

ANÁLISE DA PREVISIBILIDADE DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL COMO SUPORTE À PREVENÇÃO DE INUNDAÇÕES.

Vitor L. S. R. Tenório¹ (IC), Vanessa S. B. Carvalho¹ (PQ), Débora Martins de Oliveira¹ (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Modelagem atmosférica. Precipitação intensa. Validação de modelo. WRF.

Introdução

A Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS) possui grande importância socioeconômica para o sudeste brasileiro, mas sua alta densidade demográfica e industrial a torna extremamente vulnerável a desastres hidrometeorológicos, como inundações e movimentos de massa, frequentemente desencadeados por eventos de precipitação intensa.

A complexidade da dinâmica atmosférica local, influenciada por sistemas como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), exige ferramentas de previsão cada vez mais precisas para a mitigação de riscos (GARCIA, 2023). Nesse contexto, a Previsão Numérica do Tempo (PNT) por meio de modelos como o *Weather Research and Forecasting* (WRF) surge como uma ferramenta essencial.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo WRF na simulação de um evento extremo de precipitação ocorrido na BRPS entre 9 e 16 de fevereiro de 2020.

A justificativa para a pesquisa reside na necessidade de validar e aprimorar modelos de previsão que possam servir como suporte à tomada de decisão e à implementação de ações preventivas frente a desastres na região.

Metodologia

O estudo focou na Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS), uma área de aproximadamente 55.500 km² que abrange os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, conforme ilustrado na Figura 1.

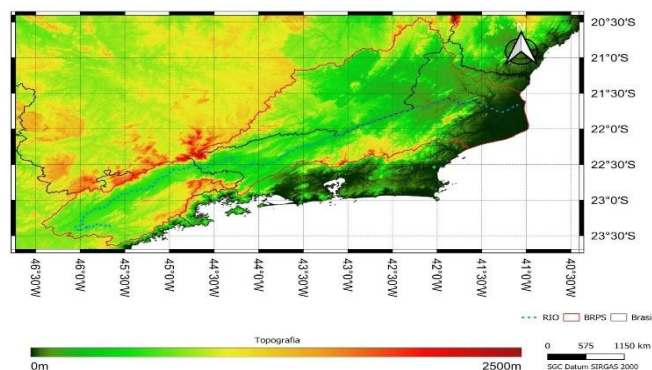
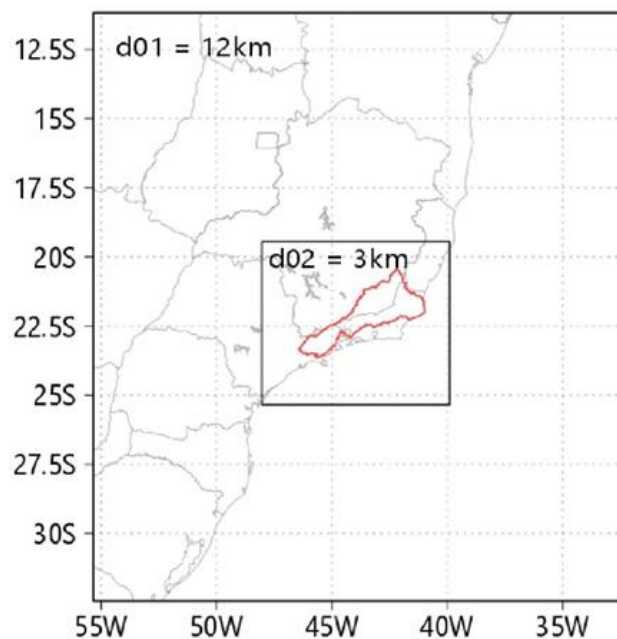


Figura 1: Área de estudo

O evento extremo analisado ocorreu entre os dias 9 e 16 de fevereiro de 2020, período marcado pela atuação da ZCAS e por acumulados de chuva que ultrapassaram 200 mm em diversos pontos.

Para a simulação, utilizou-se o modelo WRF (versão 4.4), com dados do *Global Forecast System* (GFS) para as condições iniciais e de contorno. A configuração do modelo adotou duas grades aninhadas com resolução espacial de 12 km (d01) e 3 km (d02), centradas sobre a bacia, conforme a Figura 2



Fonte: DE CAMPOS, 2023.

Figura 2: Domínio do WRF, externo (d01) e interno (d02). A região destacada em vermelho representa os limites da BRPS.

As parametrizações de microfísica de nuvens, camada limite planetária e convecção seguiram a configuração validada por estudos anteriores na região (DE CAMPOS, 2023).

A validação dos resultados foi realizada comparando os dados de precipitação simulados pelo WRF com dados observados de 20 estações

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) e com o produto de estimativa de chuva por satélite MERGE, do CPTEC/INPE.

A performance do modelo foi avaliada quantitativamente por meio de métricas estatísticas, incluindo o Desvio Padrão Observado e Modelo (DPo/DPs), Erro Médio (EM), a Correlação de Pearson (R), o Índice de Concordância (d) e a Eficiência de Kling-Gupta (KGE).

A Tabela 1 detalha os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo WRF:

Tabela 1: Parâmetros Estatísticos para Avaliação do Modelo

Índice	Fórmula
(DPo/DPs)	$\text{Desvio Padrão Observado} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{\text{observado},i} - \bar{x}_{\text{observado}})^2}$ $\text{Desvio Padrão Modelado} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{\text{modelado},i} - \bar{x}_{\text{modelado}})^2}$
(ME)	$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{\text{observado},i} - x_{\text{modelado},i})$
(Rpearson)	$R_{\text{Pearson}} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$
(d)	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$
(KGE_2012)	$KGE_{2012} = 1 - ED$ $ED = \sqrt{(s[1] * (r - 1))^2 + (s[2] * (\gamma - 1))^2 + (s[3] * (\beta - 1))^2}$ $r = \text{Pearson Correlation Coefficient}$ $\beta = \mu_s / \mu_o$ $\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o}$

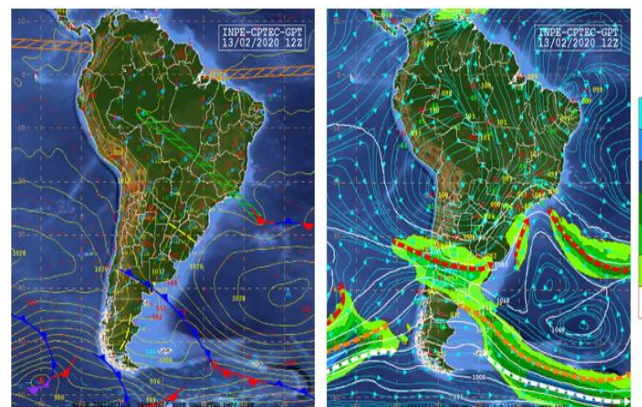


Figura 3: Carta sinótica de superfície e de altos níveis do dia 13 às 12h.

O modelo WRF demonstrou habilidade em reproduzir esse padrão atmosférico, simulando corretamente a distribuição espacial da precipitação ao longo da bacia.

A comparação dos acumulados semanais de precipitação Figura 4 revelou que o WRF tendeu a superestimar os volumes em algumas localidades, especialmente naquelas onde foram registrados os maiores picos de chuva. Contudo, em outras áreas, a simulação se aproximou bastante dos valores observados nas estações e no produto MERGE.

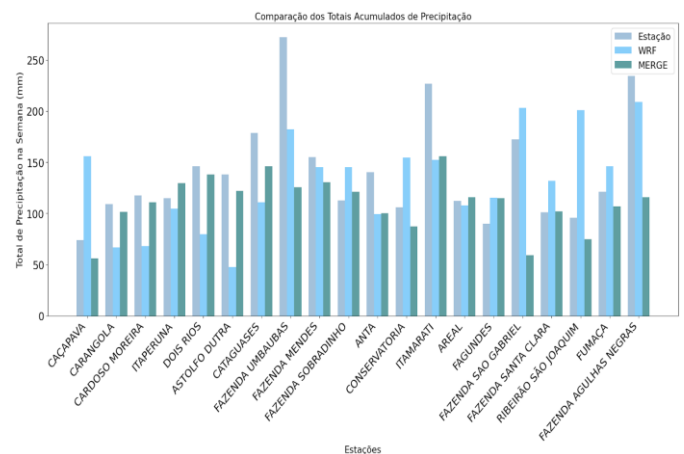


Figura 4 – Comparativo da precipitação diária acumulada entre WRF, MERGE e estações durante a semana dos eventos.

Resultados e discussão

A análise das condições sinóticas confirmou que o evento foi intensificado pela atuação de um persistente canal de umidade característico da ZCAS, que favoreceu a ocorrência de chuvas volumosas e contínuas sobre a BRPS.

Essas discrepâncias podem estar associadas à dificuldade do modelo em resolver processos convectivos de pequena escala e à complexa interação da atmosfera com a topografia da região, marcada por serras como a da Mantiqueira e a do Mar.

A (EM) revelou que, embora o modelo tenha superestimado a chuva em certas localidades (Caçapava)

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

e subestimado em outras (Astolfo Dutra), os desvios mantiveram-se, em geral, dentro de uma faixa de 10 mm Figura 5.

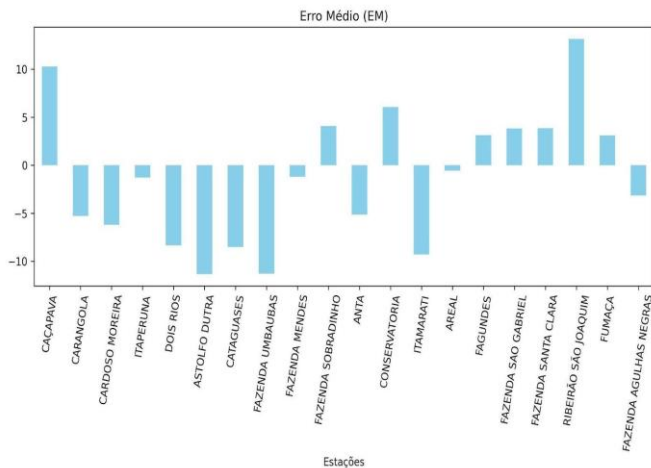


Figura 5: Erro médio da precipitação acumulada diária em cada estação

O (d) reforçou essa tendência Figura 6, com valores próximos de 1 (perfeita concordância) em estações do norte da bacia, como Cataguases e Fazenda Umuabás, que foram as mais afetadas pela chuva.

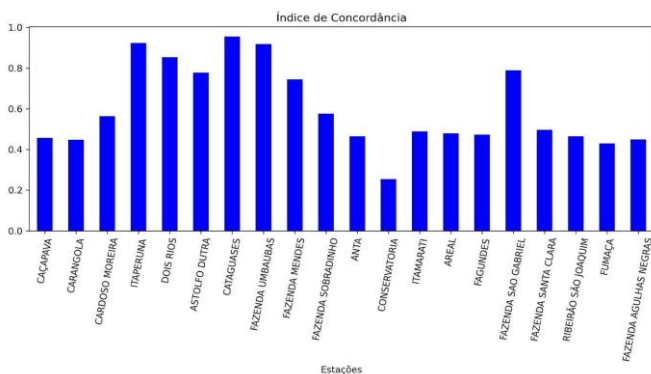


Figura 6: Índice de concordância entre WRF e estações

No entanto, a análise do (DPo/DPs) indicou uma limitação do modelo em capturar a variabilidade total dos dados Figura 7, prevendo variações de chuva menores do que as realmente observadas, especialmente em locais que registraram picos extremos, como a estação Fazenda Umuabás.

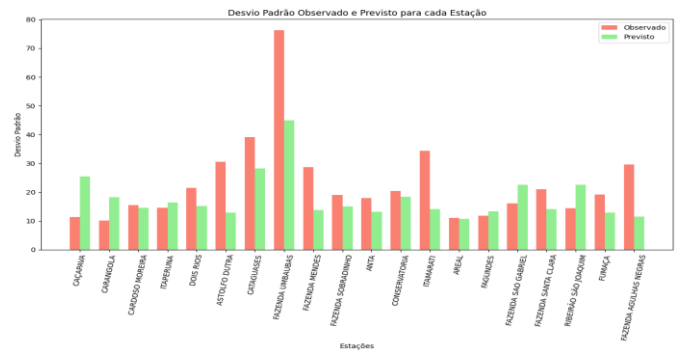


Figura 7: Desvio padrão dos dados modelados pelo WRF nos pontos equivalentes das estações

A (R) também mostrou forte associação linear ($R > 0.7$) entre os dados simulados e observados em diversas localidades, principalmente naquelas que registraram os maiores volumes de chuva Figura 8.

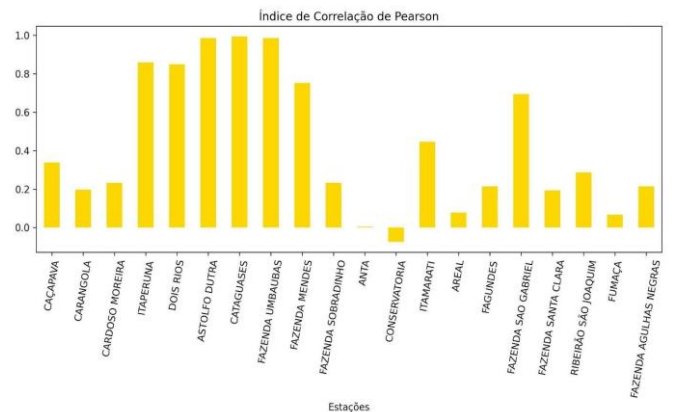


Figura 8: Índice de correlação de Pearson entre WRF e estações

O índice KGE Figura 9, que integra correlação, vies e variabilidade, apresentou valores positivos na maioria das estações, com picos superiores a 0.6 em áreas onde a concordância foi maior.

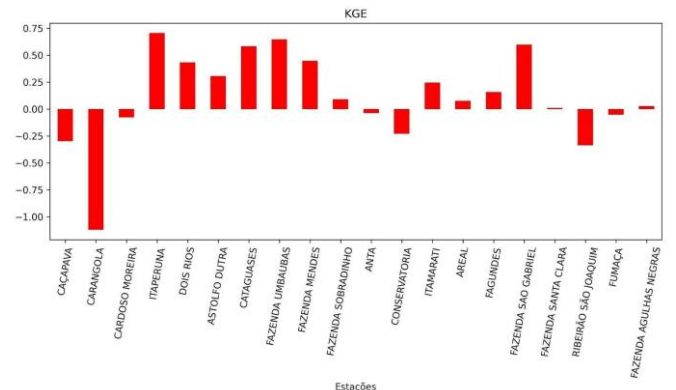


Figura 9: Índice KGE da simulação do WRF

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Estações localizadas em vales ou áreas de topografia menos complexa apresentaram melhor desempenho do modelo. 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.

Em contrapartida, os resultados foram inferiores em algumas estações de maior altitude ou em áreas a sotavento, onde o modelo subestimou a variabilidade da precipitação.

Conclusões

Este estudo demonstrou que o modelo WRF possui capacidade consistente para simular a ocorrência e a distribuição espacial de eventos extremos de precipitação na BRPS.

Apesar de ter superestimado os picos de chuva em pontos específicos, o modelo representou adequadamente os padrões atmosféricos que geraram o evento e obteve índices estatísticos satisfatórios na maior parte da área de estudo, com valores de correlação superiores a 0,6 em diversas estações, índices de concordância próximos de 1 em regiões de maior precipitação e valores de KGE acima de 0,4 em mais da metade dos pontos avaliados.

Conclui-se que o WRF é uma ferramenta promissora que, após calibrações específicas para a região, pode ser integrada a sistemas de alerta precoce, contribuindo significativamente para a prevenção de desastres e para a gestão de recursos hídricos na bacia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Itajubá (Unifei) pela infraestrutura e apoio à pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.

Referências

DE CAMPOS, B.; CARVALHO, V. S. B.; MATTOS, E. V. Assessment of cloud microphysics and cumulus

convection schemes to model extreme rainfall events over the Paraíba do Sul River Basin. **Urban Climate**, v. 51, p. 101618, 2023.

DE OLIVEIRA, D. M.; CARVALHO, V. S. B.; SILVA, B. C.; REBOITA, M. S.; DE CAMPOS, B. Hydrological and Precipitation Extremes and Trends over the Paraíba do Sul River Basin, Brazil. **Climate**, v. 11, n. 7, p. 138, 2023.

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** 80 758 - 770.

GARCIA, D.; REBOITA, M. S.; CARVALHO, V. S. B. 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.

KLING, H.; FUCHS, M.; PAULIN, M. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 424-425, p. 264-277, 2012.

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.

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. Acesso em: 2024-11-04.

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

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