

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

Avaliação do desempenho do modelo WRF na simulação de extremos de precipitação registrados entre os dias 09 e 16 de fevereiro de 2020 na Bacia do Rio Paraíba do Sul

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Vitor Lucas dos Santos Rosa Tenório

Itajubá, MG, Brasil

2024

Avaliação do desempenho do modelo WRF na simulação de extremos de precipitação registrados entre os dias 09 e 16 de fevereiro de 2020 na Bacia do Rio Paraíba do Sul

por

Vitor Lucas dos Santos Rosa Tenório

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: Débora Martins de Oliveira

> 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

AVALIAÇÃO DESEMPENHO DO MODELO WRF NA SIMULAÇÃO DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO REGISTRADOS ENTRE OS DIAS 09 E 16 DE FEVEREIRO DE 2020 NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

elaborada por

Vitor Lucas dos Santos Rosa Tenório

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

zlavalho

Vanessa Silveira Barreto Carvalho Dra. (UNIFEI) (Presidente/Orientadora) Documento assinado digitalmente DEBORA MARTINS DE OLIVEIRA FAVARIN Data: 19/11/2024 11:46:01-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

> Débora Martins de Oliveira, Msc. (Coorientadora)

Documento assinado digitalmente BENEDITO CLAUDIO DA SILVA Data: 19/11/2024 12:16:32-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Benedito Claudio da Silva, Dr. (UNIFEI)

ichelle S. Kelvita

Michelle Simões Reboita, Dra. (UNIFEI)

Itajubá, 19 de novembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Jesus pela força, sabedoria e ensinamentos concedidas ao longo de toda essa jornada acadêmica. À minha mãe, meu padrasto e meus avós, sou imensamente grato por todo o amor, paciência e compreensão que me deram ao longo de todos esses anos.

Aos meus amigos, em especial ao Eduardo Kenedy, meu mais sincero agradecimento. Sua amizade foi um dos pilares mais fortes durante toda essa caminhada, sempre presente com apoio, palavras de encorajamento e momentos de descontração que fizeram a diferença. Não posso esquecer dos amigos, Raul, Fabiana, Luiz Gustavo, Flávio, Isis, Maycon, Rafael Xavier, João Gabriel, Gabs, Thay, Alana e Felipe, também deixo meu muito obrigado por todo o companheirismo e por compartilharem essa jornada comigo, sou eternamente grato por estar ao meu lado nos momentos de maior desafio, trazendo leveza e motivação quando mais precisei.

Às minhas professoras e orientadoras, Vanessa Carvalho e Débora Martins, meu agradecimento especial pela dedicação, orientações valiosas e pelo exemplo de profissionalismo e competência que sempre demonstraram. Sou eternamente grato pela confiança e suporte que me proporcionaram. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero muito obrigado.

Dedico este trabalho à minha mãe, minha maior fonte de força, amor e inspiração. Seu carinho incondicional, sua paciência e seu apoio constante em todos os momentos foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

A você, mãe, sou eternamente grato por cada sacrifício, cada palavra de incentivo e, acima de tudo, por acreditar em mim mesmo quando eu duvidei. Este trabalho é, em muitos sentidos, fruto da sua dedicação e do seu amor inabalável.

"Não há nada neste mundo mais difícil do que dizer a verdade, nada mais fácil do que a bajulação." — Fiódor Dostoiévski

RESUMO

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

Avaliação do desempenho do modelo WRF na simulação de extremos de precipitação registrados entre os dias 09 e 16 de fevereiro de 2020 na Bacia do Rio Paraíba do Sul.

AUTOR: Vitor Lucas dos Santos Rosa Tenório ORIENTADORA: Vanessa Silveira Barreto Carvalho CO-ORIENTADORA: Débora Martins de Oliveira

Local e Data da Defesa: Itajubá, 19 de novembro de 2024.

A Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS) destaca-se no cenário econômico e possui relevância estratégica em nível nacional, uma vez que sua área se estende pelos estados de maior densidade populacional e desenvolvimento econômico no Brasil (São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais). Dentro desta região, algumas áreas frequentemente registram eventos extremos de precipitação que, muitas vezes, resultam em alagamentos, inundações e deslizamentos. Nesse contexto, o principal objetivo deste estudo consiste na avaliação do desempenho do modelo meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF) na simulação de eventos extremos de precipitação na BRPS. O período de estudo abrangeu de 09 a 16 de fevereiro de 2020 quando foram registrados volumes de chuva acima do limiar de 95% que impactaram diretamente a região. As simulações com o modelo WRF consideraram duas grades aninhadas, centradas sobre a bacia (22.211°S; 43.791°W), com resoluções espaciais de 12 km e 3 km, respectivamente. As condições iniciais e de fronteira foram fornecidas pelo Global Forecast System (GFS) com uma resolução horizontal de 0.25° e resolução temporal de 6 horas. Para a avaliação sinótica dos sistemas atuantes durante a semana utilizaram-se cartas sinóticas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), em conjunto com campos sinóticos gerados a partir dos dados de reanálise ERA5. Para a verificação do desempenho da simulação com o WRF, diversos parâmetros estatísticos foram calculados a partir dos dados medidos e dos simulados pelo modelo. Para validação dos resultados foram considerados dados de 20 estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) disponíveis na região. Os parâmetros estatísticos calculados incluíram o desvio padrão dos dados observados e modelados, o erro médio, a correlação de Pearson, o índice de concordância e o Kling-Gupta efficiency (KGE). Os resultados obtidos revelaram que o modelo WRF foi capaz de identificar com sucesso a ocorrência de precipitação extrema na região, evidenciando sua habilidade em capturar grandes volumes de precipitação. Vale ressaltar que os padrões atmosféricos de grande escala simulados revelaram condições favoráveis à formação de tempestades e apresentaramse de acordo com os padrões identificados a partir das cartas sinóticas. Logo, é possível concluir que de acordo com os testes estatísticos e com a análise sinótica do modelo WRF, o mesmo apresentou resultados satisfatórios, podendo ser utilizado como ferramenta para a melhoria da prevenção de desastres naturais nesta região.

Palavras-chave: Evento Extremo. Precipitação. Modelagem Atmosférica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da bacia hidrográfica que se estende pelos estados de São Paulo (SP), Minas Gerais (MG), Rio de Janeiro (RJ) e Espírito Santo (ES)14
Figura 2 - Mapa do relevo da bacia hidrográfica destacando as Serras do Mar e Mantiqueira15
Figura 3 - Registro de eventos extremos de precipitação nas estações pluviométricas da BRPS durante o período de 09 a 16 de fevereiro de 202016
Figura 4 - Mapa das estações automáticas do SNIRH utilizadas no estudo17
Figura 5 - Domínio do WRF, externo (d01) e interno (d02). A região destacada em vermelho representa os limites da BRPS. Fonte: DE CAMPOS, 2023
Figura 6 - Carta sinótica de superfície e de altos níveis do dia 9 às 12h22
Figura 7 - Carta sinótica de superfície e de altos níveis do dia 13 às 12h23
Figura 8 - Carta sinótica de superfície e de altos níveis do dia 16 às 12h23
Figura 9 - Boxplot da precipitação acumulada em cada estação24
Figura 10 - Mapa de PNMM, Espessura e JAN dos modelos WRF(A) e ERA-5(B) nos dias 09, 13 e 16
Figura 11 - Mapa da Média da Umidade Relativa, Altura Geopotencial em 500 hPa e Ômega em 500 hPa dos modelos WRF(A) e ERA-5(B) nos dias 09, 13 e 1628
Figura 12 - Mapa do CVV e PNMM30
Figura 13 - Comparativo da precipitação diária acumulada entre WRF, MERGE e estações durante a semana dos eventos
Figura 14 - Erro médio da precipitação acumulada diária em cada estação33
Figura 15 - Desvio padrão observados e dos dados modelados pelo WRF nos pontos equivalentes das estações
Figura 16 - Índice de concordância entre WRF e estações35
Figura 17 – Índice de correlação de Pearson entre WRF e estações
Figura 18 – Índice KGE da simulação do WRF37

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Estações Pluviométricas automáticas in situ utilizados no estudo	16
TABELA 2 - Parametrizações utilizadas no Modelo WRF	18
TABELA 3 - Parâmetros Estatísticos para Avaliação do Modelo	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AgERA5 ECMWF Agrometeorological re-analysis version 5
- AGEVAP Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
- ANA Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
- ASAS Alta Subtropical do Atlântico Sul
- BRPS Bacia do Rio Paraíba do Sul
- CAPE Energia Potencial Disponível Convectiva
- CEIVAP Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
- **CPC** Climate Prediction Center
- CPTEC Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- CVV Cisalhamento vertical do vento
- ECMWF European Center for Medium-Range Weather Forecasts
- ERA5 ECMWF re-analysis version 5
- FF Frente Fria
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- JAN Jatos de Altos Níveis
- KGE Kling–Gupta efficiency
- MSL Pressão ao Nível Médio do Mar
- PNMM Pressão Nível Médio do Mar
- PNT previsão numérica do tempo
- SMAS Sistema de Monção da América do Sul
- SNIRH Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
- WRF Weather Research and Forecasting
- ZCAS Zona de Convergência do Atlântico Sul
- ZCOU Zona de Convergência de Umidade

SUMÁRIO

1. INTRO	DDUÇÃO	11
2. MATE	RIAL E MÉTODOS	14
2.1 2.2 2.3 2.4	ÁREA DE ESTUDO Período de estudo e dados utilizados Simulação com o WRF Análises realizadas	14 15 18 19
3. RESUI	LTADOS E DISCUSSÃO	21
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES SINÓTICAS E DA F REGISTRADA	PRECIPITAÇÃO 21
3.2	AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE GRANDE ESCALA SIMULADAS PELO V	VRF25
3.3	AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA PELO WRF	
4. CONC	LUSÃO	
5. REFE	RÊNCIAS	

1. INTRODUÇÃO

A Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS), uma região hidrográfica de expressiva relevância, abrange uma extensão de aproximadamente 55.500 km², distribuídos entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, atravessando territórios de grande relevância socioeconômica no cenário nacional (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, 2011). A bacia abastece uma das regiões mais desenvolvidas do Brasil e ocupa uma área que abrange 184 municípios (39 pertencem a São Paulo, 88 em Minas Gerais e 57 no Rio de Janeiro; Souza, 2012). De acordo com CAVALCANTI E MARQUES (2016), ANA (2019) e HADDAD e TEIXEIRA (2015), às atividades econômicas da bacia, tais como indústria, agricultura, mineração e pesca, dependem do fornecimento contínuo de água proveniente da BRPS, assim como 14 milhões de habitantes que são abastecidos por esta (OLIVEIRA et al., 2023; IBGE, 2010; AGEVAP, 2013).

Com o passar do tempo, as ações antrópicas na bacia alteraram de forma negativa o ambiente em que se encontra, resultando em uma deterioração ambiental progressiva. Em algumas regiões da BRPS, a taxa de urbanização é superior a 90% e tem gerado consequências negativas para a qualidade de vida da população (LUIZ-SILVA & OSCAR-JÚNIOR, 2022; CEIVAP, 2013; AGEVAP, 2006) e o aumento da demanda de água (CAMPOS et al., 2023). Estima-se que a bacia tem uma demanda total de água de mais de 20 m³/s, originada de diversas atividades socioeconômicas e que, devido ao desenvolvimento urbano-industrial, deverá crescer cerca de 24% nos próximos 10 anos (AGEVAP, 2013; OLIVEIRA, 2022; ANA, 2019).

No período de 1991 a 2010, os desastres naturais mais comuns na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul foram, em ordem decrescente de ocorrências, as inundações, os movimentos de massa e as estiagens/secas. Durante esse período, 637 desastres naturais foram registrados nos municípios da bacia, com as inundações, associadas com fortes chuvas na região, representando 80% desse total, seguidas pelos movimentos de massa (18%) e por estiagens/secas (2%) (AGEVAP, 2021; AGEVAP/CEIVAP, 2014). Vale ressaltar que os eventos extremos de precipitação, especialmente durante a estação chuvosa, são frequentemente registrados e resultam em inundações e deslizamentos (BRASILIENSE et al., 2018; MARENGO; ALVES, 2005; PAIVA et al., 2020). Segundo BOLDRIN e PEREIRA (2022), a incidência de enchentes, alagamentos e inundações em áreas urbanas, associadas com a precipitação, pode ser atribuída ao agravamento do escoamento superficial natural, que é significativamente alterado pelo processo de urbanização desordenada.

Destaca-se também que a precipitação desempenha um papel crucial na compreensão do ciclo hidrológico, com eventos extremos frequentemente desencadeando desastres naturais que podem resultar em perdas econômicas e perdas de vidas humanas (MACHADO, 2010 e CASSALHO et al., 2020). Os eventos meteorológicos de precipitação extrema são definidos por uma quantidade de chuva que ultrapassa os limiares 95% e 99%, os quais são utilizados para avaliar a ocorrência de eventos extremos de precipitação, de acordo com a metodologia utilizada por DE COSTA et al. (2020) e OLIVEIRA et al. (2023).

Fatores naturais e antropogênicos têm contribuído para modificar a intensidade e os padrões de precipitação severa no Brasil, especialmente em regiões onde a urbanização se expandiu rapidamente ao longo do último século (SILVA DIAS et al., 2013). A diversidade de fenômenos atmosféricos que podem desencadear eventos extremos de precipitação na região da bacia inclui tempestades, frentes frias e, durante o verão, uma Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) que pode se formar sobre o continente devido à interação de diversos sistemas, como o Jato de Baixos Níveis, frentes e ventos da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (ESCOBAR, 2019). A ZCOU se estende no sentido noroeste-sudeste, abrangendo desde a região amazônica até o sudeste do Brasil e o oceano Atlântico Sul.

Quando a ZCOU persiste por quatro dias ou mais, ela é denominada de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (QUADRO 1994). Tanto a ZCOU quanto a ZCAS são facilmente identificadas em imagens de satélite, apresentando-se como uma faixa de nebulosidade que se estende desde a região amazônica até o oceano Atlântico Sul (REBOITA et al., 2015), deixando a área da BRPS em estado de alerta durante as estações do ano em que ocorrem. GOMES (2023) avaliou as condições sinóticas associadas a valores extremos de precipitação registrados entre os anos de 2018 e 2021 na BRPS, com o objetivo de verificar as estações pluviométricas que ultrapassaram o limiar de 95% e registraram eventos extremos na bacia, e concluiu que que cerca de 60% das ocorrências registradas estão interligadas à atuação da ZCAS e de sistemas frontais na região.

Nesse contexto, a previsão numérica do tempo (PNT) surge como uma ferramenta estratégica, não apenas para fins de previsão, mas também para melhorar a compreensão dos processos que influenciam a formação de chuvas intensas. Destaca-se que parte dos desafios decorrentes da falta de observações uniformemente distribuídas, confiáveis e precisas, especialmente em três dimensões, podem ser superados com o uso da PNT (KALNAY, 2002). Em áreas de baixa densidade populacional, como as montanhas dos Andes e vastas regiões

florestais na América do Sul, a ausência de uma rede robusta de monitoramento representa um obstáculo significativo para a obtenção de resultados confiáveis, essa limitação é agravada pela falta de estações in situ, dados esparsos e problemas de acessibilidade, especialmente para variáveis climáticas essenciais, como a precipitação, temperatura do ar e umidade. Além disso, em algumas regiões, mesmo quando os dados existem, muitas vezes não são de fácil acesso devido à ausência de políticas abertas de compartilhamento de dados, à falta de controle de qualidade ou à não digitalização completa das informações. (CAVAZOS et al., 2024).

A PNT desempenha um papel fundamental na gestão eficaz de desastres naturais e na tomada de decisões em vários setores, incluindo agricultura, energia, indústria, transporte e segurança pública. No âmbito da previsão do tempo e de seu potencial para mitigar danos à sociedade, o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) é amplamente utilizado na comunidade científica e operacional para a previsão numérica do tempo e pesquisas relacionadas à atmosfera. Desenvolvido de forma colaborativa por instituições como o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e o *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), o WRF é um modelo dinâmico de alta resolução que permite simulações em diferentes escalas, desde locais até globais. Ele oferece uma ampla gama de opções de parametrização para processos físicos, como microfísica de nuvens, radiação, convecção, camadas limites planetárias e interações superfície-atmosfera. Essa flexibilidade torna o WRF adequado para aplicações que vão desde a previsão de eventos extremos até estudos de impacto climático e modelagem de qualidade do ar.

Uma característica marcante do WRF é sua capacidade de utilizar múltiplos domínios aninhados, permitindo o aumento da resolução espacial em áreas de interesse sem comprometer o desempenho computacional de regiões adjacentes. Essa funcionalidade é especialmente útil para simular fenômenos atmosféricos locais, como chuvas intensas e ventos fortes. Além disso, o WRF conta com ferramentas de assimilação de dados que permitem integrar observações em tempo real, melhorando a precisão das previsões. Sua ampla aceitação também se deve à compatibilidade com diferentes plataformas computacionais e à vasta comunidade de usuários, que contribuem com extensões, validações e estudos que enriquecem continuamente o modelo. (DE CAMPOS et al., 2023; DE ARAÚJO et al., 2023; NCAR, 2023).

Logo, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do modelo WRF em simular eventos extremos de precipitação registrados ao longo da BRPS no período de 9 a 16 de fevereiro de 2020, analisando o âmbito sinótico e estatístico modelado por ele. E conforme indicado por OLIVEIRA (2023), resultou em inundações, deslizamentos de terra e outros danos significativos, durante a semana de estudo.

O WRF conseguiu reproduzir, de forma geral, modelar as condições atmosféricas e precipitação associadas ao evento extremo analisado, indicando seu potencial como ferramenta de previsão e mitigação de desastres na região da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A localização da BRPS, que exibe uma forma alongada, com um comprimento aproximadamente três vezes superior à sua largura máxima, pode ser observada na Figura 1. De acordo com o último Censo Demográfico (IBGE 2010), a população residente nos 183 municípios que compõem a bacia é majoritariamente urbana, sendo a menor proporção de população urbana apresentada pelos municípios de Minas Gerais (88%), seguidos por São Paulo (96%) e Rio de Janeiro (97%). O total da população na bacia é de 8.502.181 habitantes, que apresentam uma grande diversidade sociodemográfica que interage diretamente com os recursos hídricos que a bacia oferece (IBGE, 2024; ANA, 2021).

Figura 1 - Representação da bacia hidrográfica (Azul) e do Rio Paraíba do Sul (Vermelho) que se estende pelos estados de São Paulo (SP), Minas Gerais (MG), Rio de Janeiro (RJ) e Espírito Santo (ES)



O Rio Paraíba do Sul, que constitui seu principal curso d'água, estende-se por cerca de 1.130 km (CAVALCANTI e MARQUES, 2016). A BRPS apresenta um clima tropical quente e úmido, com variações devido à altitude e à influência dos ventos marinhos, e é caracterizada por um padrão climático de estações chuvosas no verão e secas no inverno, característica típica do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) (REBOITA et al., 2022), e com temperatura média anual entre 18°C e 24°C (CEIVAP, 2020).

As maiores precipitações ocorrem nas cabeceiras da bacia e nos pontos mais elevados das serras do Mar, da Mantiqueira e do Órgãos, com índices pluviométricos de até 2250 mm por ano (Figura 2; DE OLIVEIRA et al., 2023). O verão é marcado por chuvas intensas, acumulando entre 200 e 250 mm por mês (DE OLIVEIRA et al., 2023). e o inverno, registra valores abaixo de 50 mm por mês, o que influencia a hidrologia e a gestão dos recursos hídricos da bacia (MARENGO, 2005).



Figura 2 - Mapa do relevo da bacia hidrográfica destacando as Serras do Mar, Mantiqueira e do Órgãos

2.2 Período de estudo e dados utilizados

O período de estudo de 09 a 16 de fevereiro de 2020 foi marcado por eventos extremos de precipitação registrados em várias estações pluviométricas da BRPS, conforme apresentado na Figura 3. Este período faz parte de um mês que se mostrou marcado por precipitações significativas em relação as observações climáticas em vários trechos da BRPS (OLIVEIRA et al., 2023). Nos dias 11, 12 e 13 foram registrados volumes intensos de chuva diária em várias

estações da BRPS, como 87 mm na estação Faz. A. Negras, 113 mm em Itamarati, e 124 mm em Cataguases, além de um valor de 235 mm na Fazenda Umbaúbas. O período de 14 a 16 de fevereiro de 2020 apresentou uma diminuição nos volumes de precipitação, mas ainda com valores significativos.

Figura 3 - Registro de eventos extremos de precipitação nas estações pluviométricas da BRPS durante o período de 09 a 16 de fevereiro de 2020

SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SÁB	DOM
10 Areal (25 mm) Caçapava (30 mm) Faz. A. Negras (46 mm)	11 Anta (24 mm) Caçapava (25 mm) Carangola (24 mm) C. Moreira (27 mm) Conservatoria (64 mm) Fagundes (34 mm) Faz. A. Negras (46 mm) Faz. S. Clara (55 mm) F. Sobradinho (45 mm) Fumaça (47 mm) R. S. Joaquim (40mm)	12 Anta(27 mm) Carangola (27 mm) C. Moreira (42 mm) Dois Rios (26 mm) Faz. A. Negras (87 mm) Faz. S. Clara (41 mm) Faz. S. Gabriel (39 mm) Itamarati (113 mm) Itaperuna (28 mm)	13 Anta (44 mm) Astolfo Dutra (96 mm) Bom Jardim (40 mm) C. Moreira (122 mm) Cataguases (124 mm) Dois Rios (56 mm) Faz. A. Negras (27 mm) Faz. Mendes (89 mm) F. Sobradinho (46 mm) F. Umbaubas (235 mm) F. Umbaubas (235 mm) F. Umbaubas (235 mm) Itaperuna (39 mm) R. S. Joaquim (30 mm)	14 C. Moreira (24 mm) Faz. S. Gabriel (50 mm) Itaperuna (24 mm)	15 Anta (42 mm)	9 Areal (33 mm) Faz.S. Gabriel (29 mm)

1 L V L K L I K O - 2020	F	ΕV	ER	EIRC) - 2020
--------------------------	---	----	----	------	----------

A Tabela 1 apresenta as 20 estações pluviométricas utilizadas neste estudo, elas são provenientes do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). E classificadas em ordem crescente de altitude, desde a menor até a maior. Essa tabela fornece informações detalhadas sobre cada estação, incluindo o código identificador, o nome da estação, bem como suas coordenadas geográficas representadas pela latitude e longitude.

Tabela 1 – Estações Pluviométricas automáticas in situ utilizados no estudo.

Código	Nome	Latitude	Longitude	Altitude
2141003	Cardoso Moreira	-21,48	-41,61	29
2141006	Dois Rios	-21,64	-41,85	50
2141004	Itaperuna	-21,20	-41,89	110
2142001	Cataguases	-21,38	-42,69	182
2242028	Anta	-22,03	-42,99	230
2142000	Astolfo Dutra	-21,30	-42,86	231
2042000	Carangola	-20,74	-42,02	399
2243013	Areal (Granja Gabi)	-22,24	-43,09	450
2243014	Fagundes	-22,29	-43,17	460

2142004	Fazenda Umbaúbas	-21,05	-42,51	490
2345063	Caçapava	-23,07	-45,71	545
2243004	Conservatória	-22,28	-43,92	550
2244010	Fazenda Santa Clara (Ex	-22,69	-44,97	550
	Bocaina)			
2244034	Ribeirão De São Joaquim	-22,30	-44,18	620
2242027	Fazenda Sobradinho	-22,20	-42,90	650
2244037	Fumaça	-22,29	-44,31	720
2243202	Fazenda São Gabriel	-22,01	-43,87	798
2242022	Fazenda Mendes	-22,28	-42,66	1010
2243010	Itamarati - Se	-22,48	-43,14	1085
2244039	Fazenda Agulhas Negras	-22,33	-44,59	1245

A Figura 4 apresenta a localização das estações pluviométricas na bacia que foram utilizadas neste estudo. As estações com dados de precipitação diária são foram empregados na validação dos resultados obtidos pelo modelo WRF. Para facilitar a interpretação, as estações foram classificadas por altitude, utilizando um esquema de cores que varia do azul escuro (representando as menores altitudes) ao amarelo (representando as maiores altitudes).



Figura 4 - Mapa das estações automáticas do SNIRH utilizadas no estudo

Foram utilizados, para a análise das condições sinóticas e para a validação dos resultados obtidos com o modelo WRF, dados da reanálise ERA5 do Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo (ECMWF), com resolução espacial de 0,25° (HERBASH et al., 2020), considerando as seguintes variáveis: Pressão ao nível médio do mar (PNMM), altura geopotencial em 500 hPa e 1000 hPa no qual foi calculado a espessura da camada entre

500 e 1000 hPa, componentes zonais e meridionais de ventos em 500 e 1000 hPa, média da umidade relativa entre 500 e 1000 hPa e por último Ômega em 500 hPa.

2.3 Simulação com o WRF

Para a simulação com o WRF foram adotados o mesmo domínio e as mesmas parametrizações conforme utilizado por DE CAMPOS et al., (2023). As simulações foram realizadas para duas grades aninhadas centradas sobre a bacia (22.211°S; 43.791°W) com resolução espacial horizontal de 12 km e 3 km, respectivamente (Figura 5). As simulações foram iniciadas 24 horas antes do período de interesse para eliminar o efeito de *spin-up* do modelo, e para a geração das condições iniciais e de fronteira requeridas pelo WRF, foram utilizados dados do *Global Forecast Systems* (GFS) com resolução espacial horizontal de 0,25°, obtidos a cada 6 horas.





As parametrizações utilizadas na simulação são descritas na Tabela 2, a parametrização de convecção cumulus foi habilitada exclusivamente na grade mais externa (d01), partindo do pressuposto de que a grade interna tem a capacidade de resolver a convecção diretamente. Essa abordagem visa a otimização da representação dos processos convectivos na

simulação, concentrando-se na grade mais ampla e permitindo que a grade interna considere esses processos de maneira mais refinada (WEISMAN; SKAMAROCK; KLEMP, 1997).

Parâmetro	Domínio Externo (d01)	Domínio Interno (d02)	
Pontos na direção x	200	281	
Pontos na direção y	200	221	
Pontos na direção z	45	45	
Resolução horizontal	12 km	3km	
Passo de tempo	60	15	
Topo do modelo	50 hPa		
Latitude central	22.211°S		
Longitude central	43.791°W		
Convecção Cumulus	Grell–Freitas (GRELL; FREITAS, 2014)		
Microfísica	Morrison 2-moment (MORRISON et al., 2009)		
Camada limite planetária	Mellor-Yamada-Janjic (JANJIĆ, 2001)		
Camada superficial	Revised-MM5 (JIMÉNEZ et al., 2012)		
Superfície terrestre	Noah-LSM (CHEN; DUDHIA, 2001)		
Radiação de ondas curtas	MM5 (DUDHIA, 1989)		
Radiação de ondas longas	RRTM (MLAWER et al., 1997)		

Tabela 2 - Parametrizações utilizadas no Modelo WRF

2.4 Análises realizadas

Para a caracterização do evento, foram analisadas as cartas sinóticas de superfície do CPTEC, com o objetivo de avaliar os padrões atmosféricos em escala sinótica. Para validação dos resultados do modelo WRF, a comparação entre os dados de precipitação observados e simulados foi realizada. Dessa forma, foi possível avaliar a capacidade do modelo em não apenas detectar a ocorrência de precipitação, mas também em reproduzir sua distribuição espaço-temporal.

Com base nesses dados, foram geradas figuras que ilustram os campos de diversas variáveis atmosféricas para uma análise mais completa. Primeiramente, os mapas de Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM), Espessura Atmosférica e Jatos de Altos Níveis (JAN) fornecem uma visão detalhada dos fenômenos de larga escala, permitindo observar variações e padrões atmosféricos nesses dias. Em seguida, foram elaborados mapas da média da Umidade Relativa, Altura Geopotencial em 500 hPa e Ômega em 500 hPa, destacando as condições de umidade e

a dinâmica vertical da atmosfera em altitudes intermediárias, fundamentais para compreender a circulação atmosférica e os processos convectivos. Além disso, foi realizada uma análise do Cisalhamento Vertical do Vento (CVV) e da PNMM, o que permite avaliar as condições propícias para o desenvolvimento de fenômenos meteorológicos significativos, como tempestades, devido à variação do vento com a altura.

Esses resultados fornecem um panorama detalhado da dinâmica atmosférica durante o período analisado, contribuindo para uma melhor compreensão das interações entre diferentes variáveis meteorológicas.

Além disso, foram utilizados dados de precipitação tanto para caracterizar e investigar os totais de precipitação associados ao evento quanto para validar os resultados das simulações do modelo WRF. Para a análise pontual com estações *in situ* e WRF de precipitação na área de interesse, foram considerados os dados de precipitação do MERGE no qual é um produto desenvolvido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Ele é gerado pela combinação entre a precipitação observada e a precipitação estimada por satélite, esses foram avaliados pontualmente em cada estação.

Os parâmetros estatísticos calculados para comparação dos resultados do WRF e das observações incluem o desvio padrão dos dados observados (ANA) e modelados (WRF), o erro médio, a correlação de Pearson, o índice de concordância e o KGE, mostrados na Tabela 2. Além disso, foi utilizado um *boxplot* para visualizar a distribuição dos dados de precipitação tanto observados quanto previstos, permitindo uma análise mais detalhada da dispersão e dos valores atípicos em cada estação.

Índice	Fórmula	Descrição	Referência
Desvio Padrão Observado e Simulado (DPo/DPs)	Desvio Padrão Observado = $\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_{\text{observado},i} - \bar{x}_{\text{observado}})^2}$ Desvio Padrão Modelado = $\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_{\text{modelado},i} - \bar{x}_{\text{modelado}})^2}$	O desvio padrão é uma medida que indica o quanto os valores de um conjunto de dados variam em relação à média. Quanto maior o desvio padrão, maior a dispersão dos dados.	SILVA, TÁCITO., (1973)
Erro Médio (ME)	$ME = rac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_{\mathrm{observado},i} - x_{\mathrm{modelado},i})$	O erro médio é a média das diferenças entre os valores observados e os valores modelados. Ele indica a magnitude média do erro entre os dois conjuntos de dados.	FISHER, R.A., (1920)

Tabela 2 - Parâmetros Estatísticos para Avaliação do Modelo

Correlação de Pearson (Rpearson)	$R_{Pearson} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})(S_i - \overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (S_i - \overline{S})^2}}$	A correlação de Pearson é uma medida estatística que indica o grau de relação linear entre dois conjuntos de dados. Ela varia de -1 a 1, onde 1 indica uma correlação perfeitamente positiva, -1 indica uma correlação perfeitamente negativa e 0 indica ausência de correlação.	PEARSON, K. (1895)
Índice de Concordância (d)	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (S_i - \overline{O} + O_i - \overline{O})^2}$	O índice de concordância avalia o grau de concordância entre dois conjuntos de dados, considerando tanto a média dos valores como a variabilidade entre eles. Ele varia de 0 a 1, sendo 1 indicativo de concordância perfeita.	LEGATES, D.R., MCCABE Jr, G.J., 1999. WILLMOTT, C.J., ROBESON, S.M., MATSUURA, K., 2012.
Eficiência de Kling-Gupta (KGE_2012)	$\begin{split} & KGE_{2012} = 1 - ED \\ & ED = \sqrt{(s[1]*(r-1))^2 + (s[2]*(\gamma-1))^2 + (s[3]*(\beta-1))^2} \\ & r = \text{Pearson Correlation Coefficient} \\ & \beta = \mu_s/\mu_o \\ & \gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s/\mu_o}{\sigma_o/\mu_o} \end{split}$	O KGE é uma métrica que combina três componentes: viés, correlação e variabilidade relativa, ele oferece uma avaliação do desempenho do modelo em reproduzir os padrões de um conjunto de dados observadosInfinito < KGE (2012) < 1, não indica viés, maior é melhor.	KLING, H., FUCHS, M., & PAULIN, M. (2012).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização das condições sinóticas e da precipitação registrada

A análise das cartas sinóticas de superfície e de altos níveis do CPTEC revela a evolução dos sistemas atmosféricos que afetam a região da bacia ao longo do período estudado (09 a 16 de fevereiro). Para exemplificar essa evolução são apresentadas as cartas dos dias 9, 13 e 16 (Figuras 5, 6 e 7). Essa comparação entre os níveis de superfície e altos níveis é fundamental para entender o comportamento das frentes frias, da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e dos Jatos de Altos Níveis (JAN), que contribuíram para os eventos de precipitação extrema.

No dia 9, a carta sinótica de superfície, apresentada na Figura 6, mostra a influência de uma frente fria que se encontrava sobre a região sul do Brasil, promovendo instabilidade atmosférica e precipitações intensas nessa região. Essa frente fria ao longo da semana vai estacionar próximo da bacia na qual é associada à circulação ciclônica, que favoreceu o levantamento de umidade, criando condições propícias para a formação de chuvas na região de

estudo. Enquanto isso, nas cartas de altos níveis, observa-se a atuação dos JAN, que se aproximavam da região com ventos fortes, auxiliando no levantamento de ar e intensificando os sistemas de baixa pressão e frentes frias. A presença desses JAN acoplado com a frente em superfície favoreceu a intensificação da convecção e das precipitações extremas.



Figura 6 - Carta sinótica de superfície e de altos níveis do dia 9 às 12h.

No dia 13, a carta sinótica de superfície (Figura 7) ainda evidencia a atuação da ZCAS e a presença de um sistema de baixa pressão no Atlântico Sul, que se deslocava lentamente para o oceano, na qual a FF estacionaria na região atua como suporte de umidade para ZCAS, aumentando o seu tempo de duração sobre a bacia. A advecção de umidade, oriunda do norte do Brasil, foi direcionada para o sudeste, resultando na continuidade de chuvas intensas na bacia. Nas cartas de altos níveis, observa-se a presença de um cavado com a crista posicionada sobre a BRPS. Essa configuração atmosférica indica uma alteração na dinâmica de altos níveis, com menor contribuição para o levantamento de ar na região. Apesar disso, as condições de instabilidade atmosférica persistiram, influenciando a manutenção de padrões meteorológicos favoráveis a eventos extremos.



Figura 7 - Carta sinótica de superfície e de altos níveis do dia 13 às 12h.

Já no dia 16, a carta sinótica de superfície (Figura 8) mostra que a influência da ZCAS cessou completamente, que promove condições atmosféricas mais estáveis. Como resultado, as precipitações diminuem significativamente. Em altos níveis, os JAN aparecem uma circulação anticiclônica sobre a bacia na qual influenciando a região da bacia para uma transição para uma fase de estabilidade atmosférica, com menos influência de sistemas dinâmicos que favorecem a formação de eventos extremos.





A Figura 9 apresenta um *boxplot* das precipitações acumuladas diárias nas estações monitoradas ao longo do período estudado, evidenciando tanto a variação nos volumes de chuva quanto a influência de fatores locais na distribuição das precipitações. O gráfico destaca a variabilidade espacial entre as estações, com diferenças perceptíveis nos padrões de

precipitação. Em algumas estações, como Fazenda Agulhas Negras e Anta, observa-se uma dispersão maior nos dados, indicando uma variabilidade significativa na quantidade de chuva. Em contraste, as estações Fazenda Umbaúbas e Areal apresentam uma dispersão menor, sugerindo um padrão de precipitação mais uniforme e previsível.

A mediana das precipitações, representada por uma linha vermelha, situa-se geralmente entre 10 e 30 mm para a maioria das estações, enquanto algumas estações, como Fazenda Santa Clara e Ribeirão São Joaquim, registram valores médios próximos de zero, o que indica baixos volumes de precipitação nessas áreas. A média das precipitações, indicada por uma linha pontilhada verde, está acima da mediana em algumas estações, o que pode refletir a ocorrência de eventos extremos de precipitação que elevam o valor médio. Esses eventos extremos são evidenciados pelos *outliers* no gráfico, representados por pontos fora dos intervalos dos quartis, o que proporciona uma visão completa sobre a distribuição das chuvas, destacando tanto as tendências centrais quanto os eventos atípicos.

Os *outliers* presentes na Figura 9 revelam eventos extremos de precipitação que, embora raros, têm um impacto significativo na variabilidade dos dados. Esses pontos fora dos limites típicos são particularmente visíveis em estações como Fazenda Agulhas Negras e Anta, indicando que essas localidades experimentaram episódios de chuva intensos durante o período estudado. A presença de *outliers* contribui para elevar a média em várias estações, refletindo a ocorrência de precipitações atípicas.



Figura 9 – Boxplot da precipitação acumulada diária do período dos dias 09 a 16 em cada estação

3.2 Avaliação das condições de grande escala simuladas pelo WRF

Durante o período de estudo avaliado, observou-se um aumento na quantidade de precipitação nos dias 11 e 13 resultante da ZCAS sobre a bacia, com registros superiores aos limiares de 95% e 99%, identificados por OLIVEIRA et al. (2023), na maioria dos pluviômetros alocados na Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS). Esses eventos destacaram-se como os mais intensos da semana, o que justifica a seleção desses para fins de comparação e análise.

Os campos de PNMM, espessura e dos JAN, representados a partir dos dados do ERA5 e dos resultados do WRF estão apresentados na Figura 10, que ilustra os principais padrões atmosféricos predominantes durante o período de estudo. Posteriormente, esses resultados foram comparados com as cartas sinóticas disponibilizadas pelo CPTEC, proporcionando uma validação cruzada e um entendimento mais profundo dos fenômenos meteorológicos observados e os simulados pelo modelo.

As Figuras 10, 11 e 12 foram organizadas em duas colunas e três linhas, referentes aos dados do WRF (A) e ERA-5 (B) para os dias 9 de fevereiro, 13 de fevereiro e 16 de fevereiro às 12 UTC. No dia 9 de fevereiro de 2020, a figura 8 mostra, a partir dos resultados do WRF, os JAN concentrados na área costeira do sul do Brasil e Uruguai. Os ventos são relativamente intensos, com áreas de vento forte indicadas em azul nas proximidades da costa. Já o ERA-5 representa os JAN mais distribuídos e suavizados. Isso pode ser devido a resolução dos dados uma vez que para captar padrões de grande escala, pode suavizar estruturas atmosféricas, especialmente em eventos de precipitação intensa e localizada. Segundo o estudo de ROCHA et al. (2024) esse nível de suavização se dá pela interpolação espacial dos dados observacionais para produzir uma visão mais homogênea da atmosfera, o que pode mascarar variações de curto prazo e detalhes espaciais finos que são mais evidentes em dados de alta resolução ou observacionais locais, como os dados obtidos por estações meteorológicas em tempo real.

A região com ventos fortes aparece menos intensa e mais difusa no ERA5 em comparação com o WRF, o que pode ser esperado de uma reanálise com menor resolução espacial. No dia 13, o WRF continua mostrando áreas de ventos intensos sobre o oceano Atlântico, com uma faixa de ventos fortes que parece estar mais organizada e alinhada à costa. Isso sugere uma possível frente fria avançando ou um sistema de baixa pressão.

O ERA-5 também mostra ventos intensos, mas de forma mais difusa, com áreas de baixa pressão menos evidentes e ventos de menor intensidade em comparação com o WRF. No entanto, o padrão geral de ventos se mantém semelhante ao WRF, indicando coerência entre os

dados. Para o dia 16, o WRF indica uma intensificação dos ventos ao sul do Brasil, com uma grande área de vento forte em tons de azul escuro.

Isso sugere a presença de um sistema ciclônico bem desenvolvido ou uma frente fria intensa, com alta resolução para mostrar a estrutura detalhada dos ventos. O ERA-5 também mostra ventos intensos e um sistema de baixa pressão claro, mas novamente de forma mais difusa e menos detalhada que o WRF. As isóbaras são mais espaçadas e as áreas de vento intenso estão menos concentradas.



Figura 10: Mapa de PNMM, Espessura e JAN dos modelos WRF(A) e ERA-5(B) nos dias 09, 13 e 16.

Na Figura 11, os resultados do dia 9 revelam uma distribuição de umidade elevada (tons de azul) em grande parte da região central e oeste do Brasil, enquanto o leste e nordeste apresentam umidade mais baixa (tons alaranjados). As linhas de contorno indicam a altura geopotencial em 500 hPa, como em 5709 metros, representando a estrutura atmosférica na área. A variável ômega evidencia valores positivos nas áreas de menor umidade, sugerindo subsistência, e movimento ascendente nas regiões mais úmidas. O ERA-5 também mostra um padrão semelhante, mas com um contraste suavizado entre áreas secas e úmidas, o que pode ser explicado pela menor resolução espacial da reanálise em relação ao WRF.

No dia 13, forma-se claramente um padrão de corredor de umidade, com o WRF destacando o movimento ascendente sobre as áreas mais úmidas da bacia, sugerindo uma intensificação da convecção e uma possível maior atividade de precipitação. Nesse dia, ocorre uma mudança no padrão, com o deslocamento da umidade para o sudeste, enquanto as áreas ao norte da bacia mostram uma redução na umidade. O ERA-5 também capta essa configuração de corredor de umidade, embora de forma mais suavizada.

Estudos realizados por SILVA (2018) mostram que o WRF é eficaz na simulação de eventos de ZCAS, especialmente na representação de sistemas de baixa pressão e cavados em níveis médios e altos, que são cruciais para a convergência de umidade e intensificação da precipitação na região sudeste do Brasil. Esses padrões sinóticos são essenciais para canalizar a umidade da Amazônia para o Sudeste, criando condições para chuvas intensas durante os eventos de ZCAS.

Já no dia 16 de fevereiro de 2020, a bacia se encontra em uma área de transição, com a umidade mais concentrada ao norte, enquanto o Sul apresenta condições mais secas. O WRF evidencia bem essa divisão, capturando os detalhes da variação de umidade, enquanto o ERA-5, mais uma vez, apresenta as transições de maneira mais suave.

Essa diferença entre os dois conjuntos de dados ressalta a importância de uma análise de alta resolução para captar com maior precisão os padrões de umidade e o movimento vertical atmosférico, que influenciam diretamente os fenômenos meteorológicos extremos.



Figura 11: Mapa da Média da Umidade Relativa, Altura Geopotencial em 500 hPa e Ômega em 500 hPa dos modelos WRF(A) e ERA-5(B) nos dias 09, 13 e 16.

A figura 12 apresenta uma comparação entre os resultados do modelo WRF e os dados da reanálise ERA-5 para o período de 09 a 16 de fevereiro de 2020, em intervalos de 12 UTC. A primeira coluna exibe os padrões de cisalhamento vertical (diferença na velocidade do vento entre 500 e 1000 hPa) e PNMM gerados pelo WRF, enquanto a segunda coluna mostra as mesmas variáveis obtidas do ERA-5.

O cisalhamento vertical é importante para entender a dinâmica atmosférica e a formação de tempestades e sua intensidade, enquanto a pressão ao nível do mar reflete a distribuição dos sistemas de alta e baixa pressão, fundamentais para a previsão do tempo.

Na coluna referente ao WRF, observa-se uma variação significativa no cisalhamento vertical, no dia 13 com valores que vão de -18 m/s à +58 m/s, sendo os valores negativos indicativos de inversão de vento em diferentes altitudes. As áreas de maior intensidade de

cisalhamento concentram-se predominantemente ao longo da costa leste do Brasil, especialmente no sul, nos dias iniciais do período analisado. À medida que o tempo avança, nota-se um enfraquecimento do cisalhamento vertical, o que pode estar relacionado com o deslocamento da frente fria.

As linhas de contorno de pressão ao nível do mar, que indicam a distribuição de sistemas de alta e baixa pressão, mostram a presença de sistemas de baixa pressão nas regiões de maior cisalhamento, sugerindo uma relação entre o cisalhamento e esses sistemas atmosféricos. Estudos realizados por PLANA JUNIOR (2021) confirmam a importância do cisalhamento vertical e do transporte de umidade via do Jato de Baixos Níveis da América do Sul (JBNAS), especialmente durante eventos de ZCAS, pois esses mecanismos intensificam a convergência de umidade e favorecem a precipitação nas áreas sob influência da ZCAS.

Por outro lado, a coluna do ERA-5 exibe padrões de cisalhamento vertical mais suaves quando comparados ao WRF, com intensidades variando de -7 m/s a +38 m/s. Essa diferença de intensidade pode ser explicada pela menor resolução espacial do ERA-5, que tende a representar sistemas meteorológicos de forma mais ampla e com menor detalhamento. Apesar disso, os padrões de cisalhamento ao longo da costa sul do Brasil seguem uma tendência semelhante à do WRF, mas com magnitudes mais baixas. As linhas de pressão ao nível do mar no ERA-5 também indicam sistemas de baixa pressão, porém com menos detalhes e estruturas menos nítidas, refletindo a diferença na resolução dos dois conjuntos de dados e reforçando a importância da alta resolução para capturar os detalhes dos sistemas meteorológicos.

Esse contraste entre o WRF e o ERA-5 destaca a influência da resolução espacial na representação de variáveis meteorológicas como o cisalhamento vertical e a pressão ao nível do mar, sendo essencial considerar essas diferenças ao interpretar os padrões atmosféricos nas duas abordagens.



3.3 Avaliação da precipitação simulada pelo WRF

A Figura 13 apresenta os valores acumulados no período da precipitação simulada pelo modelo WRF, MERGE e dos registros nas estações. Durante o período de estudo foram registrados dados de precipitação diária de até 113,3 mm/dia, 87,6 mm/dia e 96,1 mm/dia nas estações Itamarati, Fazenda Agulhas Negras e Astolfo Dutra, respectivamente. Destacam-se, em média, valores entre de 50 mm a 100 mm, próximos aos valores observados na região. Picos de 350 mm/dia foram simulados pelos WRF enquanto o máximo foi registrado pluviômetro da Fazenda Umbaubas de 235,6 mm/dia no estado do Rio de Janeiro no dia 13, mostrando assim que modelo superestimou a precipitação em alguns pontos da bacia.

Ao comparar as diferentes fontes de dados, observa-se que o modelo WRF na figura 13 tende a superestimar a precipitação em vários pontos, como em Caçapava e Fazenda São Gabriel, onde os valores modelados ultrapassam os 200 mm, enquanto as medições locais indicam valores consideravelmente menores. O conjunto de dados MERGE na figura 13 apresenta valores intermediários entre o WRF e as medições das estações, mostrando-se mais coerente em localidades como Itaperuna, Fazenda Sobradinho e Ribeirão São Joaquim.

Em relação às estações com maior acúmulo de precipitação, Fazenda São Gabriel se destaca, com as estações registrando cerca de 150 mm, enquanto o WRF estimou mais de 250 mm. O MERGE, por sua vez, registrou aproximadamente 200 mm, situando-se entre os dois extremos. Fazenda Sobradinho e Fazenda Mendes também apresentaram altos índices de precipitação, com o WRF superestimando em relação aos dados observados.

Por outro lado, localidades como Cardoso Moreira e Areal registraram valores menores de precipitação, em torno de 80-100 mm, com pouca variação entre os três conjuntos de dados, indicando uma razoável concordância entre as fontes. Conservatória e Anta também mostraram acumulados abaixo de 150 mm, com o WRF subestimando a precipitação em comparação às estações locais.





Em suma, a análise comparativa dos totais de precipitação na semana observada sugere que o modelo WRF simulou na maioria das estações adequadamente os eventos de chuva intensa, enquanto o MERGE subestima em relação as observações, por causa da sua assimilação com de dados. As discrepâncias identificadas devem ser consideradas em estudos futuros, especialmente em estudos de impacto hidrológico e planejamento de recursos hídricos. Vale ressaltar que estudos como GARCIA et al. (2023) e PLANA JUNIOR (2021) demonstraram que o WRF pode subestimar eventos de precipitação extrema em regiões montanhosas complexas, como o sul de Minas Gerais. Garcia et al. (2023), por exemplo, destacaram que, embora o esquema de parametrização GRELL-FREITAS tenha apresentado um desempenho superior na simulação de eventos extremos, ainda houve subestimação quando comparado com dados de estações meteorológicas, evidenciando a necessidade de melhorias contínuas no modelo para capturar adequadamente a variabilidade espacial e a intensidade da precipitação.

A Figura 14 apresenta o erro médio (EM) das previsões de precipitação realizadas pelo modelo, em comparação com os dados observados nas estações. Valores positivos indicam superestimação pelo modelo, enquanto valores negativos representam subestimação. As estações de Caçapava e Ribeirão São Joaquim, por exemplo, destacam-se por apresentarem os maiores valores positivos de erro médio, sugerindo que o modelo superestimou significativamente a precipitação nessas localidades. Por outro lado, as estações Astolfo Dutra, Fazenda Umbaúbas e Itamarati apresentaram os maiores valores negativos de EM, indicando uma subestimação considerável das precipitações pelo modelo, sugerindo uma tendência do modelo em subestimar as precipitações nessas regiões.

Em contrapartida, localidades como Caçapava e Ribeirão São Joaquim tiveram erros médios positivos de magnitude moderada, revelando uma leve superestimação do modelo. Mas, em geral, o modelo não apresentou valores significativos, mantendo-se dentro de uma faixa de erro médio de aproximadamente 10 mm. Isso sugere que, embora existam algumas variações regionais no desempenho do modelo, a maioria dos erros de previsão se manteve dentro de um intervalo razoável, sem grandes desvios.



A figura 15 mostra importantes discrepâncias entre os desvios padrão observados e previstos para diversas estações de monitoramento. Em algumas estações, como Fazenda Umbaúbas, Fazenda Mendes, Fazenda Sobradinho e Fazenda Agulhas Negras, o desvio padrão dos valores observados é significativamente maior do que o previsto, sugerindo que o modelo de previsão subestimou a variabilidade da precipitação nesses locais. Isso pode indicar que o modelo não conseguiu capturar adequadamente os eventos mais extremos ou a variabilidade natural da precipitação nessas áreas.

Por outro lado, em estações como Carangola, Cardoso Moreira, Itaperuna e Dois Rios, os desvios padrão observados e previstos estão mais próximos, o que sugere que o modelo foi capaz de reproduzir de maneira satisfatória a variabilidade da precipitação nesses locais. No entanto, de modo geral, observa-se uma tendência de o WRF prever menores desvios padrão em diversas estações, o que pode ser um indicativo de que ele não está capturando toda a variabilidade dos dados reais. Isso pode ocorrer devido às limitações nos parâmetros do modelo, ausência de considerações sobre fenômenos locais ou sazonais, ou até mesmo por eventos climáticos extremos que não foram bem representados.

Em particular, a estação Fazenda Umbaúbas se destaca com uma diferença expressiva entre o desvio padrão observado (cerca de 75) e o previsto (cerca de 40), sugerindo uma alta variabilidade na observação que não foi refletida nas previsões do modelo. Isso se deve, em parte, a um registro extremo de 235 mm, que influenciou significativamente a variabilidade observada. Situações semelhantes são observadas em Fazenda Sobradinho e Fazenda Santa Clara, onde as diferenças também são significativas, indicando que o modelo pode não estar adequadamente representando a variabilidade natural ou eventos extremos de precipitação nessas áreas.





A Figura 16 exibe o índice de concordância entre os dados observados e previstos, variando de 0 a 1, onde 1 representa uma concordância perfeita. Nota-se que estações como Fazenda Umbaúbas, Cataguases e Astolfo Dutra apresentam índices muito próximos de 1, o que reflete uma alta concordância entre as observações e as previsões. Estas estações estão localizadas na região norte da Bacia do Rio Paraíba do Sul, uma área que registrou os maiores acumulados de precipitação em torno do dia 13 de fevereiro, conforme ilustrado na figura dos registros. A baixa elevação nesta região pode ter contribuído para a maior intensidade de chuvas, potencialmente intensificando a concordância entre os dados modelados e observados.

Por outro lado, a estação Areal, situada mais ao sul da bacia, apresenta um índice de concordância consideravelmente mais baixo, indicando uma maior discrepância entre os valores previstos e os registados. Além disso, outras estações como Conservatória e Ribeirão de São Joaquim, localizadas na região central da bacia, também exibem índices de concordância

mais baixos, acompanhados por menores acumulados de precipitação. Aqui está o parágrafo completo com as citações sugeridas:

Essa variação pode ser explicada pelas diferenças altitudinais e pelo impacto que a topografia exerce sobre a distribuição espacial da precipitação. Regiões de maior altitude, como a parte sul da bacia, tendem a intensificar processos orográficos, resultando em chuvas mais intensas, enquanto áreas de menor altitude, como a região central, não recebem o mesmo efeito, o que contribui para as discrepâncias observadas (SANTOS 2023). Esse efeito é particularmente importante em regiões montanhosas, onde a elevação cria uma barreira para o fluxo de ar úmido, forçando-o a ascender, resfriar-se e condensar, produzindo precipitação concentrada no barlavento da serra (HOUZE 2012; ABREU et al. 2017; TERASSI et al. 2022).

No estudo de TAVARES & FERREIRA, (2020), foi observado em Petrópolis que eventos extremos associados a sistemas frontais frequentemente resultam em volumes maiores de precipitação nas estações a barlavento, enquanto áreas a sotavento são menos afetadas, especialmente quando o sistema de chuva se origina no interior do continente. Essa influência da orografia é confirmada por estudos que destacam a relação entre altitude e volume de precipitação, com eventos analisados apresentando coeficientes de correlação R² de até 0,99 para eventos em áreas de relevo acentuado.



Figura 16 - Índice de concordância entre WRF e estações

O Índice de Correlação de Pearson, representado na figura 17, mede a relação linear entre os dados de precipitação simulados pelo modelo WRF e os observados pelas estações. Seus valores variam de -1 a 1, onde 1 indica uma correlação perfeita positiva, ou seja, os valores simulados seguem exatamente o comportamento dos observados; 0 indica ausência de correlação, e -1 representa uma correlação negativa perfeita, o que significa que os valores simulados se comportam de maneira oposta aos observados.

Observa-se que a maioria das estações apresenta uma correlação positiva significativa, com algumas, como Fazenda Umbauabas e Cataguases, atingindo valores próximos de 1, sugerindo uma forte concordância entre os dados simulados e os observados. Por outro lado, estações como Carangola e Fazenda Sobradinho apresentam correlação muito baixa, abaixo de 0,2, indicando que o modelo WRF não consegue capturar bem a variabilidade da precipitação nessas localidades. A estação Fazenda São Gabriel também apresenta uma correlação alta, destacando-se pela boa correspondência entre os dados simulados e observados.



Figura 17 - Índice de correlação de Pearson entre WRF e estações

A figura 18 representa o índice KGE (*Kling-Gupta Efficiency*) 2012, que avalia a eficiência da simulação levando em consideração três fatores principais: correlação, viés de volume e variabilidade dos dados. O índice KGE varia de $-\infty$ a 1, sendo que 1 representa uma simulação perfeita, 0 indica que a previsão não traz melhorias em relação a uma média

climatológica, e valores negativos significam que a simulação é inferior a uma previsão baseada apenas na média.

Nessa figura, a maioria das estações apresenta um KGE positivo, com algumas, como Astolfo Dutra, Fazenda Umbauabas e Fazenda São Gabriel, atingindo valores próximos de 0,5, sugerindo que o modelo WRF apresenta um desempenho moderado nessas localidades. No entanto, algumas estações, como Carangola e Areal, apresentam valores negativos de KGE, o que indica que o modelo não conseguiu representar adequadamente a precipitação, sendo até inferior a uma previsão simples baseada na média climatológica.





4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo analisar o desempenho do modelo WRF na simulação de um evento extremo de precipitação registrado entre 00 UTC de 9 de fevereiro de 2020 a 18 UTC de 16 de fevereiro de 2020 na BRPS. A partir dos resultados, foi possível verificar que o modelo WRF conseguiu detectar a ocorrência de precipitação extrema na região, demonstrando sua habilidade em capturar a ocorrência de grandes volumes de precipitação.

Os testes estatísticos realizados sobre o modelo para este evento apresentaram resultados satisfatórios na maioria das estações analisadas. Métricas como o índice de concordância e a correlação de Pearson indicaram valores elevados em estações localizadas nas áreas de maior intensidade de precipitação, como Fazenda Umbaúbas e Cataguases, onde os índices de concordância atingiram valores próximos a 1 e a correlação superou 0,8. Esses resultados evidenciam a capacidade do modelo WRF em capturar os padrões de precipitação registrados, especialmente em regiões mais afetadas.

Além disso, o índice KGE apresentou desempenho moderado em estações como Astolfo Dutra e Fazenda São Gabriel, com valores superiores a 0,5, o que reforça a adequação do modelo para representar variabilidade e volume de precipitação em localidades específicas. Apesar de discrepâncias pontuais, como a superestimação em algumas áreas (ex.: Caçapava), o WRF conseguiu reproduzir, de forma geral, as condições atmosféricas e precipitação associadas ao evento extremo analisado, indicando seu potencial como ferramenta de previsão e mitigação de desastres na região da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

5. REFERÊNCIAS

ABRHIDRO, 2022. A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: https://www.abrhidro.org.br/ivsrhps/index.php?ID=1064>. Acesso em: 13 set. 2023

ABREU, F. G.; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B.: Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 239-250, 2017.

AGEVAP. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de recursos hídricos das bacias afluentes: caracterização sócio-econômica. **Fundação COPPETEC Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente**. 2013. Disponível em: https://www.ceivap.org.br/downloads/PSR-010-R0.pdf >. Acesso em: 20 set. 2023.

ANA, 2011. Estudos Auxiliares para a Gestão do Risco de Inundações Bacia do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: http://gripbsul.ana.gov.br/ABacia.html. Acesso em: 13 set.2023

ANA, 2011. Estudos Auxiliares para a Gestão do Risco de Inundações Bacia do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: http://gripbsul.ana.gov.br/Hidrografia.html. Acesso em: 13 set. 2023

BOLDRIN, L. P; PEREIRA, C. S. Estudo para prevenção de enchentes e inundações. **Faculdade De Dracena Curso De Engenharia Civil.** 2022. Disponível em: https://uniesp.edu.br/sites/_biblioteca/repositorio/20230901205954.pdf. Acesso em: 05 jun. 2024

BRASILIENSE, C. S. et al. Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in southeast Brazil. **Meteorological Applications**, v. 25, n. 1, p. 66–77, 2018.

CASSALHO, F; DALELES, C. R.; BOSCO, J. C. R.; SILVA, C. B. Hydrologic Validation of MERGE Precipitation Products over Anthropogenic Watersheds. **Water**, v.12, p.1268.

CAVALCANTI, B. S.; MARQUES, G. R. G. Recursos hídricos e gestão de conflitos: a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir da crise hídrica de 2014-2015. **Revista de Gestão dos Países de Língua Portuguesa, Rio de Janeiro**, RJ, v. 15, n. 1, p. 4–16, 2016.. Disponível em: https://periodicos.fgv.br/rgplp/article/view/78411. Acesso em: 16 set. 2023.

CAVAZOS T, BETTOLLI ML, CAMPBELL D, SÁNCHEZ RODRÍGUEZ RA, MYCOO M, ARIAS PA, RIVERA J, REBOITA MS, GULIZIA C, HIDALGO HG, ALFARO EJ, STEPHENSON TS, SÖRENSSON AA, CEREZO-MOTA R, CASTELLANOS E, LEY D and MAHON R (2024) Challenges for climate change adaptation in Latin America and the Caribbean region. *Front. Clim.* 6:1392033.

CEIVAP, AGEVAP, 2014. PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL E PLANOS DE AÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DAS BACIAS AFLUENTES. Acesso em: 22 de maio de 2024 https://www.ceivap.org.br/conteudo/relatorio-diagnostico-rp6-tomo1.pdf

CHEN, F.; DUDHIA, J. Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 4, 2001.

COMITÊ PARA INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. (CEIVAP) Eventos críticos. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/arqforum/Cohidro/Ativ-703-Eventos-Criticos-rev1out13.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

COMITÊ PARA INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. (CEIVAP). **Relatório diagnóstico RP6 - Tomo 1**. Disponível em: https://www.ceivap.org.br/conteudo/relatorio-diagnostico-rp6-tomo1.pdf>. Acesso em: 24 maio 2024.

COMITÊ PARA INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). **Publicação processo 030-2018**. Disponível em: http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arq_pubMidia_Processo_030-2018_PF02.pdf>. Acesso em: 24 maio 2024.

DE ARAÚJO, ALINE AQUINO; GARCIA, DENIS WILLIAM; MONTEIRO, JULIANO DOS REIS; MIGUEL, THALES VICTOR; DE CAMPOS, BRUNO; CARVALHO, VANESSA SILVEIRA BARRETO; REBOITA, MICHELLE SIMÕES. 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, 2023.

DE CAMPOS, BRUNO; CARVALHO, VANESSA SILVEIRA BARRETO; MATTOS, ENRIQUE VIEIRA. Assessment of cloud microphysics and cumulus convection schemes to model extreme rainfall events over the Paraiba do Sul River Basin. **Urban Climate**, v. 51, p. 101618, 2023.

DE OLIVEIRA, DÉBORA MARTINS; CARVALHO, VANESSA SILVEIRA BARRETO; DA SILVA, BENEDITO CLÁUDIO; REBOITA, MICHELLE SIMÕES; DE CAMPOS, BRUNO. Hydrological and Precipitation Extremes and Trends over the Paraiba do Sul River Basin, Brazil. **Climate**, v. 11, p. 138, 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, n. 20, 1989.

ESCOBAR, GUSTAVO CARLOS JUAN. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS): critério de detecção para uso em centros operacionais de previsão de tempo. CEP, v. 12, p. 010, 2019.

FISHER, R.A., 1920. A Mathematical Examination of the Methods of Determining the Accuracy of an Observation by the Mean Error, and by the Mean Square Error. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**.

GARCIA, DENIS & REBOITA, MICHELLE & CARVALHO, VANESSA. (2023). Evaluation of WRF Performance in Simulating an Extreme Precipitation Event over the South of Minas Gerais, Brazil. **Atmosphere**. 14. 1276.

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, n. 10, 2014.

GOMES, I. B. S.; CARVALHO, V. S. B. Avaliação das condições sinóticas associadas a eventos extremos de precipitação na Bacia Paraíba do Sul. In: ENCONTRO DOS ALUNOS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO CPTEC/INPE (EPGMET), 2023, Online. Resumos/Pôsteres... São José dos Campos: **INPE**, 2023. Disponível em: http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGPDW34R/4A86CNL>.

HADDAD, E. A.; TEIXEIRA, E. Economic impacts of natural disasters in megacities: The case of floods in São Paulo, Brazil. **Habitat International**, v. 45, n. 2, p. 106-113, 2015.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. Q. J. R. Meteorol. Soc., v. 146, p. 1999-2049, 2020.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J. Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation. **NASA** Doc., 47 pp., 2015. Disponível em: http://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_doc.pdf.

HOUZE, R. A.: Orographic effects on precipitating clouds. Reviews of Geophysics, v.50, n. 1, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Dados do Censo 2010 publicados dia 04/11/2010. 2010. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 24 maio 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Panorama de Paraíba do Sul - RJ. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/paraiba-do-sul/panorama. Acesso em: 15 maio 2024.

JANJIĆ, Z. I. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP MESOmodel. **NCEP Office Note**, No. 437, 61 pp, 2001.

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

KALNAY, E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, pp. 2, 2002.

KLING, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, 424, 264-277.

LAGOS-ZÚÑIGA, MIGUEL & BALMACEDA-HUARTE, ROCIO & REGOTO, PEDRO & TORREZ-RODRIGUEZ, LIMBERT & OLMO, MATÍAS & LYRA, ANDRÉ & PAREJA-QUISPE, DAVID & BETTOLLI, MARIA. (2022). Extreme indices of temperature and precipitation in South America: trends and intercomparison of regional climate models.. 10.21203/rs.3.rs-1717139/v1.

LEGATES, D.R., MCCABE Jr, G.J., 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research** 35(1) 233-241.

LUIZ-SILVA, W., OSCAR-JÚNIOR, A.C., 2022. Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, **Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends**. *Nat Hazards* **114**, 713–732

MACHADO, MARINICE dos SANTOS. Avaliação dos impactos psicossociais provocados por inundações bruscas sobre populações vulneráveis: estudo de caso das vítimas da catástrofe ocorrida em Itaipava (Petrópolis, RJ), fevereiro de 2008. – Niterói: [s. n.], 2010. 94f.

MARENGO, J.; ALVES, L. M. Tendência hidrológicas da Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 215–226, 2005.

MLAWER, E. J. et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D14, 1997.

MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of Oneand Two-Moment Schemes. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 3, 2009.

NCAR, 2023. Weather Research & Forecasting Model (WRF). Disponível em: https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf. Acesso em: 13 set. 2023

OLIVEIRA, DÉBORA M.. Desenvolvimento e calibração de um sistema de previsão de eventos extremos de chuva e vazão como suporte à prevenção de inundações: um estudo de caso para a bacia do Paraíba do Sul. 2022. f. Proposta de Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Itajubá, 2022.

PAIVA, A. C. E. et al. Urban expansion and its impact on water security: The case of the Paraíba do Sul River Basin, São Paulo, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 720, 2020.

PEARSON, K. (1895). Note on regression and inheritance in the case of two parents. **Proceedings of the Royal Society of London,** 58, 240-242.

PLANA JUNIOR, Paulo Eduardo. A contribuição do JBNAS para a precipitação em um episódio de ZCAS: análises físicas e simulações com o modelo WRF. 2021. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - **Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2021. doi:10.11606/D.14.2021.tde-07072021-122852. Acesso em: 2024-11-04.

QUADRO, M. F. L. Estudo de episódios de zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul. 1994. 94 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

REBOITA, M. S.; TEODORO, T. A.; FERREIRA, G. W. S.; SOUZA, C. A. Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul: Clima Presente e Futuro. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 15, p. 343-358, 2022.

REBOITA, Michelle & KRUSCHE, Nisia & AMBRIZZI, Tércio & ROCHA, Rosmeri. (2015). Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terra e Didatica**.

ROCHA R. P., Reboita M.S., Crespo N.M. Análise do evento extremo de precipitação ocorrido no Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024. **J Health NPEPS**. 2024.

SILVA, Natália Pillar da. Estudo dos Mecanismos Vinculados ao Estabelecimento de um Evento de ZCAS Através de Simulações com o Modelo WRF. 2018. Tese (Doutorado em

Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Acesso em: 2024-11-04.

SILVA, Tácito. Estimativa do desvio padrão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 8, n. 8, p. 245-249, 1973.

SOUZA, T. Gestão de recursos hídricos: bacia do rio Paraíba do Sul. 2012. 134f. Monografia (Especialização) – Universidade Cândido Mendes, Faculdade Integrada AVM, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: . Acesso em: 16 set. 2023.

TAVARES, C. de M. G., & FERREIRA, C. de C. M. (2020). A RELAÇÃO ENTRE A OROGRAFIA E OS EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MUNICÍPIO DE PETRÓPOLIS- RJ. **Revista Brasileira De Climatologia**, 26.

WEISMAN, M. L.; SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B. The Resolution Dependence of Explicitly Modeled Convective Systems. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 4, 1997.

WILLMOTT, C.J., ROBESON, S.M., MATSUURA, K., 2012. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology** 32(13) 2088-2094.

TERASSI, P. M. DE B.; DA SILVA OSCAR-JÚNIOR, A. C.; GALVANI, E.; et al.: Daily rainfall intensity and temporal trends in eastern Paraná state – Brazil. **Urban Climate**, v. 42, p. 101090, 2022.