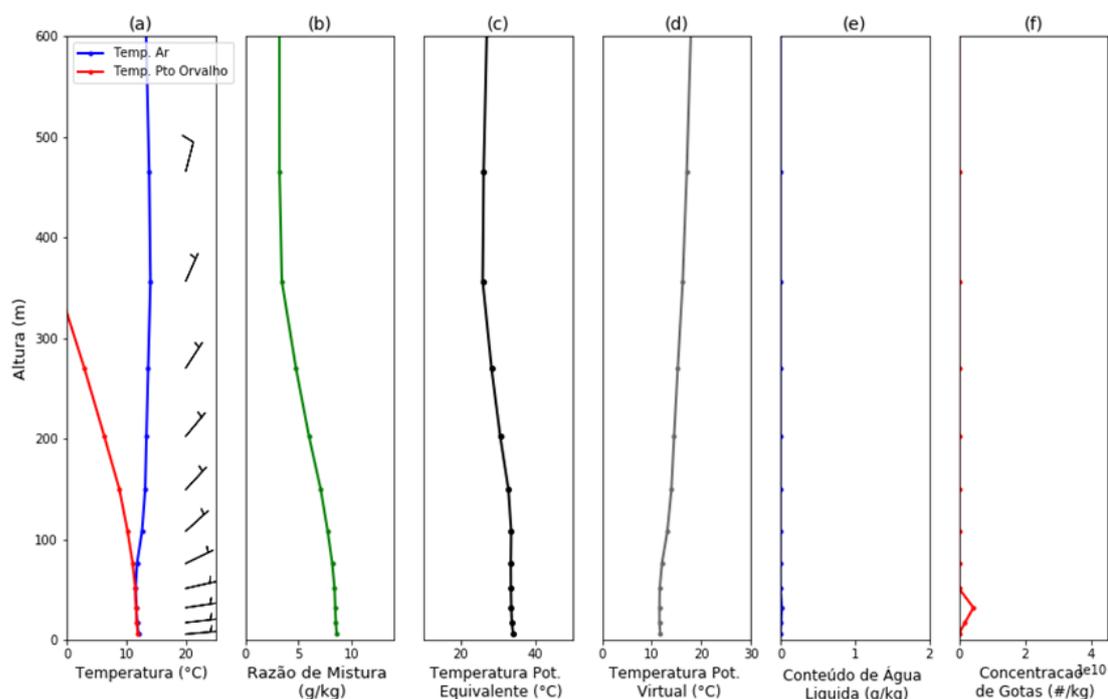


Figura 41 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 15h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

EVENTO B-2

Entre 23h30 do dia 09 de julho e 10h do dia 10 de julho de 2019 foi registrado o segundo e último intervalo de condições de visibilidade desfavoráveis à navegação durante o período B.

No fim da noite de 9 de julho de 2019, os campos simulados pelo modelo WRF indicaram uma expansão da área de atuação do fenômeno, abrangendo quase a totalidade do domínio 3 (Figura 42). Foram verificados valores significativos de conteúdo de água líquida (Figura 42a), disponibilidade de umidade (Figura 42b) no primeiro nível do modelo e umidade relativa igual ou superior a 99% (Figura 42c). Ventos de quadrante norte e fraca intensidade também foram simulados (Figura 42c), corroborando com o resultado observacional.

Os resultados para a variável visibilidade confirmaram a presença do nevoeiro e seu desenvolvimento. Nas duas metodologias de cálculo deste parâmetro, a condição de Impraticabilidade foi evidenciada, com valores iguais ou inferiores a 500m em todo o domínio (Figuras 42e e 42f). Destaca-se que, assim como em outros casos, a estimativa FSL (Figura

42e) apresentou maior variação que a de Kunkel (Figura 42f) no que diz respeito à intensidade da restrição de visibilidade, identificando áreas com nevoeiro de menor intensidade.

Os perfis verticais para o horário das 23h de 09 de julho caracterizaram uma atmosfera úmida em seus primeiros 200 metros (Figura 43a). Adicionalmente, foi possível perceber a presença de nuvem na superfície, se estendendo verticalmente até aproximadamente 270m.

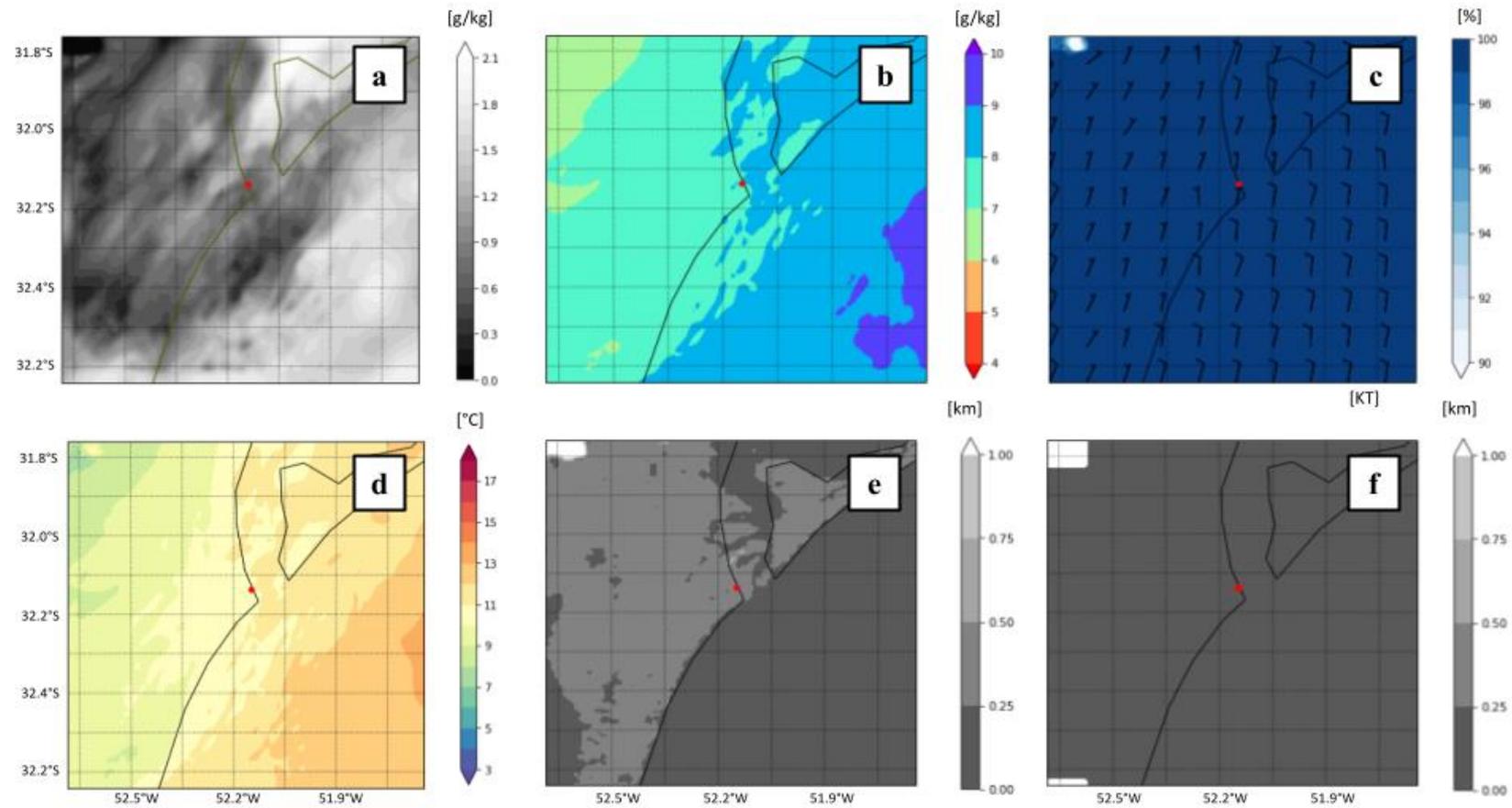


Figura 42 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 23h (hora local)

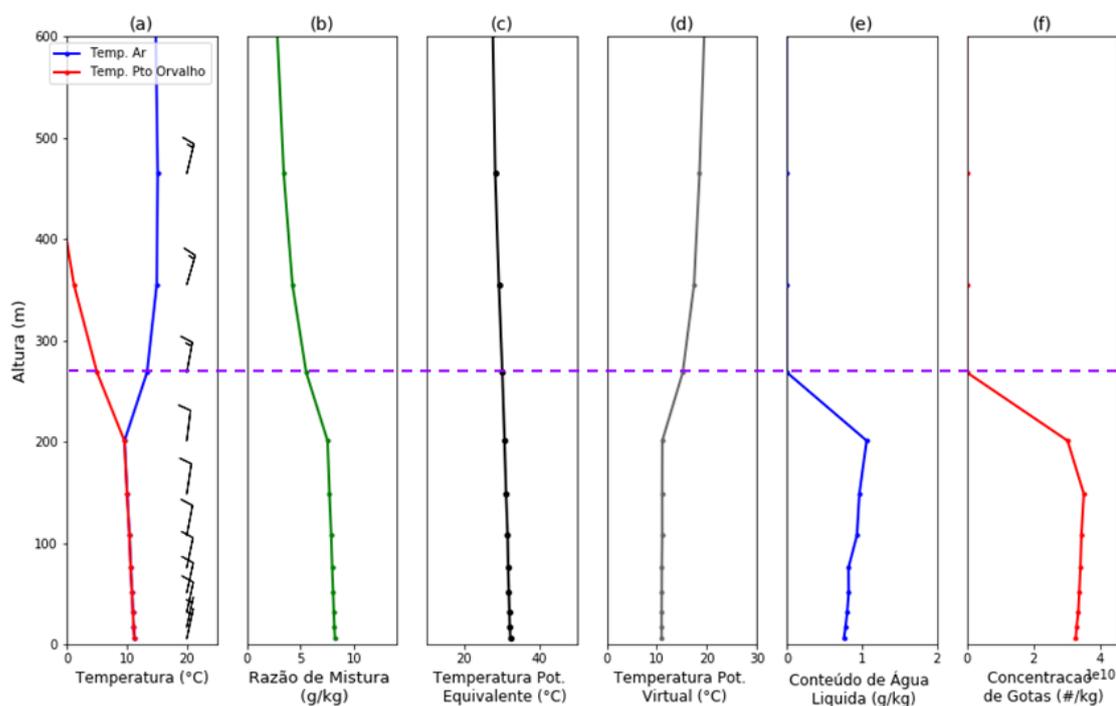


Figura 43 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 23h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

Às 10h do dia 10 de julho de 2019, horário de retorno definitivo à condição de Praticabilidade dentro do período B, não foram simulados indicativos do processo dissipativo do nevoeiro avaliado (Figura 44). O modelo WRF identificou umidade relativa muito alta, conteúdo de água líquida próximo à superfície e ventos fracos, caracterizando condições favoráveis à presença do fenômeno na área de estudo.

Adicionalmente, os campos de visibilidade horizontal também mostraram a permanência do fenômeno. Nas duas metodologias de estimativa deste parâmetro, foram identificadas intensas restrições de visibilidade, com valores iguais ou inferiores a 500m em todo o domínio 3 (Figuras 44e e 44f). Novamente, a estimativa de Kunkel (Figura 44f) apresentou menor variação que a do FSL (Figura 44e) e caracterizou predomínio de restrição de visibilidade para valores iguais ou inferiores a 250 m.

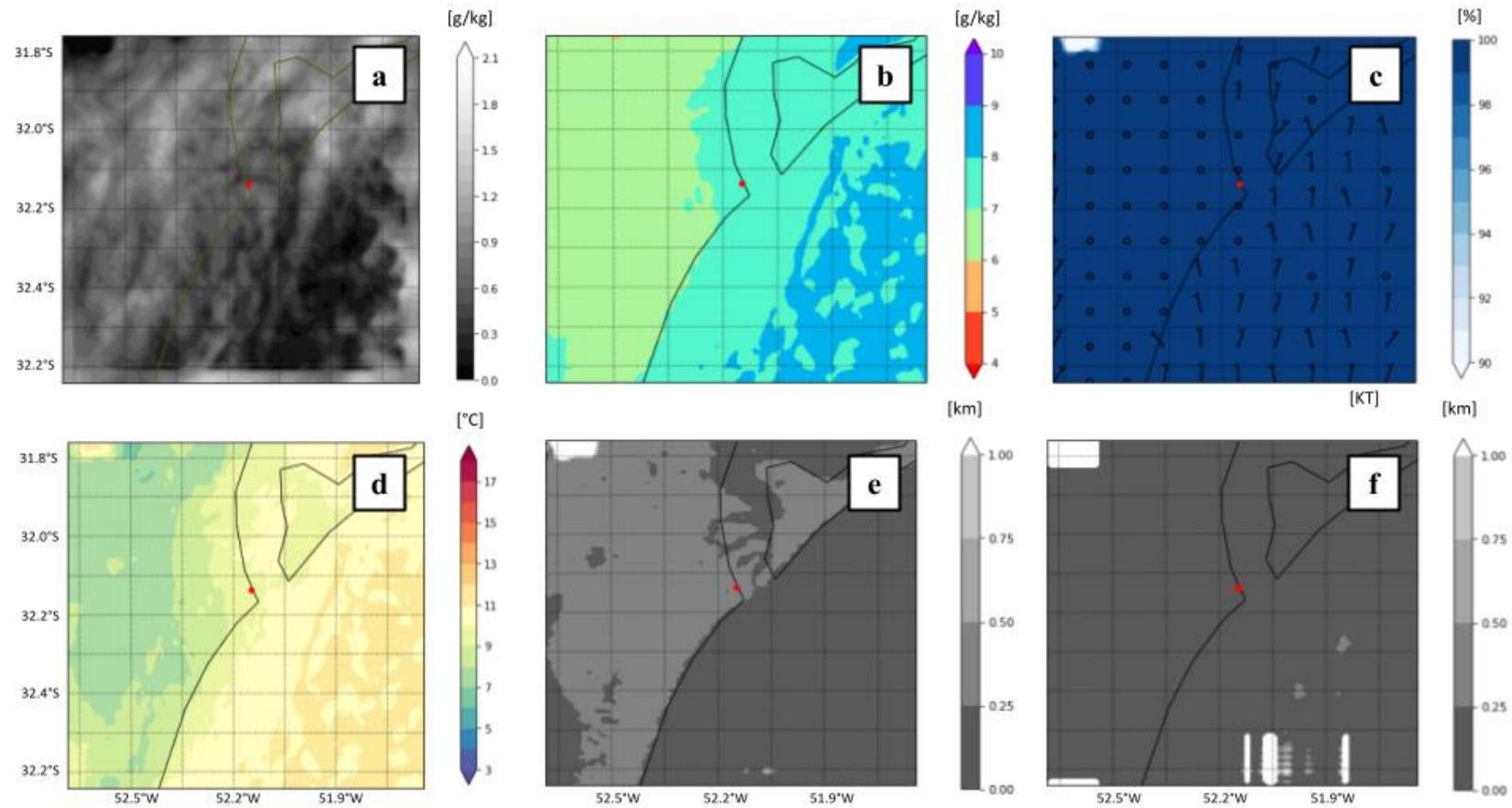


Figura 44 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 10h (hora local).

A estrutura vertical simulada pelo modelo neste horário caracterizou atmosfera úmida em seus primeiros 150m, ventos fracos e a presença de uma nuvem com base à superfície (Figura 45). Estes perfis verticais apontaram para condições favoráveis à identificação do nevoeiro, com topo na altura de aproximadamente 200m.

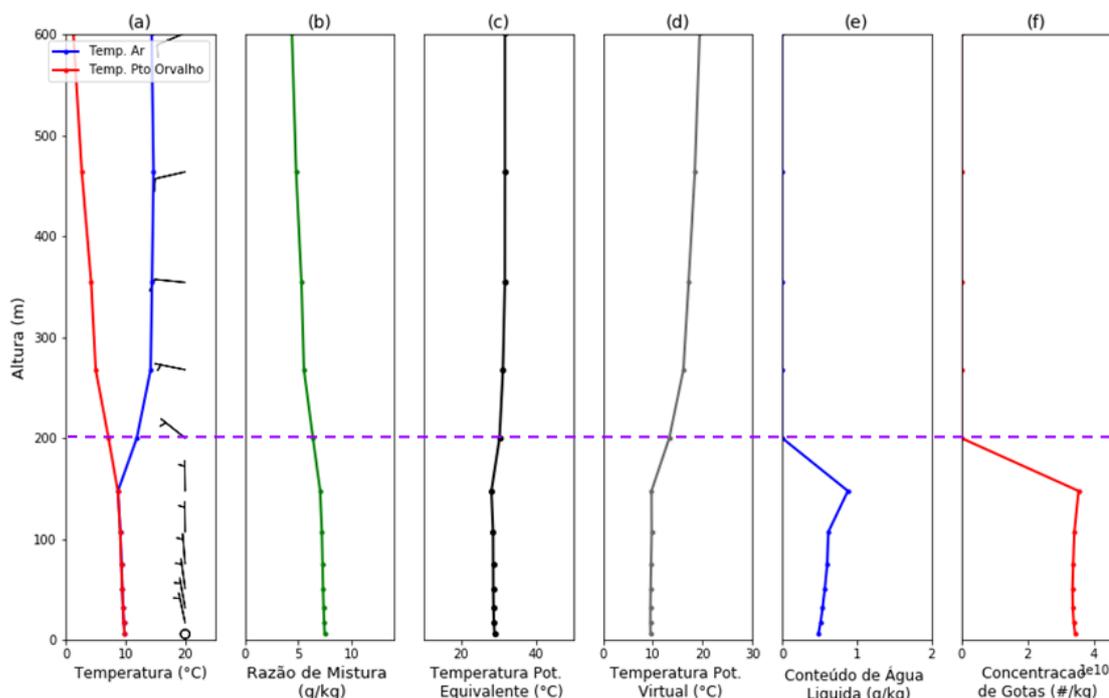


Figura 45 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 10h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

Somente às 13h do dia 10, 3 horas após o retorno às condições favoráveis à navegação, o modelo WRF começou a evidenciar indicativos do início do processo dissipativo do nevoeiro avaliado (Figura 46). Em comparação com o horário anterior, foi possível verificar uma redução no conteúdo de água líquida próximo à superfície (Figura 46a) em conjunto com uma diminuição da área de umidade relativa acima de 99% (Figura 46c). Os ventos simulados seguiram apresentando fraca intensidade neste estágio do ciclo de vida do nevoeiro avaliado, concordando com o resultado observacional (Figura 46c).

Os campos de visibilidade horizontal simulados pelo modelo WRF também caracterizaram o início do processo dissipativo deste nevoeiro (Figuras 46e e 46f). Para ambas

as estimativas, foi evidenciada uma redução significativa da área de abrangência do fenômeno e uma melhoria nas condições de visibilidade visando as atividades da Praticagem.

Os perfis verticais dispostos na figura 47 também caracterizaram a presença do nevoeiro no ponto próximo à estação da Praticagem. Umidade elevada e ventos fracos nos primeiros metros da atmosfera foram identificados. Entretanto, foi possível destacar uma distinção em relação aos demais perfis avaliados neste período. Através dos perfis de conteúdo de água líquida e concentração de gotas (Figuras 47e e 47f, respectivamente), verificou-se que no primeiro nível do modelo tais parâmetros foram nulos, indicando que a base desta nuvem estratiforme não estava localizada na superfície, apesar de encontrar-se em um nível bem próximo da mesma. Tal constatação pode ser interpretada também como indicativo do início do processo dissipativo do fenômeno avaliado, apesar de ainda caracterizar a presença do nevoeiro na área de estudo.

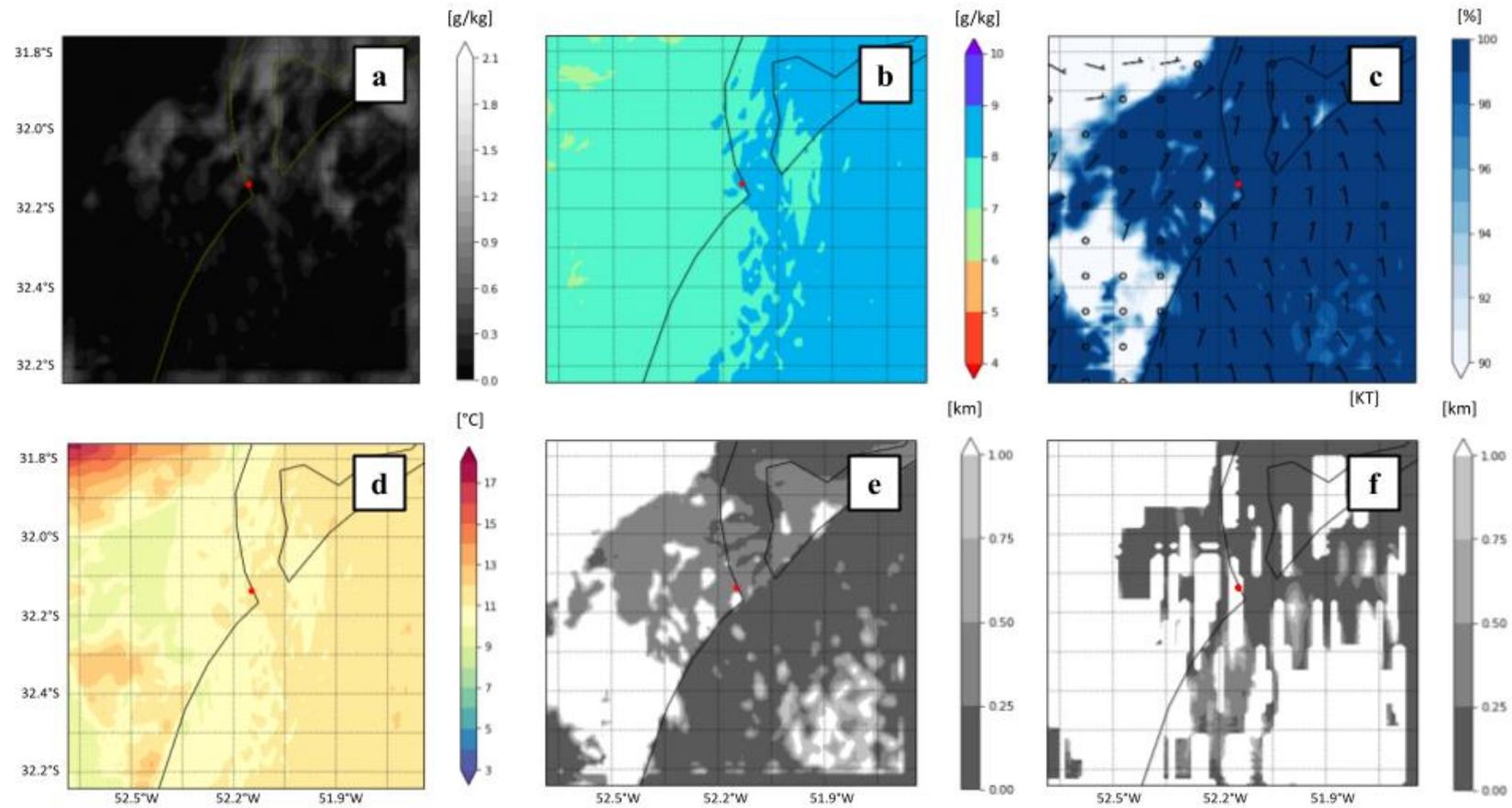


Figura 46- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 13h (hora local).

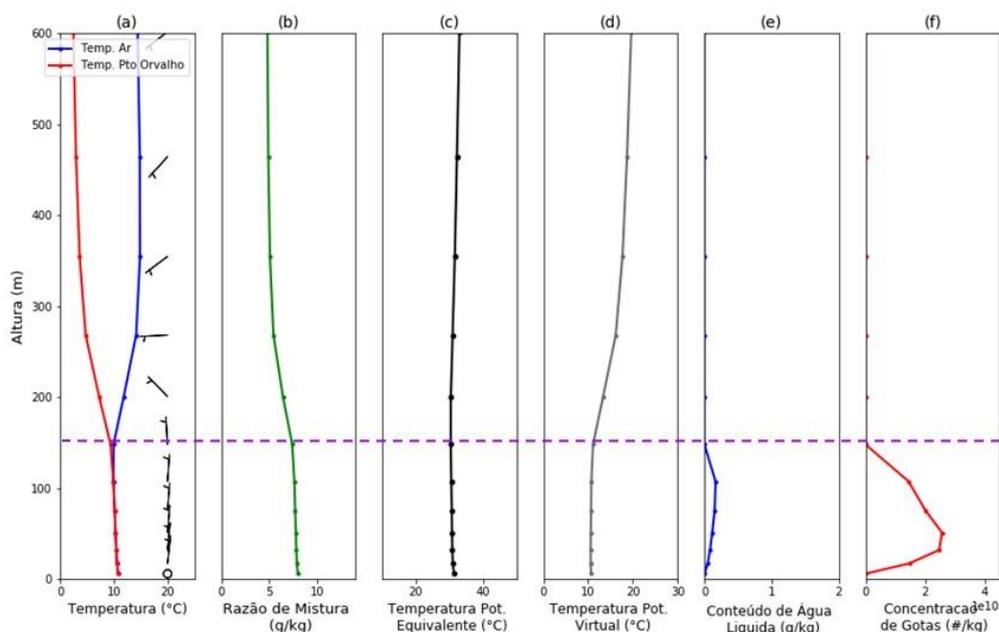


Figura 47 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 13h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

Os campos meteorológicos para o horário de 15h do dia 10 de julho de 2019 se mostraram representativos do processo de dissipação do fenômeno avaliado neste estudo (Figura 48). A partir dos mesmos, foi possível perceber redução significativa no conteúdo de água líquida próximo à superfície e diminuição dos valores de umidade relativa em grande parte do domínio (Figuras 48a e 48c). Predomínio de ventos fracos permaneceu evidenciado neste estágio do nevoeiro, ainda de acordo com a observação (Figura 48c).

Os campos de visibilidade horizontal também apontaram indicativos da dissipação do fenômeno, com expressiva redução da área de abrangência do nevoeiro simulado (Figuras 48e e 47f). A área identificada pelo método de estimativa de Kunkel apresentou-se reduzida em comparação à do FSL, o que pode ser justificado pela dependência da mesma com relação ao campo de água líquida.

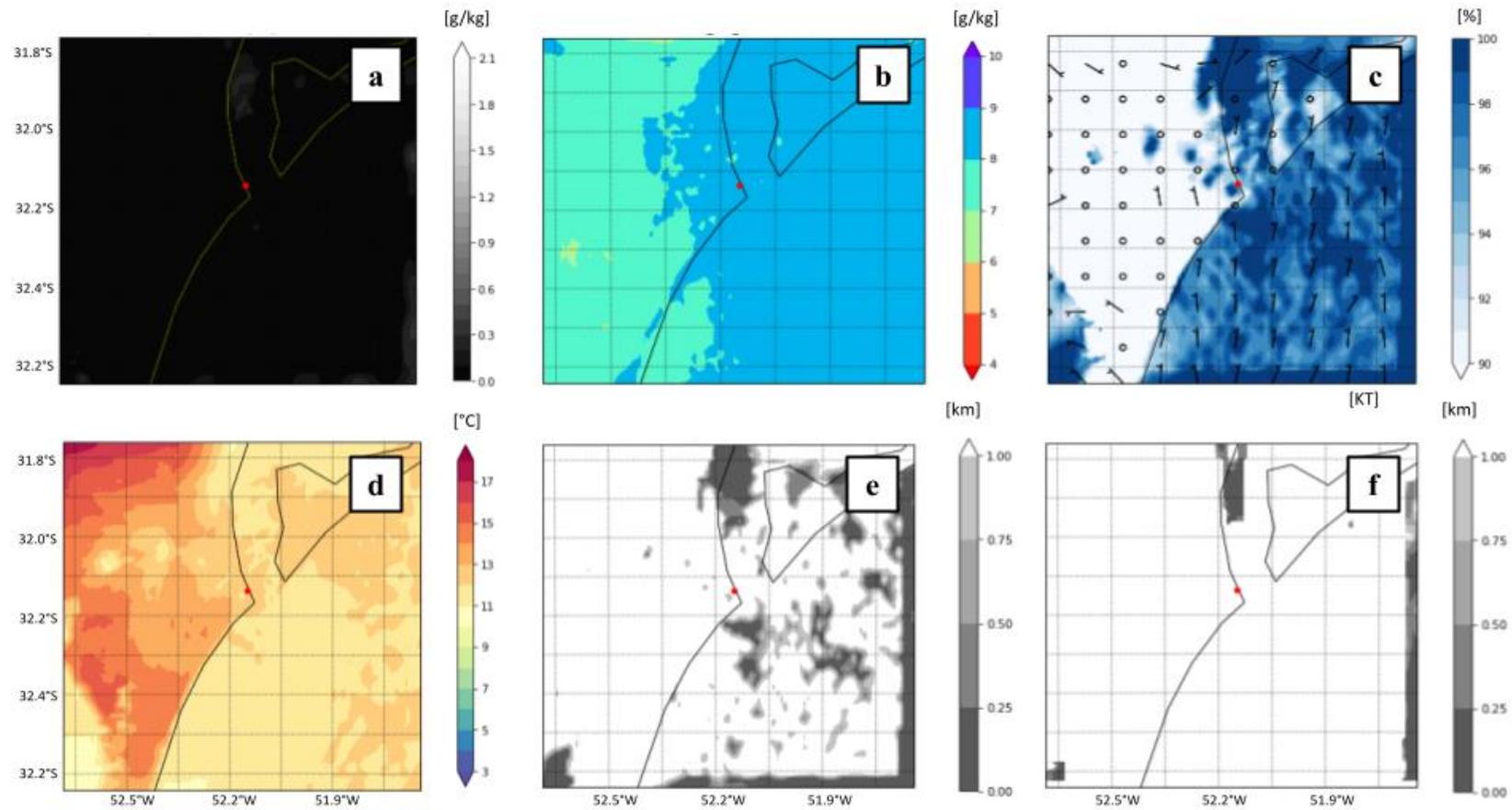


Figura 48 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 15h (hora local).

Complementando a avaliação espacial das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF, os resultados a seguir compreendem uma análise pontual das mesmas. A partir das figuras 49 a 52, é possível verificar a evolução temporal de parâmetros meteorológicos e de estabilidade no ponto de grade mais próximo à estação meteorológica da Praticagem e nos 4 pontos representativos, conforme evidenciados na figura 10. O intervalo compreendido nesta etapa do trabalho se inicia às 21h do dia 08 de julho e se encerra às 00h do dia 11 de julho de 2019. Ressalta-se que o intervalo em cinza destaca a duração da condição de Impraticabilidade e, conseqüentemente, do nevoeiro associado à intensa restrição de visibilidade. Além disso, as séries temporais para o ponto central (próximo às coordenadas da estação meteorológica da Praticagem) encontram-se destacadas em vermelho.

De maneira geral, as séries temporais simuladas de vento a 10 metros (Figura 49) apresentaram concordância entre os pontos avaliados. O modelo WRF simulou o predomínio de ventos de fraca intensidade em todos os pontos (Figuras 49 e 50a), concordando com os resultados obtidos a partir dos dados observados. Destaca-se que a intensidade do vento se mostrou mais elevada nos pontos B e C, entretanto ainda caracterizando fraca intensidade. Com relação à direção, foi possível verificar predomínio de ventos de quadrante norte simulados na região avaliada (Figura 49).

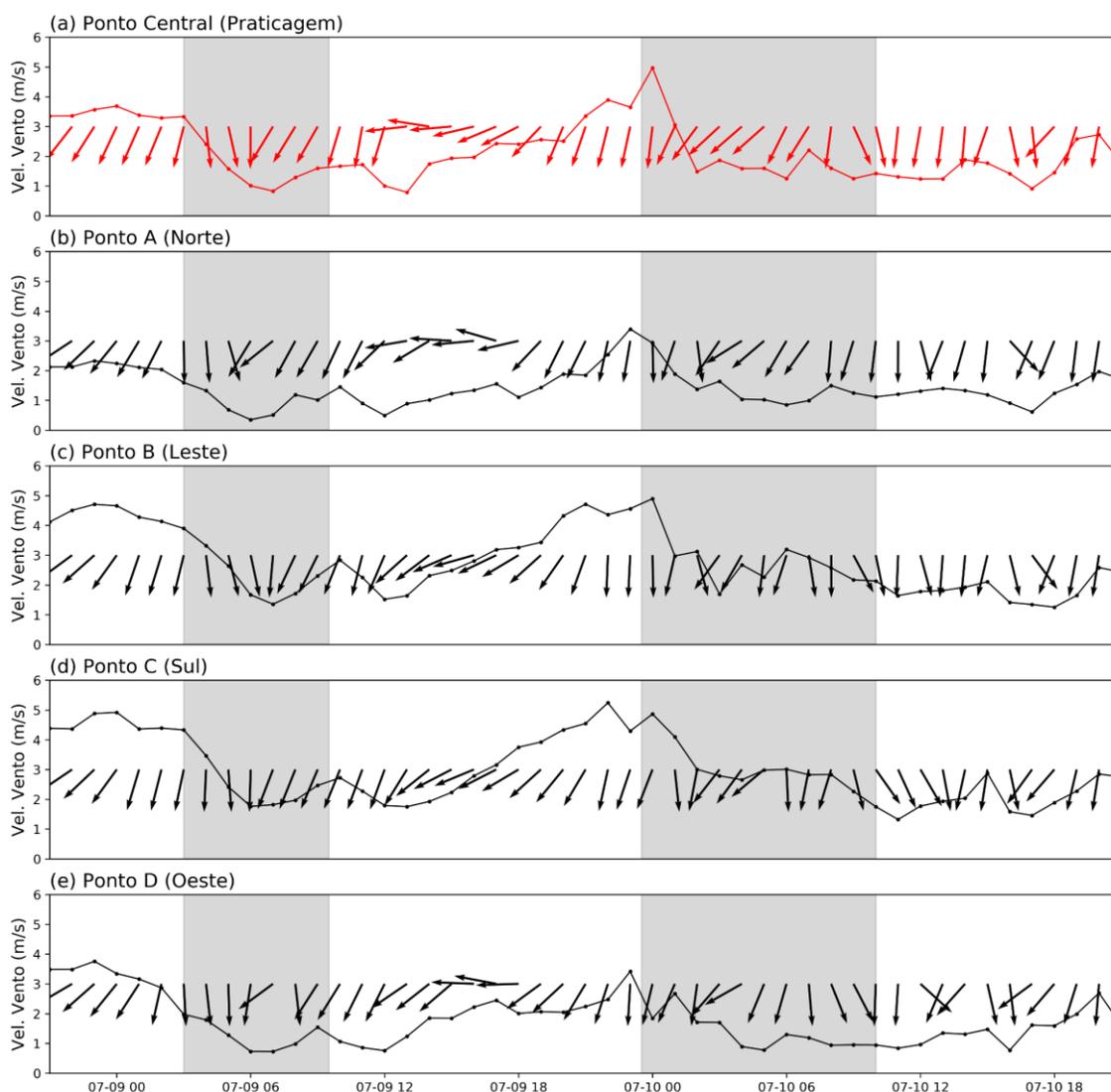


Figura 49 - Séries temporais de vento a 10 metros (direção e intensidade) para o ponto mais próximo à Torre de Controle da Praticagem (a) e demais pontos representativos (b,c,d e e) simuladas pelo modelo WRF para o período B. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

As séries temporais de umidade relativa do ar (Figuras 50b e 50c) mostraram a habilidade do modelo WRF na representação destes eventos de nevoeiro. A partir da madrugada do dia 09 de julho, foram simulados valores de umidade relativa elevados, iguais ou próximos a 100% na região de avaliação. Tal informação se mostrou de acordo com o registro de condições de navegação disponibilizado. Destaca-se que estes valores máximos foram atingidos primeiramente nos pontos A (a norte da Praticagem) e D (a oeste da Praticagem), evidenciando um possível deslocamento do nevoeiro.

Nos pontos B (a leste da Praticagem) e C (a sul da Praticagem), foi possível verificar uma persistência desses valores muito elevados de umidade relativa, caracterizando a presença do nevoeiro a sudeste da estação da Praticagem até a tarde do dia 10 de julho, assim como evidenciado pelos campos espaciais. Nos demais pontos de avaliação, foi caracterizada uma redução deste parâmetro, mais pronunciada e duradoura nos pontos A e D. Tais aspectos podem ser determinantes para caracterizar o deslocamento do fenômeno e, principalmente, justificar a condição de Praticabilidade decretada entre a manhã e a noite de 09 de julho. Desta forma, foi possível verificar que o WRF se mostrou ajustado para distinguir e identificar a ocorrência de 2 eventos de restrição de visibilidade dentro do período B na região de estudo.

Assim como para o parâmetro anterior, as séries de conteúdo de água líquida (Figura 50d) para os pontos central, A e D distinguiram 2 intervalos temporais com a presença de água líquida em níveis baixos da atmosfera coincidentes com períodos em que houve registro de restrição de visibilidade. O intervalo de redução de conteúdo de água líquida nos pontos central, A e D apresentou uma duração inferior com relação aos registros de navegação. Entretanto, foi possível percebê-lo mais duradouro nos pontos A e D em comparação com o ponto central. Nos pontos B e C a série temporal deste parâmetro caracterizou um evento único, sem redução total do parâmetro entre a madrugada de 09 de julho e a noite de 10 de julho.

De maneira geral, a figura 50e, analisada em conjunto com a figura 50d, apontou para uma representação do processo de conversão de vapor d'água em água líquida em baixos níveis da atmosfera durante os eventos de nevoeiro. Foi verificado que um processo de aumento do conteúdo de água líquida se deu acompanhado de uma tendência de redução do parâmetro razão de mistura.

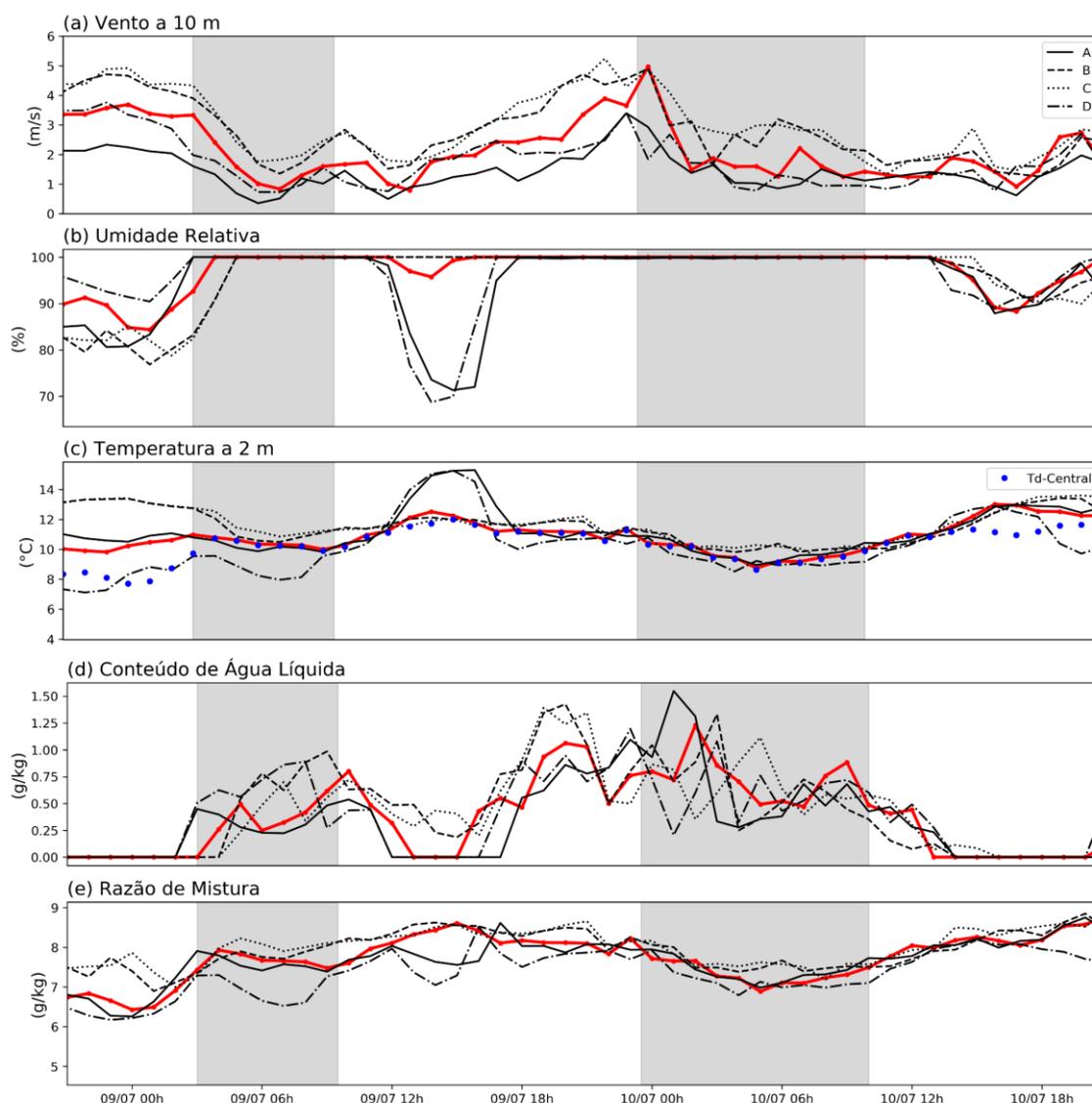


Figura 50 - Séries temporais de velocidade do vento a 10 metros (a), umidade relativa do ar a 2 metros (b), temperatura do ar (c), conteúdo de água líquida (d) e razão de mistura (e) simuladas pelo modelo WRF para o período B. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

Os resultados para o índice FSI (Figura 51a) indicaram que o modelo WRF simulou probabilidade alta ($FSI < 31$, linha laranja tracejada) de formação de nevoeiro na região ao longo de todo o intervalo avaliado. Destaca-se ainda que, nos pontos A e D foi verificada uma tendência de redução desta probabilidade durante a tarde de 09 de julho.

As estimativas de visibilidade horizontal de Kunkel e do FSL também foram analisadas (Figuras 51b e 51c, respectivamente). Os limiares de 1 km e 500 metros foram destacados em

suas séries temporais (linha azul e linha verde tracejadas, respectivamente) visando avaliar os intervalos de tempo que o modelo simulou a presença de nevoeiros e nevoeiros intensos na região de interesse deste estudo.

A estimativa de visibilidade de Kunkel (Figura 51b) é função do conteúdo de água líquida e, por conta da simulação de valores nulos ou bem próximos a 0 para esta variável, o cálculo da visibilidade horizontal apresentou falhas ao longo de sua evolução temporal. Entretanto, durante o período em que foi possível calcular este parâmetro, notou-se que a série temporal apontou valores de visibilidade abaixo de 500 metros durante os intervalos de Impraticabilidade, caracterizando restrição intensa de visibilidade. Assim como visto para demais parâmetros neste período B, nos pontos B e C a presença de nevoeiro intenso foi simulada continuamente entre a madrugada do dia 09 de julho e a tarde de 10 de julho. Em contrapartida, no ponto central houve a caracterização da condição de Praticabilidade, ou seja, de aumento da visibilidade, na tarde de 09 de julho.

Os resultados obtidos para a estimativa do FSL mostraram a habilidade do modelo em identificar e caracterizar bem os eventos de nevoeiro a partir desta metodologia (Figura 51c). Assim como verificado através das demais variáveis, nos pontos central, A e D houve a identificação de um intervalo de Praticabilidade durante a tarde do dia 09 de julho, caracterizando dois eventos de nevoeiro. Nos pontos B e C, o evento foi caracterizado como uma única restrição de visibilidade. Desta forma, evidenciou-se o posicionamento do fenômeno em área a sudeste da torre da Praticagem.

Outro aspecto importante a ser destacado é que a restrição de visibilidade foi verificada primeiro nos pontos A e D e por último nos pontos C e B, evidenciando novamente o deslocamento e posicionamento do fenômeno de estudo.

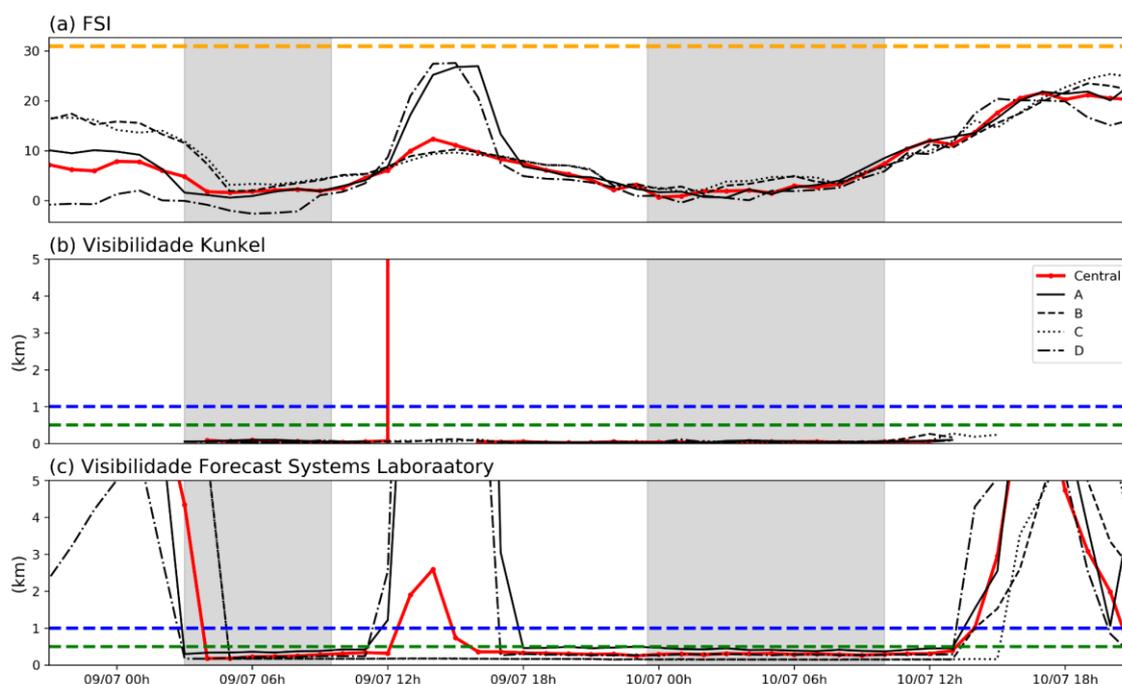


Figura 51 - Séries temporais do FSI (a) e das estimativas de visibilidade de Kunkel (b) e do FSL (c) obtidas a partir do modelo WRF para o período B. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

A figura 52 aborda a avaliação do número de Richardson como parâmetro para caracterizar a estabilidade atmosférica. Como mencionado anteriormente, esta avaliação se deu a partir das classes de Pasquill, conforme descrito pela tabela 8, e as linhas coloridas nas séries temporais ilustram os limites desta classificação. Valores abaixo da linha vermelha indicam condição muito instável; entre as linhas vermelha e amarela apontam instabilidade; entre a rosa e a amarela, caracterizam condições moderadamente instáveis; entre verde e rosa, condição de neutralidade; entre verde e azul, estabilidade e acima da linha azul, condição muito estável.

Este parâmetro foi avaliado em 3 níveis diferentes para o ponto próximo à estação meteorológica da Praticagem. Entre os dois primeiros níveis do modelo (Figura 52a), foi possível perceber que o modelo WRF simulou condição de estabilidade atmosférica horas antes do início da restrição de visibilidade reportada. Algumas horas após o início do evento, ainda durante a manhã de 09 de julho, foi verificada uma tendência de aumento da instabilidade atmosférica. Até o fim do evento (retorno definitivo para condição de Praticabilidade), o número de Richardson calculado entre os dois primeiros níveis do modelo permaneceu

indicando condições instáveis. Um padrão semelhante foi verificado entre o primeiro e o terceiro nível do modelo (Figura 52b).

Entre o primeiro e o sexto nível (Figura 52c), foi possível verificar predomínio de condições estáveis entre a noite de 08 de julho e o início da noite de 09 de julho. Tal configuração sugere que o fenômeno apresentou, neste intervalo temporal, suporte devido à estabilidade em uma camada mais profunda, corroborando com uma área de atuação mais extensa e persistente. A partir da noite de 09 de julho, o número de Richardson apontou para variações nestas condições. Entretanto, caracterizou condições de estabilidade durante o segundo intervalo de Impraticabilidade.

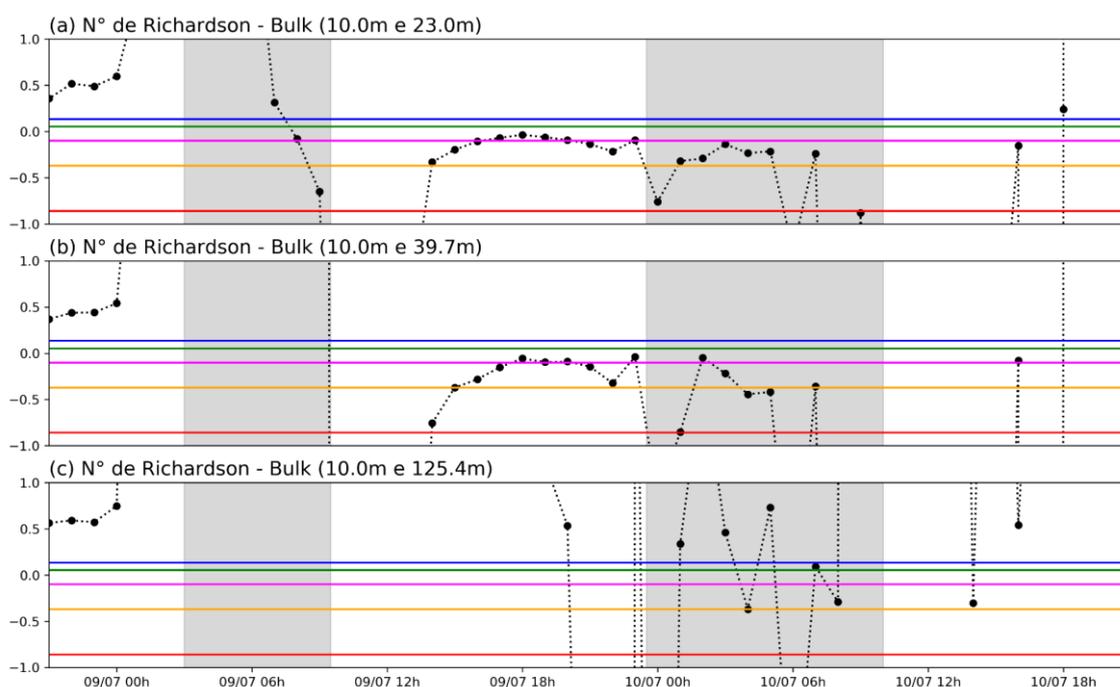


Figura 52 - Séries temporais do número de Richardson em diferentes níveis obtidos a partir da simulação do modelo WRF para o período B para o ponto de grade mais próximo à torre de controle da Praticagem. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. As linhas coloridas marcam limiares característicos das classes de estabilidade de Pasquill.

5.2.2 Período D

Conforme descrito pela tabela 9, o período de simulação D compreende 1 evento de nevoeiro intenso registrado pela Praticagem. A seguir serão apresentados os resultados obtidos para este intervalo.

5.2.2.1 Descrição observacional

Entre às 21h do dia 27 de agosto e às 09h do dia 28 de agosto de 2019, a região de interesse deste estudo encontrava-se sob influência de um sistema de alta pressão (Figura 53). Esta configuração se mostra promissora com relação à formação de nevoeiros pelo mecanismo de resfriamento, uma vez que é relacionada a ventos fracos e condições de céu claro. Destaca-se ainda que a cidade de Rio Grande estava localizada nas proximidades da borda deste sistema. Tal posicionamento pode favorecer ventos de nordeste na região.

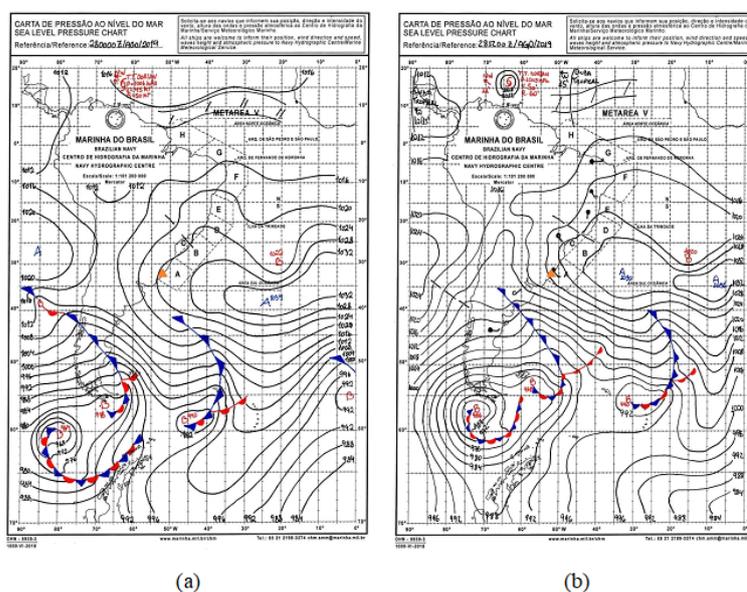


Figura 53 - Cartas Sinóticas do dia 28/08/2019 às 00UTC (a) e 12UTC (b), ilustrando a situação sinótica na região de estudo durante o período com registros de nevoeiros intensos na região de estudo. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

A partir do início da madrugada do dia 28 de agosto de 2019, o produto de satélite avaliado identificou a presença de nuvens baixas na região estuarina da Lagoa dos Patos (Figura 54). Este cenário para a área de estudo permaneceu evidenciado até o início da manhã do mesmo

dia, até o último horário de imagens de satélite disponível. Ressalta-se que o registro do evento de restrição de visibilidade intensa a partir das condições de navegação se deu entre às 07h e às 11h15 do dia 28 de agosto. Ou seja, a continuidade do evento e da presença destas nuvens baixas foi observada na região de estudo pelo menos até o fim da manhã deste dia.

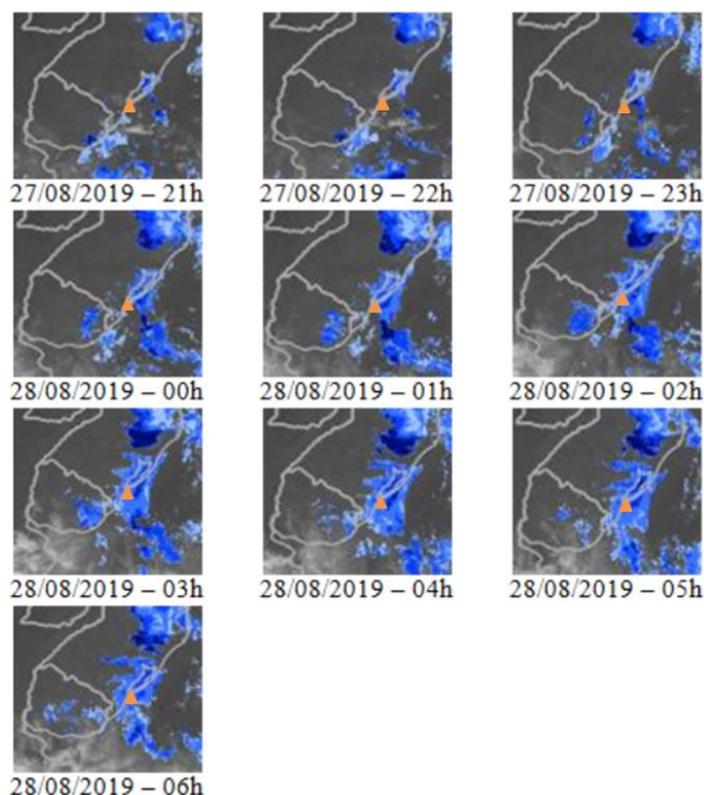


Figura 54 - Imagens horárias de satélite entre as 21h (hora local) do dia 27/08/2019 e as 06h (hora local) do dia 28/08/2019, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE).

Os dados observados na estação meteorológica da Praticagem e na boia meteoceanográfica RS-2 destacaram a ocorrência de ventos fracos a moderados e ao longo do intervalo compreendido entre a madrugada e o início da tarde do dia 28 de agosto de 2019 (Figura 55). Foi evidenciado o predomínio de ventos de quadrante norte nesta área. De maneira geral, foram verificados ventos menos intensos na boia em relação à estação meteorológica da Praticagem. Tal característica pode estar associada à diferença de altura entre os dois sensores de vento.

Outro ponto a ser caracterizado consiste na observação de temperatura do ar inferior à da água durante a restrição de visibilidade. Após o fim do evento, o sinal se inverte. Tal padrão pode ser resultante do ciclo diurno de temperatura do ar.

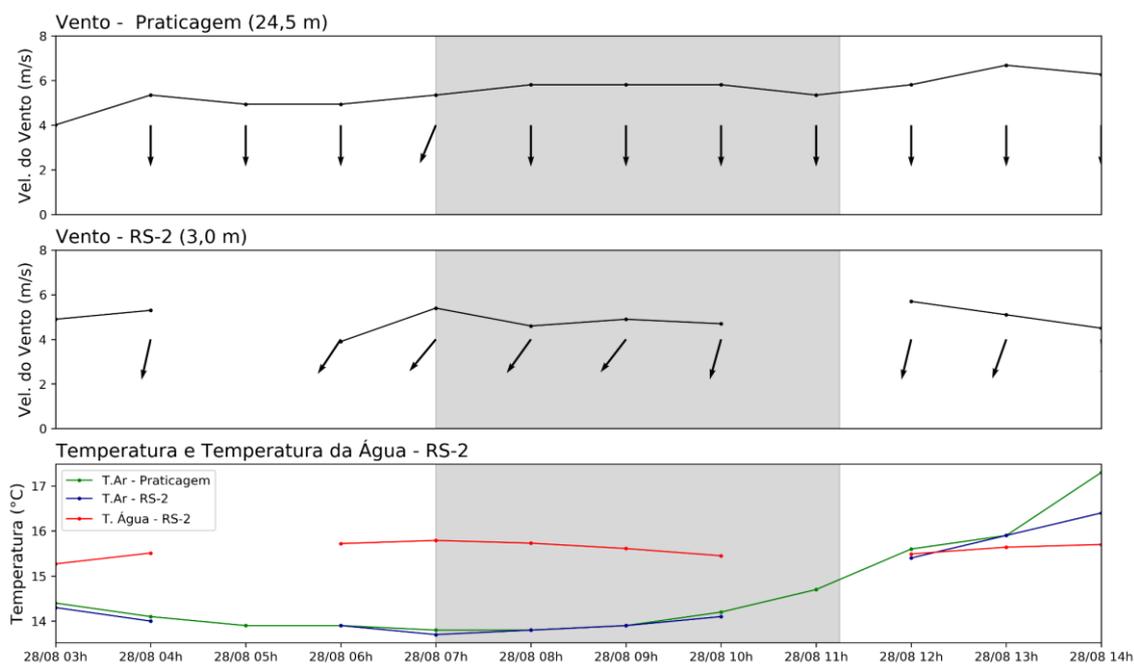


Figura 55 - Séries temporais de vento (direção e intensidade) e temperaturas do ar e da água observadas durante o intervalo compreendido entre a madrugada e a tarde de 28 de agosto de 2019. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

O evento de nevoeiro ocorrido durante o período D apresenta informações adicionais obtidas a partir de observação *in loco* e registros fotográficos neste intervalo. Tais registros possibilitaram ilustrar a subjetividade embutida nos registros de navegação, além de complementar a análise dos resultados obtidos neste estudo.

A figura 56 apresenta alguns registros fotográficos obtidos na região de estudo deste fenômeno entre a madrugada e o início da tarde do dia 28 de agosto de 2019, bem como a localização aproximada de onde foram feitos tais registros.

Na região central da cidade de Rio Grande, o processo de formação do nevoeiro avaliado neste período pôde ser observado a partir da madrugada de 28 de julho (Figura 56a). O fenômeno seguiu seu desenvolvimento nas horas seguintes e na manhã do mesmo dia persistia

atuando na região central do município, sendo associado a significativa restrição de visibilidade (Figuras 56b e 56c).

Às 07h, conforme mencionado anteriormente, foi definida condição de Impraticabilidade devido à restrição de visibilidade na região do estuário da Lagoa dos Patos. Tal informação, em conjunto com os registros fotográficos indicam o desenvolvimento do nevoeiro e caracterizam a área de atuação do mesmo. A partir do acompanhamento das atividades operacionais da Praticagem durante esta manhã, foi possível observar o reporte de relatos de restrição de visibilidade muito significativa por navio localizado em alto mar. Tal embarcação precisou aguardar a melhoria das condições meteorológicas para o prosseguimento das atividades da Praticagem e, conseqüentemente, acessar a região portuária de Rio Grande.

As atividades de manobras de navios, realizadas pelos Práticos da Barra de Rio Grande, permaneceram suspensas por cerca de 4 horas. Às 11h15, houve retorno para condição de Praticabilidade e, poucos minutos depois, as manobras deste dia começaram. Os registros das figuras 56d e 56e se deram no momento da operação para realização da primeira manobra do dia, referente à entrada do navio supracitado no canal de acesso à Lagoa dos Patos, se direcionando à área portuária de Rio Grande. Verificou-se a atuação no nevoeiro na área de estudo, ainda associado a significativa restrição de visibilidade.

Nas horas seguintes foi observado o processo dissipativo do nevoeiro na região, com melhoria nas condições de visibilidade para navegação e possibilidade de atividades da Praticagem até o fim do dia e do período de avaliação. No início da tarde ainda era possível verificar a presença do nevoeiro, a determinada distância da torre de controle da Praticagem, não afetando as atividades programadas neste horário (Figuras 56f e 56g).

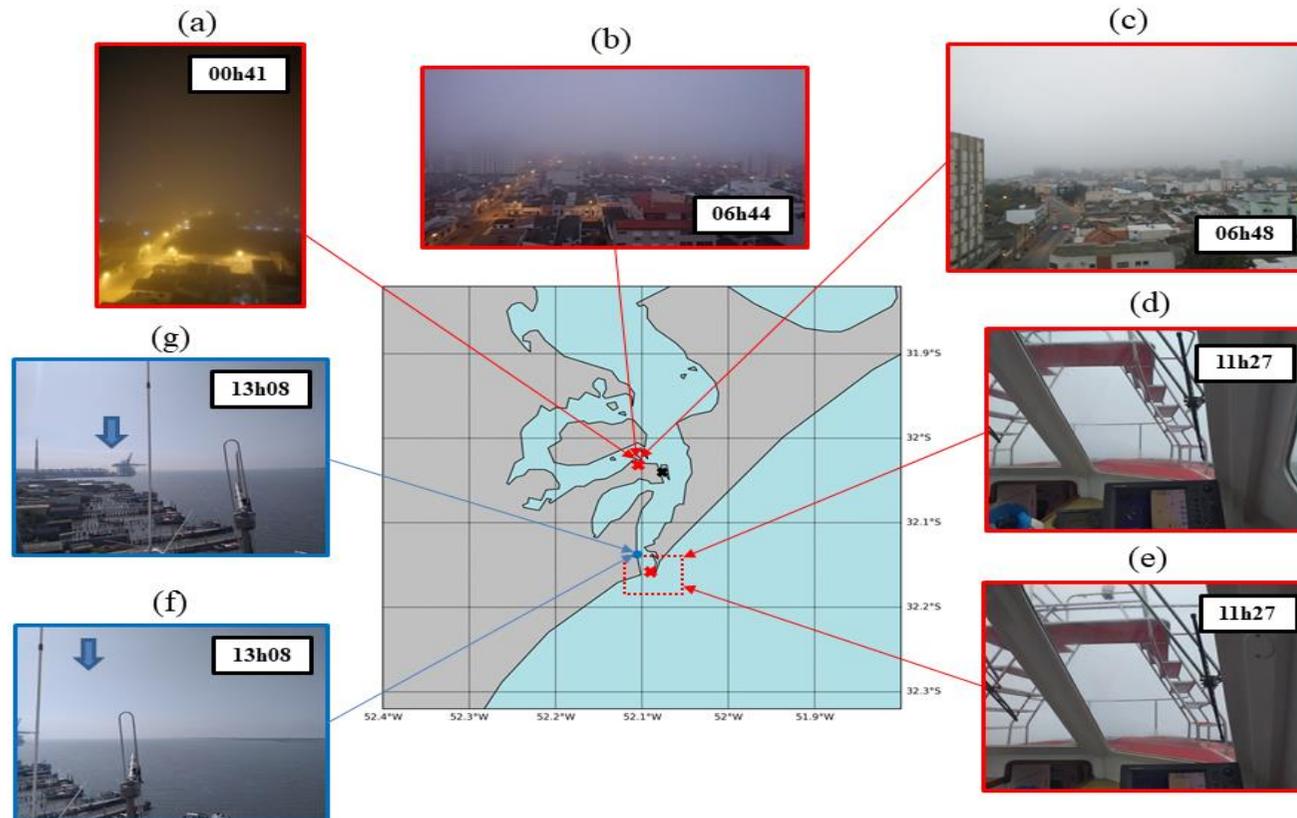


Figura 56 - Diagrama ilustrativo da ocorrência do nevoeiro na cidade de Rio Grande no dia 28/08/2019. A localização aproximada do local de registro de cada fotografia é destacado na figura, bem como a localização do Porto de Rio Grande (cruz preta).

5.2.2.2 Resultados numéricos

Nesta seção serão avaliados os resultados obtidos a partir das simulações com o modelo WRF para o período D. Os campos a seguir são referentes ao domínio 3, com resolução horizontal de 1km. Foram selecionados horários representativos de estágios distintos da evolução do nevoeiro avaliado, determinados a partir dos registros de condição de navegação e dos registros observacionais obtidos. Além da avaliação espacial a partir destes campos, serão apresentados perfis verticais e séries temporais para o ponto de grade mais próximo da estação meteorológica da Praticagem. As figuras referentes a toda a duração do período D estão disponíveis para consulta no Apêndice M em intervalos de 3 em 3 horas.

De acordo com o observado na área de estudo, o nevoeiro iniciou sua formação no início da madrugada do dia 28 de agosto de 2019. Entretanto, a simulação do modelo WRF indicou a presença do fenômeno em Rio Grande na noite do dia anterior (Figura 57).

Às 21h do dia 27 de agosto de 2019, foram simuladas condições favoráveis à presença de nevoeiro na região estuarina da Lagoa dos Patos. Foi possível verificar que o modelo WRF identificou a presença de água líquida próximo à superfície (Figura 57a), predomínio de ventos fracos (Figuras 57c e 57d) e elevada umidade relativa, principalmente sobre a superfície continental (Figura 57c). A direção do vento, predominantemente de leste neste instante (Figuras 57c e 57d), pode se mostrar favorável a um aporte de umidade do oceano e também da Lagoa dos Patos (tendo em vista o ponto da estação da Praticagem). Além disso, a direção do vento analisada em conjunto com o campo de temperatura apontou um padrão sugestivo de advecção de ar mais frio em direção à costa e ao continente (Figura 57d).

Neste mesmo horário, as estimativas de visibilidade também caracterizaram a presença do nevoeiro na área de estudo (Figuras 57e e 57f). Assim como foi destacado em alguns casos anteriores, a restrição de visibilidade obtida pelo método de Kunkel (Figura 57f) se mostrou mais intensa do que a do FSL (Figura 57e). Além disso, a estimativa do FSL identificou a presença do nevoeiro predominantemente sobre a superfície continental, com pequena extensão à área costeira (Figura 57e). Em contrapartida, a estimativa de Kunkel apontou para a presença de uma intensa restrição de visibilidade em quase todo o domínio avaliado, inclusive sobre o oceano (Figura 57f).

Os perfis verticais para este horário apontaram para a presença de nuvem próximo à superfície, com topo em aproximadamente 270m (Figura 58). Além disso, foi possível verificar a caracterização de uma atmosfera úmida e com ventos fracos em seus primeiros 200m pelo modelo WRF.

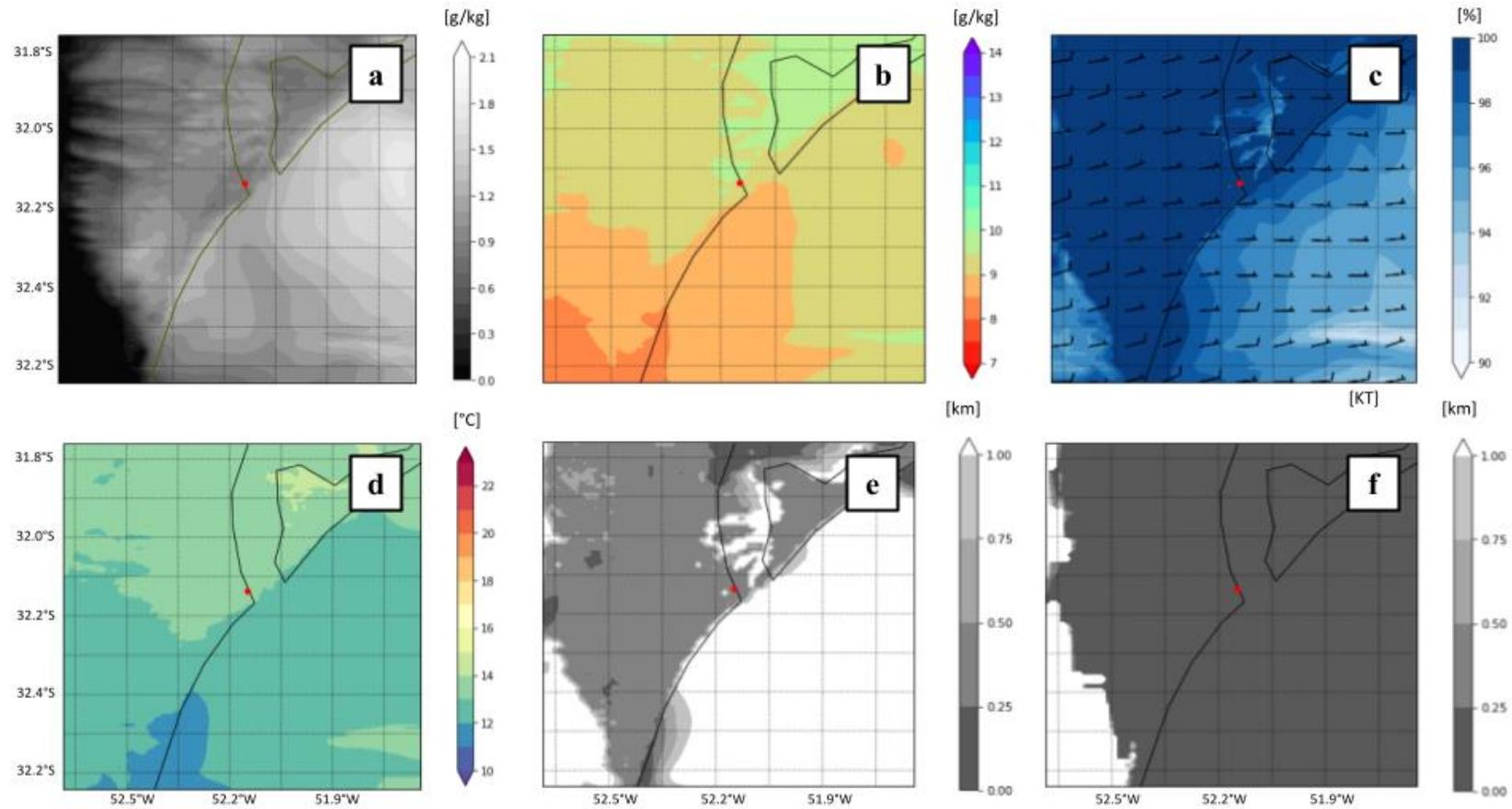


Figura 57 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 27/08/2019 às 21h (hora local).

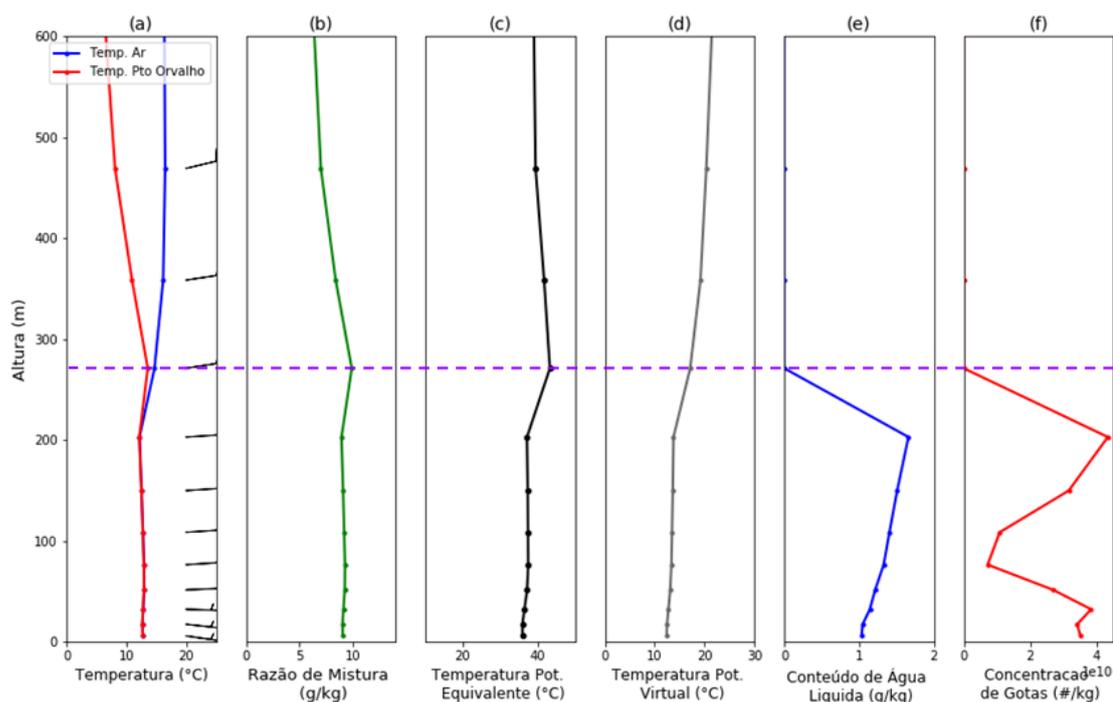


Figura 58 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 27/08/2019 às 21h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

No horário de 01h do dia 28 de agosto, horário mais próximo ao primeiro registro fotográfico do evento de nevoeiro, os campos meteorológicos indicaram a permanência e/ou desenvolvimento do fenômeno (Figura 59). Foi possível perceber um aumento do conteúdo de água líquida no primeiro nível do modelo (Figura 59a) e uma expansão da área de máxima umidade relativa (Figura 59c). Foram verificados, em conjunto, um máximo de conteúdo de água líquida e um mínimo de razão de mistura na mesma área (Figuras 59a e 59b). Tal configuração se mostra representativa de um processo de conversão de vapor d'água em água líquida. Adicionalmente, valores mais baixos de temperatura do ar foram simulados na região supracitada (Figura 59d), caracterizando um processo de resfriamento em relação aos horários anteriores. Destaca-se ainda a simulação de ventos fracos e de quadrante nordeste no domínio avaliado (Figura 59c).

As estimativas de visibilidade confirmaram a simulação do desenvolvimento do nevoeiro avaliado com relação ao horário anterior, apontando para a expansão do fenômeno e para a intensificação da restrição de visibilidade associada ao mesmo (Figuras 59e e 59f).

A figura 60 apresenta o perfil vertical da atmosfera neste mesmo instante. Foi possível identificar nos primeiros 200 metros da atmosfera condições de elevada umidade e ventos de fraca intensidade (Figura 60a). O perfil de vento permitiu a verificação de uma tendência de giro anti-horário com a altura, caracterizando uma configuração indicativa de advecção de ar quente e, conseqüentemente, condições atmosféricas estáveis e favoráveis à presença e manutenção do nevoeiro (Figura 60a). Além disso, foi verificada a presença de água líquida e gotas, caracterizando a presença de nuvem próxima à superfície (Figuras 60e e 60f). O topo teórico desta camada de nuvem estratiforme permaneceu evidenciado na altura aproximada de 270m.

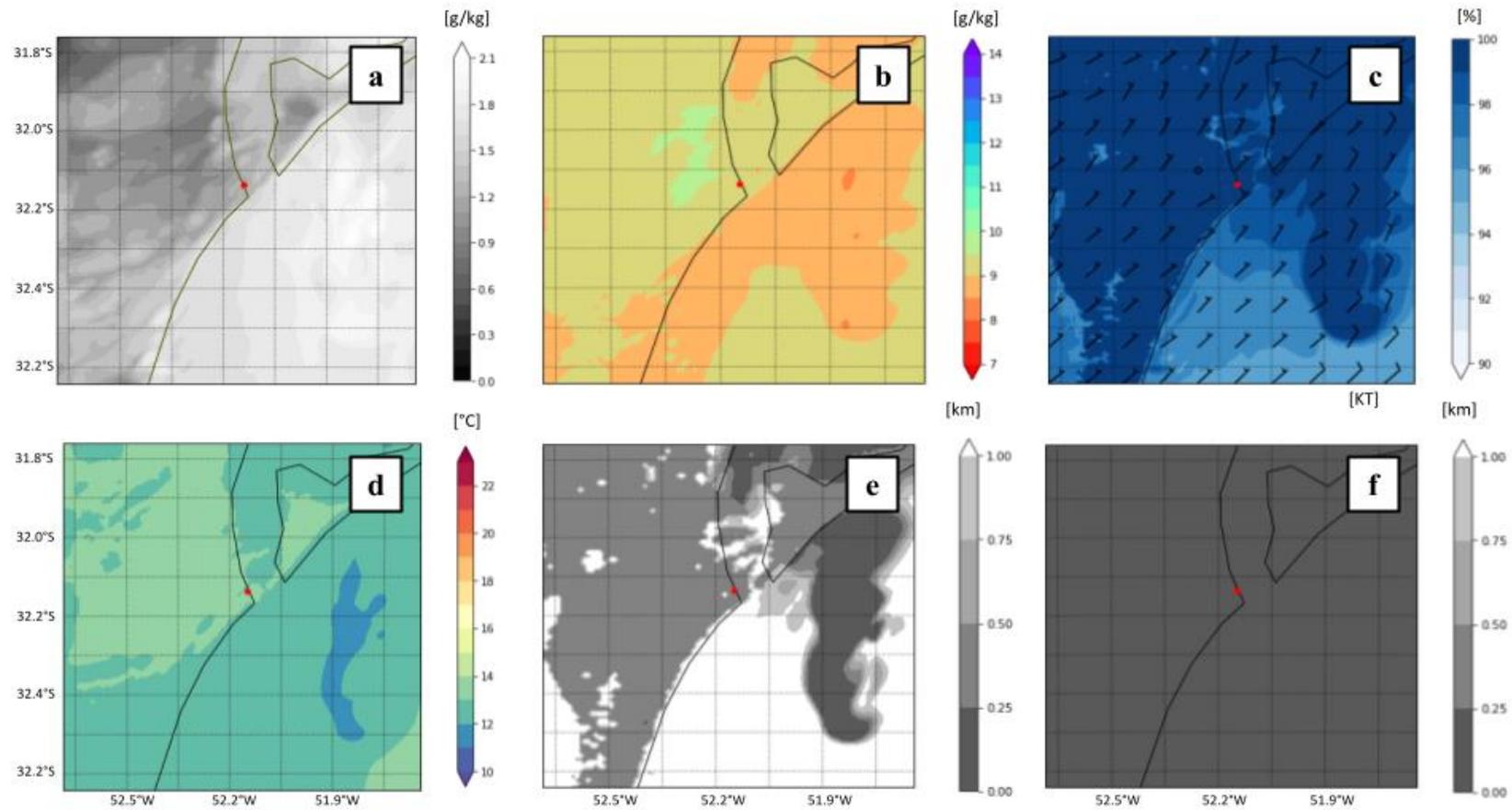


Figura 59 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 01h (hora local).

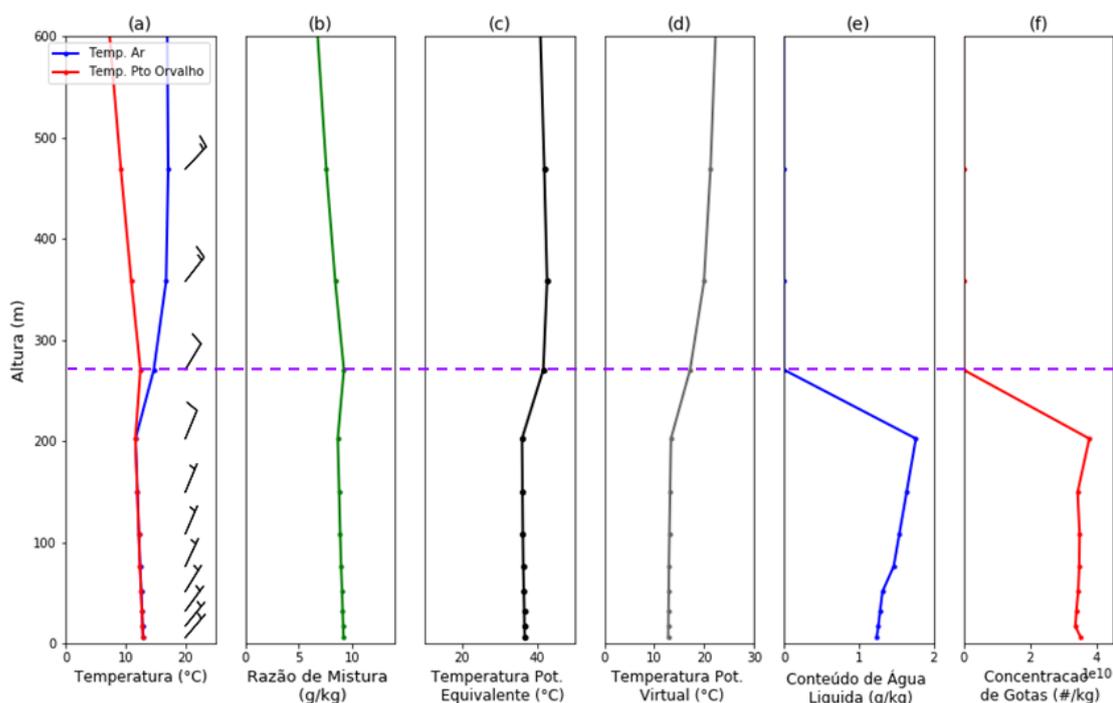


Figura 60 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 01h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

O intervalo de Impraticabilidade registrado durante o período D se deu entre 07h e 11h15 (hora local) do dia 28 de agosto de 2019, conforme evidenciado anteriormente. Desta forma, os campos a seguir são representativos das simulações do modelo WRF para o horário de início do evento de restrição de visibilidade intensa (Figura 61).

Às 07h, os processos de resfriamento e conversão de vapor d'água em água líquida próximo à superfície permaneceram destacados pelas simulações (Figuras 61a, 61b e 61d). Valores elevados de umidade relativa e ventos fracos e de quadrante norte também foram evidenciados (Figura 61c).

Os campos de visibilidade também caracterizaram a condição de Impraticabilidade, apontando para restrições de visibilidade horizontal para 500 m ou menos na área de estudo (Figuras 61e e 61f). Um aspecto relevante de destacar consiste na evolução caracterizada pela estimativa de visibilidade do FSL (Figura 61e), que identificou valores de visibilidade de 250 m ou menos sobre o oceano, bem próximo à entrada do canal de acesso à Lagoa dos Patos. Tal característica se mostrou de acordo com o reporte das condições de visibilidade pelo navio

impossibilitado de acessar o canal e que estava aguardando em alto mar condições favoráveis de navegação.

Novamente, o nevoeiro caracterizado pelo método de Kunkel (Figura 61f) apresentou maior extensão espacial e se mostrou mais intenso que o descrito pela metodologia do FSL (Figura 61e).

Os perfis verticais apontam para um aumento da espessura do nevoeiro avaliado, com topo teórico da nuvem aproximadamente no nível de 350m (Figuras 62e e 62f), sendo este um dos maiores valores deste parâmetro verificado nestas simulações. Tal aumento de espessura pode estar associado a um aumento na velocidade do vento nos primeiros metros da atmosfera (Figura 62a), promovendo uma maior mistura na camada. Além disso, os gradientes de razão de mistura e das temperaturas potenciais equivalente e virtual também são praticamente nulos nos primeiros 300 metros da atmosfera (Figuras 62b, 62c e 62d), podendo ser indicativos desta mistura.

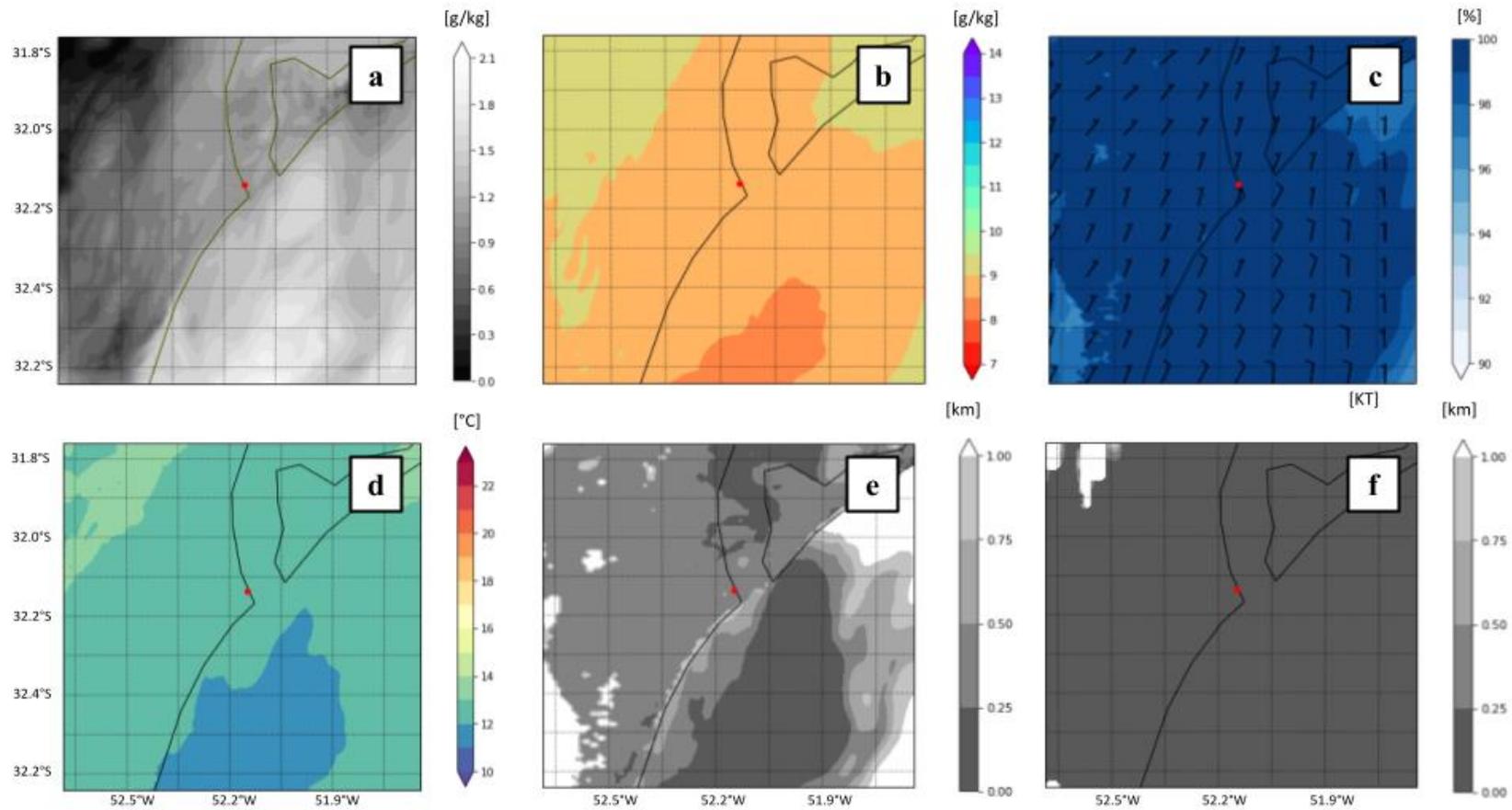


Figura 61 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 07h (hora local).

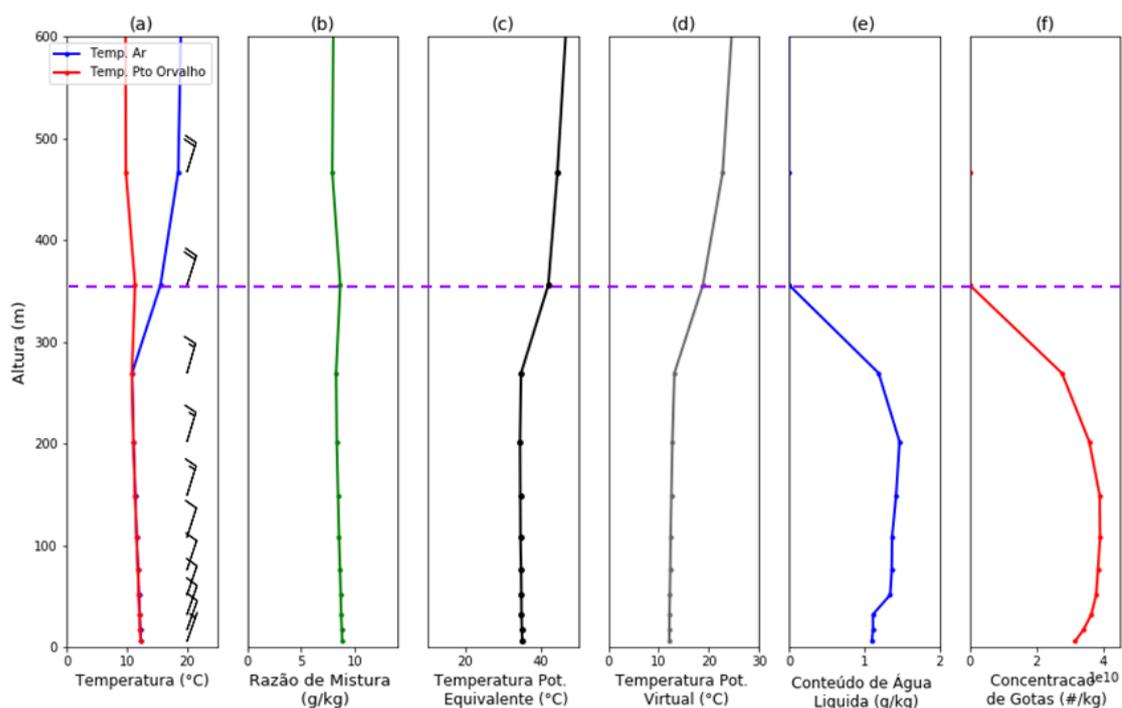


Figura 62 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 07h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

No horário de 11h do dia 28 de agosto, momento mais próximo ao retorno à condição de Praticabilidade, o modelo WRF apontou para indicativos do início do processo dissipativo do nevoeiro avaliado na área de estudo. A partir da figura 63 foi possível perceber uma ligeira aceleração dos ventos na região, bem como uma redução na área de máxima umidade relativa (Figura 63). Além disso, o processo de resfriamento e o mecanismo de conversão de vapor d'água em água líquida (Figuras 63a, 63b e 63d), característicos da formação e desenvolvimento de alguns tipos de nevoeiro, não se mostraram evidentes.

Ambas estimativas de visibilidade apontaram para uma redução da área de atuação do nevoeiro neste estágio de seu ciclo de vida, apesar de ainda caracterizar condições de visibilidade igual ou inferior a 500 m nas proximidades da região estuarina da Lagoa dos Patos (Figuras 63e e 63f). Desta forma, o WRF apresentou habilidade em detectar o início do processo dissipativo deste fenômeno.

Destaca-se que, a partir do campo de visibilidade FSL (Figura 63e), foi possível perceber a ausência ou dissipação do nevoeiro sobre o oceano, indicando melhores condições

de navegação na entrada do canal de acesso à região portuária de Rio Grande. Tendo o conhecimento do tipo de manobra a ser realizada imediatamente após o retorno à Praticabilidade (entrada de navio), foi possível avaliar que o modelo WRF apresentou bom desempenho nesta caracterização.

Os perfis verticais no ponto mais próximo à localização da torre de controle da Praticagem apresentaram-se muito semelhantes à configuração obtida no horário avaliado anteriormente (Figura 64).

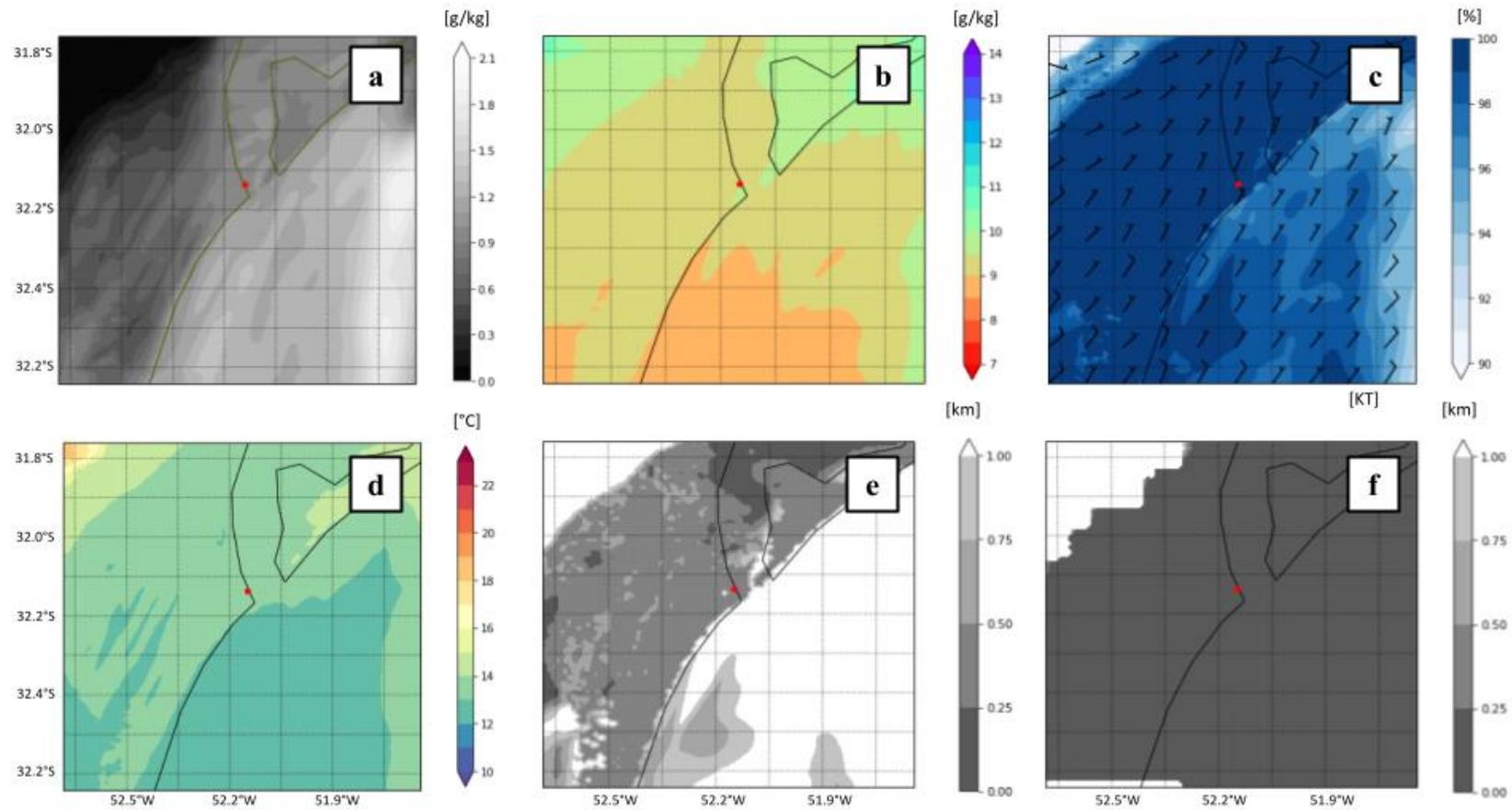


Figura 63 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08//2019 às 11h (hora local).

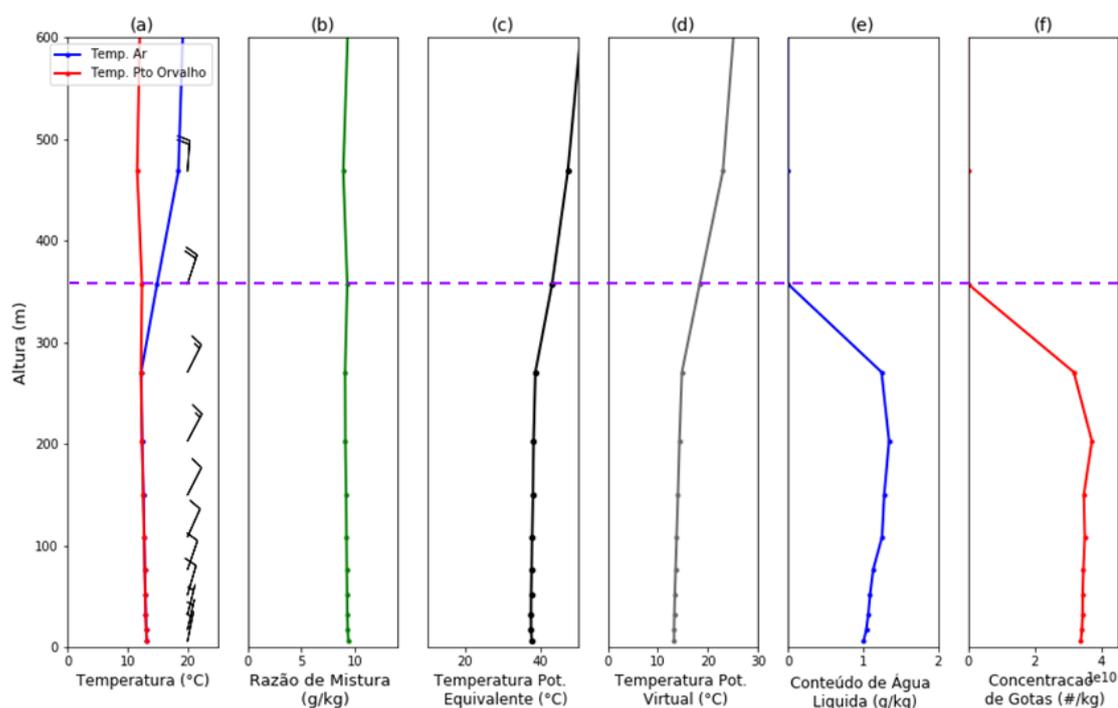


Figura 64 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 11h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

Às 15h, após o retorno das atividades de Praticagem, o modelo WRF simulou condições indicativas do processo de dissipação do nevoeiro sobre a área portuária de Rio Grande (Figura 65). Dentro do canal foi verificada a redução do conteúdo de água líquida perto da superfície. Adicionalmente, a área de máxima umidade relativa apresentou menor extensão. Ventos fracos e de quadrante norte foram destacados na área de estudo.

Os campos de visibilidade mostram diminuição da área de atuação do nevoeiro e mostram a dissipação do fenômeno no canal de acesso ao porto (Figuras 65e e 65f). Entretanto, divergem em alguns pontos. A estimativa de Kunkel apontou intensa restrição de visibilidade sobre o oceano, com valores para este parâmetro iguais ou inferiores a 250m (Figura 65f). Em contrapartida, a visibilidade pelo FSL ilustrou uma condição favorável às atividades dos Práticos da Barra de Rio de Grande, não identificando a presença de nevoeiro no oceano, próximo à entrada do canal de acesso à área portuária, bem como dentro do mesmo (Figura 65e).

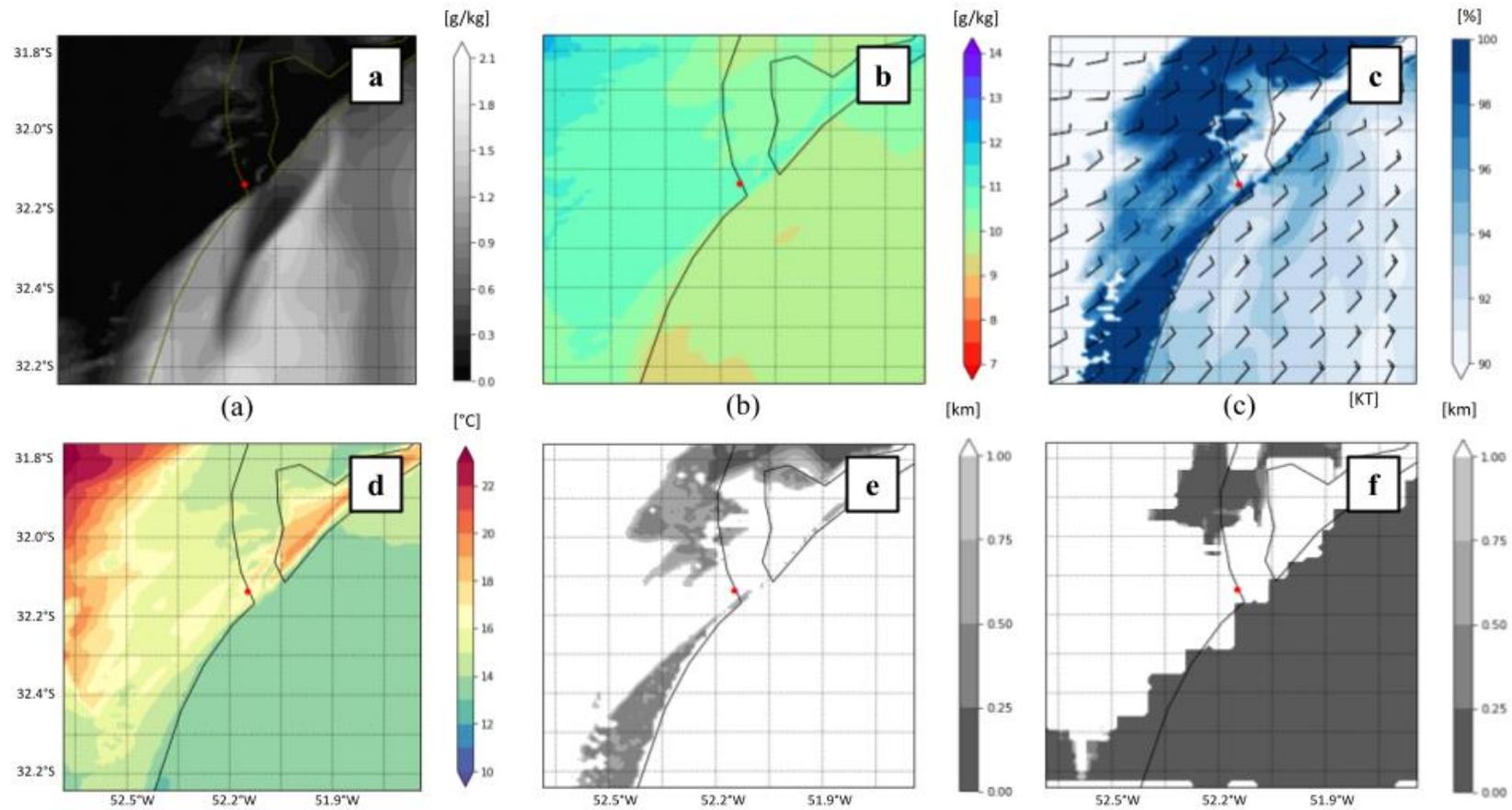


Figura 65- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 15h (hora local).

Os perfis verticais para este horário também apresentaram indicativos do processo de dissipação do nevoeiro, com diminuição da sua espessura e significativas reduções no conteúdo de água líquida e na concentração de gotas em relação a horários anteriores (Figura 66).

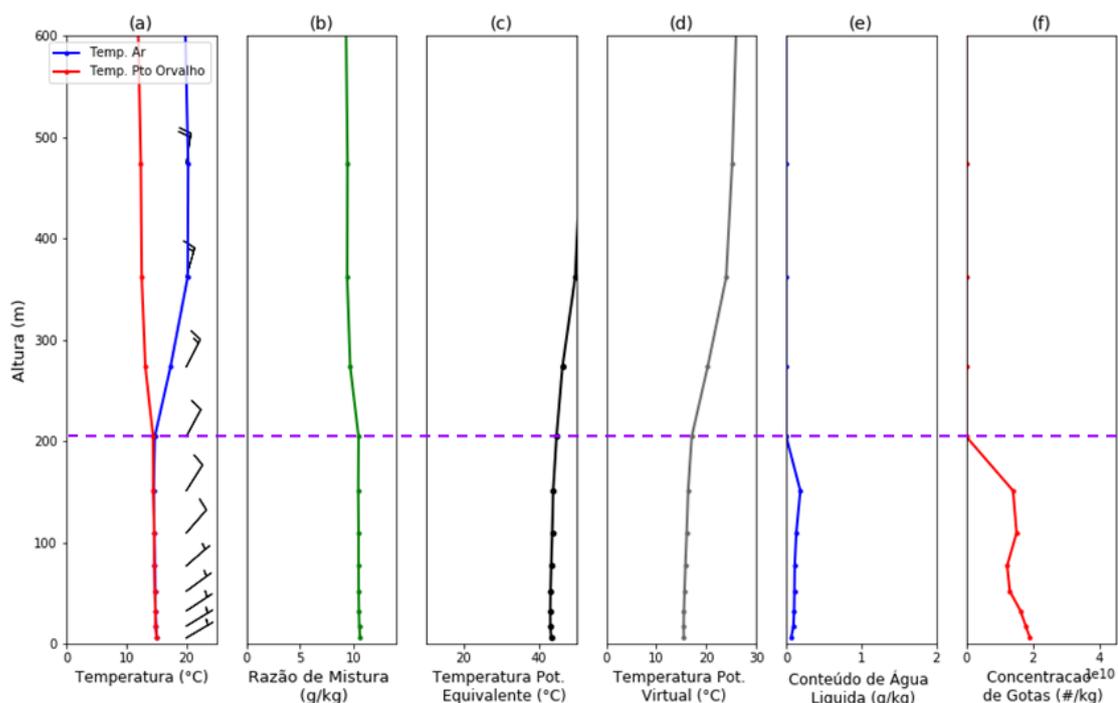


Figura 66 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 15h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

Buscando incrementar a avaliação espacial das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF feita anteriormente, os resultados a seguir compreendem uma análise pontual das mesmas. A partir das figuras a seguir, é possível avaliar a evolução temporal de parâmetros meteorológicos e de estabilidade no ponto de grade mais próximo à estação meteorológica da Praticagem e nos outros 4 pontos representativos, conforme exposto pela figura 10. O intervalo compreendido nesta etapa do trabalho se inicia às 21h do dia 27 de agosto de 2019 e se encerra às 21h do dia seguinte. Ressalta-se que o intervalo em cinza destaca a duração da condição de Impraticabilidade. Além disso, as séries temporais para o ponto central (próximo às coordenadas da estação meteorológica da Praticagem) encontram-se destacadas em vermelho.

De maneira geral, as séries temporais simuladas de vento a 10 metros apresentaram concordância entre os pontos avaliados. O modelo WRF simulou o predomínio de ventos de fraca intensidade em todos os pontos (Figuras 67 e 68a) entre a noite do dia 27 de agosto e o

início da tarde do dia 28 de agosto, concordando também com os resultados obtidos a partir dos dados observados. Destaca-se que a intensidade do vento se mostrou mais elevada nos pontos B e C em todo o intervalo avaliado (Figuras 67 e 68a). Nestes pontos, a partir da tarde do dia 28 de agosto, foram simulados ventos de intensidade moderada. Com relação à direção, foi possível verificar predomínio de ventos de quadrante norte simulados na região avaliada (Figura 67). Destaca-se que, assim como evidenciado pelos campos meteorológicos, na noite do dia 27 de agosto, ventos de leste/nordeste podem ter contribuído com um aporte de umidade na região (Figura 67).

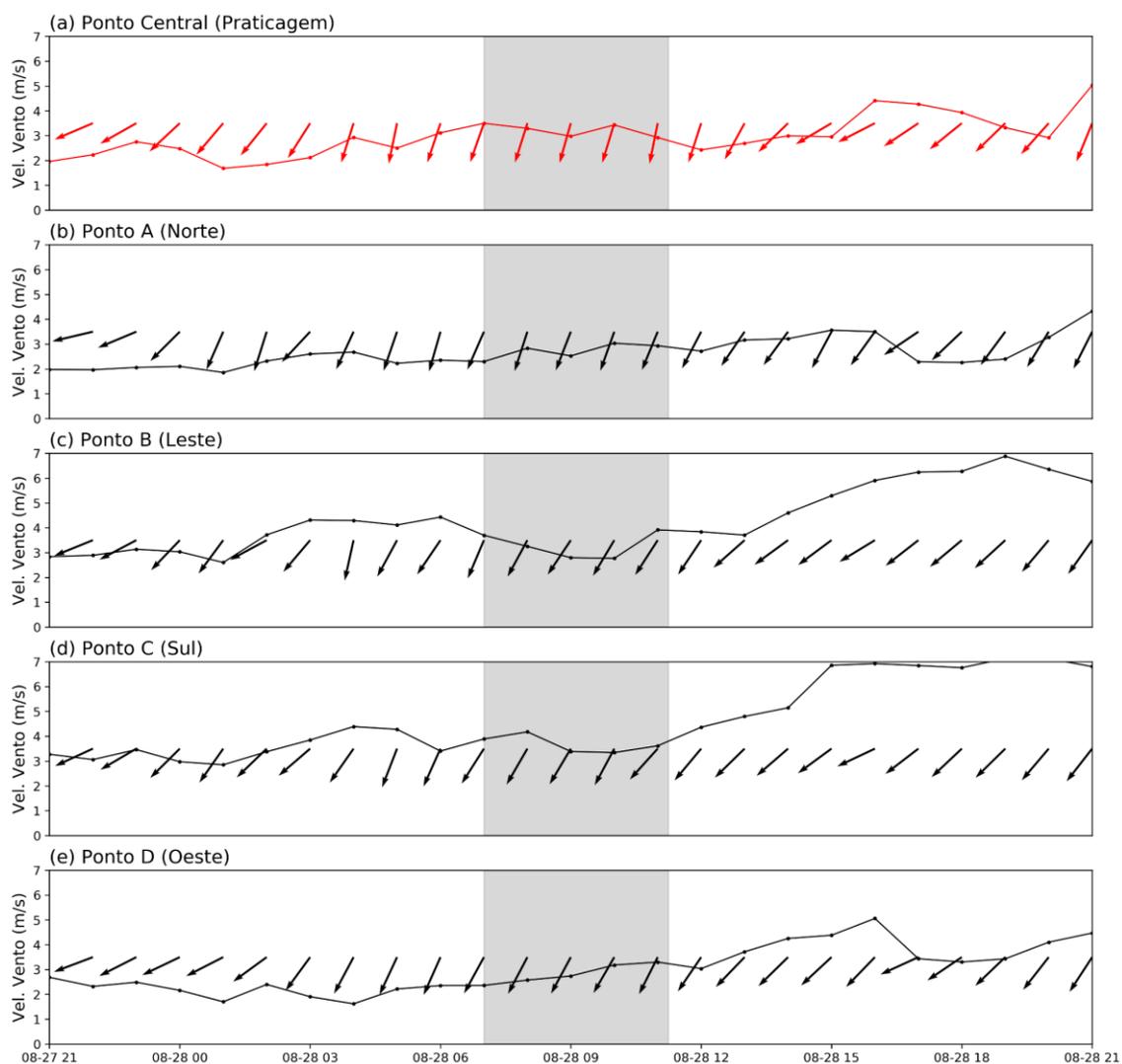


Figura 67 - Séries temporais de vento a 10 metros (direção e intensidade) para o ponto mais próximo à Torre de Controle da Praticagem (a) e demais pontos representativos (b,c,d e e) simuladas pelo modelo WRF para o período D. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

As séries temporais de umidade relativa do ar (Figuras 68b e 68c) mostraram que o modelo WRF apresentou habilidade na representação de condições favoráveis à ocorrência de nevoeiro. Desde a noite do dia 27 de agosto foram simulados valores elevados deste parâmetro, iguais ou próximos a 100%, na região de estudo. Nos pontos B e C, os máximos da variável foram alcançados posteriormente, na madrugada de 28 de agosto. Nestes mesmos pontos, a umidade apresentou tendência de redução a partir da manhã de 28 de agosto. Nos demais

pontos, a variável apresentou-se muito elevada até a tarde do dia 28 de agosto, caracterizando a presença do nevoeiro.

Destaca-se que a série referente ao ponto central não caracterizou o processo dissipativo do fenômeno através da variável umidade relativa (Figuras 68b e 68c). Em contrapartida, nos pontos A e D foi simulada acentuada queda nos valores deste parâmetro na tarde do dia 28 de agosto, marcando condições favoráveis à dissipação do nevoeiro.

Assim como para o parâmetro anterior, as séries de conteúdo de água líquida (Figura 68d) caracterizaram a ocorrência do nevoeiro na região de estudo, destacando a presença de água líquida em níveis baixos da atmosfera durante o período de avaliação, inclusive no intervalo de restrição de visibilidade. A partir do horário de retorno à condição de Praticabilidade, foi verificada tendência de redução desta variável em todos os pontos avaliados. Tal configuração se mostrou representativa da dissipação do fenômeno avaliado.

Além disso, as séries temporais de conteúdo de água líquida analisadas em conjunto com as séries de razão de mistura (Figuras 68d e 68e, respectivamente), apontaram para uma representação do processo de conversão de vapor d'água em água líquida e vice-versa em baixos níveis da atmosfera durante o intervalo avaliado. Foi verificado que um processo de aumento do conteúdo de água líquida se deu acompanhado de uma tendência de redução do parâmetro razão de mistura horas antes do registro da restrição de visibilidade. O sinal oposto é verificado nas horas seguintes, caracterizando a evolução do fenômeno e também seu processo dissipativo.

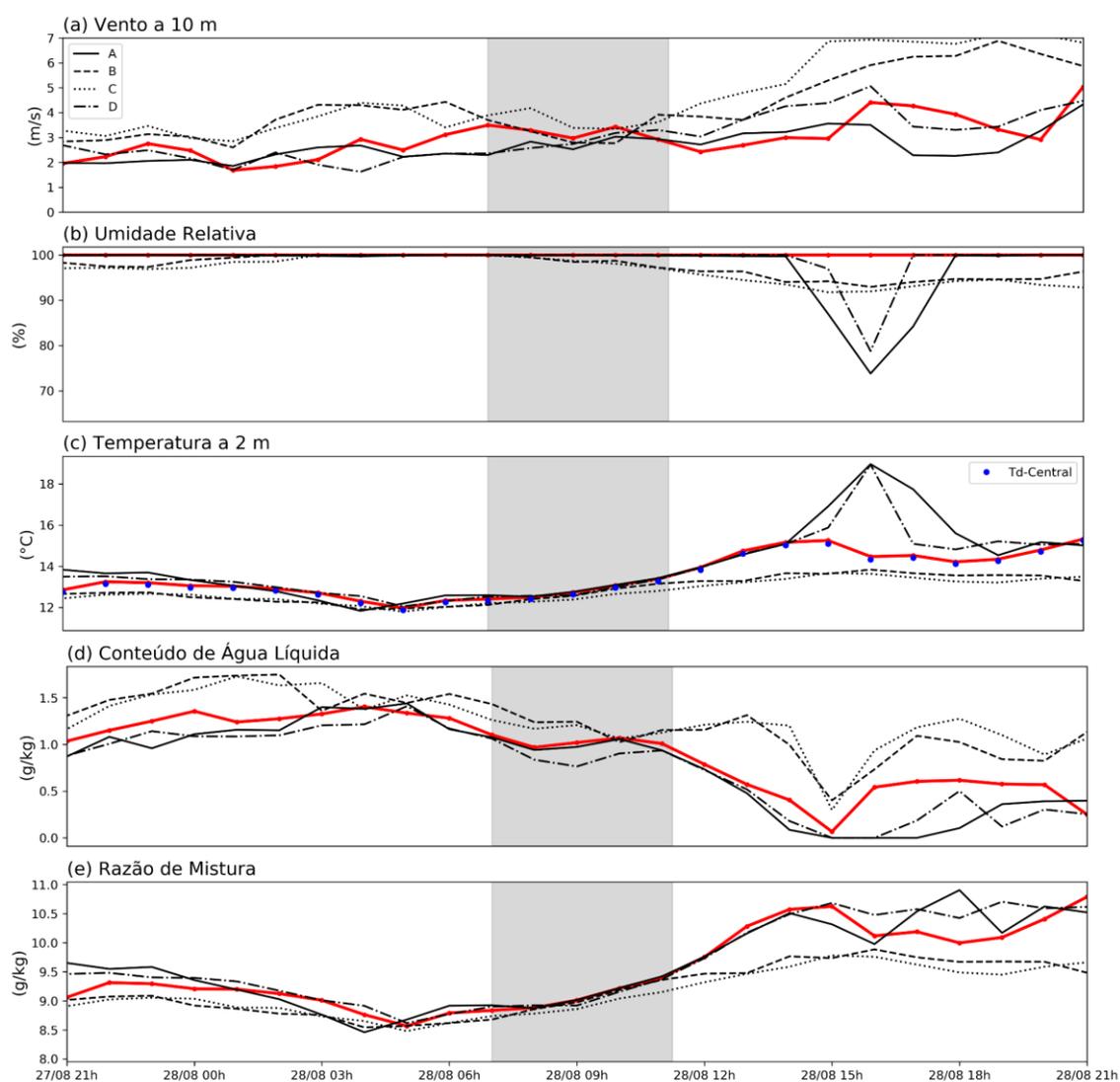


Figura 68 - Séries temporais de velocidade do vento a 10 metros (a), umidade relativa do ar a 2 metros (b), temperatura do ar (c), conteúdo de água líquida (d) e razão de mistura (e) simuladas pelo modelo WRF para o período D. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

Os resultados para o índice FSI (Figura 69a) mostraram que o modelo WRF simulou probabilidade alta ($FSI < 31$, linha laranja tracejada) de formação de nevoeiro na região ao longo de todo o intervalo avaliado para os pontos central, B e C. Nos pontos A e D foi verificada uma redução desta probabilidade durante a tarde de 28 de agosto, caracterizando probabilidade média neste intervalo temporal após o fim do evento. Entretanto, antes e durante a restrição de visibilidade reportada, todos os pontos avaliados apresentaram valores de FSI indicando elevada probabilidade de ocorrência de nevoeiro.

As estimativas de visibilidade horizontal de Kunkel e do FSL também foram analisadas (Figuras 69b e 69c, respectivamente). Os limiares de 1 km e 500 metros foram destacados em suas séries temporais (linha azul e linha verde tracejadas, respectivamente) com o objetivo de avaliar os intervalos de tempo que o modelo simulou a presença de nevoeiros e nevoeiros intensos na região de interesse deste estudo.

A estimativa de visibilidade de Kunkel (Figura 69b) é função do conteúdo de água líquida e, por conta da simulação de valores nulos ou bem próximos a 0 para esta variável, o cálculo da visibilidade horizontal apresentou falhas ao longo de sua evolução temporal. Entretanto, durante o período em que foi possível calcular este parâmetro, notou-se que a série temporal apontou valores de visibilidade abaixo de 500 metros durante todo o intervalo avaliado e em todos os pontos. O intervalo com “falha” nos dados do modelo para esta estimativa indica que o parâmetro avaliado apresentou tendência a infinito, descaracterizando a ocorrência de nevoeiro. Assim, foi possível ver que o modelo identificou a dissipação do fenômeno na tarde de 28 de agosto ou a redução de sua área de atuação, uma vez que tal padrão foi observado apenas em alguns pontos.

Os resultados obtidos para a estimativa do FSL mostraram a habilidade do modelo em identificar e caracterizar bem os eventos de nevoeiro a partir desta metodologia (Figura 69c). Assim como verificado através das séries de umidade relativa, nos pontos central, A e D houve a identificação prévia do fenômeno em relação aos pontos B e C. No ponto central, esta estimativa caracterizou a ocorrência de nevoeiro em todo o intervalo avaliado por estes gráficos. Nos pontos A e D a restrição intensa de visibilidade foi evidenciada entre a noite do dia 27 de agosto e a tarde do dia 28 de agosto de 2019. Poucas horas após o retorno à Praticabilidade, o modelo simulou melhorias nas condições de visibilidade em tais pontos, descaracterizando a presença do fenômeno e evidenciando a sua dissipação. Em contrapartida, a restrição de visibilidade simulada pelo modelo WRF nos pontos B e C apresentou menor duração que para os demais pontos, indicando o posicionamento do nevoeiro em uma área mais continental e dentro do canal de acesso ao porto.

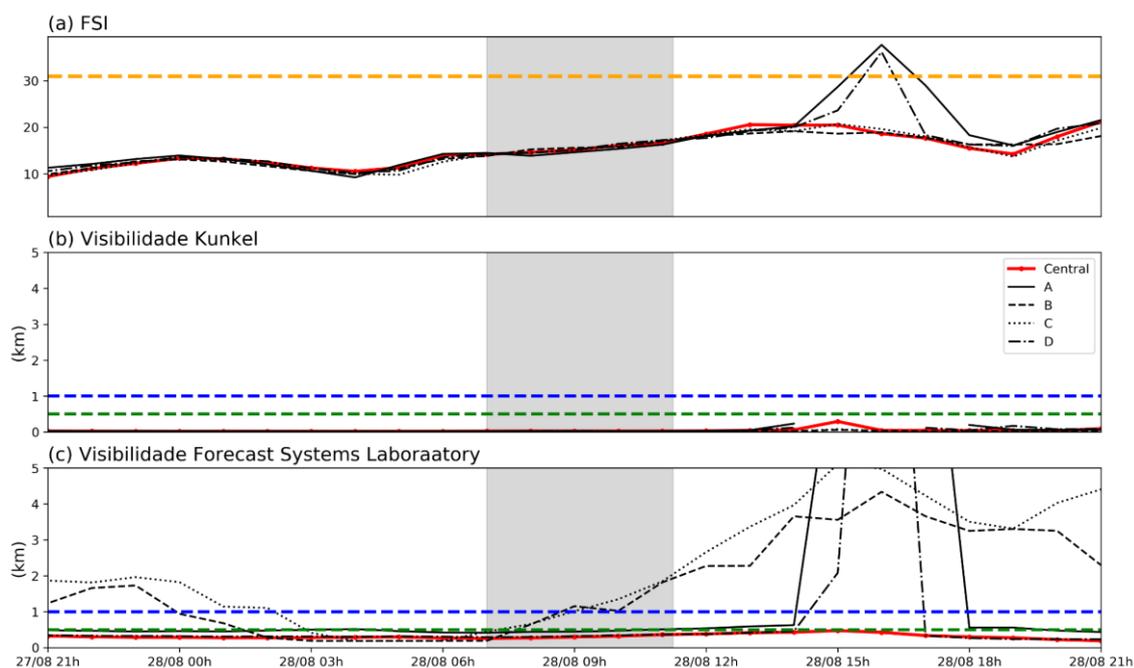


Figura 69 - Séries temporais do FSI (a) e das estimativas de visibilidade de Kunkel (b) e do FSL (c) obtidas a partir do modelo WRF para o período D. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

Assim como no evento anterior, a avaliação do número de Richardson como parâmetro para caracterizar a estabilidade atmosférica foi realizada. Reitera-se que esta análise foi conduzida a partir das classes de Pasquill, conforme descrito pela tabela 8, e as linhas coloridas nos gráficos ilustram os limites desta classificação. Valores abaixo da linha vermelha indicam condição muito instável; entre as linhas vermelha e amarela apontam instabilidade; entre a rosa e a amarela, caracterizam condições moderadamente instáveis; entre verde e rosa, condição de neutralidade; entre verde e azul, estabilidade e acima da linha azul, condição muito estável.

Da mesma forma, o número de Richardson foi avaliado em 3 níveis diferentes para o ponto próximo à estação meteorológica da Praticagem. Entre os dois primeiros níveis (Figura 70a) e entre o primeiro e o terceiro níveis do modelo (Figura 70b), foi possível perceber que o modelo WRF simulou alternância entre as condições de estabilidade, variando entre muito estável e neutra nas horas precedentes ao evento de restrição de visibilidade avaliado. Durante o evento, o predomínio foi de condições estáveis nas duas avaliações. Em contrapartida, após o término do evento, foi verificado predomínio de condições de neutralidade.

Entre o primeiro e o sexto nível (Figura 70c), foi possível verificar predomínio de condições estáveis durante todo o intervalo avaliado. Assim, não apresentou sensibilidade para distinguir os processos inerentes a este evento, sem indicativos para sua dissipação, por exemplo.

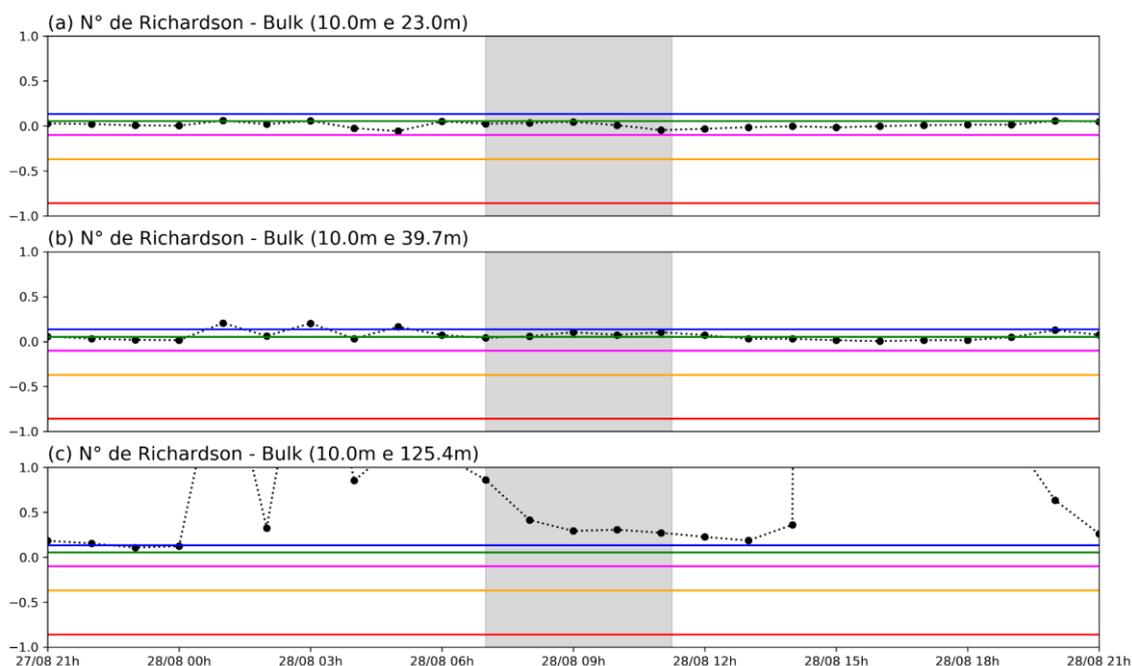


Figura 70 - Séries temporais do número de Richardson em diferentes níveis obtidos a partir da simulação do modelo WRF para o período D para o ponto de grade mais próximo à torre de controle da Praticagem. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. As linhas coloridas marcam limiares característicos das classes de estabilidade de Pasquill.

5.2.3 Avaliação estatística da previsão numérica de nevoeiros intensos pelo modelo WRF

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para a análise estatística do desempenho das simulações de nevoeiros intensos a partir do modelo WRF.

A partir da tabela 15 foi possível verificar que a estimativa de visibilidade do FSL se mostrou o parâmetro com melhores métricas estatísticas visando a verificação da previsão de ocorrência de nevoeiros, seguida pela de estimativa de visibilidade de Kunkel. As duas estimativas apresentaram resultados semelhantes para diversas métricas estatísticas, sendo ligeiramente superiores tendo em vista a previsão do fenômeno para a estimativa FSL. Os

resultados combinam significativas taxa de previsões corretas e probabilidade de detecção do fenômeno, bem como o menor índice de alarmes falsos e baixa probabilidade de falsa detecção. Além disso, apresentam viés ligeiramente superiores a 1, indicando uma pequena superestimativa da quantidade de horas de ocorrência de nevoeiros intensos. Destaca-se ainda que a previsão de nevoeiro pelo modelo WRF a partir da estimativa do FSL apresentou *odds ratio* superior aos demais parâmetros avaliados, podendo assim, ser caracterizada como a previsão mais precisa.

O FSI, apesar de apresentar a maior probabilidade de detecção do evento, esteve associado também a uma elevada taxa de alarme falso e significativa probabilidade de falsa detecção. Tal característica aponta a uma superestimativa da previsão de nevoeiros por este índice ou predomínio de identificação de probabilidades elevadas da ocorrência do fenômeno.

Tabela 15 - Métricas estatísticas para a previsão de nevoeiros intensos em Rio Grande a partir do modelo WRF.

| Métrica | FSL | Kunkel | FSI |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| PC | 0,71 | 0,70 | 0,38 |
| TS | 0,42 | 0,39 | 0,29 |
| Θ | 7,18 | 5,53 | 3,14 |
| Bias | 1,58 | 1,55 | 3,18 |
| FAR | 0,52 | 0,54 | 0,70 |
| HR | 0,76 | 0,71 | 0,94 |
| POFD | 0,30 | 0,31 | 0,83 |

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho, buscou-se avaliar a habilidade do modelo WRF na simulação de nevoeiros na cidade de Rio Grande/RS. Adicionalmente, foi realizada uma caracterização da ocorrência de nevoeiros na região de estudo.

Os resultados da etapa inicial deste estudo apontam para a maior ocorrência de nevoeiro na região entre os meses entre maio e setembro, com máximo de frequência nos meses de junho e julho, confirmando resultados obtidos em estudos anteriores. O intervalo mais frequente para o início da dissipação do fenômeno e consequente melhoria nas condições de visibilidade para navegação consiste entre 08h e 11h (hora local). Além disso, foram verificados eventos de nevoeiro com duração superior a 24 horas na região, mais frequentes no mês de julho.

Os dados observados de vento e corrente possibilitaram a constatação do predomínio de ventos de nordeste na região estuarina da Lagoa dos Patos e a presença de correntes mais intensas nesta área, em comparação com outros pontos mais distantes da entrada do canal de acesso ao porto de Rio Grande. Tal resultado concorda com os apontamentos realizados em estudos pretéritos.

Durante os eventos de nevoeiro de longa duração, verificou-se predomínio de ventos de quadrante NE, indicativos de uma contribuição da Lagoa dos Patos na ocorrência dos fenômenos, apontando para uma advecção de ar da região da laguna, favorecendo um aporte de umidade e a manutenção do fenômeno por muitas horas na área. Além disso, ventos de N foram verificados no horário próximo à dissipação de tais eventos, apresentando potencial para interromper o aporte de umidade e colaborando com a dissipação do fenômeno. Durante estes eventos, ventos calmos ou fracos predominaram, entretanto, também foram observados ventos de intensidade moderada na região, que pode ser indicativo do caráter advectivo de alguns destes fenômenos observados e de uma contribuição para a mistura e adensamento do fenômeno.

Com relação aos eventos de nevoeiros em geral, foi possível destacar a ocorrência de ventos moderados durante a ocorrência do fenômeno em todos os pontos de observação da

variável, indicando a ocorrência de nevoeiros com características advectivas. Entretanto, de maneira geral, o predomínio é de ventos calmos ou fracos, importantes conceitualmente para a formação de nevoeiros de radiação. Adicionalmente, ventos de NE se mostram predominantes na região de estudo também durante a ocorrência dos fenômenos. Em grande parte dos pontos de observação foi verificada maior frequência de ocorrência de correntes menos intensas próximo ao horário de dissipação do fenômeno do que no período total de duração do mesmo.

Foram selecionados 4 intervalos (A, B, C e D) onde foram registrados eventos de nevoeiro para simulação a partir do modelo WRF. Em todos eles foi possível perceber a atuação de um sistema de alta pressão na região de estudo e ventos fracos a moderados.

O período C foi designado para realização da avaliação da sensibilidade do modelo numérico aos parâmetros de resolução vertical. De maneira geral, destaca-se que o modelo WRF foi capaz de simular a ocorrência deste nevoeiro na área de estudo, bem como indicativos dos processos de formação e dissipação em todas as configurações avaliadas. Foi possível perceber que o aumento da resolução vertical em conjunto com uma redução na altura do primeiro nível do modelo deu origem a resultados mais adequados na representação do horário de formação do nevoeiro na região de estudo. Adicionalmente, a altura do primeiro nível do modelo apresentou-se importante na avaliação da intensidade da restrição de visibilidade associada ao nevoeiro, de modo que valores mais baixos deste parâmetro podem estar associados a simulações de nevoeiros mais intensos.

Os resultados do modelo WRF para o período A (apresentado no Apêndice J) destacaram a habilidade do modelo numérico para caracterizar e distinguir 2 eventos de nevoeiros ocorridos neste intervalo. Durante a simulação para o período A, que compreende 3 registros de restrições de visibilidade, foi possível perceber nos campos e na análise de séries temporais de parâmetros meteorológicos indicativos da formação, dissipação e evolução de 2 nevoeiros. O primeiro evento teve sua dissipação antecipada, enquanto o oposto ocorreu para o segundo evento em relação ao registro de condições de navegação. Entretanto, o modelo foi capaz de identificar o processo de dispersão de ambos os fenômenos. Neste ponto, reitera-se a subjetividade dos dados, não sendo possível caracterizar este adiantamento ou atraso na dissipação dos fenômenos como erros do modelo. O terceiro evento não foi identificado nesta avaliação, bem como não foi detectado através de imagens de satélites. Evidenciou-se que o

número de Richardson foi o único parâmetro neste intervalo que mostrou habilidade de identificar condições favoráveis à ocorrência do terceiro evento de nevoeiro intenso registrado.

Para o período B, o modelo WRF também mostrou-se habilidoso na simulação de condições atmosféricas favoráveis e representativas da ocorrência de nevoeiro na região de estudo. Neste período, a simulação numérica deu indicativos de que o intervalo de Praticabilidade compreendido entre os eventos de restrição intensa de visibilidade não foi sinônimo de uma completa dissipação do fenômeno de estudo, reforçando a subjetividade deste registro. Entretanto, foram simuladas características potencialmente favoráveis à realização de manobra em alguns pontos da zona de atuação da Praticagem, subsidiando esta mudança para condições de Praticabilidade.

No período D, as simulações e dados observados foram avaliados em conjunto com registros fotográficos do evento. Assim como nos casos anteriores, o modelo WRF apresentou sensibilidade à ocorrência do fenômeno, destacando mecanismos característicos de sua evolução, manutenção e dissipação.

Pontos comuns a serem destacados com relação a todos os períodos consiste na tendência da estimativa de visibilidade de Kunkel resultar na simulação de nevoeiros mais intensos, ou seja, associados a menor visibilidade, em comparação com a estimativa do FSL. Adicionalmente, a estimativa do FSL apresenta maior sensibilidade a variações espaciais do parâmetro visibilidade em comparação com Kunkel.

A análise de perfis verticais possibilitou a identificação de características intrínsecas aos processos de formação, manutenção, evolução e dissipação de nevoeiros, bem como destacou elementos indicativos de estabilidade atmosférica.

O índice FSI, de maneira geral, apresentou sensibilidade à ocorrência dos nevoeiros avaliados, indicando probabilidade alta da ocorrência de nevoeiros durante os eventos.

Com relação ao número de Richardson, não foi possível determinar claramente a habilidade deste parâmetro em representar a ocorrência de nevoeiros em Rio Grande. Destaca-se que seu cálculo a partir das saídas do modelo WRF foi capaz de distinguir parte dos eventos

de nevoeiro e identificar características estáveis associadas a eles nos intervalos avaliados. Entretanto, ainda existe a necessidade do desenvolvimento de novos estudos para obter uma avaliação mais completa da aplicabilidade do número de Richardson na previsão de nevoeiros.

Adicionalmente, foi possível verificar que a estimativa de visibilidade do FSL apresentou as melhores métricas estatísticas em uma verificação da simulação de ocorrência de nevoeiros intensos, com resultados combinando significativas taxa de previsões corretas e probabilidade de detecção do fenômeno, bem como o menor índice de alarmes falsos e baixa probabilidade de falsa detecção. O FSI apresentou significativa probabilidade de detecção do evento, mas combinada a elevadas taxa de alarme falso e probabilidade de falsa detecção.

Os resultados apontam que, apesar da dificuldade conhecida e inerente à previsão/simulação numérica de nevoeiros, a configuração do modelo WRF apresentada neste estudo apresentou habilidade em caracterizar/simular a ocorrência destes fenômenos na cidade de Rio Grande, bem como em representar indicativos do processo de formação, manutenção e dissipação do fenômeno. Desta forma, podem contribuir para o melhor entendimento da ocorrência de nevoeiros na região, auxiliando no desenvolvimento de novas ferramentas operacionais.

Como sugestões de trabalhos futuros, destacam-se:

- Acoplamento do modelo WRF na configuração apresentada neste trabalho com um modelo unidimensional de previsão de nevoeiros;
- Acoplamento da configuração do modelo WRF proposta neste trabalho com LES;
- Uso do sistema WRF *Variational Data Assimilation* (WRFDA), visando fazer a assimilação de dados da Praticagem e estações próximas da região estuarina da Lagoa dos Patos;
- Estudo mais aprofundado acerca da influência das correntes na formação e nevoeiros em Rio Grande;
- Analisar possível influência de aerossóis provenientes da descarga de grãos na região portuária de Rio Grande no processo de formação do fenômeno na localidade.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, J. M.S. **Análise de ocorrência de nevoeiros e dos resultados do modelo de previsão “PAFOG” em diferentes regiões climáticas do Brasil.** 2016. 237f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2016.

AFONSO, J. M.S; LEVIT, V.; FEDOROVA, N. Estudo de baixa visibilidade no aeroporto de Porto Alegre: processos sinóticos e termodinâmicos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 6, p. 131-145, 2019.

AHRENS, C. D. **Essentials of meteorology: An invitation to the atmosphere**, 3.ed. Cengage Learning, 2001, 454 p.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. **Glossary of Meteorology**, 2012. Frontal fog. Disponível em <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Frontal_fog>. Acesso em: 18 nov. 2021.

ARUN, S. H.; CHAURASIA, S.; MISRA, A.; KUMAR, R. Fog Stability Index: A novel technique for fog/low clouds detection using multi-satellites data over the Indo-Gangetic plains during winter season. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 22, p. 8200-8218, 2018.

ARYA, P. S. **Introduction to micrometeorology**. Elsevier, 2001, 420p.

BANG, C. H.; LEE, J.W.; HONG, S.Y. Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF model. **Journal of Korean society for atmospheric environment**, v. 24, n. E2, p. 92-101, 2008.

BARTOK, J.; BOTT, A.; GERA, M. Fog prediction for road traffic safety in a coastal desert region. **Boundary-layer meteorology**, v. 145, n. 3, p. 485-506, 2012.

BARTOKOVÁ, I.; BOTT, A.; BARTOK, J.;GERA, M. Fog prediction for road traffic safety in a coastal desert region: Improvement of nowcasting skills by the machine-learning approach. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 157, n. 3, p. 501-516, 2015.

BASSO, J. L. M.; MACEDO, L. R.; YAMASAKI, Y. Avaliação da extensão dos horizontes de integração temporal do WRF nos prognósticos de vento. **Ciência e Natura**, v.36, Ed. Especial II, p. 491-496, 2014

BERGOT, T.; CARRER, D.; NOILHAN, J.; BOUGEAULT, P. Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds: A feasibility study. **Weather and Forecasting**, v. 20, n. 4, p. 627-646, 2005.

BERGOT, T. Quality assessment of the Cobel-Isba numerical forecast system of fog and low clouds. In: **Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting**. 2007, Birkhäuser Basel, 2007. p. 1265-1282.

BINHUA, W. **Sea fog**. Beijing, China: Ocean Press Beijing, 1985, 330p.

BOTT, A.; TRAUTMANN, T.. PAFOG—A new efficient forecast model of radiation fog and low-level stratiform clouds. **Atmospheric Research**, v. 64, n. 1-4, p. 191-203, 2002.

CARNEIRO, I.A.M. **Estudo hidro e morfodinâmico do impacto de alterações na configuração do Porto de Rio Grande**. 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul, 2009.

CARDILLI, J; MACEDO, L. Imigrantes é liberada mais de 22 horas após engavetamento. **Portal G1**, São Paulo, 16 de set. de 2011. Disponível em: < <https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2011/09/imigrantes-e-liberada-mais-de-22-horas-apos-engavetamento.html>>. Acesso em: 06 de abr. de 2022

CASTRO, L.P.; NUNES, A. B. . Análise preliminar dos nevoeiros na região de Pelotas-RS para o mês de maio de 2012. In: XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2012, **Anais...**, Gramado - RS. 2012. v. 1.

CHEN, F.; DUDHIA, J. Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. **Monthly weather review**, v. 129, n. 4, p. 569-585, 2001.

COLABONE, R. D. O.; FERRARI, A. L.; VECCHIA, F. A. D. S.; TECH, A. R. B. Application of artificial neural networks for fog forecast. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 7, n. 2, p. 240-246, 2015.

COPPE-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia. **PROJETO BAÍAS DO BRASIL: LAGOA DOS PATOS – RS**: relatório técnico. Rio de Janeiro, 2019.

CORDEIRO, F. M.; FRANÇA, G. B.; DE ALBUQUERQUE NETO, F. L.; GULTEPE, I. Visibility and Ceiling Nowcasting Using Artificial Intelligence Techniques for Aviation Applications. **Atmosphere**, v. 12, n. 12, p. 1657, 2021.

COTTON, W. R.; ANTHES, R.A. **Storm and cloud dynamics**. Academic Press, 1989.

CROFT, P. J.; DARBE, D.; GARMON, J. Forecasting significant fog in southern Alabama. **Natl. Wea. Dig**, v.19, p.10 – 16 , 1995.

CROFT, P. J.; PFOST, R. L.; MEDLIN, J. M.; JOHNSON; G. A. Fog forecasting for the southern region: A conceptual model approach. **Weather and Forecasting**, v. 12, n. 3, p. 545-556, 1997.

CUI, C.; BAO, Y.; YUAN, C.; LI, Z.; ZONG, C. Comparison of the performances between the WRF and WRF-LES models in radiation fog–A case study. **Atmospheric Research**, v. 226, p. 76-86, 2019.

DUDHIA, J. **Overview of WRF physics**. University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, CO, 2014. disponível em: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201401/Physics_full.pdf. Acesso em: 02. dez.2020.

DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 46, n. 20, p. 3077-3107, 1989.

DUTTA, D.; CHAUDHURI, S. Nowcasting visibility during wintertime fog over the airport of a metropolis of India: decision tree algorithm and artificial neural network approach. **Natural Hazards**, v. 75, n. 2, p. 1349-1368, 2015.

FRANÇA, V. D. J. **Avaliação da Metodologia de Previsão de Nevoeiro e Visibilidade Horizontal do Modelo ETA**. 2008.172f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, São José dos Campos, 2008.

FERREIRA, K.V. O. **Construção da curva chave do rio Piancó-Piranhas usando medidor acústico de vazão com efeito doppler e medição automática de nível da água**. 2016. 54f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2016.

FERRIER, B.; JIN, Y.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, G. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In: **CONFERENCE ON WEATHER ANALYSIS AND FORECASTING**, 2002, Park City, 2002.

FILGUERAS, A.S. **Condições oceanográficas e as assembleias ictioplanctônicas no estuário da Lagoa dos Patos**. 2009. 72f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul, 2009.

FITA, L.; POLCHER, J.; GIANNAROS, T. M.; LORENZ, T.; MILOVAC, J.; SOFIADIS, G.; KATRAGKOU, E.; BASTIN, S. CORDEX-WRF v1. 3: development of a module for the Weather Research and Forecasting (WRF) model to support the CORDEX community. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 3, p. 1029-1066, 2019.

FREEMAN, L.E.; PERKINS, J.S. **Meteorological Techniques. Technical Note, AFWA/TN—98/002**. Nebraska: Air Force Weather Agency, 1998. Disponível em <http://www.novalynx.com/manuals/tn98002.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2020

GOMES, C.S.; KRUSCHE, N.; GUIMARÃES, P.; CALLIARI, L.J.; PEREIRA, P.S. Nevoeiros na Região da Cidade de Rio Grande-RS. In: VIII Mostra da Produção Universitária - XI Encontro de Pós-Graduação. 2009, **Anais...**, Rio Grande-RS, 2009.

GOMES, C. S. **Nevoeiros na região litorânea do sul do Brasil**. 2011. 85f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul, 2011.

GOMES, C. S.; KRUSCHE, N.; ROCHA, R. P. Simulação de nevoeiros no litoral sul do Brasil. **Ciência e Natura**, Edição Suplementar - VII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, p. 235-237, 2011.

GOMES, C. S., SPOLAVORI, A., KRUSCHE, N., ROCHA, R.P. Estudo de caso: Simulação numérica do nevoeiro de advecção do dia 1 de julho de 2010. In: **2012 International Conference on Offshore and Marine Technology: Science and Innovation**. 2012, Rio Grande-RS: IEEE, 2012, p. 24-26.

GRIMM, A.M.; TELEGINSKI, S.E.; COSTA, S.M.S, FERLIZI, P.G. Anomalias de precipitação no Sul do Brasil em eventos La Niña. In: IX Congresso Brasileiro de Meteorologia. 1996, **Anais...**, Campos do Jordão- SP, 1996.

GULTEPE, I.; MULLER, M.D.;BOYBEYI, Z. A New Visibility Parameterization for Warm-Fog Applications in Numerical Weather Prediction Models. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 45, n. 11, p. 1469-1480, 2006.

GULTEPE, I.; TARDIF, R.; MICHAELIDES, S.C.; CERMAL, J.; BOTT, A.; BENDIX, J.; MULLER, M.D.; PAGOWSKI, M.; HANSEN, B.; ELLROD, G.; JACOBS, W.; TOTH, G.; COBER, S.G. Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. **Pure and Applied Geophysics**, v. 164, n. 6-7 p. 1121 – 1159 , 2007.

HACKER, M.; BOTT, A. COSMO-PAFOG: Three-dimensional fog forecasting with the high-resolution COSMO-model. **EGU General Assembly**, 2017, Viena, 2017 p. 5663.

HOLTSLAG, M. C.; STEENEVELD, G. J.; HOLTSLAG, A. A. M. Fog forecasting:“old fashioned” semi-empirical methods from radio sounding observations versus “modern” numerical models. In: **5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew**, 2010, Münster, 2010.

HONG, S.Y.; DUDHIA, J.; CHEN, S.H. A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. **Monthly Weather Review**, v. 132, p. 103-120, 2004.

HONG, S.; LIM, J. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). **Journal of the Korean Meteorological Society**, v. 42, p. 129-151, 2006.

HONG, S. Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. **Monthly weather review**, v. 134, n. 9, p. 2318-2341, 2006.

JANJIC, Z. Nonsingular implementation of the Mellor Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model, **NCEP Office Note 437**, p. 60, 2002.

JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; NAVARRO, J., MONTÁVEZ, J. P.; GARCÍA-BUSTAMANTE, E. A revised scheme for the WRF surface layer formulation. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 3, p. 898-918, 2012.

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

KNIEVEL, J. **Physical parameterizations in the WRF Model**. ATEC Forecasters' Conference, Julho/ 2007 e Fevereiro/2008. disponível em: https://ral.ucar.edu/projects/armyrange/references/forecastconf_07/ppt_conversion/pdf/knievel_WRF_physics.pdf. Acesso em: 02 dez. 2020.

KULKARNI, R., JENAMANI, R. K., PITHANI, P., KONWAR, M., NIGAM, N., GHUDE, S. D. Loss to aviation economy due to winter fog in New Delhi during the winter of 2011–2016. **Atmosphere**, v. 10, n. 4, p. 198, 2019.

KUNKEL, B. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog model. **J. Appl. Meteor.**, v. 23, n. 1, p. 34-41, 1984.

LAMB, D.; VERLINDE, J. **Physics and chemistry of clouds**. Cambridge University Press, 2011, 584p.

LIU, D. Y.; YAN, W. L.; YANG, J.; PU, M. J.; NIU, S. J.; LI, Z. H. A Study of the Physical Processes of an Advection Fog Boundary Layer. **Boundary-Layer Meteorol**, v. 158, n.1, p. 125–138, 2016.

LIM, K. S. S.; HONG, S. Y. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. **Monthly weather review**, v. 138, n. 5, p. 1587-1612, 2010.

LINDSTROM, S. **Night Fog Difference (10.3 μ m – 3.9 μ m) – Quick Guide**, 2017.

MARQUES, W. C. **Padrões de Variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil**. 2006. 85f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul, 2006.

MARQUES, W.C.; MONTEIRO, I.O.; MÖLLER, O.O.; FERNANDES, E.H. A dinâmica da pluma costeira da Lagoa dos Patos, Brasil. In: Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. **Anais...**, Rio Grande – RS, 2006.

MARTINS, R.V.; FILGUEIRAS, C.A.L., **A Invasão Francesa ao Rio de Janeiro em 1711 sob a análise da Cartografia Histórica**, In: 1º Simpósio de Cartografia Histórica, 2011, Paraty-RJ. **Passado presente nos velhos mapas: conhecimento e poder**, 2011

MESOSCALE & MICROSCALE METEOROLOGY LABORATORY. **WRF Users Page**, 2019. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 4.1 . Disponível em: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.1/contents.html>. Acesso em: 18 nov. 2021

MESOSCALE & MICROSCALE METEOROLOGY LABORATORY. **MMM/NCAR: Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory**, c2021. Weather Research and Forecasting Model. Disponível em: <<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>>. Acesso em: 18 nov. 2021

MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for

the longwave. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D14, p. 16663-16682, 1997.

MÖLLER JUNIOR, O. O.; ABE, M.P. Capítulo 5- **Oceanografia Física** [2011?]. disponível em:

http://www.netto.ufpel.edu.br/lib/exe/fetch.php?media=oceano_fis:12_capi_tulo_5 equipamentos_oceanografia_fisica.pdf Acesso em: 27nov. 2020.

MÖLLER JUNIOR, O. O., CASTAING, P., SALOMON, J. C., LAZURE, P. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. **Estuaries**, v. 24, n. 2, p. 297-311, 2001.

MÖLLER JUNIOR, O. O., LORENZZETTI, J.A.; STECH, J.L.; MATA, M.M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Coastal Shelf Research*, v.16, p. 335-351, 1996.

NAKANISHI, M.; NIINO, H. An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary-Layer Meteorol*, v. 119, n. 1, p. 397–407, 2006.

NILO, S.T; CIMINI, D.; DI PAOLA, F.; GALLUCCI, D.; GENTILE, S.;GERALDI, E.; LAROSA, S.; RICCIARDELLI, E.; RIPEPI, E.; VIGGIANO, M.; ROMANO, F. Fog Forecast Using WRF Model Output for Solar Energy Applications. **Energies**, v. 13, n. 22, p. 6140, 2020.

NOBRE, J. P. G.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; DOS SANTOS, A. S.; LYRA, M. J. A. Nova Metodologia para Previsão de Eventos de Nevoeiro para o Aeroporto Zumbi dos Palmares em Maceió (Alagoas). **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 3, p. 527-535, 2020.

NUNES, A.B. **Crescimento da Camada Limite Convectiva: estudo analítico e numérico**. 2008. 190f. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

OLIVEIRA, V.M.; FEDOROVA, N. Condições para formação de nevoeiro em Pelotas: Parte I – Análise sinótica e estatística. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia. 1998a, **Anais....**, Brasília - DF, 1998

OLIVEIRA, V.M.; FEDOROVA, N. Condições para formação de nevoeiro em Pelotas: Parte II – Análise estatística das correlações. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia. 1998b, **Anais...**, Brasília - DF, 1998

OLIVEIRA, V.M.; FEDOROVA, N. Condições para formação de nevoeiro em Pelotas: Parte III – Análise Termodinâmica. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia. 1998c, **Anais...**, Brasília - DF, 1998

OLIVEIRA, V.M.; FEDOROVA, N. Condições para formação de nevoeiro em Pelotas: Parte IV – Método de previsão. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia. 1998d, **Anais...**, Brasília - DF, 1998

OLIVEIRA, V. M. **Condições para formação de nevoeiro em Pelotas**. 1998. 111f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Rio Grande do Sul, 1998.

OLIVEIRA, L. L.; VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J. **Meteorologia fundamental**. Erechim: EdiFAPES, 2001, 432 p.

OLIVEIRA, G. A. **Método estatístico no auxílio à previsão de nevoeiro para o Aeródromo de Guarulhos**. 2002. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2002

OLIVIER, J. Fog harvesting: An alternative source of water supply on the West Coast of South Africa. **GeoJournal**, v. 61, n. 2, p. 203-214, 2004.

PANG, C., LIU, J., LI, Y., NIU, N. Simulation of regional fog event with WRF in North China and evaluation of visibility equations. In: **5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew**. 2010, Münster, 2010, p. FOGDEW2010-132

PAULA, N. F.; PUHALES, F. S.; Silva, G. G.; MINTEGUI, J. M.; ANABOR, V.; DAL PIVA, E.; COSTA, F. D. Avaliação de diferentes esquemas de camada limite para simulação e previsão de eventos de nevoeiro no Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, v. 39, n. 2, p. 451-458, 2017.

PEREIRA, M.C.M. **Emprego de redes neurais artificiais RBF na previsão de nevoeiro no Aeroporto Internacional Afonso Pena**. 2016. 85f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PEREIRA, H.R.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. Características da atmosfera na primavera austral durante o El Niño de 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 293-310, 2017.

PÉREZ-DÍAZ, J. L.; IVANOV, O.; PESHEV, Z.; ÁLVAREZ-VALENZUELA, M.A.; VALIENTE-BLANCO, I.; EVGENIEVA, T.; DREISCHUCH, T.; GUEORGUIEV, O.; TODOROV, P.V.; VASEASHTA, A. Fogs: Physical Basis, Characteristic Properties, and Impacts on the Environment and Human Health. **Water**, v. 9, n. 10, 2017

PINHEIRO, F.R. **Previsão de eventos de nevoeiro utilizando o modelo COBEL**. 2006. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

PINHEIRO, F.R.; PETERSON, R.G.; COSSICH, W. Numerical study of fog events along Rio de Janeiro coast, using the MM5 model coupled with the unidimensional model COBEL. In: **Proceedings of 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography**, 2006, Foz do Iguaçu – PR, 2006, p. 1935 – 1944.

PIVA, E. Dal; ANABOR, V. Avaliação do modelo BRAMS na formação de nevoeiro de radiação em ambiente com turbulência pouco desenvolvida. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p. 417-430, 2008

PULUGURTHA, S. S.; MANE, A.S; DUDDU, V. R.; GODFREY, C. M. Investigating the influence of contributing factors and predicting visibility at road link-level. **Heliyon**, v. 5, n. 7, p. e02105, 2019.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N. Análise de componentes principais da ocorrência de Nevoeiros em Rio Grande, RS, no período de 1990 a 1999. In: **Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Rio de Janeiro, RJ. 2000. p. 853.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N. Normais Climatológicas Provisórias de 1991 a 2010 para Rio Grande, RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 165-179, 2018.

ROGERS, R.R.; YAU, M. K. **A short course in cloud physics**. Butterworth Heinemann, 1996.

ROMÁN-CASCÓN, C.; STEENEVELD, G. J.; YAGÜE, C.; SASTRE, M.; ARRILLAGA, J. A.; MAQUEDA, G. Forecasting radiation fog at climatologically contrasting sites: evaluation of statistical methods and WRF. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 142, n. 695, p. 1048-1063, 2016.

SHIN, H. H.; HONG, S. Y.; DUDHIA, J. Impacts of the lowest model level height on the performance of planetary boundary layer parameterizations. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 2, p. 664-682, 2012.

SILVA, A. O. **Nevoeiro e Nuvem Estratos no Brasil: Observação, Sensoriamento Remoto e Simulação Numérica**. 2018. 117f. Tese (Doutorado em Ciências - Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

SKAMAROCK, W.C. ; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; LIU, Z.; BERNER, J.; WANG, W.; POWERS, J.G.; DUDA, M.G.; BARKER, D.M; HUANG, X. **A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4- NCAR Technical Notes**. Nota técnica: Boulder, Colorado, 2019.

SMITH N.P. Water, salt and heat balance of coastal lagoons. In: **Kjerfve B (ed) Coastal lagoon processes**. Elsevier Oceanographic Series 60, Amsterdam, p. 69–101, 1994

STEENEVELD, G. J.; RONDA, R. J.; HOLTSLAG, A. A. M. The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 154, n. 2, p. 265-289, 2015.

STOLAKI, S.; PYTHAROULIS, I.; KARACOSTAS, T. A study of fog characteristics using a coupled WRF-COBE model over Thessaloniki airport, Greece. **Pure and applied geophysics**, v. 169, n. 5-6, p. 961-981, 2012.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Kluwer Academic Publishers, 1997, 670p.

SUPERINTENDÊNCIA DOS PORTOS. **Portos do Rio Grande do Sul**, c2019. Porto do Rio Grande. Disponível em <http://www.portosrs.com.br/site/comunidade_portuaria/rio_grande/conheca_o_porto>. Acesso em: 18 nov. 2021.

TARDIF, R. M. **Characterizing fog and the physical mechanisms leading to its formation during precipitation in a coastal area of the northeastern United States**. 2007. Tese – Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado, 2007.

TARDIF, R.; RASMUSSEN, R. M. Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 46, n. 8, p. 1141-1168, 2007

TIWARI, S.; PAYRA, S.; MOHAN, M.; VERMA, S.; BISHT, D. S. Visibility degradation during foggy period due to anthropogenic urban aerosol at Delhi, India. **Atmospheric Pollution Research**, v. 2, n. 1, p. 116-120, 2011.

TRIGG, J. L. **A study of morning radiation fog formation**. 2000. 81f. Tese, Air Force Institute of Technology, Ohio, 2000.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia** Versão Digital 1. , Recife, v.1., 2005, 516 p.

WANTUCH, Ferenc. Visibility and fog forecasting based on decision tree method. **Idojárás**, v. 105, p. 29-38, 2001.7

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2006,627p.

WOODWARD, J. L. Appendix A: atmospheric stability classification schemes. **Estimating the Flammable Mass of a Vapor Cloud**, p. 209-212, 1998.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, **International Cloud Atlas**, 2017. **Fog**. Disponível em <<https://cloudatlas.wmo.int/en/fog.html>>. Acesso em: 4 nov. 2020

YADAV, P.; PARDE, A. N.; DHANGAR, N. G.; GOVARDHAN, G.; LAL, D. M.; WAGH, S.; PRASAD, D.S.V.V.D.; AHMED, R. GHUDE,S.D. Understanding the genesis of a dense fog event over Delhi using observations and high-resolution model experiments. **Modeling Earth Systems and Environment**, p. 1-12, 2022.

YANG, Y.; HU, X. M.; GAO, S.; WANG, Y. Sensitivity of WRF simulations with the YSU PBL scheme to the lowest model level height for a sea fog event over the Yellow Sea. **Atmospheric Research**, v. 215, p. 253-267, 2019.

ZANOTTA, D.C.; GONÇALVES, G.A.; DUCATI, J.R. Mapeamento da temperatura superficial da Lagoa dos Patos –RS com dados NOAA-AVHRR. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais...**, Natal-RN, 2009

ZHIYIN, Yang. Large-eddy simulation: Past, present and the future. **Chinese journal of Aeronautics**, v. 28, n. 1, p. 11-24, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PELAS CONDIÇÕES INICIAIS (GFS) E PELO MODELO WRF

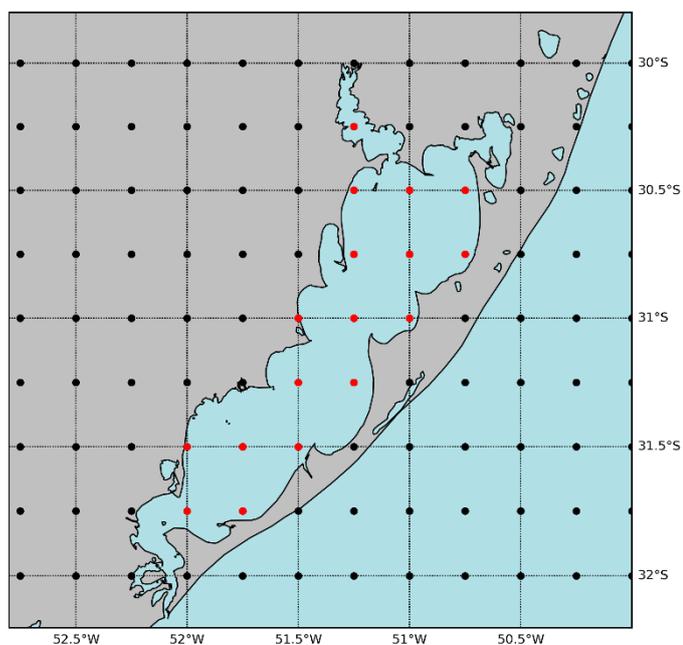


Figura A- 1- Grade das análises do do NCEP/ *Global Data Assimilation System* (GDAS)/FNL, com resolução de 0,25°, utilizadas como condições iniciais neste estudo. Os pontos em vermelho consistem nos pontos localizados dentro da Lagoa dos Patos.



Figura A- 2- Representação da Lagoa dos Patos pelas análises do NCEP/ *Global Data Assimilation System* (GDAS)/FNL, com resolução de 0,25°, utilizadas como condições iniciais neste estudo. Em azul, a representação de corpos d'água e em vermelho, a representação da terra.

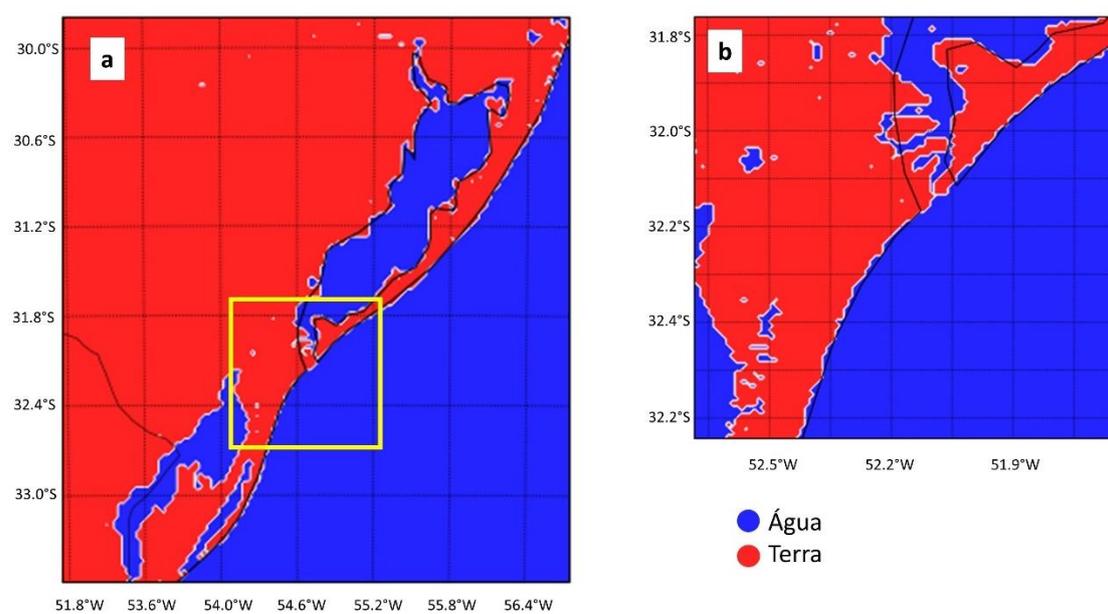


Figura
A- 3- Representação da Lagoa dos Patos pelo modelo WRF, a partir das saídas obtidas para os domínios 02 (a) e 03 (b). Em azul, a representação de corpos d'água e em vermelho, a representação da terra. O quadrado amarelo na figura referente ao domínio 02 indica a abrangência do domínio 03.

APÊNDICE B – AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA PREVISÃO NUMÉRICA DE NEVOEIROS INTENSOS PELO MODELO WRF A PARTIR DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE VISIBILIDADE E DO *FOG STABILITY INDEX*

A seguir são apresentadas as métricas estatísticas consideradas na avaliação da previsão de nevoeiros pelo modelo WRF e o modelo de tabela de contingência utilizado (Figura K-1). Desta forma, considera-se **a** o número de acertos, **b** os alarmes falsos, **c** os eventos observados e não previstos (perdidos) e **d** os eventos não previstos e não observados (corretos negativos) (WILKS, 2011). O total de observações é chamado **n** (a+b+c+d).

| | | Observação | |
|----------|-----|------------|-----|
| | | SIM | NÃO |
| Previsão | SIM | a | b |
| | NÃO | c | d |

Figura B- 1- Tabela de Contingência 2x2 (adaptado de Wilks, 2011).

As métricas utilizadas na avaliação serão expostas a seguir (WILKS, 2011):

- a) Acurácia ou Proporção Correta (PC): a fração das **n** previsões para as quais o evento foi previsto ou não previsto corretamente.

$$PC = \frac{a+d}{n} \quad (B.1)$$

- b) *Threat Score* (TS) ou Índice Crítico de Sucesso (CSI): Métrica alternativa ao PC que pode ser aplicada quando o evento a ser previsto (sim) ocorre com menos frequência do que a não ocorrência (não). É o número de previsões corretas dividido pelo número total de ocasiões em que esse evento foi previsto e/ou observado e pode ser interpretada como a PC para a quantidade que está sendo prevista, após a remoção das “não previsões” corretas. O melhor resultado para esse parâmetro é 1 e o pior é 0.

$$TS = CSI = \frac{a}{a+b+c} \quad (\text{B.2})$$

- c) *Odds Ratio* (θ): a razão entre as chances de um acerto, dado que o evento ocorre, e as chances de um alarme falso, dado que o evento não ocorre. Em termos da tabela de contingência 2×2 , este parâmetro é o produto do número de previsões corretas pelo produto do número de previsões incorretas. Valores maiores da razão indicam previsões mais precisas.

$$\theta = \frac{ad}{bc} \quad (\text{B.3})$$

- d) *Viés ou Bias* (B): razão entre o número de previsões e o número de observações do evento. Previsões que apresentam $B = 1$, indicam que o evento foi previsto o mesmo número de vezes que foi observado. Valores de $B > 1$ indicam que o evento foi previsto com mais frequência do que o observado, enquanto $B < 1$ aponta para uma subestimativa, onde o evento foi previsto com menos frequência do que o observado.

$$B = \frac{a+b}{a+c} \quad (\text{B.4})$$

- e) *Razão de Alarme Falso* (FAR): fração de previsões erradas, ou a proporção dos eventos previstos que não se confirmam. O melhor valor de FAR possível para uma previsão é 0 e o pior é 1.

$$FAR = \frac{a}{a+b} \quad (\text{B.5})$$

- f) *Hit Rate* (H) ou *Probabilidade de Detecção* (POD): razão entre as previsões corretas e o número de vezes que esse evento ocorreu.

$$HR = POD = \frac{a}{a+c} \quad (\text{B.6})$$

- g) Probabilidade de Falsa Detecção (POFD): razão entre o número de alarmes falsos e o número total de não ocorrências do evento.

$$\text{POFD} = \frac{b}{b+d} \quad (\text{B.7})$$

APÊNDICE C - ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA ESTAÇÃO DA PRATICAGEM DA BARRA DE RIO GRANDE

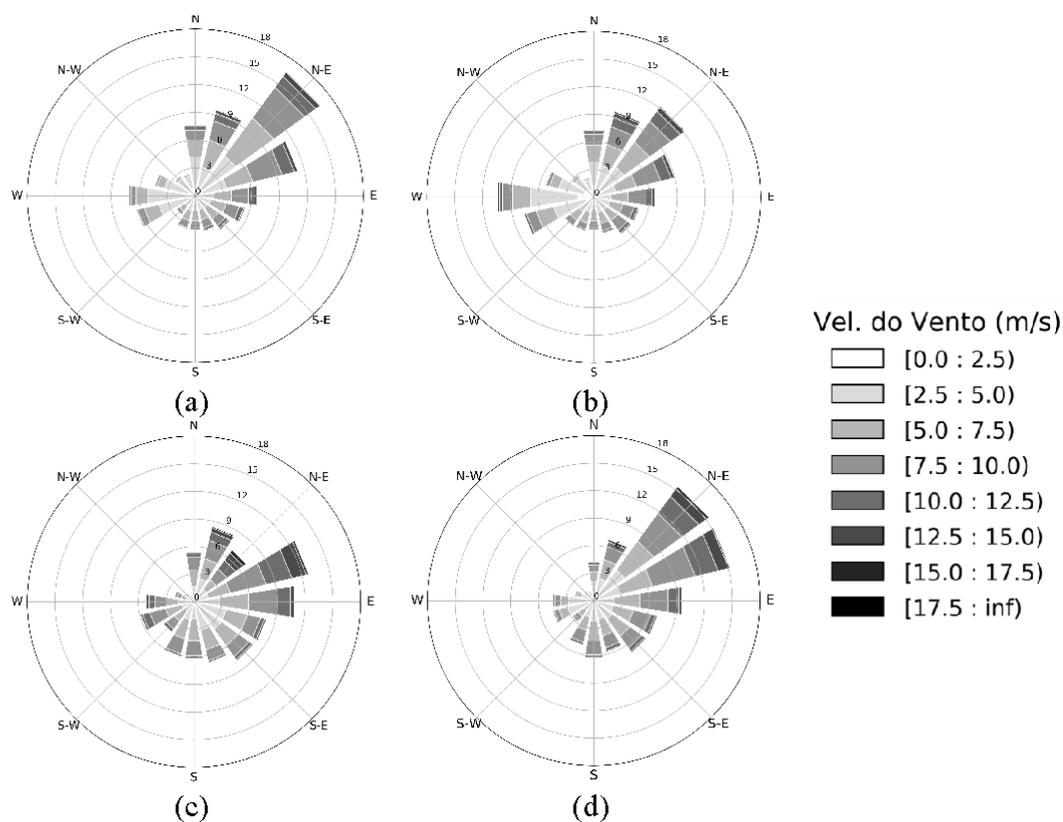


Figura C-1 - Vento (m/s) na torre da Praticagem da Barra do Rio Grande, em Rio Grande - RS, nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

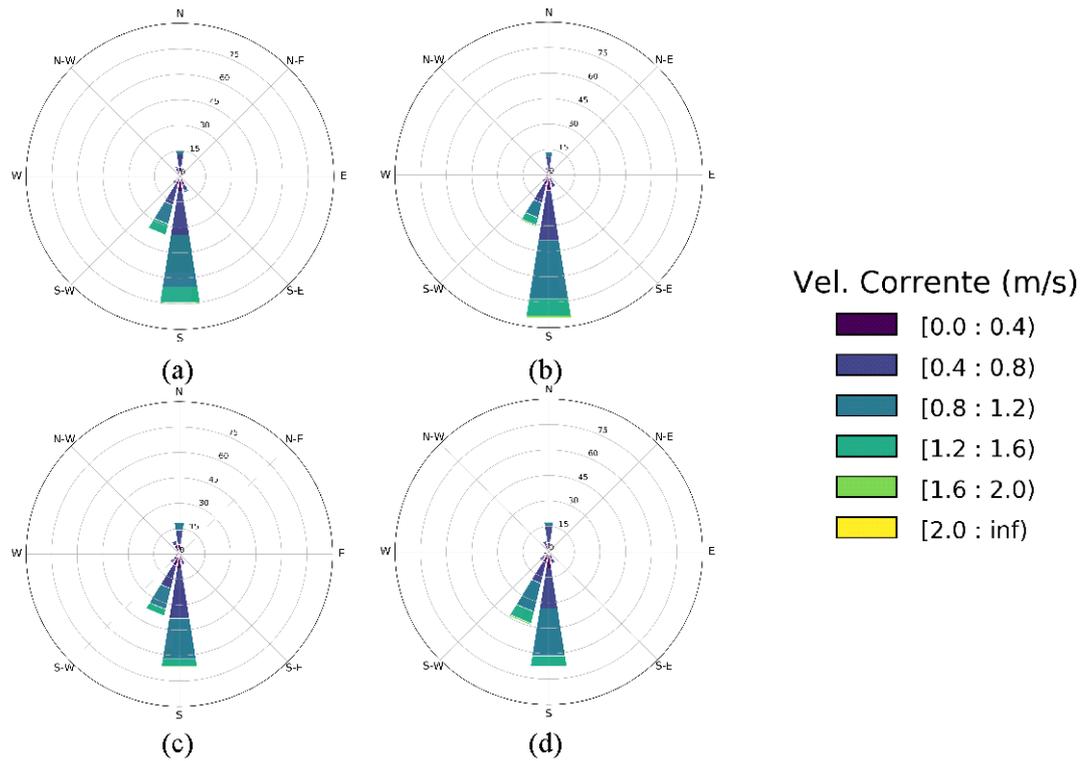


Figura C- 2 Corrente (m/s) medida pelo ADCP fundeado em frente à torre de controle da Praticagem da Barra do Rio Grande, em Rio Grande - RS, nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

APÊNDICE D - ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA BOIA RS-2

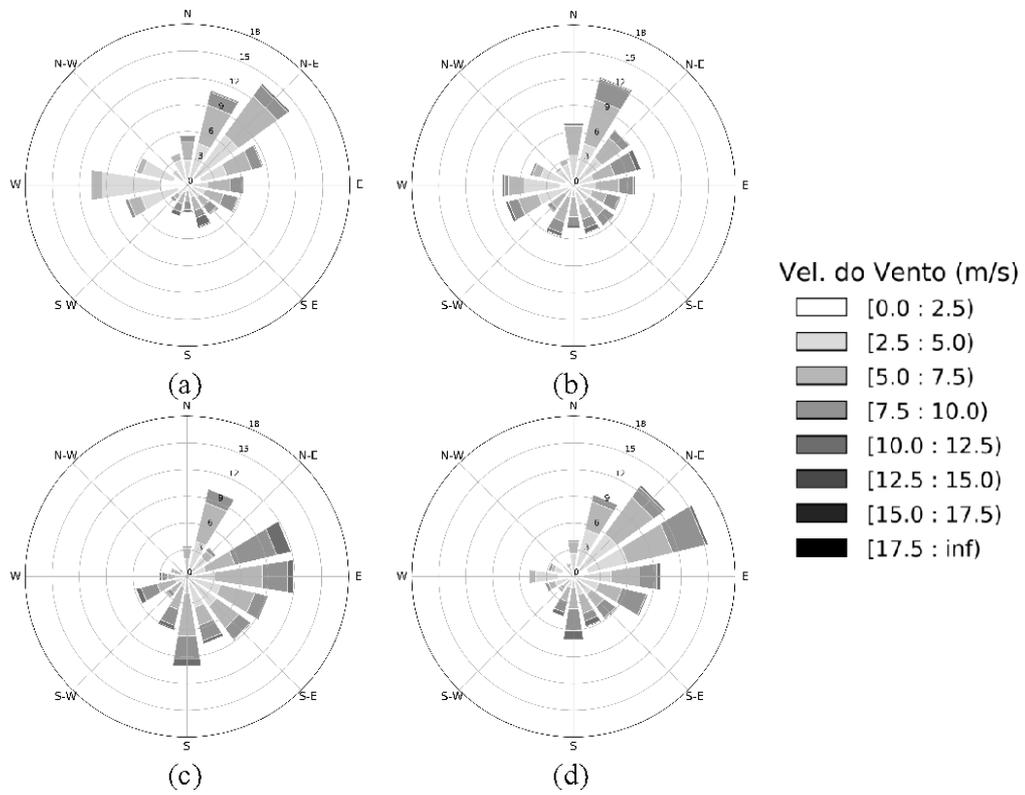


Figura D - 1- Vento (m/s) na boia RS-2 nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

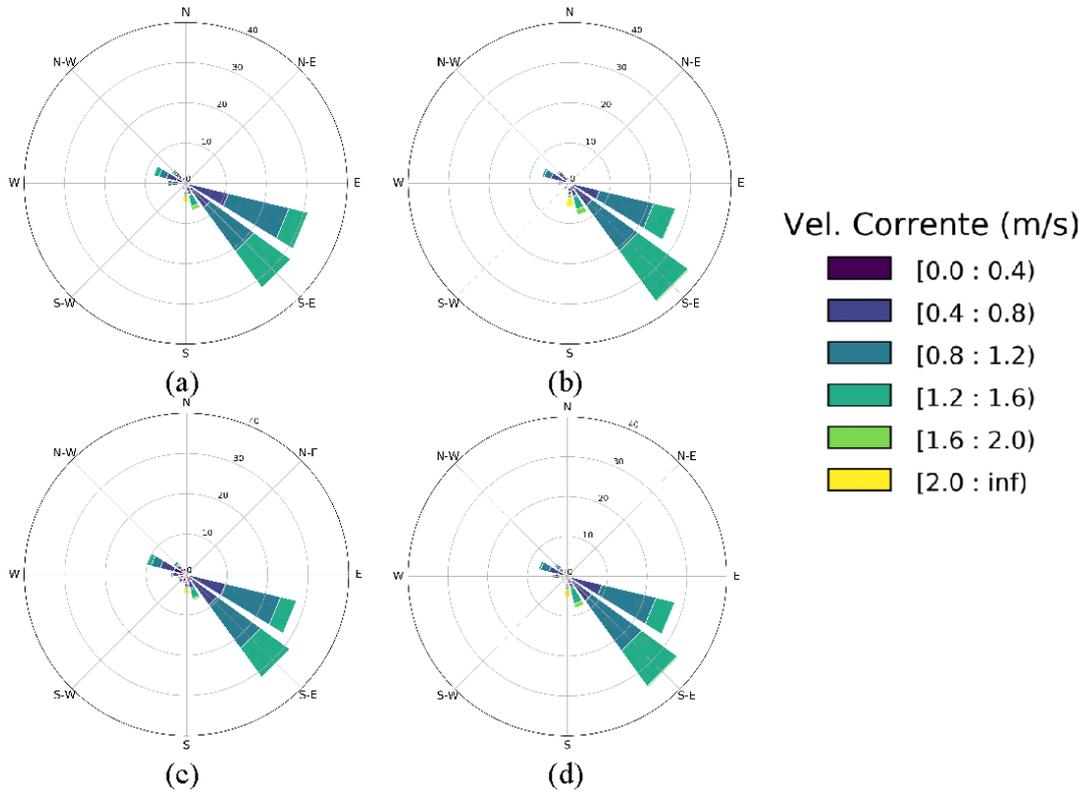


Figura D - 2- Corrente (m/s) na boia RS-2 nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

APÊNDICE E- ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA BOIA RS-3

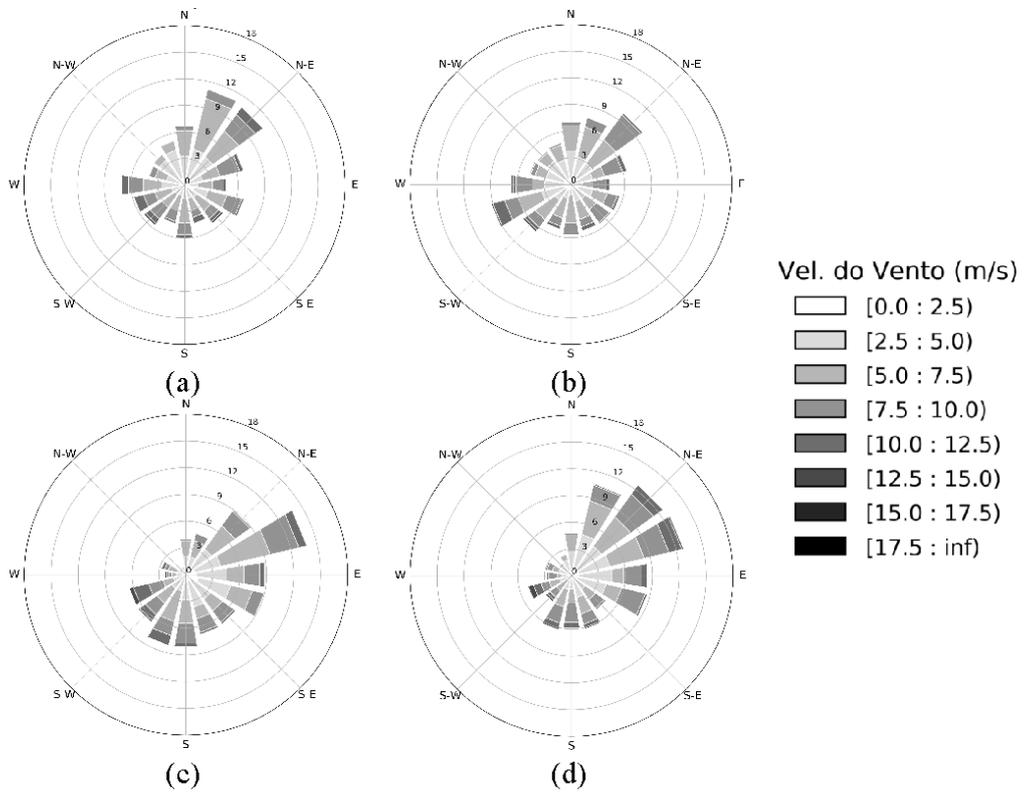


Figura E- 1- Vento (m/s) na boia RS-3 nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

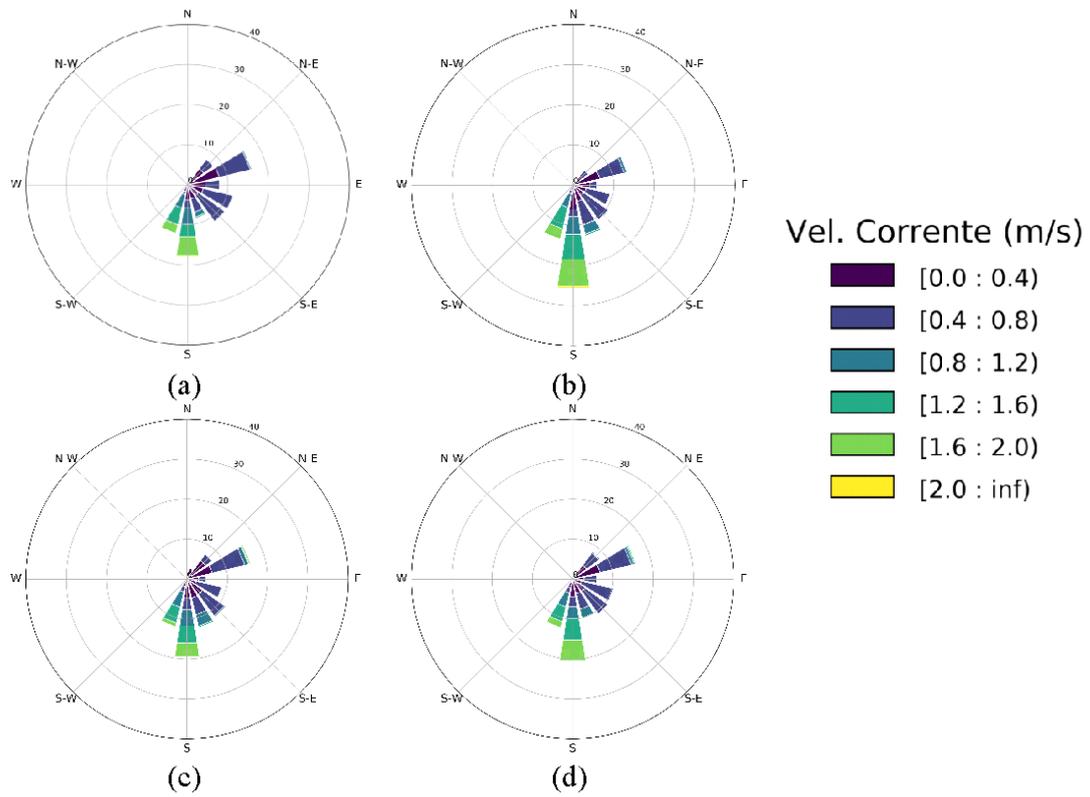


Figura E- 2- Corrente (m/s) na boia RS-3 nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

APÊNDICE F - ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA BOIA RS-4

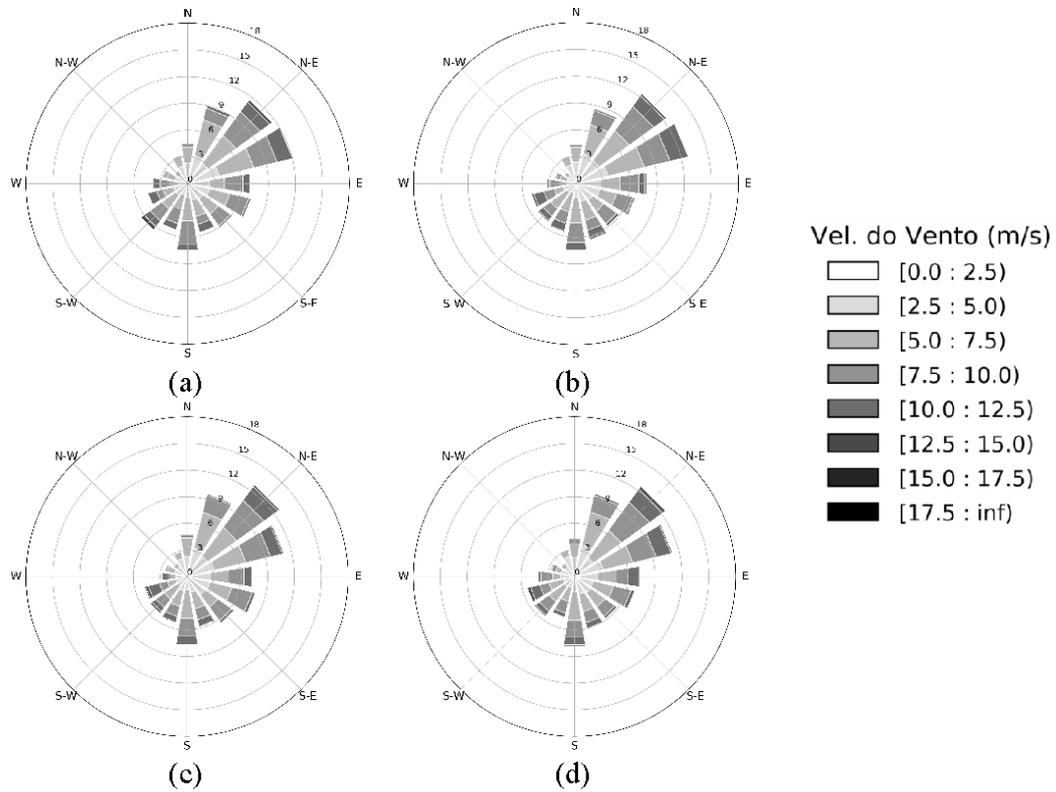


Figura F- 1- Vento (m/s) na boia RS-4 nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

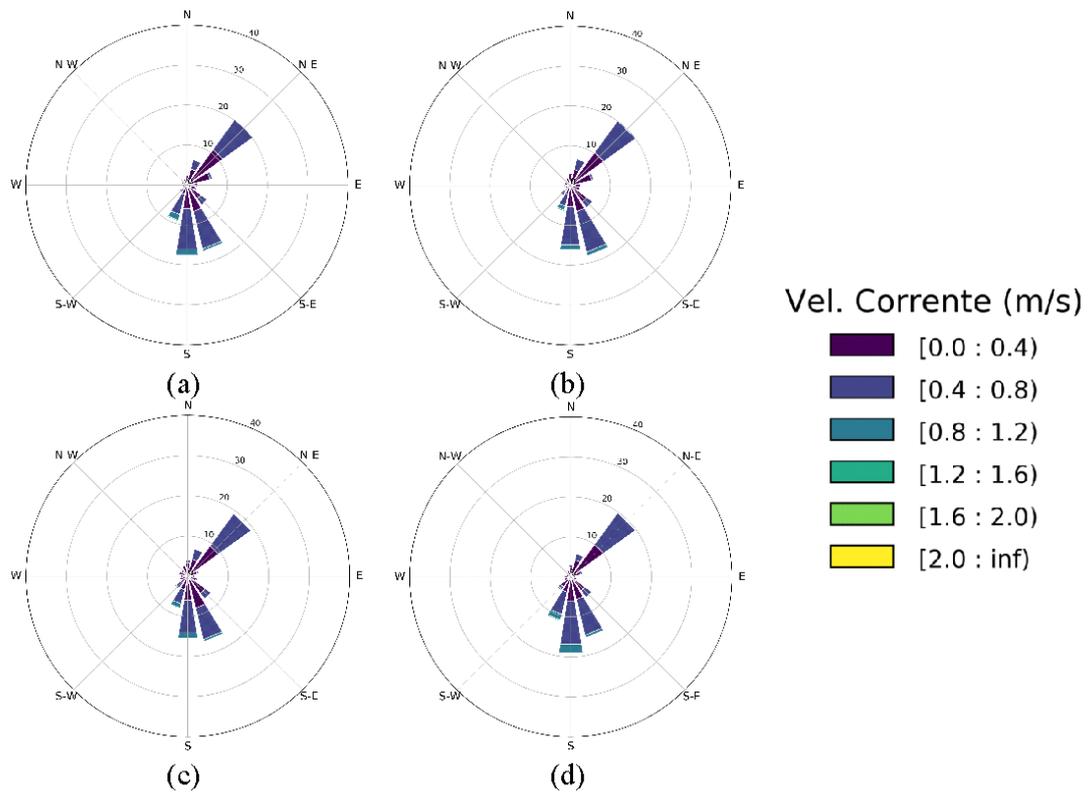


Figura F- 2- Corrente (m/s) na boia RS-4 nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

APÊNDICE G - ROSAS DOS VENTOS E CORRENTES POR TURNOS NA BOIA RS-5

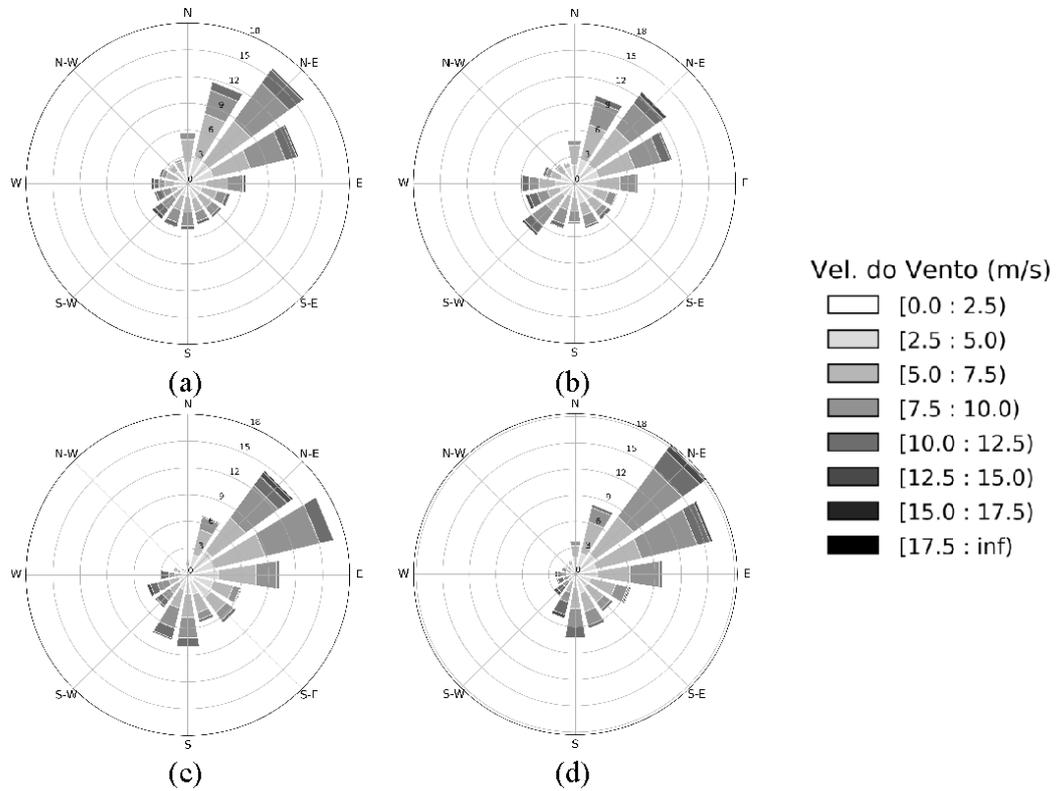


Figura G- 1- Vento (m/s) na boia RS-5 nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

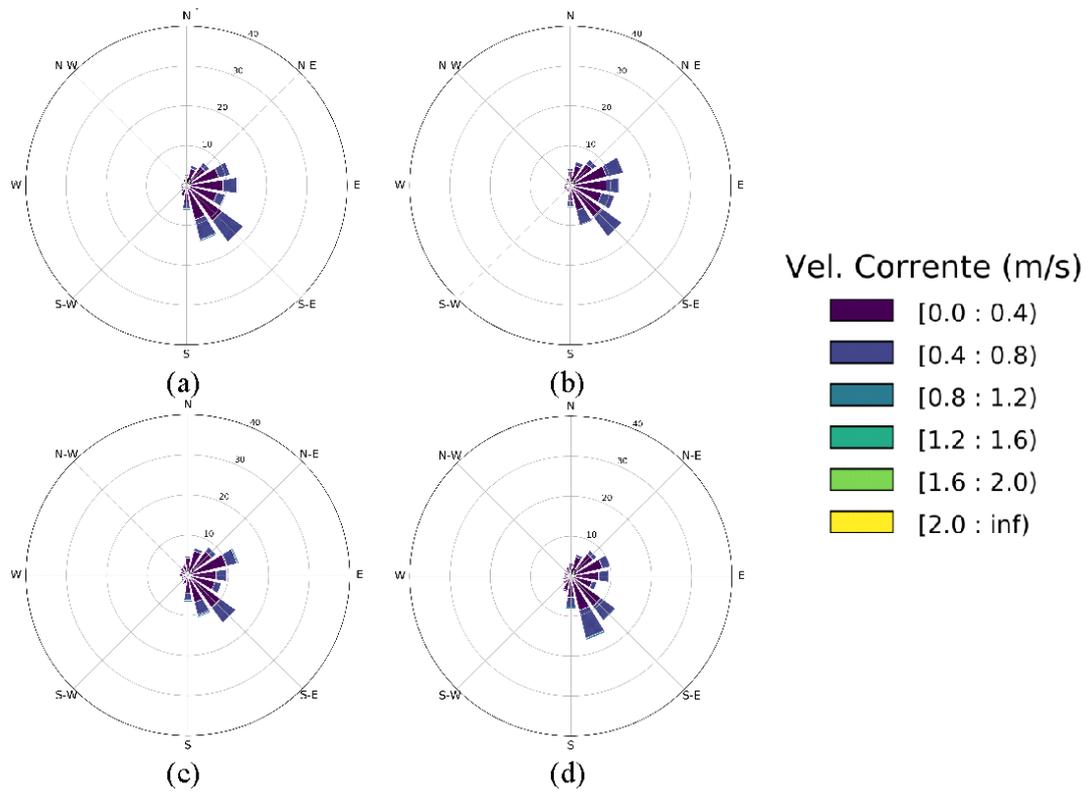


Figura G- 2- Corrente (m/s) na boia RS-5 nos períodos da madrugada (a), manhã (b), tarde (c) e noite (d).

APÊNDICE H – ANÁLISE ESPACIAL DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE DO MODELO WRF AOS PARÂMETROS DE RESOLUÇÃO VERTICAL – PERÍODO C

Como referência será utilizado o teste 3, com maior resolução vertical e menor altura para o primeiro nível do modelo, uma vez que apresenta uma melhor discretização dos primeiros níveis da atmosfera. As demais figuras, referentes aos testes 1 e 2, serão apresentadas em forma de campos de diferenças, onde valores positivos encontram-se em vermelho e valores negativos em azul. Destaca-se que as diferenças foram calculadas do seguinte modo:

$$DIF_1(\phi) = \phi(50m) - \phi(10m) \quad (H.1)$$

$$DIF_2(\phi) = \phi(20m) - \phi(10m) \quad (H.2),$$

onde $\phi(z1)$ corresponde à variável avaliada na simulação com primeiro nível do modelo na altura $z1$.

Foram selecionados horários representativos dos estágios de formação e dissipação do evento avaliado, de acordo com os registros disponíveis. Reitera-se que o tal registro abrange ocorrências de nevoeiro com visibilidade inferior a 457m, sendo possível o início do fenômeno de acordo com sua definição ter se dado em horário anterior. As figuras a seguir seguem o padrão de apresentar na primeira coluna os campos referentes ao teste 3 (controle) e na segunda e na terceira coluna as diferenças para os testes 1 e 2, respectivamente.

Adicionalmente, a evolução temporal do evento também será avaliada a partir de séries temporais de parâmetros meteorológicos no ponto de grade mais próximo à torre de controle da Praticagem de Rio Grande.

H.1. Formação do fenômeno

Às 23h do dia 16 de julho de 2019, horário mais próximo ao início do evento de restrição intensa de visibilidade, foi possível verificar que o modelo WRF foi capaz de simular indicativos da presença do nevoeiro na configuração do teste 3. Os campos resultantes para este teste apontam a presença de água líquida próximo à superfície sobre o continente e na região de atuação da Praticagem, nas redondezas do canal de acesso à Barra de Rio Grande (Figura H-1a) e valores de umidade relativa do ar acima de 98% foram simulados para mesma área (Figura H-1g).

Adicionalmente, há indícios do processo de formação do nevoeiro, com percepção de uma área com valores mínimos de razão de mistura (Figura H-1d) coincidentes com valores mais elevados no campo de conteúdo de água líquida (Figura H-1a). Tal configuração tem potencial para representar uma conversão de vapor d'água em água líquida, sendo indicativa do processo de formação do nevoeiro devido ao mecanismo de resfriamento. Temperaturas mais baixas foram simuladas sobre o continente, na mesma área do mínimo de razão de mistura (Figura H-1j).

Os campos de diferença para a configuração vertical 1 apontaram para uma divergência com relação ao resultado obtido para o teste 3. No teste 1 (de menor resolução vertical e maior altura do primeiro nível do modelo) o início do nevoeiro se mostrou atrasado em relação ao teste 3 e também ao registro da Praticagem. Valores negativos de diferenças foram calculados para a variável conteúdo de água líquida em todo o domínio 1, sendo mais expressivos sobre a área de máximos da variável na simulação de referência (Figura H-1b). Tal configuração aponta que não foram simulados valores significativos deste parâmetro neste horário. Além disso, a diferença para a razão de mistura evidencia uma maior disponibilidade de vapor nesta região no teste 1 (Figura H-1e), em conjunto com menor disponibilidade de água líquida, não evidenciando ainda o processo de resfriamento supracitado.

Em conjunto com a avaliação anterior, também foram verificados valores de umidade relativa mais baixos para o teste 1 ao longo de toda a costa, incluindo a região de entrada do canal localizado no estuário da Lagoa dos Patos (Figura H-1h). Com relação à temperatura do ar a 2m, foi possível perceber diferenças, com valores mais elevados ao longo da região costeira e valores mais baixos deste parâmetro sobre o continente, de uma maneira geral (Figura H-1k). Entretanto, sobre a região continental evidenciada nos resultados do teste 3 foi possível verificar

valores mais elevados de temperatura simulados pelo teste 1, também não identificando o processo de resfriamento.

As diferenças entre os testes 2 e 3 (terceira coluna) apresentaram-se menos expressivas em magnitude com relação às diferenças entre os teste 1 e 3 (segunda coluna). Entretanto, foi possível verificar características relevantes com relação ao impacto da altura do primeiro nível de modelo, uma vez que as configurações 2 e 3 apresentam o mesmo número de níveis verticais.

Foram evidenciadas diferenças positivas de conteúdo de água líquida entre os testes 2 e 3, conforme ilustra a figura H-1c. Tal variável é avaliada no primeiro nível do modelo (z_1) e o fato deste valor ser o dobro no teste 2 em relação ao teste 3 pode ser uma justificativa para este resultado, uma vez que representa uma coluna maior. Com relação aos parâmetros de mistura e temperatura do ar foram verificadas diferenças negativas, apontando para uma menor disponibilidade de vapor e temperaturas mais baixas sobre o continente nas simulações deste teste (Figuras H-1f e H-1l).

Os valores de umidade relativa não apresentaram diferenças significativas entre os testes 2 e 3 neste horário (Figura H-1i).

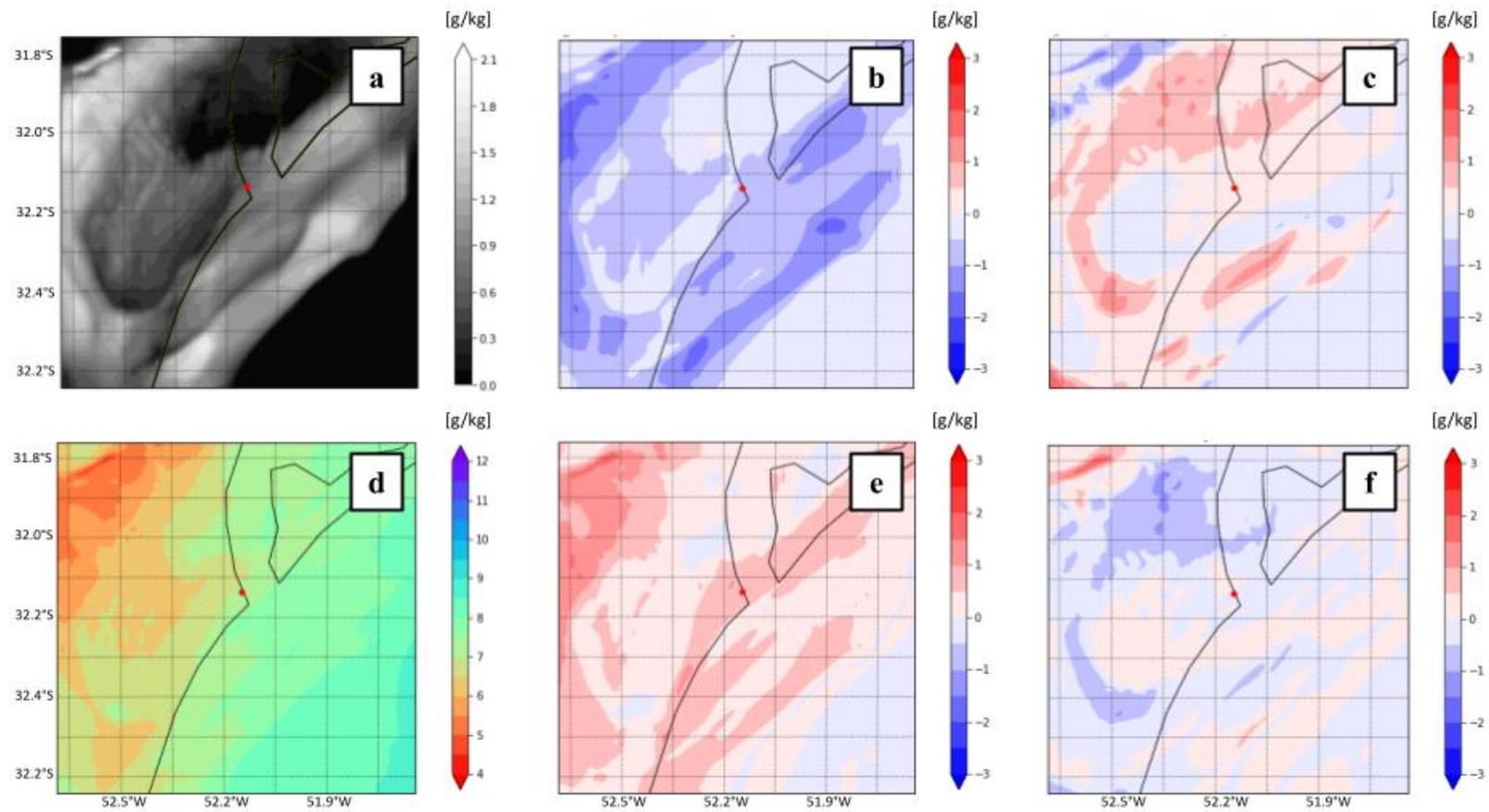


Figura H-1 - Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 23h00 do dia 16 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

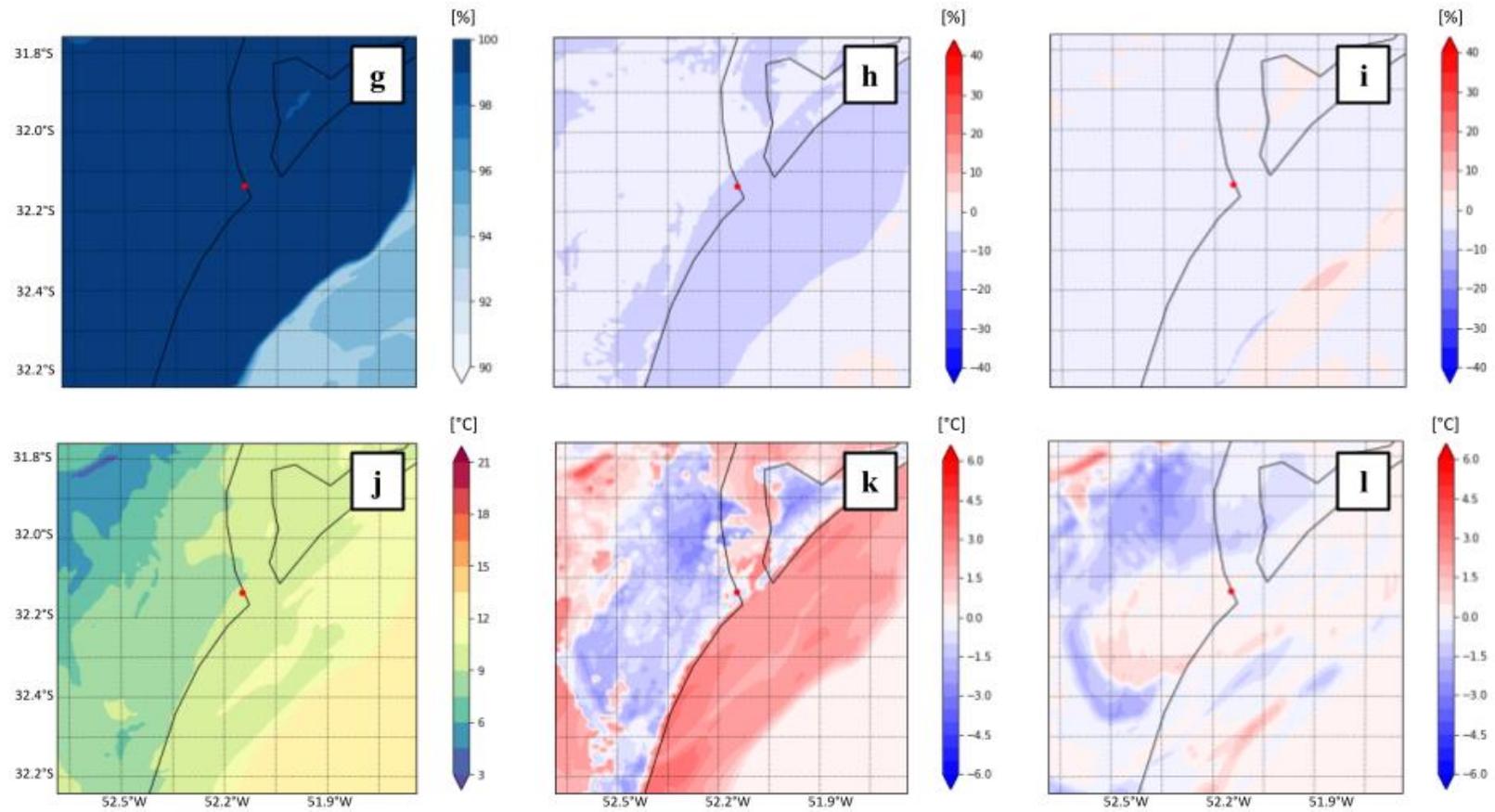


Figura H-1 (continuação)- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 23h00 do dia 16 de julho de 2019. As variáveis avaliadas são conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

Adicionalmente, o modelo WRF simulou ventos fracos em todo o domínio avaliado no teste de referência (Figuras H-2a e H-2d), apresentando-se de quadrante sul próximo ao ponto da estação meteorológica da Praticagem (Figura H-2d). Tal resultado está de acordo com o observado neste local. Tal direção do vento, quando observada nesta região, pode favorecer um incremento de umidade proveniente do oceano na área de estudo, contribuindo para a formação de nevoeiros.

Destaca-se que, de maneira geral, poucas diferenças foram evidenciadas entre os testes 2 e 3, tanto em magnitude, quanto em direção (Figuras H-2a, H-2c, H-2d e H-2f). Para o teste 1 (Figuras H-2b e H-2e), foi destacada a simulação de ventos mais intensos sobre o continente na área de estudo.

Os campos das estimativas de visibilidade estão dispostos na figura H-3. A primeira linha corresponde à estimativa do FSL e a segunda linha à de Kunkel. Destaca-se que, de fato, o evento de nevoeiro simulado pelo teste 1 (Figuras H-3b e H-3e) apresenta um atraso em sua formação e desenvolvimento com relação aos testes 2 e 3. De maneira geral, as estimativas apresentaram concordância do ponto de vista espacial e evidenciaram uma extensão simulada semelhante do evento de nevoeiro para cada teste. Entretanto, foi possível perceber uma potencial maior sensibilidade da estimativa do FSL em relação à de Kunkel, uma vez que a segunda se mostra mais uniforme, com predomínio de valores de visibilidade muito restrita. Outro aspecto evidenciado pela estimativa de visibilidade do FSL consiste em uma restrição de visibilidade mais significativa ter sido simulada na configuração vertical com primeiro nível do modelo mais baixo (Figura H-3a).

Desta forma, foi possível perceber que, um aumento da resolução vertical, em conjunto com uma redução na altura do primeiro nível do modelo, resultou na melhoria da representação do horário de formação do nevoeiro. Adicionalmente, a altura do primeiro nível do modelo apresentou-se relevante para a avaliação espacial da intensidade da restrição de visibilidade associada ao fenômeno.

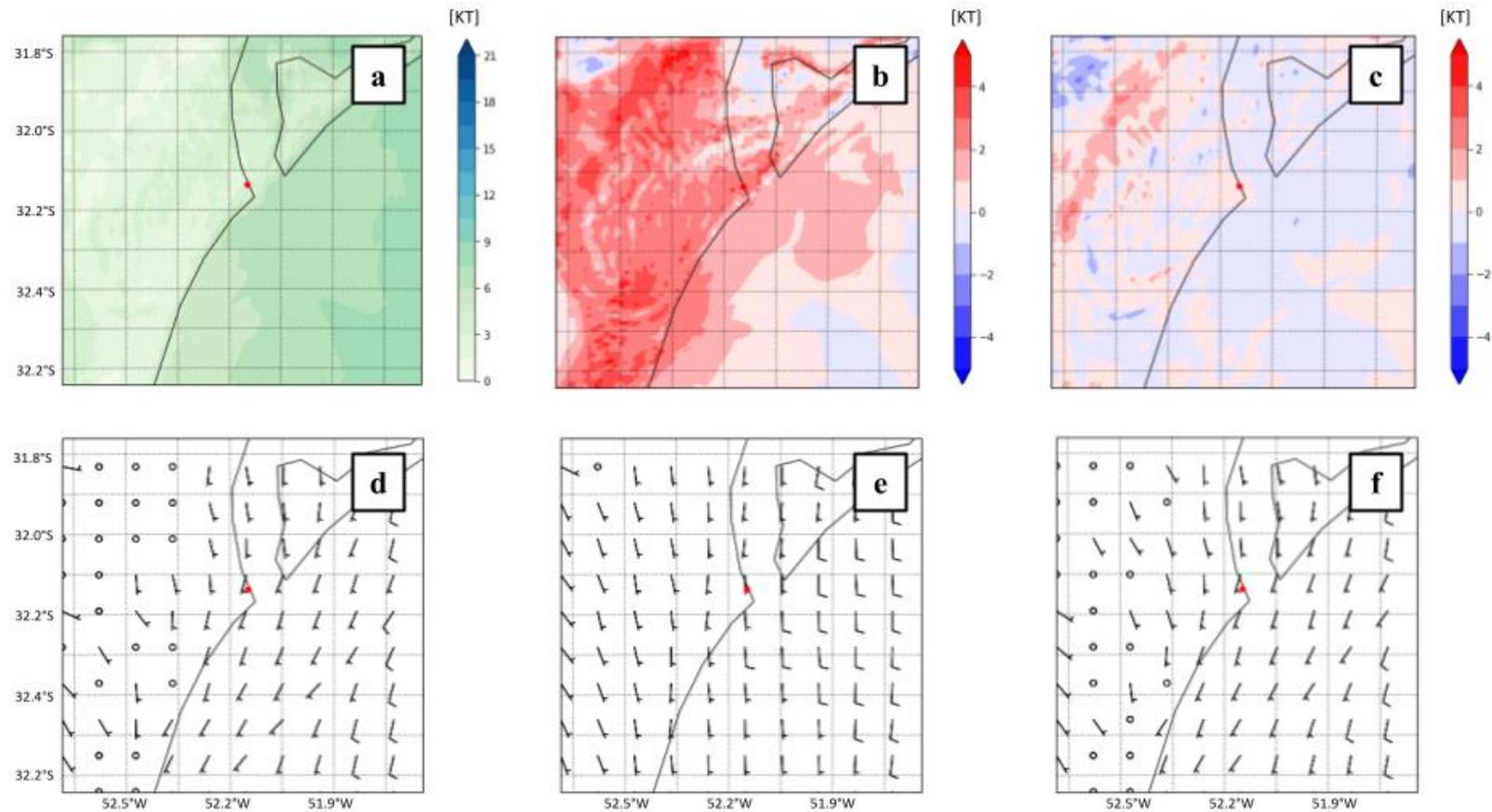


Figura H-2 - Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 23h00 do dia 16 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (em nós) (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetros para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

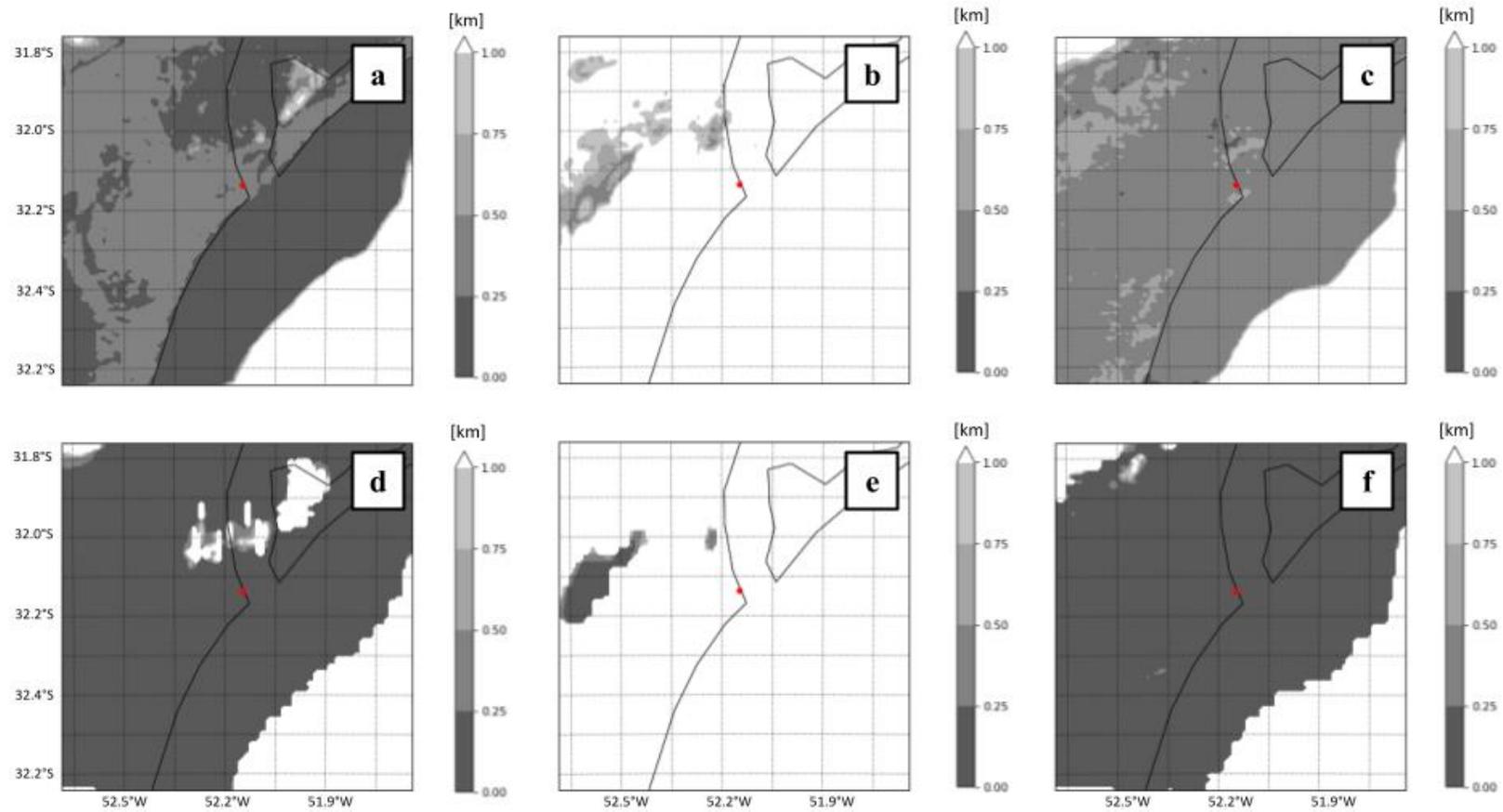


Figura H-3- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 23h00 do dia 16 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

H.2. Dissipação do fenômeno

A avaliação dos campos meteorológicos para o horário de 03h do dia 18 de julho de 2019, momento do registro de retorno definitivo à condição de Praticabilidade durante o intervalo avaliado, permitiu constatar que o modelo WRF conseguiu simular características físicas condizentes com o processo de dissipação do fenômeno estudado.

De uma maneira geral, neste estágio do nevoeiro, os três testes apresentaram poucas diferenças entre si na região estuarina da Lagoa dos Patos, convergindo para características semelhantes. A seguir serão descritos os resultados obtidos para o teste 3.

Através da figura H-4a foi possível verificar que o campo de conteúdo de água líquida não apresentou valores significativos deste parâmetro sobre a área de atuação da praticagem, mas ainda foram identificados valores acima de 1g/kg sobre o oceano, mais distante da costa. Sobre estas mesmas regiões foram simulados máximos de umidade relativa (a partir de 99%), assim como próximo ao canal de acesso ao porto e sobre o continente (Figura H-4g).

Neste estágio do fenômeno não foram identificados indícios de conversão de vapor em água líquida (Figuras H-4a e H-4d), como foi característico na formação por resfriamento. E o campo de temperatura mostrou valores simulados entre 12°C e 15°C na área de estudo (Figura H-4j).

Conforme mencionado anteriormente, os resultados para os testes 1 e 2 apresentaram diferenças pequenas em comparação com o teste 3. Para razão de mistura e conteúdo de água líquida, as diferenças foram iguais ou inferiores a 0,5g/kg (Figuras H-4b, H-4c, H-4e e H-4f) em grande parte do domínio avaliado. Para temperatura e umidade relativa, o predomínio foi de diferenças iguais ou inferiores a 0,5°C e 5%, respectivamente.

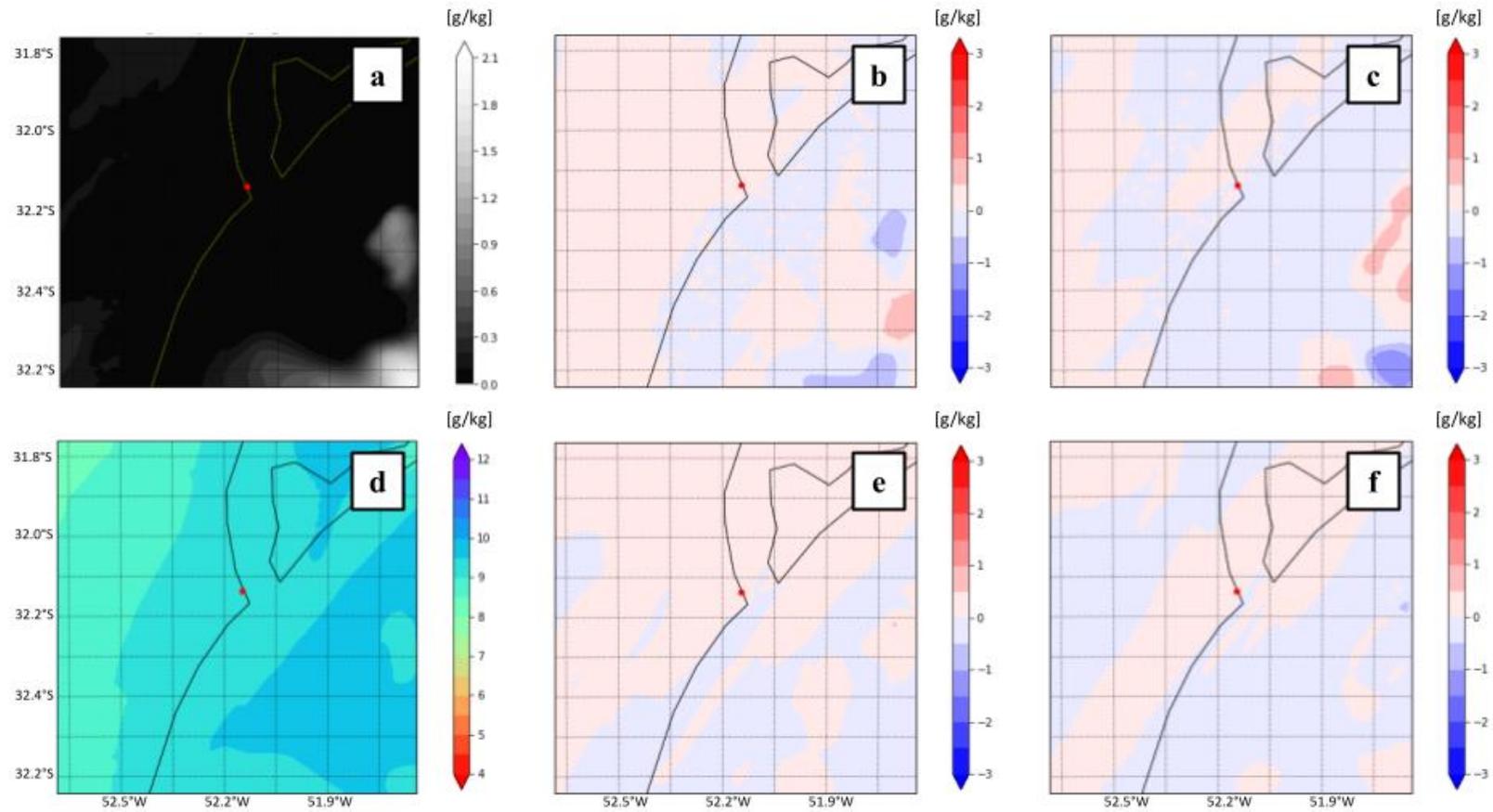


Figura H-4 - Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 03h00 do dia 18 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

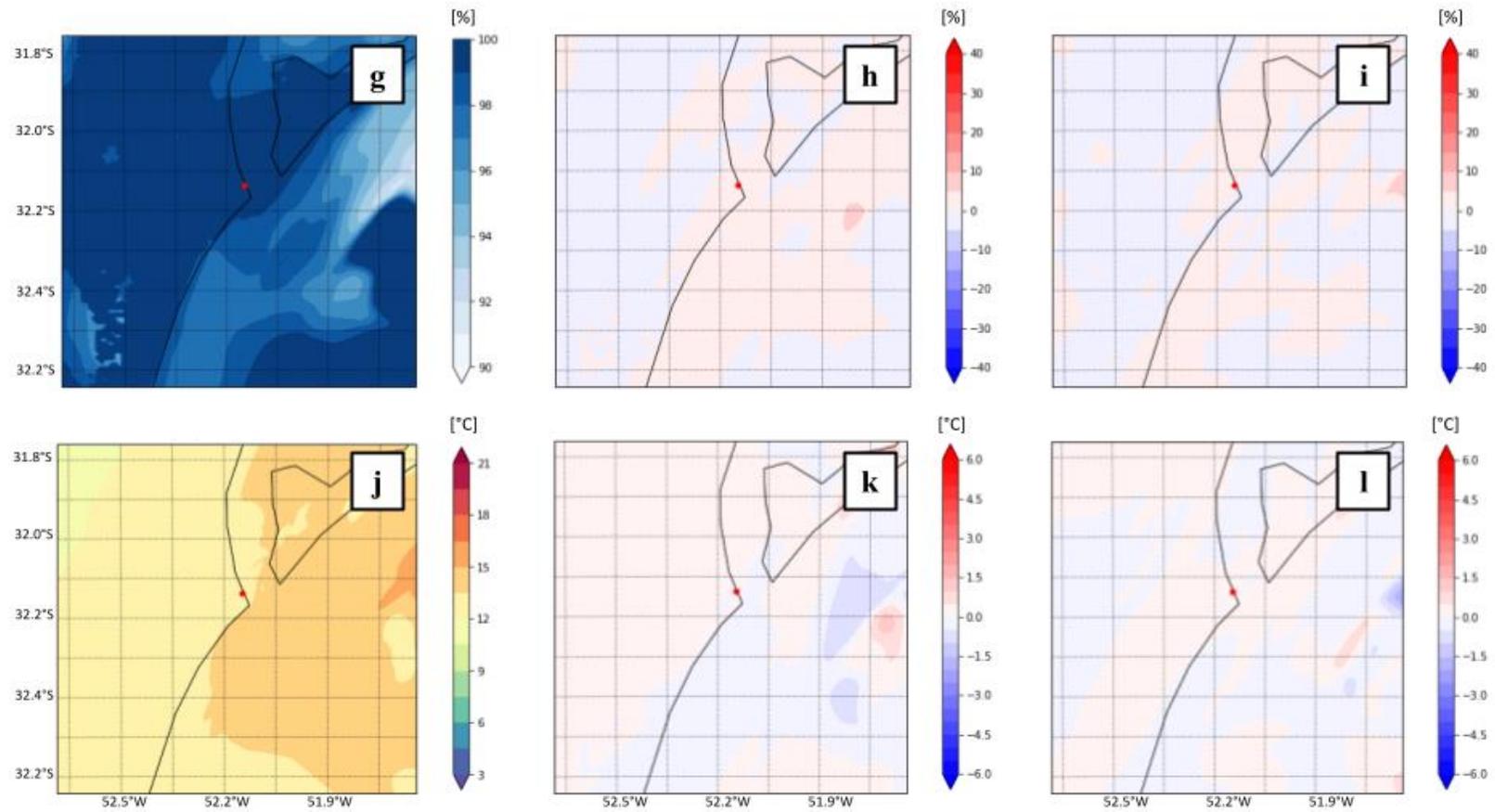


Figura H-4 (continuação) - Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (*segunda* coluna) e 2 (*terceira* coluna) para o horário de 03h00 do dia 18 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

O campo de vento para o teste 3 mostrou valores mais elevados de magnitude neste horário (Figura H-5a), apontando para intensidade moderada desta variável, o que condiz com o que foi observado na estação meteorológica. Com relação à direção do vento, destacou-se sobre a área de estudo o predomínio de ventos de nordeste, inclusive próximo à torre da Praticagem, corroborando com a observação (Figura H-5d). Analisando este campo em conjunto com o campo de temperatura (Figura H-4j), foi possível perceber um padrão sugestivo de advecção de ar mais quente na região de estudo, o que pode indicar uma contribuição para dissipação de um nevoeiro, em conjunto com a intensificação dos ventos. As diferenças para este parâmetro se mostraram mais pronunciadas entre os testes 1 e 3, com a simulação de ventos mais intensos na região costeira pelo teste 1 (Figura H-5b).

Os campos de visibilidade do FSL para este horário também caracterizam condições favoráveis ao retorno para condição de Praticabilidade, ou seja, valores deste parâmetro superiores a 500 m na área de atuação da Praticagem (Figuras H-6a e H-6b) nos testes 1 e 3. Para o teste 2 ainda foram estimados valores de visibilidade característicos da condição de Impraticabilidade próximo ao canal (Figura H-6c). A estimativa de visibilidade de Kunkel também representou bem a condição de retorno à Praticabilidade no teste 3 (Figura H-6d), identificando a ausência de nevoeiro na entrada do canal e, conseqüentemente, condições de visibilidade superiores a 1km. Nos testes 1 e 2 (Figuras H-6e e H-6f), este parâmetro apontou uma redução da área de abrangência do fenômeno, indicativa do processo de dissipação do mesmo sobre a área de atuação da Praticagem. Entretanto, ainda foram simulados valores de visibilidade abaixo de 500m a partir destas configurações.

Evidenciou-se que, assim como no caso anterior, as restrições de visibilidade pela estimativa do FSL se mostraram mais intensas quanto menor a altura do primeiro nível do modelo

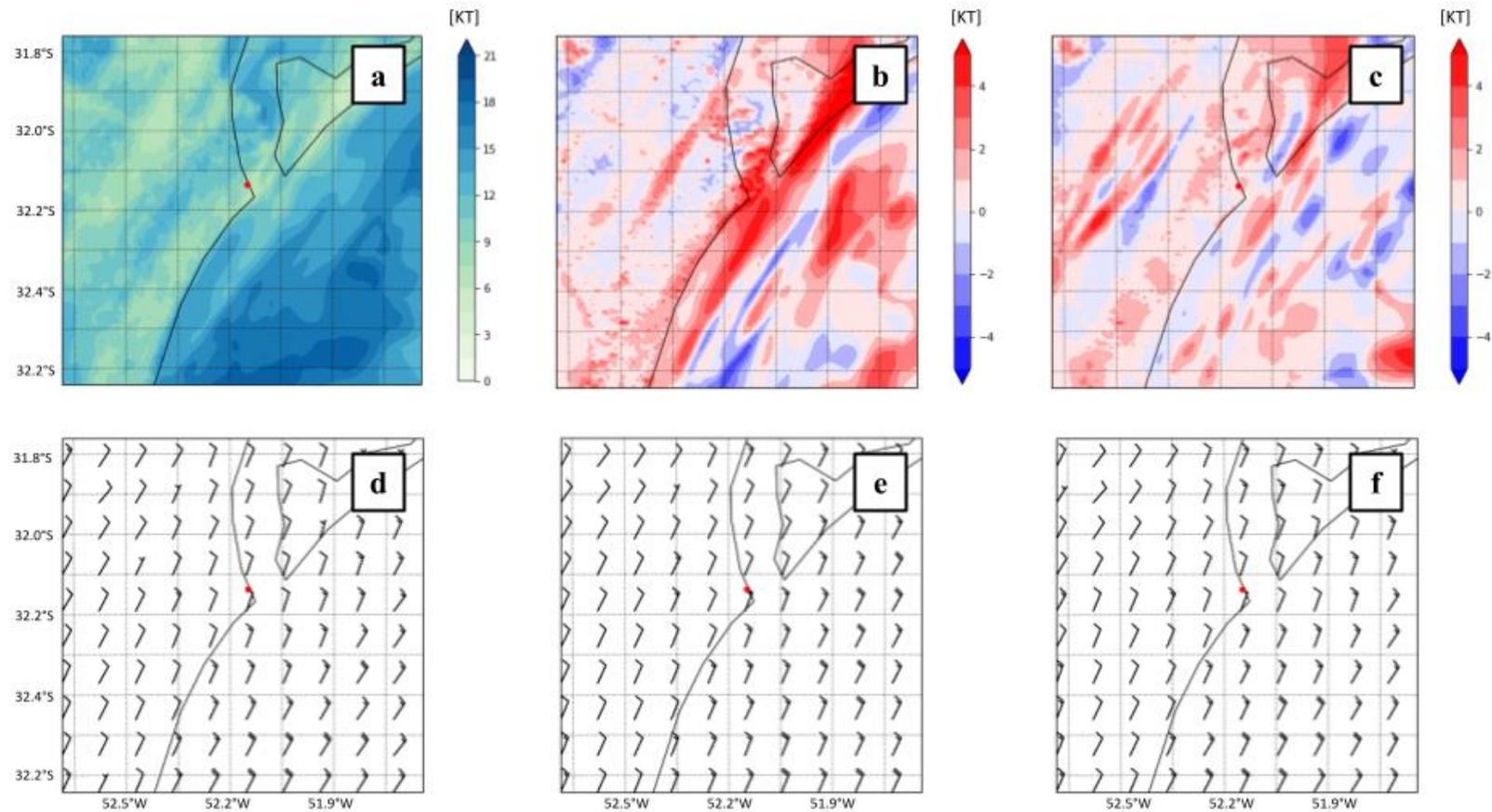


Figura H-5 - Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (*segunda* coluna) e 2 (*terceira* coluna) para o horário de 03h00 do dia 18 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (em nós) (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetro para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

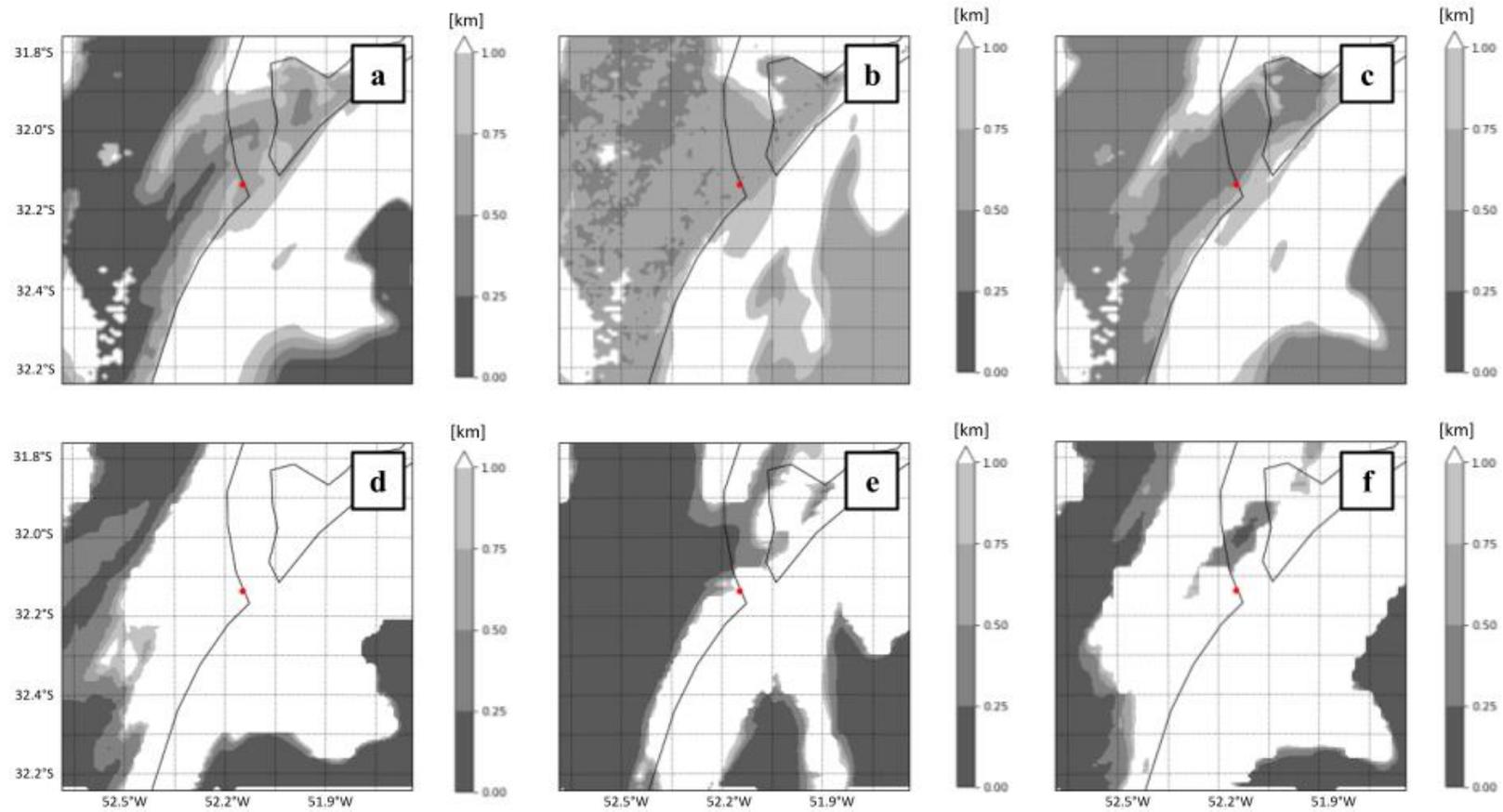


Figura H-6 - Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 03h00 do dia 18 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

No horário de 09h do dia 18 de julho, os campos de visibilidade simulados pelo modelo confirmaram o processo de dissipação do fenômeno e apontaram para a manutenção da condição de Praticabilidade na área próxima ao canal para todos os testes avaliados neste estudo (Figura H-7). Desta forma, o modelo WRF mostrou habilidade em simular o decaimento do nevoeiro estudado.

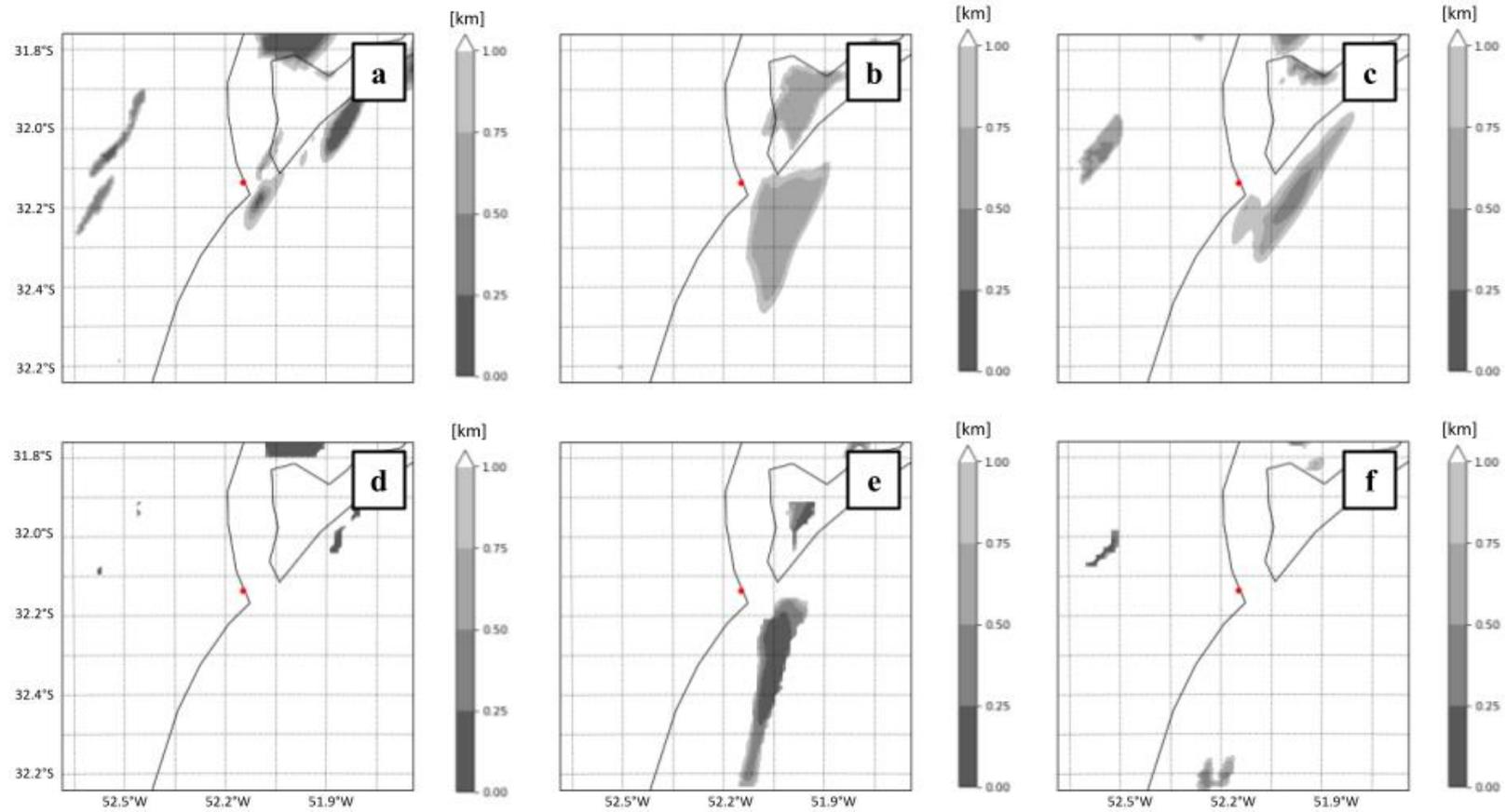


Figura H-7 - Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (*segunda* coluna) e 2 (*terceira* coluna) para o horário de 09h00 do dia 18 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

APÊNDICE I – RESULTADOS TESTES DE SENSIBILIDADE DO MODELO WRF À PARÂMETROS DE RESOLUÇÃO VERTICAL – PERÍODO C

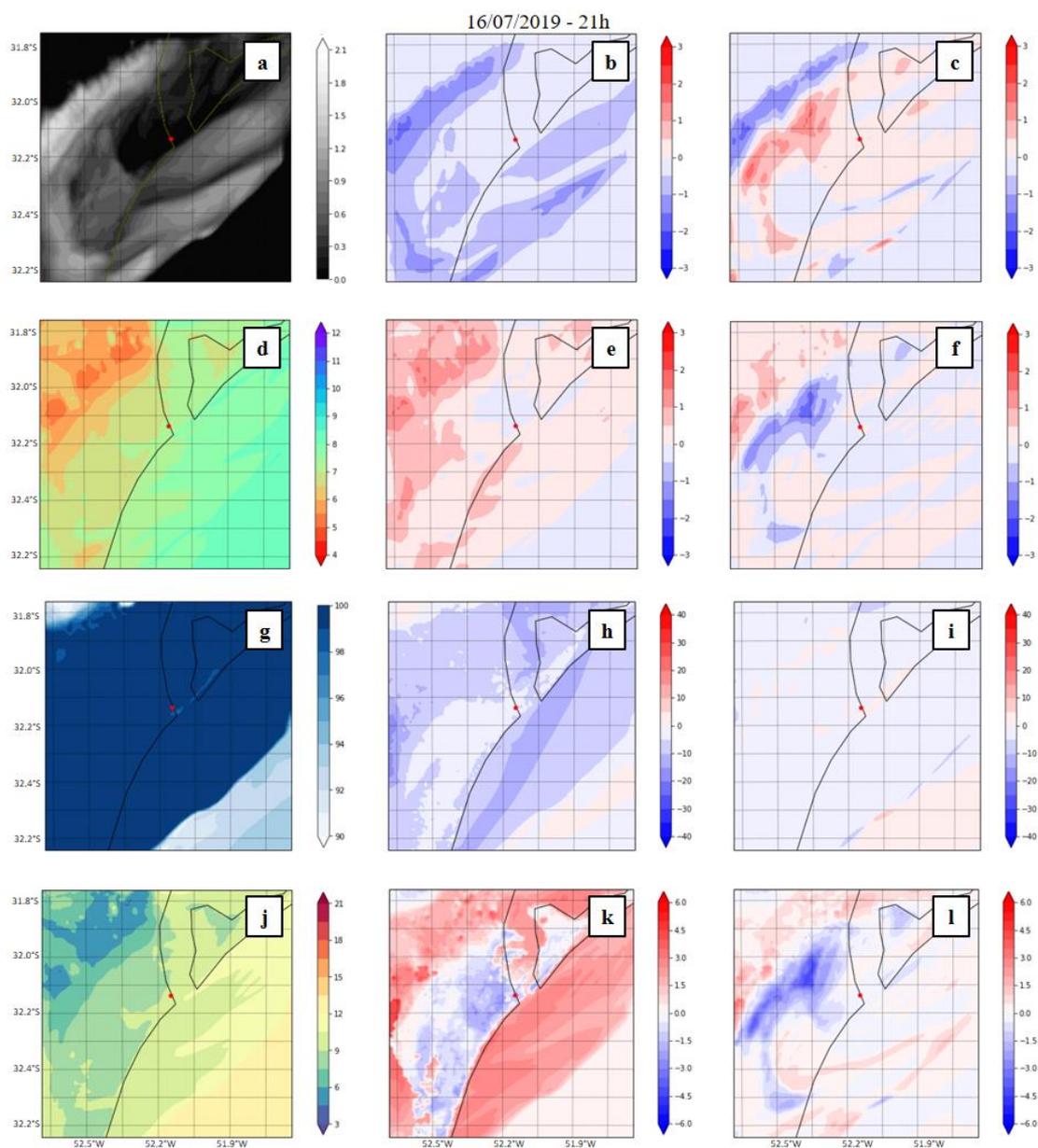


Figura I- 1- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 21h do dia 16 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

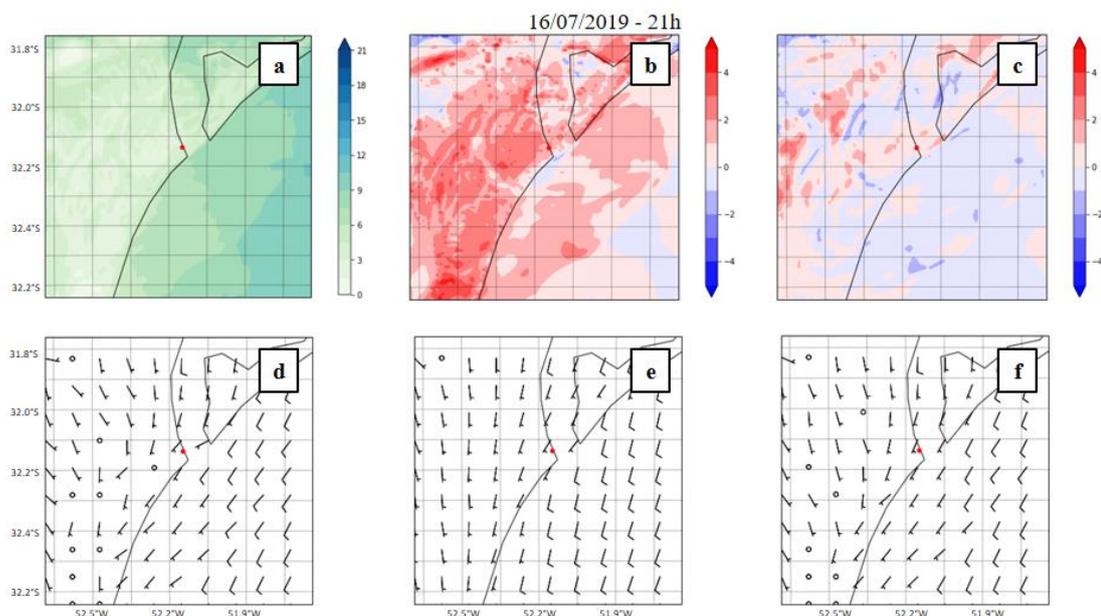


Figura I- 2- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 21h do dia 16 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetros para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

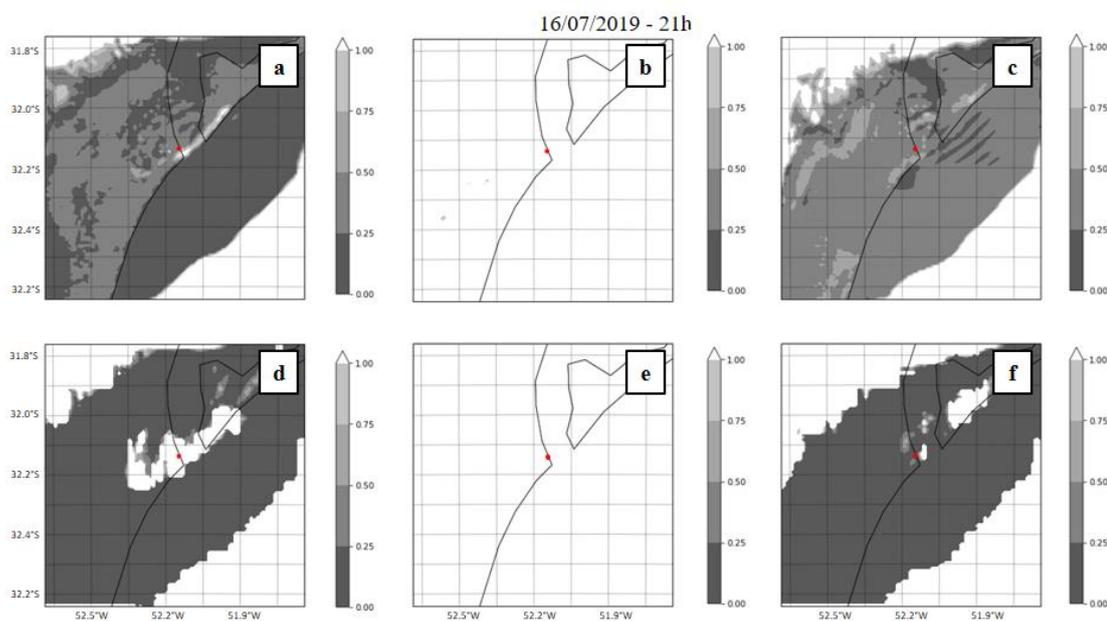


Figura I- 3- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 21h do dia 16 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

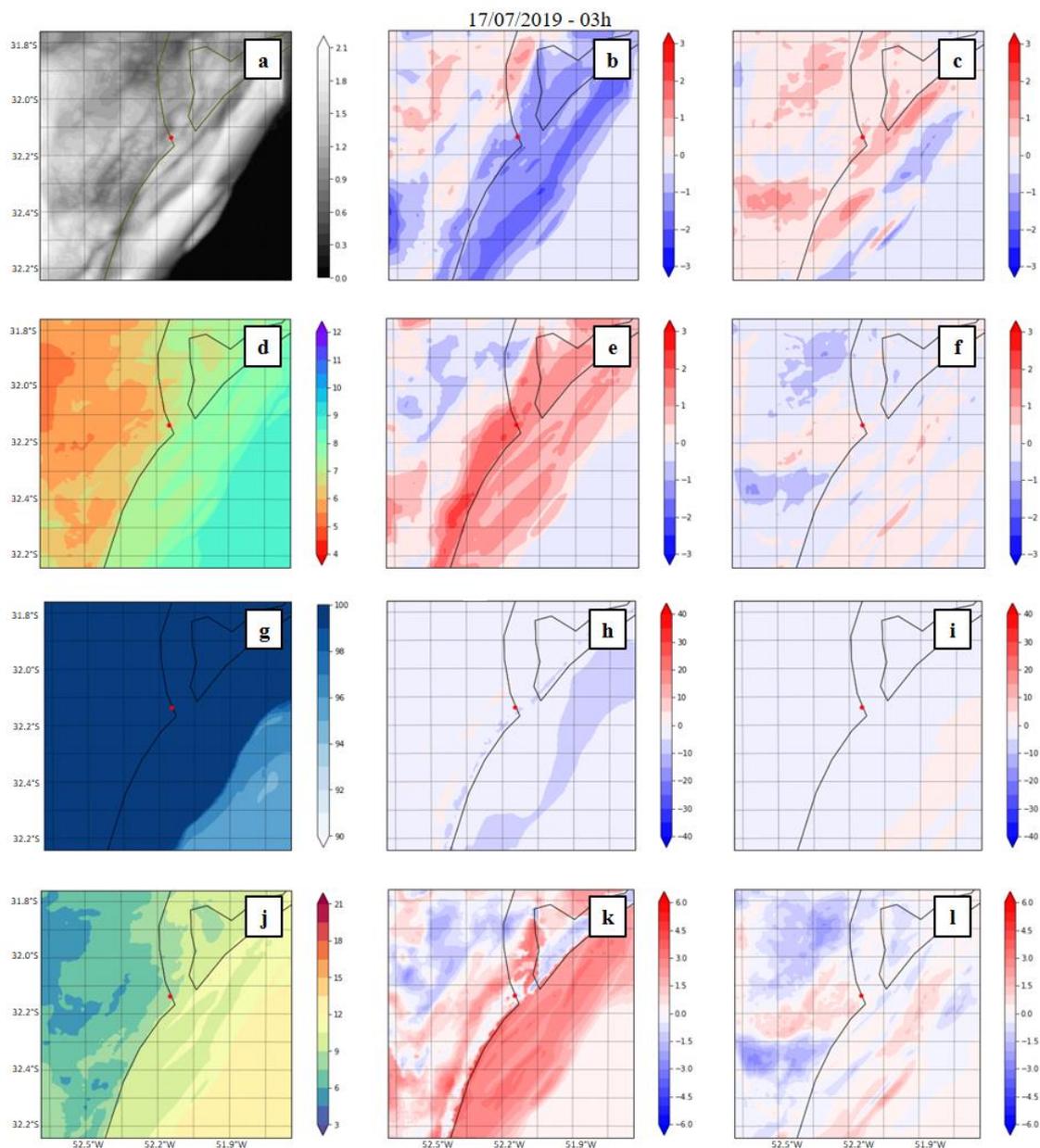


Figura I- 4- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 03h do dia 17 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l).O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

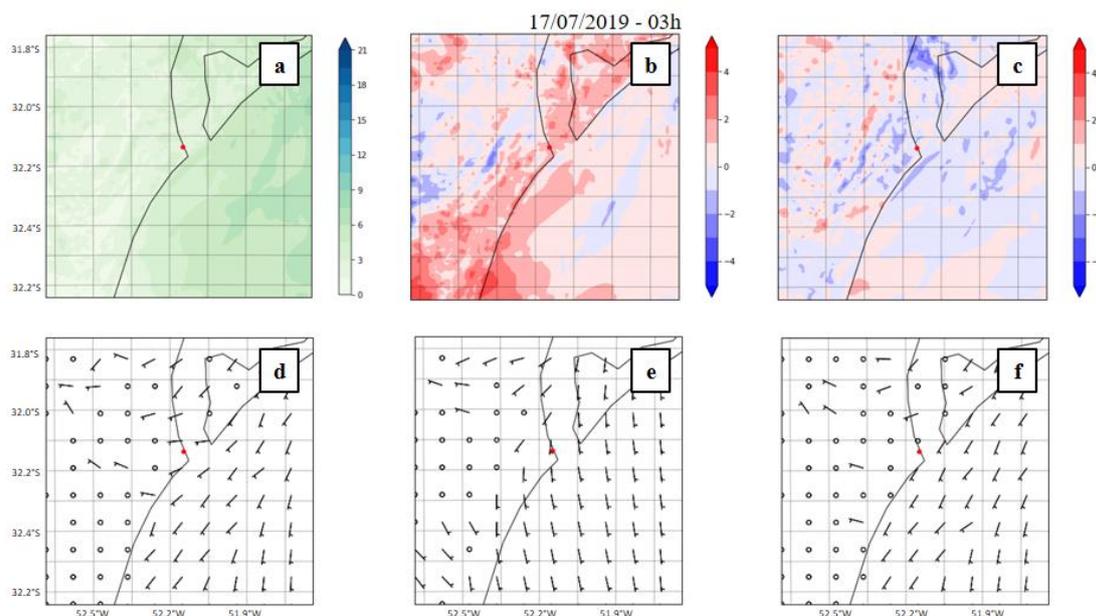


Figura I- 5- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 03h do dia 17 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetros para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

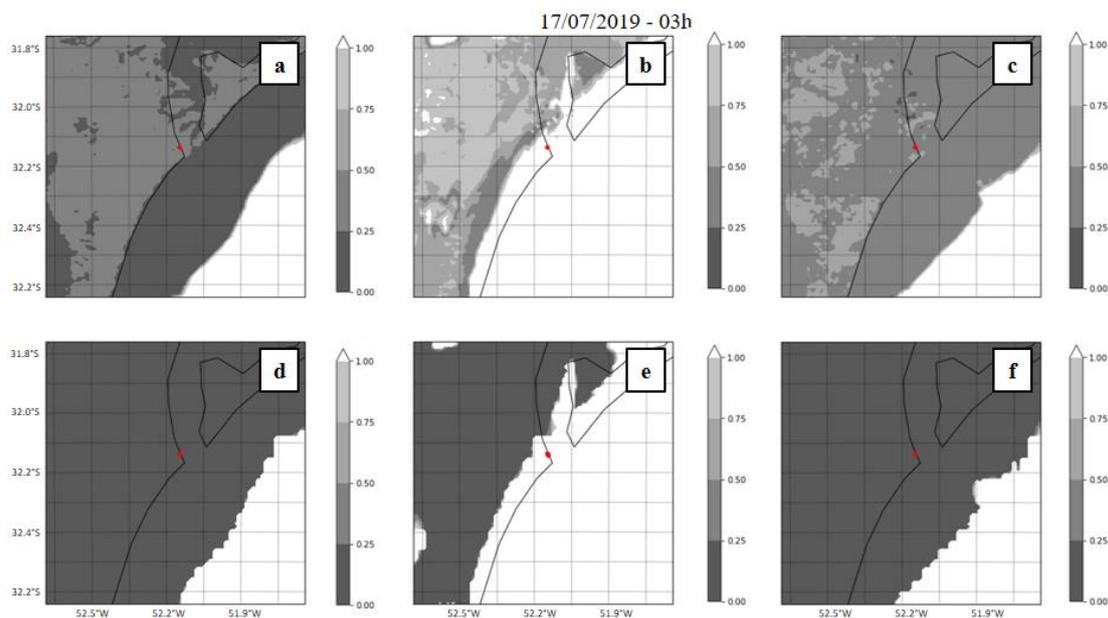


Figura I- 6- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 03h00 do dia 17 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

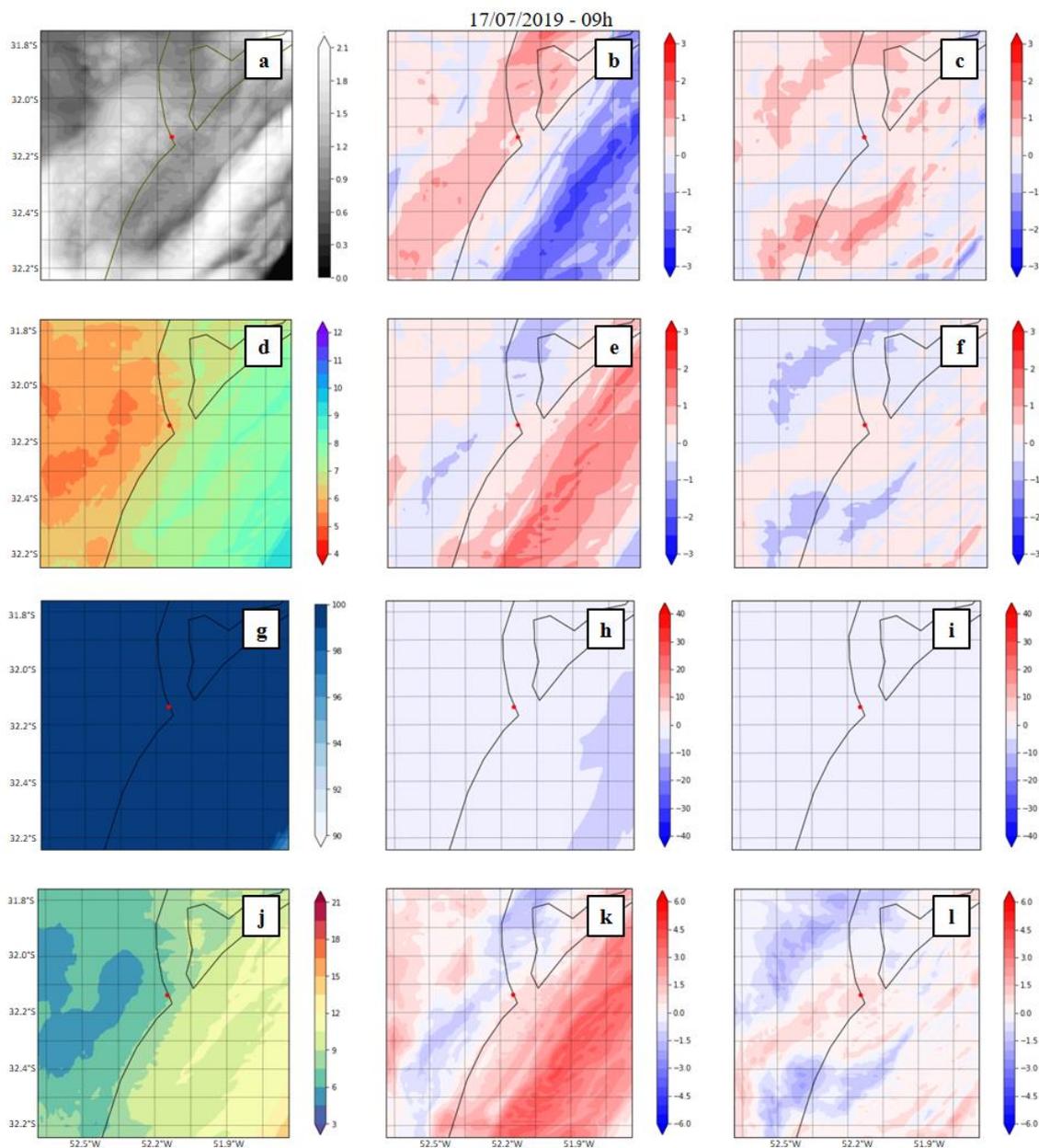


Figura I- 7- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 09h do dia 17 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l).O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

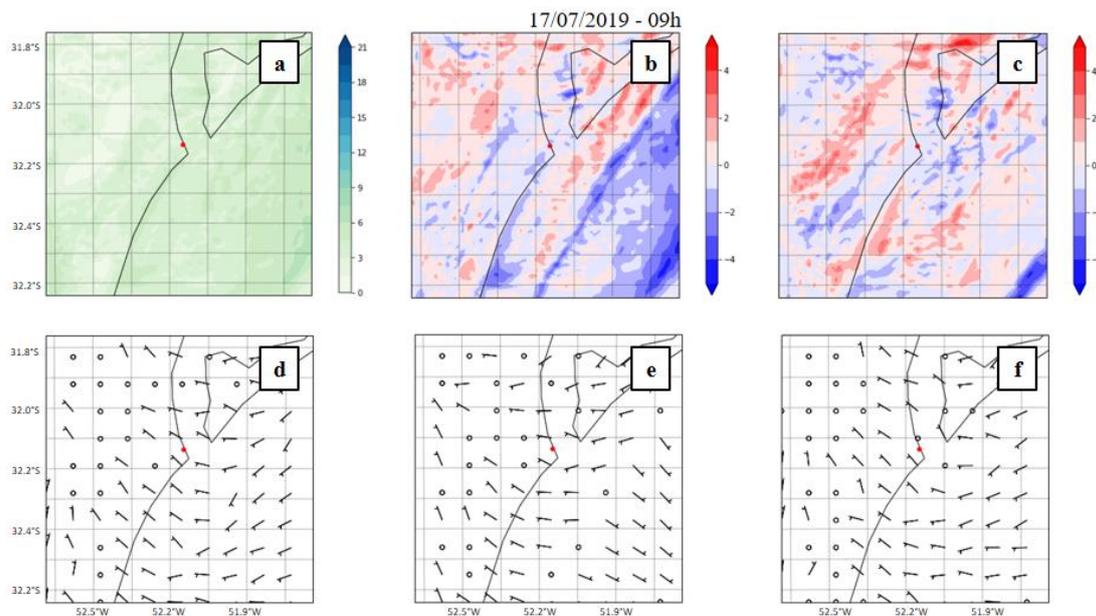


Figura I- 8- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 09h do dia 17 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetros para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

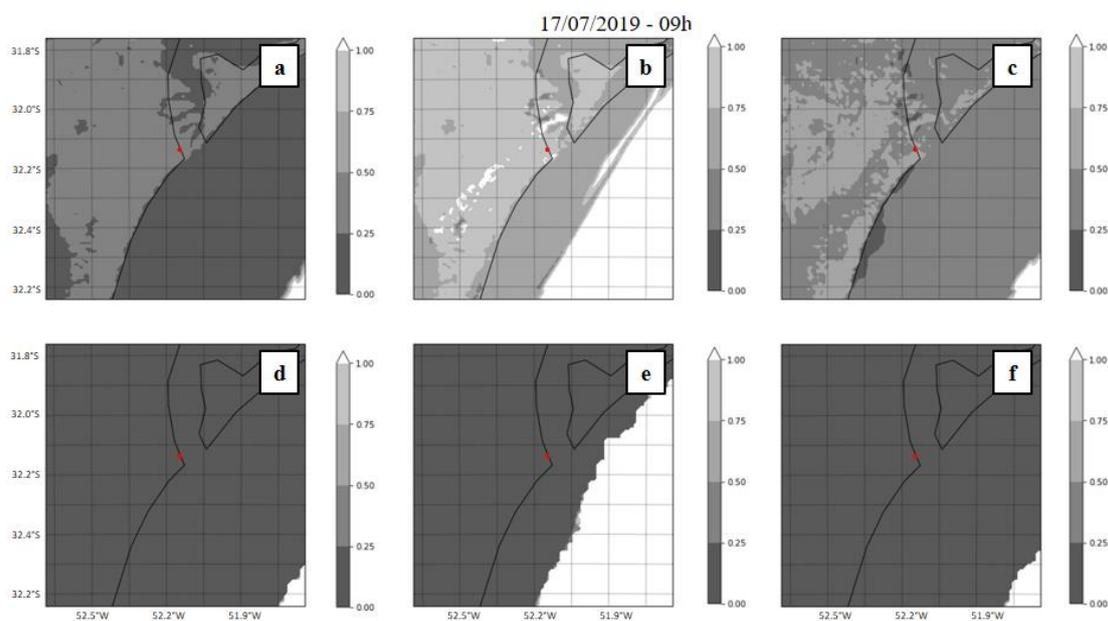


Figura I- 9- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 09h do dia 17 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

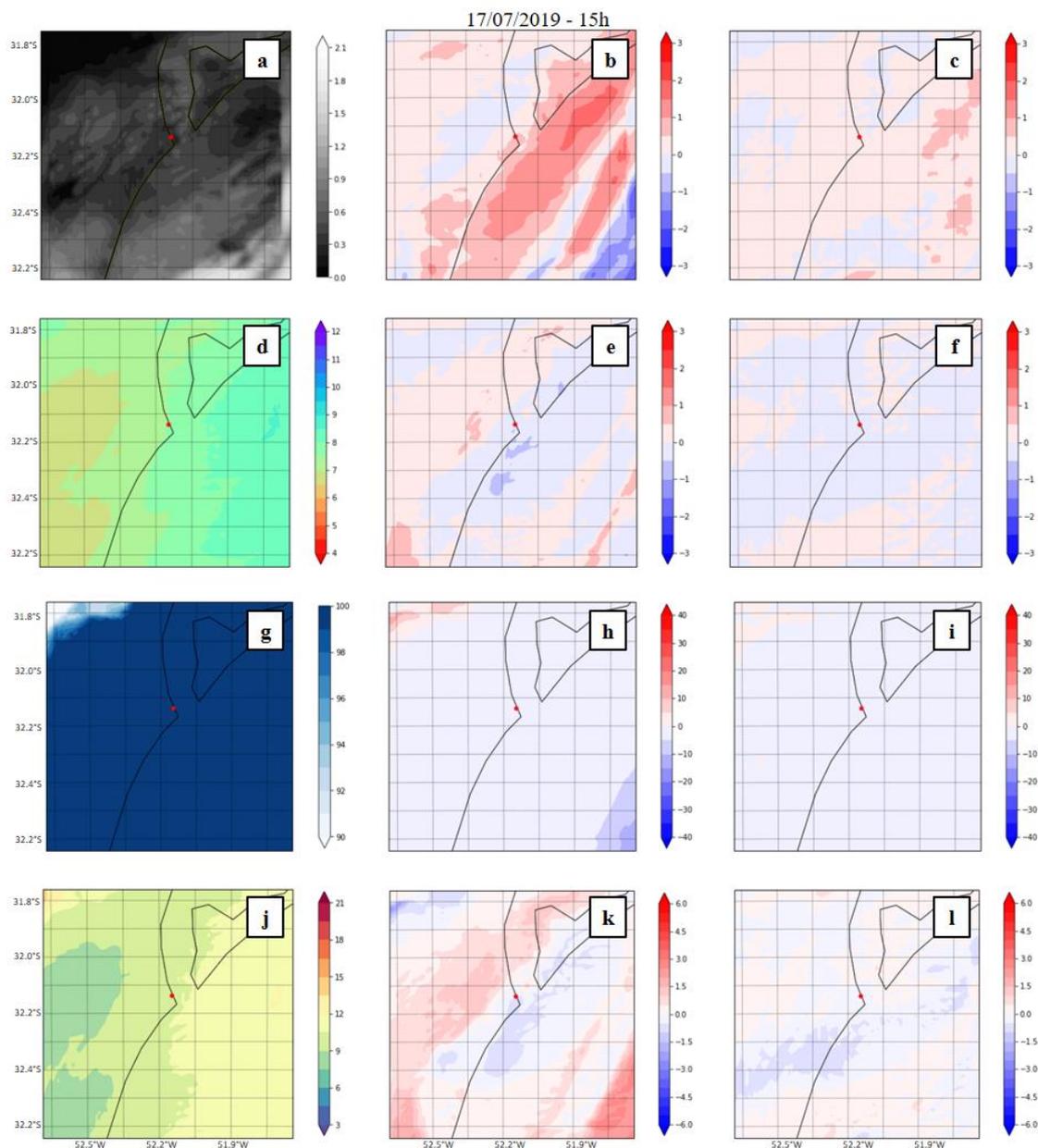


Figura I- 10- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 15h do dia 17 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l).O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

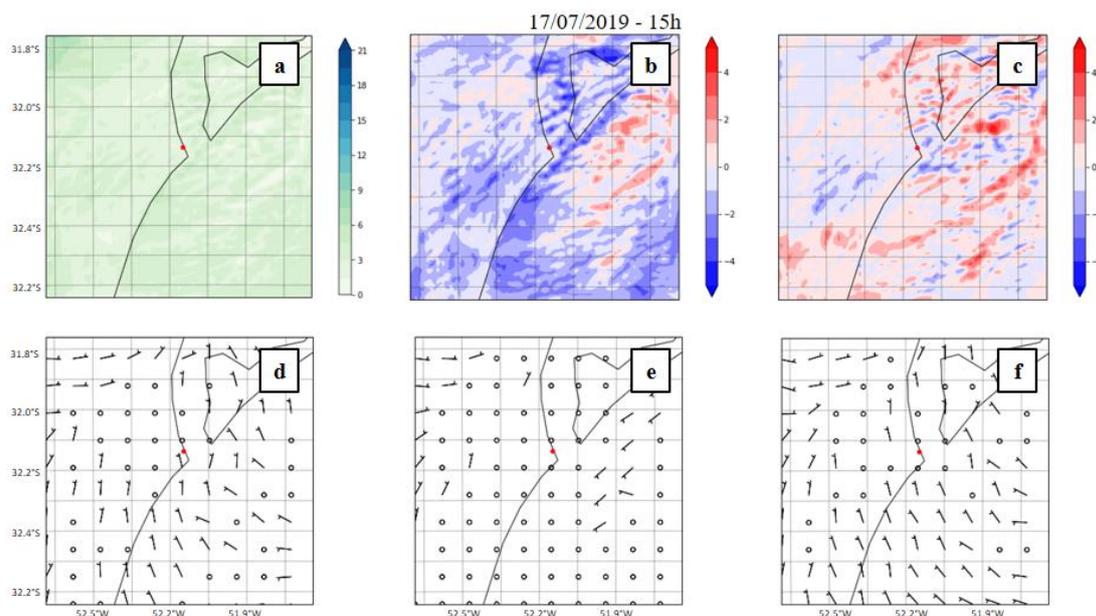


Figura I-11- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 15h do dia 17 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetros para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

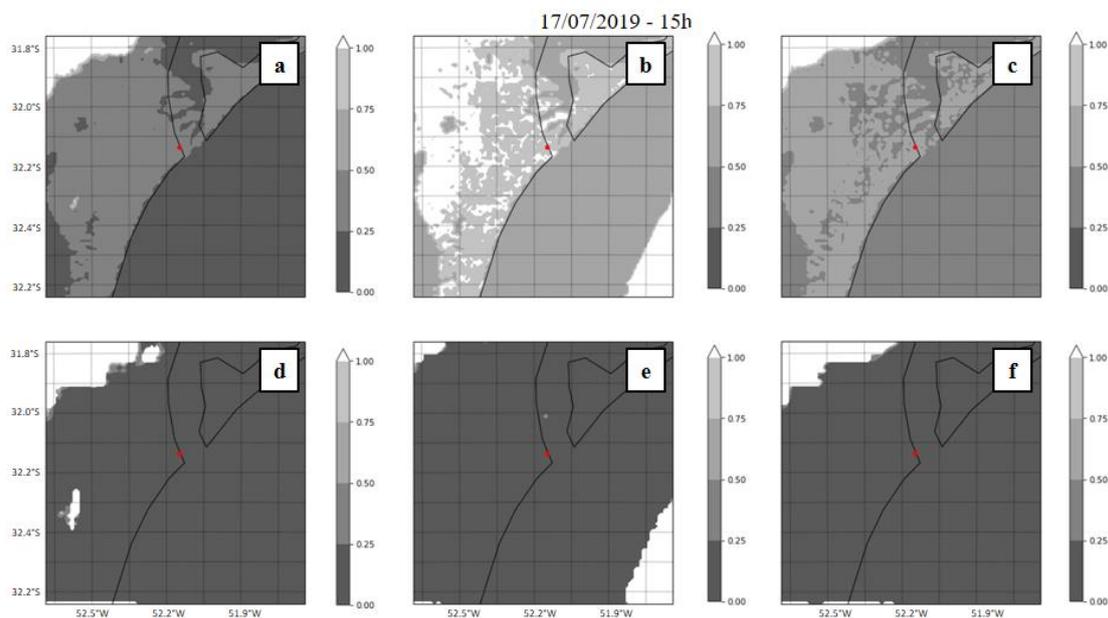


Figura I- 12- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 15h do dia 17 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

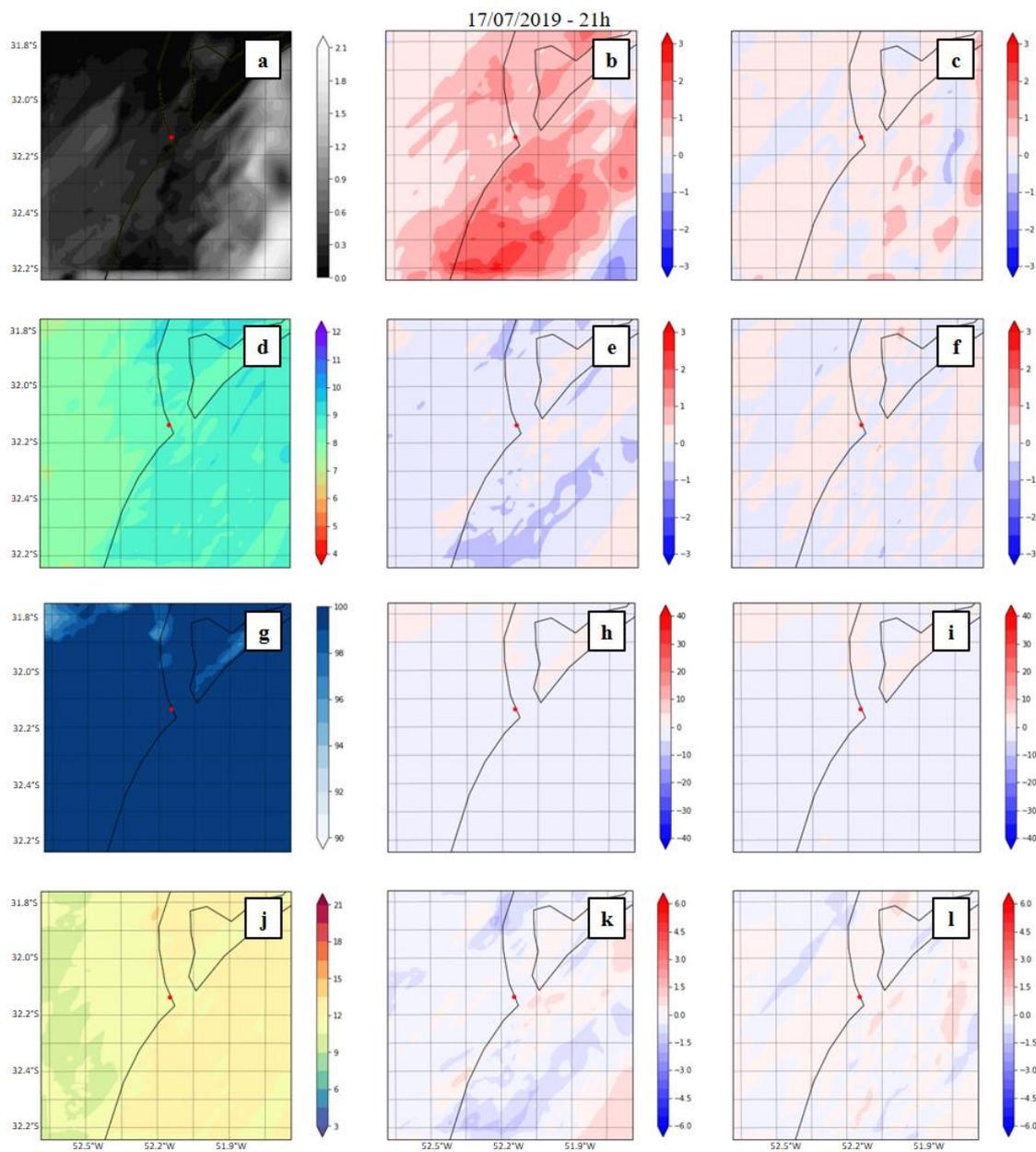


Figura I- 13- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 21h do dia 17 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l).O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

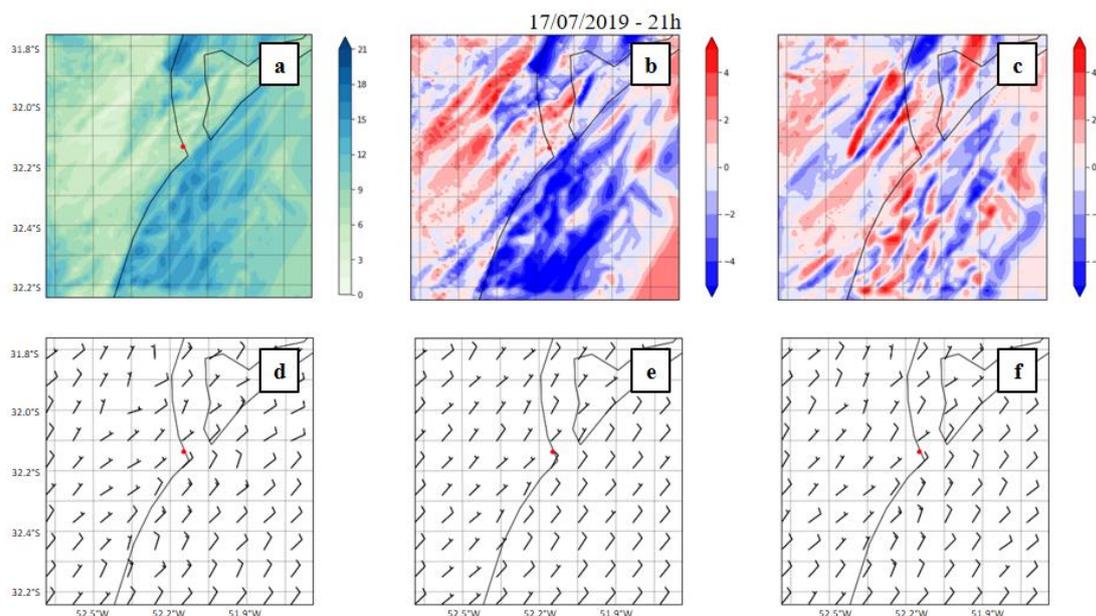


Figura I- 14- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 21h do dia 17 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetros para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

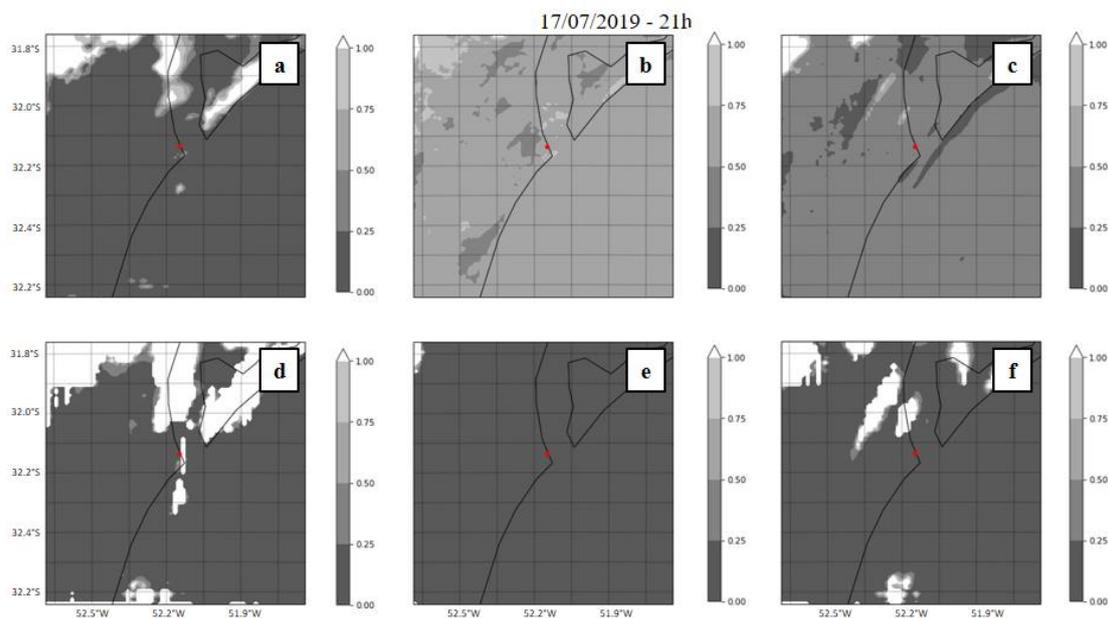


Figura I- 15- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 21h do dia 17 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

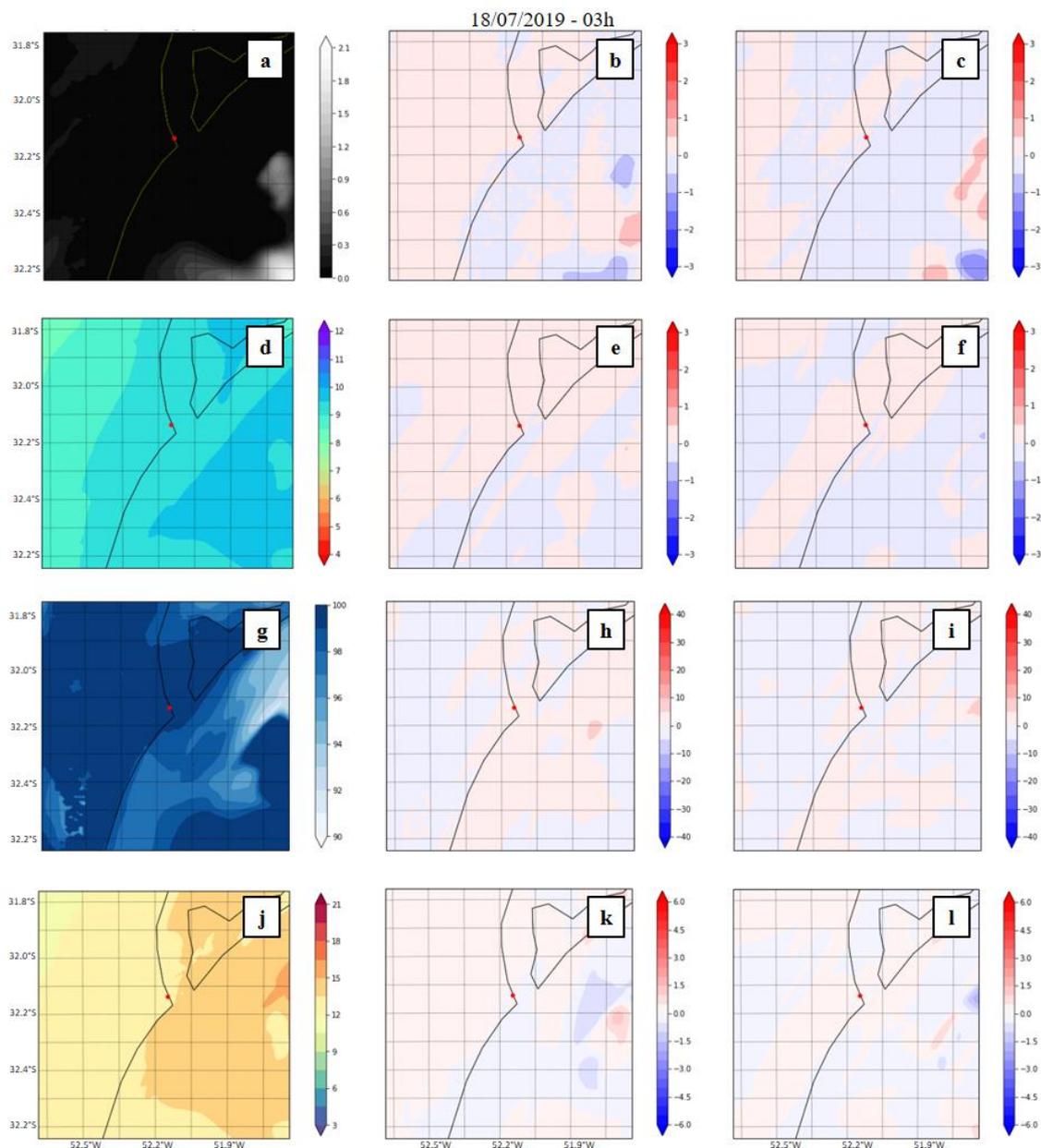


Figura I- 16- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 03h do dia 18 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l).O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

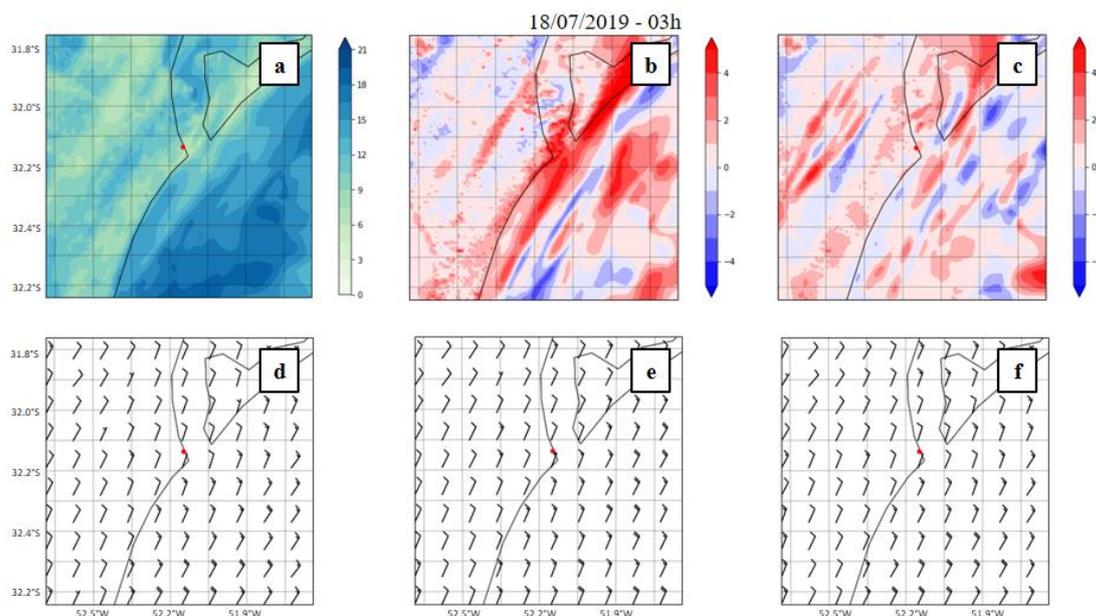


Figura I- 17- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 03h do dia 18 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetros para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

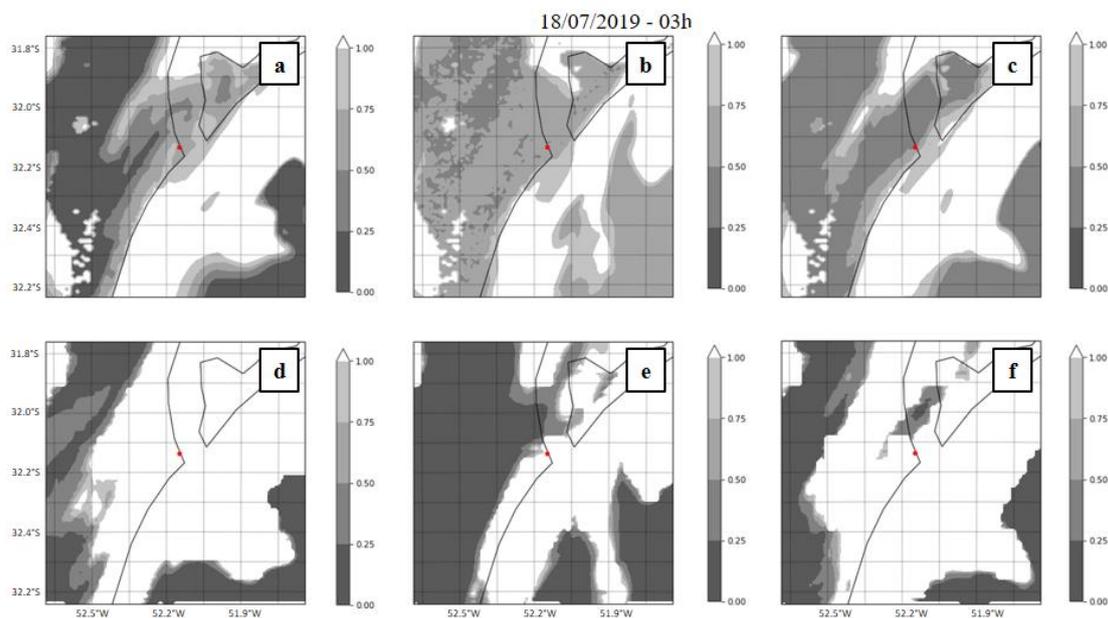


Figura I- 18- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 03h do dia 18 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

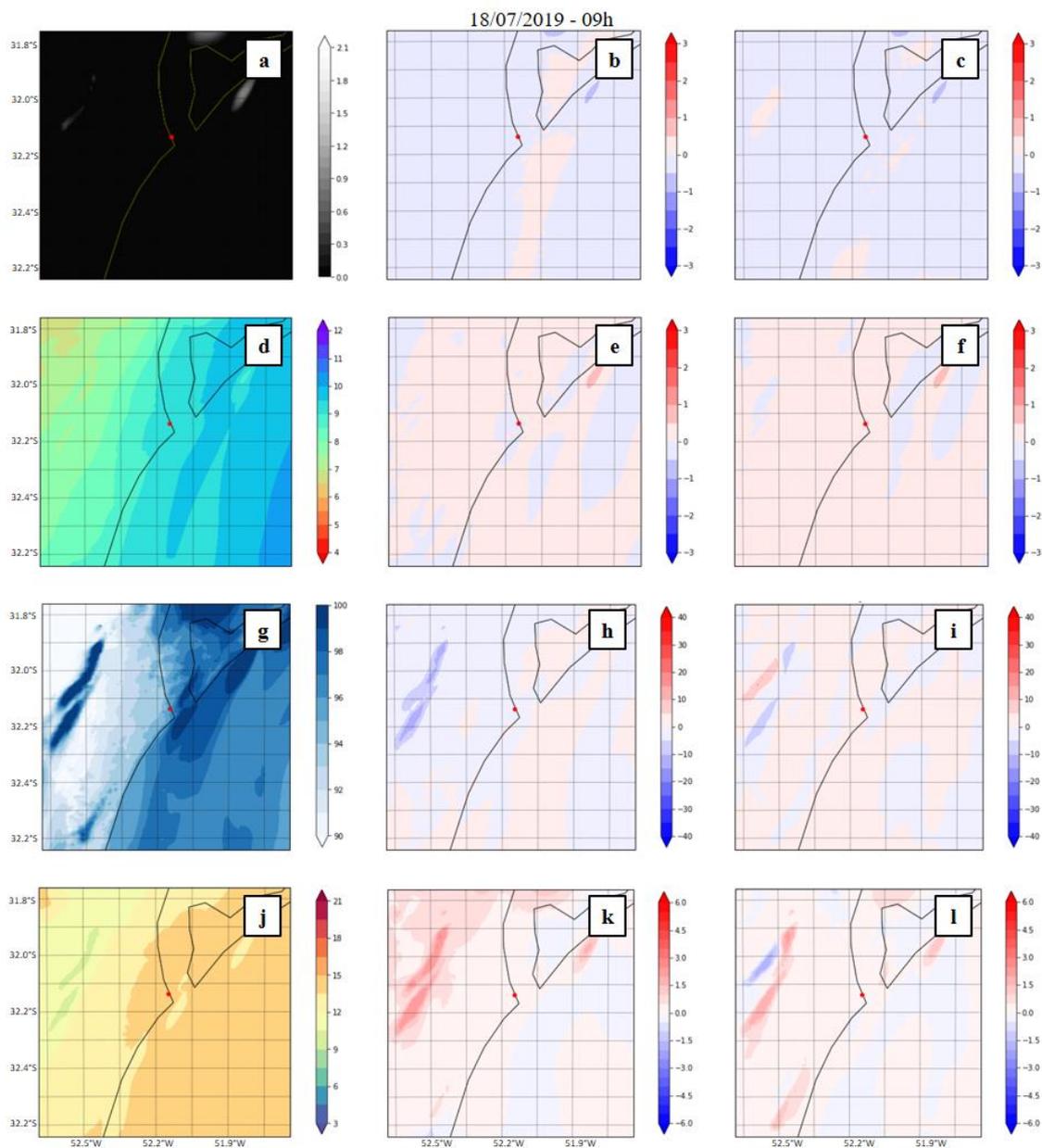


Figura I- 19- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 09h do dia 18 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l).O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

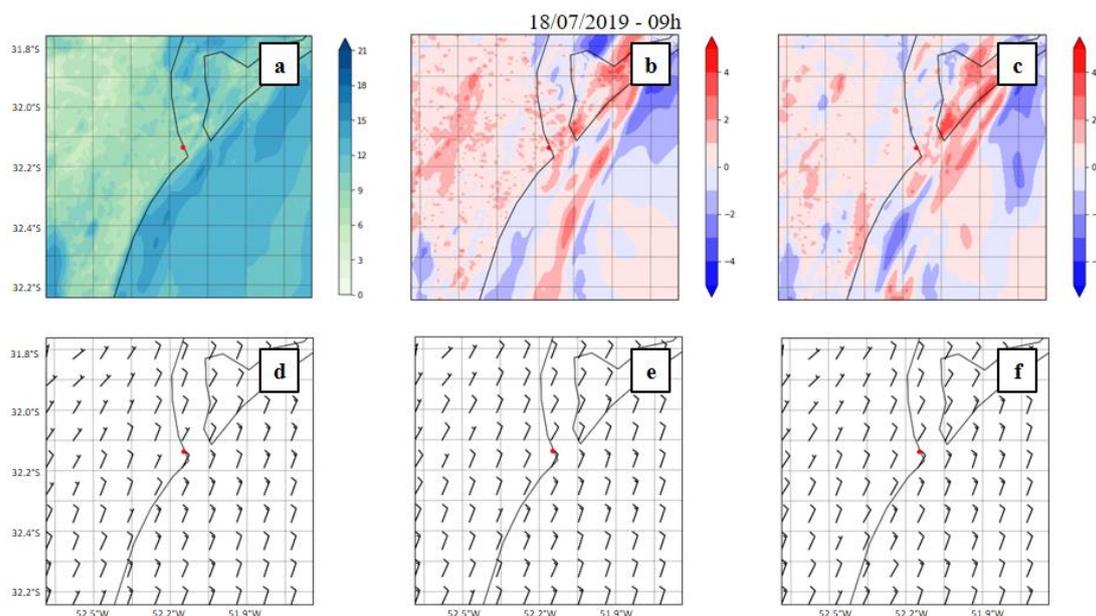


Figura I- 20- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 09h do dia 18 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetros para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

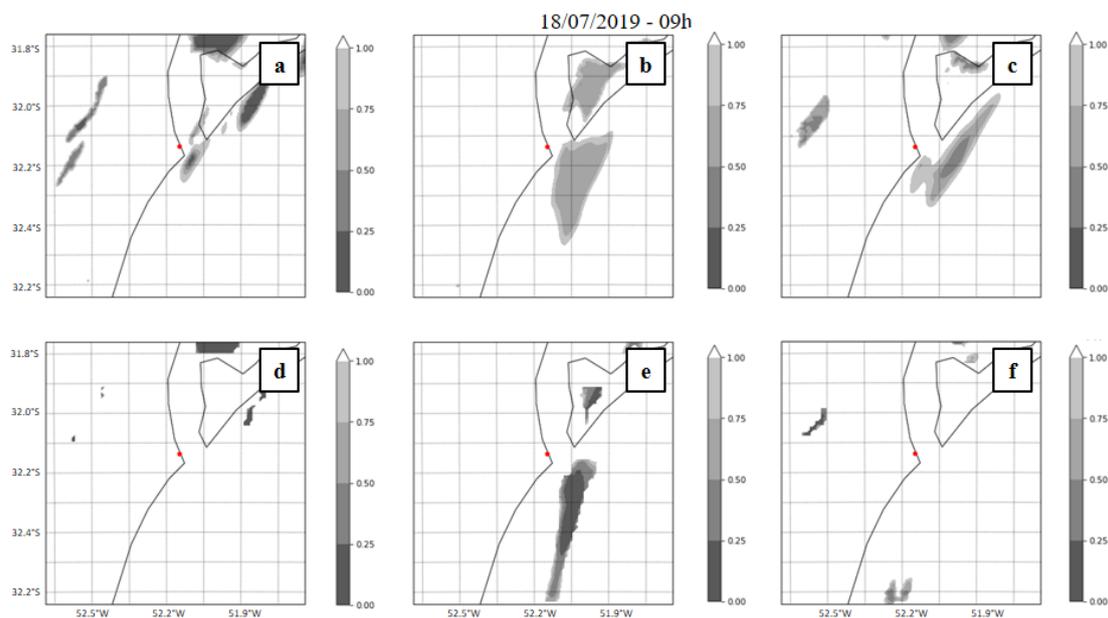


Figura I- 21- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 09h do dia 18 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

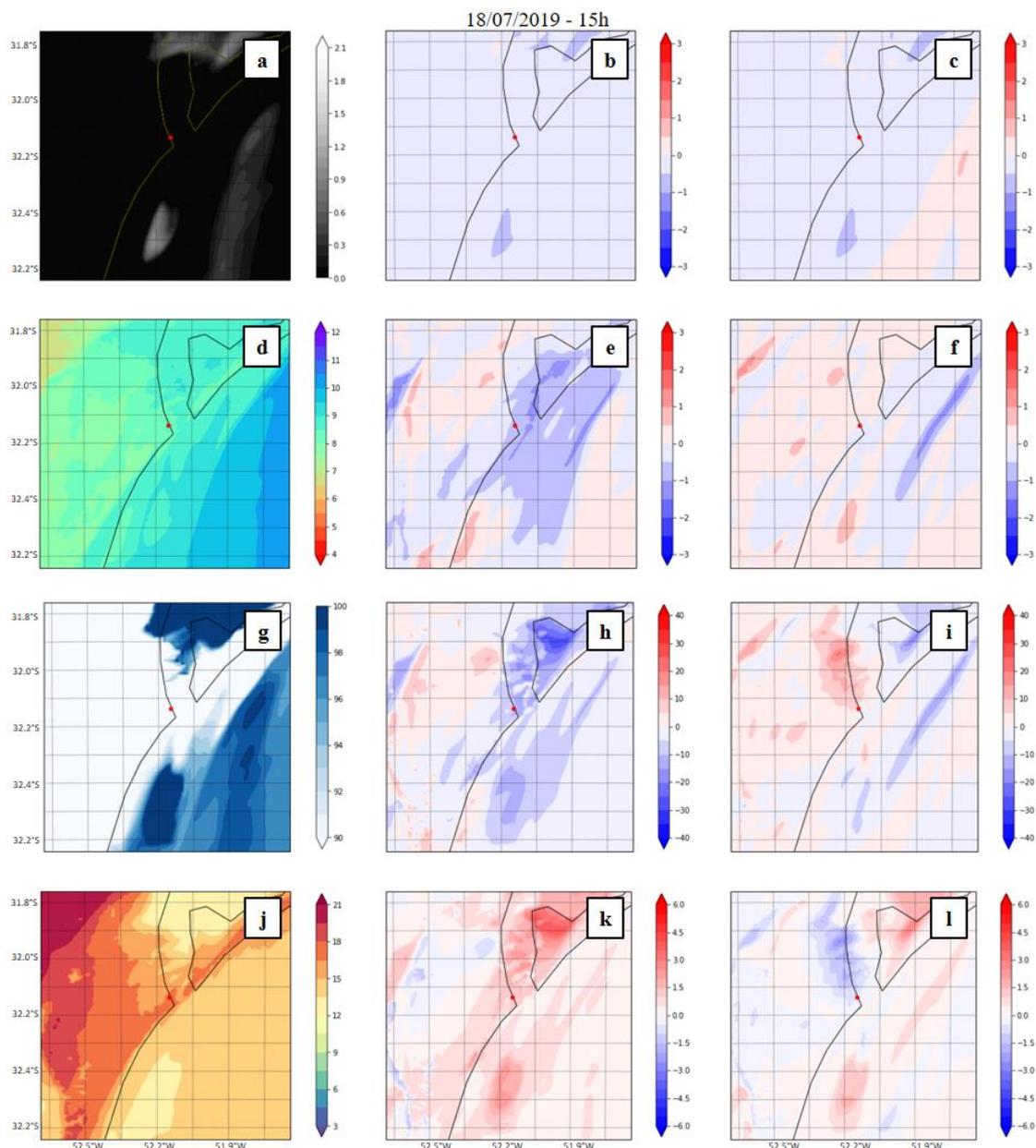


Figura I- 22- Comparação entre os resultados dos testes 1 (primeira coluna), 2 (terceira coluna) e 3 (segunda coluna) para o horário de 15h do dia 18 de julho de 2019. São avaliadas as variáveis conteúdo de água líquida (a, b e c) e razão de mistura no primeiro nível do modelo (d,e,f), umidade relativa do ar (g,h,i) e temperatura do ar a 2 metros (j,k,l).O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

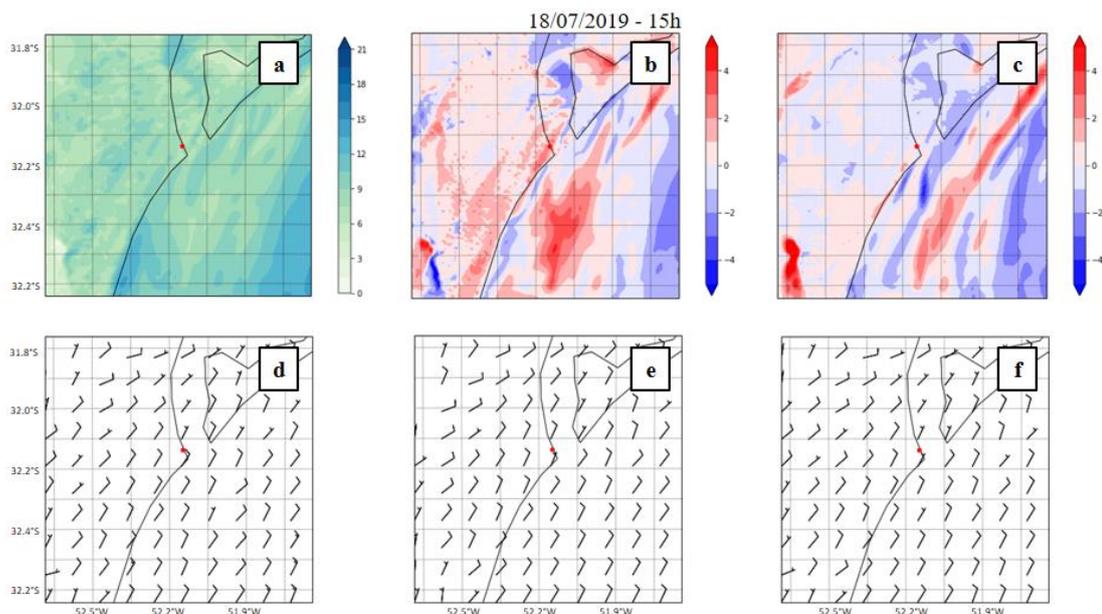


Figura I- 23- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 15h do dia 18 de julho de 2019. O campo de intensidade do vento a 10 metros (a) do teste 3 é utilizado como referência nos cálculos das diferenças do mesmo parâmetros para os testes 1 (b) e 2 (c). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

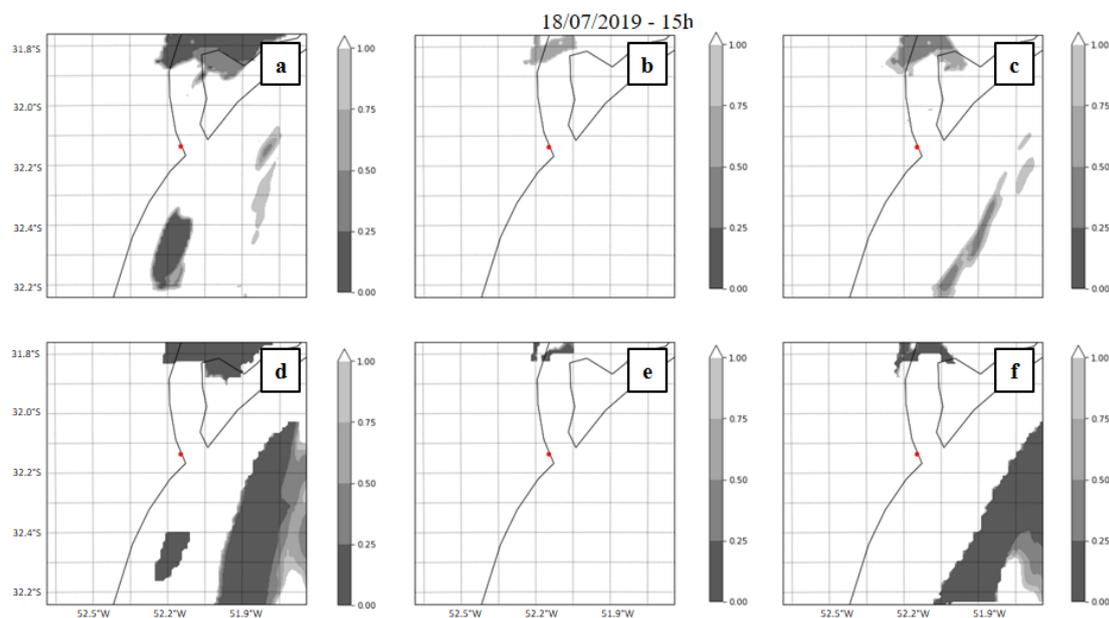


Figura I- 24- Comparação entre os resultados dos testes controle (primeira coluna), 1 (segunda coluna) e 2 (terceira coluna) para o horário de 15h do dia 18 de julho de 2019 para as estimativas de visibilidade do FSL (primeira linha) e Kunkel (segunda linha). O ponto vermelho corresponde à localização da torre de controle da Praticagem.

APÊNDICE J – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COM O MODELO WRF PARA O PERÍODO A (DOMÍNIO 3)

Conforme descrito pela tabela 9, o período de simulação A compreende 3 eventos de nevoeiros intensos registrados pela Praticagem (Eventos A-1, A-2 e A-3). A seguir serão apresentados os resultados obtidos para este intervalo.

J.1. Descrição observacional

Entre às 21h do dia 17 de junho e às 21h do dia 19 de junho de 2018, a região de interesse deste estudo encontrava-se sob influência de um sistema de alta pressão (Figura J-1). Destaca-se novamente que esta configuração se mostra promissora com relação à formação de nevoeiros pelo mecanismo de resfriamento, uma vez que é relacionada a ventos fracos e condições de céu claro.

Na noite de 19 de junho foi possível perceber que a área de estudo encontrava-se localizada mais próxima à borda deste sistema de alta pressão (Figura J-1c). Assim como mencionado anteriormente, tal configuração apresenta potencial para favorecimento da ocorrência de ventos de norte/nordeste na região de estudo.

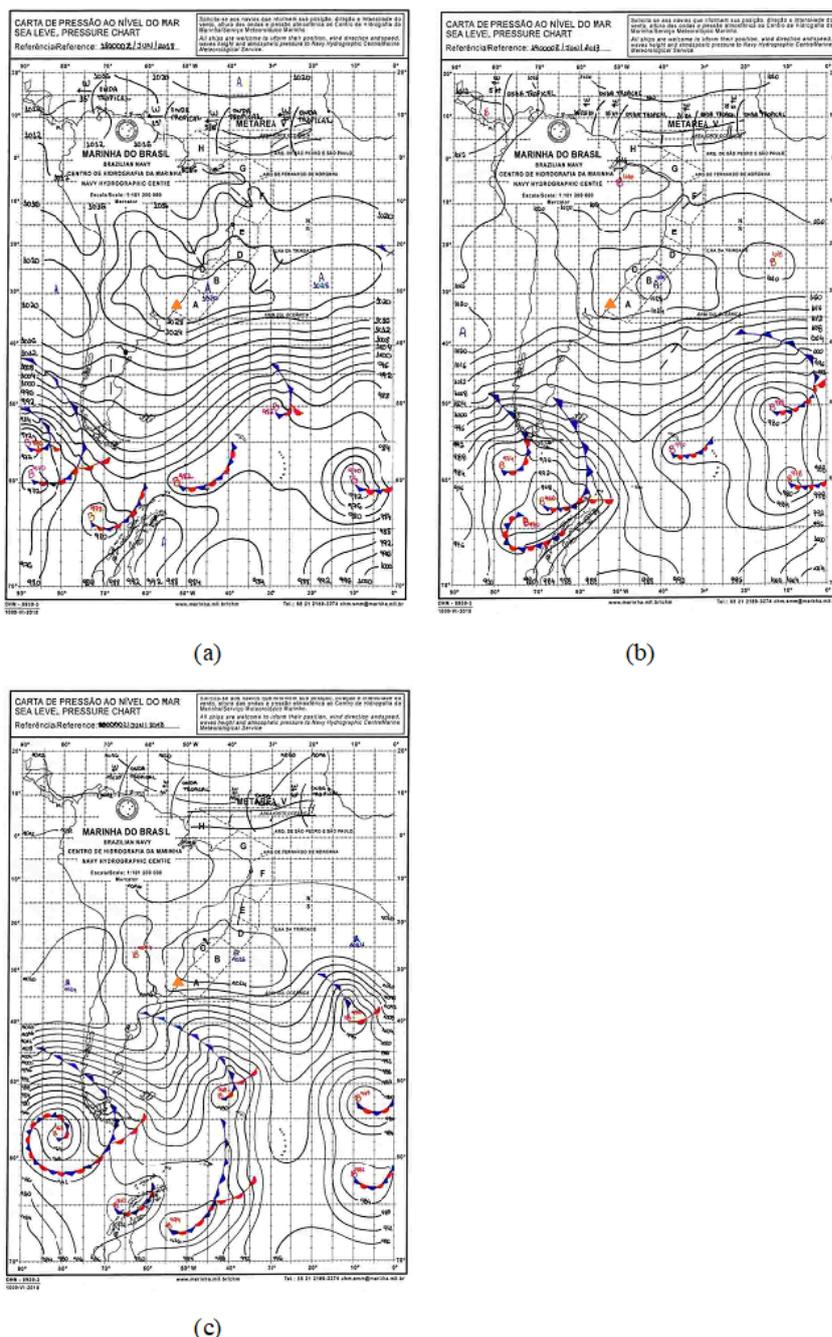


Figura J- 1 - Cartas Sinóticas dos dias 18 (a), 19(b) e 20/06/2018 (c) às 00UTC, ilustrando a situação sinótica na região de estudo durante o período com registros de nevoeiros intensos na região de estudo. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

Nas figuras J-2, J-3 e J-4 estão dispostas as imagens de satélite do destaque “Nevoeiro” da Divisão de Satélites Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE).

Foi possível verificar a detecção da presença de nuvens baixas próximas à região de estudo entre a noite do dia 17 e o início da manhã do dia 18 de junho de 2018 (Figura J-2). Esse intervalo concorda com o registro das condições de navegação.

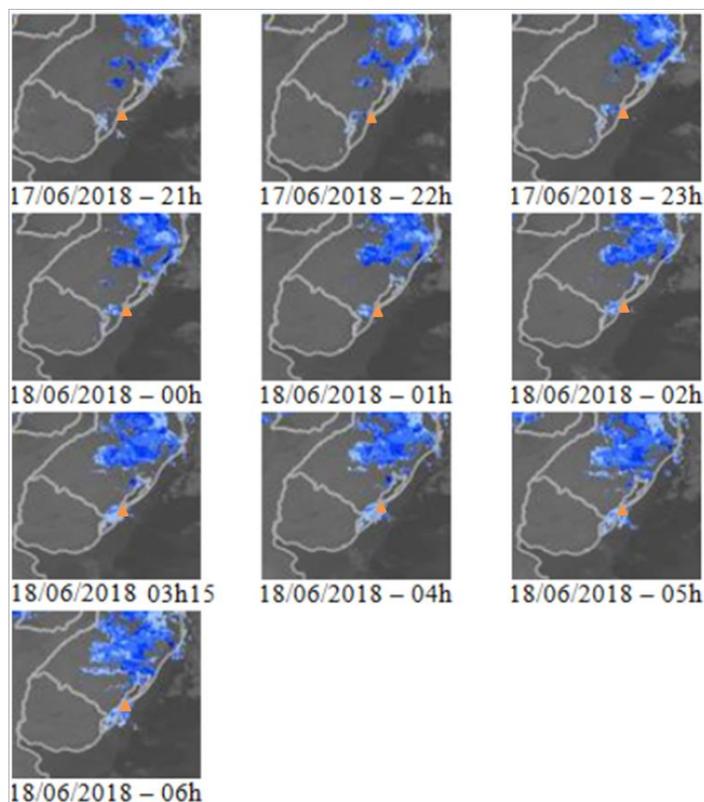


Figura J- 2- Imagens horárias de satélite entre as 21h (hora local) do dia 17/06/2018 e as 06h (hora local) do dia 18/06/2018, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE).

Entre o início da noite de 18 de junho e o início da manhã de 19 de junho também foi possível identificar a presença de nuvens baixas pelo produto avaliado (Figura J-3). Entretanto, tais nuvens foram detectadas sobre a Lagoa dos Patos e sobre a área mais próxima à sua região estuarina apenas no fim da noite de 18 de junho. Tal resultado também se mostrou coerente com o registro de condições de navegação, que destaca a atuação de nevoeiros intensos na área entre 00h30 e 05h do dia 19 de junho.

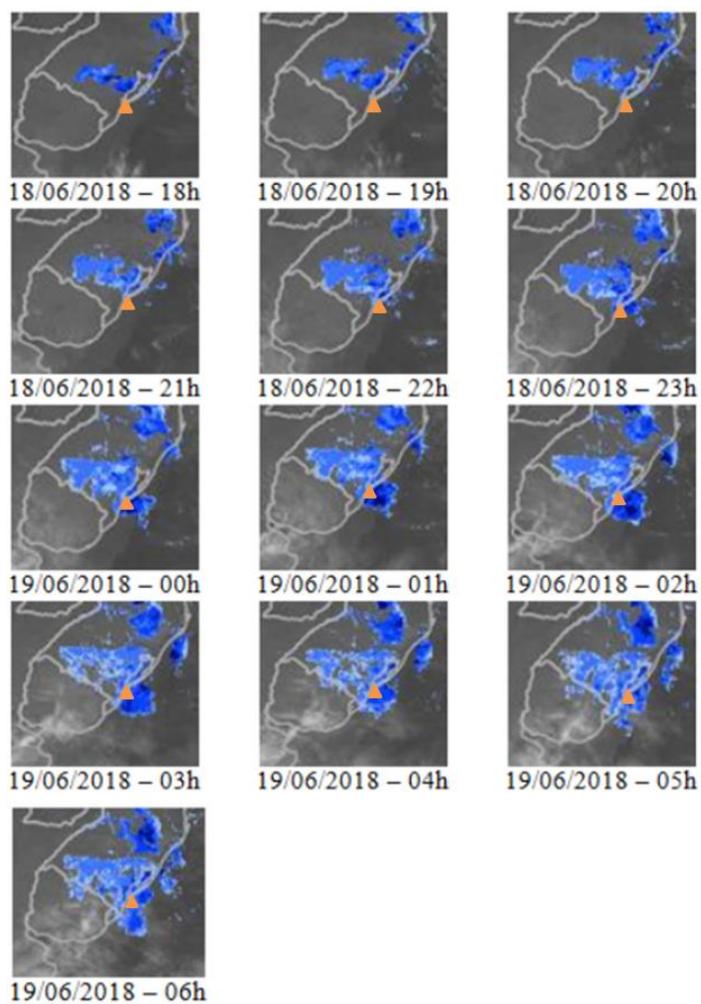


Figura J- 3 - Imagens horárias de satélite entre as 18h (hora local) do dia 18/06/2018 e as 06h (hora local) do dia 19/06/2018, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE).

Entre a noite do dia 19 de junho e o início da madrugada do dia 20 de junho o produto de satélite avaliado não destacou a presença de nuvens baixas na região de estudo (Figura J-4). Tal fato pode ser justificado pela presença de nuvens altas na área.

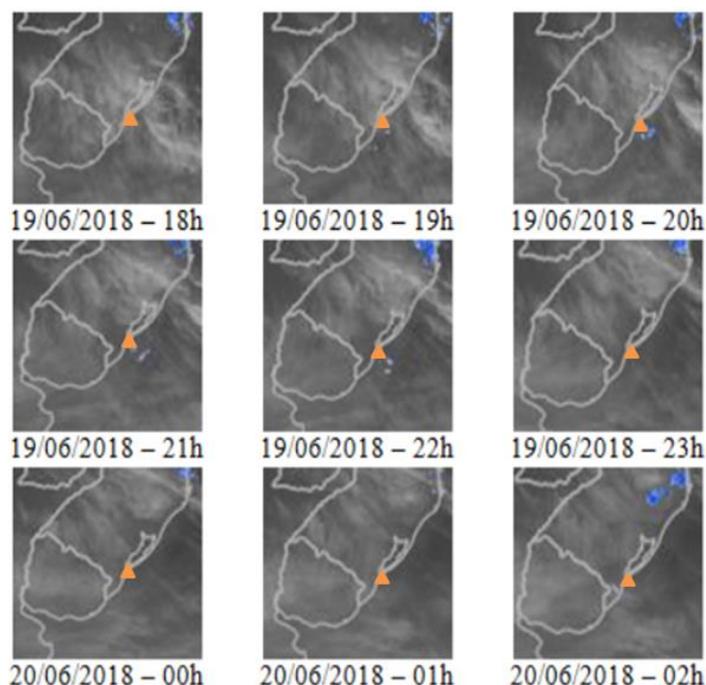


Figura J- 4 - Imagens horárias de satélite entre as 18h (hora local) do dia 19/06/2018 e as 02h (hora local) do dia 20/06/2018, destacando a detecção de nuvens baixas em azul. O triângulo laranja corresponde à localização aproximada da cidade de Rio Grande. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE).

Os dados observados na estação da Praticagem e na boia RS-5 do projeto SiMCosta durante o período compreendido entre a noite de 17 de junho e início da madrugada de 20 de junho de 2018 são apresentados na figura J-5. Assim como definido anteriormente, o intervalo temporal destacado em cinza é referente aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. Destaca-se que a boia RS-5 foi a única com disponibilidade de dados neste período.

Foi possível identificar a ocorrência de ventos fracos e de noroeste durante o início do período avaliado tanto na boia RS-5, quanto na estação meteorológica da Praticagem. Durante a madrugada do dia 18 de junho, as fontes de dados apresentaram uma ligeira diferença, com a estação meteorológica apontando pro predomínio de ventos de oeste, enquanto a boia registrou ventos oscilando entre as direções oeste e sudoeste. Entretanto, a partir da tarde do mesmo dia, os dados registrados pelos dois equipamentos apresentaram resultados em concordância com relação à direção do vento, com ventos de quadrante norte até o fim do período avaliado. Reitera-se que os anemômetros que forneceram estes resultados encontravam-se em diferentes alturas e localizações.

Durante o primeiro período de restrição de visibilidade intensa reportado neste intervalo, foi possível identificar algumas características meteorológicas importantes para a formação de nevoeiros. Foram destacados a presença de ventos de intensidade fraca nos dois pontos avaliados (RS-5 e Praticagem) e um característico processo de resfriamento durante este período. O resfriamento ficou evidenciado a partir dos dados de temperatura da estação meteorológica da Praticagem. Estes mesmos dados apontaram para uma ligeira elevação de temperatura próximo ao início do período de Impraticabilidade, que pode estar associado ao processo de condensação do ar e consequente liberação de calor latente, dando origem ao nevoeiro.

Próximo ao fim deste primeiro evento de restrição de visibilidade foi possível verificar uma tendência de intensificação do vento, que pode ter relação com a melhoria nas condições de visibilidade com relação à navegação. Esta intensificação do vento se mostrou mais pronunciada na boia RS-5 que nos registros da estação meteorológica da Praticagem, apesar da última estar localizada a uma altura maior.

As demais restrições de visibilidade reportadas foram registradas em conjunto com ventos fracos a moderados, de quadrante norte e temperaturas em torno de 10°C.

Destaca-se ainda que durante todo o intervalo avaliado, a temperatura da água se mostrou superior à temperatura do ar na região.

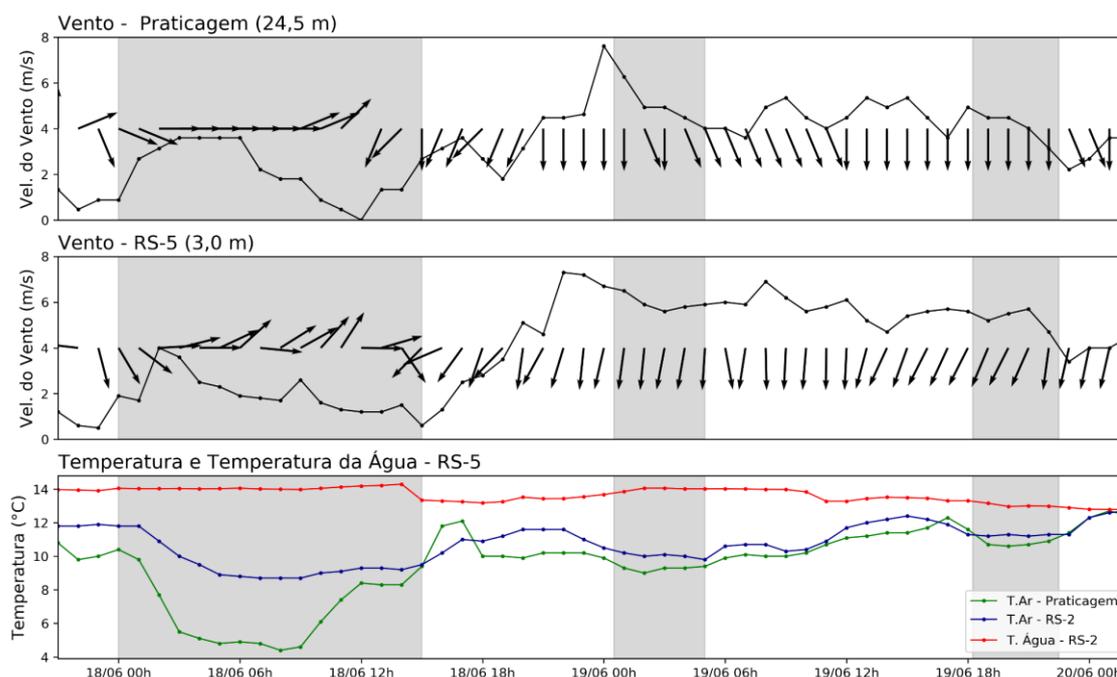


Figura J- 5 - Séries temporais de vento (direção e intensidade) e temperaturas do ar e da água observadas durante o intervalo compreendido entre a noite de 17 de junho e madrugada de 20 de junho de 2018. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

J.2. Resultados numéricos

A seguir, serão mostrados os resultados obtidos a partir do modelo WRF referentes ao domínio 3, com resolução horizontal de 1km. Foram selecionados horários representativos dos diferentes estágios de desenvolvimentos dos nevoeiros, obtidos a partir dos registros de condição de navegação disponíveis. Reitera-se que este registro abrange ocorrências de nevoeiro com visibilidade inferior a 457m, sendo possível o início do fenômeno de acordo com sua definição ter se dado em horário anterior. Além de campos meteorológicos para uma avaliação espacial do desempenho do modelo, serão apresentados perfis verticais para o ponto de grade mais próximo da estação meteorológica da Praticagem. Tais resultados serão mostrados nos horários avaliados em que foi simulada a presença do nevoeiro. A evolução temporal dos mesmos, em intervalos de 3 em 3 horas também serão apresentados no Apêndice K.

EVENTO A-1

O primeiro intervalo de Impraticabilidade reportado durante o período de avaliação A se deu entre 00h e 15h (hora local) do dia 18 de junho de 2018, conforme evidenciado anteriormente.

Os campos meteorológicos dispostos na figura J-6, referentes ao horário de 00h do dia 18 de junho, indicaram que o modelo WRF apresentou habilidade na simulação da presença do nevoeiro na região de estudo. Entretanto, neste horário o fenômeno simulado se apresentou restrito espacialmente à área continental. Foram simulados valores significativos de conteúdo de água líquida no primeiro nível do modelo (Figura J-6a) sobre o continente e valores mínimos razão de mistura nesta mesma região (Figura J-6b), indicativo de formação de nevoeiro pelo processo de resfriamento e conversão de vapor d'água em água líquida. Adicionalmente, destacaram-se valores elevados de umidade relativa e ventos fracos na área de abrangência do fenômeno (Figuras J-6c e J-6d). A direção do vento sobre o continente, de oeste, apresentou-se indicativa da advecção do fenômeno para a área do canal de acesso à Lagoa dos Patos (Figura J-6c).

Os campos de visibilidade também convergiram para a identificação da presença de nevoeiro sobre o continente neste horário. O nevoeiro simulado a partir da estimativa FSL (Figura J-6e) apresentou maior extensão espacial e menor intensidade que o fenômeno da estimativa de Kunkel (Figura J-6f). Adicionalmente, destacou-se que a estimativa do FSL apresentou maior restrição de visibilidade nas bordas do nevoeiro (Figura J-6e).

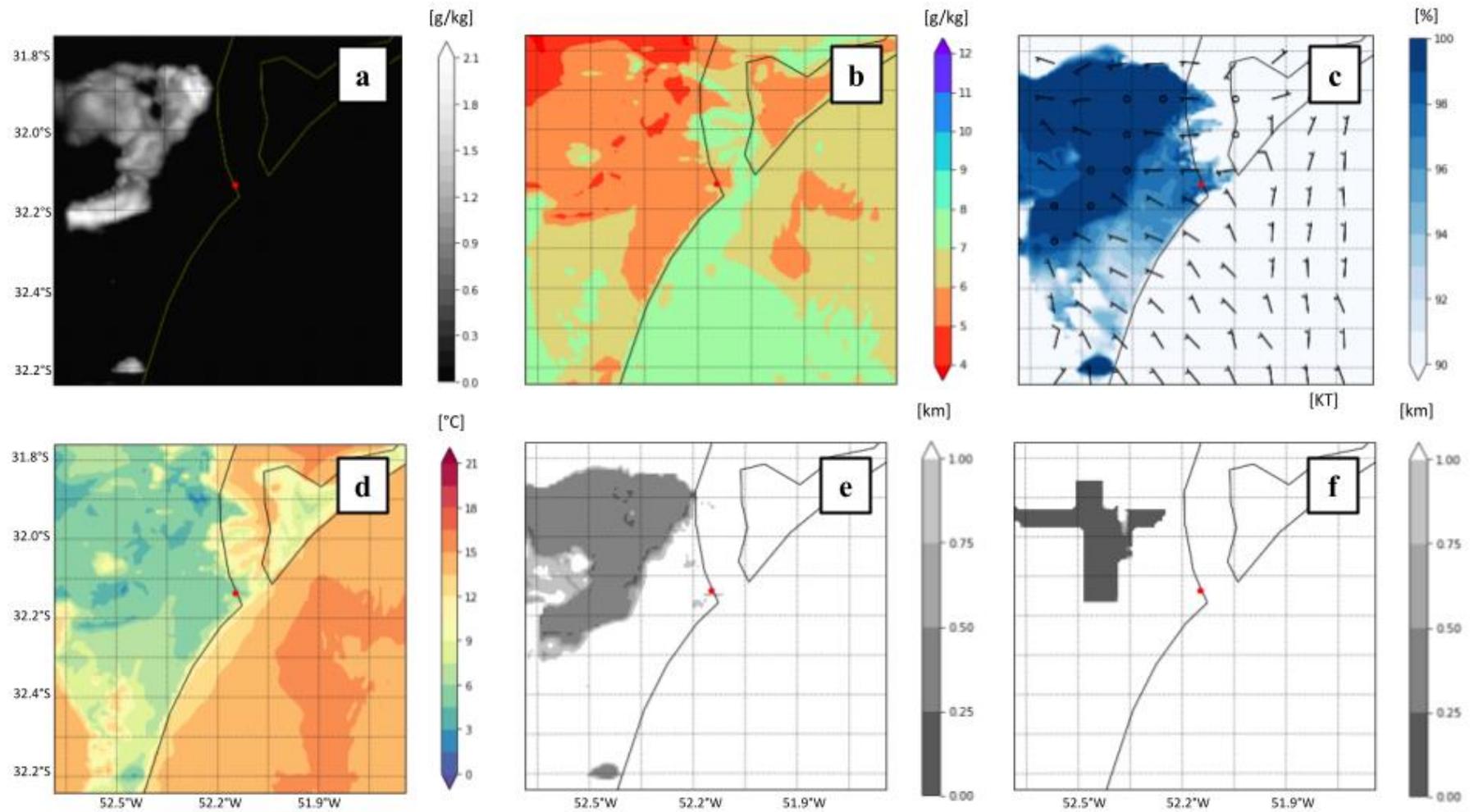


Figura J- 671-Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 00h (hora local).

Para o horário das 03h do mesmo dia, foi possível verificar o desenvolvimento do nevoeiro simulado, com uma maior área de abrangência (Figura J-7). Foi possível perceber a continuidade do processo de resfriamento supracitado (Figuras J-7a, J-7b e J-7d), aliado a elevados valores de umidade relativa e ventos fracos no domínio de atuação do fenômeno (Figura J-7c). Adicionalmente, os campos de visibilidade corroboraram com esta expansão da área de atuação do nevoeiro, sendo o mesmo percebido na região estuarina da Lagoa dos Patos e bem próximo à costa (Figuras J-7e e J-7f). Tal expansão se deu de forma a acompanhar a direção do vento, que possivelmente contribuiu para o desenvolvimento e espalhamento do fenômeno.

Destaca-se que, assim como no horário anterior, a estimativa de Kunkel (Figura J-7f) apresentou restrição de visibilidade mais intensa que a do FSL (Figura J-7e). Entretanto, a visibilidade a partir da estimativa FSL apresentou uma maior sensibilidade a variações do parâmetro espacialmente.

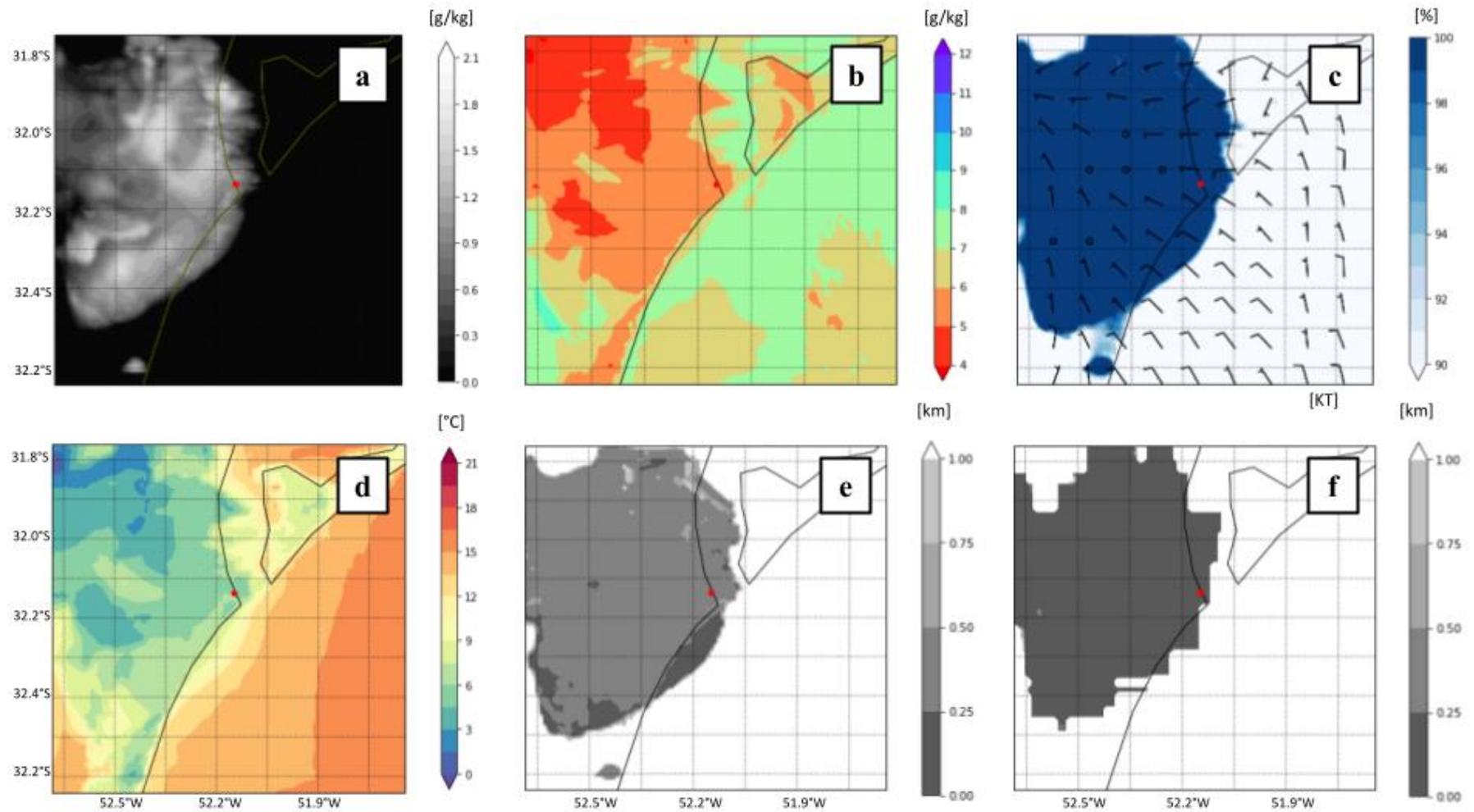


Figura J- 7 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 03h (hora local).

Os perfis verticais a partir da saída do modelo WRF indicaram a presença de nuvem baixa próxima à superfície, com topo no nível de 61,4m (Figura J-8). Comparadas ao perfil teórico de referência de Stull (1997) (Figura 9) foi possível perceber a caracterização vertical da ocorrência de nevoeiro pelo modelo WRF.

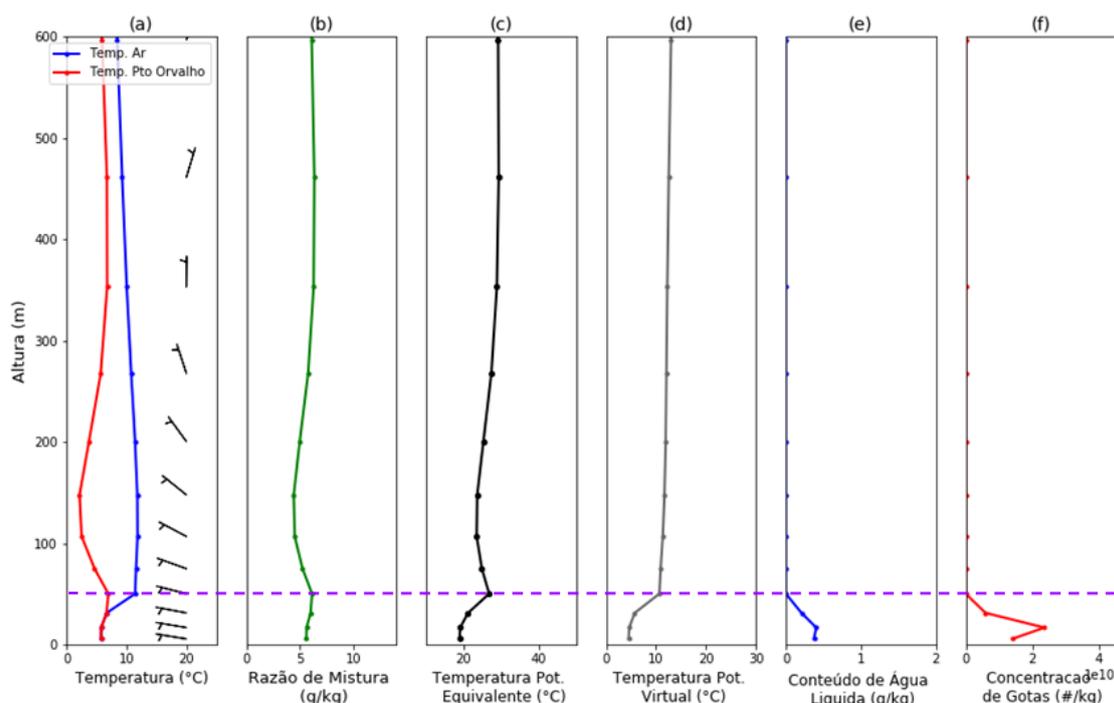


Figura J- 8- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 03h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

Apesar do horário de retorno à Praticabilidade em registro ter se dado às 15h do dia 18 de junho de 2018, o modelo WRF começou a apresentar indicativos de sua dissipação no fim da manhã do mesmo dia. Os campos meteorológicos para o horário de 11h, dispostos na figura J-9, caracterizaram esta condição, com redução significativa no conteúdo de água líquida e da extensão da área de máxima umidade relativa (Figuras J-9a e J-9c). Adicionalmente, os campos de estimativa de visibilidade também apresentaram-se representativos do processo de dissipação do fenômeno (Figuras J-9e e J-9f).

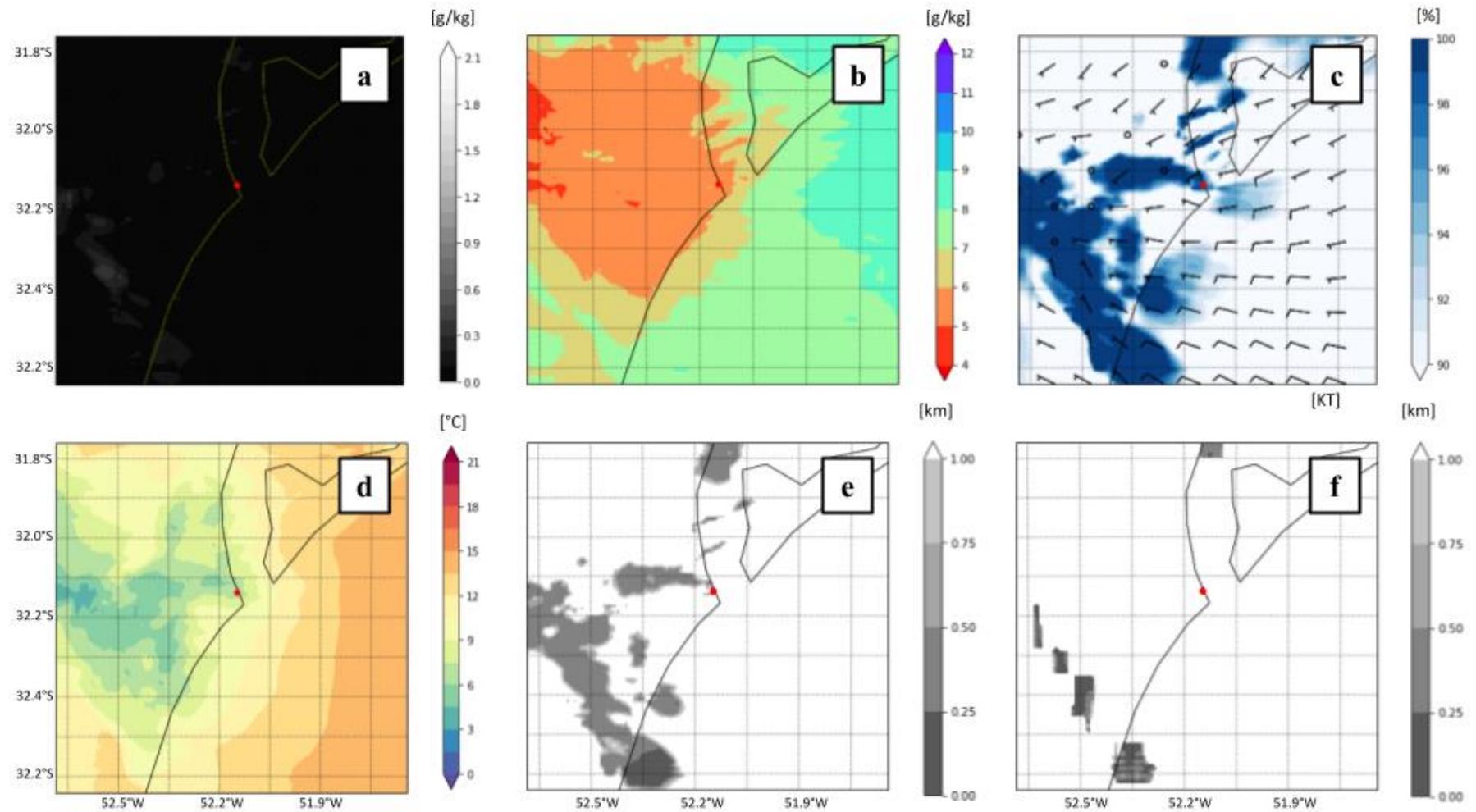


Figura J- 9 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 11h (hora local).

No horário de retorno à Praticabilidade, às 15h do dia 18 de junho, o modelo WRF indicou a ausência de atuação de nevoeiros na região (Figura J-10). Não foram simulados valores significativos de conteúdo de água líquida e umidade relativa (Figuras J-10a e J-10c). Em contrapartida, foi verificado aquecimento com relação aos horários anteriores (Figura J-10d), típico do ciclo diurno de temperatura, mas que pode ter contribuído também para a dissipação do nevoeiro.

As estimativas de visibilidade avaliadas neste estudo também evidenciaram a dissipação do fenômeno na área de estudo, apontando para ausência de restrições de visibilidade igual ou inferior a 1km e, conseqüentemente, de nevoeiros (Figuras J-10e e J-10f).

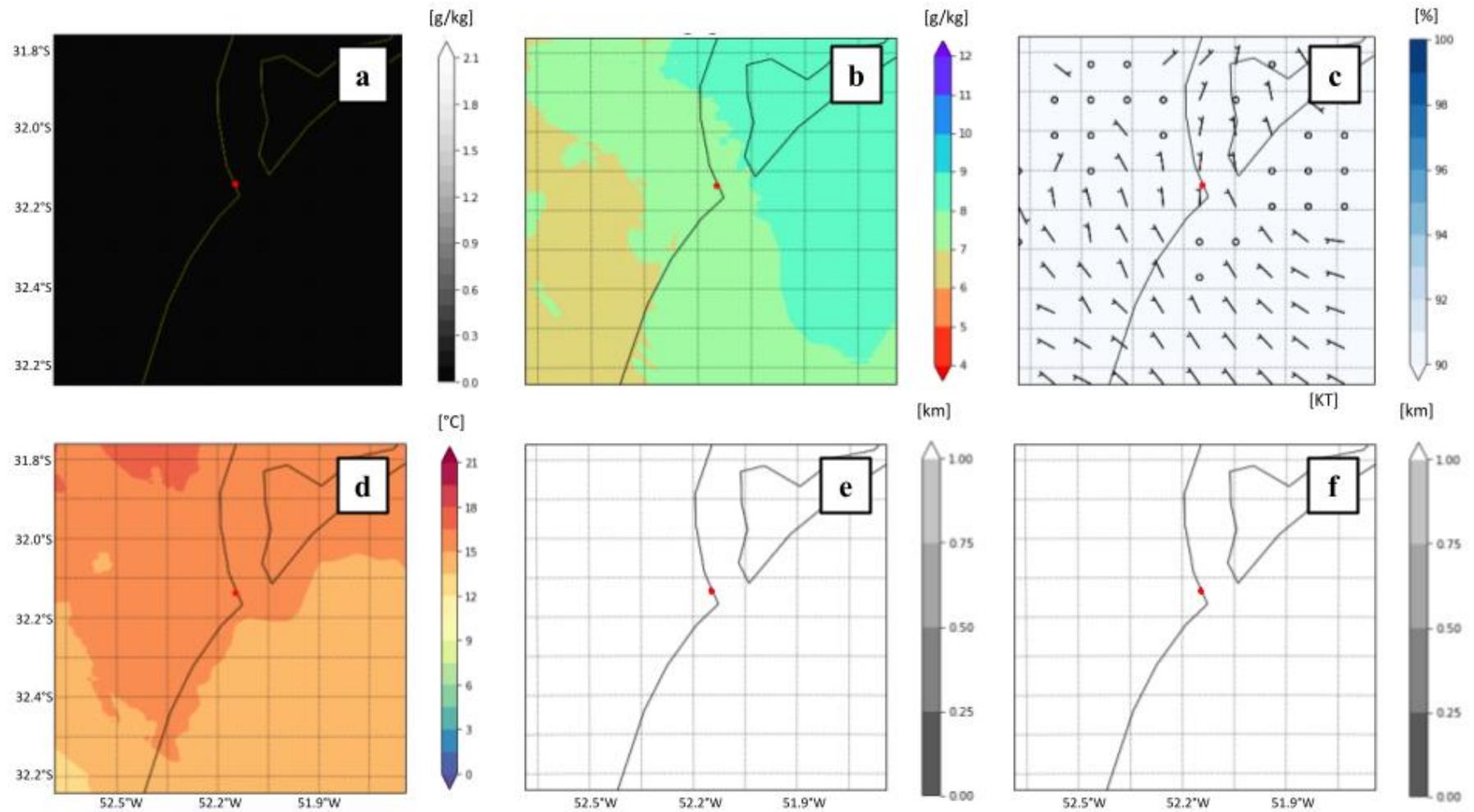


Figura J- 10 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 15h (hora local).

EVENTO A-2

Entre 00h30 e 05h do dia 19 de junho de 2018 foi registrado o segundo intervalo de condições de visibilidade desfavoráveis à navegação durante o período A.

A figura J-11 apresenta os campos meteorológicos para o horário das 23h do dia 18 de junho. Através dela, foi possível verificar que o modelo WRF conseguiu simular indicativos do processo de formação deste novo nevoeiro a partir da noite do dia 18. Assim como nos outros casos avaliados, foram simulados valores significativos de conteúdo de água líquida próximos à superfície (Figura J-11a) em conjunto com mínimos de razão de mistura (Figura J-11b), podendo demonstrar uma potencial configuração física da conversão de vapor d'água em água líquida. Desta forma, a configuração pode representar um indicativo da formação do fenômeno pelo mecanismo de resfriamento. Além disso, foram simulados valores elevados de umidade relativa principalmente sobre o continente e a presença de ventos fracos (Figura J-11c). Estas características destacadas, aliadas ao fato de terem sido simuladas preferencialmente sobre o continente, configuram a possibilidade deste se tratar de um nevoeiro de radiação.

Ambas as estimativas de visibilidade avaliadas mostraram habilidade ao identificar a presença do nevoeiro avaliado neste horário (Figuras J-11e e J-11f). Entretanto, a extensão espacial do nevoeiro simulada pela estimativa do FSL se mostrou maior que a de Kunkel.

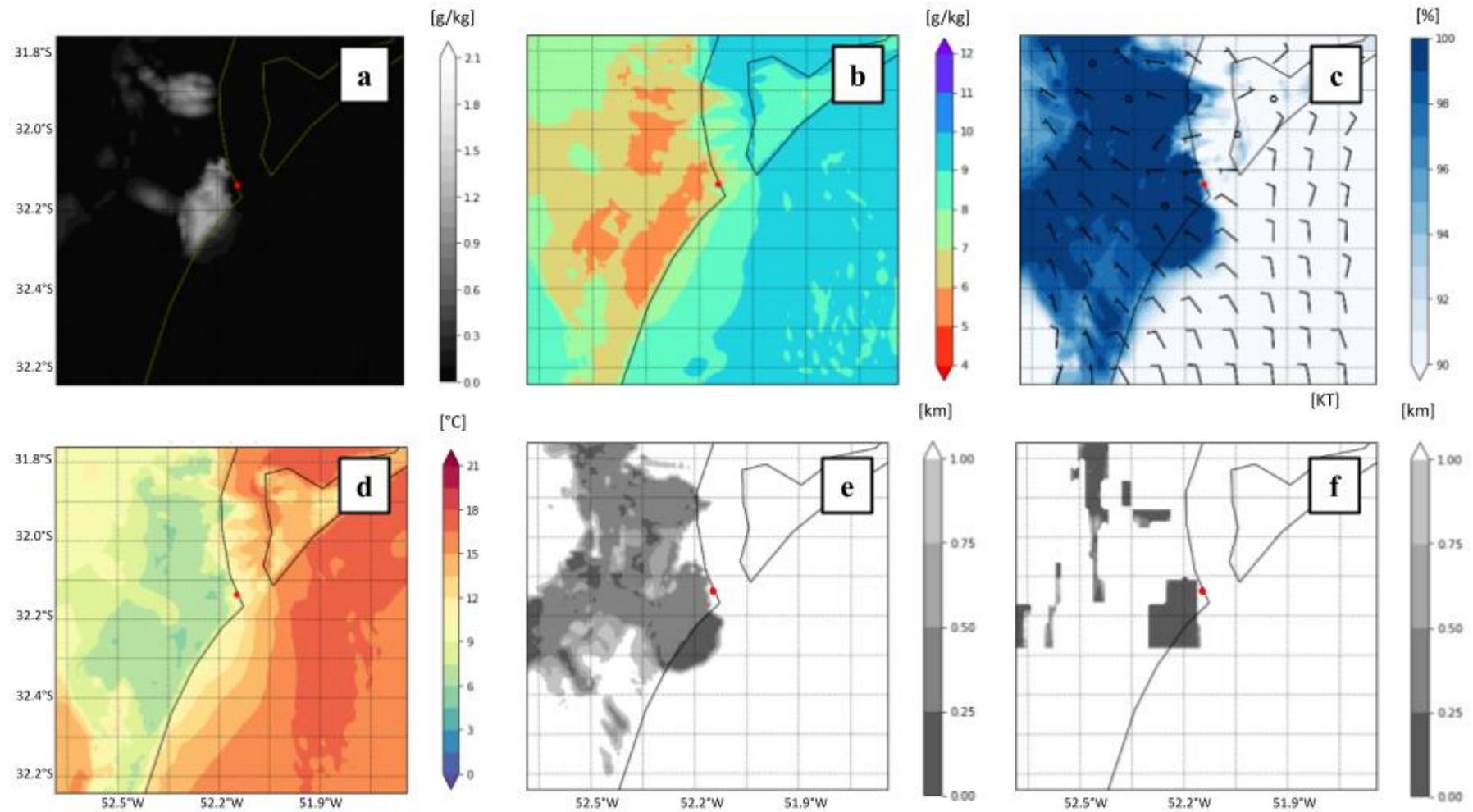


Figura J- 11 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 23h (hora local).

No horário de registro do retorno à condição de Praticabilidade às 05h do dia 19 de junho, o modelo WRF apresentou indicativos da permanência da condição de restrição intensa de visibilidade na área de estudo (Figura J-12). Vale ressaltar que este horário é representativo do início das melhorias das condições de visibilidade para a navegação e não da completa dissipação do nevoeiro. No primeiro nível do modelo, foi simulada a presença de água líquida (Figura J-12a), além de umidade relativa do ar elevada em todo o domínio analisado, ventos fracos e valores acima de 98% em grande parte do mesmo (Figura J-12c). O mecanismo de resfriamento evidenciado anteriormente não se mostrou caracterizado nesta etapa do ciclo de vida do fenômeno avaliado (Figuras J-12a e J-12b) e, em comparação com horário anterior, foi possível perceber um aquecimento sobre a superfície continental (Figura J-12d).

Adicionalmente, os campos de visibilidade também apontaram para a presença de nevoeiro na área de estudo (Figuras J-12e e J-12f), inclusive sobre o canal de acesso à Lagoa dos Patos. Outro ponto importante a ser destacado consiste na simulação de intensa restrição de visibilidade por ambas metodologias de estimativa, com valores deste parâmetro iguais ou inferiores a 250 metros.

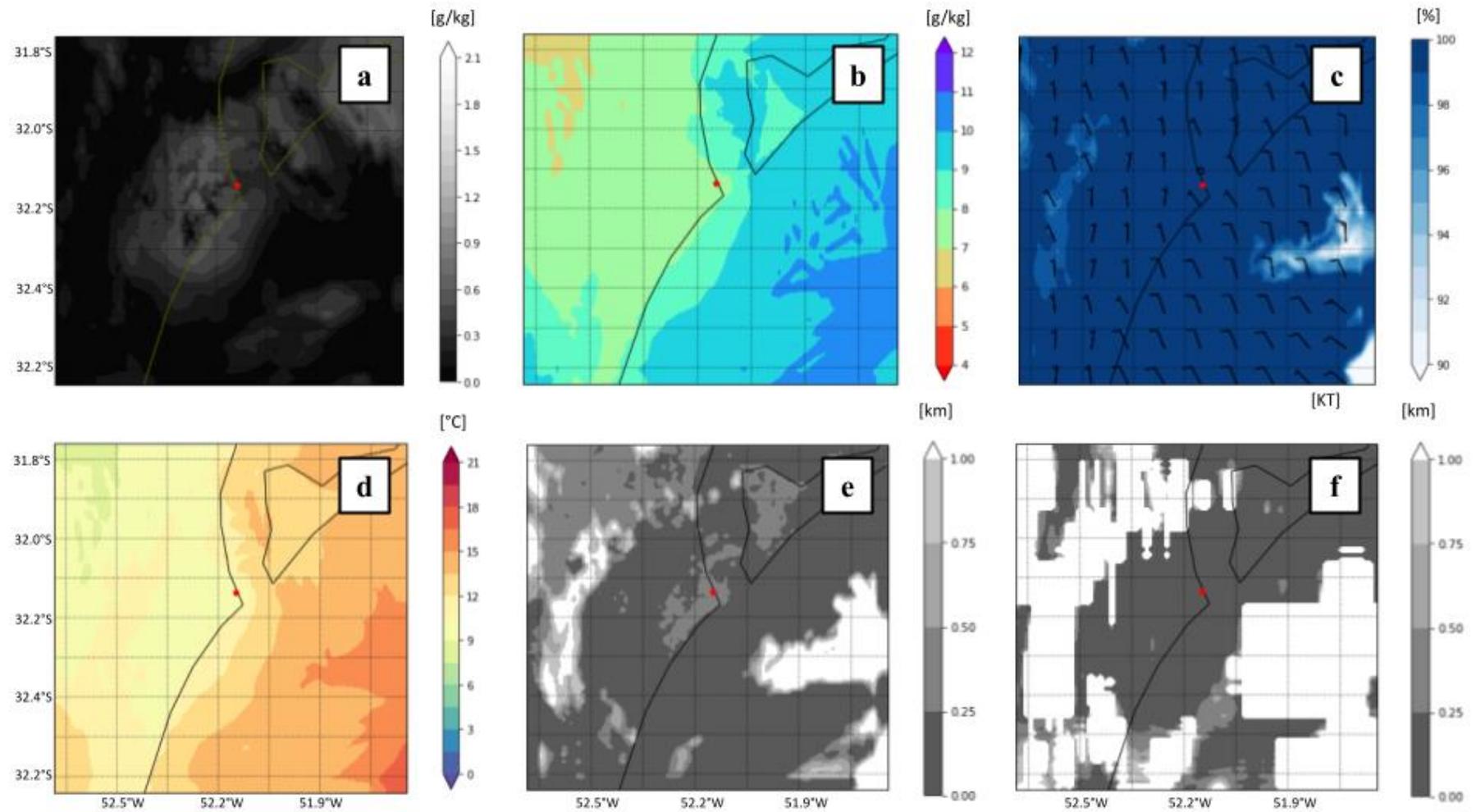


Figura J- 12 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 05h (hora local).

A figura J-13 mostra o perfil vertical da atmosfera no horário de 05h do dia 19 de junho. A partir da mesma foi possível perceber que o modelo WRF simulou uma atmosfera úmida em seus primeiros 350 metros (Figura J-13a) e que identificou a presença de água líquida e gotas de nuvem até a altura de aproximadamente 460m (Figuras J-13e e J-13f). Outro aspecto relevante sobre o perfil de vento destacado na figura J-13a é o fato de ter sido simulado um giro horário do vento com a altura. Esta configuração é indicativa de uma advecção de ar frio, caracterizando condições atmosféricas instáveis. Desta forma, este aspecto pode ser considerado indicativo inicial de condições favoráveis à dissipação do nevoeiro.

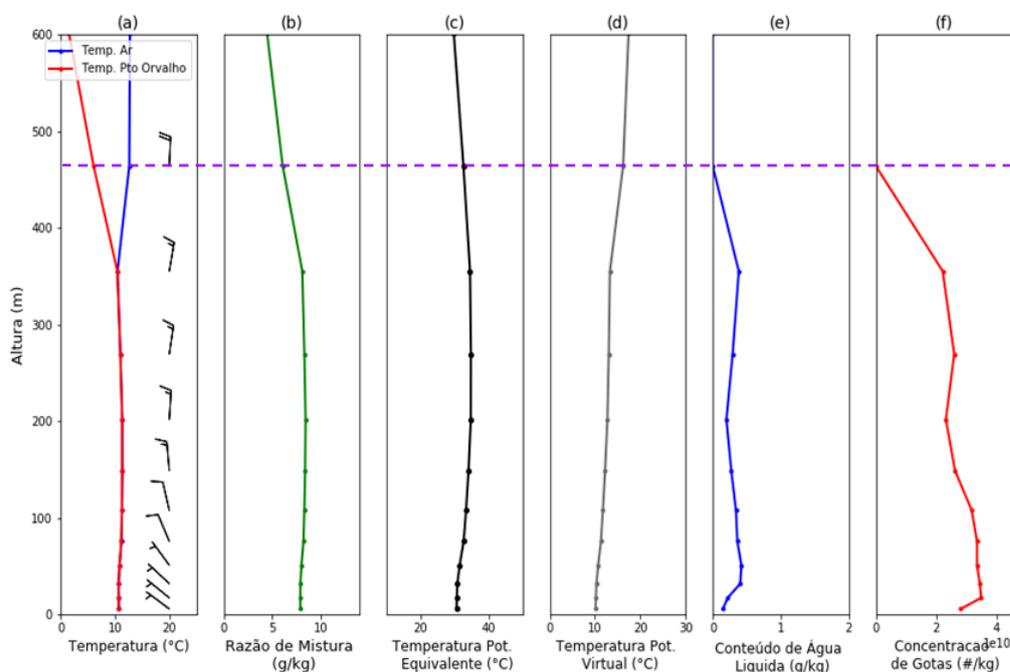


Figura J- 13 - Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 05h (hora local). O topo teórico do nevoeiro está delimitado pela linha na cor roxa.

Ainda dentro da avaliação da segunda restrição de visibilidade intensa registrada durante o período A, os indicativos de dissipação do nevoeiro foram simulados entre o fim da manhã e início da tarde de 19 de junho. Os campos da figura J-14 são referentes ao horário de 12h do mesmo dia. A partir da análise deles, foi possível perceber evidências do processo dissipativo do fenômeno. Ausência de conteúdo de água líquida significativo e redução da umidade relativa em grande parte do domínio foram evidenciadas (Figuras J-14a e J-14c).

Os campos de visibilidade também exibiram um padrão sugestivo da dissipação do fenômeno, com significativa redução da área de abrangência do nevoeiro simulado (Figuras J-14e e J-14f). A área de nevoeiro identificada pela estimativa de Kunkel apresentou-se reduzida em comparação à do FSL. Tal fato pode ser justificado pela dependência da mesma ao campo de água líquida.

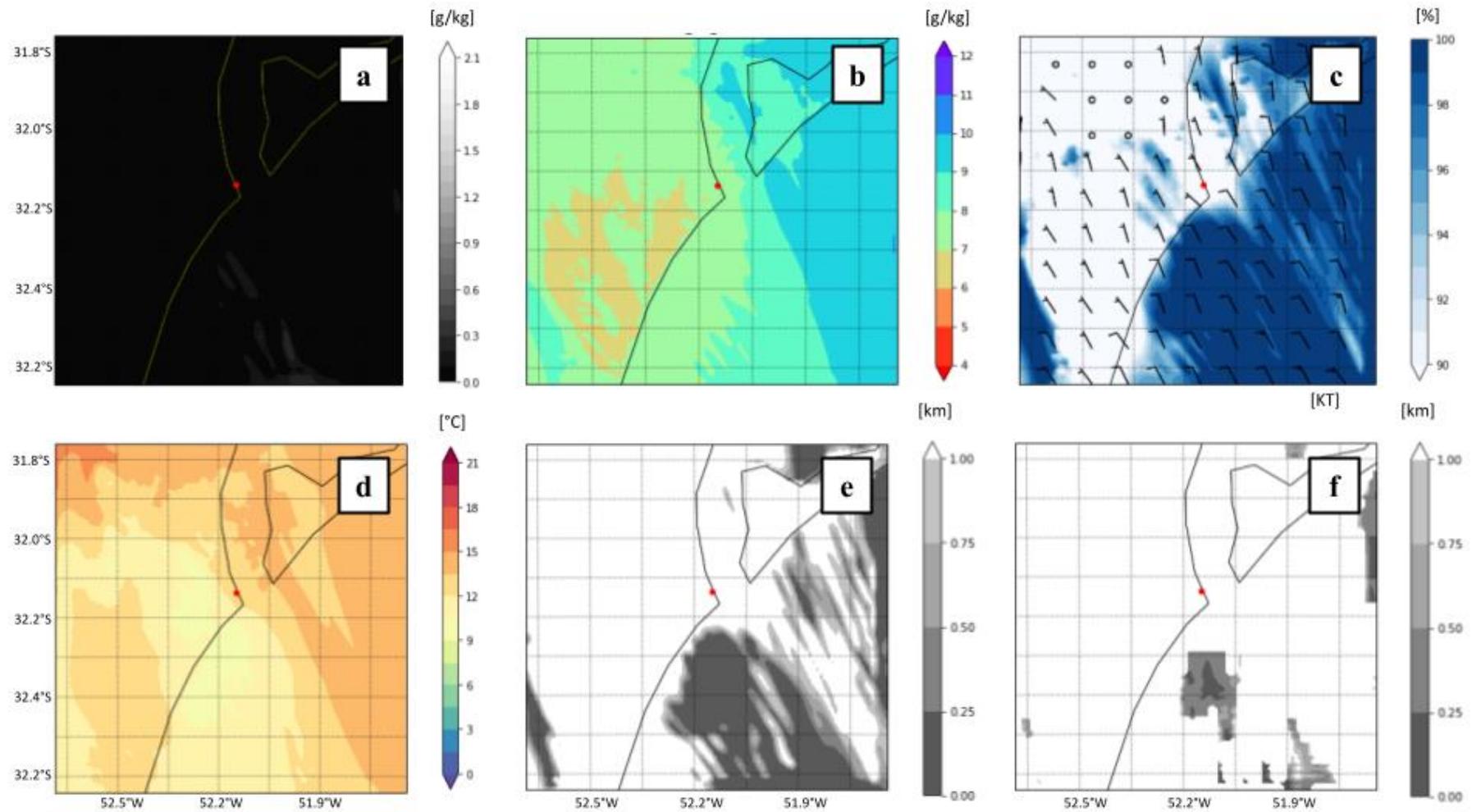


Figura J- 14- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 12h (hora local).

EVENTO A-3

O último registro de restrição intensa de visibilidade dentro do período A se deu entre 18h15 e 22h30 do dia 19 de junho de 2018.

O modelo WRF não apresentou habilidade de representação da formação e da duração deste evento de nevoeiro. Durante o intervalo avaliado, não foram simuladas restrições de visibilidade e nem campos meteorológicos característicos da sua atuação na região de estudo.

As figuras J-15 e J-16 são representativas dos horários mais próximos dos horários de registro das condições de Impraticabilidade e Praticabilidade, respectivamente. Em ambas, foi possível verificar um ligeiro aumento na intensidade do vento em comparação com horários anteriores, ausência de valores significativos de conteúdo de água líquida no primeiro nível do modelo e umidade relativa inferior a 90% em grande parte do domínio. Além disso, não foram simulados valores de visibilidade inferior a 1 km na região, caracterizando a ausência de nevoeiro na área.

Ressalta-se que, tal evento, também não foi detectado nas imagens de satélite devido à nebulosidade alta na região. Tal fator pode ter tido impacto no cálculo da transferência radiativa do modelo, afetando seu desempenho e resultado.

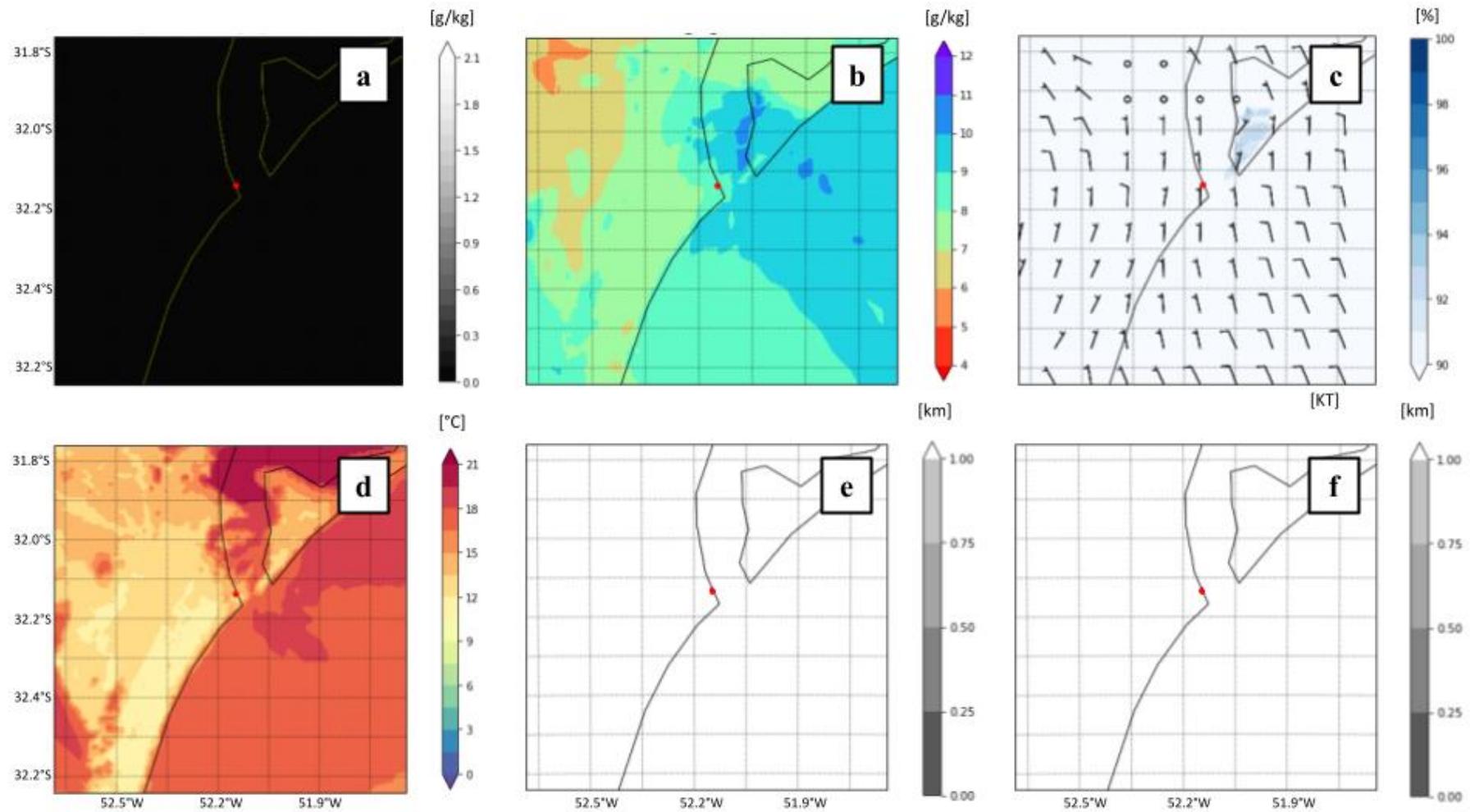


Figura J- 15- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 18h (hora local).

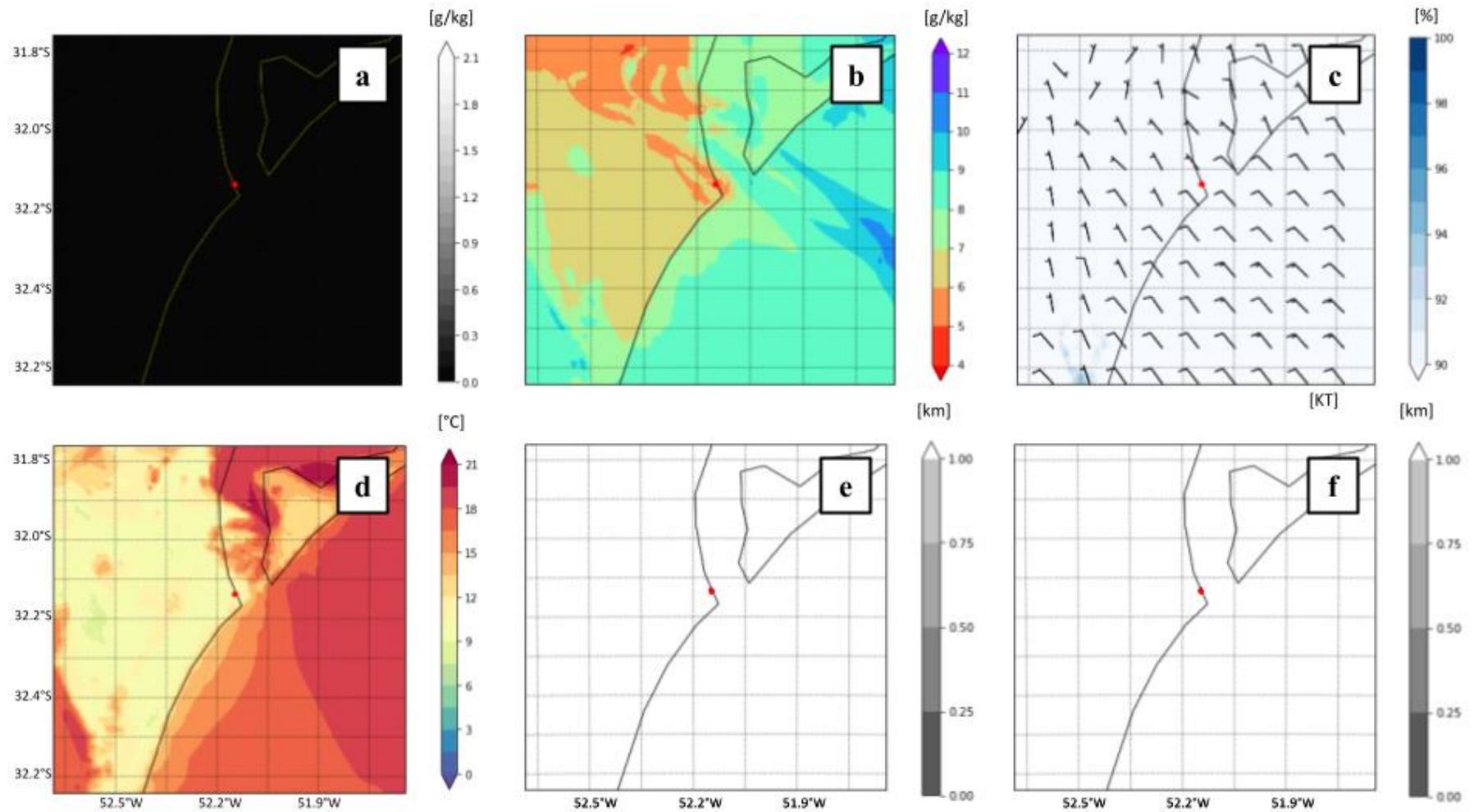


Figura J- 16 - Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 23h (hora local).

Visando incrementar a análise espacial das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF, os resultados a seguir compreendem uma análise pontual das mesmas. Nela, é possível verificar a evolução temporal de parâmetros meteorológicos no ponto de grade mais próximo à estação meteorológica da Praticagem e nos 4 pontos representativos, conforme evidenciados na figura 10. O intervalo compreendido nesta etapa do trabalho se inicia às 21h do dia 17 de junho e termina às 09h do dia 20 de junho de 2018. Assim como nos casos anteriores, o intervalo em cinza representa o período em que foi estabelecida condição de Impraticabilidade e, conseqüentemente, restrição intensa de visibilidade. Destaca-se que as séries temporais para o ponto central (próximo às coordenadas da estação meteorológica da Praticagem) encontram-se destacadas em vermelho.

De maneira geral, as séries temporais simuladas de vento a 10 metros (Figura J-17) mostraram concordância nos pontos avaliados, principalmente para o parâmetro de direção. O modelo WRF foi capaz de representar a direção e também a tendência da intensidade do vento (Figuras J-17 e J-18a) no ponto representativo da estação meteorológica em relação aos dados observados (Figura J-5).

Foi possível perceber a simulação de ventos predominantemente de fraca intensidade durante toda duração do fenômeno na área de avaliação (Figura J-18a). Nos pontos B e C, a leste e a sul da estação da Praticagem, foram simulados ventos de intensidade moderada a partir da tarde de 18 de junho.

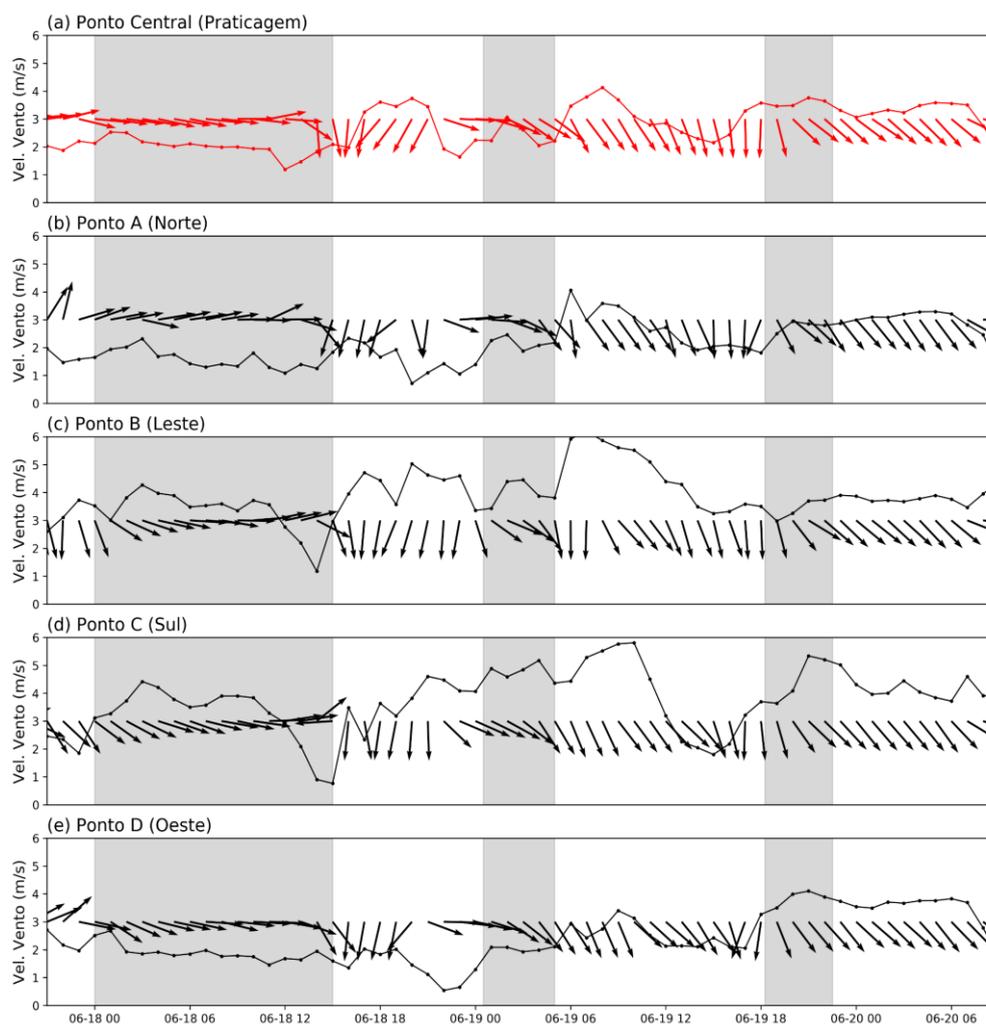


Figura J- 17 - Séries temporais de vento a 10 metros (direção e intensidade) para o ponto mais próximo à Torre de Controle da Praticagem (a) e demais pontos representativos (b,c,d e e) simuladas pelo modelo WRF para o período A. O intervalo destacado em cinza cores corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

As séries temporais de umidade relativa do ar (Figuras J-18b e J-18c) representaram a habilidade do modelo WRF na simulação dos dois primeiros eventos de restrição de visibilidade na área de estudo. Foram simulados valores de umidade relativa elevados, iguais ou próximos a 100% durante estes 2 eventos de nevoeiro mencionados, apresentando redução do parâmetro entre os mesmos. Ou seja, o WRF se mostrou ajustado para distinguir e identificar a ocorrência dos 2 eventos. Da mesma forma que destacado pelos campos meteorológicos, na análise das séries temporais deste parâmetro também ficou evidente que, no primeiro evento a duração simulada se mostrou inferior ao registro das condições de navegação, enquanto o oposto foi observado no segundo evento. Entretanto, é importante lembrar a subjetividade inerente ao

registro das condições de navegação. O último evento não foi caracterizado nas séries temporais deste parâmetro, com máximo de umidade relativa inferior a 80% no intervalo de registro.

Outro aspecto interessante de destacar com relação às séries de umidade relativa consiste no fato dos valores máximos deste parâmetro nos pontos B e C se deram instantes depois que nos demais pontos (Figura J-18b) para o primeiro evento de nevoeiro do período avaliado. Tal característica pode ser representativa do deslocamento do fenômeno e/ou de um aumento da sua extensão espacial com direcionamento para sudeste.

As séries de conteúdo de água líquida (Figura J-18d) caracterizaram 2 intervalos temporais com a presença de água líquida em níveis baixos da atmosfera coincidentes com os períodos em que houve registro de restrição de visibilidade. Tal apontamento reforçou a habilidade do modelo WRF na representação dos 2 primeiros eventos de nevoeiro destacados pelas condições de navegação. Foi possível perceber e evidenciar que, para o ponto D (a oeste da Praticagem), este parâmetro apresentou maior magnitude nos dois eventos. Adicionalmente, o segundo evento neste ponto foi simulado de modo adiantado com relação aos demais, se mostrando em concordância com as informações obtidas a partir das imagens de satélite. Destacou-se ainda que o terceiro evento de nevoeiro não pôde ser identificado a partir desta variável em nenhum ponto avaliado neste estudo.

A figura J-18e, analisada em conjunto com a figura J-18d, se mostrou representativa do processo de conversão de vapor d'água em água líquida em baixos níveis da atmosfera durante a ocorrência dos 2 primeiros eventos de nevoeiro reportados. Foi verificado que um processo de aumento do conteúdo de água líquida se revelou acompanhado de uma tendência de redução do parâmetro razão de mistura nestes casos.

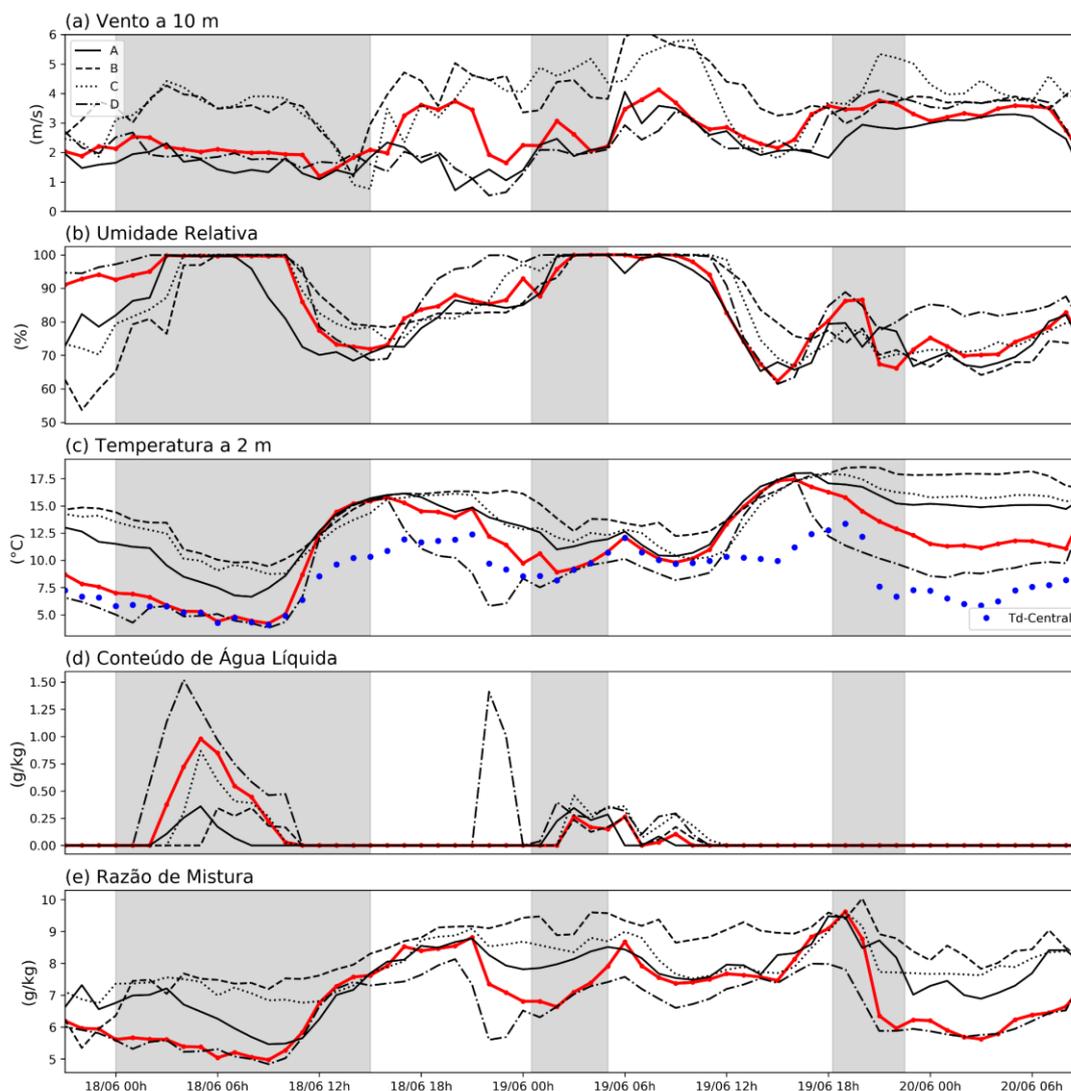


Figura J- 18 - Séries temporais de velocidade do vento a 10 metros (a), umidade relativa do ar a 2 metros (b), temperatura do ar (c), conteúdo de água líquida (d) e razão de mistura (e) simuladas pelo modelo WRF para o período A. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

A figura J-19 apresenta parâmetros associados à ocorrência de nevoeiro. Limiares relevantes para a avaliação dos mesmos encontram-se destacados nas séries temporais.

Os resultados para o índice FSI (Figura J-19a) mostraram-se relevantes com relação ao prognóstico de nevoeiros. Tal índice apresentou habilidade, indicando predomínio de probabilidade alta ($FSI < 31$, linha laranja tracejada) de formação de nevoeiro na região ao longo do intervalo de duração dos dois primeiros eventos avaliados. Após o fim do segundo evento de restrição de visibilidade reportado, foi verificada uma tendência de aumento do índice e

consequente redução da probabilidade de ocorrência de nevoeiro, alcançando limiares característicos de probabilidade moderada a partir da tarde de 19 de junho. Tal resultado corroborou com as avaliações anteriores, apontando para a identificação dos dois primeiros eventos pelo modelo WRF, enquanto o terceiro não foi bem caracterizado do ponto de vista numérico.

As estimativas de visibilidade horizontal de Kunkel e do FSL também foram avaliadas (Figuras J-19b e J-19c, respectivamente). Os limiares de 1 km e 500 metros foram destacados nas séries temporais de tais parâmetros (linha azul e linha verde tracejadas, respectivamente) com o objetivo de identificar os intervalos de tempo que o modelo identificou em suas simulações a presença de nevoeiros e nevoeiros intensos na região de interesse.

Como discutido anteriormente, a estimativa de visibilidade de Kunkel (Figura J-19b) é em função do conteúdo de água líquida. Tendo em vista a simulação de valores nulos ou bem próximos a 0 para a série de conteúdo de água líquida, o cálculo da estimativa de visibilidade apresentou falhas ao longo de sua evolução temporal. Entretanto, durante o período em que foi possível calcular este parâmetro, notou-se que a série temporal apontou valores de visibilidade abaixo de 500 metros durante os 2 primeiros eventos de nevoeiro, caracterizando restrição intensa de visibilidade.

Os resultados obtidos para a estimativa do FSL mostraram a habilidade do modelo em identificar a presença de nevoeiro a partir desta estimativa, embora de forma atrasada em relação aos registros observacionais. Assim como verificado para outras variáveis, os dois primeiros eventos de nevoeiro foram identificados por esta análise. A partir da noite do dia 17 de junho foi simulada uma tendência de redução da visibilidade em todos os pontos avaliados, atingindo primeiro o limiar de ocorrência de nevoeiro no ponto D (a oeste da estação da Praticagem). Na manhã do dia 18 de junho, foi verificado um aumento da visibilidade, descaracterizando o fenômeno nevoeiro. Entre a noite de 18 e a madrugada de 19 de junho, novamente foi simulada a redução de visibilidade, representativa da ocorrência do segundo evento deste período A. Destaca-se que, no segundo evento, a identificação da restrição de visibilidade também se deu previamente no ponto D em relação aos demais. Neste mesmo ponto, foram simuladas as maiores durações destes 2 primeiros eventos de restrição de visibilidade.

Destacou-se ainda que, assim como verificado anteriormente, as durações simuladas pelo modelo WRF divergiram ligeiramente com relação aos registros. O primeiro evento apresentou duração simulada inferior à reportada e o oposto foi verificado para o segundo evento. Adicionalmente, o terceiro evento não foi identificado e/ou caracterizado por esta simulação.

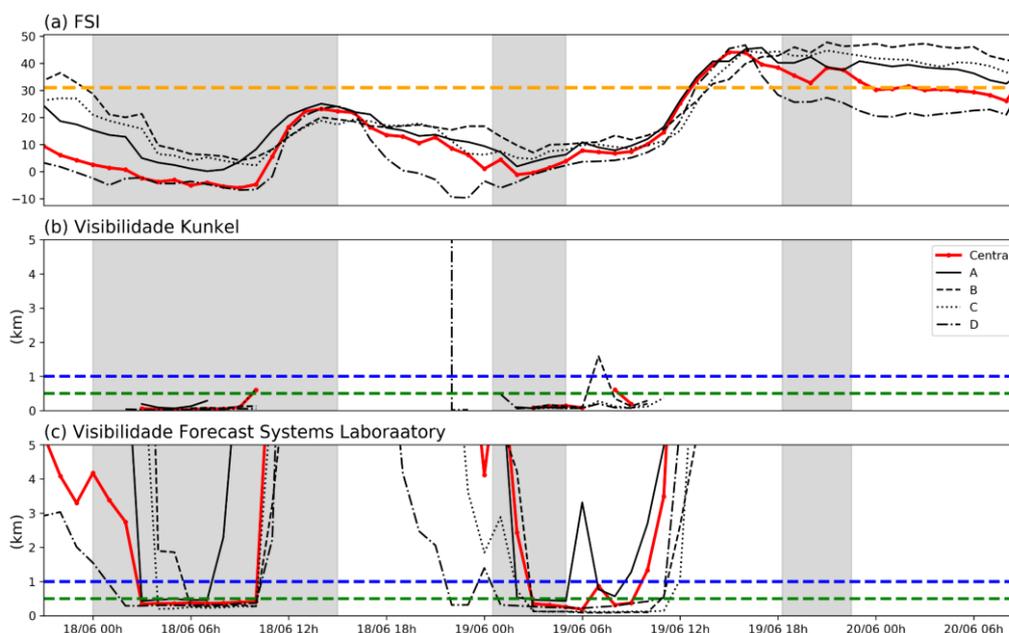


Figura J- 19 - Séries temporais do FSI (a) e das estimativas de visibilidade de Kunkel (b) e do FSL (c) obtidas a partir do modelo WRF para o período A. As linhas vermelhas são referentes às séries temporais no ponto central e o intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada.

A avaliação do número de Richardson como parâmetro para caracterizar a estabilidade atmosférica se deu a partir das classes de Pasquill, conforme descrito pela tabela 8. As linhas coloridas na figura J-20 ilustram os limiares desta classificação. Valores abaixo da linha vermelha apontam para condição muito instável; entre as linhas vermelha e amarela caracterizam instabilidade; entre a rosa e a amarela, moderadamente instável; entre verde e rosa, condição de neutralidade; entre verde e azul, estabilidade e acima da linha azul, condição muito estável.

Este parâmetro foi avaliado em 3 níveis diferentes para o ponto próximo à estação meteorológica da Praticagem e os resultados estão dispostos na figura J-20. Entre os dois primeiros níveis do modelo (Figura J-20a), foi possível perceber que o modelo WRF simulou condição de estabilidade atmosférica horas antes da ocorrência registrada dos 3 eventos de

nevoeiro registrados no período avaliado. Após o início do registro da restrição de visibilidade, foi verificada uma tendência de aumento da instabilidade, descaracterizando a condição de estabilidade atmosférica ao fim dos dois primeiros eventos. Um padrão semelhante foi verificado quando a avaliação se deu entre o primeiro e o terceiro nível do modelo (Figura J-20b) e entre o primeiro e o sexto nível (Figura J-20c).

Desta forma, possibilitou-se evidenciar o número de Richardson como o único parâmetro nesta avaliação que mostrou habilidade de identificar condições favoráveis à ocorrência do terceiro evento de nevoeiro intenso registrado.

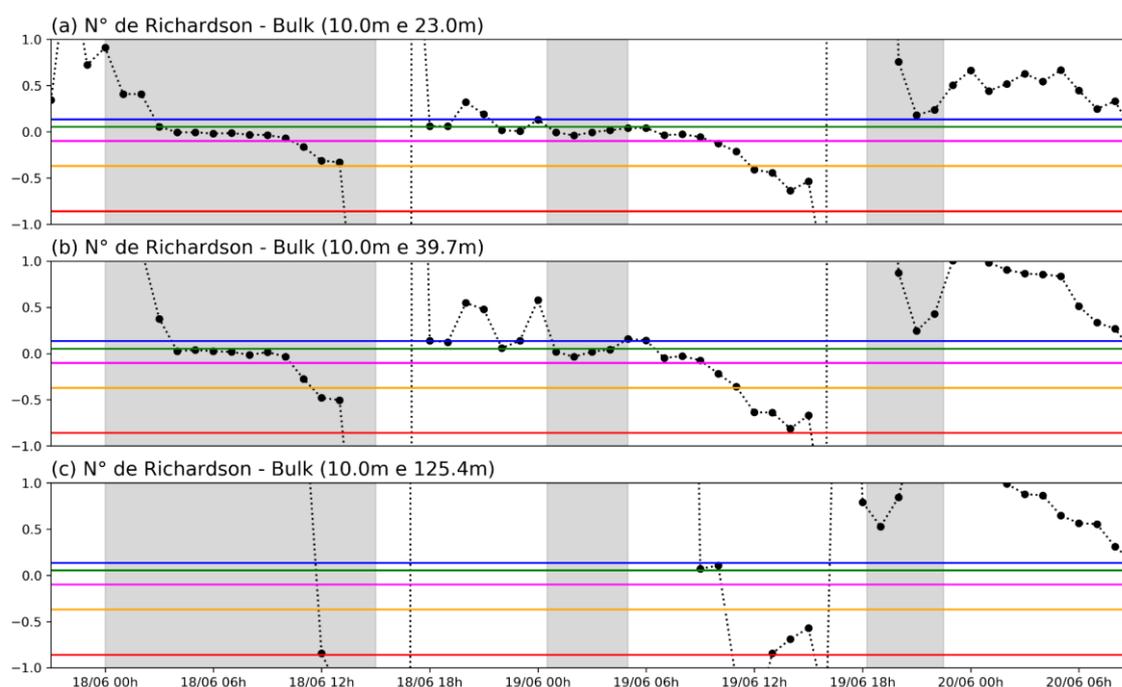


Figura J- 20- Séries temporais do número de Richardson em diferentes níveis obtidos a partir da simulação do modelo WRF para o período A. O intervalo destacado em cinza corresponde aos horários em que a condição de Impraticabilidade foi reportada. As linhas marcam limiares característicos das classes de estabilidade de Pasquill.

APÊNDICE K - CAMPOS E PERFIS VERTICAIS SIMULADOS PELO MODELO WRF
PARA O PERÍODO A (DOMÍNIO 3)

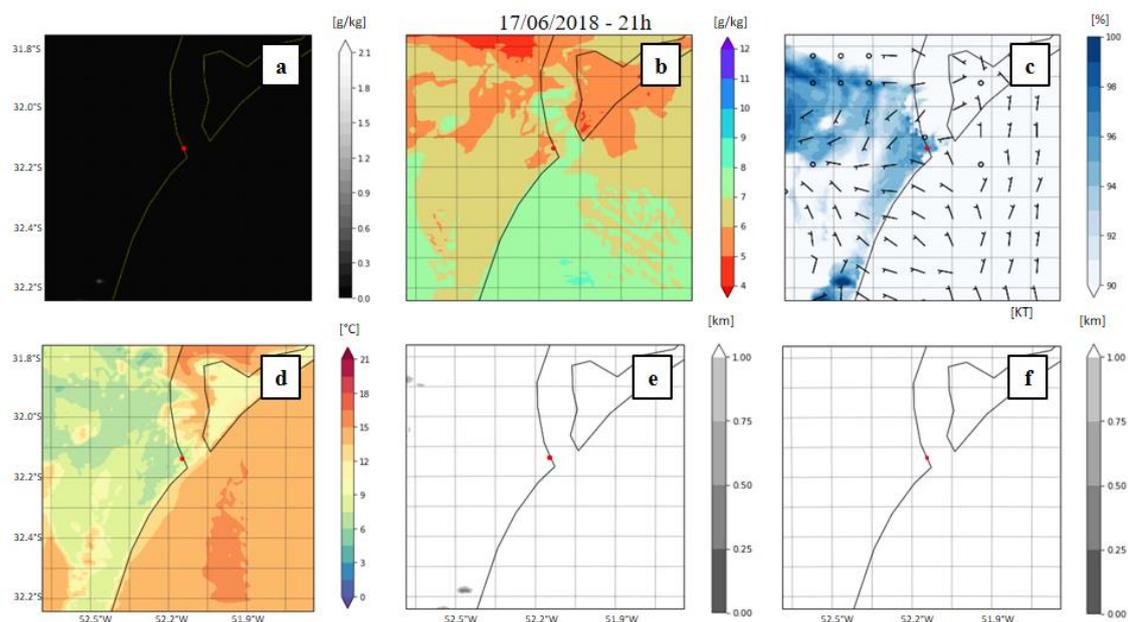
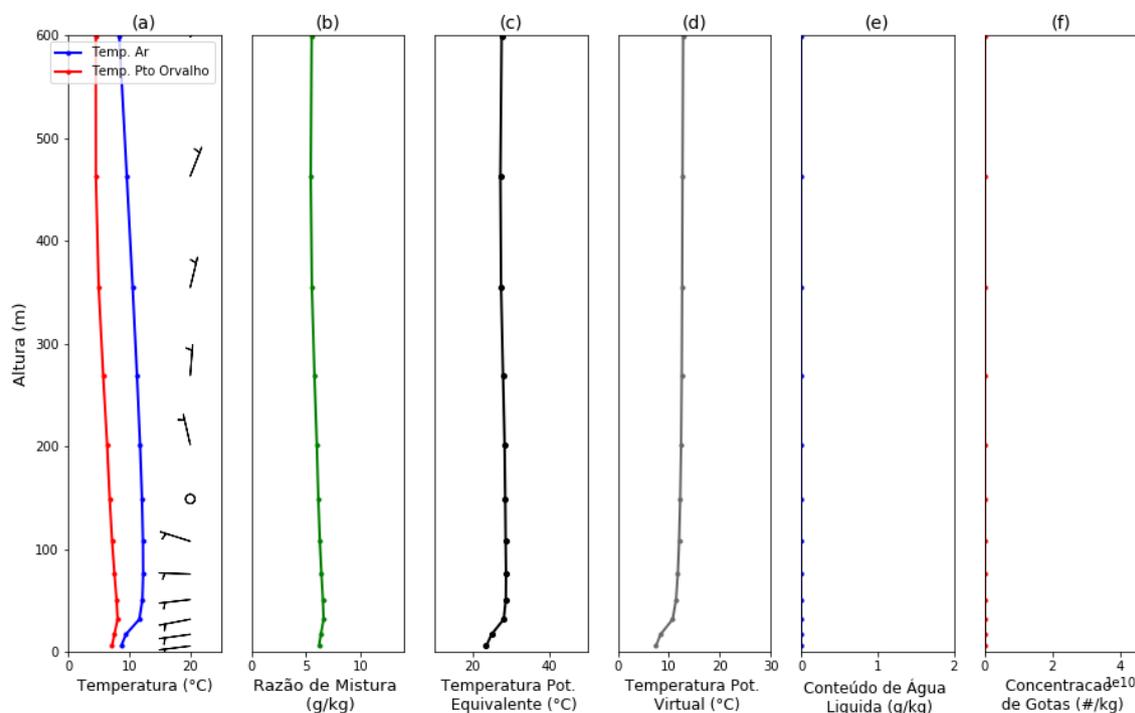


Figura K- 1- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 17/06/2018 às 21h (hora local).



K- 2- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 17/06/2018 às 21h (hora local).

Figura

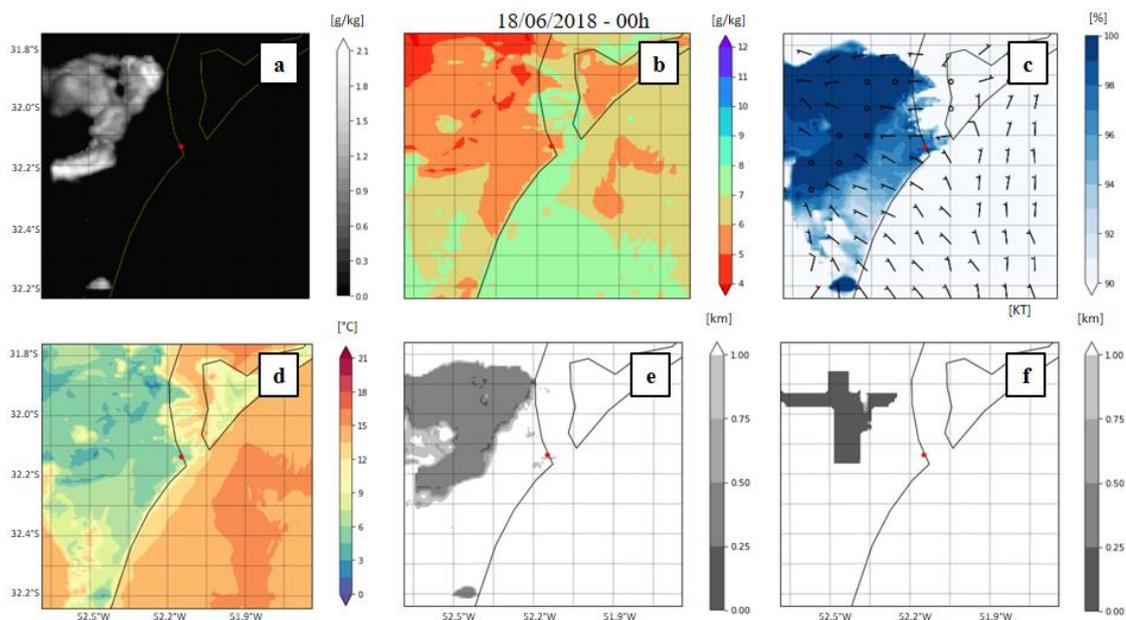


Figura K- 3- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 00h (hora local).

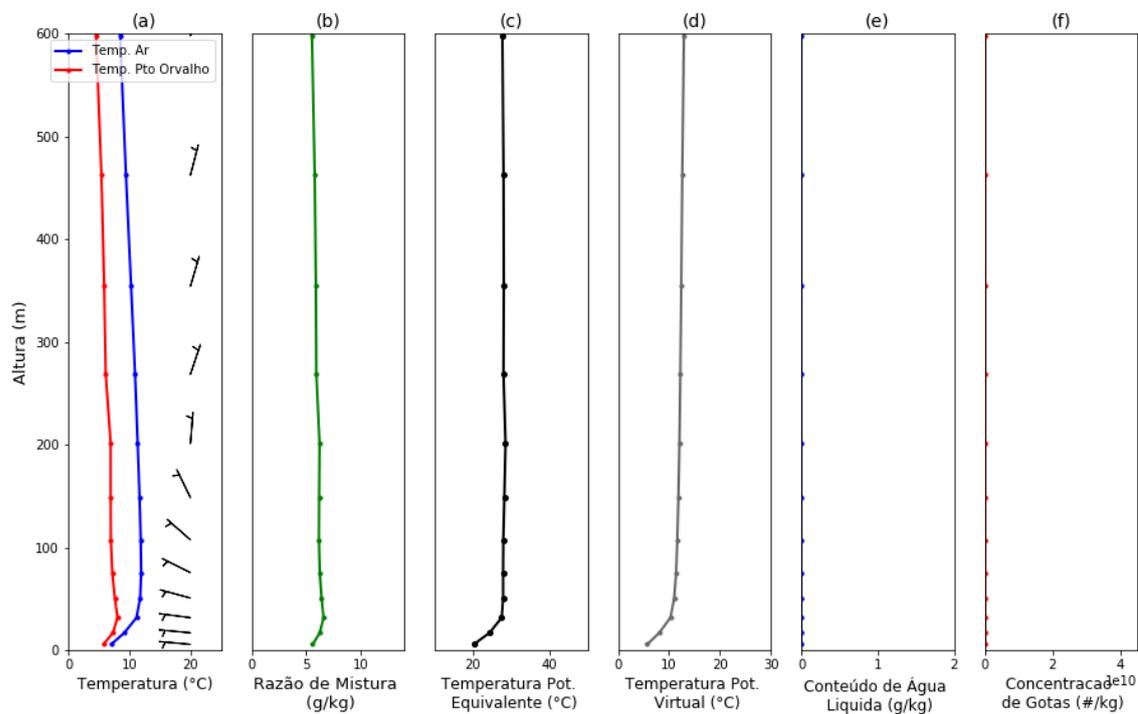


Figura K- 4- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 00h (hora local).

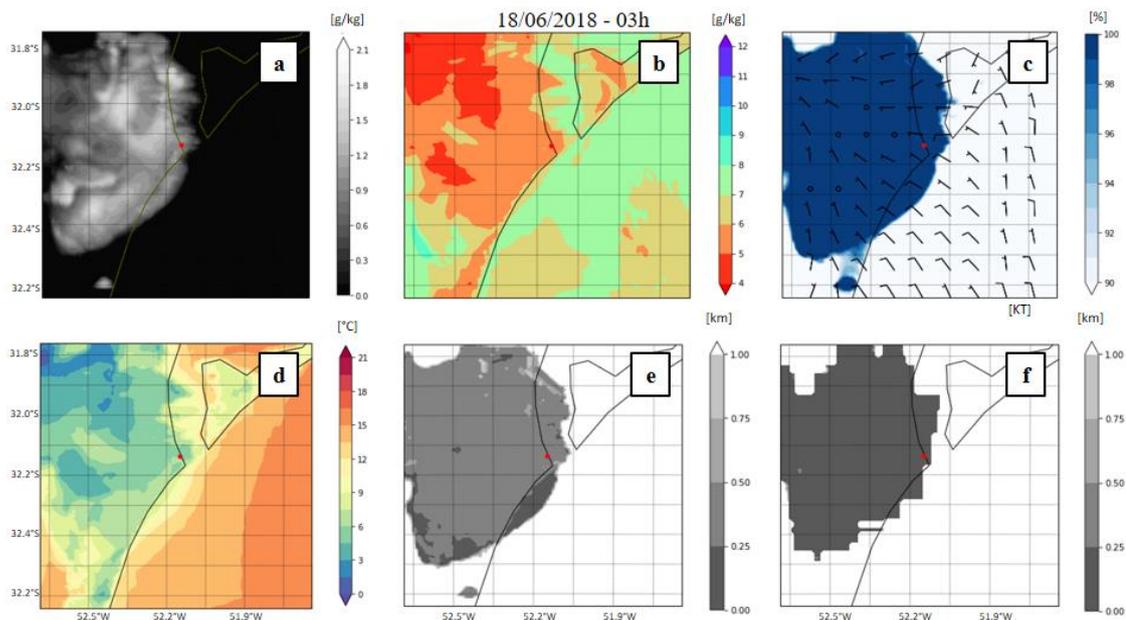


Figura K- 5- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 03h (hora local).

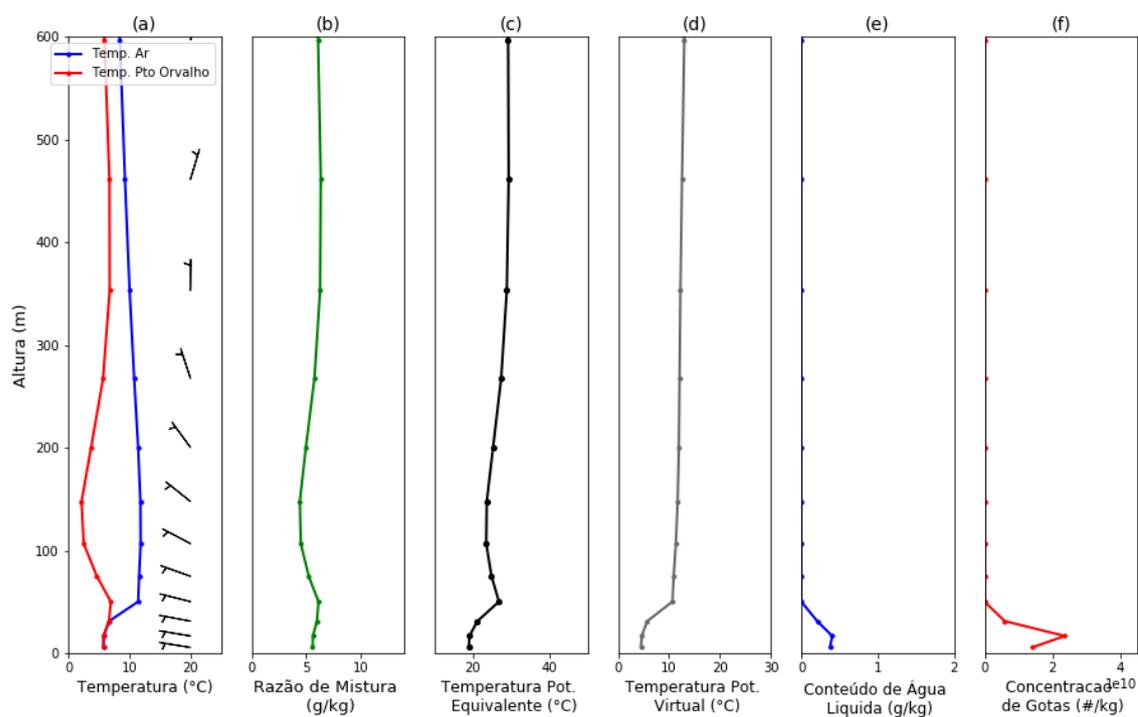


Figura K- 6- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 03h (hora local).

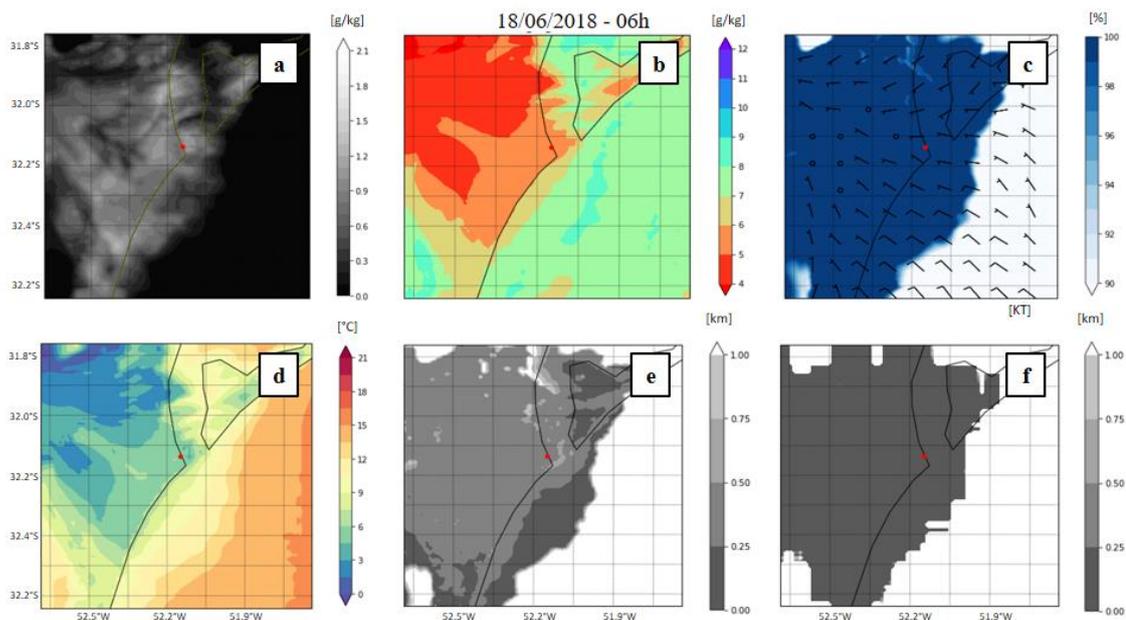


Figura K- 7- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 06h (hora local).

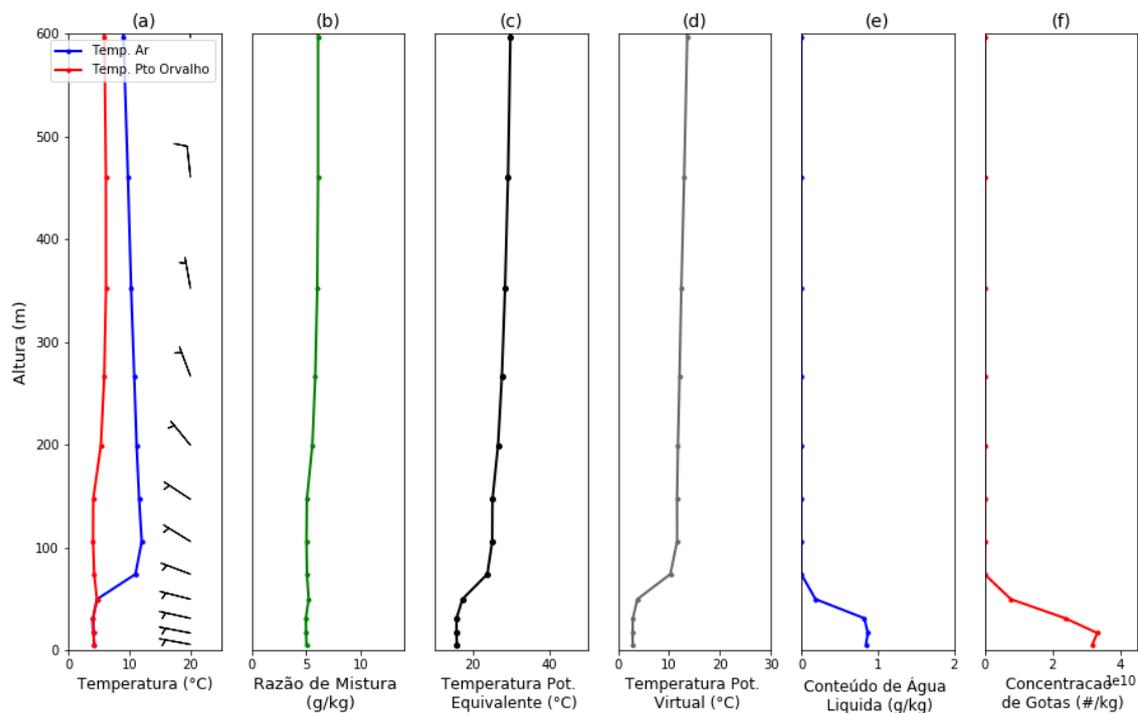


Figura K- 8- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 06h (hora local).

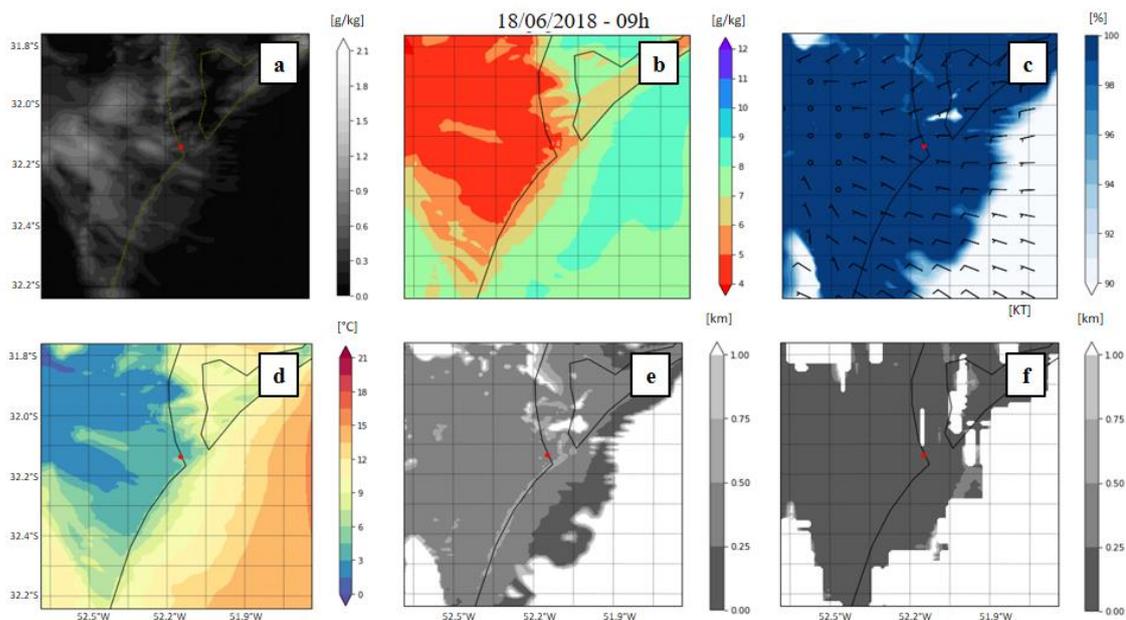


Figura K- 9- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 09h (hora local).

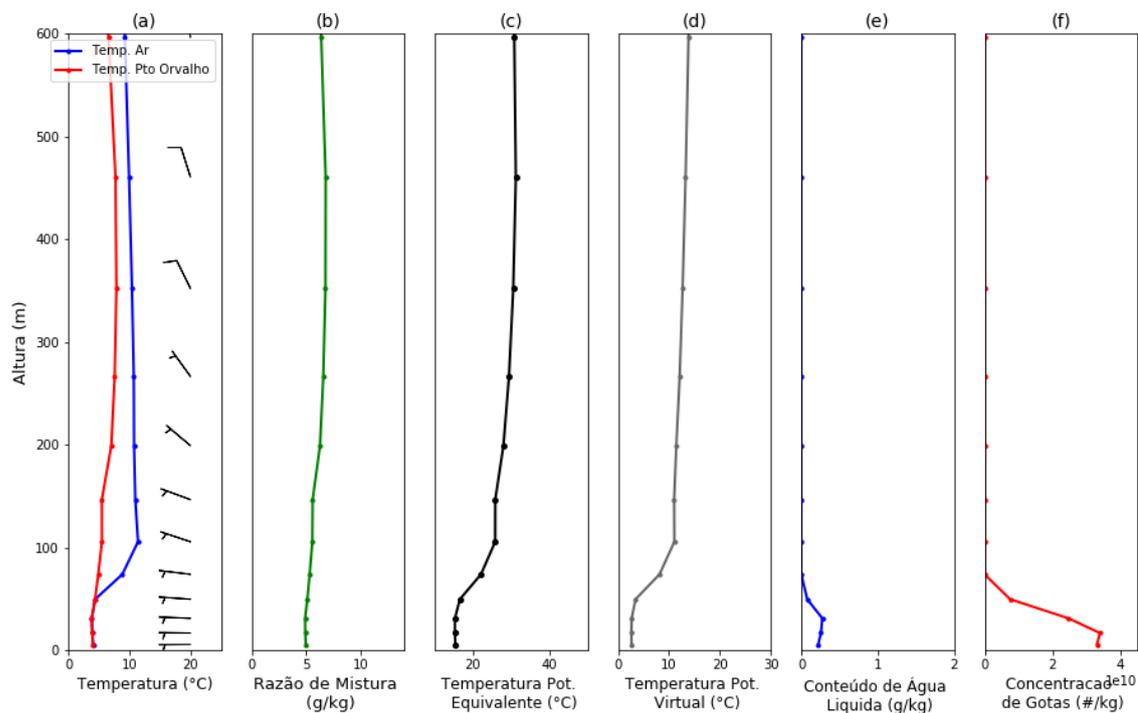


Figura K- 10- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 09h (hora local).

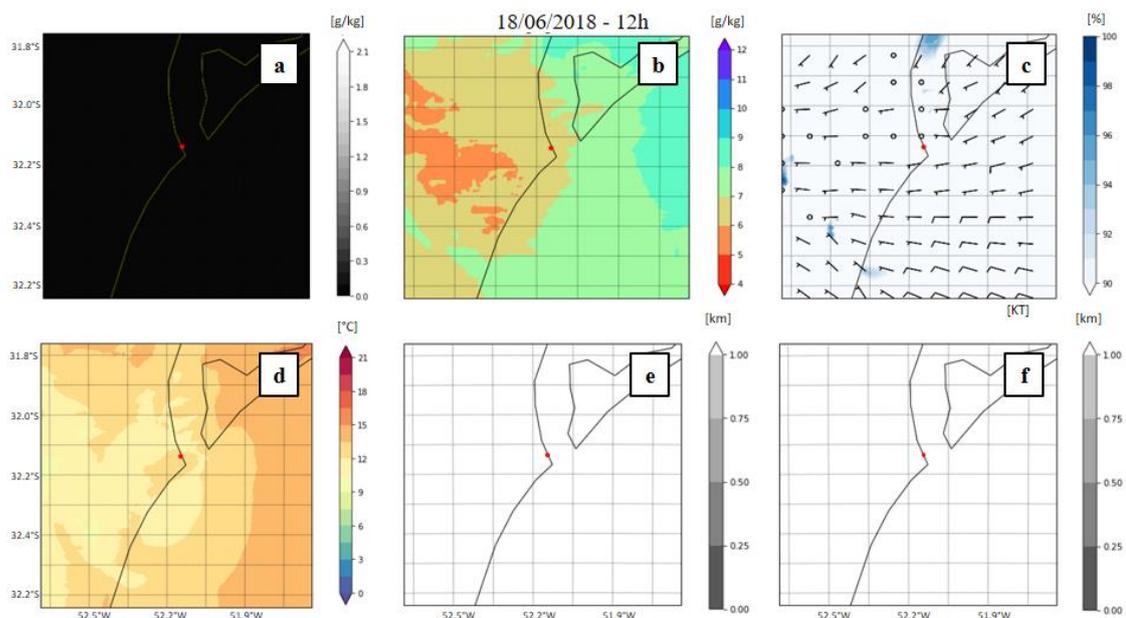


Figura K- 11- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 12h (hora local).

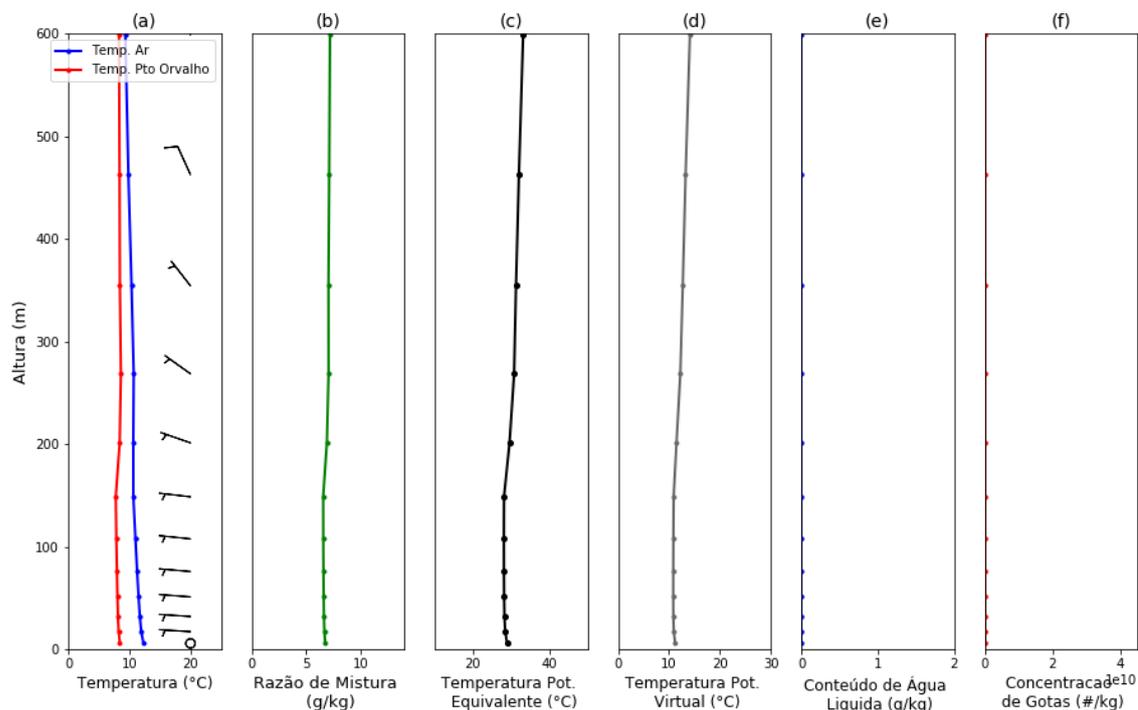


Figura K- 12- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 12h (hora local).

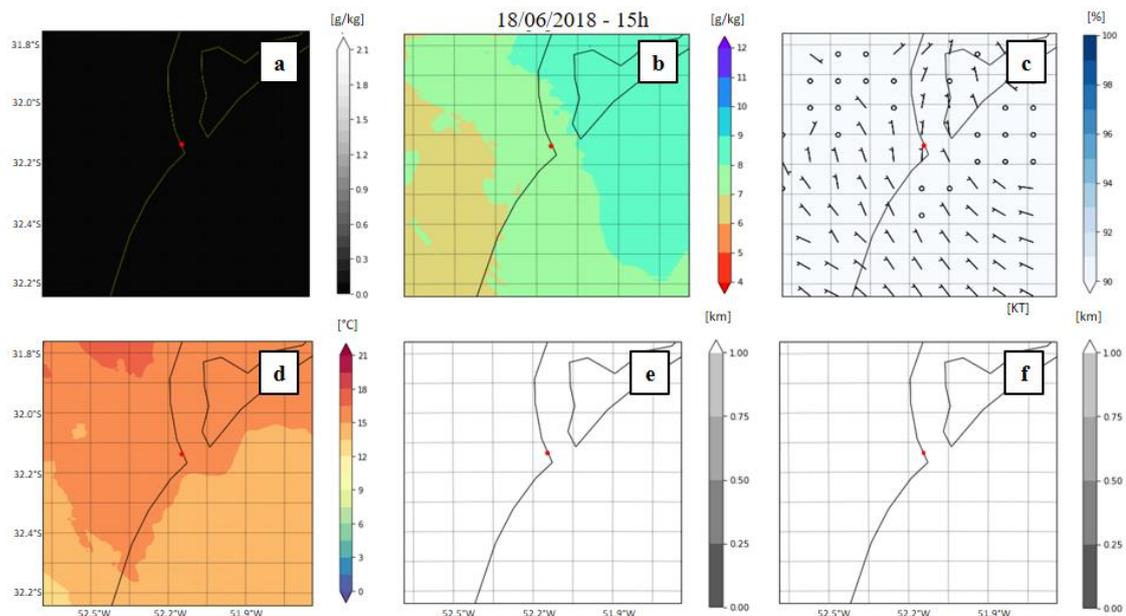


Figura K- 13- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 15h (hora local).

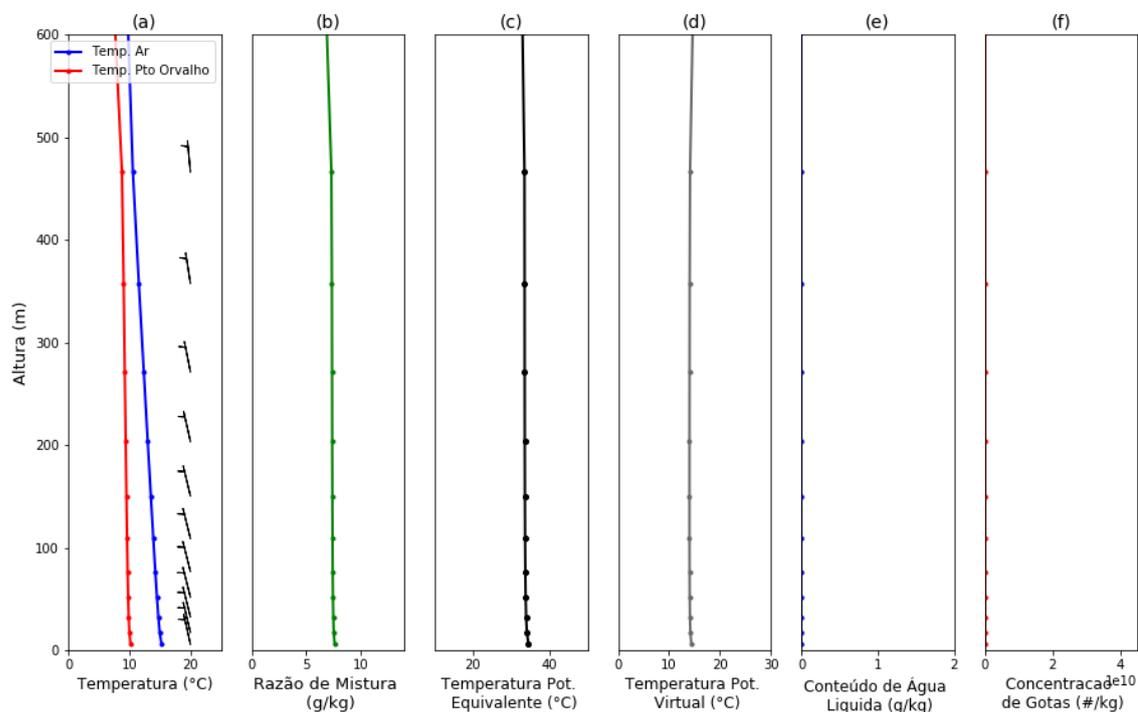


Figura K- 14- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 15h (hora local).

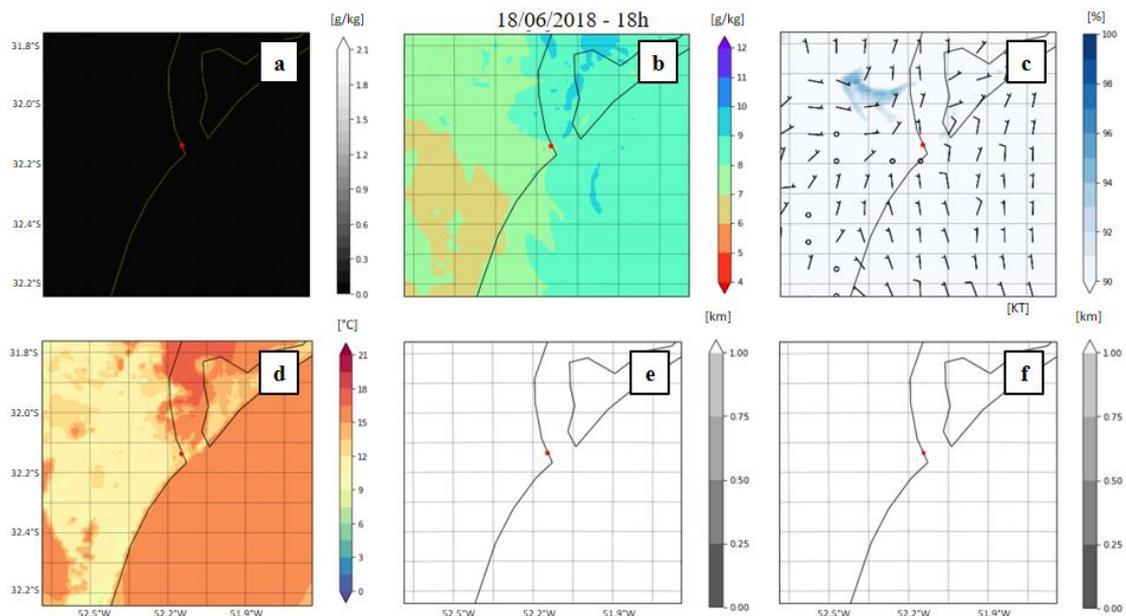


Figura K- 15- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 18h (hora local).

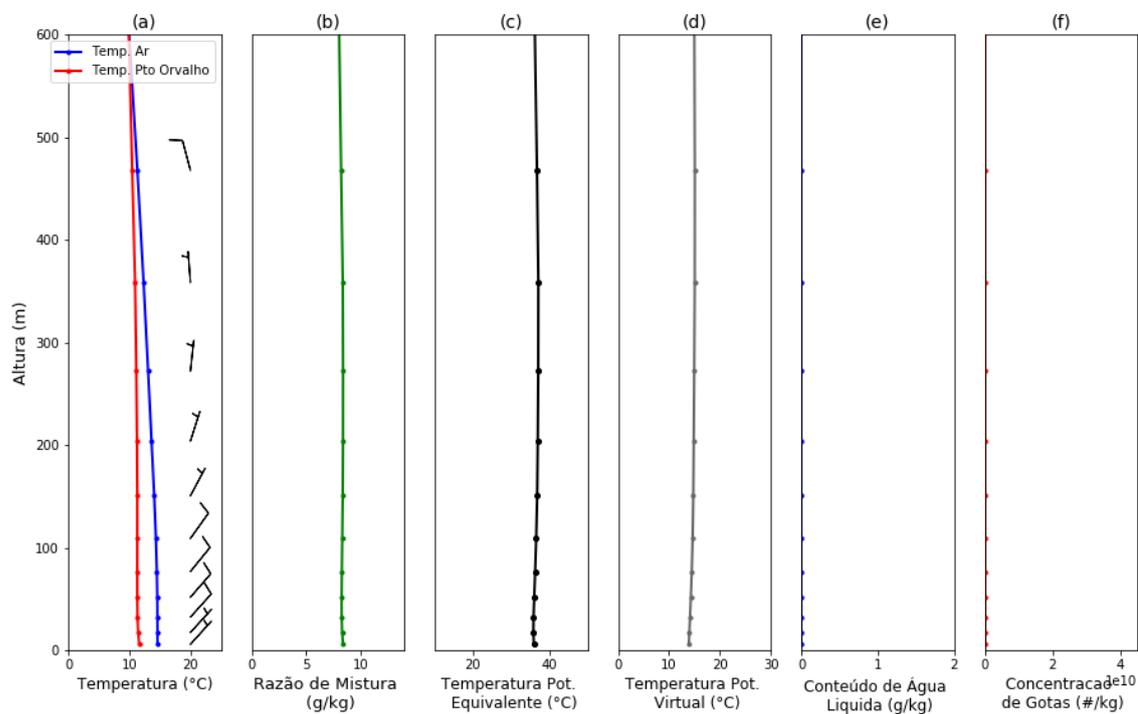


Figura K- 16- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 18h (hora local).

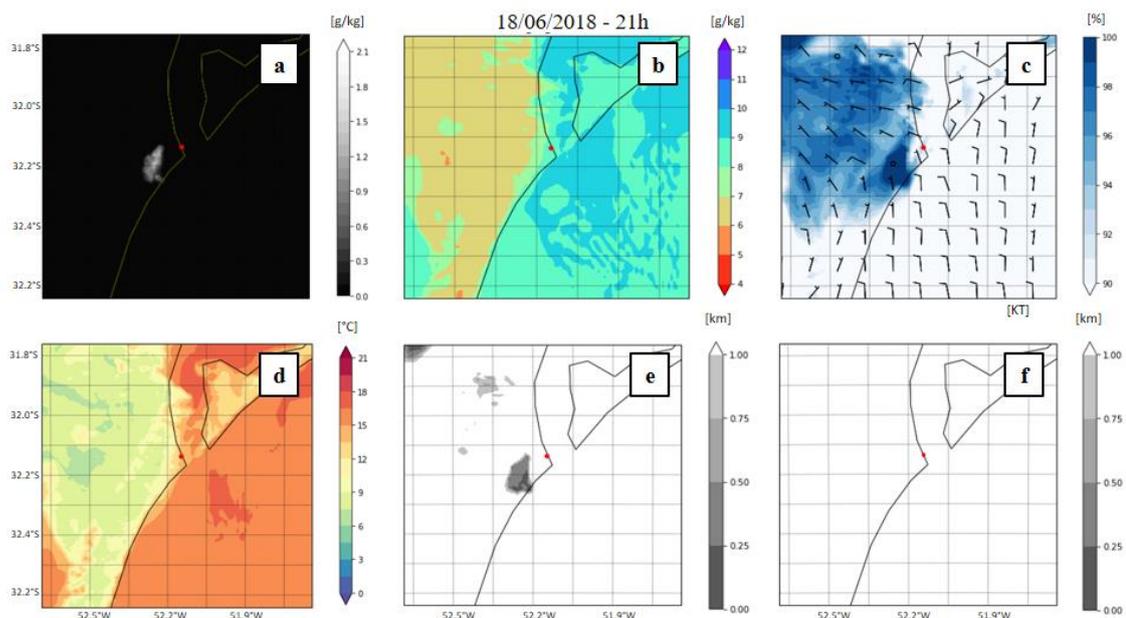


Figura K- 17- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 21h (hora local).

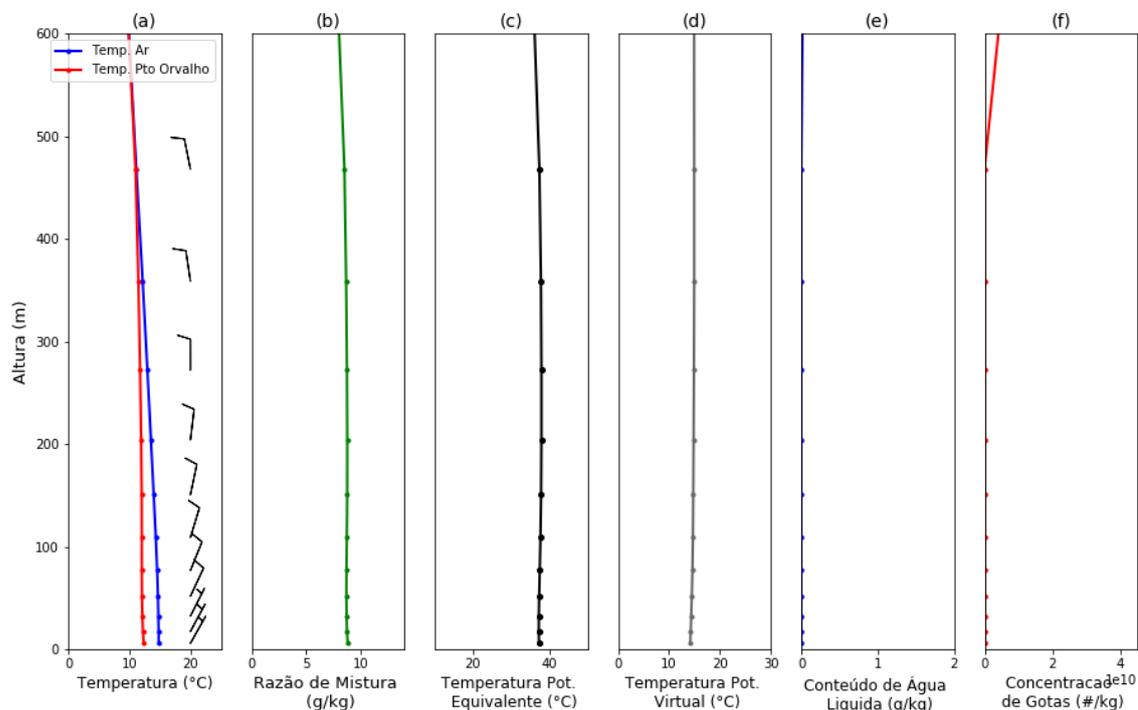


Figura K- 18- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 18/06/2018 às 21h (hora local).

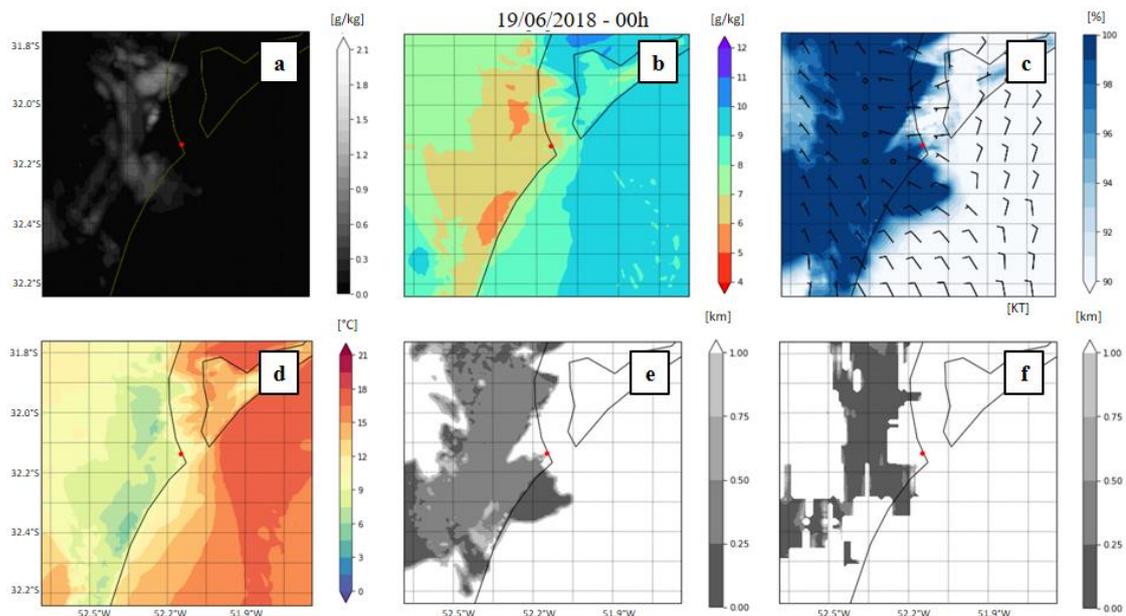


Figura K- 19- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 00h (hora local).

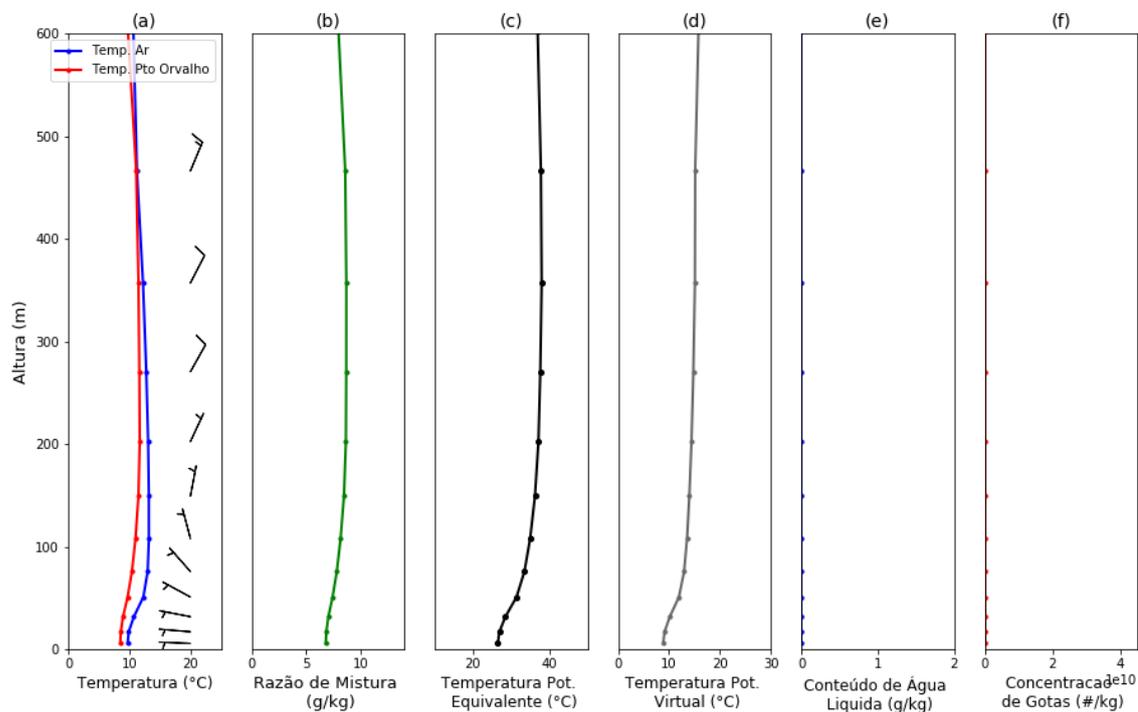


Figura K- 20- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 00h (hora local).

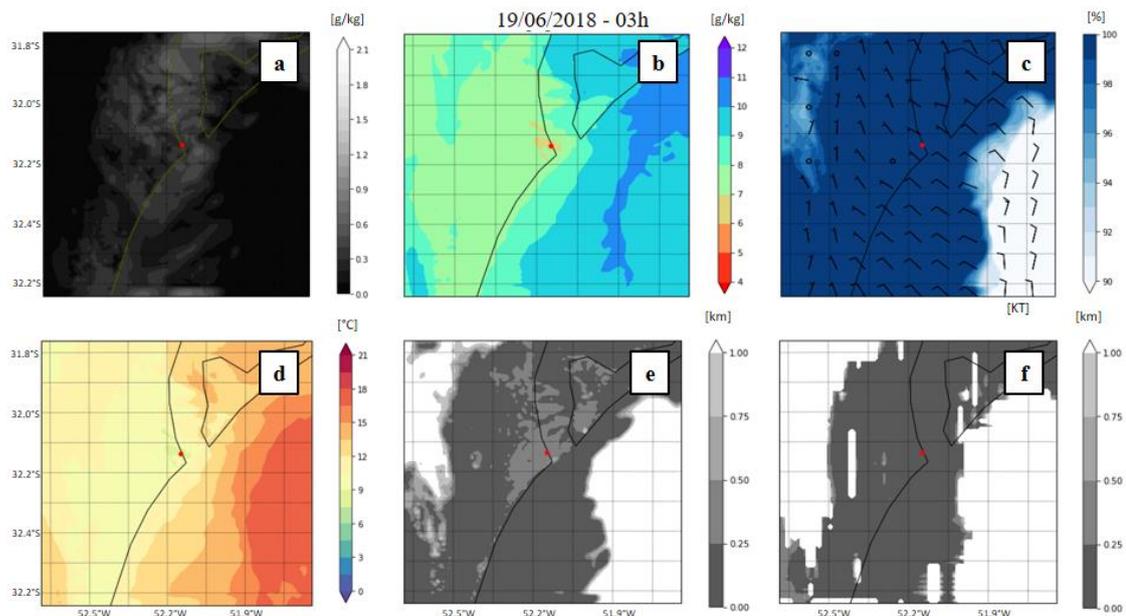


Figura K- 21- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 03h (hora local).

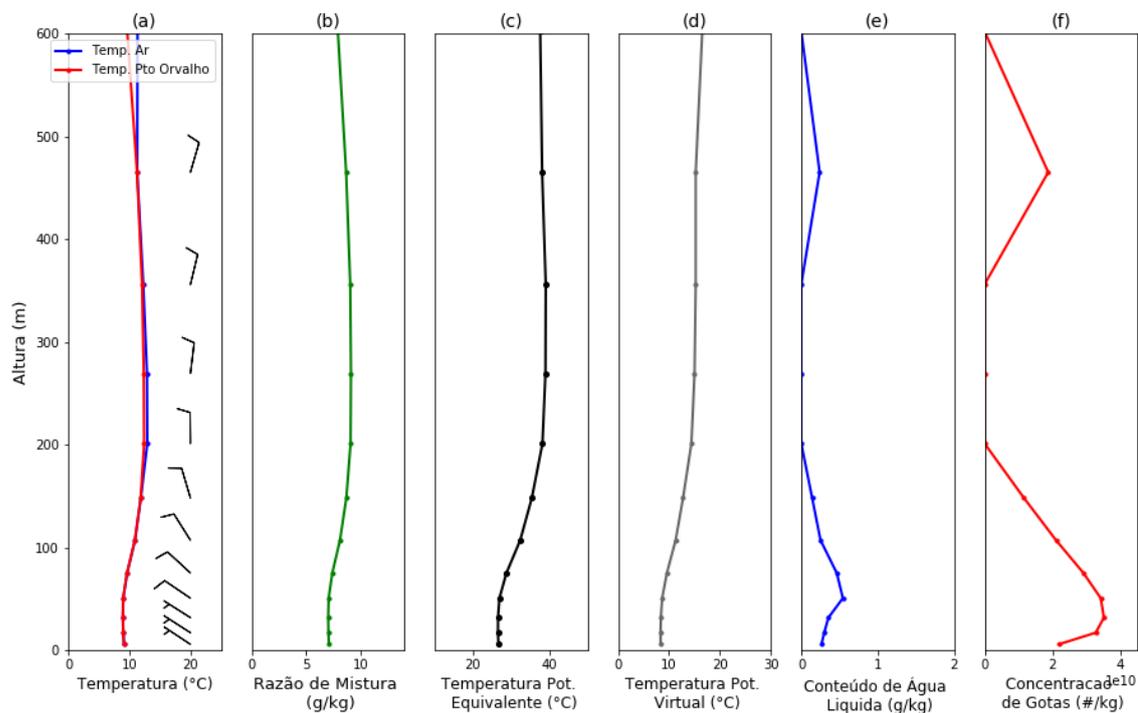


Figura K- 22- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 03h (hora local).

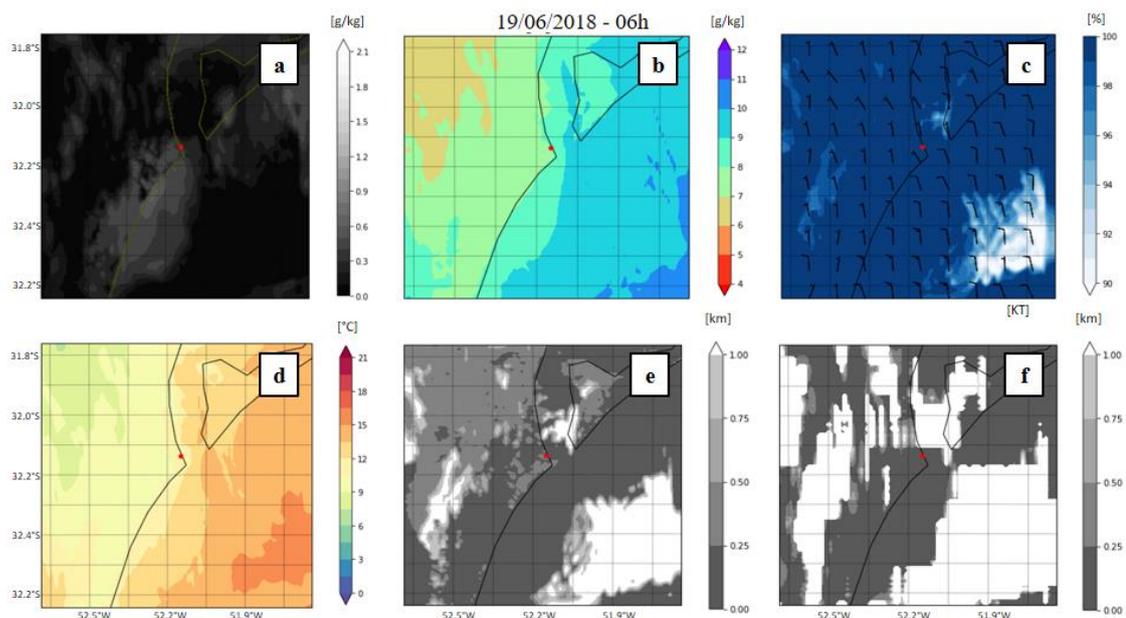


Figura K- 23- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 06h (hora local).

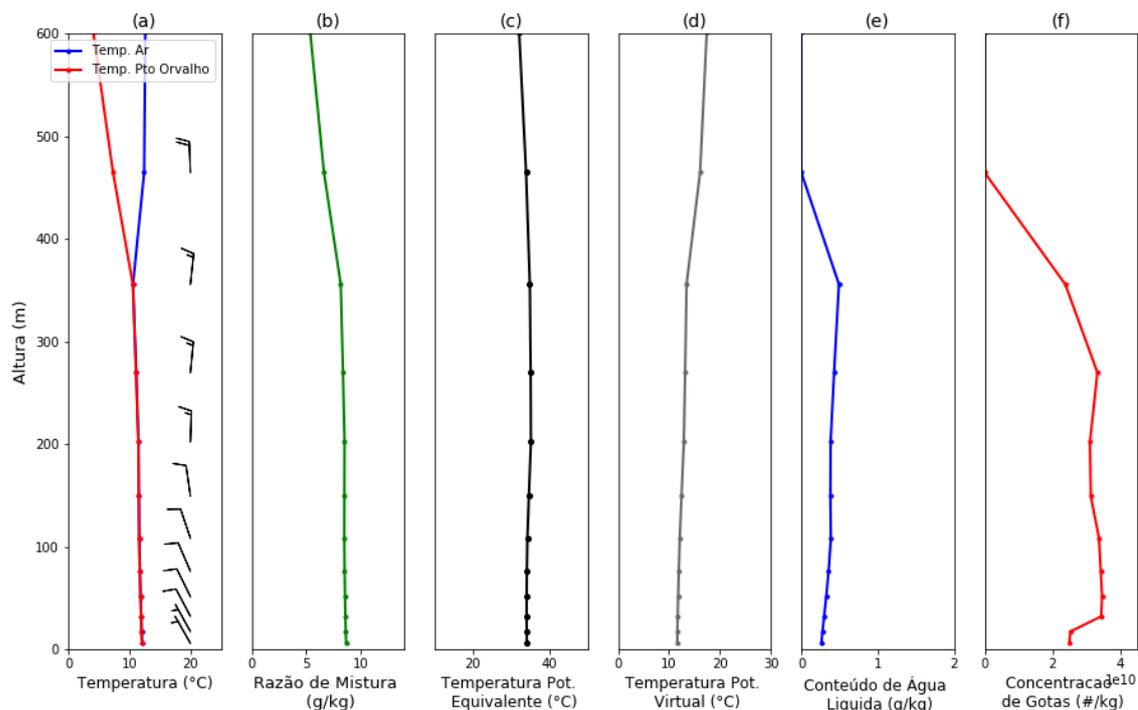


Figura K- 24- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 06h (hora local).

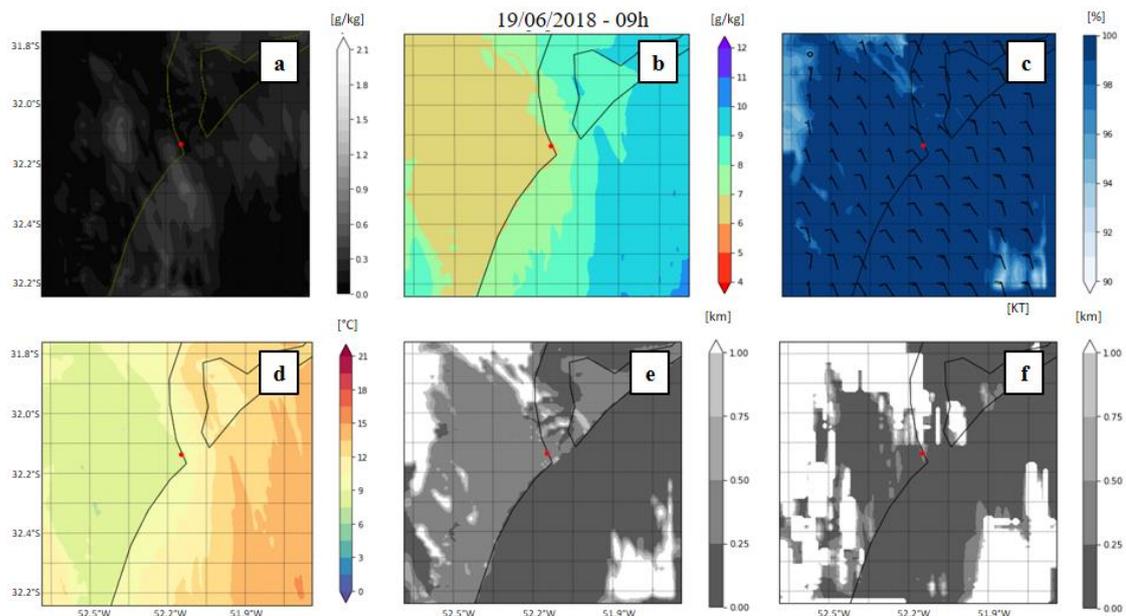


Figura K- 25- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 09h (hora local).

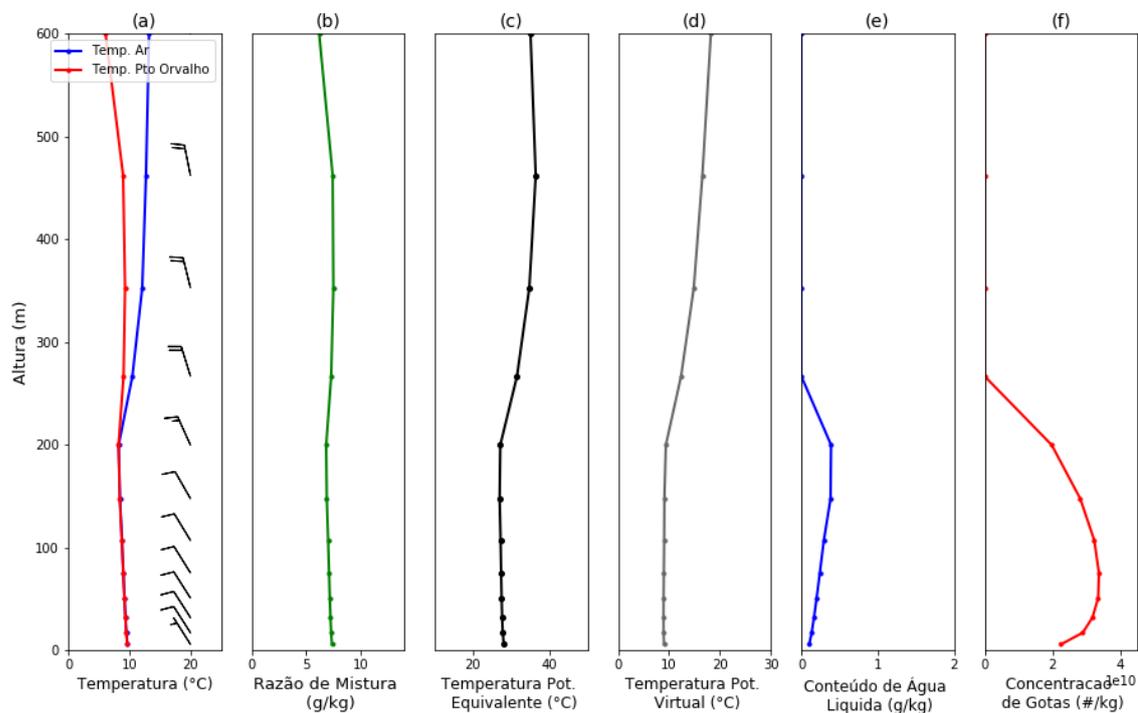


Figura K- 26- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 09h (hora local).

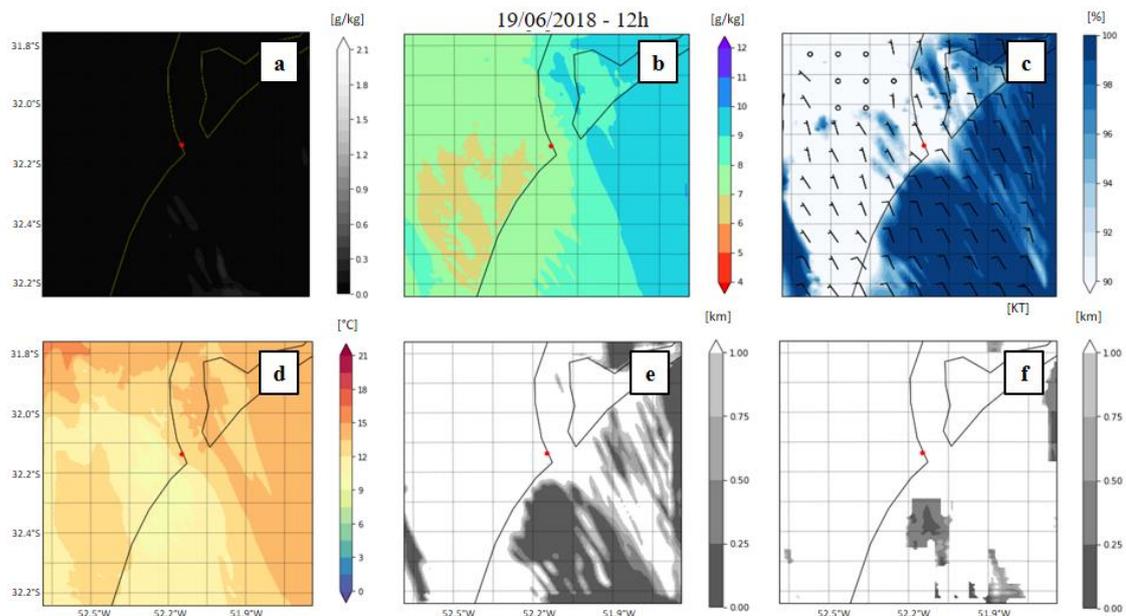


Figura K- 27- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 12h (hora local).

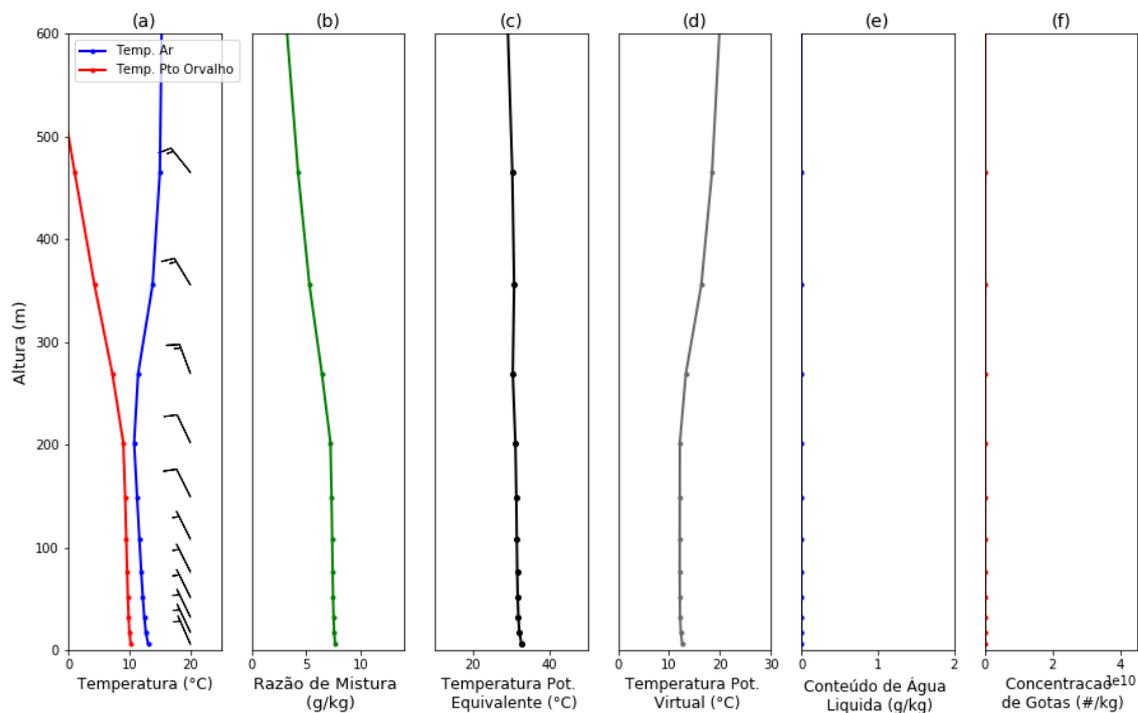


Figura K- 28- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 17906/2018 às 12h (hora local).

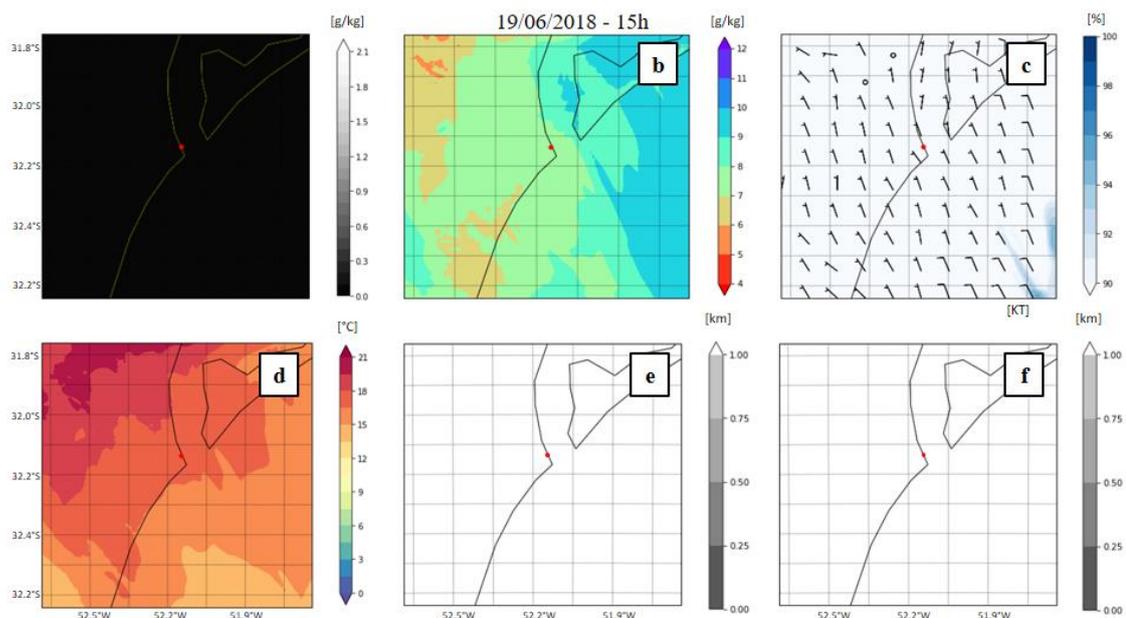


Figura K- 29- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 15h (hora local).

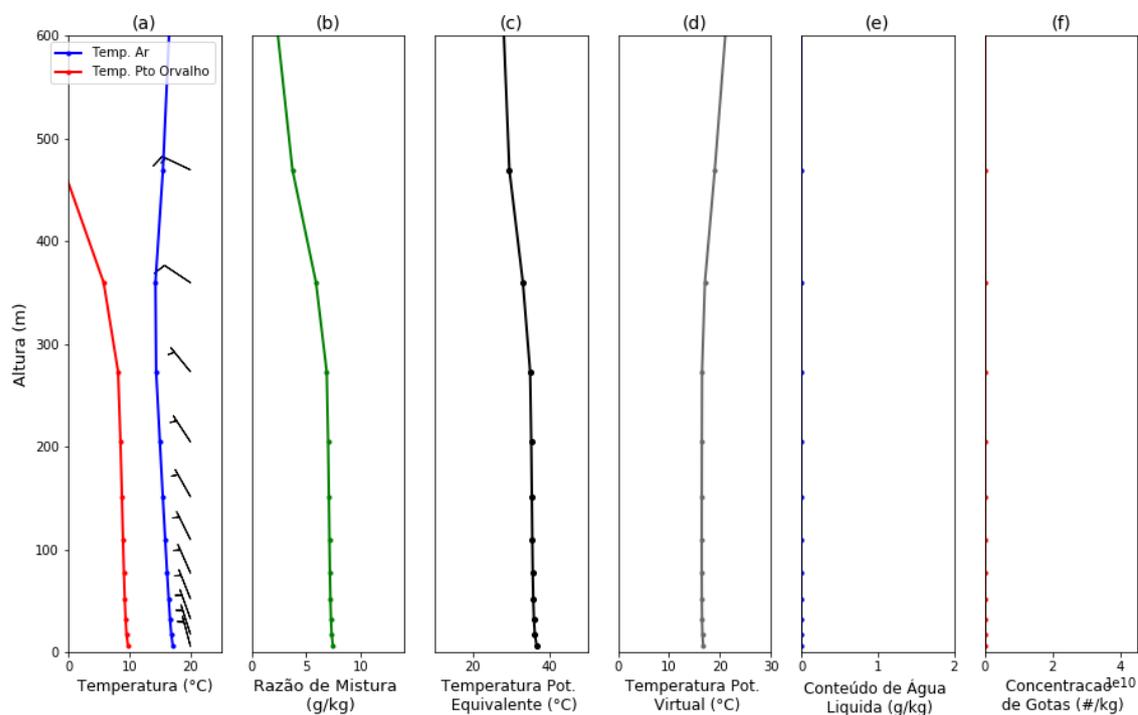


Figura K- 30- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 15h (hora local).

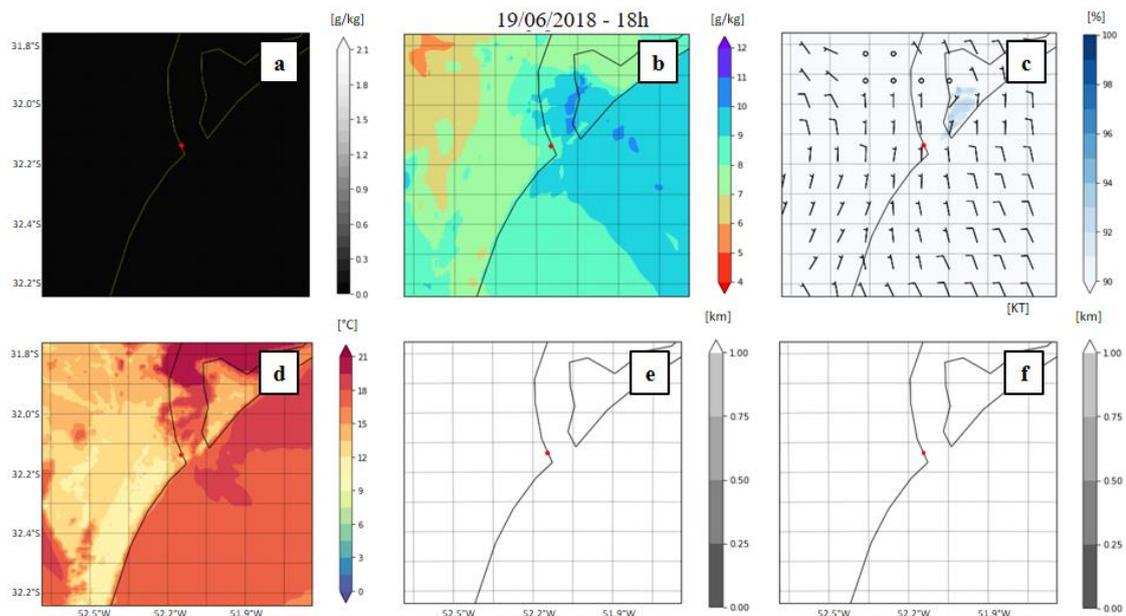


Figura K- 31- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 18h (hora local).

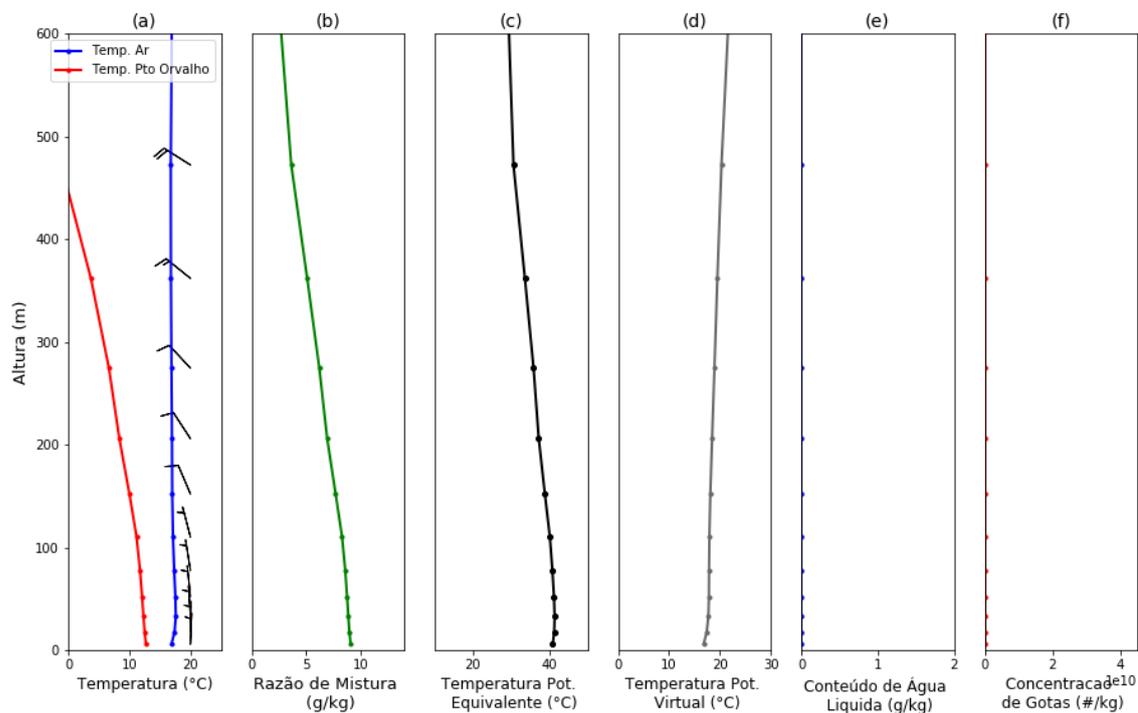


Figura K- 32- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 18h (hora local).

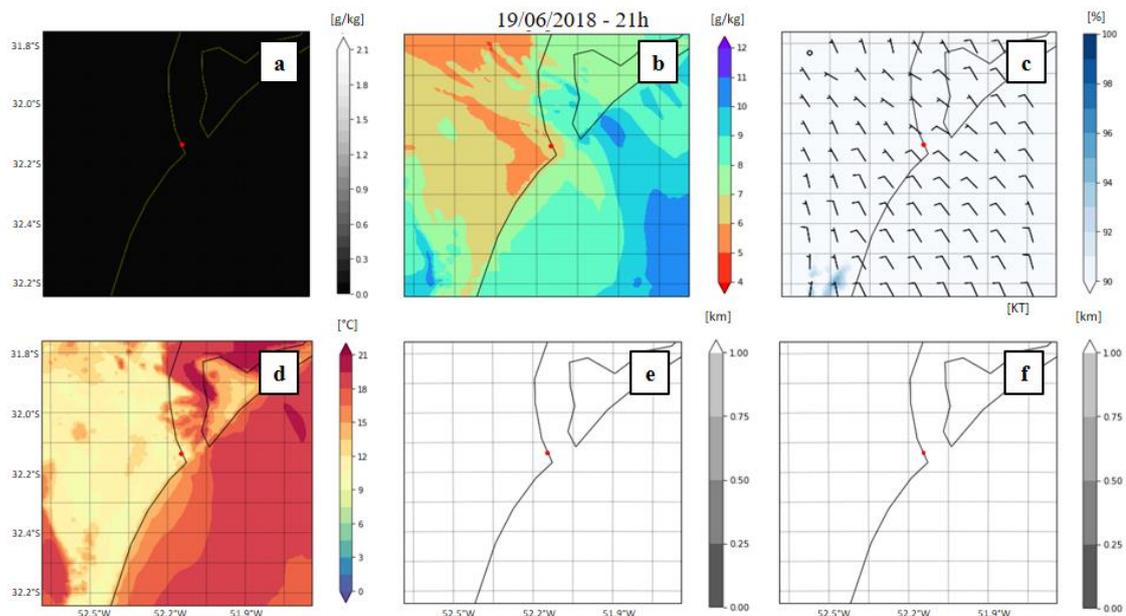


Figura K- 33- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 21h (hora local).

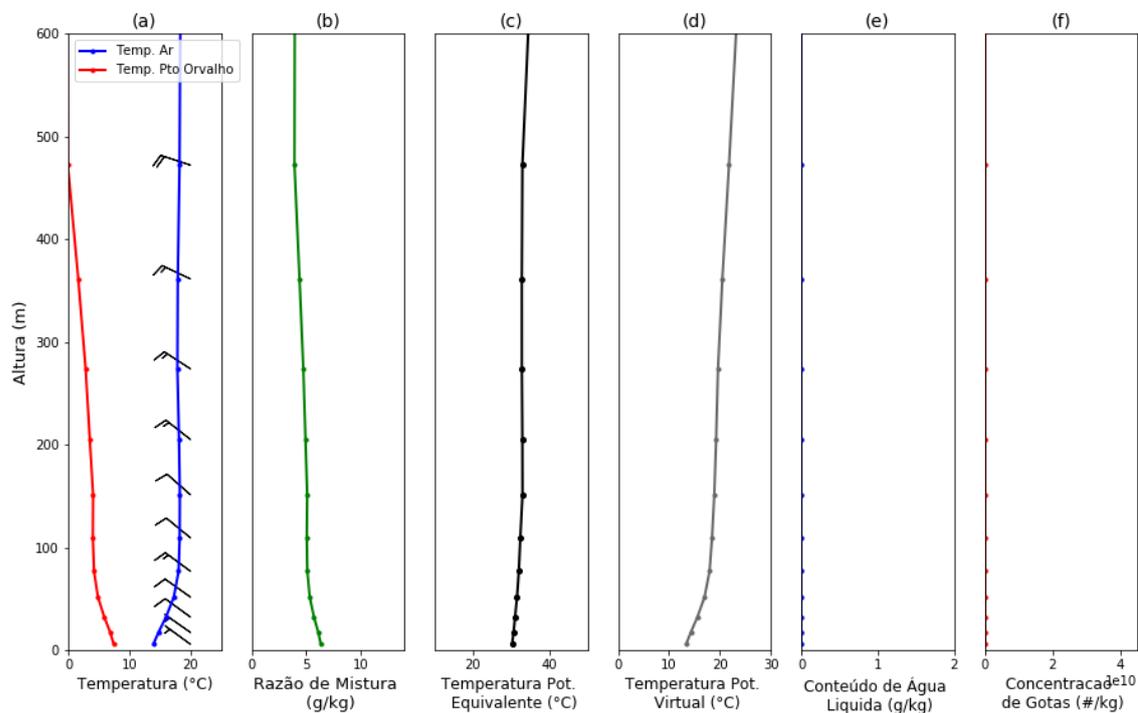


Figura K- 34- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 19/06/2018 às 21h (hora local).

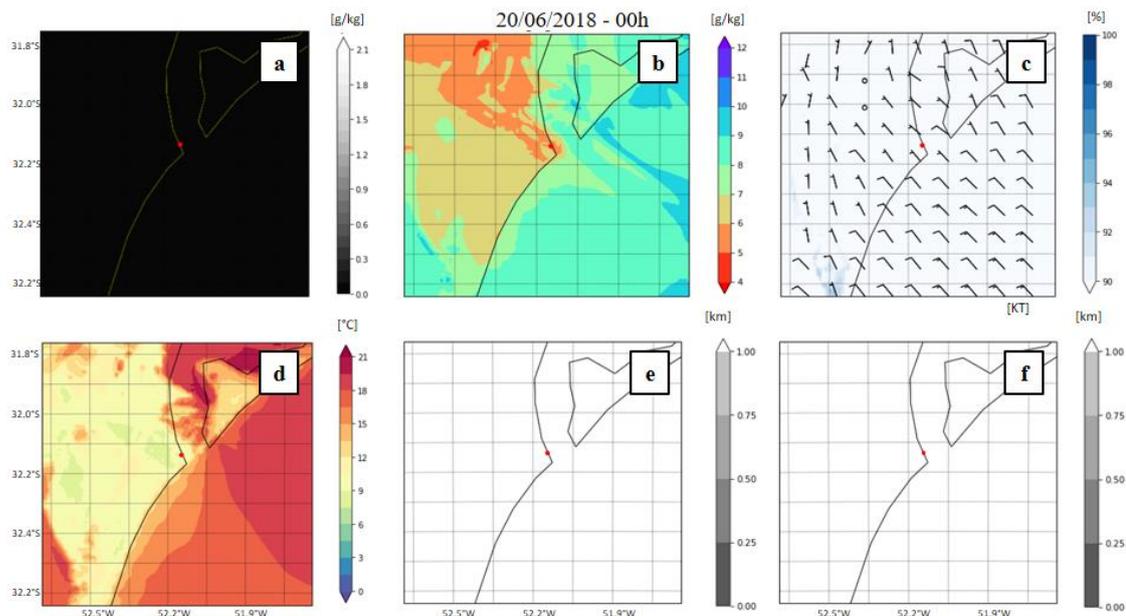


Figura K- 35- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 20/06/2018 às 00h (hora local).

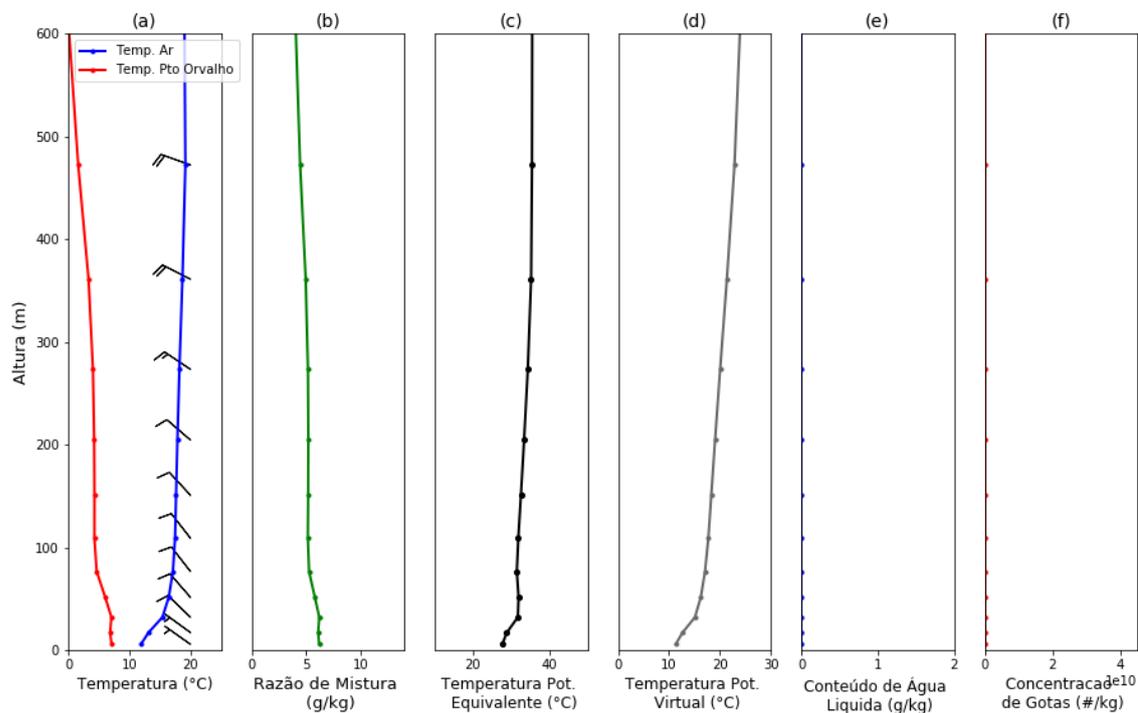


Figura K- 36- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 20/06/2018 às 00h (hora local).

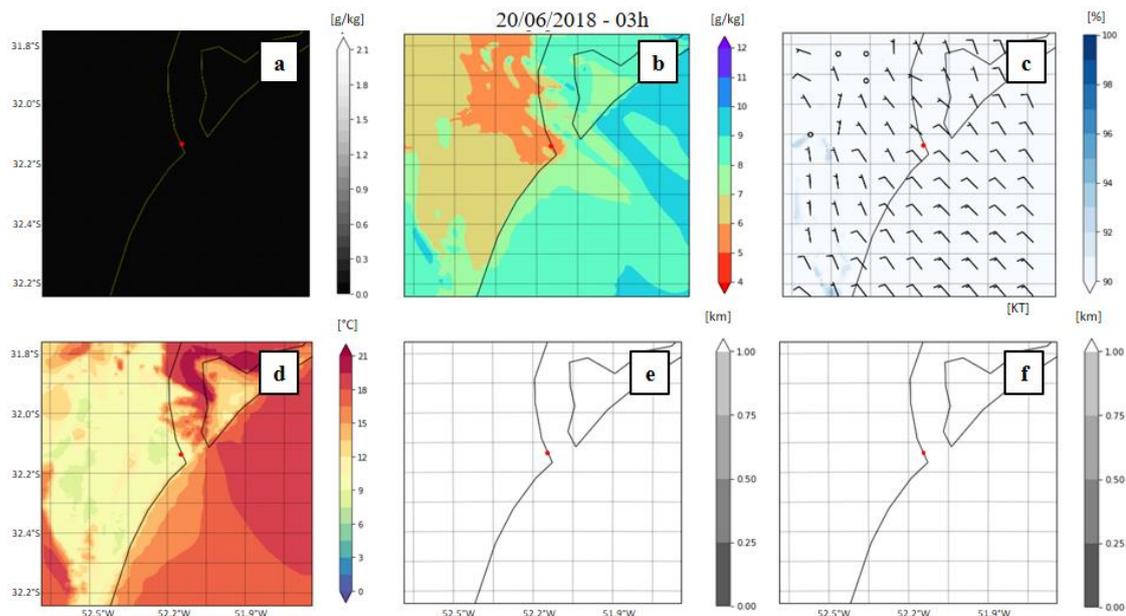


Figura K- 37- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 20/06/2018 às 03h (hora local).

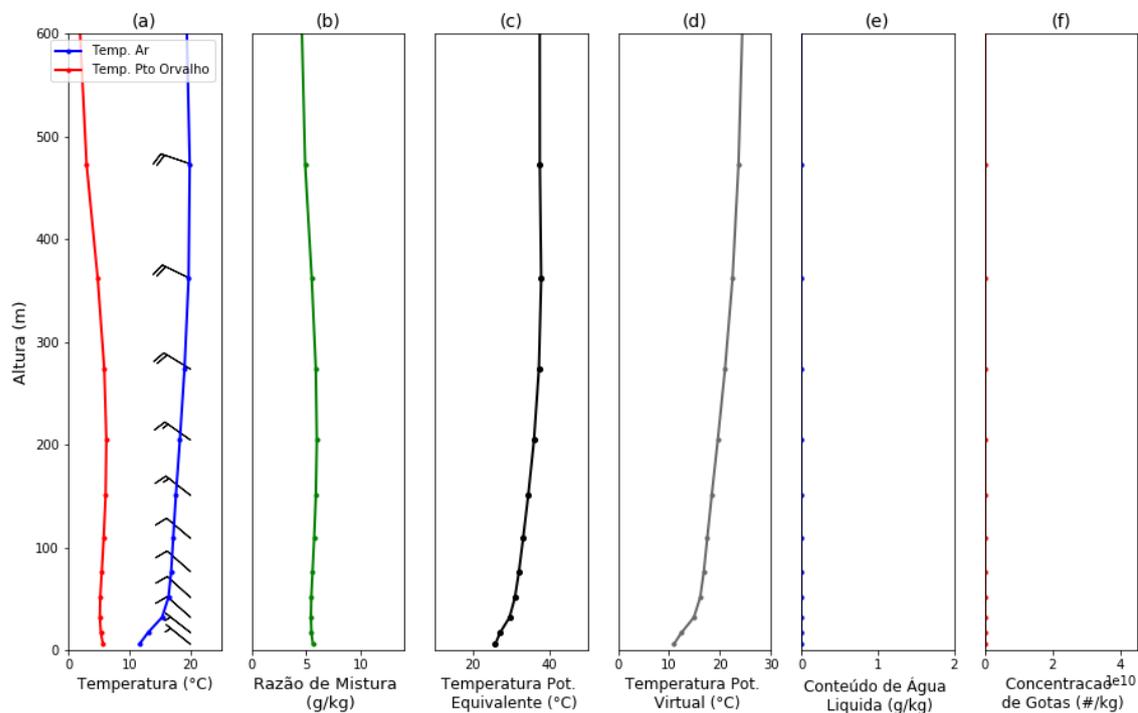


Figura K- 38- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 20/06/2018 às 03h (hora local).

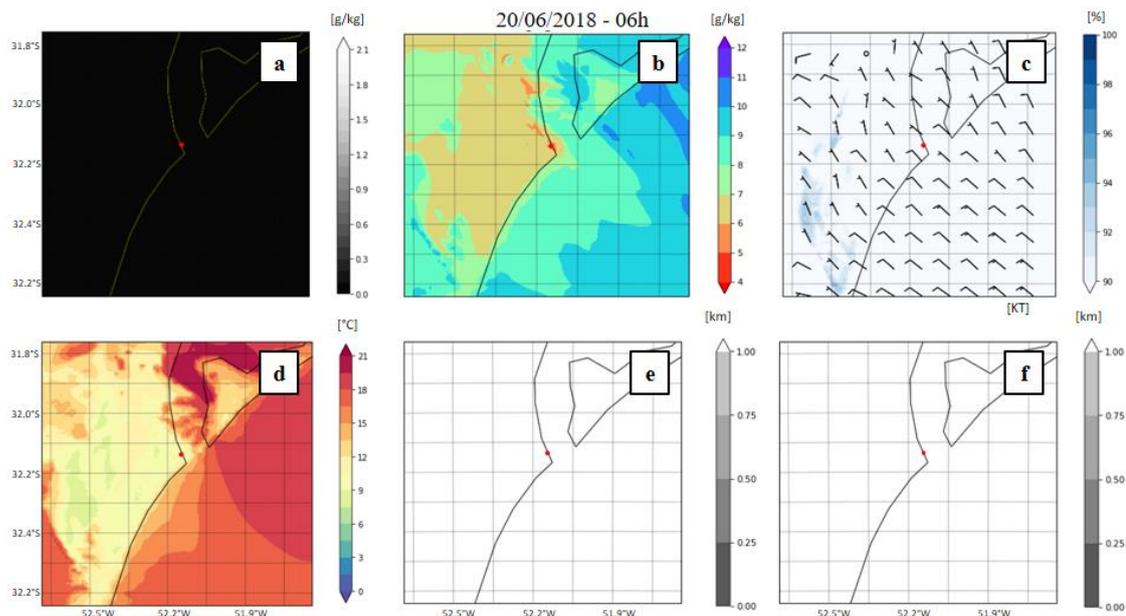


Figura K- 39- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 20/06/2018 às 06h (hora local).

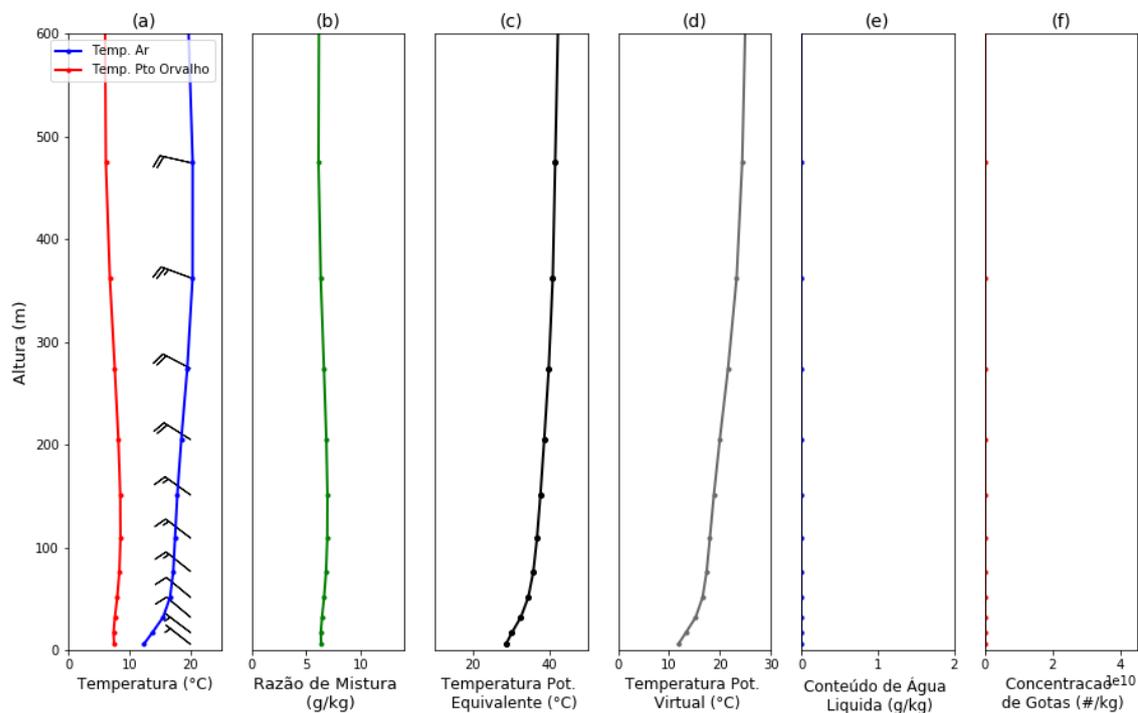


Figura K- 40- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 20/06/2018 às 06h (hora local).

APÊNDICE L - CAMPOS E PERFIS VERTICAIS SIMULADOS PELO MODELO WRF PARA O PERÍODO B (DOMÍNIO 3)

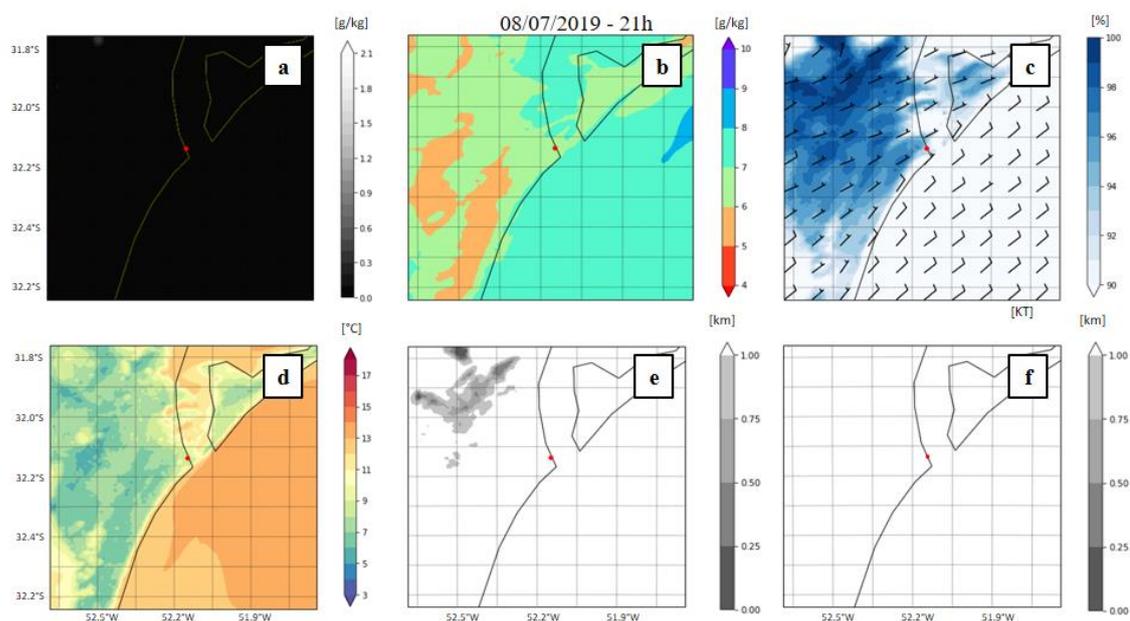


Figura L- 1- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 08/07/201 à 21h (hora local).

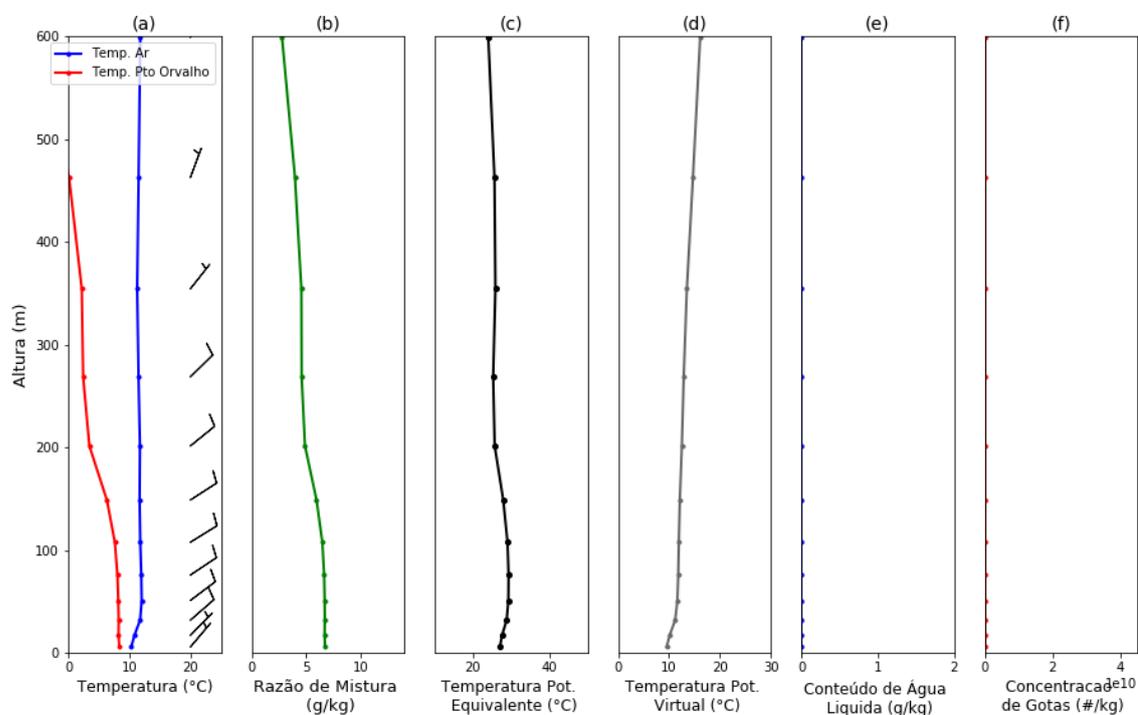


Figura L- 2- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 08/07/201 à 21h (hora local).

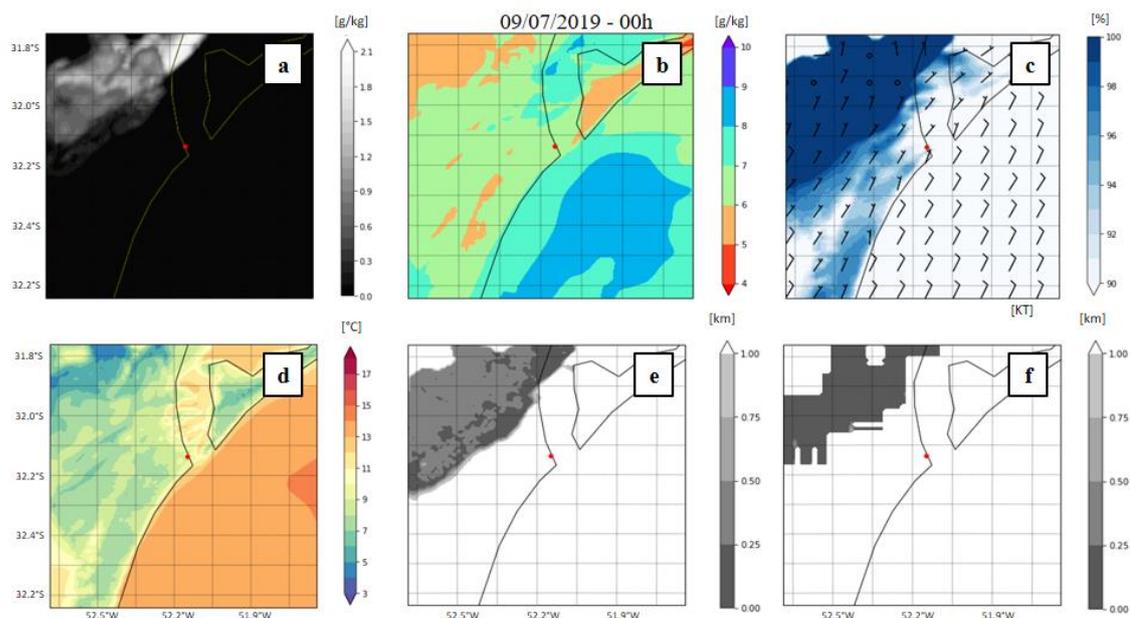


Figura L- 3- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 00h (hora local).

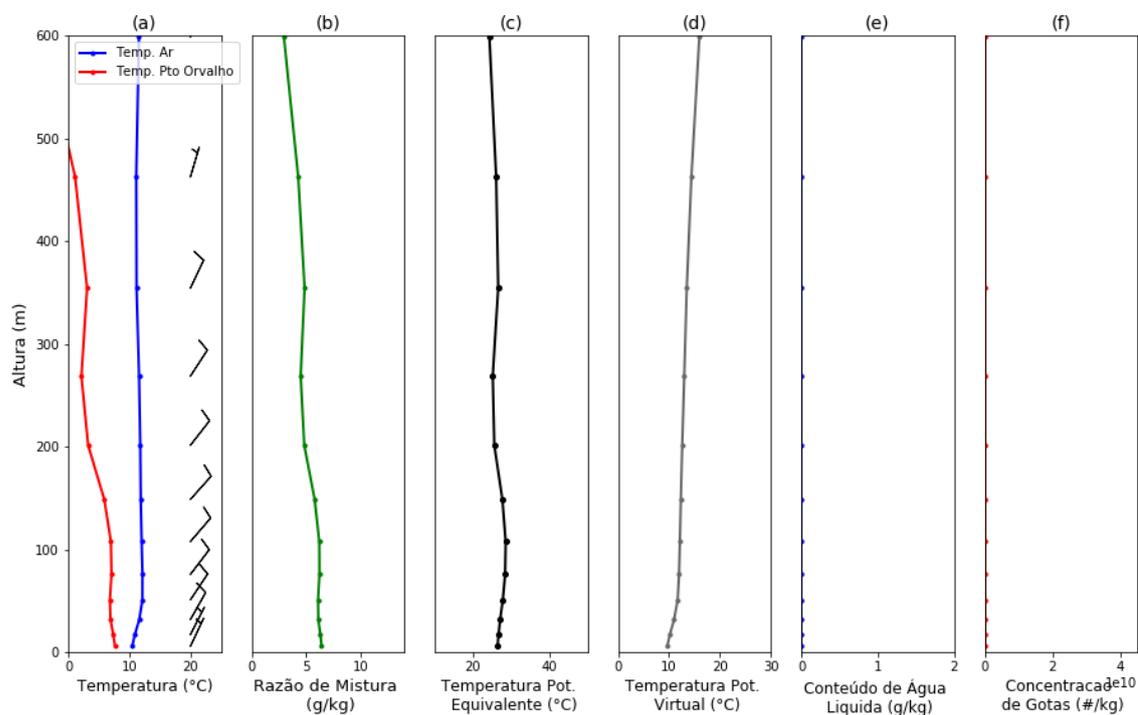


Figura L- 4- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 00h (hora local).

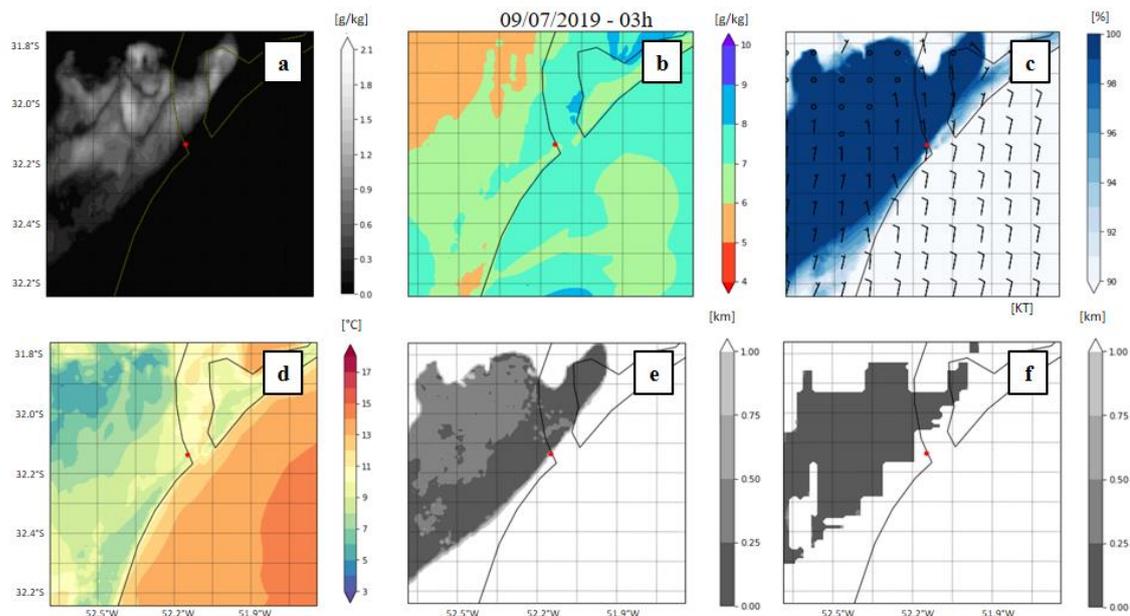


Figura L- 5- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 03h (hora local).

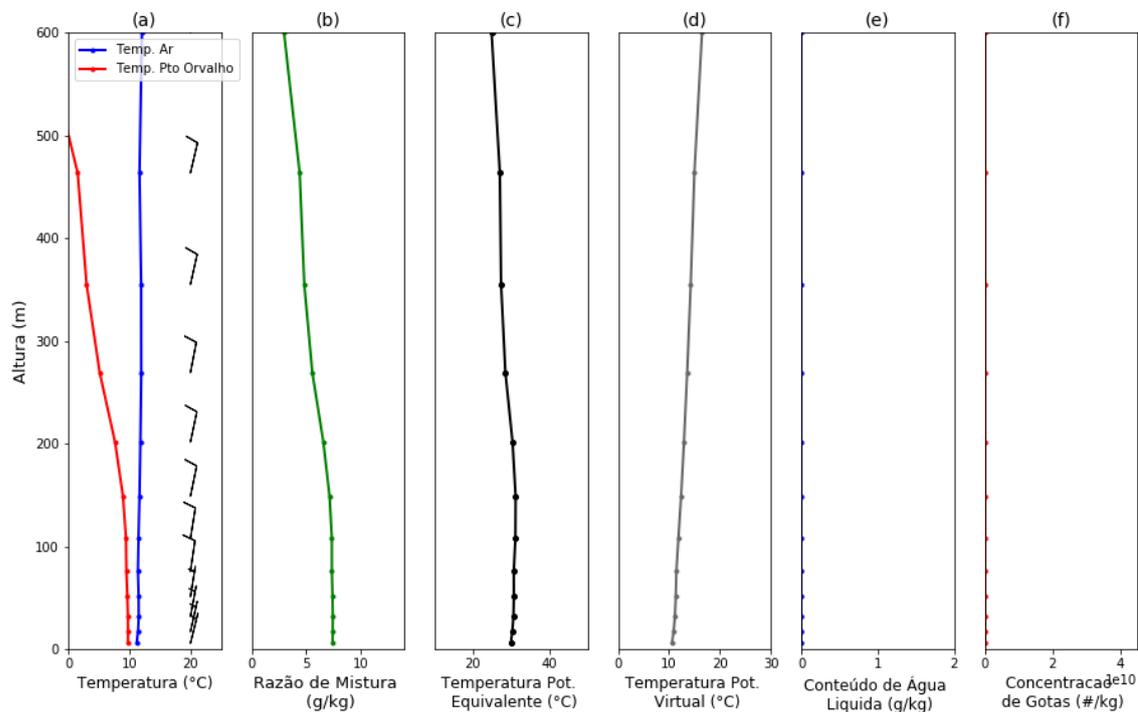


Figura L- 6- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 03h (hora local).

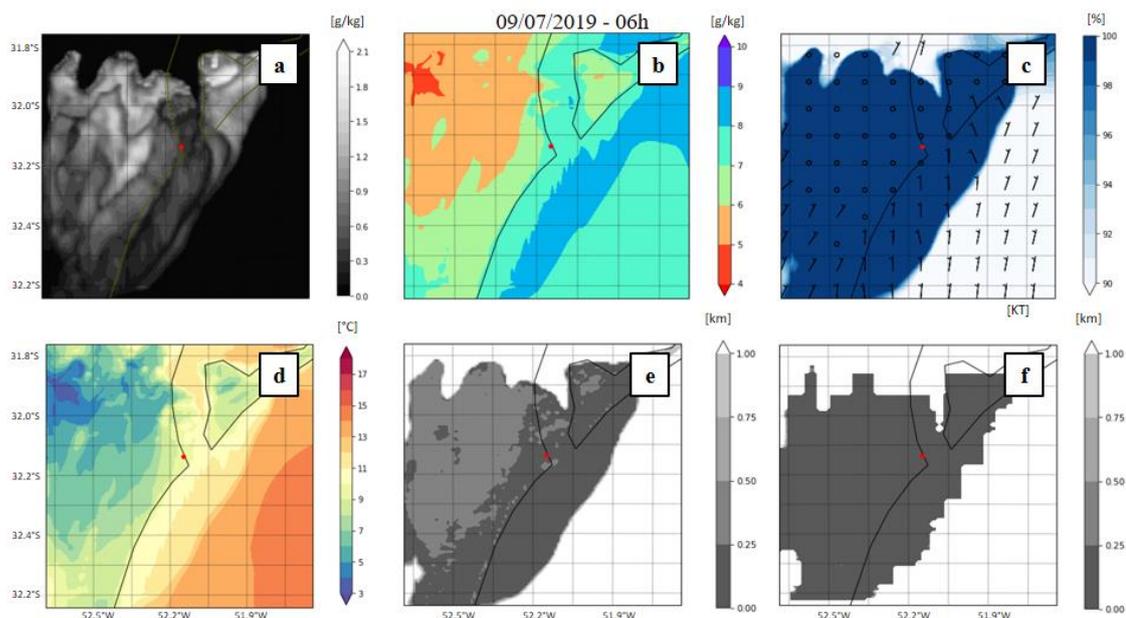


Figura L- 7- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 06h (hora local).

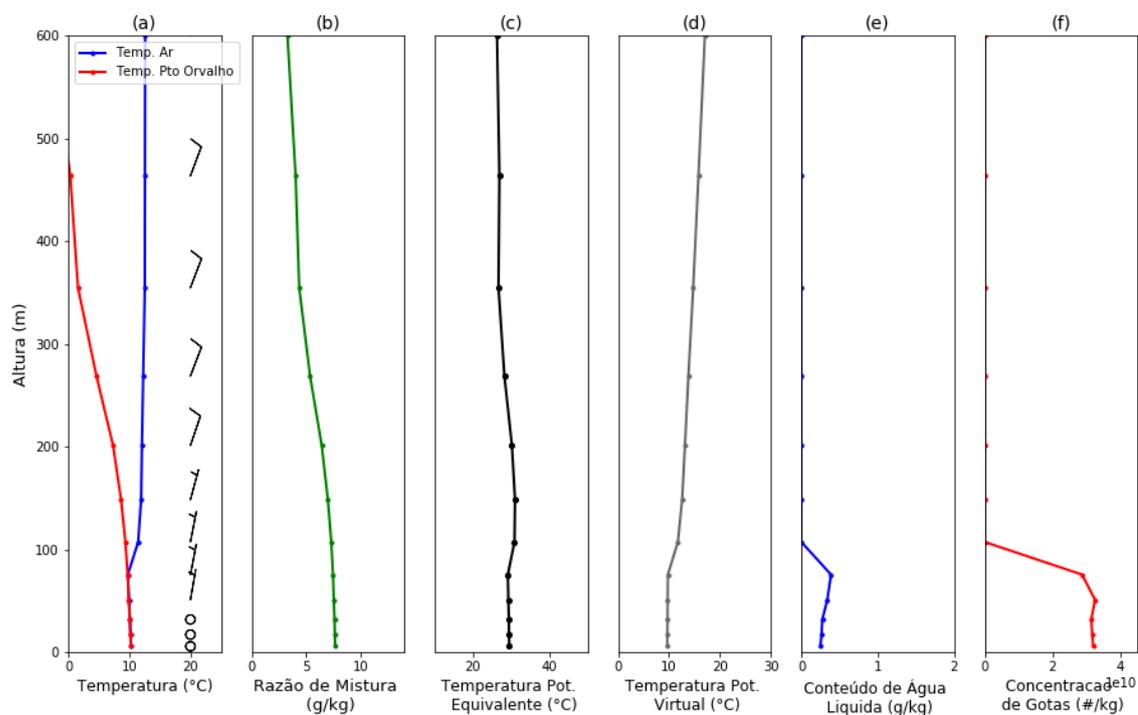


Figura L- 8- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 06h (hora local).

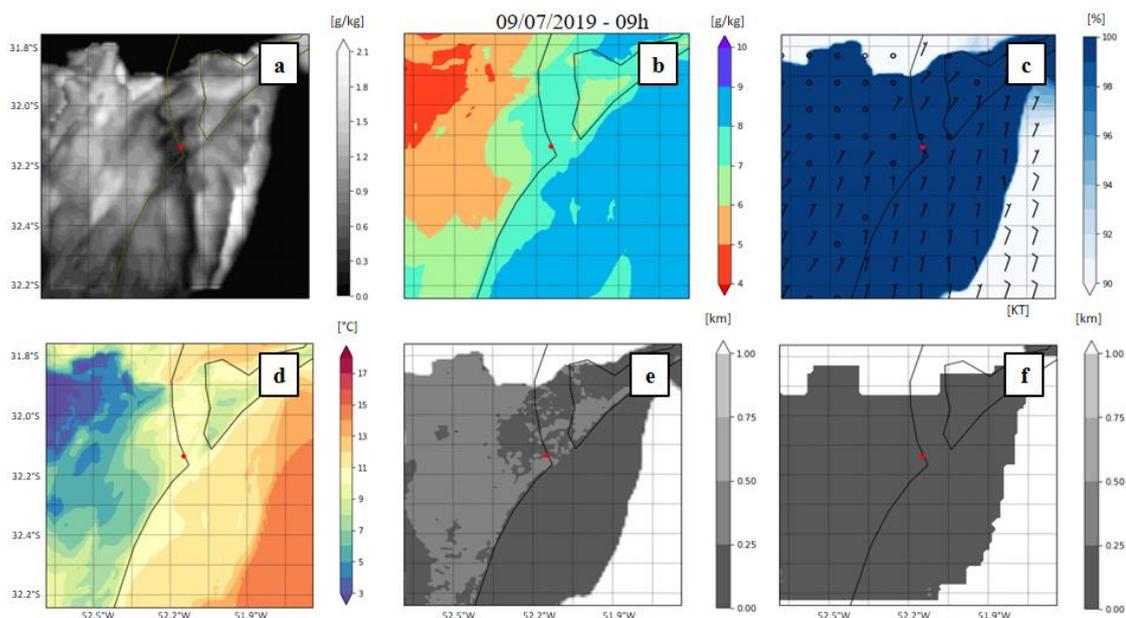


Figura L- 9- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 09h (hora local).

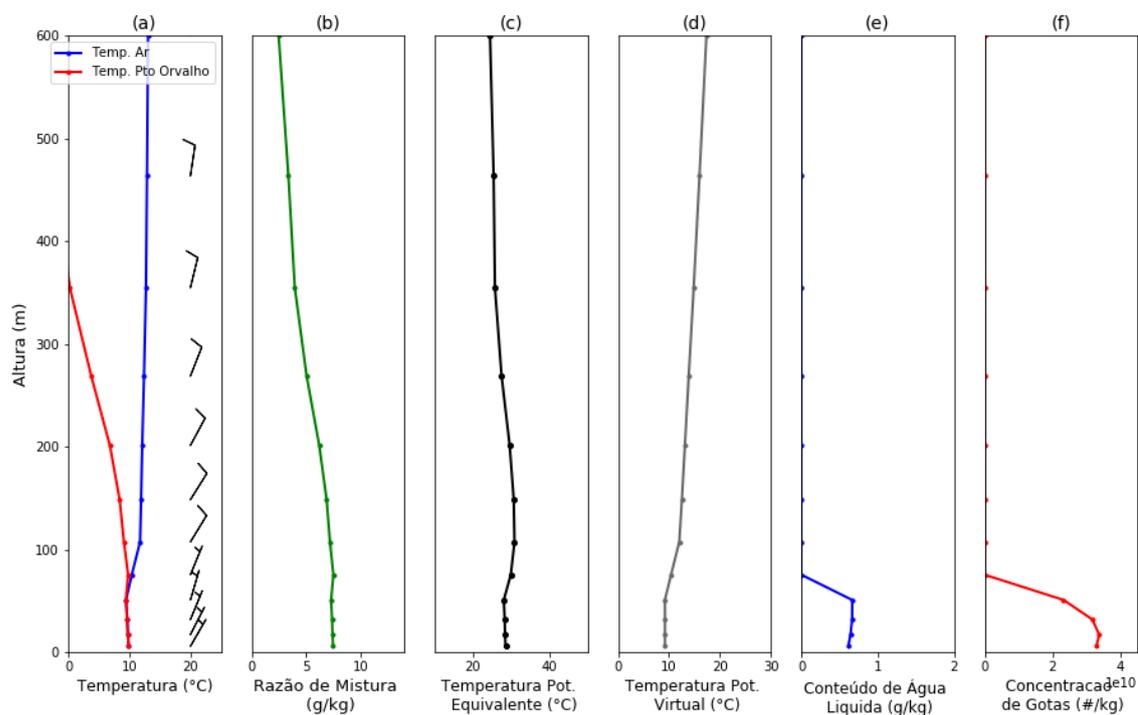


Figura L- 10- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 09h (hora local).

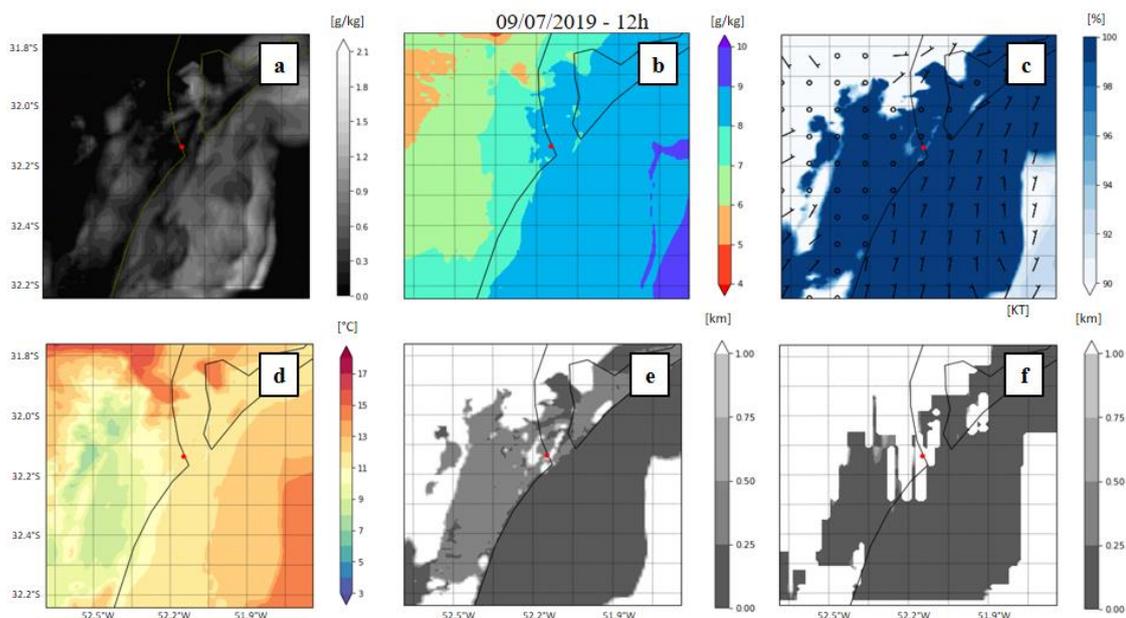


Figura L- 11- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 12h (hora local).

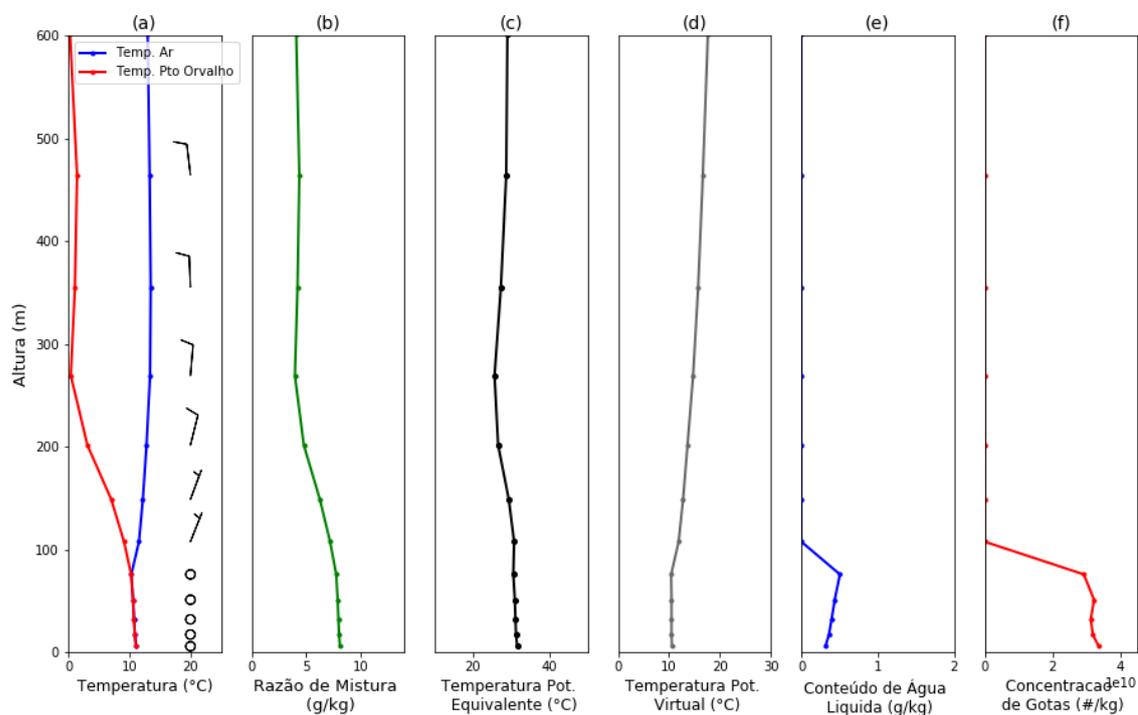


Figura L- 12- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 12h (hora local).

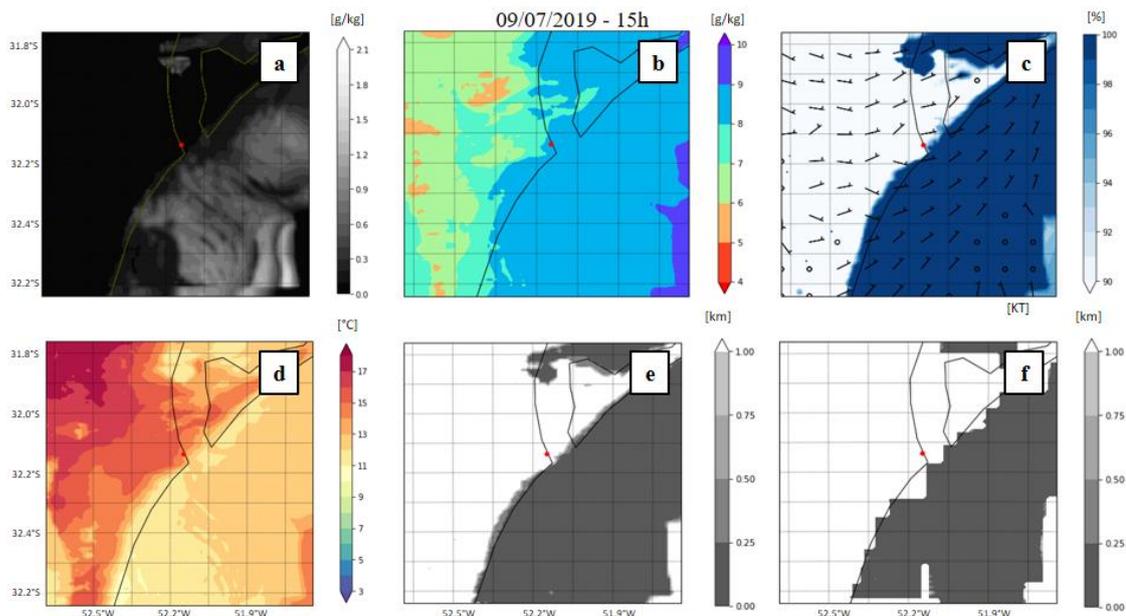


Figura L- 13- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 15h (hora local).

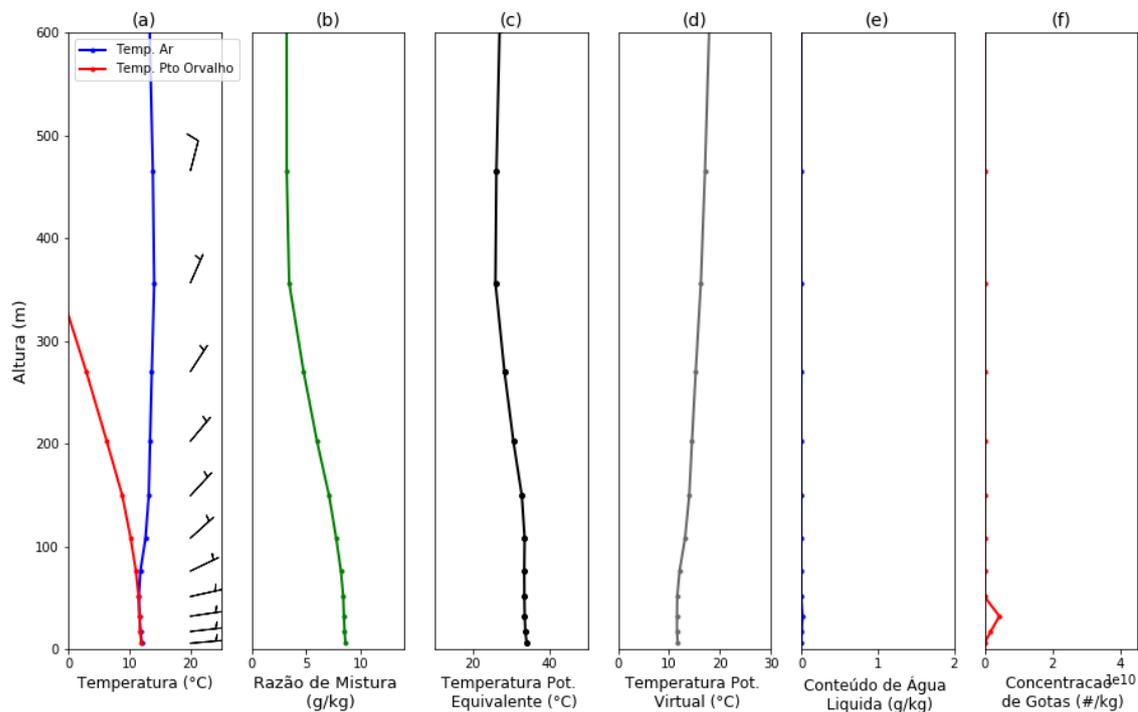


Figura L- 14- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 15h (hora local).

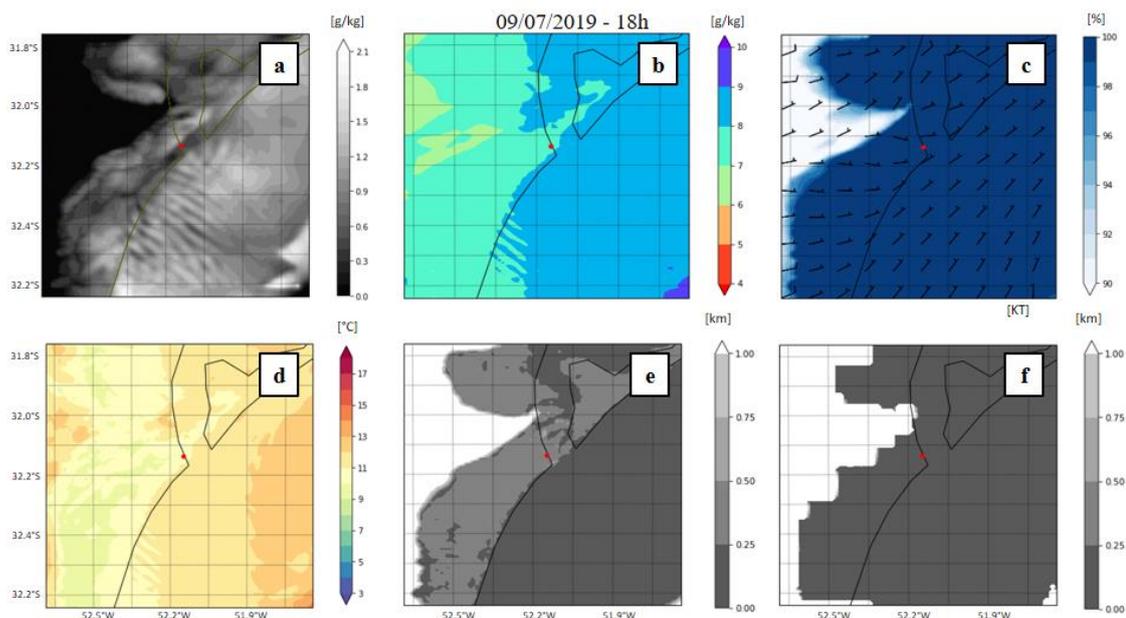


Figura L- 15- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 18h (hora local).

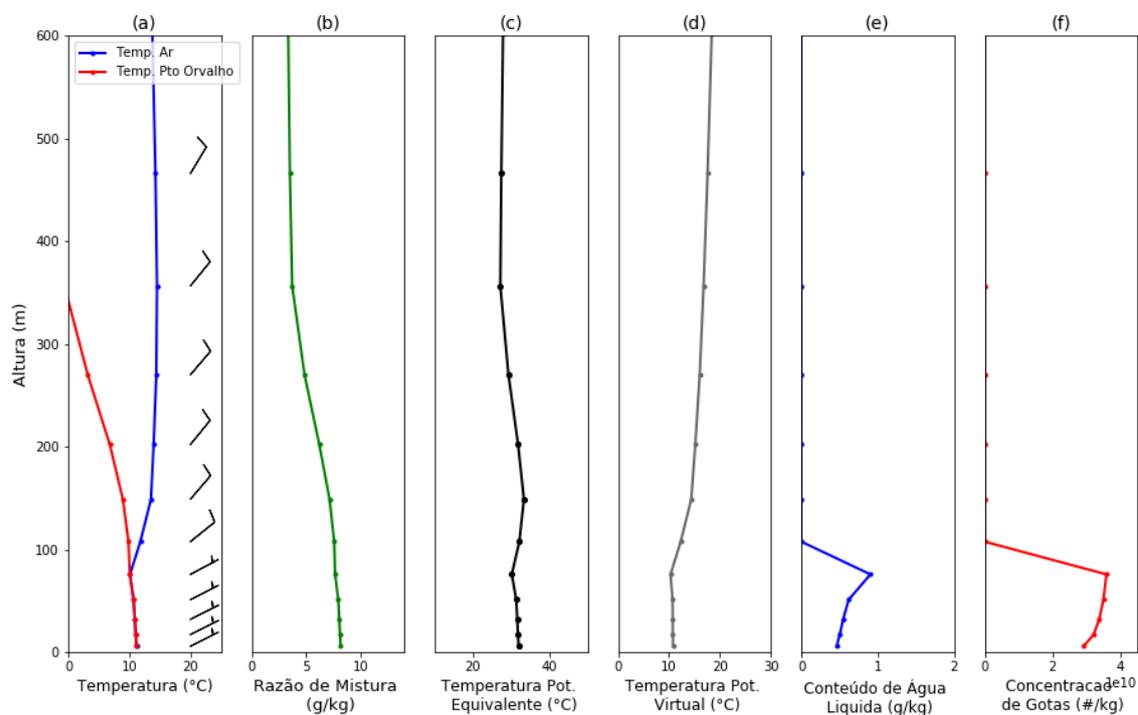


Figura L- 16- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 18h (hora local).

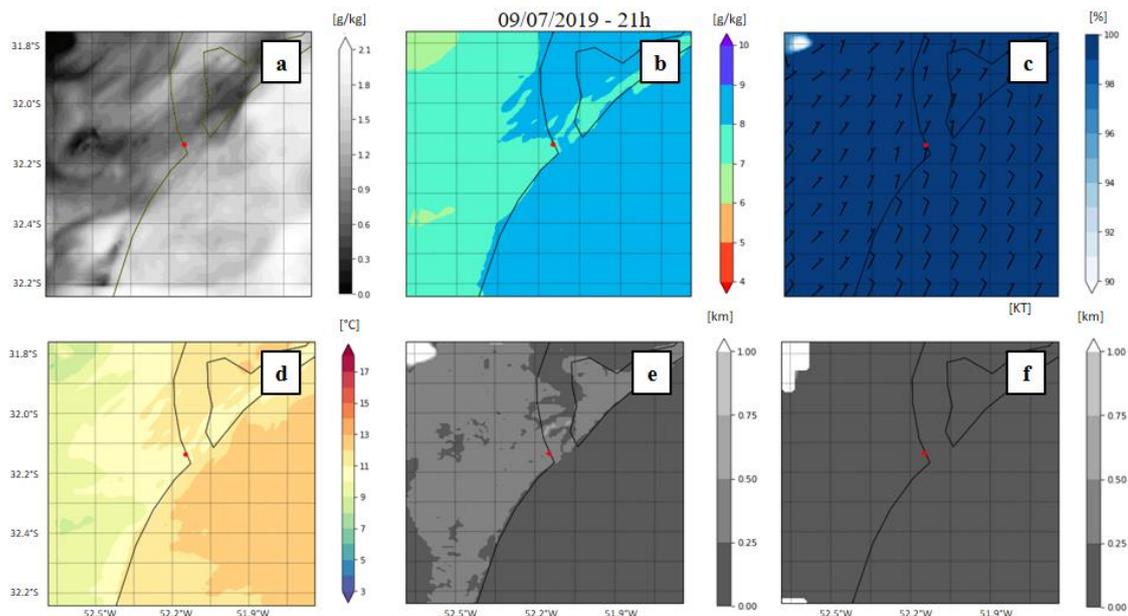


Figura L- 17- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 21h (hora local).

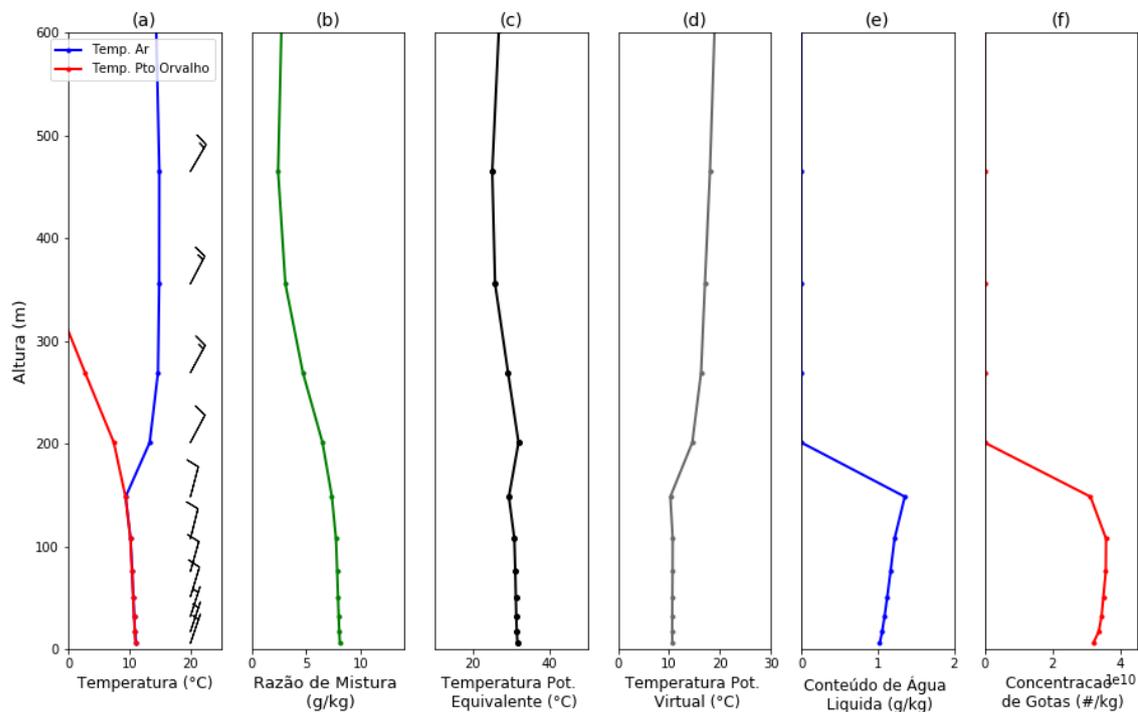


Figura L- 18- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 09/07/2019 às 21h (hora local).

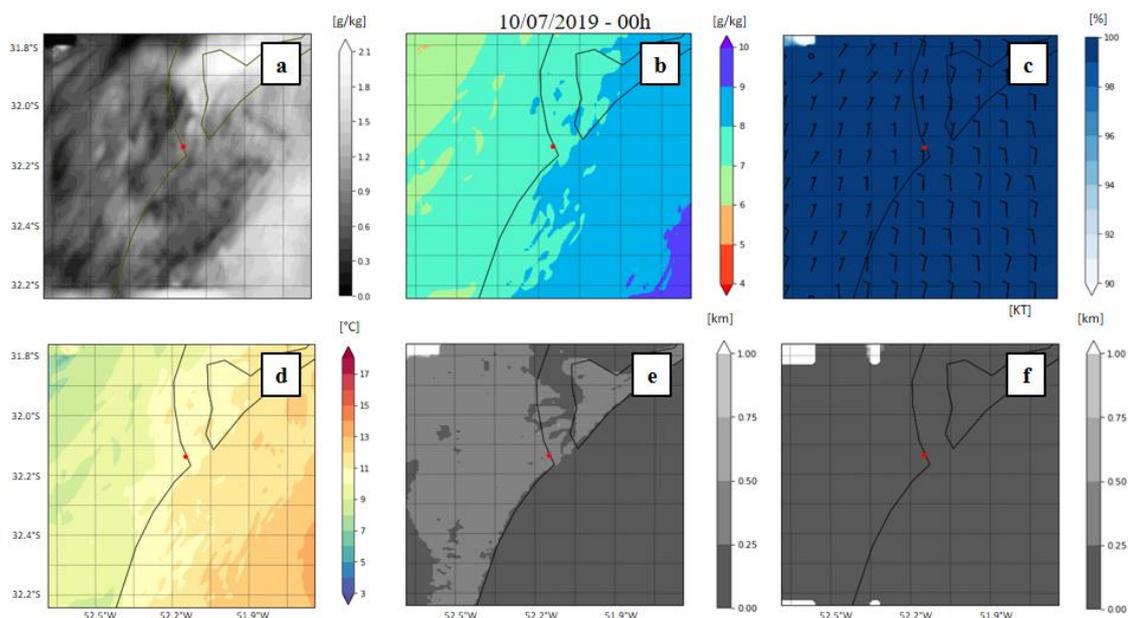


Figura L- 19- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 00h (hora local).

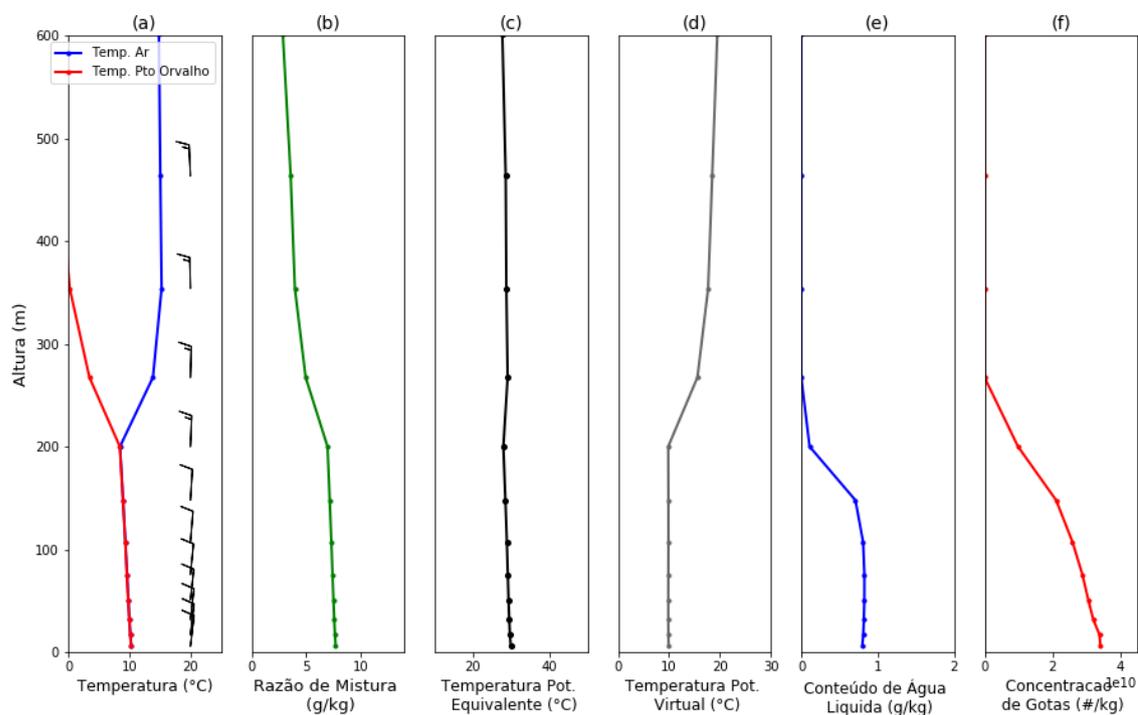


Figura L- 20- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 00h (hora local).

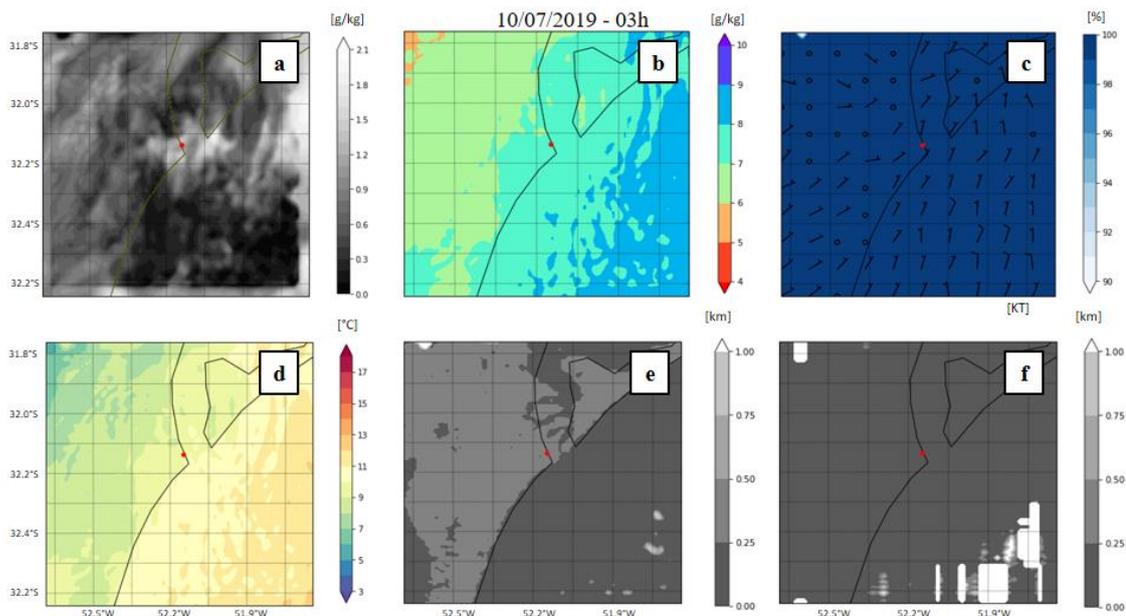


Figura L- 21- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 03h (hora local).

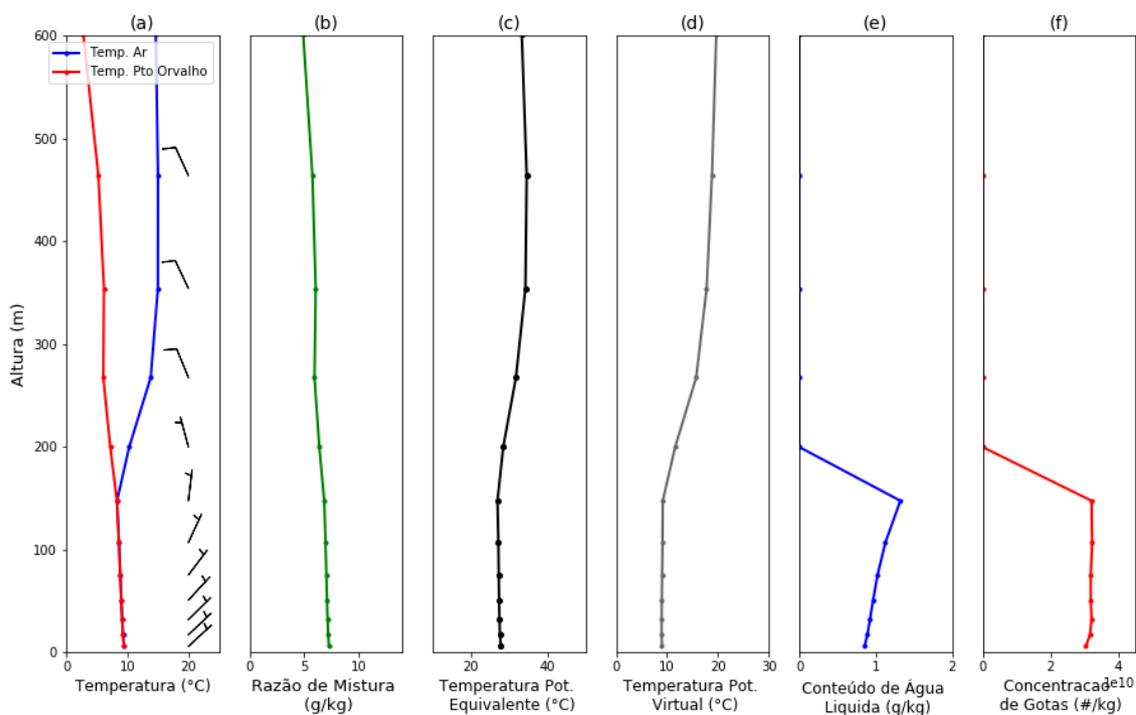


Figura L- 22- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 03h (hora local).

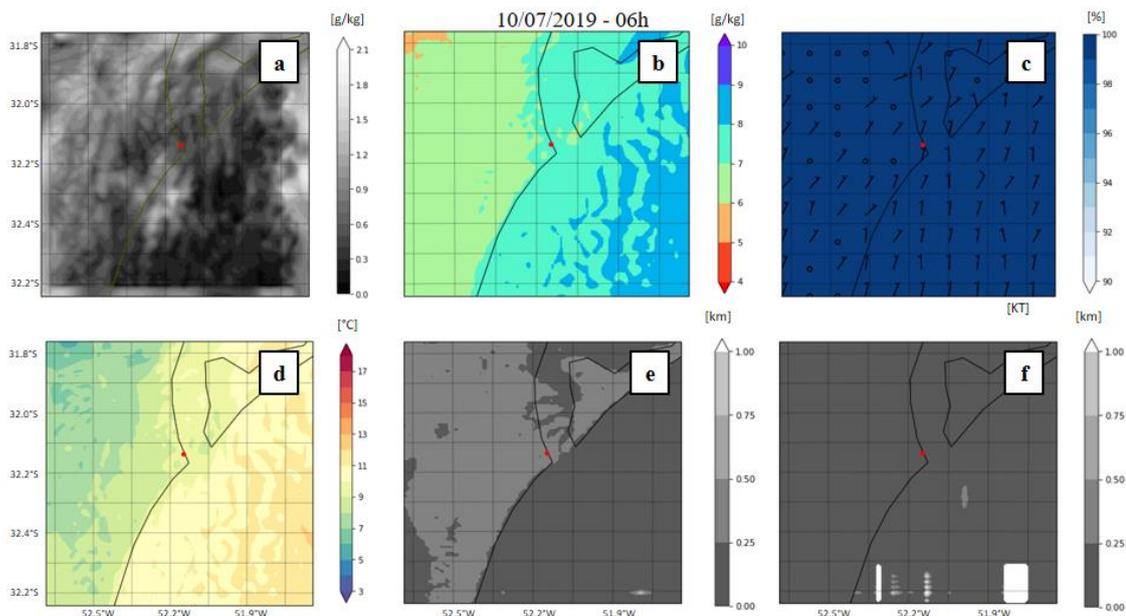


Figura L- 23- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 06h (hora local).

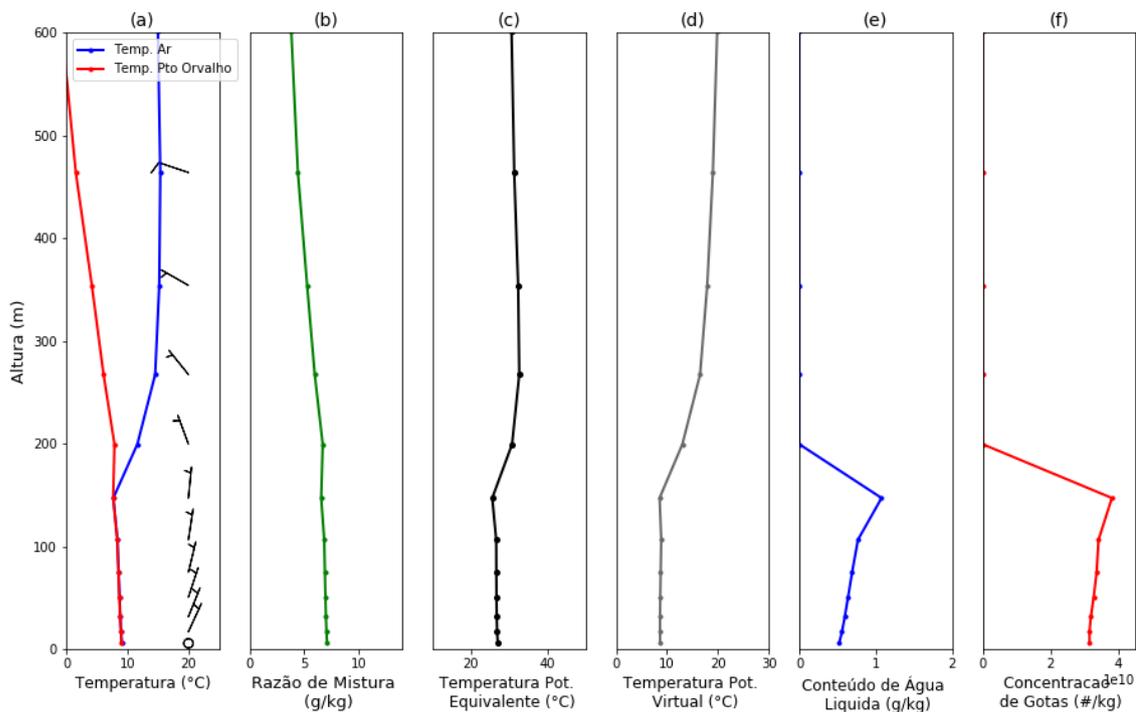


Figura L- 24- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 06h (hora local).

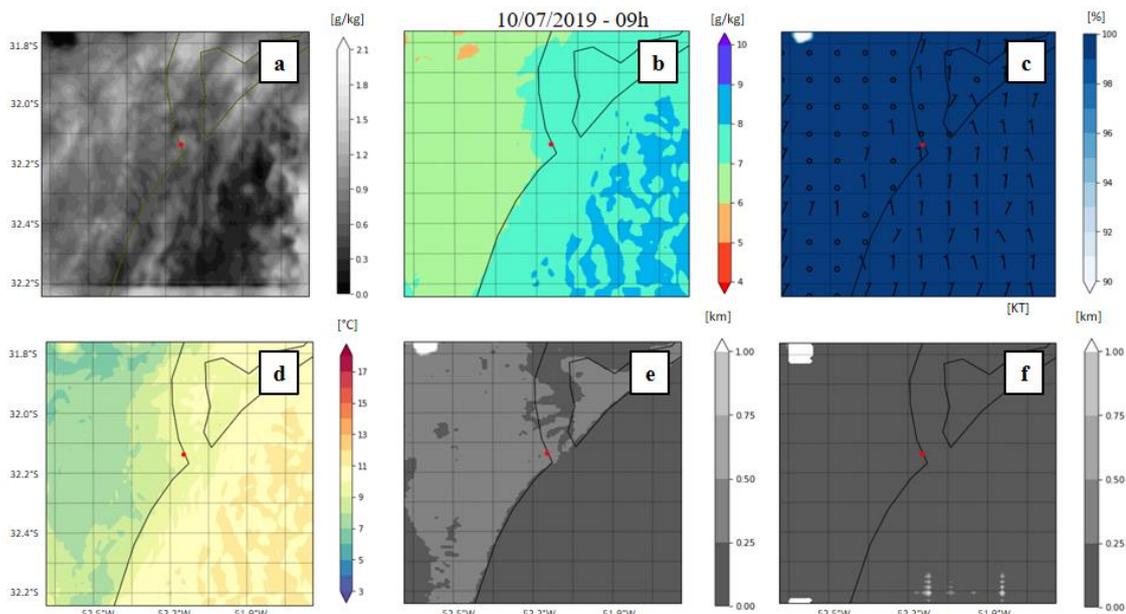


Figura L- 25- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 09h (hora local).

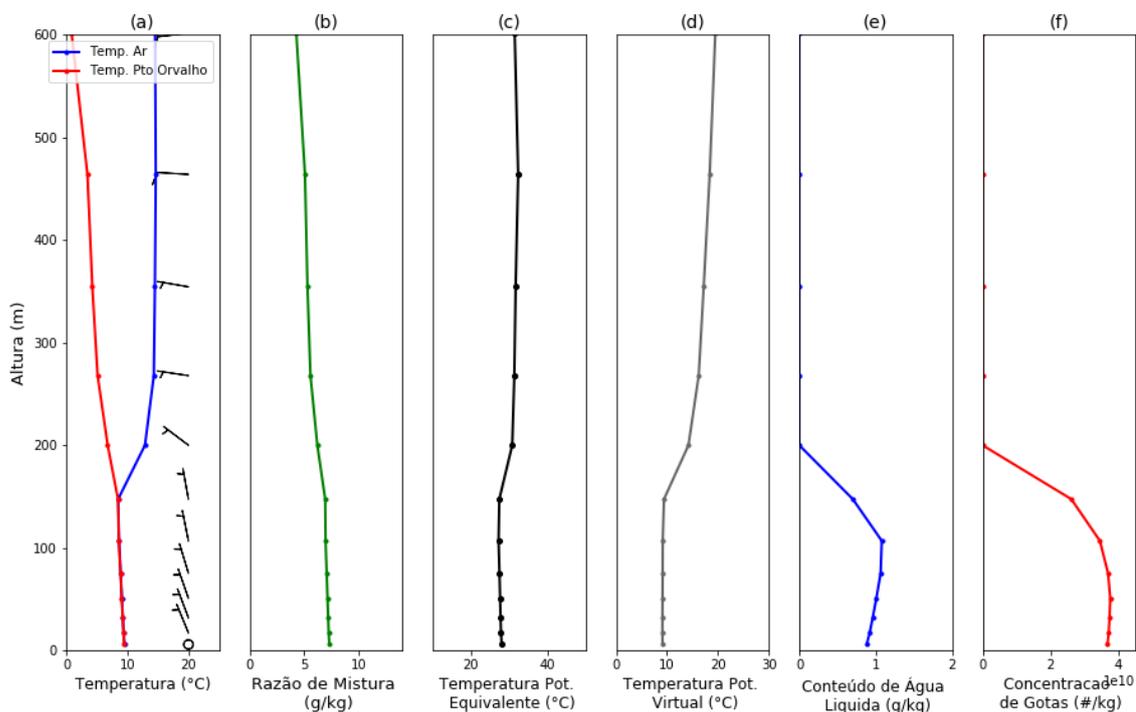


Figura L- 26- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 09h (hora local).

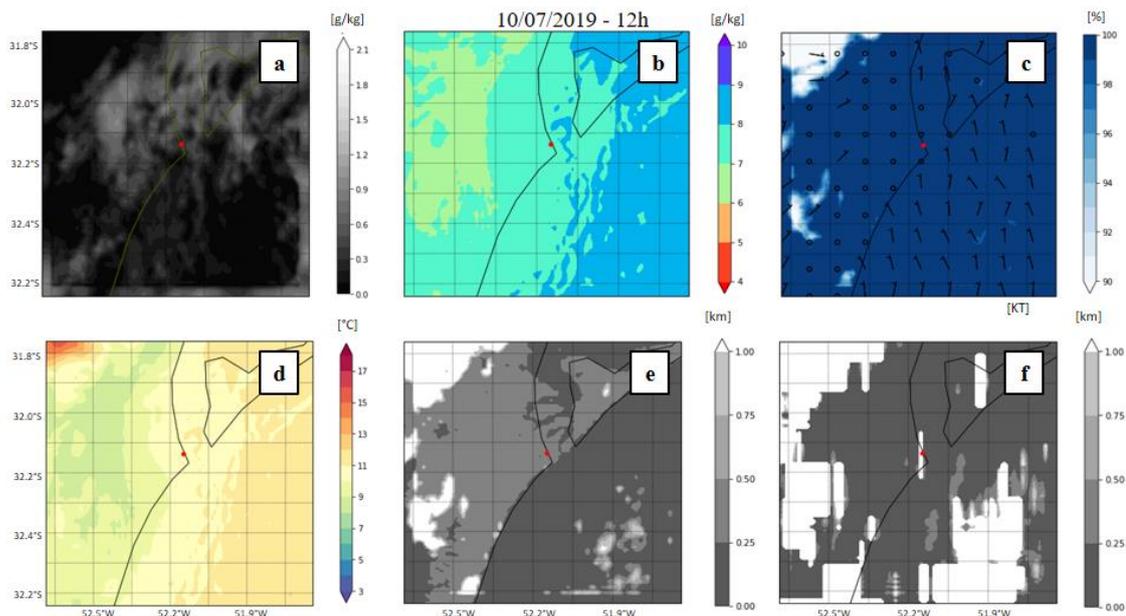


Figura L- 27- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 12h (hora local).

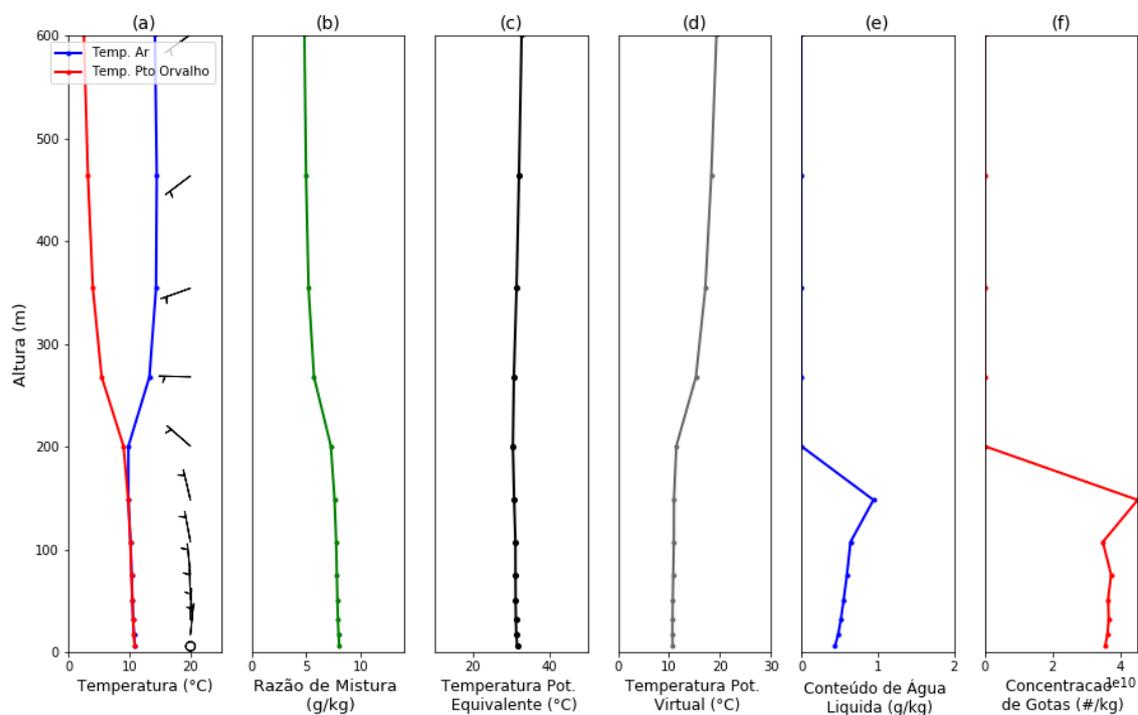


Figura L- 28- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 12h (hora local).

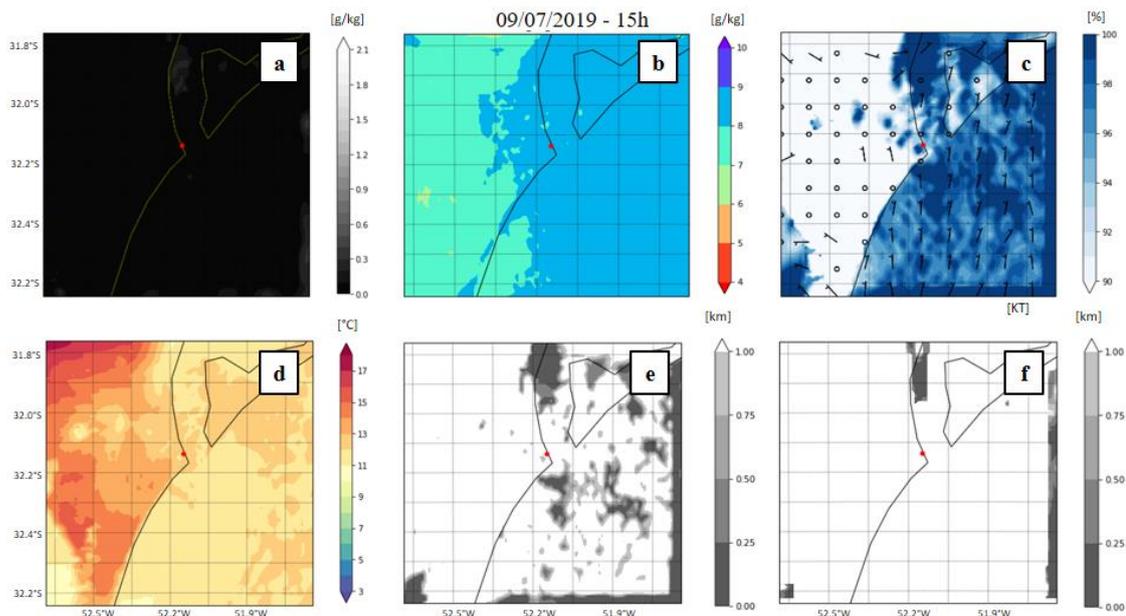


Figura L- 29- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 15h (hora local).

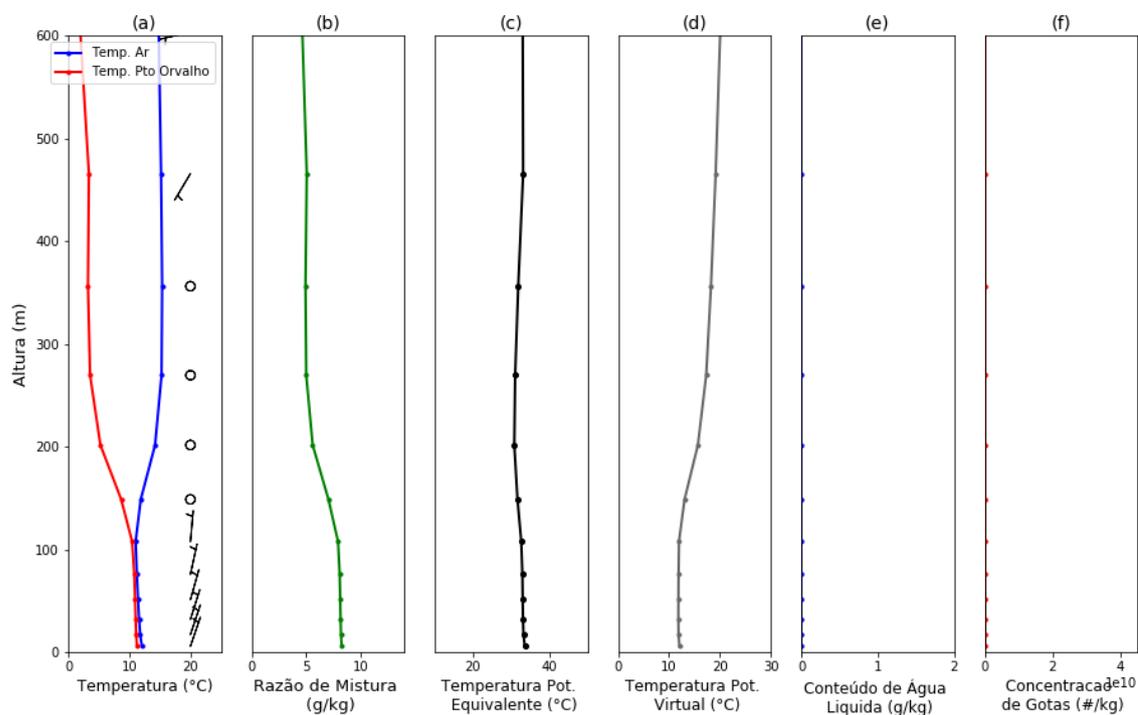


Figura L- 30- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 15h (hora local).

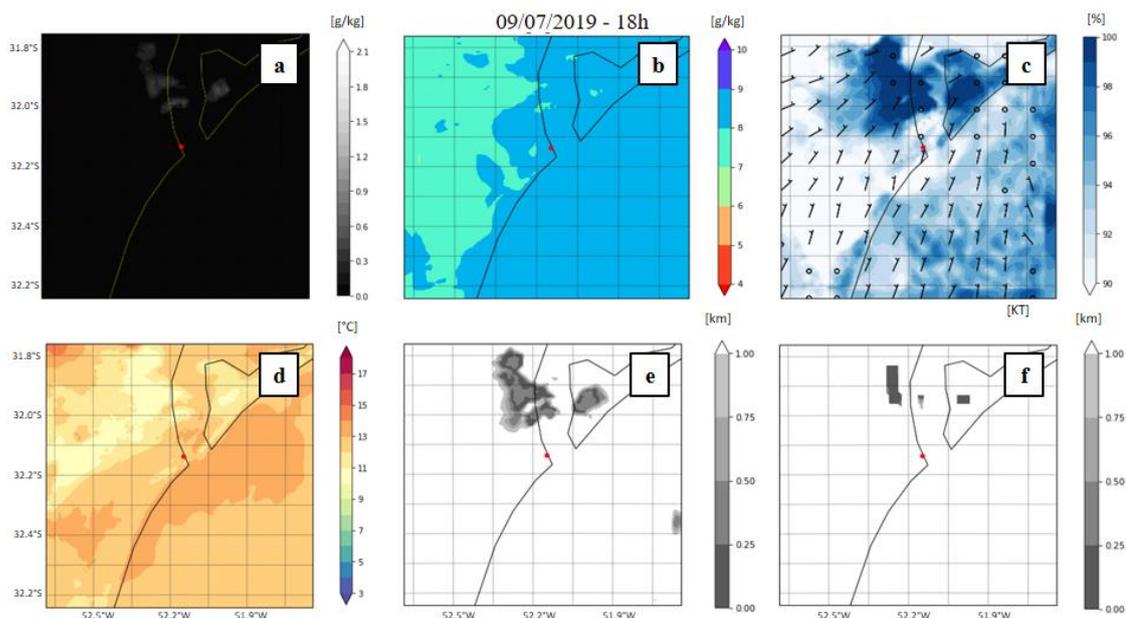


Figura L- 31- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 18h (hora local).

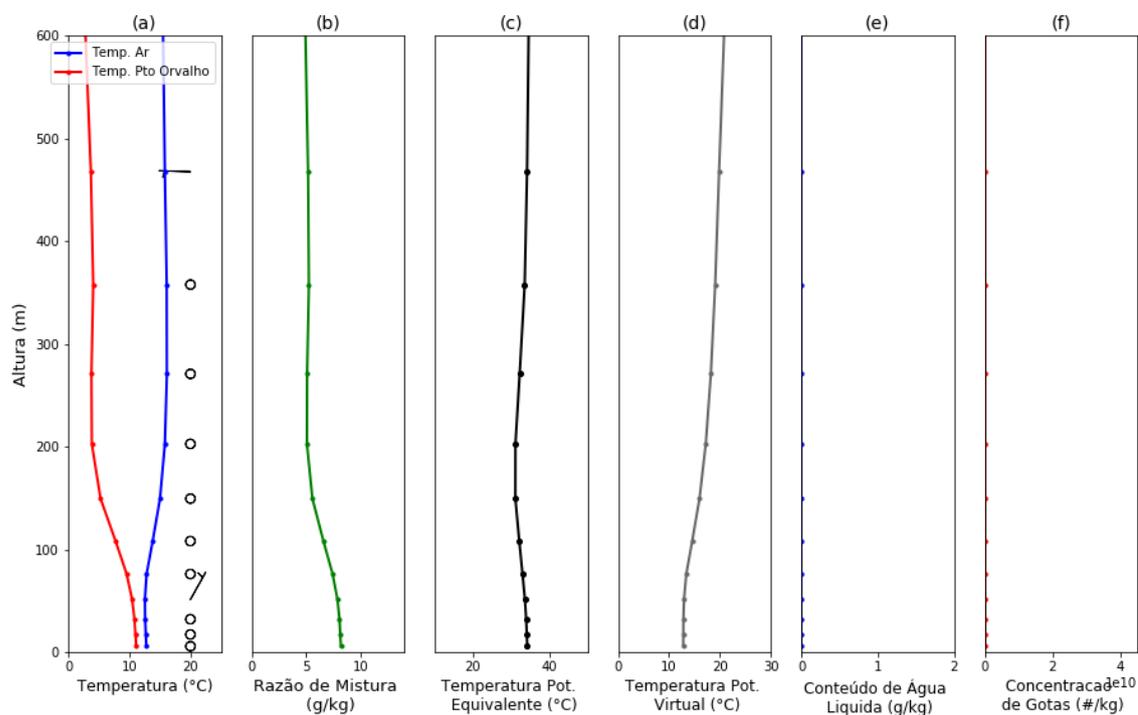


Figura L- 32- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 10/07/2019 às 18h (hora local).

APÊNDICE M - CAMPOS E PERFIS VERTICAIS SIMULADOS PELO MODELO WRF PARA O PERÍODO D (DOMÍNIO 3)

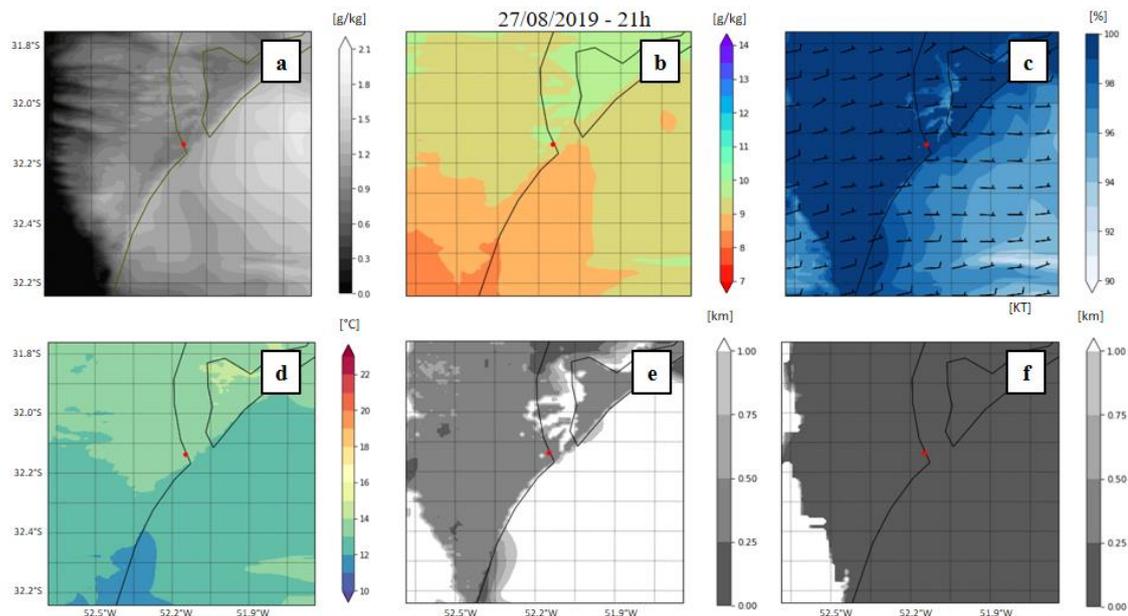


Figura M- 1- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 27/08/2019 às 21h (hora local).

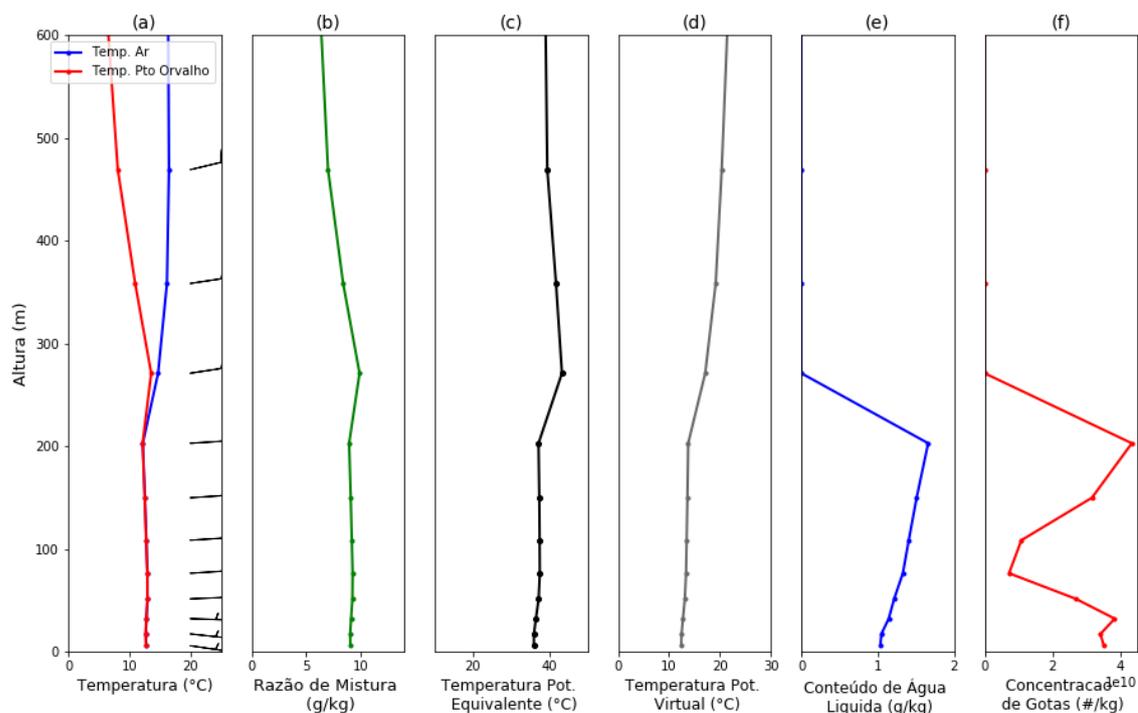


Figura M- 2- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 27/08/2019 às 21h (hora local).

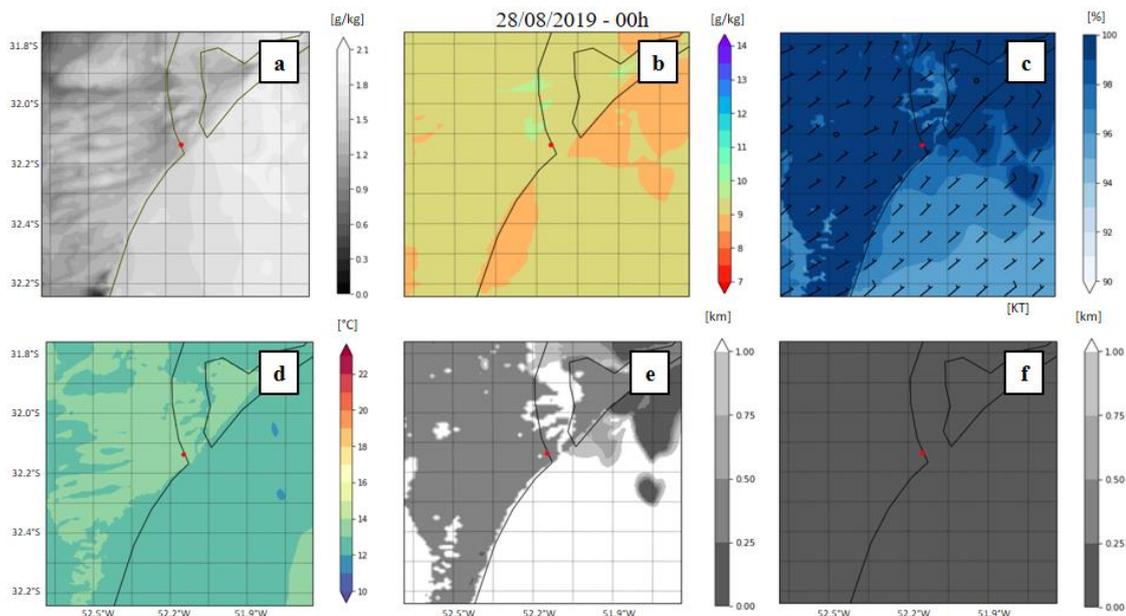


Figura M- 3- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 00h (hora local).

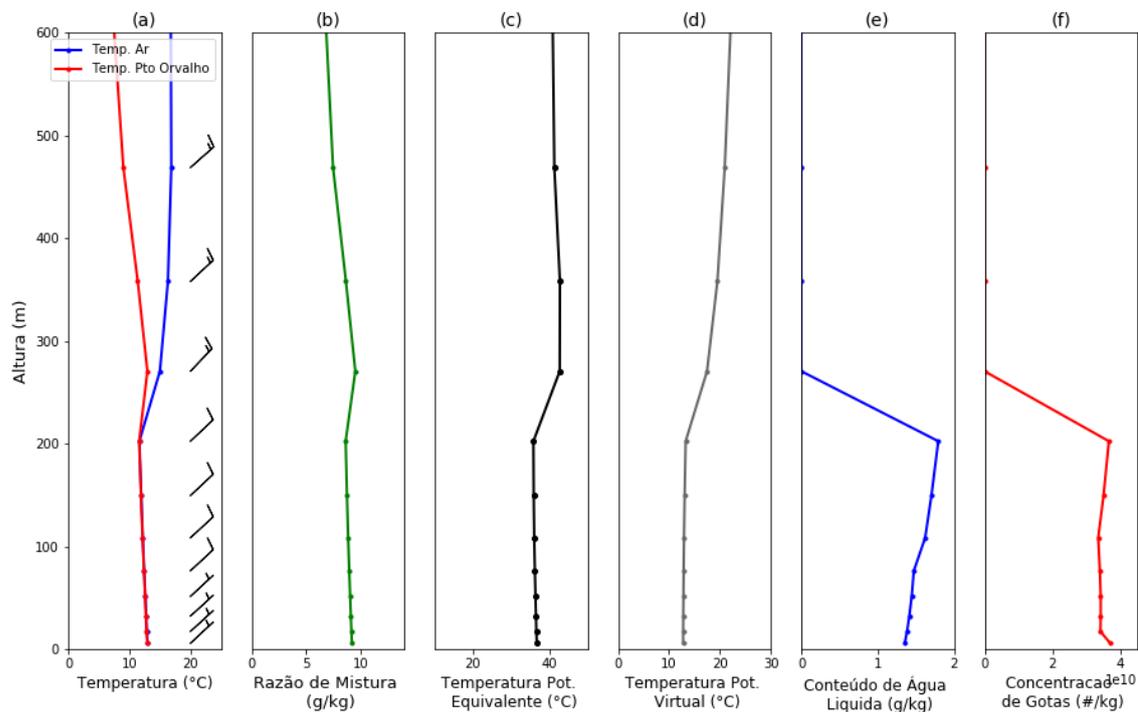


Figura M- 4- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 00h (hora local).

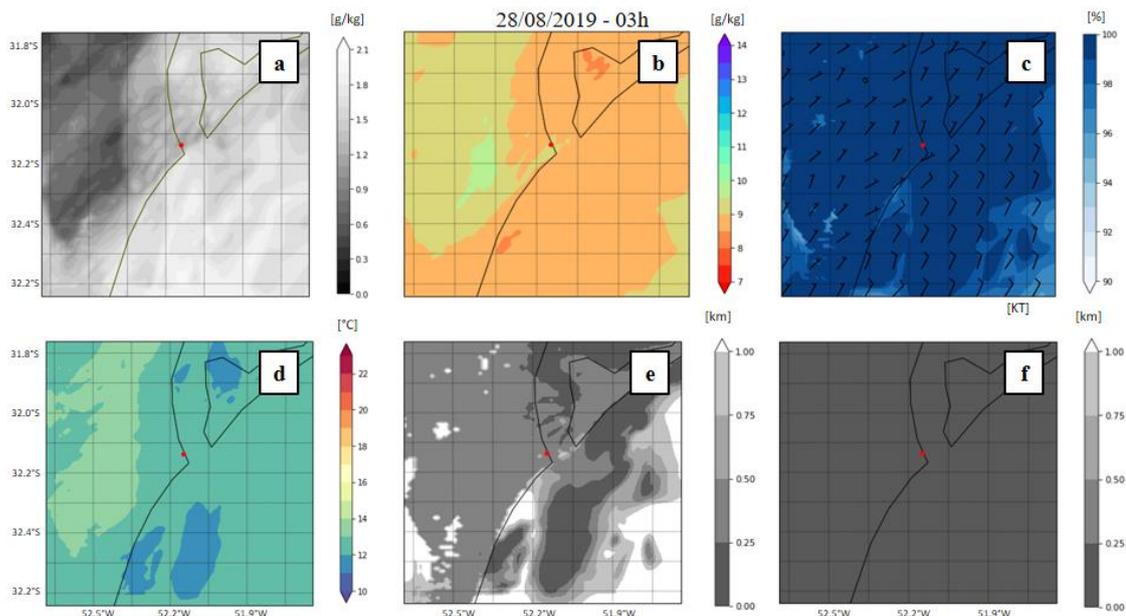


Figura M- 5- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 03h (hora local).

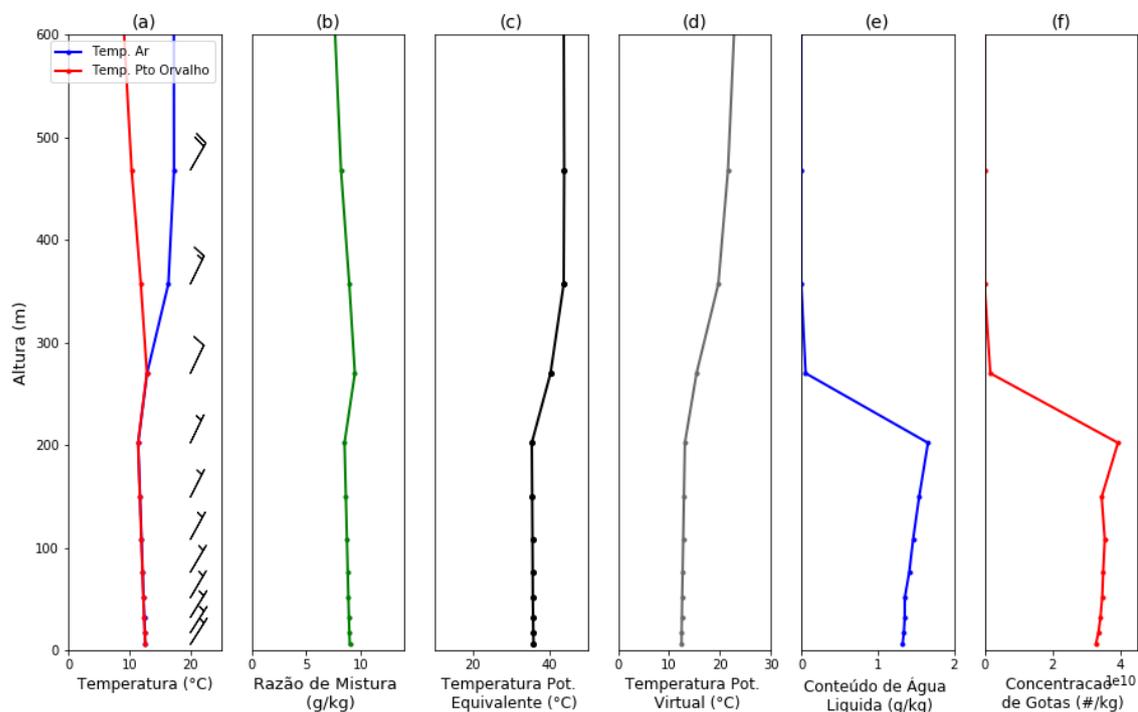


Figura M- 6- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 03h (hora local).

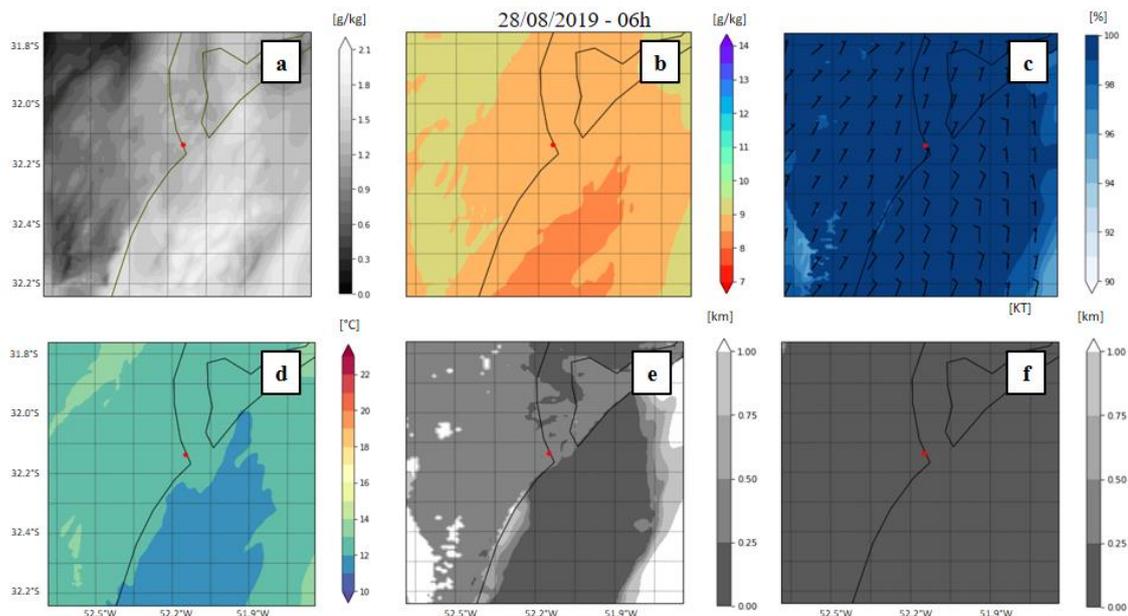


Figura M- 7- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 06h (hora local).

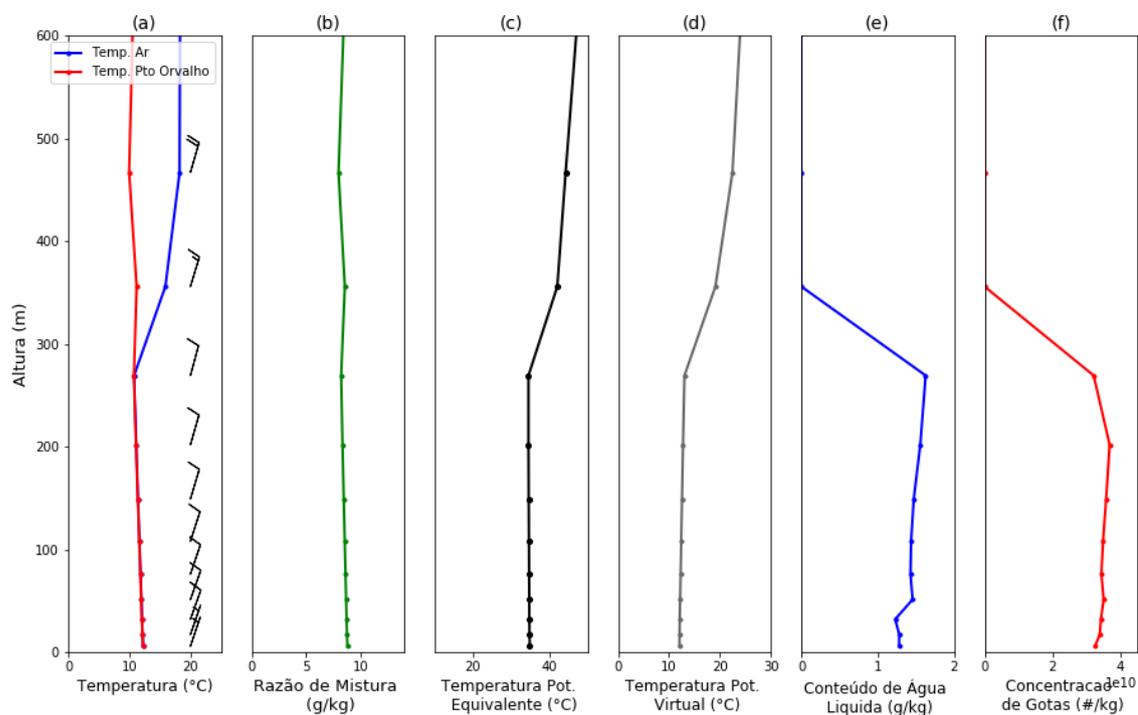


Figura M- 8- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 06h (hora local).

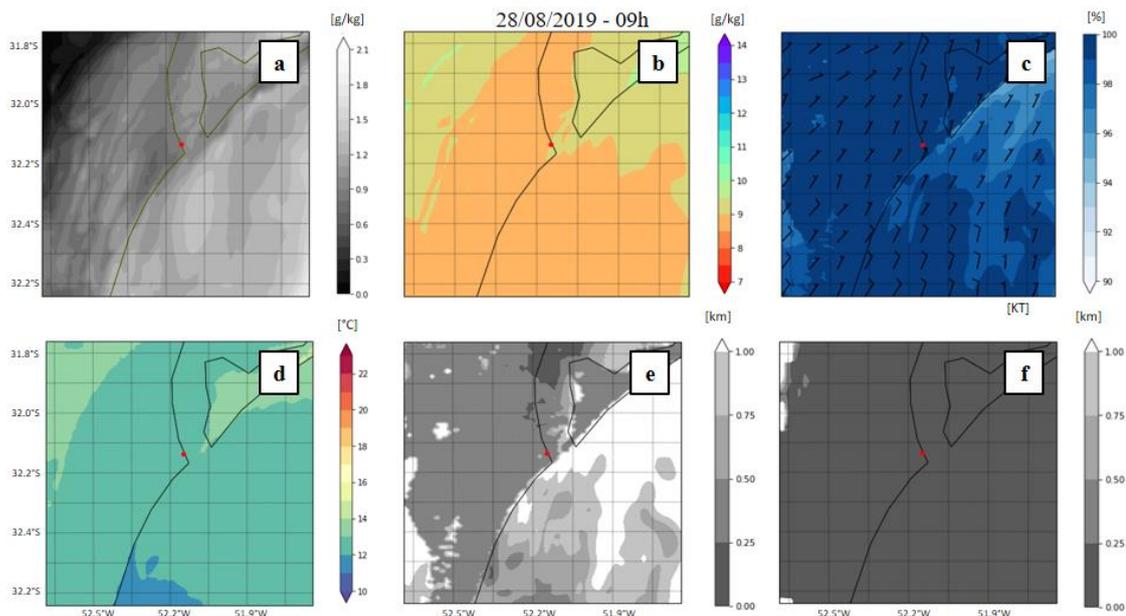


Figura M- 9- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 09h (hora local).

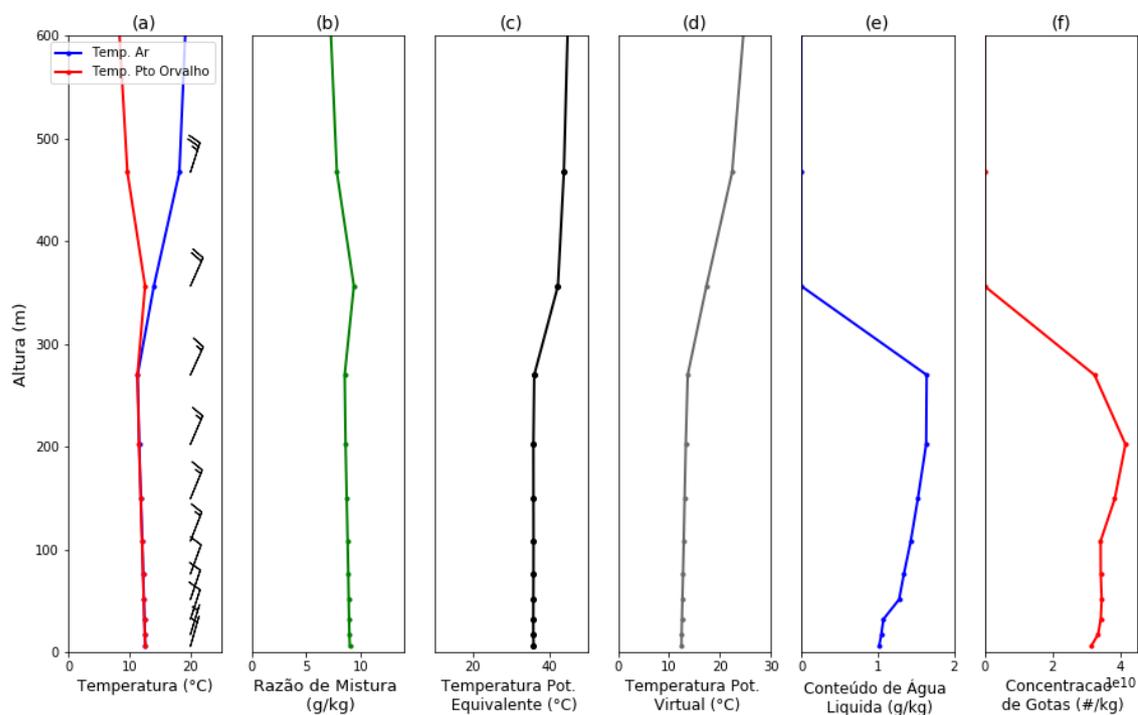


Figura M- 10- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 09h (hora local).

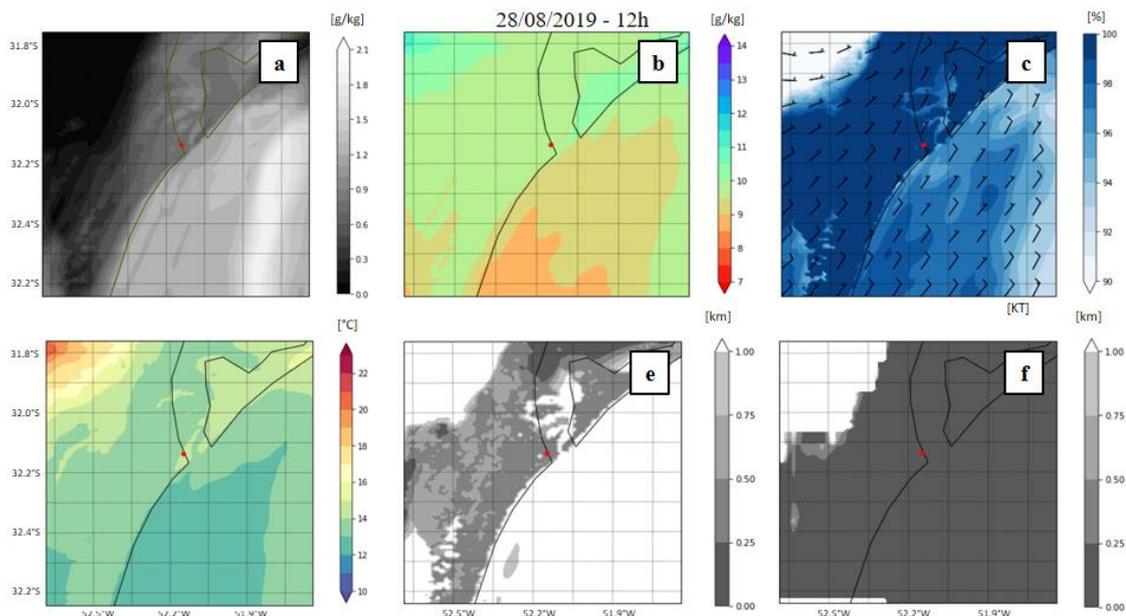


Figura M- 11- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 12h (hora local).

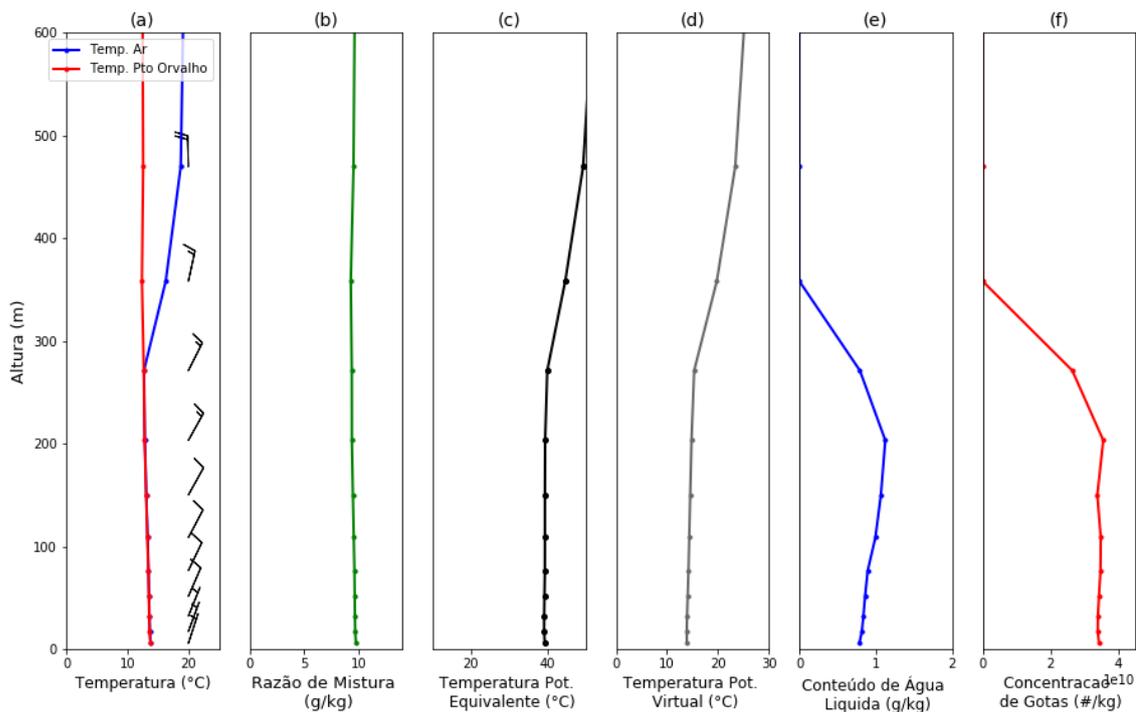


Figura M- 12- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 12h (hora local).

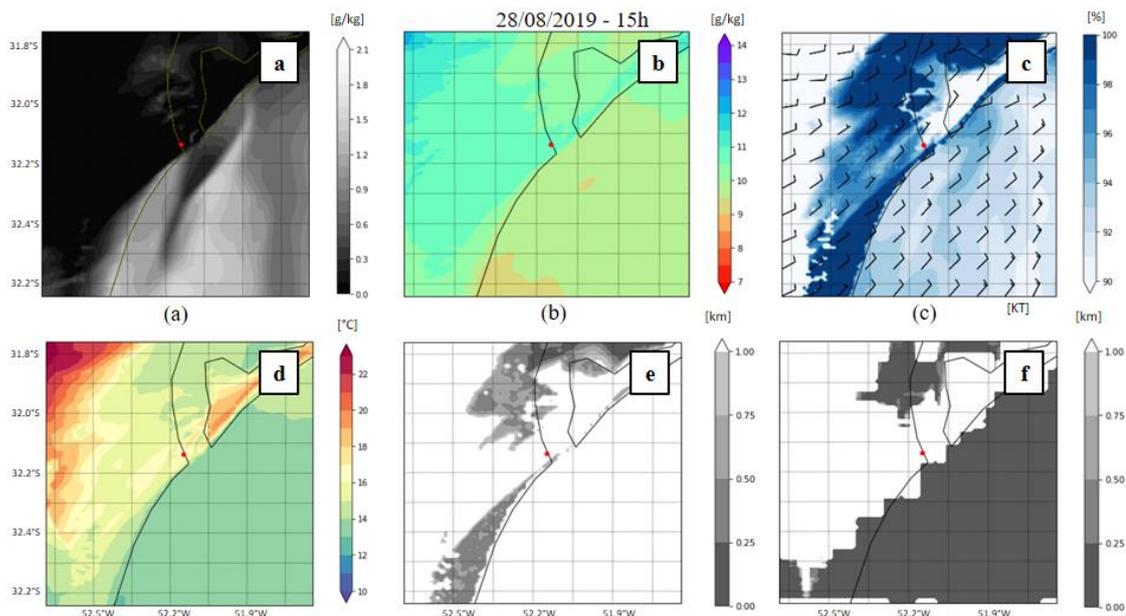


Figura M- 13- Campos de conteúdo de água líquida (a), razão de mistura (b), umidade relativa do ar a 2 metros e vento a 10 metros (c), temperatura do ar a 2 metros (d) e visibilidade horizontal do FSL (e) e de Kunkel (f) simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 15h (hora local).

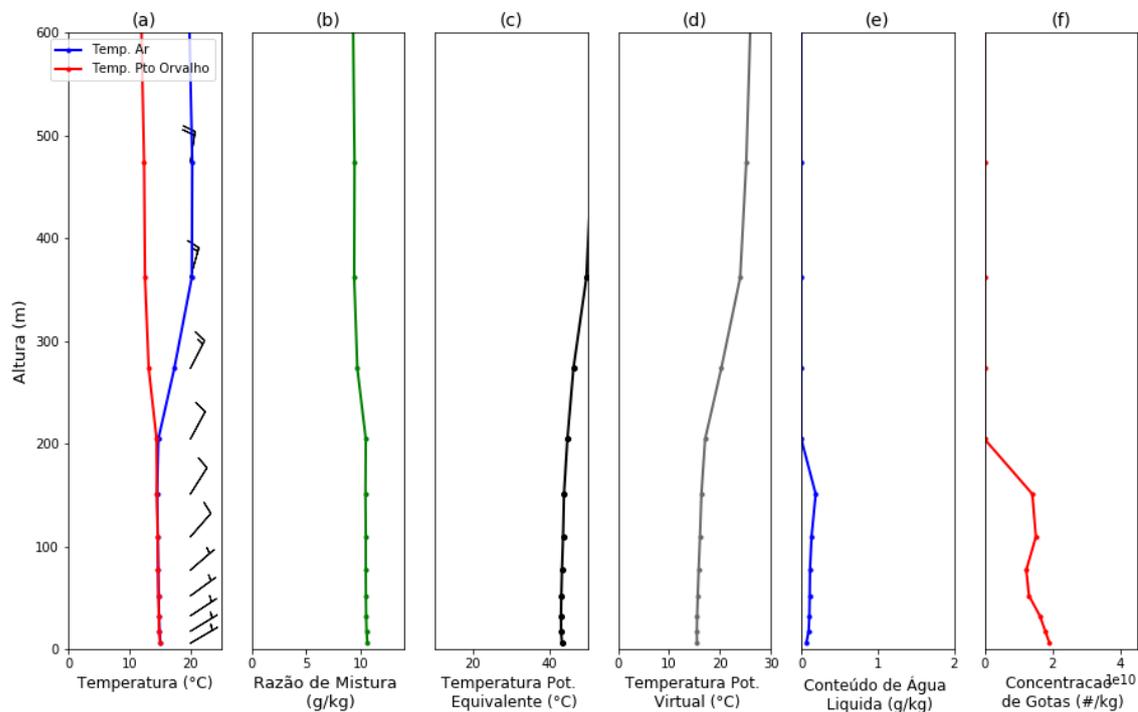


Figura M- 14- Perfis verticais simulados pelo modelo WRF para o dia 28/08/2019 às 15h (hora local).