

Universidade Federal do Rio de Janeiro

PREVISÃO DE NEVOEIRO COM PÓS-PROCESSAMENTO DO  
WRF PARA O AEROPORTO DE CURITIBA

José Eduardo Gonçalves Platenik

2020

PREVISÃO DE NEVOEIRO COM PÓS-PROCESSAMENTO DO WRF PARA O  
AEROPORTO DE CURITIBA

José Eduardo Gonçalves Platenik

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: Gutemberg Borges França.

Rio de Janeiro  
março de 2020

PREVISÃO DE NEVOEIRO COM PÓS-PROCESSAMENTO DO WRF PARA O  
AEROPORTO DE CURITIBA

José Eduardo Gonçalves Platenik

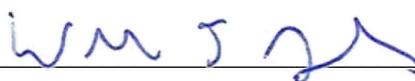
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS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

Examinada por:



---

Gutemberg Borges França, *Ph.D.* – UFRJ



---

Wallace Figueiredo Menezes, *D. Sc.* – UFRJ



---

Manoel Valdonel de Almeida, *D. Sc.* – (Externo)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2020

Da dissertação, José Eduardo Gonçalves Platenik.

Previsão de Nevoeiro com pós-processamento do WRF para o aeroporto de Curitiba/ José Eduardo Gonçalves Platenik. - Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2020.

XXII, 53 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Gutemberg Borges França.

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

Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 50-53.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, 2020.

Orientador: Gutemberg Borges França.

1. Nevoeiro. 2. Multicritérios. 3. WRF. I. França, Gutemberg Borges. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ, Programa de Pós-graduação em Meteorologia. III. Previsão de nevoeiro com pós-processamento do WRF para o aeroporto de Curitiba.

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.)

## PREVISÃO DE NEVOEIRO COM PÓS-PROCESSAMENTO DO WRF PARA O AEROPORTO DE CURITIBA

José Eduardo Gonçalves Platenik

Março/2020

Orientador: Gutemberg Borges França.

Programa de Pós-graduação em Meteorologia

Este trabalho discorre sobre a formação de nevoeiro no aeroporto de Curitiba (Aeroporto Internacional Afonso Pena), utilizando uma abordagem de diagnóstico baseada em multicritérios, com dados meteorológicos observados e previstos, através do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) implementado para a área do aeroporto, com resolução espacial de 1 km. Neste estudo são utilizados dados observados da estação meteorológica de superfície (EMS) do aeroporto e resultados obtidos do modelo WRF, com a finalidade de se estabelecer critérios que, após ajustados e validados com os dados observados, representem as condições mais propensas, no pós-processamento das simulações do modelo, para a formação de nevoeiro no aeroporto de Curitiba. A análise dos resultados mostra que: (1) as correlações entre temperatura, umidade e velocidade do vento, previstas e observadas, são expressivas e iguais a 0,93; 0,89 e 0,74, respectivamente; e (2) quatro critérios foram estabelecidos via combinação das variáveis meteorológicas mencionadas, isto é: (i) umidade relativa e temperatura; (ii) umidade relativa e temperatura do ar; (iii) umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento; e (iv) umidade relativa, temperatura do ar, velocidade e direção do vento. Estes foram testados e as

probabilidades de acerto para os critérios I, II, III e IV, da previsão do evento, para início (término) são, respectivamente, de 93,2% (91,5%), 93,2% (93,7%), 88,1% (88,7%) e 90% (87,5%). As previsões possuem uma leve tendência a atrasar o início e adiantar o término do nevoeiro.

Palavras chave: Nevoeiro; Multicritérios; Previsão

Abstract of Thesis presented to PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## FOG FORECAST WITH POST-PROCESSING OF WRF FOR CURITIBA AIRPORT

José Eduardo Gonçalves Platenik

Março/2020

Advisor: Gutemberg Borges França.

Department: Meteorology

This paper discusses the formation of fog at the airport in Curitiba (Afonso Pena International Airport), using a diagnostic approach based on multirule, with observed and predicted meteorological data, through the *Weather Research and Forecasting* (WRF) model implemented for the area of airport, with spatial resolution of 1 km. In this study, observed data from the airport's surface weather station (EMS) and results obtained from the WRF model are used, with the purpose of establishing standard that, after being adjusted and validated with the observed data, represent the ideal conditions, in the post-processing model simulations for fog formation at Curitiba airport. The analysis of the results of this work shows that: (1) the correlations between temperature, humidity and wind speed, predicted and observed, are expressive and equal to 0.93; 0.89 and 0.74, respectively; and (2) the application of the four established multirule indicates that the probability of detection by rule (I, II, III, and IV) of the event forecast for the onset (demise) are, respectively, 93.2% (91.5%), 93.2% (93.7%), 88.14% (88.7%), and 90% (87.5%). The fog forecasts are slightly biased, i.e., delayed onset and anticipated demise in 30 minutes or less.

Keywords: Fog; Multirule; Forecast

## AGRADECIMENTOS

Refletindo neste momento em que o Brasil se encontra, com a união de esforço para minimizar os efeitos devastadores da pandemia do COVID-19, doença provocada pelo novo “coronavírus” SARS-COV-2, podemos perceber claramente que somos seres sociais e ninguém pode alcançar sucesso, em qualquer projeto, sem a cooperação de outrem. Este trabalho de pesquisa não deixou de seguir esta regra e por esse motivo gostaria de deixar registrado o reconhecimento àqueles que tanto colaboraram para a sua concretização.

Antes de tudo, agradeço ao Grande Arquiteto do Universo, poderoso Deus, pela vida e oportunidade de chegar a este momento em minha vida.

Agradeço, em memória, à dedicação e ao empenho dos meus amados pais, Hugo e Elza, que a partir de seus esforços dedicados, pude construir a base dos conhecimentos científicos e morais que hora me permitiu alcançar mais essa realização. Igualmente as minhas irmãs, Jussara e Maria Inara, que atualmente formam a estrutura da nossa família.

Agradeço aos meus três filhos, Pedro, João e Thiago, joias preciosas em minha vida, pela inspiração em continuar, a cada dia, vencendo todos os obstáculos que a vida nos oferece. E a mãe dessas joias, meu profundo respeito pelos seus cuidados dispensados a eles.

Agradeço à minha esposa Elizane pelo seu companheirismo e dedicação nos momentos em que, solitariamente, debruçava na pesquisa e contava com sua compreensão e apoio.

Em seguida, não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Professor Gutemberg Borges França, por toda a serenidade, paciência, empenho e visão operacional com que, de forma incansável, me orientou neste trabalho de mestrado. Amigo Gutemberg, muito obrigado por ter me aconselhado e corrigido quando necessário, sem jamais me desmotivar.

Agradeço imensamente aos meus estimados companheiro e companheira de caserna, Major Pereira e Sgt Maria Carolina, do Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica, que se envolveram com meu projeto e me deram todo o suporte necessário, inclusive com conselhos valiosos, que muito me auxiliou na caminhada.

Perdoem-me por não citar os inúmeros colaboradores que fizeram parte dessa conquista, porém não os cito pela simples impossibilidade de elencá-los nestas breves palavras. Espero, do fundo do coração, que eles me perdoem e sintam a minha mais pura gratidão pelos seus esforços e tenham consciência que, de alguma forma, deixaram suas contribuições para este trabalho.

*“Há triunfos que só se obtém pelo preço da alma, mas a alma é mais preciosa  
que qualquer triunfo”.*

*Rabindranath Tagore .*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Principais causas e principais fenômenos meteorológicos responsáveis por atrasos dos voos no Brasil no período de 2014 a 2016 (Fonte: DECEA, 2016). ....	17
Figura 1.2. Ocorrências de nevoeiro no período de 2007 a 2011, nos aeroportos de SBEG, SBKP, SBSP, SBGR, SBGL, SBRJ, SBPA, SBCT, SBCF e SBBR (Fonte: ICEA, 2019). ....	20
Figura 1.3. Região da localização do aeroporto internacional Afonso Pena em Curitiba (Fonte: adaptada do Google Earth).....	21
Figura 3.1. Localização do aeroporto internacional Afonso Pena com os domínios das simulações, aninhadas, com resolução de 9 km, 3 km e 1 km, respectivamente. ....	29
Figura 3.2. Componentes do framework WRF.....	29
Figura 5.1. Diagrama de blocos da metodologia.....	34
Figura 6.1. Cartas de superfície dos dias 03, 04, 21, 22, 26 e 27 de maio do ano de 2019, às 00Z. ....	37
Figura 6.2. Cartas de superfície dos dias 04, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 18, 19, 22, 23 e 24 de junho do ano de 2019, às 00Z.....	41
Figura 6.3. Cartas de superfície dos dias 09, 10, 11, 12, 20, 24, 25, 26 e 27 de julho do ano de 2019, às 00Z.....	43
Figura 6.4. Número de horas com valores de RVR inferior a 1000m no período de outubro de 2018 a setembro de 2019.....	44
Figura 6.5. Dispersão das simulações WRF versus observação para temperatura do ar (A), velocidade do vento (B) e umidade relativa do ar (C), para os 37 eventos teste. ...	46
Figura 6.6. Comportamento da direção do vento previsto (A) e observado (B) para os 37 eventos teste.....	46

Figura 6.7. Comportamento da direção do vento previsto (A) e observado (B) para os 37 eventos teste..... 48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Ocorrência de nevoeiro no aeroporto internacional Afonso Pena – SBCT.	23
Tabela 3.1. Resumo dos dados da estação meteorológica de superfície. ....	27
Tabela 6.1. Relação de dias de ocorrência de nevoeiro utilizados para avaliação dos quatro critérios estabelecidos. ....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARW -	<i>Advanced Research WRF</i>
ASAS -	Alta Subtropical do Atlântico Sul
ATFM -	Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo
CIMAER -	Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica
DECEA -	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
EMS -	Estação Meteorológica de Superfície
ICA -	Instrução do Comando da Aeronáutica
ICEA -	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
INFRAERO -	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
GANP -	Plano Global de Navegação Aérea
GFS -	<i>Global Forecast System</i>
MCA -	Manual do Comando da Aeronáutica
METAR -	<i>Meteorological Aerodrome Report</i>
NCDC -	<i>National Climate Data Center</i>
NOAA -	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
Noah LSM -	<i>Noah Land Surface Model</i>
NMM -	<i>Nonhydrostatic Mesoscale Model</i>
OACI -	Organização de Aviação Civil Internacional
RRTMG -	<i>Rapid Radiative Transfer Model</i>
RVR -	<i>Runway Visual Range</i>
SBCT -	Aeroporto Internacional Afonso Pena
SPECI -	<i>Special Weather Report</i>
UTC -	<i>Coordinated Universal Time</i>
WRF -	<i>Weather Research and Forecasting</i>



## SUMÁRIO

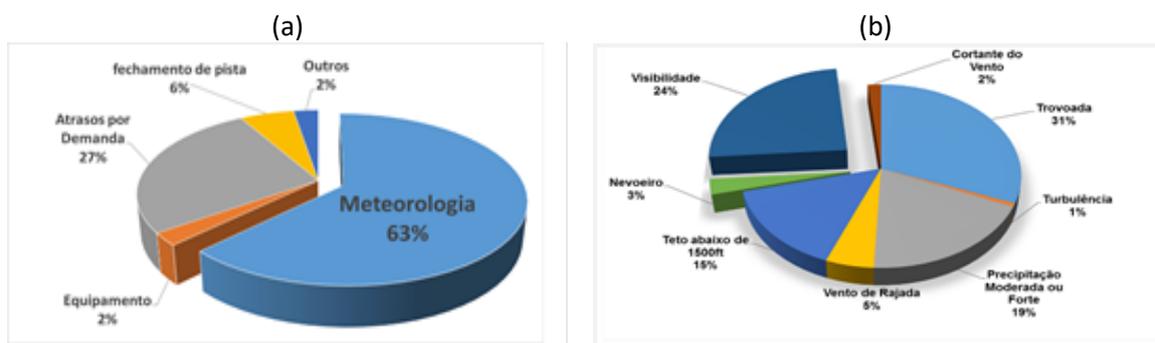
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. Nevoeiro.....</b>	<b>24</b>
<b>3. MATERIAL .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. Dados de Nevoeiro .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.1. Dados METAR.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.2. Dados da Estação Automática.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.3. Dados de Análise do NCDC/NOAA .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2. Modelo .....</b>	<b>28</b>
<b>4. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>31</b>
<b>5. MÉTODO.....</b>	<b>33</b>
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
<b>6.1. Análise Sinótica dos Eventos.....</b>	<b>36</b>
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>50</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Embora o nevoeiro não seja considerado um evento meteorológico extremo, Gultepe *et al.*, (2007) apresentam dados que demonstram que as perdas financeiras, e por vezes humanas, relacionadas ao nevoeiro, nos diversos setores da sociedade, são comparáveis às perdas provocadas por outros eventos extremos, como por exemplo, tornados e furacões. Para conceituar nevoeiro, este artigo utiliza a definição clássica da Organização Meteorológica Mundial onde diz que nevoeiro são gotículas d'água, ou cristais de gelo, suspensas no ar, reduzindo a visibilidade horizontal a um valor menor que 1000 (mil) metros (WMO, 1992).

Na aviação, em particular, os fenômenos meteorológicos são considerados essenciais para o planejamento, à execução da navegação aérea e o gerenciamento de fluxo aéreo, visando, não apenas a segurança do voo, mas também a otimização dos recursos e a logística empregada nesta área. As perdas totais associadas ao impacto do nevoeiro nos transportes aéreos são de extrema preocupação para o setor aeronáutico, necessitando de planejamento e de medidas de segurança específica para prevenir acidentes, atrasos ou cancelamentos dos voos. A previsão de nevoeiro tem prioridade elevada na logística dos planejamentos de voo e na segurança das operações aéreas (Australia, 2013).

Neste contexto, a previsão de restrição de visibilidade tem prioridade elevada na logística dos planejamentos de voo em nosso país. As Figuras 1.1a e 1.1b ilustram as principais causas e os principais fenômenos meteorológicos responsáveis por atrasos dos voos no Brasil. O percentual de acidentes relacionados à restrição de visibilidade devido ao nevoeiro é significativo, aparecendo como a sexta variável meteorológica que mais causa acidente aéreo, conforme aponta o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).



**Figura 1.1. Principais causas e principais fenômenos meteorológicos responsáveis por atrasos dos voos no Brasil no período de 2014 a 2016 (Fonte: DECEA, 2016).**

A segurança da aviação está no centro dos objetivos fundamentais da Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), órgão criado em 1944, durante a Conferência de Chicago. No Brasil, o DECEA é o setor responsável por prover os meios necessários (sistemas e equipamentos) para o gerenciamento, o controle e a segurança do serviço de navegação aérea, de modo seguro e eficiente, conforme estabelecido nas normas nacionais e nos acordos e tratados internacionais, estabelecidos pela Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), da qual o Brasil é signatário (Decreto Federal nº 21.713/1946, Lei Complementar nº 97/1999 e Decreto Federal nº 6.835/2009). Para cumprir o estabelecido pela OACI, o DECEA, por intermédio do Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica (CIMAER) presta um serviço de previsão e vigilância meteorológicas, fornecendo prognósticos meteorológicos para o emprego aeronáutico, apoiando as atividades relativas à Meteorologia de Defesa, gerenciando a aplicação da climatologia para fins aeronáuticos e divulgando as informações meteorológicas aeronáuticas.

Uma das ferramentas operacionais mais utilizadas atualmente nos serviços de previsão meteorológica são os modelos numéricos de previsão do tempo (Richardson, 1922), ou apenas, modelos atmosféricos, que baseados em equações diferenciais parciais, inicializadas a partir de condições iniciais obtidas de diversas fontes de dados observados, e estimados, geram prognósticos para grandezas meteorológicas primitivas e paramétricas. No entanto, apesar dos avanços no desenvolvimento de modelos

atmosféricos, estes ainda necessitam ser aprimorados para vencer o desafio da previsão das condições para formação do nevoeiro, seu início e término, de forma assertiva e fidedigna como requer à aviação (Gultepe, 2006; Croft & Ward, 2015).

Gultepe *et al.*, (2019) fez uma revisão do conhecimento disponível em meteorologia para operações aeronáuticas e incluiu nesta revisão uma descrição do ambiente propício da camada limite para a ocorrência de nevoeiro, analisando as variáveis geradas por um modelo atmosférico regional. Em particular, Payra & Mohan (2014) desenvolveu um procedimento que apresenta resultados de previsão de nevoeiro bastante assertivos – com 24 horas de antecedência – baseado no ajuste de uma árvore de decisão (multicritério), considerando dados meteorológicos de superfície de Nova Delhi, na Índia, para caracterização de eventos de nevoeiro, e dados prognosticados do modelo atmosférico WRF (Skamarock *et al.*, 2008), ajustados aos observados, para avaliar a capacidade preditiva de nevoeiros na região.

A restrição de visibilidade é um dos fenômenos meteorológicos que mais interfere nos procedimentos de pouso e decolagem nos aeródromos, podendo causar seu fechamento por horas. No Brasil, existem poucos registros de estudo sobre este fenômeno. Poucos esforços foram destinados à compreensão da distribuição espacial e das propriedades microfísicas de nevoeiros e nuvens estratos baixos no Brasil. A maioria das pesquisas se basearam somente em dados observacionais, que não incluem propriedades microfísicas do nevoeiro, e geralmente são restritas a área dos aeródromos. Em alguns casos o uso de satélites contribuiu para extrapolar as características locais de um nevoeiro para uma área maior. Entretanto, a comunidade científica que inclui meteorologistas, físicos, engenheiros, médicos, biólogos e ambientalistas demonstrou interesse em uma melhor compreensão do nevoeiro devido a seus efeitos sobre a vida cotidiana humana. Apesar desses estudos da comunidade científica, nossa capacidade de prever restrição de visibilidade permanece limitada devido à nossa compreensão incompleta dos processos de nevoeiro ao longo de várias escalas de tempo e espaço.

No final da década de 1990, as necessidades conflitantes de espaço aéreo e capacidade aeroportuária no cenário do tráfego aéreo brasileiro trouxeram a exigência

de um Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM, em inglês) totalmente estabelecido, projetado principalmente para minimizar restrições aos fluxos de tráfego devido aos estrangulamentos de capacidade. Um aspecto chave do ATFM é “Demanda” e “Capacidade”. A função “equilíbrio de demanda e capacidade” leva em conta os fluxos de tráfego e as capacidades de aeródromo do sistema para permitir que os usuários do espaço aéreo determinem quando, onde e como operam, ao mesmo tempo em que mitigam as necessidades conflitantes de espaço aéreo e capacidade de aeródromo. Ademais, prevê uma avaliação de tais fluxos de tráfego e capacidades de todo o sistema, meteorologia e infraestrutura, a fim de planejar as ações necessárias em tempo hábil. Com isso a previsão de restrição de visibilidade, que venha deixar um aeródromo abaixo dos mínimos operacionais, para gerentes de Unidades da ATFM é de caráter fundamental, pois possibilita uma melhor organização da malha aérea.

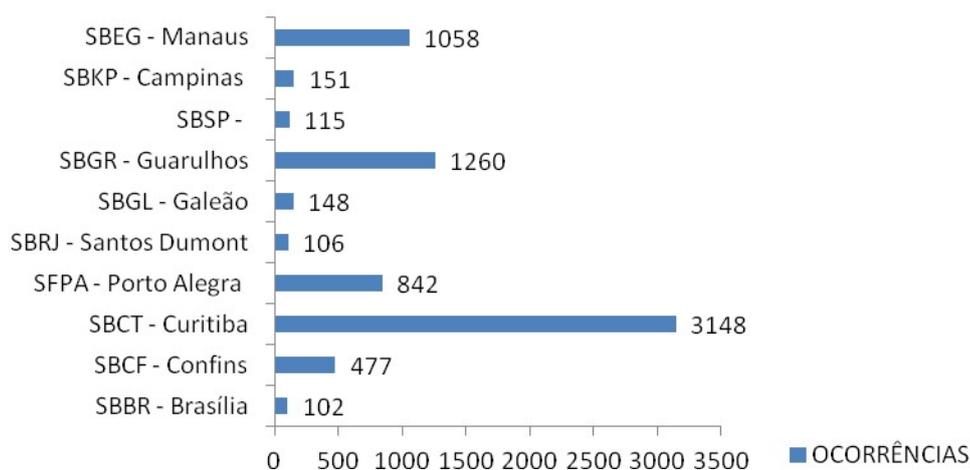
O Plano Global de Navegação Aérea (GANP, 2016) da OACI para 2016-2030 apresenta a todos os países uma ferramenta de planejamento abrangente que apoia um sistema global de navegação aérea harmonizado. Ele identifica todas as melhorias potenciais de desempenho disponíveis hoje, detalha a próxima geração de tecnologias terrestres que serão implantadas em todo o mundo e fornece a certeza de investimento necessária para que os países e a indústria tomem decisões estratégicas para fins de planejamento individual.

O GANP é a estratégia para alcançar um sistema global de navegação aérea interoperável, para todos os usuários durante todas as fases de voo, que atenda a níveis acordados de segurança, proporcione operações econômicas ótimas, seja ambientalmente sustentável e atenda aos requisitos de segurança nacional. Para o desenvolvimento e atuação desse sistema, a operação dos aeroportos deve ser considerada, uma vez que a inoperância, não programada, de qualquer aeroporto impacta diretamente na interoperabilidade do sistema.

Dentre os aeroportos do Brasil, o aeroporto de Curitiba merece destaque na ocorrência de nevoeiro, sendo um dos que mais suspende suas operações em função desta restrição (Figura 1.2). Este aeroporto tem se mostrado importante no contexto da

aeronáutica, no que tange movimentação de aeronaves, não só pelo fluxo de voos comerciais destinados aquela cidade, mas também por funcionar como um importante centro de conexão (*hub*) na malha aérea, assim como pelo apoio às operações militares da região sul do país, com funcionamento ininterrupto, 24 horas por dia, todos os dias do ano.

### Aeroportos

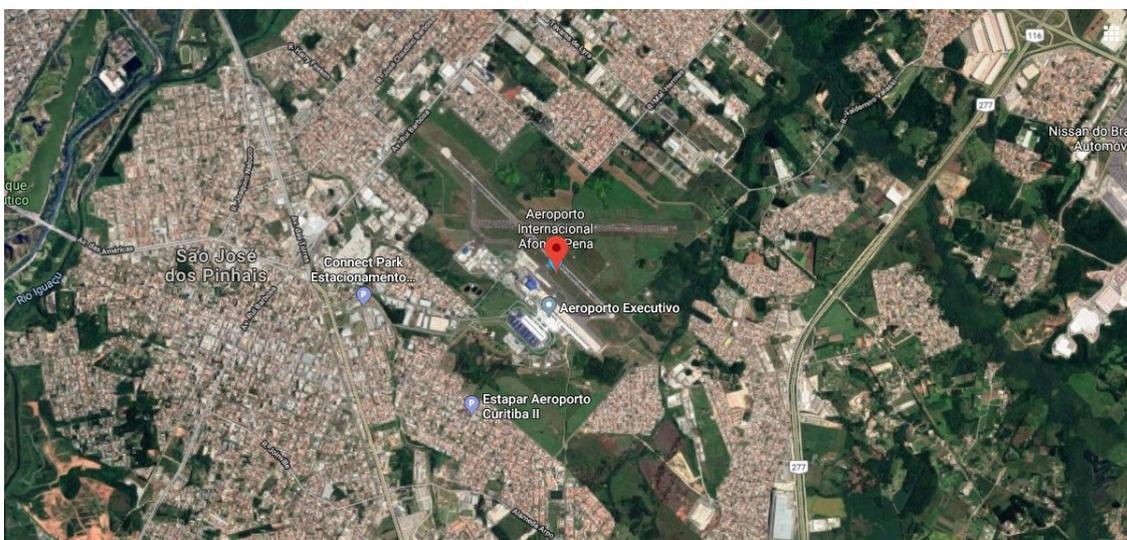


**Figura 1.2. Ocorrências de nevoeiro no período de 2007 a 2011, nos aeroportos de SBEG, SBKP, SBSP, SBGR, SBGL, SBRJ, SBPA, SBCT, SBCF e SBBR (Fonte: ICEA, 2019).**

A operação de um aeroporto, em particular pousos e decolagens, é impactada, mais ou menos, dependendo da infraestrutura do aeroporto, com a presença do nevoeiro. A região do Aeroporto de Curitiba é uma das que demonstra impactos significativos, pois segundo o anuário estatístico operacional de 2018 (INFRAERO, 2019) o aeroporto de internacional Afonso Pena é o sexto maior do país em movimentação de aeronaves, quarto em movimento de passageiros, com cerca de 210 (duzentos e dez) pousos e decolagens diárias, e tem suas operações de pouso e decolagem impactadas em aproximadamente 300 (trezentas) horas por ano devido às restrições impostas pelos eventos de baixa visibilidade/nevoeiro (Oliveira, 2019). Desta forma, considerando as restrições impostas pelo nevoeiro ao aeroporto de Curitiba e o atual grau de

subjetividade utilizado pelo meteorologista para elaborar previsão de nevoeiro para esta localidade, faz-se necessário o desenvolvimento de modelos prognósticos mais objetivos e assertivos.

A área de estudo, localizada no município de São José dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba, que compreende o aeroporto de Curitiba e região, está centrada na latitude  $25^{\circ} 32'S$  e longitude  $49^{\circ} 10'W$  (Figura 1.3) com uma altitude de 911m acima do nível do mar. A área está situada entre duas serras: a leste da área de estudo está a Serra do Mar e a oeste, a Serra de São Luiz do Purunã. Os verões em Curitiba são amenos e os invernos frios. As temperaturas médias máximas chegam, apenas, aos 26 graus no verão e aos 19 graus no inverno. Os invernos são marcados pela névoa e nevoeiro no período da manhã e muitas vezes o sol é visto no período da tarde, após a dissipação do nevoeiro. Por ser, a área de estudo, uma região de passagem das frentes frias e, conseqüentemente, das Altas Pressões Polares, as massas de ar frio que acompanham essas Altas Pressões fazem com que os invernos sejam rigorosos com temperaturas abaixo de zero, em alguns dias (Escobar, 2019).



**Figura 1.3. Região da localização do aeroporto internacional Afonso Pena em Curitiba (Fonte: adaptada do Google Earth)**

Nos últimos anos, muitos esforços são voltados para melhorar o entendimento da interação entre a circulação de grande escala e a convecção cúmulos, principalmente os

esquemas que a parametrizam (KUO *et al.*,1997). Até o momento, nenhum dos esquemas existentes é considerado melhor do que o outro para todas as situações atmosféricas (WANG E SEAMAN, 1997). Pereira (2014) afirma que a distribuição do fenômeno nevoeiro, durante os meses do ano, aproxima-se a uma distribuição gaussiana (ou normal) e o número de ocorrências deste fenômeno é maior quanto mais próximo do inverno, tendo sua maior concentração no mês de junho, seguido pelos meses de julho e maio.

No aeroporto de Curitiba, SBCT (indicador OACI), o período compreendido entre os meses de maio a julho de 2018 foi identificado com o de maior ocorrência de nevoeiros (maior que 80 ocorrências, por mês), segundo o Sistema de Geração e Disponibilização de Informações Aeronáuticas do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA, 2019), dados estes, apresentados na Tabela 1.1. A partir desta constatação foi definido para este trabalho o mesmo período do ano (maio a julho) de 2019, por ser mais recente, como o período de análise para o qual se extraíram os dados da estação meteorológica de superfície (EMS) do SBCT. Os dados obtidos foram os dados brutos da estação, com informações a cada minuto, bem como os dados codificados de acordo com o padrão METAR (*Meteorological Aerodrome Report*) – mensagem utilizada para registro das observações meteorológicas de uma EMS – (ICA 105-15, 2019), com frequência horária.

O presente trabalho objetiva desenvolver um modelo preditivo para o aeroporto internacional Afonso Pena (Curitiba), detectando o início e término dos eventos de nevoeiro, com uma antecedência de 24 horas, utilizando a abordagem de multicritérios (árvore de decisão), considerando dados observacionais obtidos a partir da estação meteorológica de superfície do aeródromo e as previsões geradas pelo modelo atmosférico WRF, configurado para a região do aeródromo.

**Tabela 1.1. Ocorrência de nevoeiro no aeroporto internacional Afonso Pena – SBCT.**

<b>Ano</b>	<b>Mês</b>	<b>Ocorrência</b>
2018	Jan	12
2018	Fev	24
2018	Mar	21
2018	Abr	70
2018	Mai	106
2018	Jun	81
2018	Jul	94
2018	Ago	49
2018	Set	62
2018	Out	38
2018	Nov	16
2018	Dez	16

Para atingir o objetivo geral acima, objetivos específicos foram traçados. A saber:

- testar o modelo de multicritérios sobre a região do aeroporto de Curitiba;
- ajustar (calibrar) os parâmetros dos multicritérios para a região estudada; e
- validar os ajustes realizados para um período independente do utilizado para o teste e ajuste.

A dissertação está organizada da seguinte forma. No capítulo 2, está apresentada a fundamentação teórica; no capítulo 3, o material para o desenvolvimento da dissertação; no capítulo 4, o referencial teórico; no capítulo 5, o método aplicado; no capítulo 6, os resultados; e, finalmente, a conclusão é mostrada no capítulo 7.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para esta dissertação, o embasamento teórico foi referenciado nos estudos da literatura sobre nevoeiro e na documentação técnica sobre o modelo WRF.

### 2.1. Nevoeiro

O nevoeiro, pode se formar quando uma porção de ar alcança a saturação (França, 2016). Quando uma nuvem *stratus* se forma em contato com a superfície da Terra, podemos entender que temos nevoeiro; como menciona Ferreira (2002), “o nevoeiro é simplesmente uma nuvem *stratus* que foi formada no mesmo nível da superfície”. Em termos de umidade relativa, em princípio, o nevoeiro é formado quando a temperatura do ar se resfria e iguala-se a da temperatura do ponto de orvalho. Neste caso, em condições normais de temperatura e pressão atmosférica, a umidade relativa deverá ficar próxima dos 100%. No entanto, quando estiver menor que 100%, deverá conter na atmosfera Núcleos de Condensação Higroscópios abundantes. Varejão-Silva (2005) define nevoeiro como sendo a suspensão de gotículas de água na camada atmosférica contígua à superfície terrestre, reduzindo a visibilidade horizontal a menos de 1000 metros. A definição internacional de nevoeiro consiste em uma coleção de gotículas de água ou cristais de gelo suspensas no ar, próximo à superfície da Terra, que levam a uma redução da visibilidade horizontal abaixo de 1 km (WMO, 1992). Se a visibilidade for maior que 1 km, então é chamada névoa úmida.

Diversas abordagens têm sido utilizadas na classificação do nevoeiro. Esta classificação pode ser baseada em propriedades físicas, termodinâmicas, processos dinâmicos, composição química de partículas, características fisiográficas da superfície e características meteorológicas. Ainda, quanto ao estado das gotículas em suspensão, o nevoeiro também pode ser dividido em três grupos:

- nevoeiro líquido ( $T > -10^{\circ}\text{C}$ );
- nevoeiro misto ( $-10^{\circ}\text{C} > T > -30^{\circ}\text{C}$ ); e
- nevoeiro de gelo ( $T < -30^{\circ}\text{C}$ ).

No nevoeiro líquido, as gotículas em suspensão estão no estado líquido. No nevoeiro misto encontramos gotículas em suspensão tanto no estado líquido como no sólido. E por fim, No nevoeiro de gelo, as gotículas em suspensão são somente partículas de gelo.

Ainda, em relação ao seu processo de formação, podemos encontrar duas formas distintas de nevoeiro:

- Nevoeiro de Radiação; e
- Nevoeiro de Advecção.

O nevoeiro de radiação é o tipo mais comum de nevoeiro e ocorre devido ao resfriamento noturno do solo através da liberação de radiação em ondas longas. Observa-se que para este tipo de nevoeiro, a umidade relativa, o céu com poucas nuvens e vento fraco são condições iniciais para a sua formação.

Segundo Wallace e Hobbs (2006), o nevoeiro de advecção ocorre quando o ar quente (e úmido) se desloca horizontalmente sobre uma superfície mais fria, ou quando o ar frio (e úmido) se desloca horizontalmente sobre uma superfície mais quente.

### **3. MATERIAL**

Nesta seção apresentam-se os dados e o modelo utilizado no trabalho.

#### **3.1. Dados de Nevoeiro**

##### *3.1.1. Dados METAR*

Conforme o Manual do Comando da Aeronáutica (MCA) 105-16 e a ICA 105-1, as observações meteorológicas regulares são realizadas em horários pré-fixados, em intervalos de uma hora e divulgadas como código METAR. Já as especiais, na forma de SPECI, quando houver mudanças significativas nas condições meteorológicas observadas. E por fim, as locais são confeccionadas quando ocorre algum incidente ou acidente aeronáutico no aeródromo que comporta a Estação Meteorológica de Superfície.

Exemplo do código METAR: METAR SBCT 091000Z 36005KT 0450 R15/0450 R33/0550 FG VV001 06/06 Q1027.

O código METAR fornece informação direta da direção e velocidade do vento, visibilidade horizontal, tempo presente, nebulosidade ou visibilidade vertical, temperaturas do ar (T) e do ponto de orvalho ( $T_d$ ) e a pressão atmosférica. O valor da Umidade Relativa (UR) pode ser obtido indiretamente por meio de uma relação entre T e  $T_d$ . A Tabela 3.1 tem um resumo com as informações do METAR.

Os dados METAR foram utilizados apenas para identificar de maneira objetiva a ocorrência de nevoeiro na mensagem (tempo presente) e selecionar datas para as quais seriam obtidos os resultados do modelo atmosférico WRF.

Os dados codificados e confeccionados de acordo com o padrão METAR contêm observações meteorológicas extraídas da Estação Meteorológica de Superfície, Classe 1 (EMS-1). Estas mensagens, no âmbito da meteorologia aeronáutica, podem ser classificadas como regulares, especiais e locais.

**Tabela 3.1. Resumo dos dados da estação meteorológica de superfície.**

Dados	Frequência	Informação	Fonte
Código METAR/SPECI	1 hora (no mínimo)	Temperatura do Ar (°C)	Banco Climatológico do ICEA
		Temperatura do Ponto de Orvalho (°C)	
		Direção e velocidade do vento (Norte Verdadeiro/Kt)	
		Pressão atmosférica reduzida ao nível médio do mar (hPa)	
		Tempo Presente (fenômeno meteorológico)	
		Cobertura e altura de nuvens (oitavos e centena de pés)	
		Visibilidade horizontal (m)	

Identificada de maneira objetiva a ocorrência de nevoeiro na mensagem METAR, foram selecionadas 30 (trinta). Ressalta-se que em algumas datas foram registradas mais de uma ocorrência de nevoeiro.

### *3.1.2. Dados da Estação Automática*

A EMS do SBCT registra em seus dados brutos, a cada minuto, informações dos sensores de pressão atmosférica (hPa), temperatura do ar (°C); Temperatura do bulbo úmido (°C), umidade relativa do ar (%); precipitação (mm); radiação solar (W/m<sup>2</sup>); Alcance Visual da Pista (RVR – *Runway Visual Range*) (m); direção do vento (°) e velocidade do vento (m/s). Para este trabalho, estes dados foram sub amostrados para o intervalo de 15 minutos.

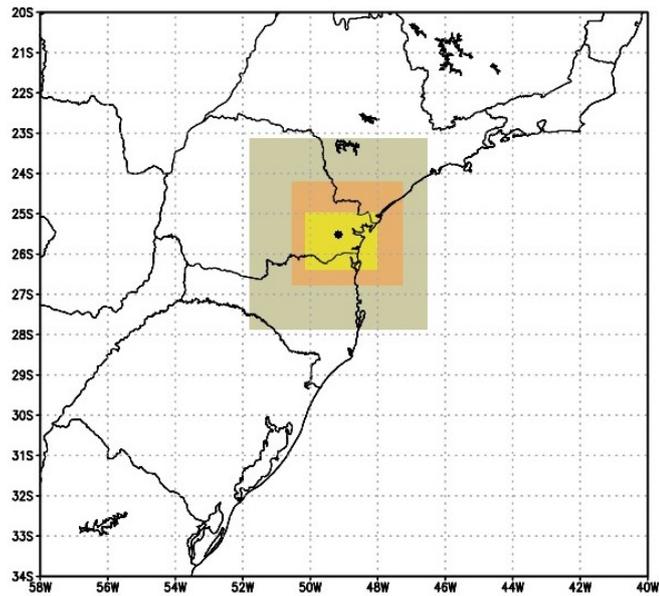
### *3.1.3. Dados de Análise do NCDC/NOAA*

A partir das 34 (trinta e quatro) datas selecionadas com ocorrência de nevoeiro para o período de estudo deste trabalho, foi consultado o banco de dados do *National Climate Data Center* (NCDC), do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), de onde se obteve dados para condição inicial e de contorno para o modelo atmosférico WRF. Os dados selecionados foram as análises das 00Z e previsões para

48h, com condições de contorno a cada 3 (três) horas, geradas com o modelo espectral *Global Forecast System* (GFS), com resultados já transformados para a resolução horizontal de  $0.25^\circ$  (longitude e latitude) para as datas identificadas. Dos dados disponíveis no NCDC, não foram identificadas informações para 4 (quatro) dias, resultando em apenas 30 (trinta) datas com dados, com condição inicial e de contorno, para realizar as simulações com o modelo atmosférico WRF. Destes, foram analisadas e selecionadas 22 (vinte e duas) datas mais representativas, ressaltando-se que as datas são referentes ao início das simulações, às 00z.

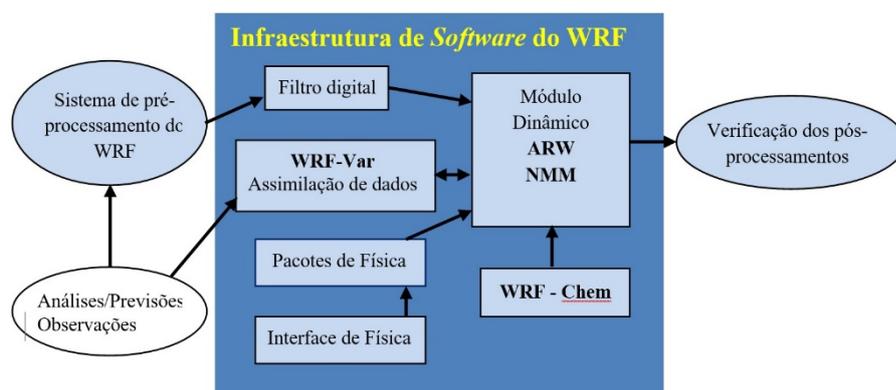
### 3.2. Modelo

O WRF (Skamarock *et al.*, 2008) foi o modelo atmosférico selecionado para realizar as simulações das ocorrências de nevoeiro na área do SBCT. Para as simulações foi utilizado o módulo com a solução dinâmica ARW (*Advanced Research WRF*). Este módulo contempla equações compressíveis não-hidrostáticas, com solução para coriolis e termos de curvatura da Terra, aninhamento bi-direcional para múltiplas grades, com projeção mercator e arranjo de grade tipo C de Arakawa. Foi utilizado, ainda, o suporte à computação paralela *shared memory*. Para as simulações foram criados três domínios computacionais centrados, aproximadamente, no aeroporto internacional Afonso Pena (Figura 3.1) que abrangem a área correspondente das resoluções horizontais aplicadas nesses três domínios: de 9 km (60 x 60 pontos), 3 km (112 x 97 pontos) e 1 km (214 x 160 pontos). O número de níveis na vertical é igual a 33. A pressão no topo da atmosfera é de 50 hPa. Os esquemas de parametrização dos processos físicos são: Kain-Fritsch (Kain, 2004) para convecção profunda; Kessler (Kessler, 1969) para convecção explícita; *Rapid Radiative Transfer Model*- RRTMG (Iacono *et al.*, 2008) para radiação de ondas longa e curta; Mellor-Yamada Janjic (Janjic, 1994) para camada limite planetária; e Noah Land Surface Model- Noah LSM (Chen & Dudhia, 2001) para processos de superfície.



**Figura 3.1. Localização do aeroporto internacional Afonso Pena com os domínios das simulações, aninhadas, com resolução de 9 km, 3 km e 1 km, respectivamente.**

Na Figura 3.2 são apresentados os principais componentes do sistema WRF. Este é conceituado como um *Framework*, em função das múltiplas opções que oferece, conferindo modularidade aos desenvolvedores, e possibilidade de inclusão de soluções físicas e até dinâmicas, razão pela qual pode funcionar com dois módulos de solução dinamica diferente (NMM - *Nonhydrostatic Mesoscale Model* e ARW - *Advanced Research WRF*), além de incluir soluções para assimilação de dados, modelos químicos (WRF-Chem) e hidrológicos (WRF-Hydro).



**Figura 3.2. Componentes do framework WRF.**

As integrações do modelo se iniciam com a análise de 00:00 UTC (*Coordinated Universal Time*) e se estendem por 48 h, com aninhamento bidirecional das grades e o tempo de integração correspondente ao período de estudo de caso deste trabalho, com descarte das 6 horas iniciais para acomodação dinâmica do modelo (*spin up*). As variáveis simuladas pelo modelo são obtidas a partir das séries temporais extraídas para a localização do ponto de grade (ponto preto na Figura 1) mais próximo do Aeroporto Internacional Afonso Pena (considerado neste trabalho a latitude de 25° 32'S e longitude 49° 10'W, conforme apontado na Figura 3).

A previsão numérica de tempo serve para representar ou prognosticar os fenômenos atmosféricos que influenciam as condições de tempo e tem sido cada vez mais utilizada como informação estratégica de planejamento para diversas áreas de atividade econômica e social, no entanto, a previsão do início do nevoeiro permanece difícil, apesar do progresso na previsão numérica do tempo e poucos estudos tentaram descrever o ambiente de nevoeiro em termos da temperatura da camada limite, umidade, velocidade e direção do vento, bem como de perfis de resfriamento radiativo próximo à superfície, correntes de advecção e características da superfície.

#### 4. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

O nevoeiro abrange uma diversidade de escalas de tempo e espaço. Uma classificação dos nevoeiros em função do processo físico responsável por sua formação pode ser encontrada em Gultepe *et al.*, (2007). De acordo com a intensidade da restrição de visibilidade Petterssen (1940) classifica os nevoeiros em fracos (1000 m a 500 m), médios (500 m a 100 m) e fortes (abaixo de 100m).

Nos últimos anos, muitos esforços são voltados para melhorar o entendimento do nevoeiro, por ser um fenômeno meteorológico de formação local e gênese complexa, a previsão de ocorrência e evolução dos nevoeiros é um grande desafio aos meteorologistas e uma grande motivação aos pesquisadores, haja vista as diversas pesquisas, nas mais diversas áreas, que buscam métodos e técnicas de previsão do fenômeno. Até o momento, nenhum das metodologias existentes é considerado melhor para prever nevoeiro. Para a cidade de Dheli, na Índia, uma metodologia diagnóstica usando o pós-processamento de um modelo de mesoescala está sendo usada e esta metodologia é o foco principal da presente dissertação.

Os primeiros trabalhos sobre o nevoeiro foram citados por Aristóteles (284- 322 AC), conforme referenciado por NEUMANN (1989) em seu estudo sobre neblina e clima. Outros trabalhos sobre formação e previsão de nevoeiros foram conduzidos ao longo do tempo. A importância do nevoeiro na previsão do tempo foi estudada por WILLETT (1928). Em seu trabalho ele enfatizou a importância dos núcleos de condensação para a formação de nevoeiro. O processo de formação de nevoeiro foi descrito por Emmons e Montgomery (1947). Mais recentemente Gultepe e Milbrandt (2007) e Gultepe *et al.*, (2009) desenvolveram trabalhos experimentais, com base em campanhas de campo, onde estudos sobre previsão de nevoeiro marítimos e continentais foram feitas em condições específicas. França *et al.*, (2018) fizeram um estudo detalhado sobre as ocorrências de nevoeiro antes e após a construção do Aeroporto Internacional de Guarulhos, utilizando uma extensa série de dados, de 1951 a 2015.

Emmons e Montgomery (1947) descreveram o processo de formação de nevoeiro e apontaram que a troca turbulenta não é suficiente para gerar o nevoeiro, sendo o processo adicional de radiação necessário para que seja alcançado a saturação.

Kunkel (1984), estudando espectros de gotas coletadas a 5 m e 30 m de altura chegou à correlação quase linear, 95 % entre o coeficiente de extinção e o conteúdo de água líquida, tornando prático e mais realista, a conversão do conteúdo de água líquida em coeficiente de extinção ou visibilidade horizontal para o evento de nevoeiro.

Ballard *et al.*, (1991) foram pioneiros em usar um modelo tridimensional de mesoscala na previsão do nevoeiro. Em seus trabalhos, concluíram que a exatidão de circunstâncias iniciais, bem como uma melhor representação da resolução vertical, aumenta a exatidão e são essenciais para a acurácia das previsões dos modelos numéricos.

Payra e Mohan (2014) publicaram um trabalho sobre as ocorrências de nevoeiro por meio de um método de pós-processamento da saída do modelo WRF, usado para previsão de início de nevoeiro, após validação dos parâmetros de temperatura de superfície, umidade relativa e velocidade do vento, sobre uma região específica da Índia.

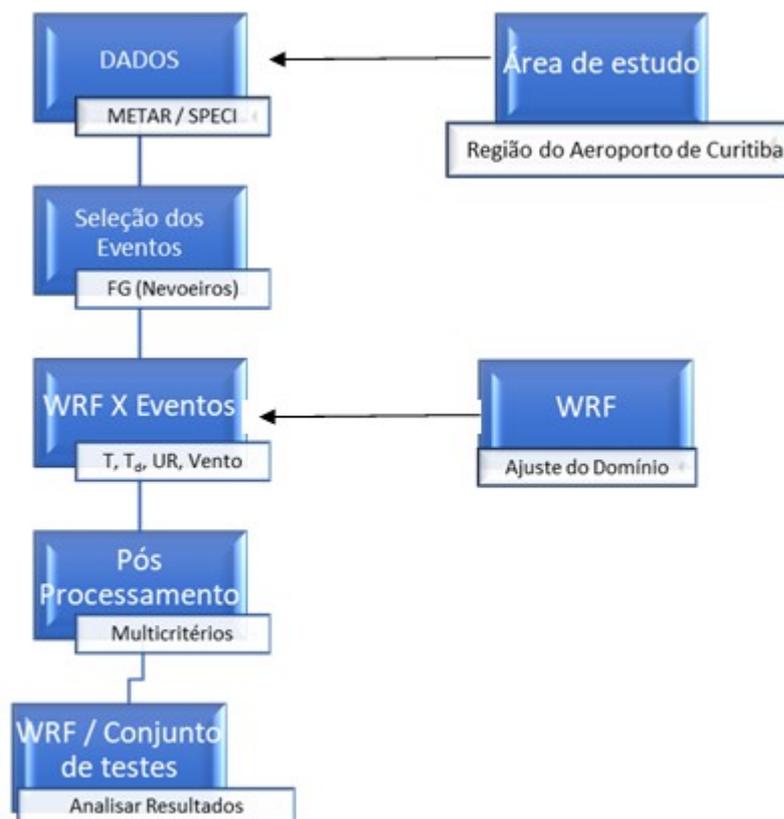
Estudos mais recente de Gultepe (2019) apontam que um número expressivo de acidentes ou incidentes causados em operações aéreas, próxima da superfície, entre 1994 a 2003, foram devidos, ou teve contribuição, de restrições de visibilidade.

## 5. MÉTODO

Neste capítulo serão apresentados os métodos seguidos para a realização da pesquisa, tomando como base: a área de estudo e o tipo de dado meteorológico que será utilizado.

O método consiste em, após definida a área de estudo, coletar dados meteorológicos desta área, selecionar casos de eventos de nevoeiro, aplicando simulações numéricas dos casos selecionados, com a finalidade de validar os resultados das simulações em comparação com os dados observados. Em seguida aplicar pós-processamento nas saídas do modelo para previsão de nevoeiro em no ponto de grade do modelo mais próximo do aeroporto, analisando o desempenho do modelo para determinação da incerteza de início, duração e término dos episódios de nevoeiro.

Para auxiliar na explanação da pesquisa, foi criado um diagrama de blocos, conforme Figura 5.1, e descritos os passos da metodologia de pesquisa empregada:



**Figura 5.1. Diagrama de blocos da metodologia.**

A metodologia empregada para esta pesquisa é dividida em seis passos distintos, a saber:

Passo 1: Coletou-se os dados brutos, com frequência de 15 minutos, da EMS automática do SBCT para o período de 01 de outubro de 2019 a 30 de setembro de 2019;

Passo 2: Selecionou-se os eventos de nevoeiro, com base na visibilidade do alcance visual da pista (RVR), da pista 15;

Passo 3: Simulou-se as condições atmosféricas utilizando o modelo WRF a cada 15 minutos, com 24 horas de antecedência dos eventos selecionados no Passo 2;

Passo 4: Analisou-se o comportamento dos dados observacionais (temperatura, umidade relativa e vento) dos eventos versus as simulações WRF (para o ponto de grade

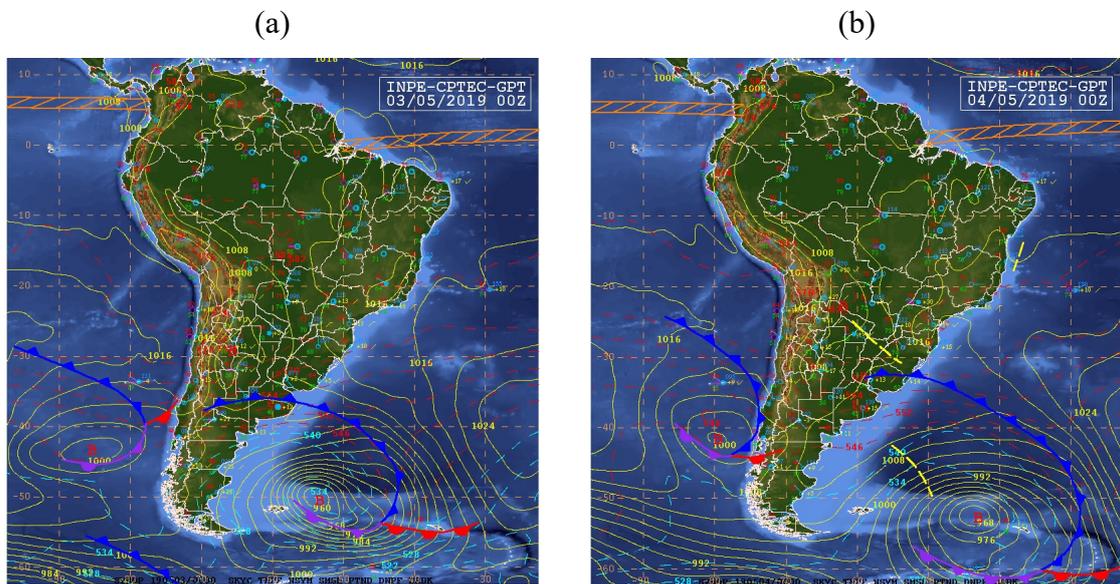
mais próximo dos observacionais, no passo 2), considerando uma amostra (aproximadamente 65%) da população dos eventos de nevoeiros e se estabeleceu os multicritérios, considerando o viés com dados simulados, para detecção de nevoeiro; e

Passo 5: Aplicou-se os multicritérios em uma amostra independente de teste dos eventos de nevoeiro e avalia-se estatisticamente o desempenho usando a correlação e taxa percentual de acerto.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Análise Sinótica dos Eventos

Nos dias de evento nevoeiro dos meses de maio, junho e julho de 2019, observou-se a presença de uma crista do sistema de alta pressão atuando na região de interesse, como se pode verificar pelas Figuras 6.1 a 6.3. É possível notar que este sistema vai gradualmente adquirindo características subtropicais ao longo do dia, de forma que, na carta das 00Z, a área de interesse está sob a influência da borda oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).



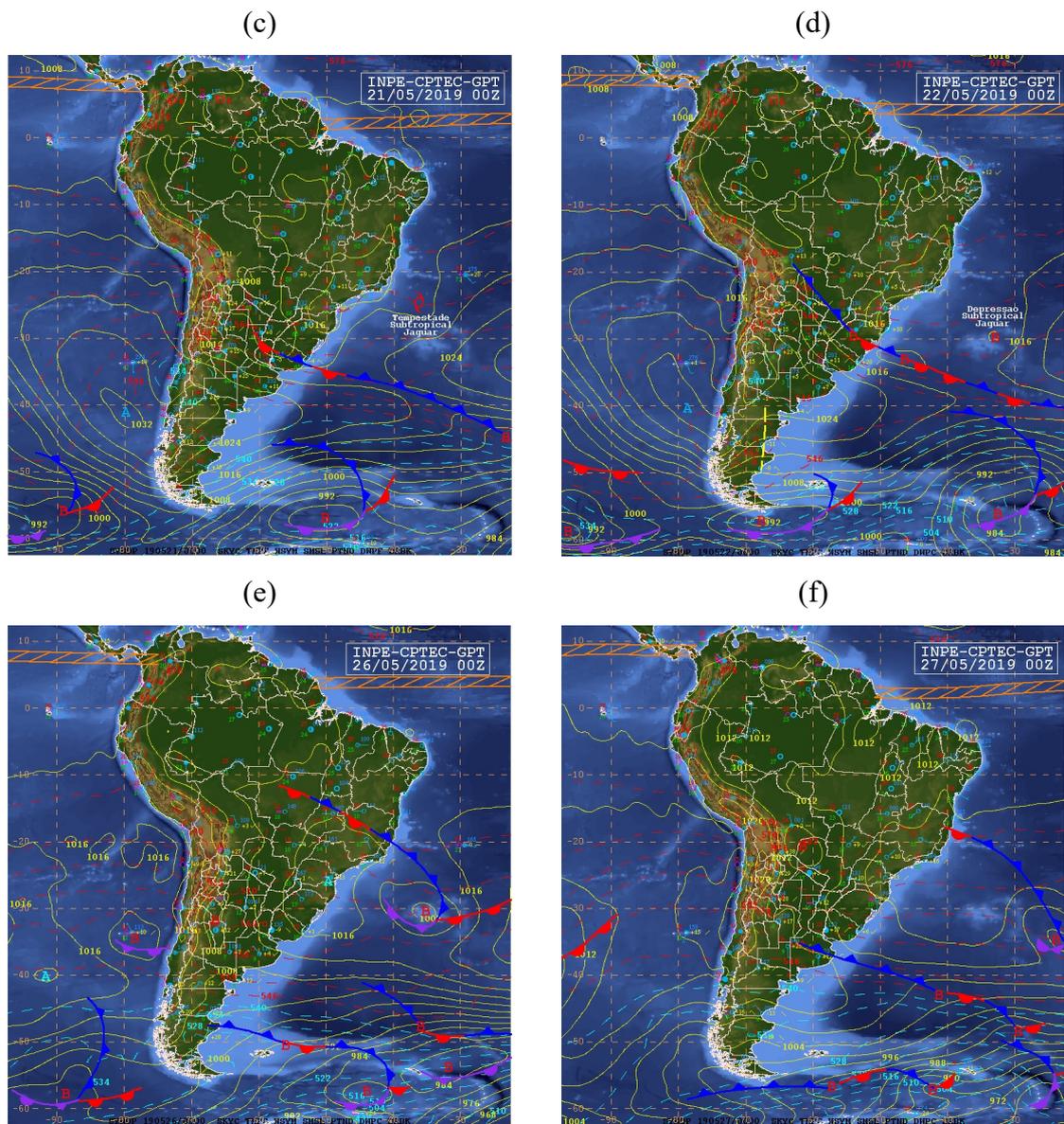
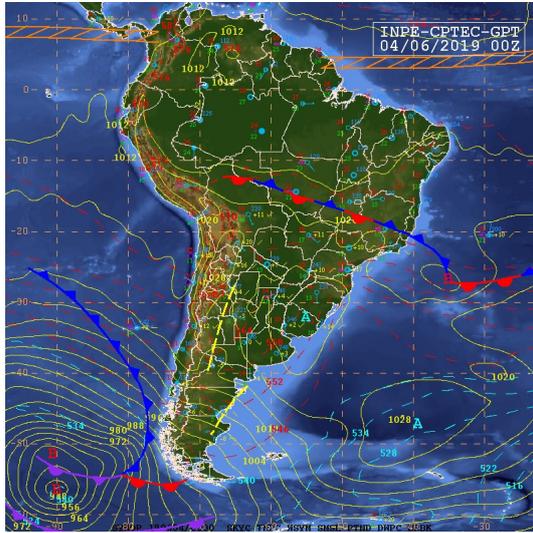
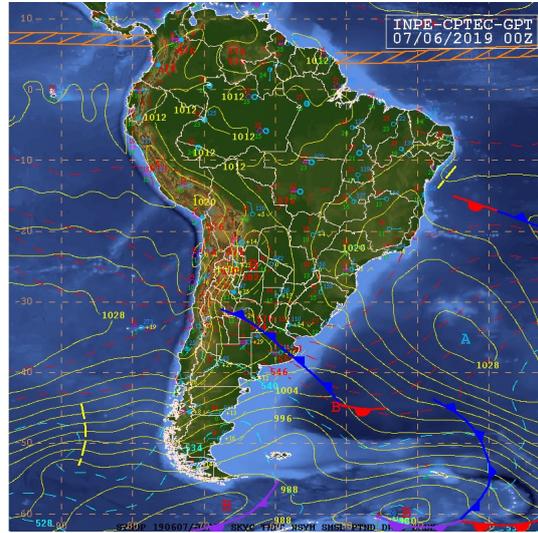


Figura 6.1. Cartas de superfície dos dias 03, 04, 21, 22, 26 e 27 de maio do ano de 2019, às 00Z.

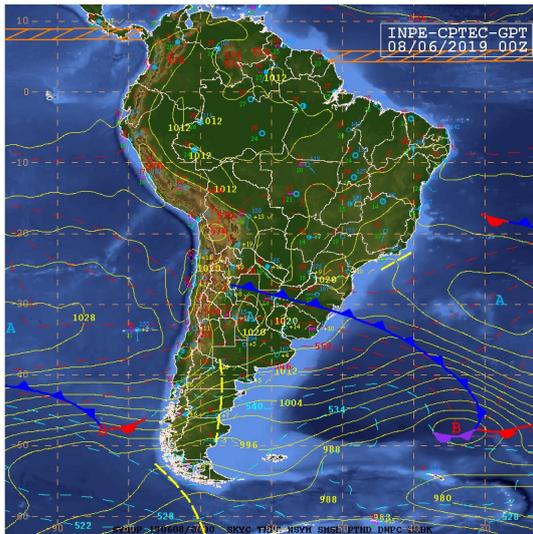
(a)



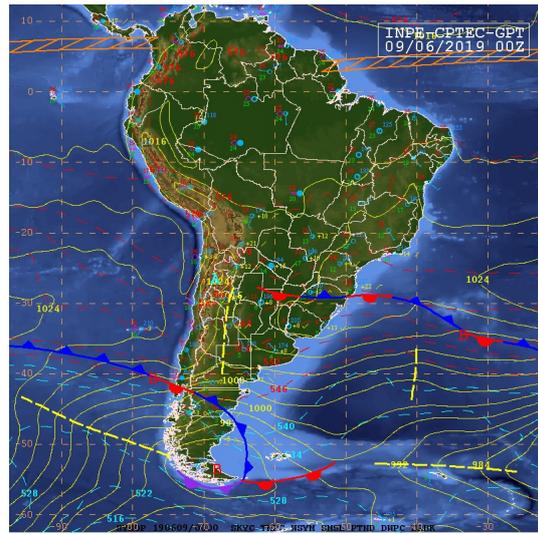
(b)



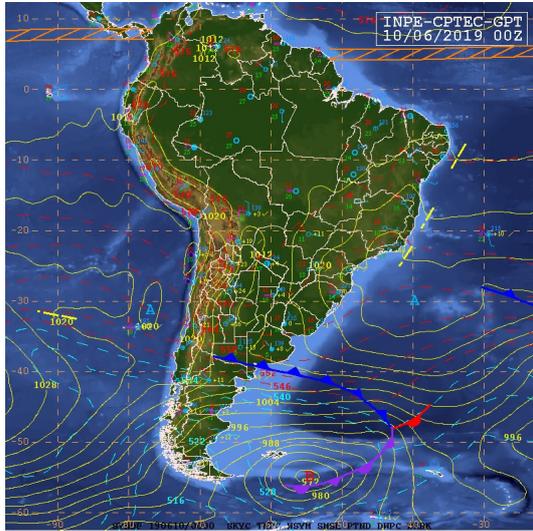
(c)



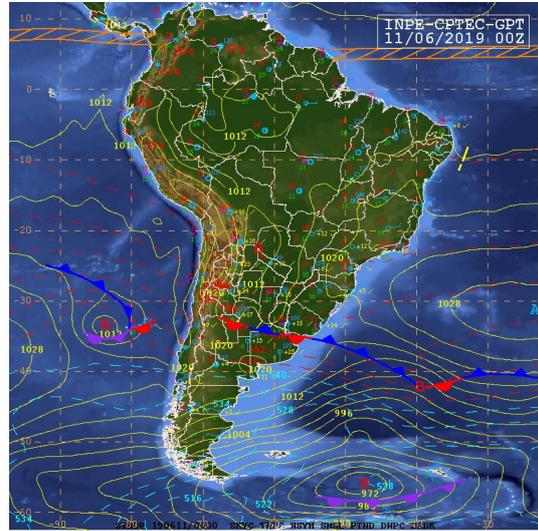
(d)



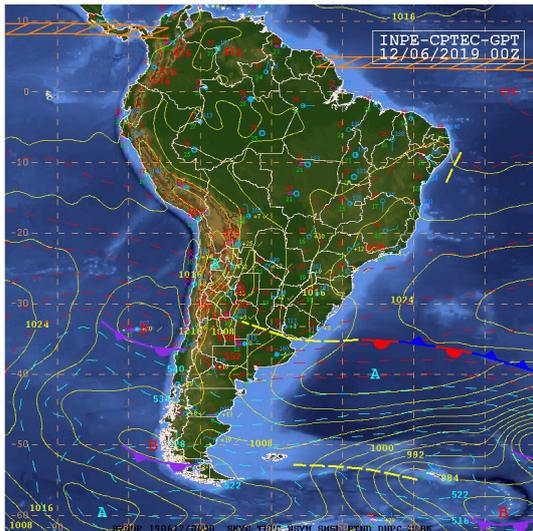
(e)



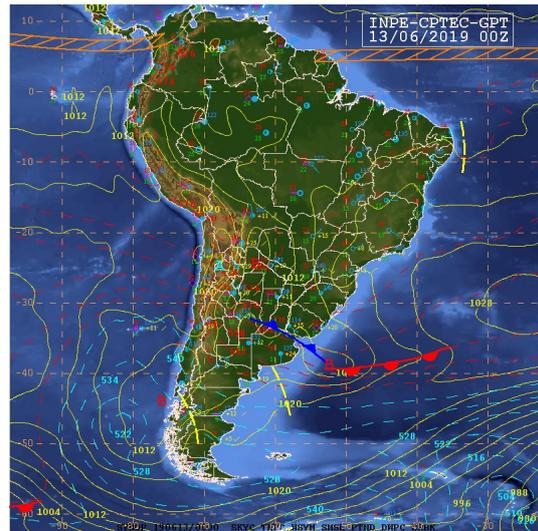
(f)



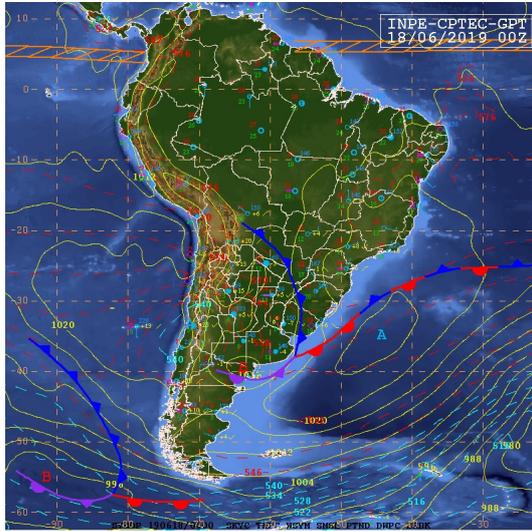
(g)



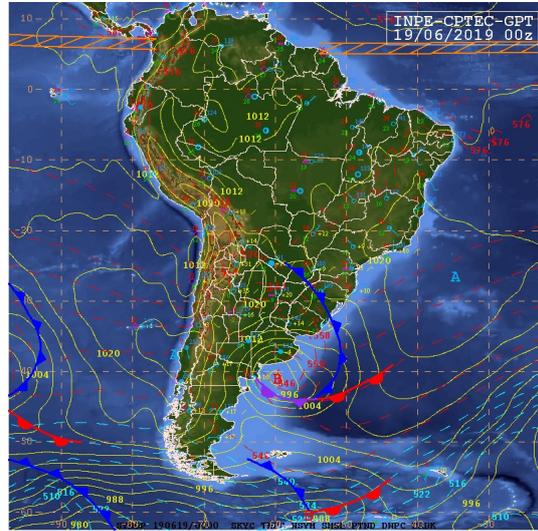
(h)



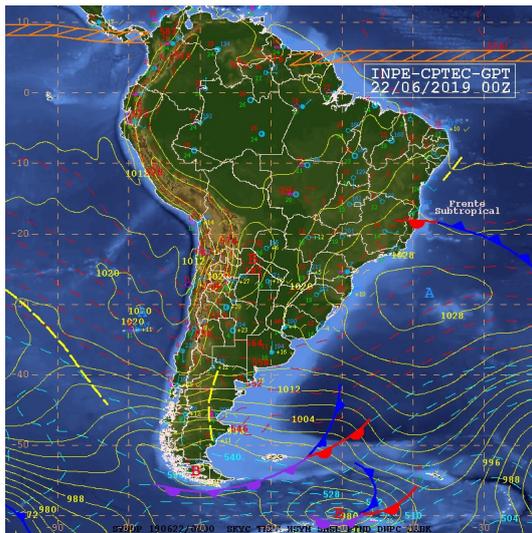
(i)



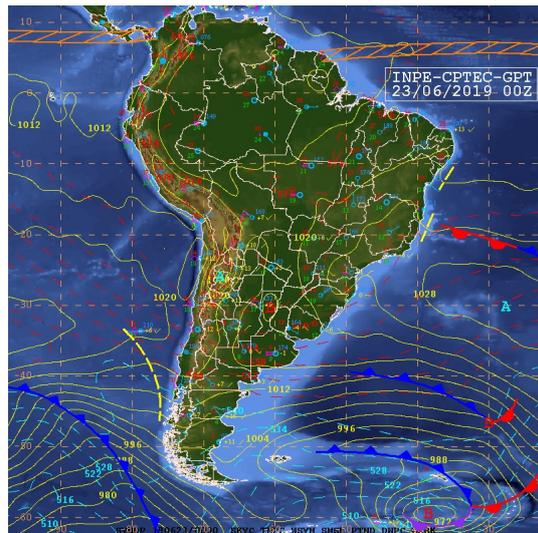
(j)



(k)



(l)



(m)

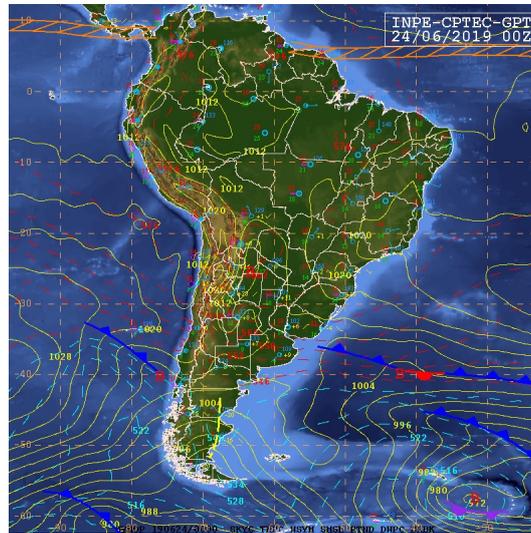
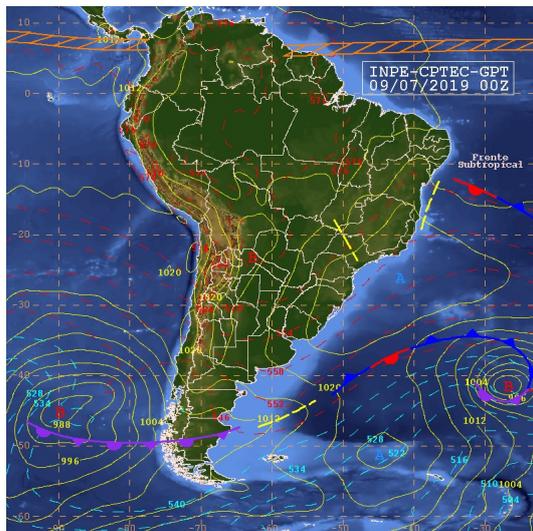
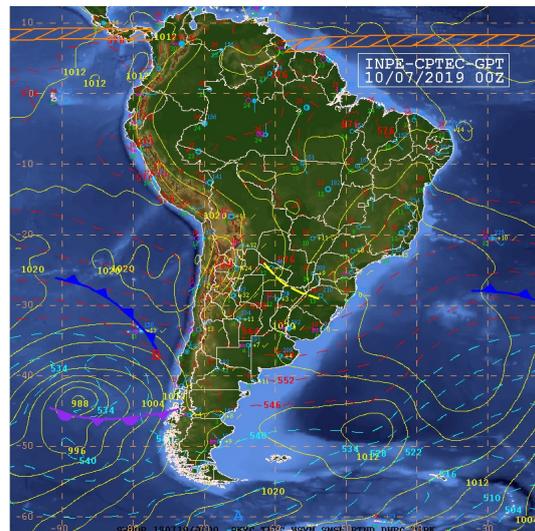


Figura 6.2. Cartas de superfície dos dias 04, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 18, 19, 22, 23 e 24 de junho do ano de 2019, às 00Z.

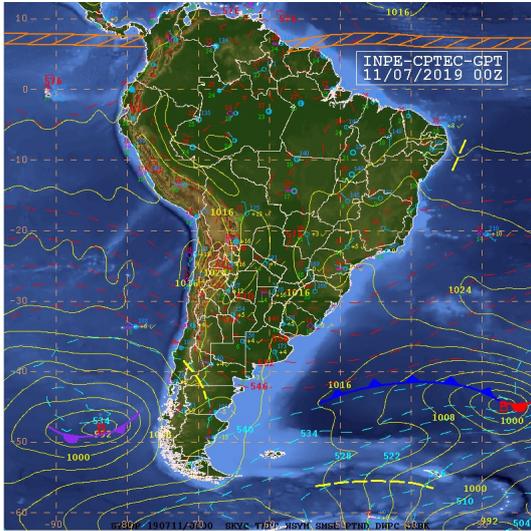
(a)



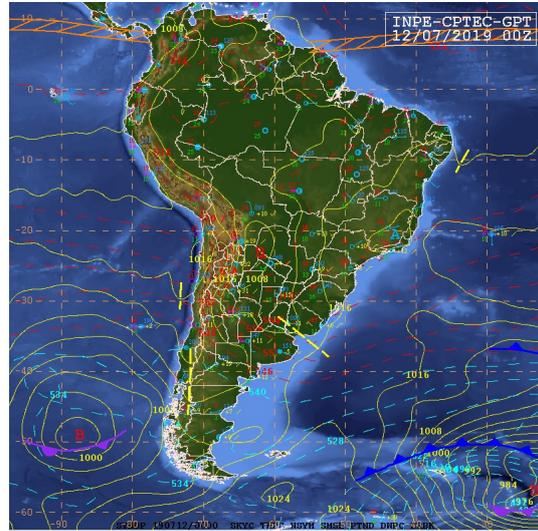
(b)



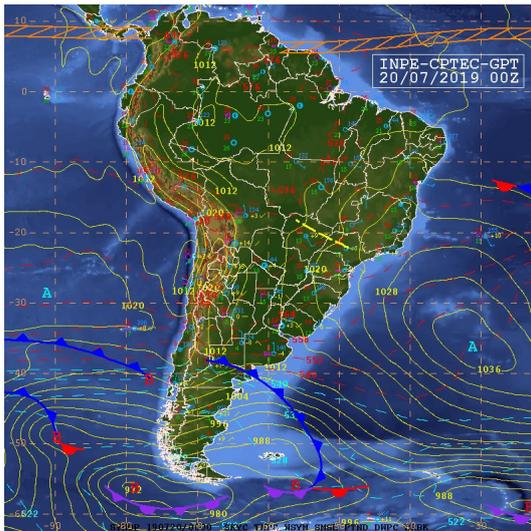
(c)



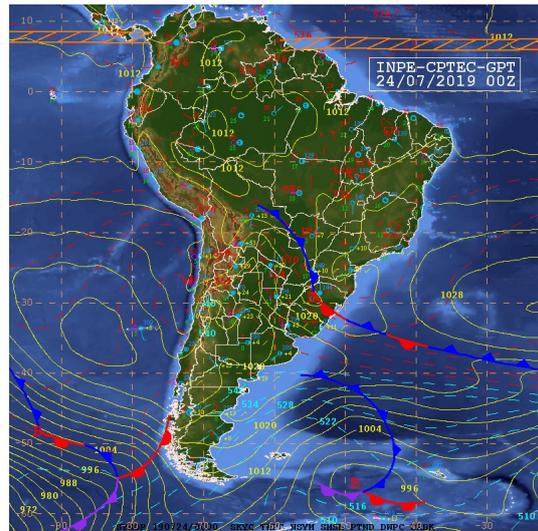
(d)

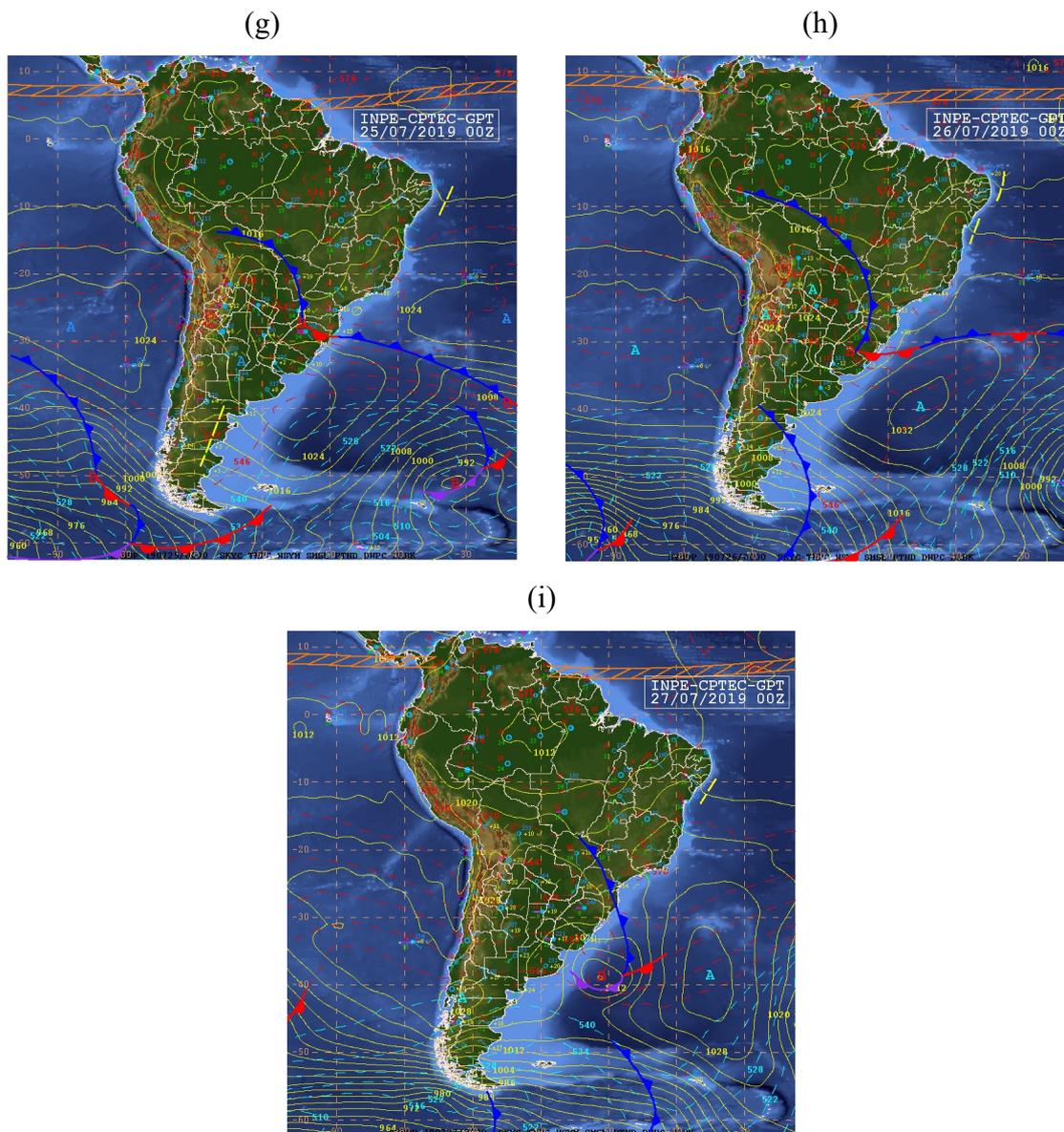


(e)



(f)



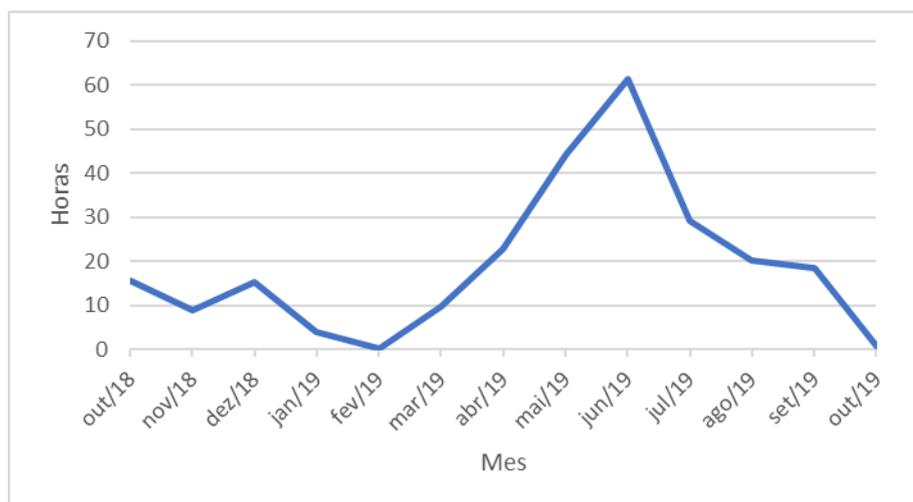


**Figura 6.3.** Cartas de superfície dos dias 09, 10, 11, 12, 20, 24, 25, 26 e 27 de julho do ano de 2019, às 00Z.

Considerando o período de dados, 30 (trinta) datas foram selecionadas considerando com registro nevoeiro entre maio e julho de 2019. Para estes casos, foram simuladas as integrações do modelo WRF, que se iniciaram com a análise de 00 UTC e se estenderam por 48 h, conforme descrito no passo 4 do método. Para ajuste dos multicritérios, (ou árvore de decisão) 8 dias com eventos de nevoeiro (intensos ou não)

foram aleatoriamente selecionados e os demais para avaliação. O objetivo do multicritério a ser estabelecido é prever a ocorrência, início e término, de nevoeiro utilizando o pós-processamento do modelo WRF. Inicialmente, observou-se que seria impossível a utilização dos mesmos critérios aplicados por Payra & Mohan (2014), visto que EMS do SBCT não coleta a mesmas variáveis meteorológicas coletadas em Nova Delhi.

Pereira (2014) afirma que a distribuição do fenômeno nevoeiro, durante os meses do ano, se aproxima a uma distribuição gaussiana (ou normal) e o número de ocorrências deste fenômeno é maior quanto mais próximo do inverno, tendo sua maior concentração no mês de junho, seguido pelos meses de julho e maio. O gráfico da Figura 6.4 mostra esse comportamento para a região de estudo no ano de 2019.



**Figura 6.4. Número de horas com valores de RVR inferior a 1000m no período de outubro de 2018 a setembro de 2019.**

Com as variáveis meteorológicas geradas pela EMS do SBCT, foram criados intervalos, com base no modelo conceitual de formação de nevoeiro, que mais se aproximaram da técnica utilizada por Payra & Mohan (2014) e que foram consideradas neste trabalho, para construção dos multicritérios (ou árvores de decisão), que são:

a) limiar de temperatura do ar a 2m: o nevoeiro se forma com temperaturas baixas, em uma faixa onde essas temperaturas estão próximas ao ponto de orvalho e a saturação do ar;

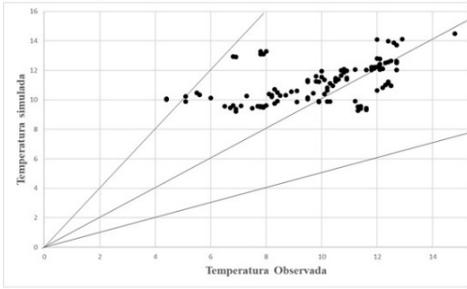
b) umidade relativa do ar elevada: quantidade de umidade elevada, próximo a 100%, no nível mais baixo, favorece as ocorrências de nevoeiro; e

c) intervalo específico da intensidade do vento: em certo intervalo, a velocidade do vento favorece a homogeneização da camada limite, contribuindo para a formação do nevoeiro.

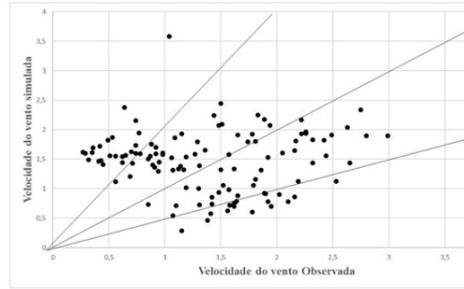
Uma vez que a topografia da região influencia na intensidade e direção do vento, foi adicionado um novo critério que depende da região estudada.

d) intervalo específico da direção do vento: em função da geografia local e das condições sinóticas, a direção do vento contribui para o transporte de umidade, favorecendo a formação de nevoeiro.

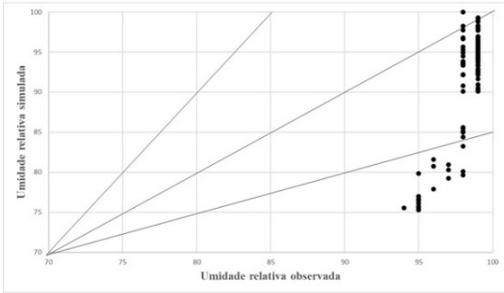
A Figura 6.5 apresenta o comportamento previsto pelo WRF versus observações da EMS do SBCT, para cada 15 minutos, para a temperatura do ar (Figura 6.5A), velocidade do vento (Figura 6.5B) e umidade relativa do ar (Figura 6.5C), durante os eventos utilizados na fase de ajuste dos multicritérios (Passo 3) para os 37 eventos teste. Observa-se que as correlações entre a temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, previstas e observadas, são expressivas e iguais a 0,93; 0,89 e 0,74, respectivamente. Similarmente, na Figura 6.6, considerando apenas direção do vento, visto que a velocidade é analisada acima, são apresentados: o comportamento da simulação da direção do vento WRF (Figura 6.6A) e as observações da direção do vento (Figura 6.6B), para cada 15 minutos, para os 37 eventos teste.



A

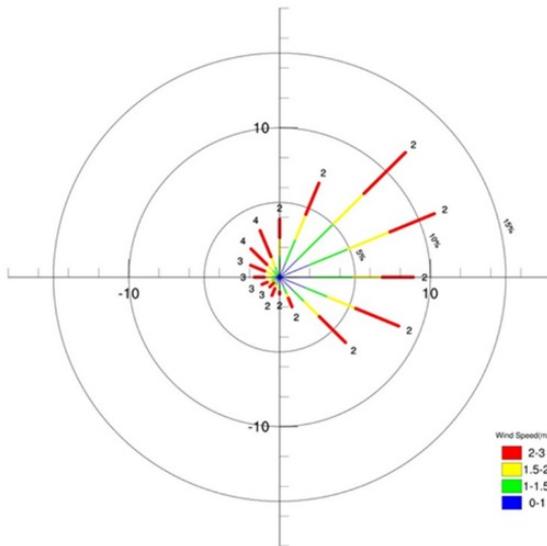


B

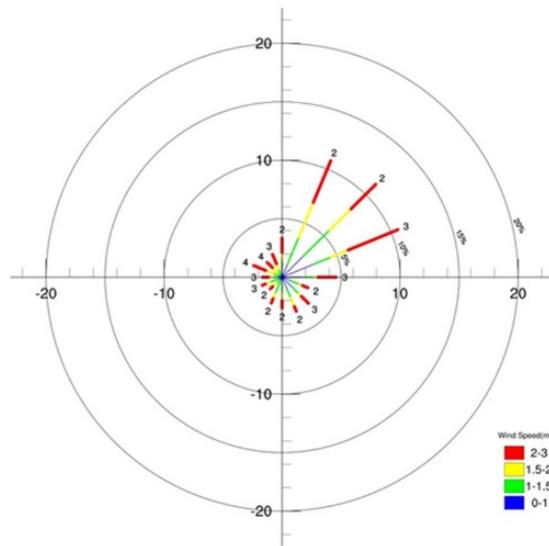


C

**Figura 6.5. Dispersão das simulações WRF versus observação para temperatura do ar (A), velocidade do vento (B) e umidade relativa do ar (C), para os 37 eventos teste.**



A



B

**Figura 6.6. Comportamento da direção do vento previsto (A) e observado (B) para os 37 eventos teste.**

Em geral as simulações são próximas das observações, com viés sistemático entre as simulações do WRF em relação às observações, trazendo a uma dedução de que o WRF pode simular - com viés – a maioria das condições atmosféricas favoráveis à formação de nevoeiro para o aeroporto de Curitiba.

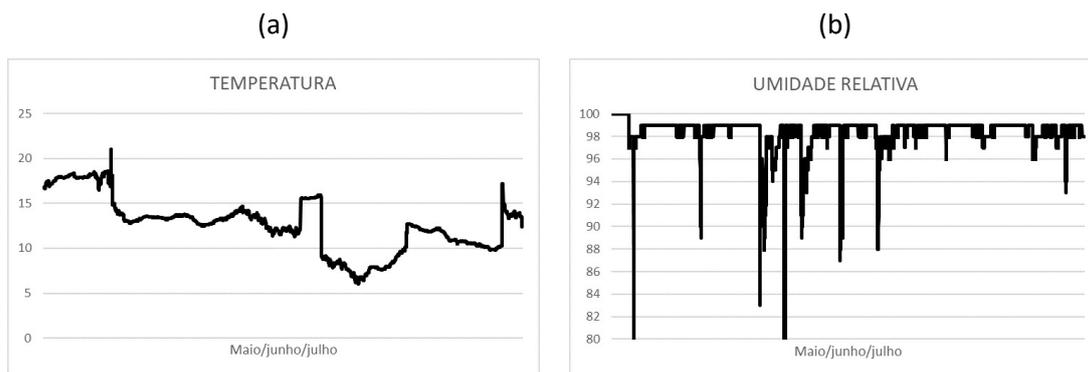
Considerando as análises, simulações versus observações, apresentadas nas Figuras 6.5 e 6.6, é possível estabelecer os seguintes critérios (ou árvores de decisão) preditivos de ocorrência de nevoeiro, a saber:

Critério I: Umidade relativa do ar maior que 95% ( $UR > 95$ ) e velocidade do vento entre 0,5 m/s e 3 m/s ( $0,5 < VEL < 3$ );

Critério II: Umidade Relativa do ar maior que 95% ( $UR > 95$ ) e Temperatura do ar a 2m de altura, entre 8°C e 16°C ( $8 < T < 16$ );

Critério III: Umidade relativa do ar maior que 95% ( $UR > 95$ ); velocidade do vento entre 0,5 m/s e 3 m/s ( $0,5 < VEL < 3$ ) e Temperatura do ar a 2m de altura entre 8°C e 16°C ( $8 < T < 16$ ); e

Critério IV: Umidade relativa do ar maior que 95% ( $UR > 95$ ); velocidade do vento entre 0,5 m/s e 3 m/s ( $0,5 < VEL < 3$ ); Temperatura do ar a 2m de altura entre 8°C e 16°C ( $8 < T < 16$ ); e Direção do vento entre 0° e 240° ( $0 < DIR < 240$ ).



(c)



**Figura 6.7. Comportamento da direção do vento previsto (A) e observado (B) para os 37 eventos teste.**

As variáveis direção e velocidade do vento são de grande importância no estudo dos nevoeiros. Nas figuras 6.6A e 6.6B observa-se as direções predominantes, prevista e observada, respectivamente, sendo possível verificar que na direção predominante dos ventos observados, em 50% dos eventos, a velocidade observada ficou entre 1,5 e 3 m/s.

Os resultados mostram que os critérios I e II são ligeiramente superiores aos resultados dos critérios III e IV, individualmente aplicados. Observa-se que o critério I (relacionado a umidade relativa e velocidade do vento), II (relacionado a umidade relativa e temperatura a 2 m), III (relacionado a umidade relativa, velocidade do vento e temperatura a 2 m) e IV (relacionado a umidade relativa, velocidade do vento, direção do vento e temperatura a 2 m) são capazes de prever o início (fim) com taxa de acerto de 93,2% (91,5%), 93,2% (93,7%), 88,1% (88,7%) e 90% (87,5%) respectivamente. Os critérios tendem a atrasar o início e adiantar o término dos eventos de 15 a 30 minutos. Em suma, os resultados dos critérios são similares com intervalo de variação do percentual de acerto do início (término) de 88 a 93% (87 a 93%).

Os resultados mostram que os pares de critérios I-II e III-IV são similares. Inicialmente foi feita uma contagem dos "S", incluindo os eventos com desvio de 15 minutos para contabilizar os acertos. Observa-se que o par de critérios I-II obteve 90%, 79,3% e 87,5% de acertos no início (com erro médio de 15 minutos - atraso), duração (com erro médio de 20%) e final (com um erro médio de 15 minutos - adiantado) dos 59 eventos de nevoeiro, respectivamente. Já o par III-IV obteve (68,8% - 66,3%), (54,2% -

51,7%) e (66,3% - 63,4%) de acertos no início (com erro médio de 15 minutos - atraso), duração (com erro médio de 47%) e final (sem erro) dos 59 eventos de nevoeiro, respectivamente. Para os dias de nevoeiro analisados, houve apenas dois (09/06/2019 e 22/06/2019) em que o multicritério não previu ocorrência, em nenhum dos critérios utilizados. Em uma análise preliminar, no dia 09/06/2019, não foi possível identificar o motivo do o “erro” do multicritério. Já no dia 22/06/2019, houve formação rápida de nevoeiro (apenas 15 minutos) e pode-se inferir que as condições atmosféricas para a formação de nevoeiro não estavam fortemente pronunciadas neste dia, de acordo com os critérios estabelecidos para a formação de nevoeiro.

**Tabela 6.1. Relação de dias de ocorrência de nevoeiro utilizados para avaliação dos quatro critérios estabelecidos.**

	início (h)	término (h)	eventos	duração (h)	Critério de Previsão				Critério de Previsão			
					(início)				(término)			
					I	II	III	IV	I	II	III	IV
03/05/19	00:45	11:30	3	04:30	s	s	n	n	s	s	n	n
04/05/19	07:30	10:45	4	01:15	n	n	n	n	s	s	n	n
05/05/19	08:15	08:30	1	00:15	s	s	n	n	s	s	n	n
21/05/19	00:00	12:30	3	12:00	s	s	s	s	s	s	s	s
22/05/19	03:30	10:00	5	00:45	s	s	s	s	s	s	s	s
08/06/19	05:45	09:45	3	02:00	s	s	s	s	s	s	n	n
09/06/19	05:15	12:45	2	06:00	n	n	n	n	n	n	n	n
10/06/19	09:00	10:45	2	01:30	s	s	s	s	s	s	s	s
13/06/19	04:45	10:45	6	13:00	s	s	s	s	s	s	s	s
18/06/19	04:15	07:15	1	03:00	s	s	s	s	s	s	s	s
19/06/19	05:30	09:45	2	02:30	s	s	s	n	s	s	s	s
22/06/19	04:00	04:15	1	00:15	n	n	n	n	n	n	n	n
23/06/19	04:00	13:00	2	08:45	s	s	s	s	n	n	n	n
24/06/19	08:15	08:30	1	00:15	s	s	s	s	s	s	s	s
09/07/19	00:45	13:15	2	12:00	s	s	n	n	n	n	n	n
10/07/19	01:30	03:15	1	01:45	s	s	s	s	s	s	s	s
11/07/19	04:00	09:45	2	00:30	n	n	n	n	s	s	n	n
12/07/19	04:00	11:00	5	04:00	s	s	s	s	n	n	n	n
20/07/19	10:15	12:30	1	02:15	s	s	s	s	s	s	s	n
24/07/19	08:00	10:30	3	00:45	s	s	s	s	s	s	s	s
27/07/19	07:00	07:30	1	00:30	s	s	s	s	s	s	s	s
31/07/19	02:45	00:00	8	05:00	s	s	s	s	s	s	s	s
Percentual de acerto					93%	93%	88%	90%	91%	93%	88%	87%

## 7. CONCLUSÃO

Neste trabalho utilizou-se a técnica de multicritérios (árvore de decisão), com base no pós-processamento do WRF e nos dados observacionais, como modelo preditivo de nevoeiro para o aeroporto internacional Afonso Pena (Curitiba).

Os objetivos específicos foram alcançados com o teste do modelo de multicritérios utilizado por Payra & Mohan (2014) sobre a região do aeroporto de Curitiba e com o ajuste dos parâmetros desses multicritérios para a região estudada, bem como a validação desses ajustes realizados para um período independente do utilizado para no teste. Com o cumprimento desses objetivos foi possível alcançar o objetivo geral da pesquisa que foi o de desenvolver um modelo preditivo para o aeroporto internacional Afonso Pena (Curitiba), detectando o início e término dos eventos de nevoeiro, com uma antecedência de 24 horas, utilizando a abordagem de multicritérios (árvore de decisão), considerando dados observacionais obtidos a partir da estação meteorológica de superfície do aeródromo e as previsões geradas pelo modelo atmosférico WRF, configurado para a região do aeroporto de Curitiba.

Os resultados indicam que os quatro critérios estabelecidos são fisicamente representativos da gênese (advecção e radiação) dos eventos de nevoeiro, pois os resultados são similares e capazes de gerar previsões do início e término dos mesmos. No entanto, observa-se que os critérios estabelecidos possuem leve tendência a atrasar o início e adiantar o término do nevoeiro.

Visto as necessidades operacionais do aeroporto em estudo, o modelo preditivo aqui estabelecido pode, talvez, ser utilizado pelos meteorologistas como ferramenta objetiva para emissão das mensagens de alertas das restrições de visibilidade previstas e, assim, corroborar de forma assertiva para o gerenciamento de fluxo aéreo, no que tange operações de pouso e decolagem. Como passo futuro, pretende-se estender a amostra de dados analisados, visando uma consistência estatística dos resultados, e uso

de inteligência computacional (ex: redes neurais e árvore de decisão), visando futura operacionalização do modelo desenvolvido.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTRALIA. Australian Government. Bureau of Meteorology. Hazardous Weather Phenomena: Fog. Commonwealth of Australia, 2013.
- Ballard, S. P., B. W. Golding, and R. N. B. Smith, 1991: Mesoscale model experiment forecasts of the Haar of northeast Scotland. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 2107 – 2123.
- Barry, R. G.; Chorley, R. J. *Atmosphere, Weather and Climate*. 8th ed. London: Routledge, 2003.
- BRASIL, Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Instrução do Comando da Aeronáutica - Estações Meteorológicas de Superfície. ICA 105-15. Rio de Janeiro, 2019.
- BRASIL, Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Instrução de Estações Meteorológicas de Superfície. ICA 105-01. Rio de Janeiro, 2016.
- BRASIL, Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Manual de Operação do WEBMET. MCA 105-16. Rio de Janeiro, 2015.
- Chen, F, Dudhia, J. Coupling and advanced land-surface/hydrology model with the penn State/ NCAR MM5 MODELING SYSTEM. Part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather review*, v. 129, p. 569 – 585, 2001.
- Croft, P. J., Ward B., 2015: Clouds and Fog, in *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*.
- Emmons, G.; Montgomery, R. B., 1947: Note on the Physics of Fog Formation. *Journal of Meteorology*, 4, 206.
- Escobar, 2019: Classificação Sinótica durante a Estação Chuvosa do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*.
- Ferreira, A. G. *Interpretação de Imagens de Satélites Meteorológicos: umavisão prática e operacional do hemisfério sul*. Brasília: Stilo, 2002. 188p.
- França, G. B., Carmo, L. F. R., Almeida, M. V., Neto, F. L. A. Fog at the Guarulhos International Airport from 1951 to 2015. *International Publishing AG*, part of Springer Nature, doi: 10.1007/s00024-018-1781-5, 2018.
- França, G. B.; Almeida, M. V.; Rossete, A. C. An Automated Nowcasting Model of Significant Instability Events in the Flight Terminal Area of Rio De Janeiro, Brazil. *Atmospheric Measurement Techniques* 9: 2335–2344. doi:10.5194/amt-9-2335-2016, 2016.

- GANP, 2016: Plano Global de Navegação Aérea. Disponível em <<https://www.icao.int/airnavigation/Documents/GANP-2016-interactive.pdf>>. Acesso em 23 de fevereiro de 2020.
- Gultepe, I., Pearson, J., Milbrandt, J. A., Hansen, B. The Fog Remote Sensing and Modeling Field Project, BAMS, 2009.
- Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S. C., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., Müller, M. D., Pagowski, M., Hansen, B., Ellrod G., Jacobs, W., Toth G. & Cober, S. G. 2007b. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Journal of Pure and Applied Geophysics*, 164, 1121–1159.
- Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P., Zhou, B., França, G., Almeida. A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology. *Pure and Applied Geophysics*, 2019.
- Gultepe, I. A New Visibility Parameterization for Warm-Fog Applications in Numerical Weather Prediction Models, 2006, *Journal of Applied Meteorological and Climatological*, 2006.
- Iacono, M. J., Delamere J. S., Mlawer, E .J., Shepard, M. W., Clough, S. A., Collins, W. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER Radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, D13103, 2008.
- ICEA, 2019: Sistema de Geração e Disponibilização de Informações Aeronáuticas do Instituto de Controle do Espaço Aéreo. Disponível em <<http://clima.icea.gov.br/>>. Acesso em 23 de fevereiro de 2020.
- INFRAERO, 2019: Anuário Estatístico Operacional da INFRAERO de 2018. Disponível em <[http://www4.infraero.gov.br/media/677124/ANUARIO\\_2018.PDF](http://www4.infraero.gov.br/media/677124/ANUARIO_2018.PDF)>. Acesso em 23 de fevereiro de 2020.
- Janjic, Z. I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes, *Mon. Weather Rev.* 122, 927-945, 1994.
- Kain, J. S. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, JAM8805, 2004.
- Kessler, E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation, *Meteor. Monogra.*, 32, American Meteorology Society, 84 p, 1969.
- Kunkel, B., 1984: Parametrization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog model. *J. Appl. Meteor.*, 23, 34 – 41.

- Kuo, H-L., J. F. Bresch, M-D. Cheng, J. Kain, D. B. Parsons, W-K. Tao, and D-L. Zhang. 1997. Summary of a mini workshop on cumulus parameterization for mesoscale models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78:475–491.
- Neumann, J. 1989, Forecasts of fine weather in the literature of classical antiquity, *Bull. Am. Meteor. Soc.* 70, 46–48.
- NOAA, 2009: National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em <<https://www.weather.gov/safety/fog>>. Acesso em 23 de fevereiro de 2020.
- Oliveira, M. V., 2019: Caracterização e Previsão dos Nevoeiros no Aeródromo SBCT utilizando Inteligência Artificial. Departamento de Meteorologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 173p.
- Payra, S., Mohan, M. Multirule Based Diagnostic Approach for the Fog Predictions Using WRF Modelling Tool. Academic Editor: A. N. V. Satyanarayana, 2014.
- Pagowski, M., Gultepe, I., King, P. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario. *J. Appl. Meteor.*, 43, 3–16, 2004.
- Pereira, M. C. M. 2014. Emprego de Redes Neurais Artificiais RBF na Previsão de Nevoeiro no Aeroporto Internacional Afonso Pena. Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, 109p.
- Petterssen, S., 1940: *Weather Analysis and Forecasting*. 1st ed. Mc-Graw-Hill, 286 p.
- Richardson, 1922: *Weather prediction by numerical process, 1881-1953*, Topics Weather forecasting, Publisher Cambridge, The University press Collection.
- Skamarock, W.C, Klemp, J. B., Dudhia, J., D. O., Gill, Barker, D. M., Duda, M., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008: A description of the advanced research WRF v.3, NCAR Technical Note.
- Varejão-Silva, M. A. *Meteorologia e Climatologia*. 2 ed. Brasília: INMET. Pax, 2005.
- Wallace, J. M., Hobbs, P. V. *Atmospheric science – an introductory survey*. 2a. ed. Amsterdam: Elsevier, 2006. 483 p.
- Wang, W. and N. L. Seaman. 1997. A comparison of convective parameterization schemes in a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.* 125:252–278.
- Willett, H. C. 1928, Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting, *Monthly Weather: Rev.* 56, 435–468.

WMO, 1992, International Meteorological Vocabulary, World Meteorological Organization, (WMO-No 1182) Geneva, 276 pp. DOI: 10.1002/qj.49709339524.