



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA
VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO
OPERACIONAL WRF PARA O SUL DE MINAS
GERIAS**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Flávio Augusto dos Santos

Itajubá, MG, Brasil

2024

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA
VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO
OPERACIONAL WRF PARA O SUL DE MINAS GERAIS**

por

Flávio Augusto dos Santos

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Vanessa Silveira Barreto Carvalho
Coorientador: Michelle Simões Reboita

Itajubá, MG, Brasil
2024

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO DOS
RESULTADOS DO MODELO OPERACIONAL WRF PARA O SUL DE
MINAS GERAIS**

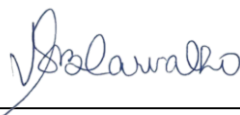
elaborada por

Flavio Augusto dos Santos

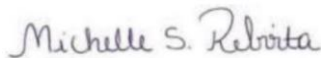
Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Vanessa Silveira Barreto Carvalho Dra. (UNIFEI)
(Presidente/Orientadora)



Michelle Simões Reboita, Dra.
(Coorientadora)

Documento assinado digitalmente



BENEDITO CLAUDIO DA SILVA
Data: 19/11/2024 15:04:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Benedito Claudio da Silva, Dr. (UNIFEI)



João Gabriel Martins Ribeiro, Msc. (UNIFEI)

Itajubá, 19 de novembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por me proporcionar todas as oportunidades que me deu, e por todos que colocaram na minha vida. Agradeço aos meus pais, Márcia e Edmilson que me deram a vida, que me ensinaram a vida toda, cuidaram de mim e fizeram de tudo para que eu pudesse ter as melhores condições. Agradeço todos os demais parentes, por todos os conselhos, ajuda e etc. Sou grato a minha namorada, que também compartilhou comigo momentos de felicidade e tristeza sempre sendo um porto seguro, ao qual eu sempre pude contar, por me aceitar do jeito que sou e sempre me ajudando a melhorar.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos e companheiros de jornada, ao qual eu tenho muito apreço, Vitor (Copal), Raul, Luiz (Jesus), Fabiana (Fabi), Juliana (Ju), e aos demais que apareceram ao longo desta, saibam que todos moram no meu coração e que nunca serão esquecidos. Agradeço também a todos os meus professores da faculdade, pela paciência e dedicação no ensino, ao meu orientador de IC Diego Souza, por me proporcionar a oportunidade de estar aprendendo coisas novas na área de Satélites e ter novas experiências.

Expresso de todo o coração o apreço a Professora Vanessa Carvalho, por me guiar nesta jornada, sempre sendo paciente, me orientando no trabalho e ensinando, sempre me proporcionando desafios e experiências, você é uma verdadeira professora que me inspirou a todo o momento.

*Para meus pais Edmilson da Silva Santos
Márcia Flávia Melo Santos*

“Grandes líderes inspiram a grandeza em outras pessoas “
(Star Wars: The Clone Wars)

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO OPERACIONAL WRF PARA O SUL DE MINAS GERAIS

AUTOR(A): Flávio Augusto dos Santos
ORIENTADOR: Vanessa Silveira Barreto Carvalho
Local e Data da Defesa: Itajubá, 19 de novembro de 2024.

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia para validação dos resultados do modelo operacional WRF (Weather Research and Forecasting) aplicado à região do Sul de Minas Gerais (SMG). O modelo WRF é rodado diariamente a partir do Sistema Numérico-Operacional de Previsão de Tempo do Sul de Minas Gerais (SiNOPT) no CEPReMG na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e considera duas grades que abrangem parte do SMG, aninhadas com resolução espacial horizontal de 12 km e 3 km, com uma resolução temporal de 1 hora. O processo de validação das previsões foi realizado a partir do desenvolvimento de um programa em Python considerando a geração de gráficos comparativos dos dados simulados e medidos e do cálculo de diversos parâmetros estatísticos. Para testar a metodologia, foi considerado o período de estudo entre os dias 19 de fevereiro e 04 de março de 2024. Diversas análises estatísticas foram implementadas para avaliar o desempenho do modelo, e áreas de interesse específicas na região foram selecionadas para um estudo mais detalhado. Os resultados da metodologia aplicado para a cidade de Itajubá, se mostraram mais concordantes para temperatura que obteve os menores desvios e melhores índices, já a umidade e precipitação demonstraram menor confiabilidade no que diz respeito a simulação.

Palavras-chave: Weather Research and Forecast, análise estatística, previsão numérica do tempo.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Representação da área de estudo.....	15
FIGURA 2 – Área de estudo e configuração das grades do WRF.....	16
FIGURA 3 – Localização das estações.....	18
FIGURA 4 – Fluxograma contendo o passo a passo do programa.....	22
FIGURA 5 – Demonstração do Programa.....	23
FIGURA 6 – Gráficos do dia 20/02/2024 para a cidade de Itajubá.....	24

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 1 - Configuração do modelo e parametrizações físicas.....	6
TABELA 2 – Tabela de Contingência.....	21
TABELA 3 - Dados da validação para a Cidade de Itajubá.....	25
TABELA 4 - Resultados mensais para a cidade de Itajubá.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

PNT – Previsão Numérica de Tempo

GFS – Global Forecast System

WRF – Weather Research & Forecasting Model

SMG – Sul de Minas Gerais

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

CEPreMG – Centro de Estudos e Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

SINOPT– Sistema Numérico-Operacional de Previsão de Tempo do Sul de Minas Gerais

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

NetCDF – Network Common Data Form

RMSE – Raiz do erro quadrático médio

FAR – Razão de falso alarme

POD – Probabilidade de detecção

CSI – Índice de sucesso crítico

Sumário

RESUMO.....	10
1. INTRODUÇÃO	12
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
2.1. REGIÃO DE ESTUDO	15
2.2. DADOS E PERÍODO DE ESTUDO	16
2.3. MEDIDAS DE DESEMPENHO PARA VALIDAÇÃO DO MODELO WRF.....	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
3.1. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO.....	21
3.2. RESULTADOS DO PERÍODO DE TESTE	23
4. CONCLUSÃO.....	28
APÊNDICE A - FIGURA DO DIA 21 E 23 DE FEVEREIRO DE 2024 PARA A CIDADE DE CALDAS DE A) TEMPERATURA, B) PRECIPITAÇÃO E C) UMIDADE	33
APÊNDICE B - FIGURA DO DIA 21 E 23 DE FEVEREIRO DE 2024 PARA A CIDADE DE DELFIM MOREIRA DE A) TEMPERATURA, B) PRECIPITAÇÃO E C) UMIDADE.....	34
APÊNDICE C - FIGURA DO DIA 21 E 23 DE FEVEREIRO DE 2024 PARA A CIDADE DE MARIA DA FÉ DE A) TEMPERATURA, B) PRECIPITAÇÃO E C) UMIDADE.....	35
APÊNDICE D - FIGURA DO DIA 21 E 23 DE FEVEREIRO DE 2024 PARA A CIDADE DE MONTE VERDE DE A) TEMPERATURA, B) PRECIPITAÇÃO E C) UMIDADE.....	36
APÊNDICE E – FIGURA DO DIA 21 E 23 DE FEVEREIRO DE 2024 PARA A CIDADE DE PASSA QUATRO DE A) TEMPERATURA, B) PRECIPITAÇÃO E C) UMIDADE.....	37
APÊNDICE F - TABELA DE DADOS DA VALIDAÇÃO PARA A CIDADE DE CALDAS	38
APÊNDICE G - TABELA DE DADOS DA VALIDAÇÃO PARA A CIDADE DE DELFIM MOREIRA	39
APÊNDICE H - TABELA DE DADOS DA VALIDAÇÃO PARA A CIDADE DE MARIA DA FÉ.....	40
APÊNDICE I - TABELA DE DADOS DA VALIDAÇÃO PARA A CIDADE DE MONTE VERDE	41
APÊNDICE J - TABELA DE DADOS DA VALIDAÇÃO PARA A CIDADE DE PASSA QUATRO	42
APÊNDICE K - TABELA DE RESULTADOS MENSAIS DA PRECIPITAÇÃO	43
APÊNDICE L - TABELA DE RESULTADOS MENSAIS DA TEMPERATURA	44

APÊNDICE M - TABELA DE RESULTADOS MENSAIS DA UMIDADE RELATIVA	
.....	45

1. INTRODUÇÃO

Em 1904, Vilhelm Bjerkness formalizou a base do conhecimento da previsão numérica do tempo (PNT), propondo que esta fosse abordada como um problema de condição inicial, sugerindo que, ao descrever o estado atual da atmosfera e aplicar as equações matemáticas que regem sua evolução, é possível prever as condições de tempo futuro (Bjerknes, 1904; Lynch, 2007). Nesse contexto, surgiram os modelos de PNT que utilizam a capacidade de processamento dos computadores para gerar uma previsão do futuro estado atmosférico. Os modelos de PNT fundamentam-se em equações físicas que descrevem o comportamento hidrodinâmico da atmosfera (“IPMA - Previsão Numérica do Tempo”, [s.d.]), prevendo o futuro estado da atmosfera a partir de condições iniciais específicas, considerando processos como radiação, nuvens, precipitação e trocas superficiais por meio de esquemas de parametrização.

Os modelos de PNT são classificados com base na escala espacial em que operam, sendo definidos como globais ou regionais. Segundo Kalnay (2003), os modelos globais, como o *Global Forecast System* (GFS) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), são empregados para previsões de médio alcance (até de 16 dias com 0,25° de resolução espacial, como por exemplo, no caso do GFS). Já os modelos regionais são usados para previsões de curto prazo (1-5 dias) e oferecem maior resolução horizontal espacial como o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF), permitindo maior precisão e a simulação de fenômenos locais. Contudo, os modelos regionais representam uma área limitada do globo e dependem de condições de fronteira fornecidas por modelos globais, o que limita sua autonomia e duração efetiva. Ainda assim, eles são essenciais para fornecer previsões mais detalhadas, especialmente em regiões de terreno complexo, como é o caso da região Sul de Minas Gerais (SMG), bem como em áreas costeiras ou próximas a grandes corpos d’água. A capacidade desses modelos de representar fenômenos de mesoescala permite previsões mais acuradas das condições atmosféricas, com impacto direto na mitigação de eventos extremos.

Um exemplo desse impacto foi analisado por Sugahara et al. (2010), que estudo analisou um evento extremo de precipitação ocorrido no Vale do Paraíba entre 1º e 5 de janeiro de 2000, utilizando o modelo de distribuição generalizada de Pareto (DGP) para 10 estações meteorológicas. Esse evento, registrado por dez estações meteorológicas da região, foi classificado como extremamente raro para a área, com

uma probabilidade anual de ocorrência variando entre 0,0086% e 2,3%. As repercussões desse fenômeno não se limitaram ao Vale do Paraíba, mas também atingiram o SMG. Na cidade de Itajubá, por exemplo, o evento provocou inundações e alagamentos, com uma chuva que superou mais de 180 mm, sendo responsável por um aumento de 8 metros no nível do Rio Sapucaí (Campos, 2011; Pinheiro, 2005)

Vale ressaltar que diversos fatores meteorológicos impactam a distribuição espacial e temporal da precipitação no SMG. Reboita et al. (2015), por exemplo, citam como principais fatores que afetam a precipitação na região: a massa de ar tropical atlântica que atinge frequentemente a área durante o verão, causando muitas chuvas; as tempestades convectivas que podem causar grandes quantidades de precipitação em um curto período de tempo, principalmente, durante o verão; a presença da massa de ar polar que vem do Atlântico e predomina no inverno, reduzindo a quantidade de chuva nas regiões de maior latitude; além da presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que pode causar chuvas prolongadas e volumosas, especialmente durante a primavera e o verão.

De acordo com Johnson et al. (1995), o relevo também desempenha um papel significativo na distribuição espacial da precipitação, modificando os padrões existentes. O SMG é uma região com precipitação média anual de aproximadamente 1600 mm e possui histórico de ocorrência de eventos extremos de precipitação que impactam diretamente a população e economia regional (SILVA, 2013). Campos et. al (2011), por exemplo, analisaram os dados históricos de precipitação entre abril de 1998 e julho de 2011, revelando a ocorrência de 21 eventos com totais de precipitação superiores a 50 mm/dia. Chaves et al. (2023) apresentaram um estudo sobre um evento extremo de precipitação que registrou aproximadamente 74 mm na cidade de Itajubá no dia 27 de fevereiro de 2023 e causou diversos danos, como alagamentos e danos a infraestrutura da região, sendo gerado a partir de processos termodinâmicos.

Nesse contexto, o Centro de Estudos e Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), realiza, em modo operacional, a PNT com o modelo WRF, por meio do Sistema Numérico-Operacional de Previsão de Tempo do Sul de Minas Gerais (SiNOPT) conforme apresentado por Campos et al. (2016). O SiNOPT teve início em 2014, com a utilização dos dados fornecidos pelo GFS com resolução horizontal de 0,5° para a geração das condições iniciais e de fronteira. O sistema considerava três grades aninhadas com resoluções horizontais de 27, 9 e 3 km. Campos et al. (2016) avaliaram a primeira versão do

SiNOPT encontrando previsões que subestimaram a temperatura do ar a 2 metros, além de terem dificuldade na representação da evolução temporal da precipitação, contudo seu acumulado mensal apresentou bons resultados. Em 2019, contudo, o sistema em operação foi modificado devido à disponibilidade de dados do GFS com uma resolução horizontal mais refinada de $0,25^\circ$ e ao aumento da capacidade computacional para simulações. A adoção de uma nova versão do modelo WRF (versão 4.0), a expansão do domínio do modelo e a redução para apenas duas grades aninhadas com resoluções horizontais de 12 Km e 3 km foram algumas das mudanças relatadas por Araújo et al. (2023). Neste estudo, os resultados do SiNOPT durante um período com a passagem de frente fria sobre a região foram avaliados revelando uma boa capacidade de prever as variações de temperatura, pressão atmosféricas e o comportamentos dos ventos associadas à passagem da frente fria, já na identificação áreas de alta precipitação, houve discrepâncias em relação à intensidade e à distribuição espacial das chuvas.

Segundo Garcia et al. (2023), o CEPReMG usa o modelo WRF desde 2017 para melhorar a previsão do tempo, mas poucos estudos avaliaram os melhores esquemas de parametrização física para simular a precipitação na região, conhecida por seu terreno complexo e eventos extremos de precipitação com grandes impactos socioeconômicos. Ainda sobre Garcia, avaliou-se diferentes esquemas de convecção de cumulus, usando o evento de precipitação extrema entre 31 de dezembro de 2021 e 2 de janeiro de 2022 como base. Os resultados mostraram que, na grade de menor resolução (D-01), o esquema GF produziu simulações de precipitação mais próximas dos dados MERGE, embora esses dados subestimem as taxas de precipitação em comparação com medições in situ. A análise adicional com dados ERA5 e GFS indicou que o GFS reproduziu padrões espaciais semelhantes aos do ERA5, mas com diferenças significativas nos ventos e isóbaras, sugerindo possíveis fontes de erro. Para o domínio D-02, o esquema GF também mostrou melhor coerência com as observações de precipitação acumulada, indicando que o esquema GF atualmente usado é o mais adequado para a previsão de precipitação na região.

Contudo, destaca-se que apesar dos resultados obtidos por Campos et al., (2016); Araújo et al., (2023) e Garcia et al. (2023), a validação dos resultados obtidos por meio do SiNOPT ainda não é realizada de forma operacional. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia operacional para a validação dos resultados obtidos do modelo WRF para o Sul de

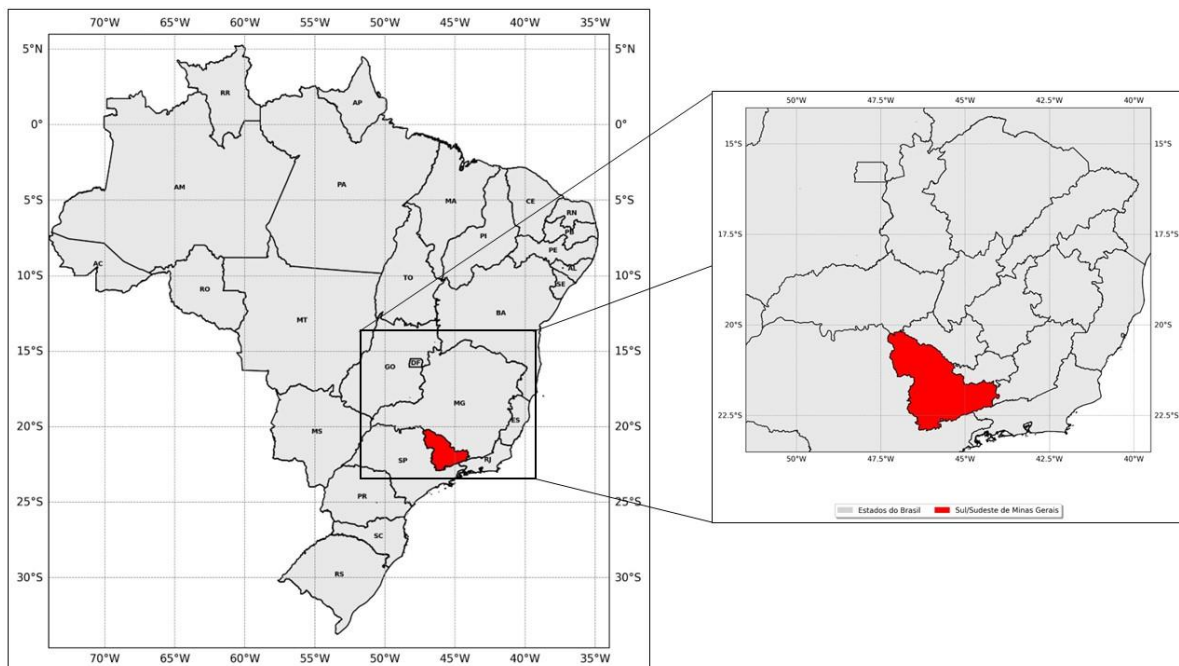
Minas Gerais, com foco principal na cidade de Itajubá. Espera-se com a realização deste estudo, que a metodologia proposta seja implementada de forma operacional e disponibilizada no site do CEPReMG, para a divulgação do conhecimento e conscientização da população acerca da confiabilidade e das incertezas produzidas a partir dos resultados do SiNOPT.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Região de Estudo

O SMG, cuja localização está ilustrada na Figura 1, abrange uma área de aproximadamente 49.575,93 km², com 162 municípios onde vive uma população de 2.897.745 habitantes (IBGE, 2022). Segundo o relatório do Grupo de Estudos Econômicos do Sul de Minas (2020), evidencia que o SMG possui uma economia diversificada, com destaque para o agronegócio e a indústria alimentícia, além de um setor de comércio e serviços robusto impulsionado pelo turismo. André et al. (2018), utilizando dados históricos de precipitação (1975-2015), verificou que a região de MG é afetada com maior prevalência nos meses de verão por eventos de precipitação extrema geralmente associados com a ZCAS, ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul), Frentes Frias, Sistemas Convectivos locais e Correntes de Jato em Altitude, corroborando os resultados apresentados por Reboita et al. (2010).

FIGURA 1 – Representação da área de estudo em vermelho está o SMG

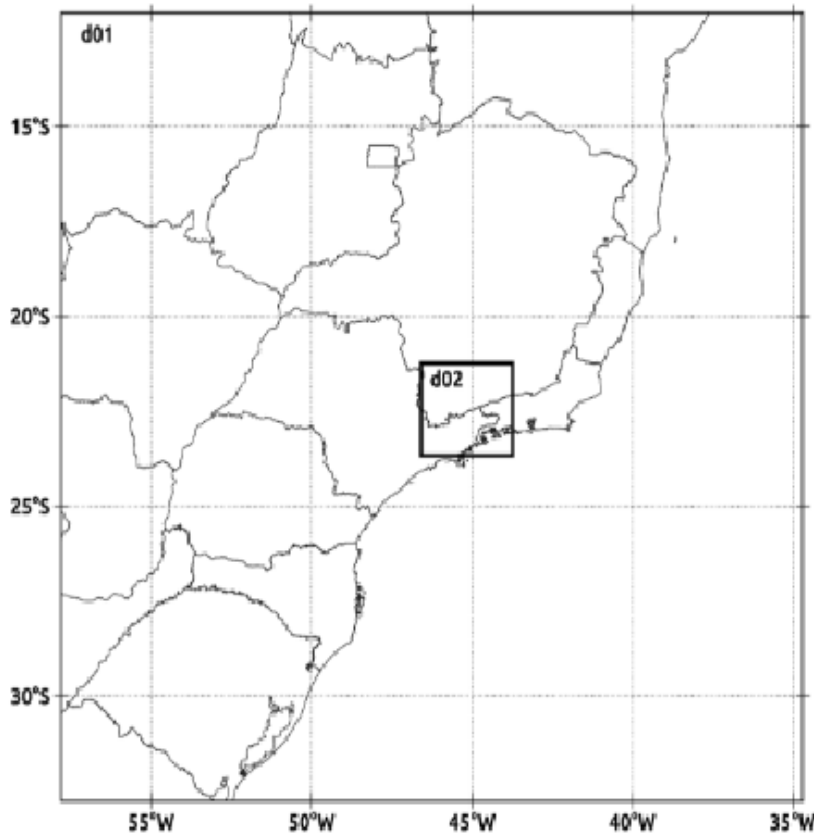


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2. Dados e Período de Estudo

Foram utilizadas as saídas diárias do modelo WRF produzidas a partir do SiNOPT que realiza previsões diárias de 72 horas com o modelo WRF para a região SMG sendo as primeiras 24 horas da simulação descartadas das análises com o propósito de eliminar erros de “spin-up”. As condições iniciais e de fronteira necessárias para simulação com o WRF são provenientes das rodadas operacionais do modelo global GFS, com resolução horizontal de $0,25^\circ$ e resolução temporal de 3 horas. O modelo foi configurado com duas grades aninhadas com resolução espacial horizontal de 12 km (d01) e 3 km (d02), conforme Figura 2, utilizando 42 níveis verticais em ambas e seguindo as parametrizações da Tabela 1. Somente os resultados da grade menor (3 km) foram considerados durante este estudo. As variáveis selecionadas para validação foram: precipitação [RAINCC], temperatura do ar a 2 metros [T2] e umidade relativa do ar [UR].

FIGURA 2 - Área de estudo e configuração das grades do WRF, sendo: grade 1 (d01) de 12 km e a grade 2 (d02) de 3 km.



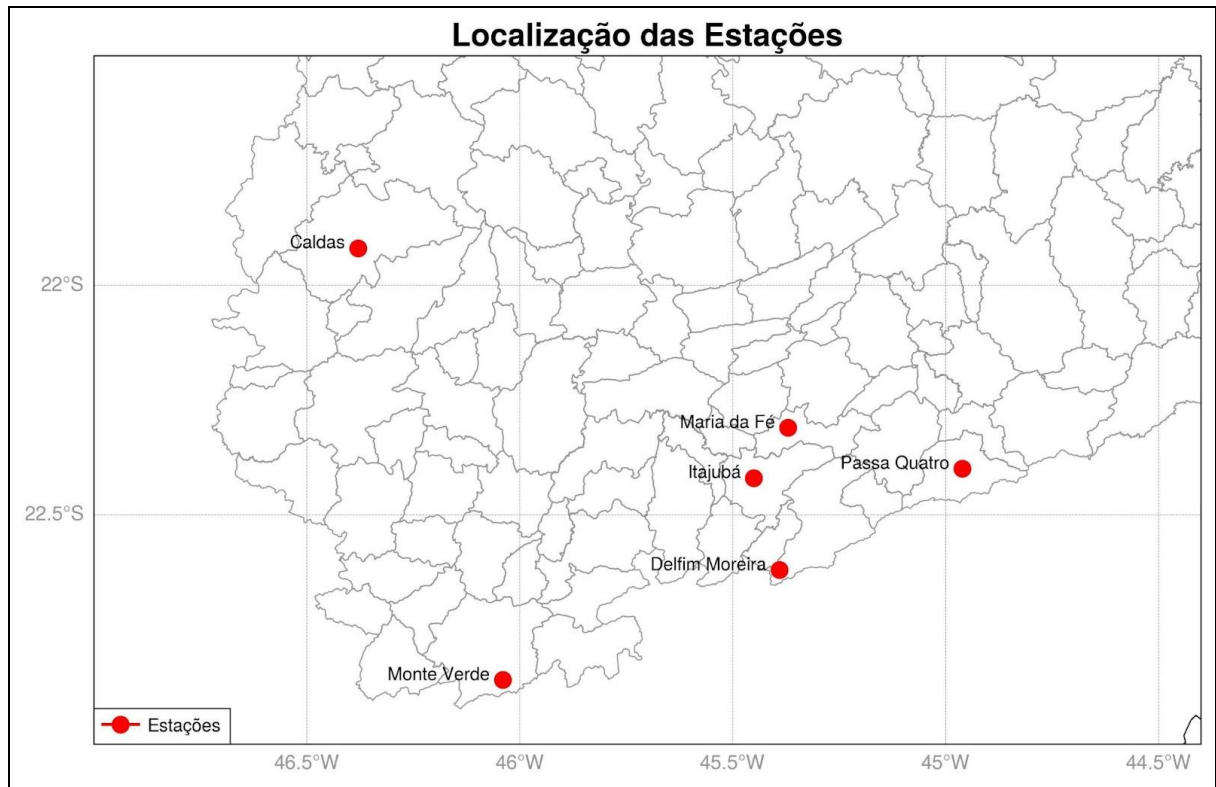
Fonte: ARAÚJO et al. (2023)

Tabela 1 - Configuração do modelo e parametrizações físicas.

Parâmetro	Descrição
Microfísica	WSM3 (Hong et al., 2004)
Convecção Cumulus	convecção cumulus, ativa somente para d01 (Grell e Freitas, 2014)
Camada limite planetária	Yonsei University (Hong et al., 2006)
Superfície	Noah Land Surface Model (Niu et al., 2011).
Onda curta	Dudhia (Dudhia, 1989)
Onda longa	RRTM (Mlawer et al., 1997)

Para o desenvolvimento do modelo de validação dos dados operacionais do modelo WRF foram utilizados dados horários de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que estão localizados nas cidades de Caldas (21,92 °S; 46,38 °W), Passa Quatro (22,40 °S; 44,96 °W), Monte Verde (22,86 °S; 46,04 °W), Maria da Fé (22,31 °S; 45,37 °W), além da estação da Prefeitura Municipal de Delfim Moreira (22,62 °S; 45,39 °W). Foram considerados os dados do período de 19 de fevereiro até o dia 04 de março de 2024. A escolha do período é devido à disponibilidade dos dados e uma vez que durante esse período foram registradas grandes variações na temperatura e ocorrência de períodos secos e de precipitação. Além disso, dados horários da estação automática da Universidade Federal de Itajubá (22,41 °S; 45,45 °W) para o mesmo período também foram considerados. A distribuição espacial das estações consideradas está ilustrada na Figura 3.

FIGURA 3 - Localização das estações



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3. Medidas de Desempenho para Validação do Modelo WRF

A metodologia proposta para validação dos resultados obtidos a partir do WRF terá etapas para execução diária e mensal. Para execução de toda a metodologia proposta foi desenvolvido um programa em linguagem de programação python.

Para a avaliação diária dos resultados obtidos a partir do SiNOPT, foram propostos gráficos que comparam de forma direta os valores previstos e observados das variáveis: temperatura, umidade e precipitação. Também foi proposta a utilização de técnicas estatísticas para validação dos resultados obtidos. As medidas de desempenho para a avaliação quantitativa usadas neste trabalho são descritas por Wilks (2011), sendo essas:

- Desvio padrão das séries: é uma medida que indica o grau de dispersão ou variabilidade dos valores em um conjunto de dados. Em outras palavras, nos diz o quanto os valores de um conjunto estão "espalhados" em relação à média desse conjunto.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum |x - \mu|^2}{N}}$$

- Erro médio: O erro médio é simplesmente a diferença entre a previsão média e a observação média e, portanto, expressa a tendência da previsão em subestimar ou superestimar os valores de determinada variável.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n F_i - O_i}{n}$$

- Raiz do erro quadrático médio (RMSE): é o desvio padrão dos erros do nível de previsão da precipitação (resíduos), ou seja, representa uma medida da dispersão destes resíduos e pode ser interpretada de forma similar ao ME.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2}{n}}$$

- Correlação de Pearson: A correlação de Pearson é uma medida abreviada e de valor único da associação entre duas variáveis, geralmente denotadas como x e y. Ela varia entre -1 e 1. Um coeficiente de -1 sugere uma associação linear negativa perfeita entre x e y, enquanto um coeficiente de 1 indica uma associação linear positiva perfeita. No entanto, um coeficiente de 1 não fornece informações sobre a inclinação da relação linear perfeita, exceto que não é zero. A correlação é denotada pela seguinte fórmula:

$$r_{xy} = \frac{Cov(x, y)}{S_x S_y}$$

- Índice de concordância: O índice de concordância usado neste trabalho será o desenvolvido por Willmott em 1981, parte da suposição de que toda a variação nos erros está contida na previsão, assumindo que a observação está livre de erros. Este índice avalia o grau de correspondência entre os desvios das observações em relação à média observada e os desvios das previsões em relação à mesma média. Ele é adimensional e varia entre 0 e 1, onde 1 indica uma concordância perfeita entre observação e previsão, enquanto 0 indica completa discordância. De acordo com Emery et al. (2001), o índice de Willmott condensa todas as diferenças entre as estimativas do modelo e as observações em uma única medida estatística, considerando uma determinada região de análise e um período de tempo específico. A função a seguir demonstra a forma que é calculado o índice:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right]$$

- KGE: Gupta et al. (2009) desenvolveram essa métrica para demonstrar a importância relativa dos três componentes do NSE: correlação, tendência e variabilidade. Isso foi feito no contexto da modelagem hidrológica, com o objetivo de resolver problemas associados ao NSE. Kling propôs, em 2009, uma versão modificada do KGE para evitar a correlação cruzada entre as proporções de viés e variabilidade, e para o presente estudo foi utilizada esta versão.

$$KGE_{2012} = 1 - ED$$

$$ED = \sqrt{(s[1] * (r - 1))^2 + (s[2] * (\gamma - 1))^2 + (s[3] * (\beta - 1))^2}$$

$$r = \text{Pearson Correlation Coefficient}$$

$$\beta = \mu_s / \mu_o$$

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o}$$

- Probabilidade de detecção (POD): representa a fração da região observada que foi bem prevista, que pode variar entre zero (desempenho fraco) e um (desempenho ótimo), dada por

$$POD = \frac{A}{A + C}$$

- Razão de falsos alarmes (FAR): é sensível à fração da área de previsão que não observou o evento. Esta medida estatística tem uma orientação negativa; significa que valores mais baixos (zero) representam uma melhor previsão e valores mais altos (um) o pior desempenho, e é definida como

$$FAR = \frac{B}{A + B}$$

- Índice de sucesso crítico (CSI): é uma medida de verificação de desempenho igual ao número total de previsões de precipitação corretas (acertos) dividido pelo número total de previsões de precipitação mais o número de erros (acertos+alarmes falsos+erros). As interpretações dos valores esperados são semelhantes às do POD.

$$CSI = \frac{A}{A + B + C}$$

Para o cálculo relacionado ao POD, FAR e CSI foi utilizado a seguinte tabela:

Tabela 2 – Tabela de Contingência

Tabela de Contingência		Observado	
		Chuva	Não-Chuva
Previsto	Chuva	A	B
	Não-Chuva	C	D

Ressalta-se que diariamente, foi realizado o cálculo do desvio padrão, erro médio, RMSE, correlação de Pearson, índice de concordância. Ao final do mês, além dos parâmetros mencionados, também foram calculados os seguintes índices: POD, FAR, CSI, KGE.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Desenvolvimento da Metodologia de Validação

A primeira etapa do programa de validação dos resultados ocorrerá diariamente no horário das 12:00, um período posterior a finalização da simulação e da geração das imagens de resultados que já são disponibilizados pelo CEPReMG (www.meteorologia.unifei.edu.br). Nesta etapa ocorrerá a leitura dos dados de saída do WRF e o download dos dados das estações meteorológicas de forma automática.

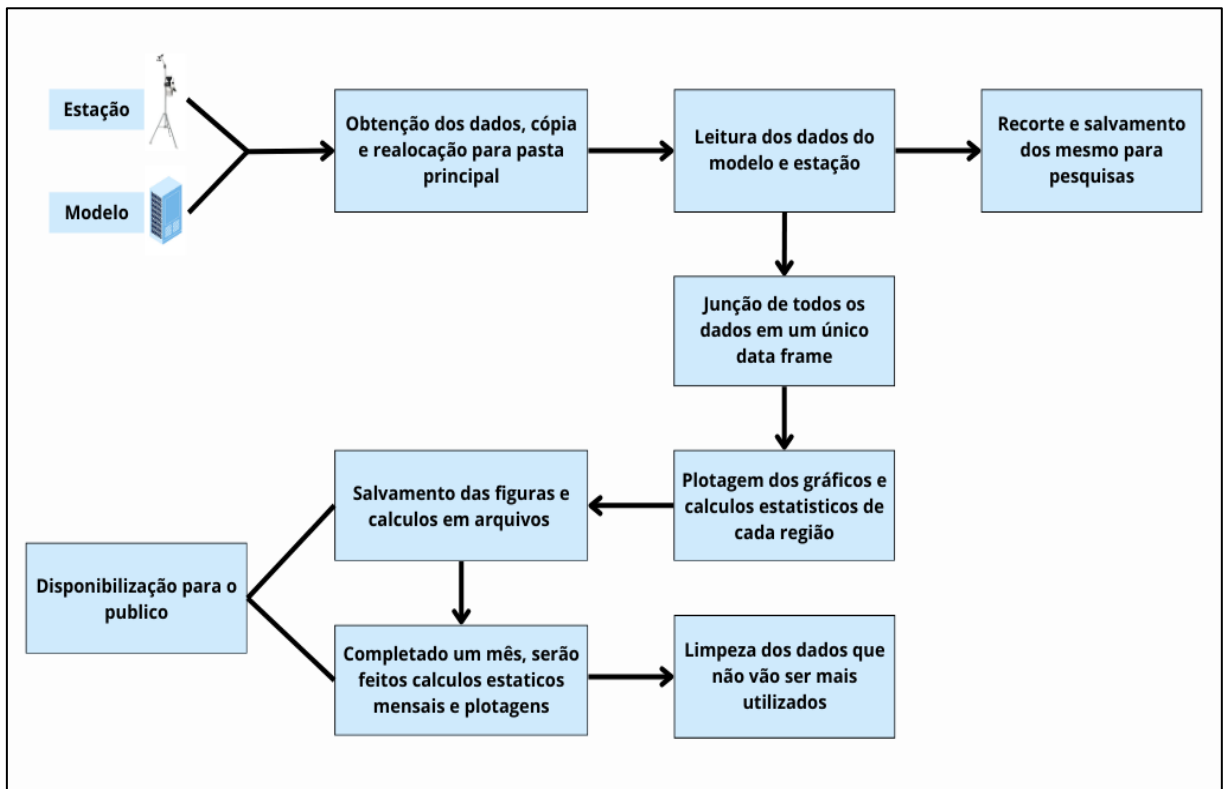
Uma vez que todos os dados estejam disponíveis, foi realizado a leitura do arquivo de saída do WRF, que se encontra no formato NetCDF (Network Common Data Form), para recorte e armazenamento do ponto de grade mais próximo em relação a estação, das variáveis precipitação, temperatura do ar a 2 mestros, umidade relativa, Shear, CAPE, geopotencial em 850 hPa e em 250 hPa e componentes u e v do vento, para todos os 42 níveis verticais, que serão disponibilizadas para outros estudos futuros.

Posteriormente, foi realizado o download dos dados das estações que serão comparados com os dados simulados pelo modelo que são extraídos do ponto de grade mais próximo. Após a junção dos dados do modelo e das observações em um único dataframe (que é uma estrutura de dados que organiza dados em uma tabela bidimensional, semelhante a uma planilha, com linhas e colunas), é gerado o gráfico da evolução da precipitação, temperatura e umidade observada e prevista pelo

modelo. Essa plotagem será atualizada diariamente nos horários de 12:00 e 00:00 (horário de Brasília ou 15:00 e 03:00 UTC). Esses plots também serão salvos como arquivos JPG, a fim de poderem ser usados futuramente como material para estudo. Em seguida, serão efetuados os cálculos estatísticos relacionados para o dia, sendo todos salvos em variáveis que posteriormente serão colocadas em um mesmo dataframe e salvas em arquivos CSV, que também vão ser disponibilizados.

No primeiro dia do mês seguinte, os dados que foram salvos durante o mês anterior foram utilizados para calcular as estatísticas mensais, que também foram disponibilizadas em formato de arquivo CSV. Todo o passo a passo feito pelo programa pode ser visto através do fluxograma na Figura 4 é uma figura ilustrando o código do programa desenvolvido é apresentada na Figura 5.

FIGURA 4 - Fluxograma contendo o passo a passo do programa de validação



Fonte: Elaborado pelo autor.

FIGURA 5 - Demonstração do programa de validação

Seleção da Área e Seleção dos Dados

```

[1634.] caninho_arquivo = '/home/cepreng/Documents/FlavioFG/Dados/UnifeiCA_mar2024.csv'
dados_ita = pd.read_csv(caninho_arquivo, delimiter=',')

dados_ita = dados_ita.drop(['Hi', 'Low', 'Dev', 'Wind', 'Wind.1', 'Wind.2', 'Hi.1', 'Wind.3', 'Heat', 'THW', 'THSW', 'Unnamed: 16', 'Rain', 'Solar', 'Solar.1', 'Hi Solar',
                             'UV', 'UV.1', 'Hi', 'Heat.1', 'Cool', 'In', 'In', 'In.1', 'In.2',
                             'In.3', 'In Air', 'Temp.1', 'Temp.2', 'Temp.3', 'Hum', 'Hum.1',
                             'Unnamed: 38', 'Soil.1', 'Soil.2', 'Soil.3', 'Soil.4', 'Soil',
                             'Soil.1', 'Soil.2', 'Soil.3', 'Leaf', 'Leaf.1', 'Leaf', 'Leaf.1',
                             'Wind.4', 'Wind.5', 'ISS', 'Arc', 'HL.2'], axis=1)

# Resetando o índice
dados_ita = dados_ita.reset_index(drop=True)

# Concatenando as duas primeiras linhas para criar o novo cabeçalho
new_header = dados_ita.iloc[0].astype(str)

# Definindo o novo cabeçalho
dados_ita.columns = new_header

# Removendo as duas primeiras linhas
dados_ita = dados_ita[1:]

dados_ita.loc[:, 'datahora'] = pd.to_datetime(dados_ita['Date'] + ' ' + dados_ita['Time'], format='%d/%m/%Y %H:%M')

# Apagar as colunas date e time
dados_ita = dados_ita.drop(['Date', 'Time'], axis=1)

dados_ita = dados_ita.loc[(dados_ita['datahora'] >= data_inicial) & (dados_ita['datahora'] <= data_final)]

# Definir a coluna datetime como índice
dados_ita.set_index('datahora', inplace=True)

dados_ita['Out'] = dados_ita['Out'].astype(float)

# Trocar o nome do índice da coluna
dados_ita = dados_ita.rename(columns={'Out': 'Temp. Ins. (C)'})

dados_ita['Hum'] = dados_ita['Hum'].astype(float)

# Trocar o nome do índice da coluna
dados_ita = dados_ita.rename(columns={'Hum': 'Umi. Ins. (%)'})

dados_ita['Rain'] = dados_ita['Rain'].astype(float)

# Trocar o nome do índice da coluna
dados_ita = dados_ita.rename(columns={'Rain': 'Chuva (mm)'})

dados_ita = dados_ita.resample('h').mean()

dados_ita

```

[1634.]

Temp. Ins. (C) Umi. Ins. (%) Chuva (mm)

datahora

2024-03-04 00:00:00	19.833333	73.500000	0.0
---------------------	-----------	-----------	-----

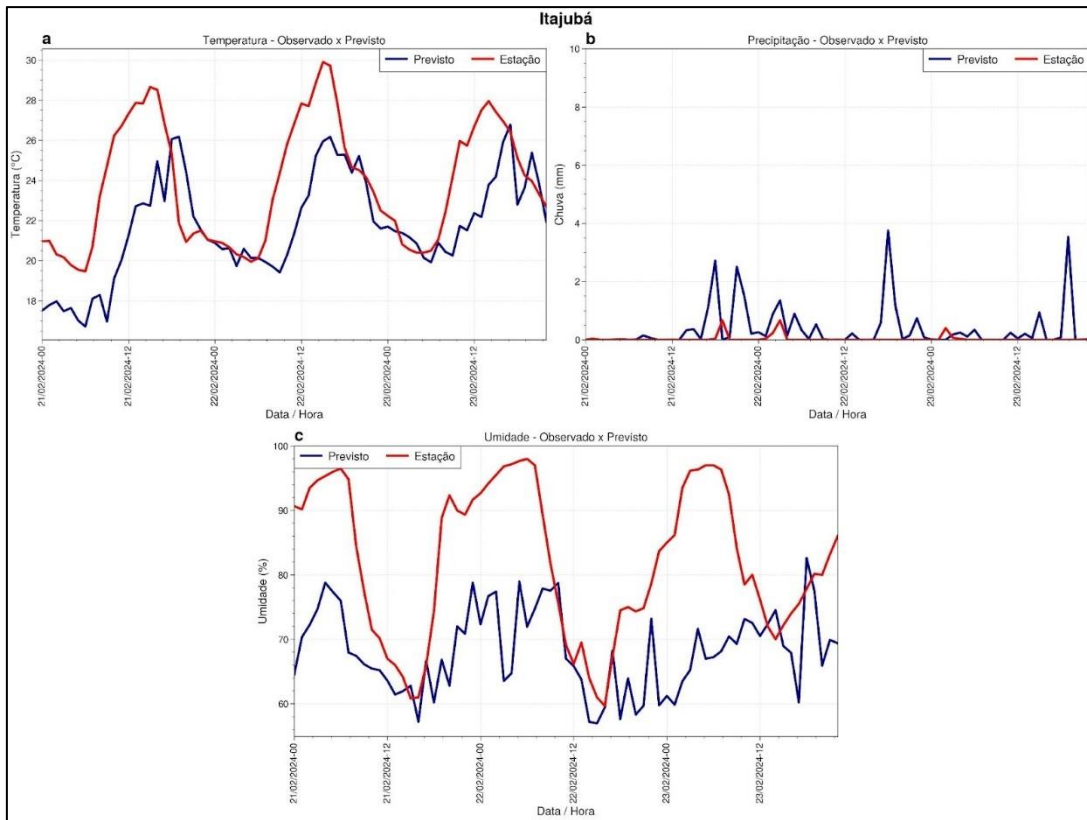
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2. Resultados do Período de teste

Para exemplificar as análises diárias propostas a partir da metodologia, foram gerados gráficos comparando as previsões do modelo e as observações para o dia 21 a 23 de fevereiro de 2024, para a cidade de Itajubá (Figura 6), neste dia a depressão subtropical Akara estava atuando na porção mais Sudeste do Brasil, ajudando a canalizar umidade para a região. As figuras com os gráficos para as outras localidades encontram-se no Apêndice A, B, C, D e E. O gráfico para a temperatura do ar a 2 metros está representado na Figura 6-a, revelando que a variação diária da temperatura é bem representada pelo modelo com uma diferença inicial de 2 °C, que ao longo do tempo vai se normalizando, os máximos e mínimos de temperatura também são bem representados, porém com defasagem também de 2 °C do real e uma leva temporal. A precipitação está retratada na Figura 6-b, onde verifica-se que o modelo apresentou picos de precipitação consideravelmente mais elevados do que os valores medidos pela estação. Durante os períodos sem chuva observados, nota-se que o modelo mostra baixos valores de precipitação.

Na Figura 6-c é apresentada a comparação da umidade relativa no que diz respeito a variabilidade diurna, os valores não são bem representados com valores de 60 à 80%, não atingindo os picos observados. Os valores mínimos previstos são mais próximos dos observados.

Figura 6 - Gráficos do dia 21 e 23 de fevereiro de 2024 para a cidade de Itajubá da estação da UNIFEI de a) Temperatura, b) Precipitação e c) Umidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 2 apresenta os índices estatísticos calculados da temperatura, umidade relativa e precipitação para a cidade de Itajubá. Os resultados para as demais cidades se encontram nos Apêndices E, F, G, H, I. Primeiramente, analisando a temperatura, nota-se que o desvio padrão do modelo (2,6 à 4,3 °C) foi próximo, porém com pouca diferença do desvio padrão da estação (2,5 à 4,9 °C) indicando uma boa performance do modelo ao retratar a variação da temperatura diária. O erro médio absoluto variou entre 2,5 °C e 4,4 °C, revelando que o modelo tende a ter uma imprecisão com relação a temperatura em certos dias, já o RMSE apresenta uma variação entre 3,0 a 5,6 °C relativamente maior se comparado com o ME. A correlação de Pearson oscila entre 0,3 a 0,8 o que indica que os valores do modelo tendem a uma fraca relação acontecendo em momentos em que o modelo simula chuva, porém os valores não são próximos do real, mas isso não é exclusivo destes momentos, pois também ocorre em outros momentos com ela tendendo a ser melhor, sobre o índice de concordância, sua variação é de 0,5 à 0,7 apontando uma concordância moderada a boa o que demonstra que, em geral, o modelo consegue capturar os padrões de variação da temperatura.

No que se refere à umidade relativa, nota-se que o desvio padrão do modelo (4,3 a 9,4 %) foi menor se comparado ao do desvio padrão da estação (9,6 à 14,3 %), indicando que o modelo tem dificuldade para representar a variabilidade associada ao ciclo diurno. O ME tem uma variação de 9,7 à 26,4%, demonstrando uma grande incerteza do modelo na projeção da umidade em certos dias, o mesmo pode ser notado no RMSE que acompanha valores próximos (9,9 a 29,1%), também indicando erros maiores. A correlação de Pearson diverge entre 0,2 a 0,8, sendo que majoritariamente os valores tendem a ser baixos a moderados, indicando uma baixa relação em momentos de baixa representação da chuva. Quanto ao índice de concordância, sua variação é de 0,4 à 0,8 apontando uma concordância baixa a boa, isso pode ocorrer devido a maior dificuldade de simulação desta devido às forçantes orográficas da região analisada.

Sobre a precipitação, observou-se que o desvio padrão do modelo (0 à 2,1 mm) tende a ser maior do que o da estação (0 à 0,3 mm) que em algumas ocasiões indica a ausência de chuva, porém o modelo relata que houve. Acerca do ME e RMSE, ambos variam muito pouco em seus valores sendo de 0 à 0,5 mm e 0 à 2,1 mm respectivamente, isso se dá pela ausência de precipitação em alguns dias, porém ainda revela que o modelo tende a cometer erros nas previsões. Os índices de concordância e correlação destacaram-se negativamente, pela ausência de precipitação pouco se pode analisar, porém os indicadores negativos na correlação demonstram que o modelo não obtém uma boa previsão para a cidade de Itajubá.

Tabela 3 - Dados da validação para a Cidade de Itajubá

Data	DPT M	DPT E	DPU M	DPU E	DPP M	DPP E	EMT	EMU	EMP	RMS ET	RMS EU	RMS EP	CPT	CPU	CPP	ICT	ICU	ICP
19/02	4,2	3,9	6,5	13,3	0,0	0,0	4,2	16,8	0,0	5,2	19,5	0,0	0,7	0,7	–	0,7	0,6	0,0
20/02	3,5	2,5	5,4	9,6	0,2	0,0	3,5	9,7	0,1	4,2	10,9	0,2	0,5	0,2	–	0,6	0,4	0,0
21/02	2,7	2,8	7,1	10,4	1,2	0,1	2,3	14,9	0,4	3,0	16,9	1,3	0,6	0,5	-0,1	0,7	0,5	0,0
22/02	4,0	2,8	8,9	9,6	0,6	0,0	3,5	18,9	0,2	4,2	20,8	0,6	0,3	0,6	-0,1	0,5	0,5	0,0
23/02	2,9	3,7	9,4	12,9	0,3	0,0	3,3	7,5	0,1	4,0	9,9	0,4	0,8	0,8	–	0,7	0,8	0,0
24/02	2,7	3,0	6,1	10,3	0,8	0,0	2,7	14,0	0,4	3,4	16,4	0,9	0,5	0,4	-0,1	0,7	0,5	0,0
25/02	3,2	3,4	4,3	10,1	2,1	0,1	2,8	16,7	0,5	3,9	19,0	2,1	0,6	0,4	0,0	0,7	0,5	0,0
26/02	2,8	3,9	8,2	12,8	1,1	0,3	2,9	20,7	0,4	3,7	24,3	1,2	0,5	0,2	-0,1	0,6	0,4	0,0
27/02	4,0	3,3	8,0	12,5	0,0	0,0	4,4	13,6	0,0	4,9	16,6	0,0	0,7	0,5	–	0,7	0,6	0,0
28/02	3,2	3,5	5,6	12,5	0,1	0,0	3,2	14,5	0,0	4,3	16,9	0,1	0,6	0,6	–	0,7	0,6	0,0
29/02	2,7	3,0	6,7	11,4	1,3	0,1	2,7	15,2	0,5	3,4	17,3	1,5	0,6	0,2	0,0	0,7	0,5	0,0
01/03	3,3	3,7	6,2	12,2	0,2	0,0	3,2	12,2	0,1	4,2	14,7	0,2	0,6	0,7	–	0,7	0,6	0,0
02/03	3,0	3,5	5,4	11,1	0,7	0,3	3,3	21,8	0,3	3,9	24,5	0,8	0,5	0,2	-0,1	0,6	0,4	0,0
03/03	4,3	4,9	5,1	14,3	0,0	0,0	4,4	26,4	0,0	5,6	29,1	0,0	0,7	0,5	–	0,7	0,5	0,0
04/03	2,6	3,1	6,4	11,7	0,7	0,1	2,5	14,3	0,4	3,3	17,3	0,8	0,8	0,5	0,1	0,7	0,6	0,1

Legenda: Tabela contendo os resultados do Desvio padrão (DP), Erro Médio (EM), RMSE, Correlação de Pearson (CP), Índice de Concordância (IC) para a Precipitação (P), Temperatura (T) e Umidade relativa (U) do Modelo (M) e Estação (E)

Os resultados dos índices calculados mensalmente para a cidade de Itajubá estão apresentados na Tabela 3, para as demais cidades que se encontram nos Apêndices I, J, K. A Tabela 3 apresenta os resultados de cada índice estatístico, no que diz respeito a precipitação, o POD obtido foi de 1 o que representa um desempenho ótimo na previsão, porém quando analisamos o FAR com um valor de 0,46 mostrando um desempenho moderado na previsão dos eventos de precipitação, já o CIS obteve um valor de 0,53 indicando que o modelo prevê somente 53% dos casos. Com um KGE de -10,02 é um indicativo de que os valores previstos estão muito distantes dos valores observados, com uma discrepância significativa. O desvio padrão da estação (1,3 mm) é inferior ao do modelo (12,6 mm), isso evidencia que o modelo possui uma variação maior dos valores de precipitação se comparado ao da estação, isso também pode ser evidenciado pelos índices ME (10,5 mm) e RMSE (15,5 mm). Os índices de correlação e concordância são distintos, enquanto a correlação é moderada indicando que o modelo consegue ter uma boa precisão, a concordância já apresentou um valor muito baixo (0,16) isso implica que o modelo tem uma capacidade limitada de representar os valores reais, esses resultados se mostraram similares ao de Campos (2015).

Sobre a temperatura, os valores de desvio padrão tanto do modelo quanto da estação foram muito baixos ($< 1^{\circ}\text{C}$), demonstrando que o modelo tem uma consistência na variação dos valores quase igual ao da estação. O ME e RMSE apresentaram os valores muito próximos o que reforça que o modelo é consistente na previsão, com erros relativamente pequenos e homogêneos, os índices de correlação e concordância também são muito próximos, porém muito baixos se analisados mensalmente, isso pode indicar que no geral o modelo tem uma capacidade limitada de representar o comportamento dos dados observados.

Ainda na Tabela 3 nos resultados sobre a Umidade relativa, os desvios padrões apresentaram diferenças onde o desvio da estação foi duas vezes maior que o do modelo, isso pode indicar que o modelo não consegue representar bem a variação real. O ME e o RMSE apresentaram valores próximos e altos, porém isso indica que o modelo tende a manter uma certa diferença ($\sim 15\%$) do valor real. A correlação de Pearson de 0,62 e um índice de concordância de 0,36 sugerem que o modelo consegue capturar razoavelmente bem o padrão de variação dos dados, mas tem dificuldades em representar a magnitude

Tabela 4 - Resultados mensais para a cidade de Itajubá

	POD	FAR	CIS	KGE	DPE	DPM	EM	RMSE	CP	IC
Temp.	–	–	–	–	0,72	0,99	2,61	2,81	0,57	0,54
Umid.	–	–	–	–	6,96	3,78	14,96	15,86	0,67	0,57
Prec.	1.0	0,46	0,53	-10,02	1,33	12,64	10,57	15,56	0,65	0,16

4. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi de desenvolver uma metodologia operacional para a validação dos resultados obtidos do modelo WRF para o Sul de Minas Gerais. A metodologia de validação proposta permitiu uma avaliação robusta do desempenho do modelo operacional WRF em diferentes cidades do SMG, proporcionando à comunidade uma avaliação rápida e detalhada sobre os acertos e erros do modelo. A análise dos resultados mostrou que o WRF para a região de Itajubá uma melhor concordância no que diz respeito à temperatura, tendo os menos desvios e índices. A umidade, principalmente, os valores máximos, e a precipitação obtiveram resultados menos confiáveis, o que pode ser reflexo das forçantes orográficas da região que dificultam a simulação.

Os resultados mensais demonstram que o modelo tende a seguir de maneira satisfatória os padrões de temperatura que apresentou o menor desvio (0,72 °C e 0,99°C) comparado às outras variáveis, a umidade relativa tende a ser subestimada em sua maioria e com os maiores EM e RMSE enquanto a precipitação é superestimada na maior parte dos casos, sendo a mais inferior no índice de concordância. A partir dos resultados obtidos neste estudo, espera-se que essa metodologia possa ser aplicada de forma operacional, promovendo a avaliação do desempenho do modelo em toda a região do SMG.

Para trabalhos futuros sugere-se que seja uma análise com um maior período de dados a fim de verificar com mais acurácia as variáveis, além de também analisar outras variáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

REIS, A. L. et al. Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, p. 652-660, 2018.

ARAÚJO, A. A. et al. Avaliação do modelo Weather Research and Forecasting (WRF) na simulação operacional de um evento de frente fria no sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, p. 805-817, 2023.

BJERKNES, V. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 21, p. 1-7, 1904.
Tradução de Y. Mintz: The Problem of Weather Forecasting as a Problem in Mechanics and Physics. Los Angeles, 1954.

CAMPOS, Bruno; CARVALHO, Vanessa Silveira Barreto; CALHEIROS, Alan James Peixoto. Análise da ocorrência de eventos extremos de precipitação registrados no município de Itajubá, MG. 2011.

CAMPOS, J. R. M. et al. Sistema Numérico-Operacional de Previsão de Tempo do Sul de Minas Gerais (SiNOPT). **Boletim do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**, v. 15, n. 2, p. 1-20, 2016.

CAMPOS, B.; CARVALHO, V. S. B. Sistema numérico-operacional de previsão de tempo para a Região Sul de Minas Gerais: Avaliação dos resultados preliminares, 2015. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/278410808_Sistema_numerico-operacional_de_previsao_de_tempo_para_a_regiao_Sul_de_Minas_Gerais_avaliacao_dos_resultados_preliminares. Acesso em: 15 out. 2024.

CHAVES, R. N. M.; OLIVEIRA, L. G. de; TENÓRIO, V. L. S. R.; FERREIRA, I. R. P.; REBOITA, M. S. Análise Sinótica do Evento de Precipitação ocorrido em Itajubá, MG, em 27 de fevereiro de 2023. In: **SEMINÁRIO DE RECURSOS NATURAIS**, XVII, 2023, Itajubá. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2023.

DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 46, p. 3077-3106, 1989.

EMERY, C.; TAI, E.; YARWOOD, G. Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Austin, TX: Environment International Corporation, 2001.

GARCIA, Denis William; REBOITA, Michelle Simões; CARVALHO, Vanessa Silveira Barreto. Evaluation of WRF performance in simulating an extreme precipitation event over the South of Minas Gerais, Brazil. **Atmosphere**, v. 14, n. 8, p. 1276, 2023.

GEESUL. **A Economia do Sul de Minas Gerais: Relatório de Estudos Econômicos do Sul de Minas - nº 1**. Guilherme A. D. Vivaldi, Marçal Serafim Cândido, Pedro dos Santos Portugal Júnior, Marcelo Castro Ávila. Fevereiro de 2020.

GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, p. 5233–5250, 2014.

HONG, S. Y.; DUDHIA, J.; CHEN, S. H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. **American Meteorological Society**, v. 132, p. 103-120, 2006.

IPMA - Previsão Numérica do Tempo. Disponível em:

<<https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.html>>. Acesso em: 27 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

JOHNSON, Gregory L.; HANSON, Clayton L. Topographic and atmospheric influences on precipitation variability over a mountainous watershed. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 34, n. 1, p. 68-87, 1995.

KALNAY, Eugenia. **Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

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**, v. 102, p. 16,663-16,682, 1997.

NIU, G. Y. et al. The community Noah land surface model with multi parameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, p. 1-19, 2011.

PINHEIRO, M. V. Avaliação Técnica e Histórica das Enchentes em Itajubá – MG. Dissertação (Mestrado) — Programa de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOITA, Michelle Simões et al. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015.

SILVA, Esmeraldo David; REBOITA, Michelle Simões. ESTUDO DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DE MINAS GERAIS-MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, 2013.

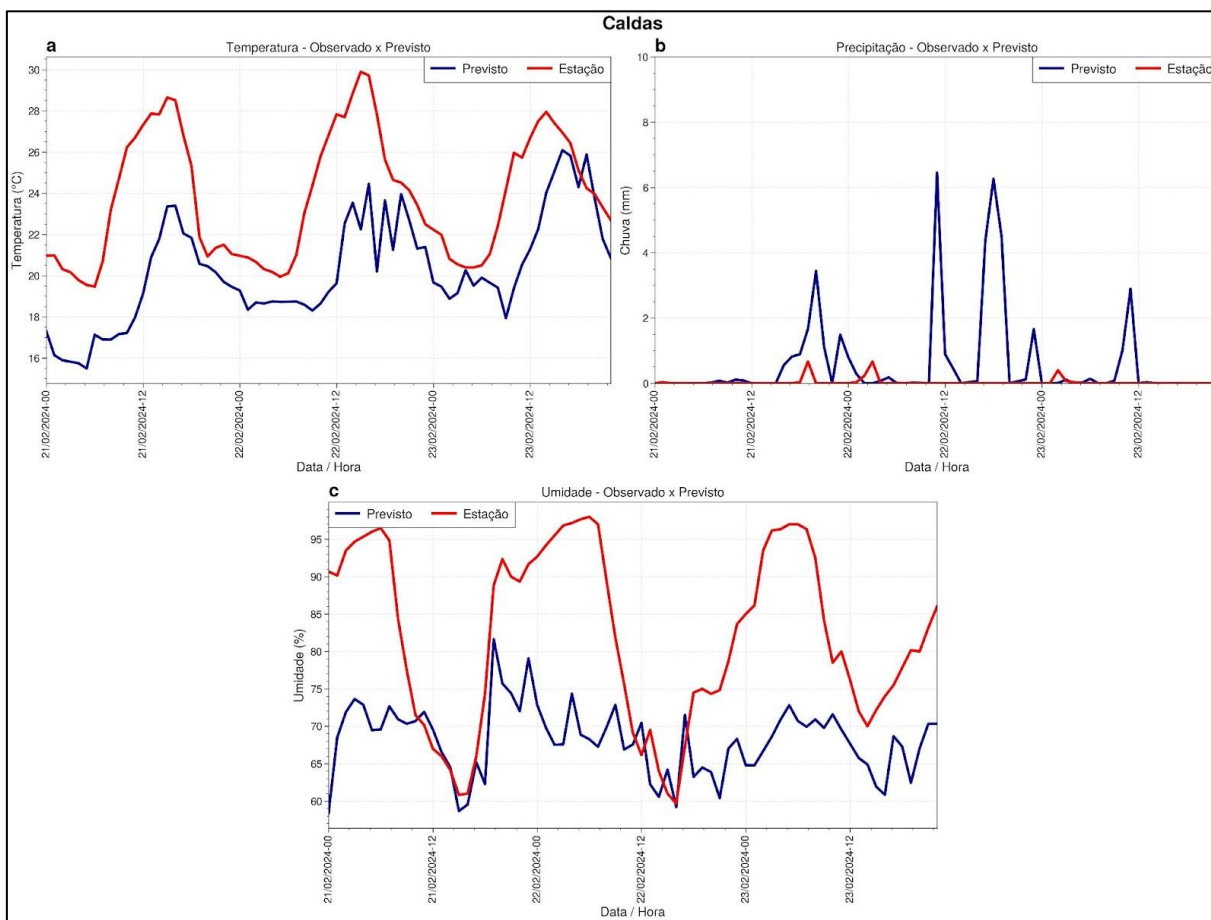
SUGAHARA, S.; DA SILVEIRA, R. B.; DA ROCHA, R. P. Estimativa da probabilidade do evento extremo de precipitação de janeiro de 2000 no Vale do Paraíba, baseada

na distribuição generalizada de Pareto. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 2, p. 193-208, 2010.

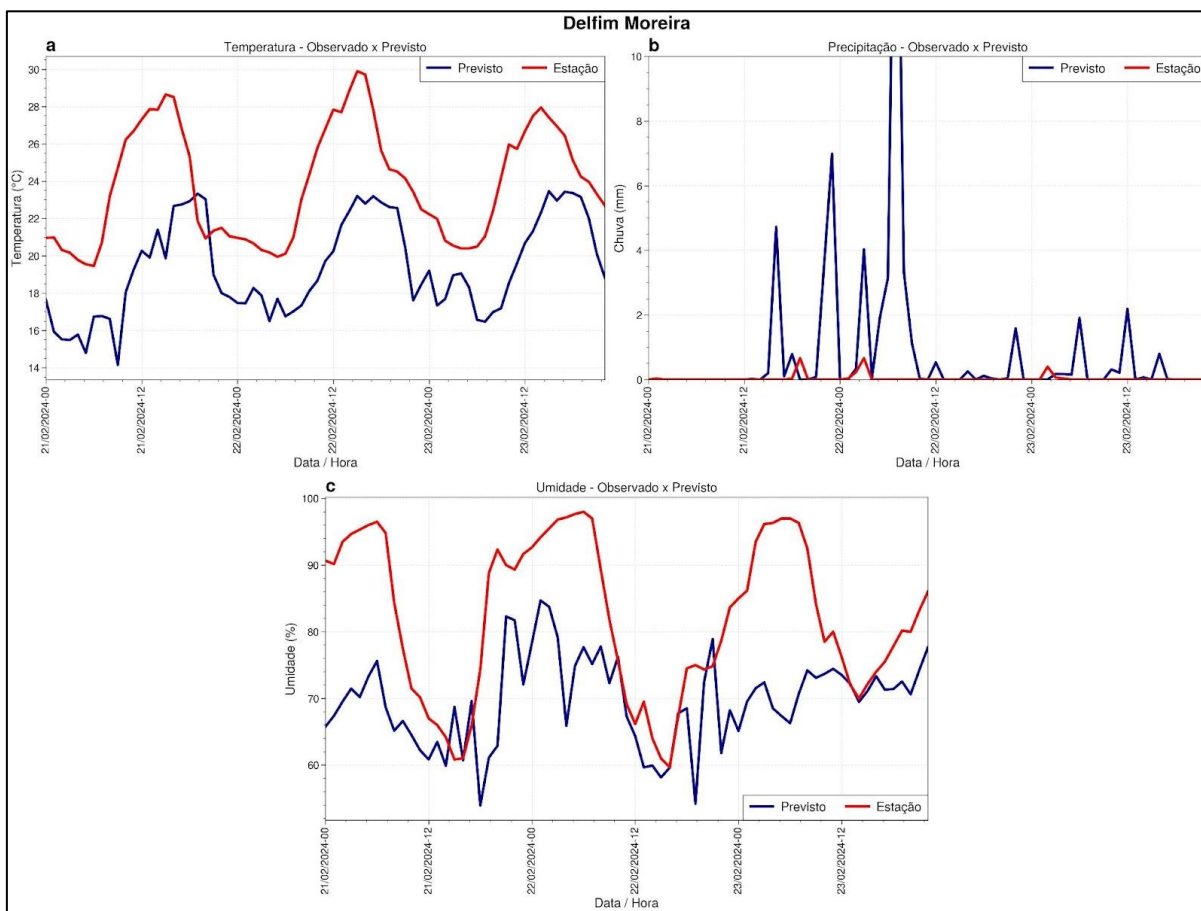
WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WILKS, Daniel S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Academic Press, 2011.

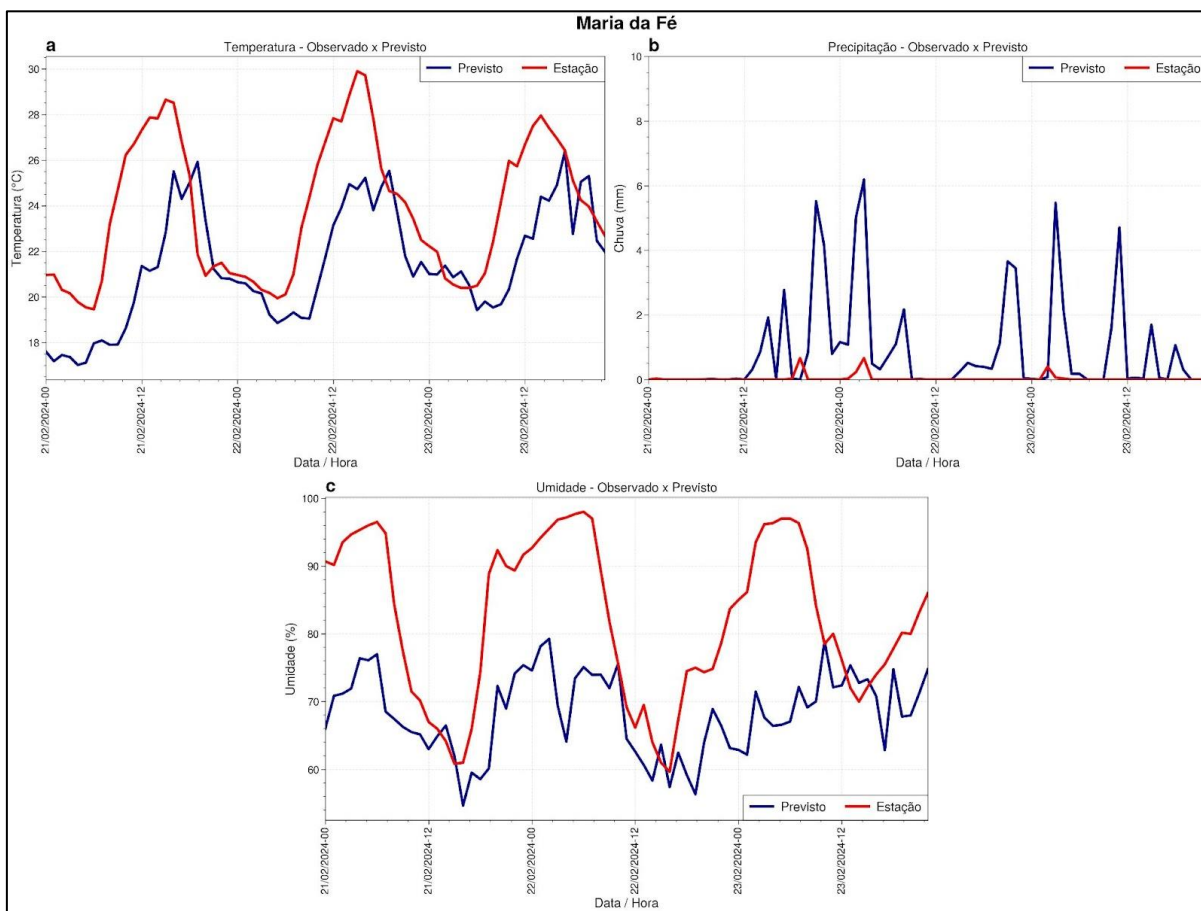
APÊNDICE A - Figura do dia 21 e 23 de fevereiro de 2024 para a cidade de Caldas de a) Temperatura, b) Precipitação e c) Umidade



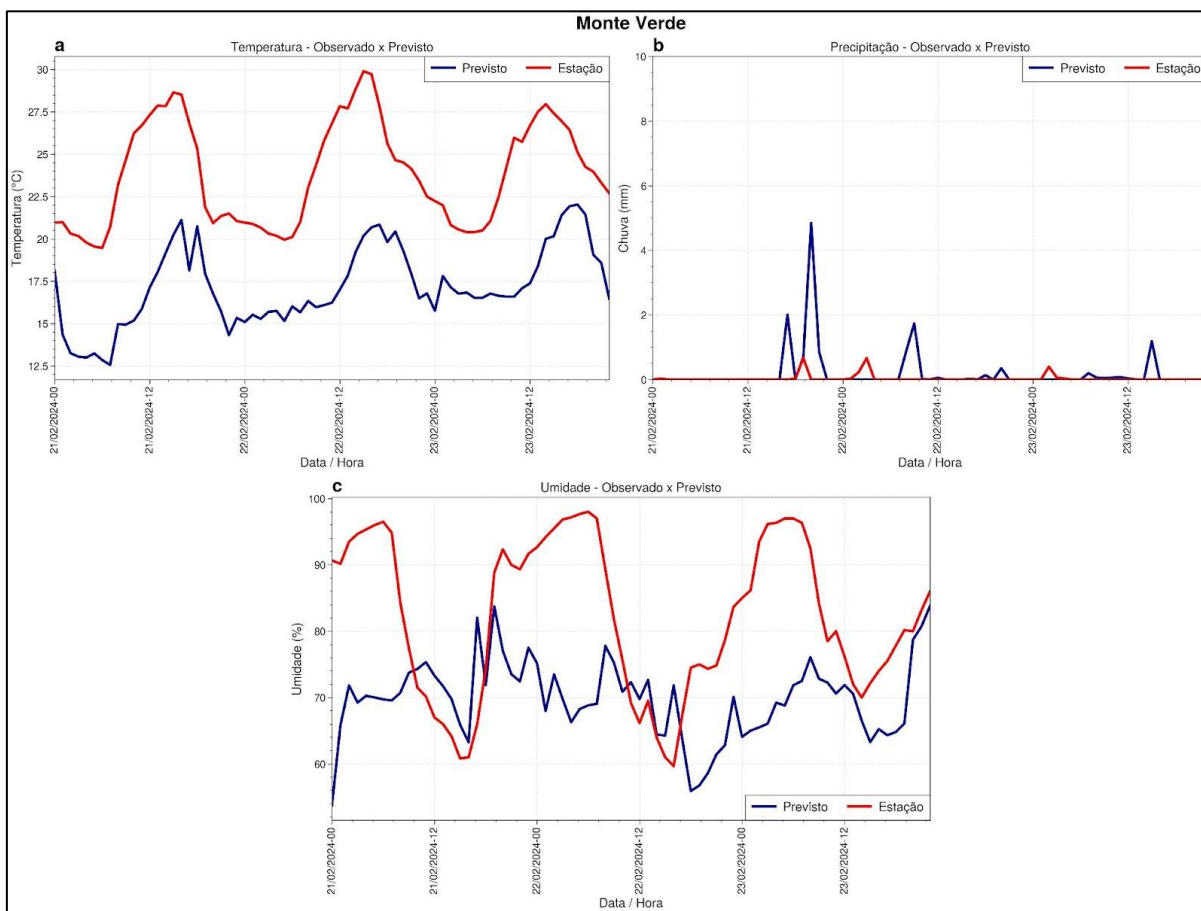
APÊNDICE B - Figura do dia 21 e 23 de fevereiro de 2024 para a cidade de Delfim Moreira de a) Temperatura, b) Precipitação e c) Umidade



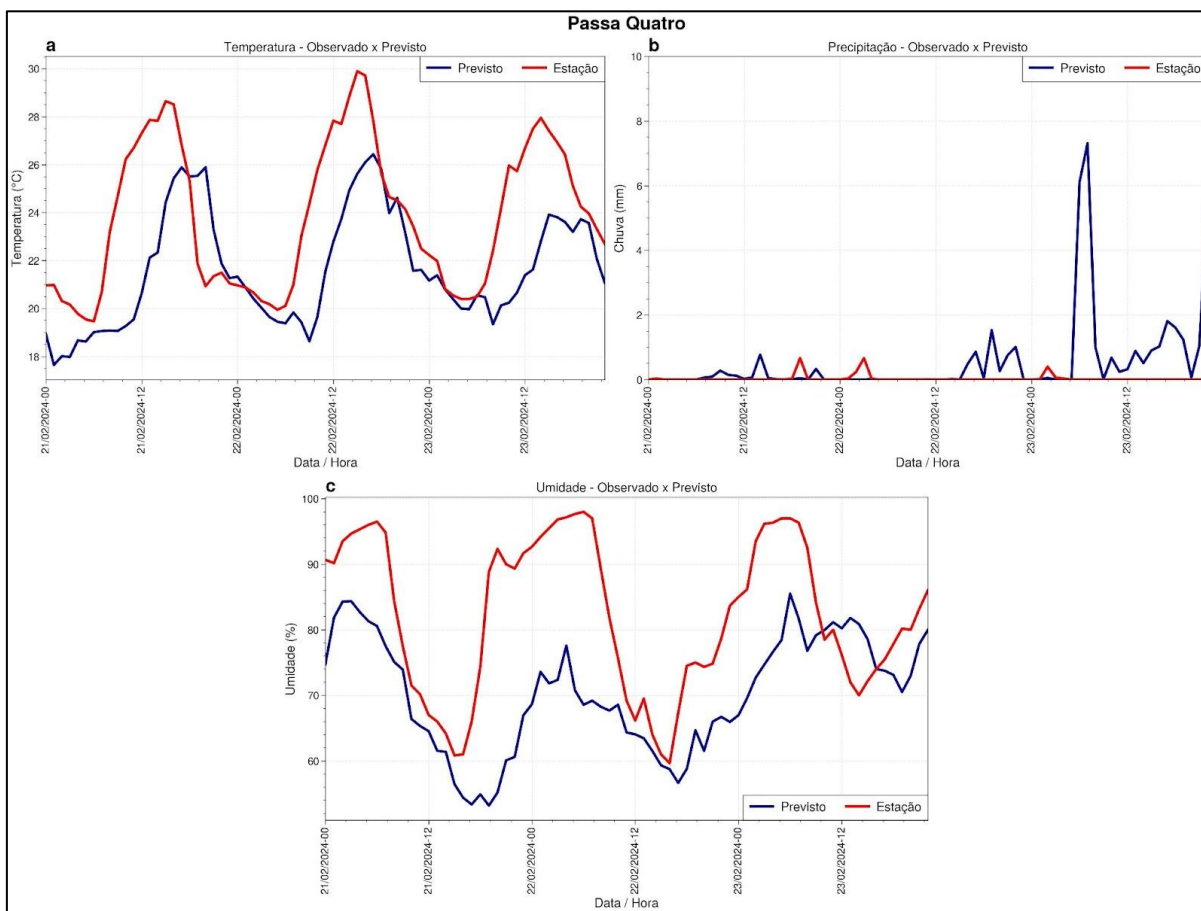
APÊNDICE C - Figura do dia 21 e 23 de fevereiro de 2024 para a cidade de Maria da Fé de a) Temperatura, b) Precipitação e c) Umidade



APÊNDICE D - Figura do dia 21 e 23 de fevereiro de 2024 para a cidade de Monte Verde de a) Temperatura, b) Precipitação e c) Umidade



APÊNDICE E – Figura do dia 21 e 23 de fevereiro de 2024 para a cidade de Passa Quatro de a) Temperatura, b) Precipitação e c) Umidade



APÊNDICE F - Tabela de Dados da validação para a Cidade de Caldas

Data	DPT M	DPT E	DPU M	DPU E	DPP M	DPP E	EMT	EMU	EMP	RMS ET	RMS EU	RMS EP	CT	CU	CP	ICT	ICU	ICP
19/02	3,3	3,4	6,8	18,2	0,1	0,1	1,6	19,0	0,0	2,0	22,5	0,1	0,9	0,8	0,0	0,9	0,6	0,1
20/02	3,4	2,8	6,8	16,6	0,9	0,0	2,4	12,5	0,2	2,6	14,9	0,9	1,0	0,7	-0,1	0,8	0,7	0,0
21/02	2,6	3,3	4,7	15,6	1,4	8,6	1,7	20,4	3,3	2,1	23,2	9,1	0,9	0,5	-0,1	0,9	0,5	0,2
22/02	3,9	4,2	5,5	21,1	0,1	0,0	1,3	20,2	0,0	1,6	24,6	0,1	1,0	0,3	—	1,0	0,5	0,0
23/02	3,5	4,2	4,6	21,3	0,2	0,2	1,6	21,8	0,1	2,1	26,3	0,3	0,9	0,7	0,0	0,9	0,6	0,1
24/02	2,8	3,6	7,6	18,6	0,2	1,4	1,8	20,2	0,3	2,2	25,3	1,2	0,9	0,3	1,0	0,9	0,5	0,5
25/02	4,1	3,3	8,1	19,0	0,0	0,1	2,7	18,7	0,0	2,9	22,4	0,1	1,0	0,8	0,0	0,9	0,7	0,3
26/02	2,9	3,1	6,4	15,7	0,3	7,4	1,7	19,8	2,0	1,9	22,7	7,6	0,8	0,6	0,0	0,9	0,6	0,2
27/02	2,9	3,1	6,4	16,1	1,0	5,4	1,8	18,5	1,3	2,2	21,0	5,6	0,7	0,7	0,0	0,8	0,6	0,1
28/02	2,6	3,5	7,8	17,0	1,4	7,0	1,9	19,7	2,0	2,4	22,3	7,2	0,8	0,4	-0,1	0,8	0,5	0,1
29/02	3,8	4,3	5,8	20,9	3,0	0,2	1,3	27,3	0,6	1,9	31,3	3,1	0,9	0,5	0,0	0,9	0,5	0,0
01/03	4,5	4,8	5,9	19,5	0,0	0,1	1,5	24,4	0,0	1,9	28,2	0,1	1,0	0,8	-0,1	1,0	0,6	0,2
02/03	3,1	3,8	5,3	17,9	0,2	0,3	1,3	20,7	0,1	1,7	23,4	0,4	0,9	0,7	0,0	0,9	0,6	0,1
03/03	3,9	4,0	5,5	20,9	0,0	0,0	2,5	32,5	0,0	2,7	36,3	0,1	1,0	0,8	0,0	0,9	0,5	0,1
04/03	4,2	3,1	3,8	15,7	0,1	0,0	3,3	27,6	0,0	3,7	30,8	0,1	0,9	0,5	—	0,8	0,5	0,0

APÊNDICE G - Tabela de Dados da validação para a Cidade de Delfim Moreira

Data	DPT M	DPT E	DPU M	DPU E	DPP M	DPP E	EMT	EMU	EMP	RMS ET	RMS EU	RMS EP	CT	CU	CP	ICT	ICU	ICP
19/02	2,9	1,8	4,1	3,6	0,0	0,2	1,3	15,4	0,1	1,6	15,6	0,2	0,9	0,8	0,5	0,9	0,3	0,3
20/02	2,9	3,4	9,6	7,0	0,7	0,8	1,7	24,1	0,3	2,2	26,0	0,6	0,8	0,3	0,6	0,9	0,3	0,8
21/02	3,1	3,5	5,2	6,2	0,1	0,3	1,4	24,6	0,1	1,9	25,2	0,3	0,9	0,6	0,0	0,9	0,3	0,1
22/02	2,8	2,9	6,0	6,1	0,0	0,1	1,4	25,0	0,0	1,7	25,6	0,1	0,9	0,6	-0,1	0,9	0,3	0,1
23/02	4,0	6,4	5,3	11,8	0,0	0,0	2,4	40,3	0,0	3,2	42,5	0,0	0,9	-0,2	–	0,9	0,3	0,0
24/02	2,5	2,2	7,3	5,3	1,5	2,9	1,3	20,7	1,0	1,6	22,0	3,3	0,8	0,4	0,0	0,9	0,3	0,1
25/02	2,7	6,1	4,2	9,9	0,0	0,0	3,6	29,9	0,0	4,7	31,8	0,0	0,9	-0,1	–	0,7	0,3	0,0
26/02	3,7	3,0	7,2	5,0	0,0	0,1	1,4	25,9	0,0	1,6	26,0	0,1	0,9	1,0	-0,1	0,9	0,3	0,2
27/02	2,5	4,2	7,3	6,8	2,0	0,1	2,6	23,5	0,7	2,9	26,0	2,1	0,8	-0,6	-0,1	0,8	0,2	0,0
28/02	2,4	2,1	7,0	5,0	0,7	0,5	1,1	22,4	0,4	1,3	23,3	0,8	0,9	0,4	0,0	0,9	0,3	0,2
29/02	3,3	3,9	3,8	5,6	0,0	0,2	2,1	33,9	0,1	2,5	34,0	0,3	0,9	0,9	0,7	0,9	0,2	0,3
01/03	2,8	3,6	5,5	4,7	2,5	1,4	2,0	29,2	0,8	2,4	30,3	2,9	0,9	-0,3	0,0	0,9	0,2	0,1
02/03	2,6	2,4	6,7	5,6	2,7	2,9	1,2	21,7	0,9	1,4	23,0	3,1	0,9	0,3	0,4	0,9	0,3	0,5
03/03	1,9	3,1	8,7	6,0	0,0	0,0	1,5	19,8	0,0	2,0	20,6	0,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,4	0,6
04/03	2,6	2,7	7,4	4,7	1,8	0,3	1,5	22,7	0,7	1,8	23,7	1,9	0,8	0,4	-0,1	0,9	0,3	0,0

APÊNDICE H - Tabela de Dados da validação para a Cidade de Maria da Fé

Data	DPT M	DPT E	DPU M	DPU E	DPP M	DPP E	EMT	EMU	EMP	RMS ET	RMS EU	RMS EP	CT	CU	CP	ICT	ICU	ICP
19/02	4,2	3,7	7,1	14,9	0,0	0,5	1,2	25,0	0,1	1,6	27,4	0,5	0,9	0,7	-0,1	1,0	0,5	0,2
20/02	3,2	3,3	5,2	12,8	0,0	1,5	1,4	23,3	0,3	1,6	25,2	1,6	0,9	0,7	0,0	0,9	0,5	0,1
21/02	4,0	3,3	8,6	15,4	0,1	0,9	1,6	21,9	0,4	2,3	24,8	1,0	0,9	0,6	-0,1	0,9	0,6	0,3
22/02	3,4	4,6	6,0	17,2	0,0	0,0	2,0	30,5	0,0	2,4	34,2	0,0	0,9	0,4	—	0,9	0,5	0,0
23/02	3,1	2,3	4,6	9,5	0,4	0,1	1,1	10,6	0,1	1,4	12,3	0,4	0,9	0,6	-0,1	0,9	0,6	0,0
24/02	2,7	2,2	6,9	9,2	0,6	3,1	1,5	20,6	0,6	1,8	21,9	3,2	1,0	0,6	0,0	0,9	0,5	0,1
25/02	3,5	4,1	5,8	14,2	0,1	0,0	1,3	20,5	0,0	1,6	23,1	0,1	1,0	0,6	0,0	1,0	0,5	0,0
26/02	4,1	3,3	8,2	15,3	0,0	2,2	0,9	19,3	0,6	1,0	21,2	2,2	0,9	0,9	-0,1	1,0	0,6	0,2
27/02	4,4	4,6	4,2	17,5	0,0	0,0	1,4	34,1	0,0	1,9	37,0	0,0	0,9	0,7	0,3	1,0	0,5	0,1
28/02	2,8	2,4	7,2	10,5	0,7	0,9	1,3	18,7	0,6	1,5	20,6	1,2	0,9	0,4	-0,1	0,9	0,5	0,2
29/02	2,8	3,6	9,0	12,6	0,4	0,0	1,8	19,4	0,2	2,0	21,4	0,4	0,9	0,7	-0,1	0,9	0,6	0,0
01/03	2,5	2,3	5,9	10,3	1,6	3,2	1,1	18,8	1,3	1,4	20,0	3,4	0,9	0,7	0,1	0,9	0,5	0,2
02/03	3,2	4,0	6,0	14,3	1,3	3,2	2,1	28,0	0,8	2,7	30,6	3,4	0,8	0,0	0,0	0,9	0,4	0,1
03/03	2,7	3,0	5,3	10,9	0,4	3,2	2,1	20,2	0,6	2,4	22,0	3,2	0,8	0,5	0,0	0,8	0,5	0,0
04/03	3,4	4,2	4,5	13,9	1,1	1,5	1,3	22,9	0,6	1,7	25,2	1,9	0,9	0,4	0,0	0,9	0,5	0,1

APÊNDICE I - Tabela de Dados da validação para a Cidade de Monte Verde

Data	DPT M	DPT E	DPU M	DPU E	DPP M	DPP E	EMT	EMU	EMP	RMS ET	RMS EU	RMS EP	CT	CU	CP	ICT	ICU	ICP
19/02	3,6	4,8	3,8	18,8	0,4	0,0	1,9	19,5	0,1	2,3	23,1	0,4	0,9	0,2	-0,1	0,9	0,5	0,0
20/02	3,1	4,1	4,6	15,3	0,1	5,1	2,2	26,6	1,1	2,6	30,8	5,0	1,0	-0,2	1,0	0,9	0,4	0,2
21/02	2,2	2,5	7,4	12,2	2,7	1,4	2,2	14,4	1,0	2,6	16,4	3,1	0,8	-0,1	-0,1	0,7	0,4	0,0
22/02	2,7	3,2	4,5	16,3	0,6	0,1	1,9	20,7	0,2	2,3	24,6	0,6	0,9	0,2	-0,1	0,9	0,5	0,0
23/02	1,9	2,5	6,2	11,4	0,8	0,5	1,7	12,6	0,3	2,1	14,0	0,7	0,8	0,1	0,6	0,8	0,4	0,7
24/02	2,9	3,3	5,7	15,1	0,0	0,1	2,1	12,0	0,0	2,2	15,0	0,1	1,0	0,9	-0,1	0,9	0,7	0,2
25/02	2,2	2,3	6,2	11,5	0,7	1,6	1,9	11,1	0,6	2,1	12,6	1,7	0,9	0,5	0,1	0,8	0,6	0,3
26/02	2,7	1,8	3,7	9,7	0,3	0,2	2,7	10,0	0,1	3,0	11,3	0,2	0,9	-0,2	0,9	0,7	0,3	0,9
27/02	2,2	2,5	5,4	12,2	0,8	0,6	1,8	12,0	0,4	2,1	13,9	1,0	0,9	0,5	-0,1	0,8	0,6	0,1
28/02	2,4	2,7	6,0	13,3	0,7	1,7	2,0	12,8	0,7	2,3	15,2	1,8	0,9	0,2	-0,1	0,8	0,5	0,2
29/02	2,0	2,3	7,3	12,0	0,2	0,0	1,9	6,5	0,1	2,0	7,7	0,2	0,9	0,8	-0,1	0,8	0,8	0,0
01/03	2,6	3,5	5,5	17,7	2,9	3,0	1,9	20,9	1,5	2,4	23,0	4,2	0,9	-0,2	-0,1	0,9	0,4	0,1
02/03	2,3	2,8	9,5	14,5	0,9	2,6	1,8	16,7	1,3	2,1	20,9	2,9	0,7	0,2	-0,1	0,8	0,5	0,2
03/03	2,1	2,4	5,5	11,6	4,2	1,5	1,9	12,5	1,5	2,3	14,4	4,6	0,8	-0,1	0,0	0,8	0,4	0,0
04/03	2,8	3,8	5,6	14,1	0,1	0,0	1,8	15,9	0,0	2,1	19,6	0,1	1,0	0,5	0,0	0,9	0,5	0,0

APÊNDICE J - Tabela de Dados da validação para a Cidade de Passa Quatro

Data	DPT M	DPT E	DPU M	DPU E	DPP M	DPP E	EMT	EMU	EMP	RMS ET	RMS EU	RMS EP	CT	CU	CP	ICT	ICU	ICP
19/02	2,4	2,4	8,8	10,1	1,3	0,7	0,9	15,6	0,7	1,2	17,2	1,5	0,9	0,7	0,0	0,9	0,6	0,1
20/02	3,0	5,7	4,7	17,5	0,2	0,0	2,6	15,2	0,1	3,0	17,6	0,2	1,0	0,7	–	0,9	0,6	0,0
21/02	2,8	3,0	6,9	12,4	0,4	0,1	1,4	12,7	0,2	1,8	13,8	0,4	0,9	0,7	0,0	0,9	0,7	0,1
22/02	4,4	5,4	5,7	20,1	0,0	0,0	1,6	24,2	0,0	1,8	28,3	0,0	1,0	0,9	-0,1	1,0	0,6	0,2
23/02	3,8	3,1	9,6	15,4	0,0	0,0	2,2	9,9	0,0	2,5	10,5	0,0	0,9	0,8	-0,1	0,9	0,8	0,1
24/02	3,1	2,7	7,3	10,7	0,7	0,0	0,9	11,7	0,2	1,1	13,3	0,7	1,0	0,8	–	1,0	0,7	0,0
25/02	2,4	2,4	6,1	10,3	0,6	0,6	1,3	13,2	0,4	1,8	14,7	0,9	0,8	0,4	-0,1	0,8	0,5	0,1
26/02	2,6	2,3	7,5	10,3	1,0	0,6	1,3	14,7	0,4	1,5	16,4	1,2	0,9	0,6	-0,1	0,9	0,6	0,1
27/02	4,2	2,9	5,7	11,2	0,3	1,7	2,2	22,3	0,5	2,5	23,8	1,5	0,8	0,7	1,0	0,9	0,5	0,5
28/02	3,0	3,1	7,0	12,9	0,4	1,4	2,1	16,2	0,4	2,4	18,1	1,1	0,9	0,8	0,6	0,9	0,6	0,5
29/02	3,2	3,2	6,2	11,9	0,1	0,0	1,8	15,5	0,0	2,0	18,2	0,1	1,0	0,5	–	0,9	0,6	0,0
01/03	4,0	3,7	7,1	15,0	0,0	0,0	1,7	19,9	0,0	1,8	21,6	0,0	1,0	1,0	–	0,9	0,6	0,0
02/03	3,1	3,4	5,4	11,4	0,7	0,1	2,1	11,3	0,3	2,3	13,0	0,8	1,0	0,7	-0,1	0,9	0,6	0,0
03/03	3,5	3,2	5,5	12,4	0,3	0,9	1,6	26,6	0,3	2,1	28,2	0,9	0,8	0,4	0,0	0,9	0,4	0,1
04/03	4,0	3,4	5,0	13,3	0,1	0,8	1,3	19,8	0,2	1,5	22,6	0,8	0,9	0,6	0,0	1,0	0,5	0,1

APÊNDICE K - Tabela de Resultados Mensais da Precipitação

	MARIA DA FÉ	MONTE VERDE	CALDAS	DELFIM MOREIRA	PASSA QUATRO
POD	1.0	1.0	1.0	0.92	1.0
FAR	0.06	0.0	0.13	0.07	0.21
CIS	0.93	1.0	0.86	0.85	0.78
KGE	0.25	0.30	0.18	0.40	0.55
DPE	14.063	13.569	64.936	13.368	6.564
DPM	16.918	22.051	13.436	18.696	10.250
EM	8.133	12.884	32.262	6.364	4.876
RMSE	11.562	19.288	60.920	11.247	6.990
CP	0.744	0.460	0.736	0.835	0.734
IC	0.837	0.605	0.498	0.862	0.806

APÊNDICE L - Tabela de Resultados Mensais da Temperatura

	MARIA DA FÉ	MONTE VERDE	CALDAS	DELFIM MOREIRA	PASSA QUATRO
DPE	0.790	0.939	1.101	1.052	0.807
DPM	0.994	0.948	1.241	0.816	0.963
EM	0.855	1.769	1.539	1.171	1.044
RMSE	0.983	1.808	1.730	1.305	1.210
CP	0.703	0.917	0.762	0.827	0.744
IC	0.696	0.580	0.633	0.653	0.677

APÊNDICE M - Tabela de Resultados Mensais da Umidade Relativa

	MARIA DA FÉ	MONTE VERDE	CALDAS	DELFIN MOREIRA	PASSA QUATRO
DPE	2.255	3.916	4.290	2.770	5.096
DPM	7.434	7.270	7.990	8.093	7.061
EM	21.904	10.951	19.672	25.262	15.551
RMSE	22.583	12.505	20.428	25.938	16.525
CP	0.835	0.512	0.726	0.805	0.588
IC	0.189	0.403	0.297	0.180	0.394