

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DO EVENTO DO ANO 2022: USO DE PRODUTOS HIDROLÓGICOS DO RADAR METEOROLÓGICO

Geiza Thamirys Correia Gomes¹; José Almir Cirilo²; Carlos Roberto Fragoso Jr³; Maria Luciene Dias de Melo⁴; Vera Núbia Carvalho de Farias⁵ & Clebson Carvalho de Farias⁶

Abstract: This study analyzes the precipitation estimate by meteorological radar during the most relevant rainy event that occurred in 2022 in the Mundaú river basin, covering the states of Alagoas and Pernambuco. This event was associated with persistent and heavy rainfall. The research evaluated the performance of different radar hydrological products — SRI, DPSRI, PAC, and PRT — using methodologies based on single and dual polarization, as well as different Z-R relationships, including the classical Marshall-Palmer equation and specific relationships developed for the state of Alagoas. The results demonstrate that the adoption of dual polarization improves the identification of hydrometeors and the mitigation of errors, providing more accurate estimates. It was also observed that the density of the rainfall network directly influences the accuracy of the validations. The study reinforces the importance of updating regional Z-R relationships and recommends carrying out complementary analyses with other events with similar synoptic characteristics, aiming to improve precipitation estimates for hydrological and risk management applications.

Resumo: O presente estudo analisa a estimativa de precipitação por radar meteorológico durante o evento chuvoso de maior relevância ocorrido em 2022 na bacia hidrográfica do rio Mundaú, abrangendo os estados de Alagoas e Pernambuco. Esse evento foi associado resultou em chuvas persistentes e volumosas. A pesquisa avaliou o desempenho de diferentes produtos hidrológicos de radar — SRI, DPSRI, PAC e PRT —, utilizando metodologias baseadas em polarização simples e dupla, bem como distintas relações Z-R, incluindo a equação clássica de Marshall-Palmer e relações específicas desenvolvidas para o estado de Alagoas. Os resultados demonstram que a adoção da polarização dupla melhora a identificação de hidrometeores e a mitigação de erros, proporcionando estimativas mais precisas. Observou-se ainda que a densidade da rede pluviométrica influencia diretamente na acurácia das validações. O estudo reforça a importância de atualizar as relações Z-R regionais e recomenda a realização de análises complementares com outros eventos de características sinóticas semelhantes, visando aprimorar as estimativas de precipitação para aplicações hidrológicas e de gestão de risco.

Palavras-Chave – radar meteorológico, dupla polarização, relação Z-R, produto hidrológico

1) Doutoranda no Prog. de Pós-Graduação em Engenharia Civil (POSCIVIL) - UFPE, Recife, Pernambuco, (82) 96020-8091, geiza.tcgomes@ufpe.br

2) Professor Titular do PPGECAM - UFPE, Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru-PE, (81) 99488-5647, jose.cirilo@ufpe.br

3) Professor do Centro de Tecnologia - UFAL, Maceió, Alagoas, (82) 99632-8814, ruberto@ctec.ufal.br

4) Professora do Instituto de Ciências Atmosféricas - UFAL, Maceió, Alagoas, (82) 99919-3268, maria.melo@icat.ufal.br

5) Doutoranda no Prog. de Pós-Graduação em Engenharia Civil (POSCIVIL) - UFPE, Recife, Pernambuco, (82) 99909-0499, vera.nubia@ufpe.br

6) Projeto REALPE: Rede Alagoas-Pernambuco – UFPE (82) 98706-2296, clebson2007.farias@gmail.com

INTRODUÇÃO

O evento chuvoso de maior relevância ocorrido em 2022 na bacia hidrográfica do rio Mundaú, localizada nos estados de Pernambuco e Alagoas, foi registrado principalmente entre o final do mês de maio e início de junho de 2022, quando fortes chuvas atingiram a região, provocando enchentes significativas. A bacia hidrográfica do rio Mundaú (BHRM), que abrange parte dos estados de Alagoas e Pernambuco, sofreu com o transbordamento de rios e riachos. Embora esse evento não tenha alcançado a mesma gravidade das grandes enchentes de 2010 e 2017, foi um dos maiores desde então, reforçando a vulnerabilidade da BHRM aos eventos extremos.

A estimativa de precipitação por radar meteorológico é de fundamental importância para o monitoramento e gestão de riscos associados a eventos extremos de chuva, especialmente em bacias hidrográficas vulneráveis. Sua capacidade de fornecer dados com alta resolução espacial e temporal permite identificar, com precisão, a distribuição e a intensidade da chuva sobre áreas extensas e, muitas vezes, de difícil acesso. Diferentemente das estações pluviométricas pontuais, o radar oferece uma visão abrangente e contínua, atualizada em intervalos de poucos minutos, o que é essencial para capturar a dinâmica dos sistemas convectivos. Esses sistemas, caracterizados por chuvas intensas e localizadas, são os principais responsáveis por inundações rápidas e enxurradas.

O presente artigo apresenta uma análise das estimativas de precipitação obtidas a partir de dados de radar meteorológico, utilizando metodologias baseadas em polarização simples e dupla. No desenvolvimento do estudo, foram aplicadas diferentes relações Z-R, que estabelecem a correlação entre a refletividade do radar (Z) e a taxa de precipitação (R), com destaque para a aplicação de equações específicas desenvolvidas para as condições atmosféricas e hidrológicas do estado de Alagoas. Essa abordagem permitiu avaliar a acurácia das estimativas em cenários de chuvas intensas, considerando as características locais, e verificar o desempenho comparativo entre as metodologias.

A adoção da polarização dupla, em especial, busca ganhos na identificação de tipos de hidrometeoros e na mitigação de erros associados a atenuações e ruídos, contribuindo para uma representação mais precisa dos volumes de precipitação, essencial para monitoramento hidrológico e emissão de alertas em eventos extremos.

A estimativa de precipitação proveniente do radar meteorológico foi realizada por meio da composição de quatro produtos hidrológicos, cada um com características específicas na representação da chuva. Os produtos empregados foram: SRI (Surface Rainfall Intensity); DPSRI (Dual Polarization Surface Rainfall Intensity); PAC (Precipitation Accumulation); e PRT (Point Rainfall Total).

A aplicação conjunta desses produtos possibilitou uma análise da distribuição espacial da chuva. Foram comparados os mapas de chuva interpolada, obtidos a partir de dados de estações pluviométricas e de radar meteorológico, utilizando distintas metodologias e diferentes relações Z-R, com o objetivo de avaliar a eficácia de cada abordagem na representação da variabilidade espacial da precipitação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Mundaú (Figura 1) está situada na região Nordeste do Brasil, abrangendo áreas dos estados de Alagoas e Pernambuco, com uma área total aproximada de 4.334 km². Seu principal curso d'água nasce no município de Garanhuns (PE), na região do Planalto da Borborema, e percorre cerca de 180 km até desaguar na Lagoa Mundaú, no município de Maceió (AL). A bacia apresenta características fisiográficas diversificadas, com variações de relevo que vão

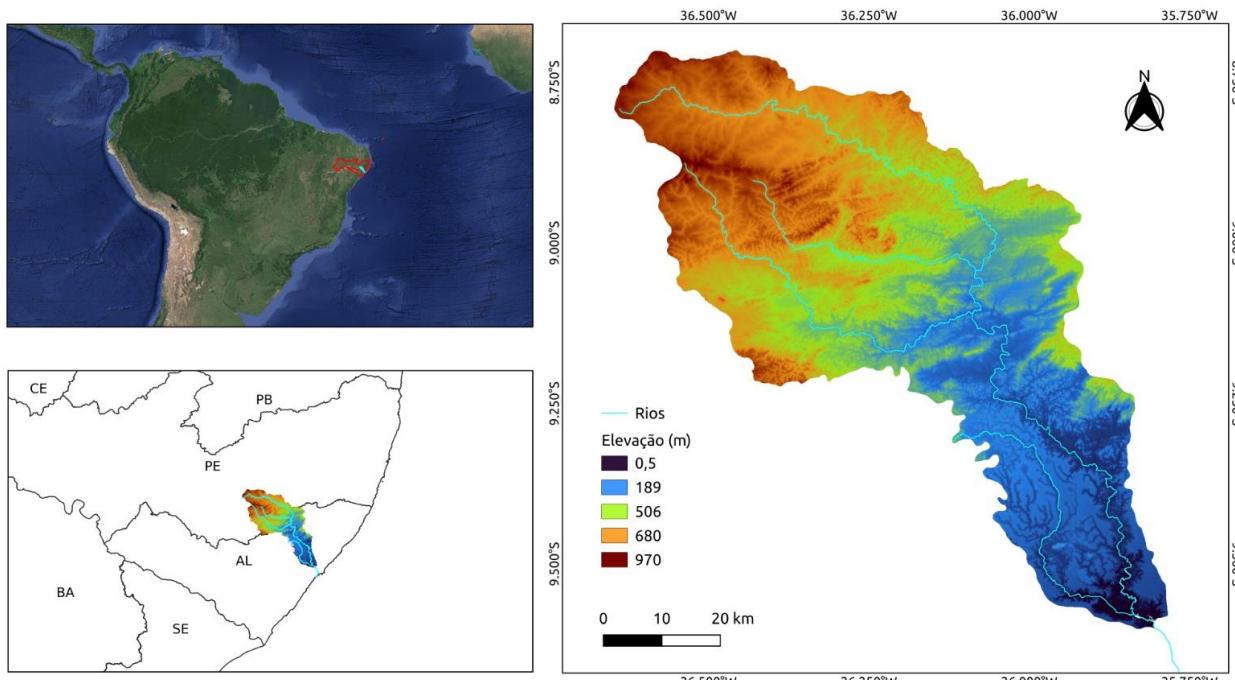
desde áreas elevadas no semiárido da Borborema até a planície costeira na Zona da Mata alagoana, o que influencia diretamente os processos hidrológicos e a dinâmica das chuvas.

Essa vulnerabilidade às enchentes decorre de uma combinação de fatores fisiográficos e antrópicos, como a declividade acentuada no alto curso, a rápida concentração do escoamento superficial e a ocupação urbana em áreas de planície de inundação, a impermeabilização do solo e o uso e ocupação desordenados do território. Soma-se a isso a alta variabilidade espacial e temporal da precipitação, frequentemente associada a sistemas meteorológicos de mesoescala, como Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL).

Desde o século XX, a BHRM foi palco de eventos extremos que marcam sua vulnerabilidade, incluindo inundações em 1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010 e 2017.

Mais recentemente, entre maio e junho de 2022, ondas de leste intensificadas sobre o Nordeste geraram volumes superiores à média histórica, causando alagamentos em mais de 30 municípios alagoanos, incluindo Maceió, com mais de 10.000 pessoas afetadas. O Sistema de Alerta Hidrológico (SAH) operado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) emitiu 56 boletins técnicos e 38 boletins extraordinários durante o período, em virtude da superação de cotas de alerta e de inundações (SGB, 2023).

Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do rio Mundaú (BHRM)



Chuva provinda do radar meteorológico

Os dados foram processado pelo radar meteorológico da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), instalado em 2014 e gerenciado pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN).

O radar meteorológico não realiza a medição direta da chuva, mas sim uma estimativa. Ele mede a energia retroespalhada pelos hidrometeoros presentes em um determinado volume de ar, expressa por sua refletividade (Z), também chamada de fator de refletividade do radar. A partir desse parâmetro, é possível estimar a intensidade ou taxa de precipitação (R) por meio de uma relação empírica conhecida como equação Z-R. Portanto, o radar atua como um estimador indireto da precipitação (CALHEIROS; ZAWADZKIB, 1986).

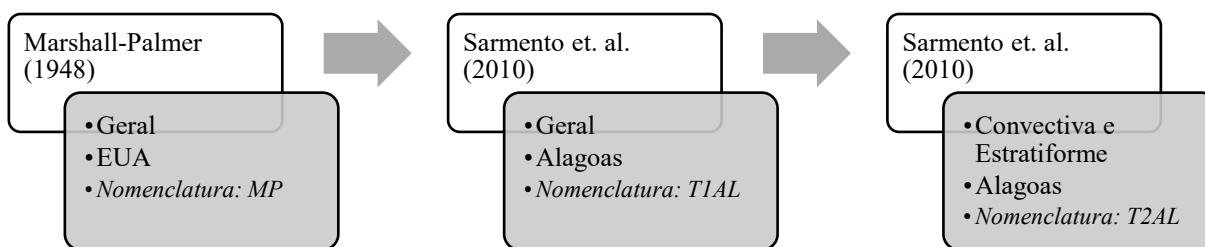
Para este estudo, foi analisado o período compreendido entre os dias 08 e 20 de junho, que se caracteriza pela disponibilidade contínua dos dados brutos do radar, sem lacunas que comprometam a integridade da análise. A escolha desse intervalo temporal é justificada, portanto, tanto pela representatividade em termos de ocorrência de precipitação significativa, quanto pela garantia da completude dos dados necessários para a aplicação das metodologias de estimativa de precipitação e análise hidrológica na bacia do rio Mundaú.

Alguns produtos do radar meteorológico — que originalmente são parâmetros eletromagnéticos (como refletividade, velocidade radial e largura espectral) — disponíveis no software Rainbow® são chamados de hidrológicos porque são processados e configurados especificamente para estimar variáveis diretamente relacionadas aos processos hidrológicos.

Para a estimativa de precipitação, partiu-se dos produtos hidrológicos SRI (Surface Rainfall Intensity) e DPSRI (Dual Polarization Surface Rainfall Intensity), gerados a partir dos dados do radar meteorológico.

Foram aplicadas diferentes relações empíricas Z-R, que estabelecem a relação entre a refletividade do radar (Z) e a taxa de precipitação (R). Neste estudo, adotaram-se as equações (Figura 2) desenvolvidas especificamente para as condições climáticas e microfísicas do estado de Alagoas, conforme proposto por Tenório et al. (2010), as quais consideram características locais dos hidrometeoros, além da tradicional equação de Marshall-Palmer (1948), desenvolvida para cenários continentais nos Estados Unidos. A comparação entre essas relações permitiu avaliar o desempenho das estimativas de precipitação para diferentes contextos físicos e meteorológicos, considerando tanto os ganhos proporcionados pela polarização dupla quanto as limitações associadas ao uso de equações desenvolvidas para outras regiões.

Figura 2 – Relações Z-R aplicadas na análise



No software Rainbow® usado pelo CEMADEN para operação do radar, foi possível empregar uma ou duas equações da relação Z-R: uma para nuvens com formação estratiforme e outra para convectiva. O próprio software Rainbow® faz uma análise e classificação dos tipos de formação de nuvem. Para a equação geral, a opção de classificação é desligada, utilizando apenas uma equação.

Além dos dados empregando apenas as diferentes relações Z-R, que utilizam somente a refletividade horizontal (Zh), também foi empregado uma relação de dupla polarização: o DPSRI (Dual Polarization Surface Rainfall Intensity).

O uso do produto PAC possibilitou o acúmulo das leituras de precipitação do radar que são dadas a cada 10 minutos, gerando dados em resolução horária, o que também reduz o tamanho do arquivo de saída.

Em relação ao produto PRT, este permitiu a extração da precipitação acumulada diretamente nas coordenadas de interesse. Foram gerados 4.128 pontos, correspondentes a estações virtuais distribuídas na BHRM. A utilização do PRT proporcionou uma significativa redução no tempo de processamento, no tamanho dos arquivos e, consequentemente, no espaço necessário para armazenamento, uma vez que não foi necessário processar toda a malha de cobertura do radar e sim as coordenadas correspondentes às estações pluviométricas.

Estações pluviométricas

Para o evento em estudo, foram identificadas 13 (treze) estações pluviométricas situadas dentro dos limites da BHRM (Figura 3). Embora o número de estações seja considerado reduzido em função da extensão da bacia, a seleção dessas estações (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) se deu em razão da indisponibilidade de dados nas demais, restringindo assim a amostra às que apresentavam registros válidos para o período avaliado.

Foi empregado o método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighting) que é uma técnica determinística amplamente utilizada para estimar valores em locais não amostrados, com base na premissa de que pontos mais próximos exercem maior influência sobre a estimativa do que pontos mais distantes (MIRANDA, 2005). No contexto da interpolação de precipitação, o IDW atribui pesos inversamente proporcionais à distância entre os pluviômetros e os locais de interesse, produzindo uma superfície contínua de chuva estimada (JIMENEZ, DOMEcq, 2008).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram estudados mapas de chuva interpolada, gerados a partir de dados de estações pluviométricas (Figura 3) e de radar meteorológico, por meio de diferentes metodologias e relações Z-R, com o objetivo de avaliar a eficácia de cada abordagem na representação da variabilidade espacial da precipitação. O produto hidrológico PRT foi utilizado para a geração dos dados do radar meteorológico e comparação pontual entre dados de estações pluviométricas.

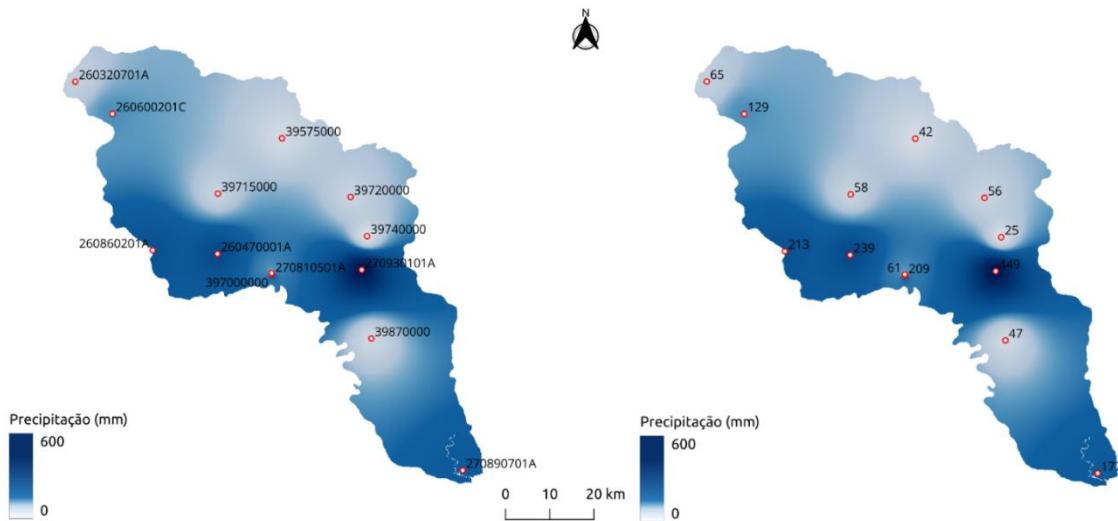
A chuva interpolada corresponde ao acumulado de precipitação referente ao período em análise, a simbologia em vermelho (ver mapas) indica o valor da chuva acumulada na estação.

Buscou-se analisar o desempenho do radar meteorológico em relação às medições das estações pluviométricas. Tendo a compreensão de que a estimativa de precipitação pelo radar meteorológico e o registro dos pluviômetros possuem metodologias distintas. Para uma mesma região, o radar estima a precipitação média em um volume, enquanto a estimativa dos pluviômetros se dá pela média dos registros de chuva em um ponto, representativo de uma determinada área. Outros fatores como o vento e a localização da chuva também estão associados às possíveis diferenças entre os valores registrados no radar meteorológico versus pluviômetros.

Outra análise de suma relevância consiste na avaliação do uso da dupla polarização, com o intuito de verificar possíveis ganhos na estimativa da precipitação. Ressalta-se que, embora o ideal seja empregar essa tecnologia, nem sempre as variáveis polarimétricas foram devidamente armazenadas nos dados brutos. Além disso, buscou-se analisar o desempenho da clássica relação de Marshall-Palmer em comparação às equações Z-R desenvolvidas especificamente para o estado de Alagoas.

No entanto, no contexto da hidrologia — especialmente em aplicações de modelagem hidrológica — é fundamental explorar uma das principais vantagens do radar: sua capacidade de representar a distribuição espacial da precipitação. Essa característica permite uma descrição mais detalhada e contínua do campo de chuva, o que é essencial para a adequada simulação dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas.

Figura 3 – Interpolação dos registros de chuva nas estações pluviométricas e pontos com as respectivas chuvas acumuladas



Analisando a Figura 4, as imagens (a), (c) e (e) geradas com a polarização simples apresentam diferenças quando comparadas àquelas com o emprego da dupla polarização, (b), (d) e (f). Em algumas regiões, a polarização simples apresenta maiores acumulados de precipitação, o que pode ser justificado pela sua limitação na detecção de ruídos. Essa metodologia não possui mecanismos para distinguir alvos não hidrometeorológicos, os quais acabam sendo erroneamente interpretados como chuva.

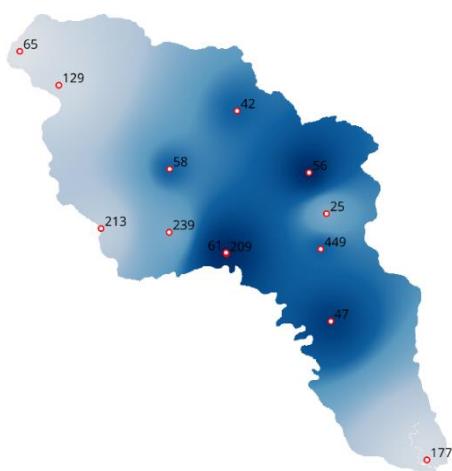
Por outro lado, a dupla polarização conta com filtros capazes de identificar diferentes tipos de hidrometeoros, além de mitigar erros associados à atenuação e aos ruídos, proporcionando, assim, uma estimativa mais precisa dos volumes de precipitação (GIANGRANDE e RYZHKOV, 2008).

No que se refere ao desempenho da equação Z-R, destaca-se que a relação desenvolvida por Marshall-Palmer (1948) é amplamente utilizada e, de fato, constitui o padrão adotado nos radares meteorológicos. Contudo, trata-se de uma relação empírica generalizada, que pode não representar adequadamente as características microfísicas locais da precipitação. A relação Z-R pode mudar continuamente ao longo do tempo e do espaço devido à considerável variabilidade da distribuição do tamanho das gotas de chuva (Smith et al., 2004) (Wang et al., 2016).

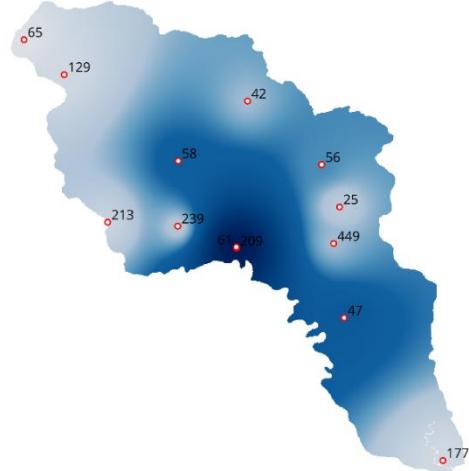
A relação Z-R é mais representativa da climatologia local e das características do radar (Rendon et al., 2010). Poucas localidades possuem uma equação específica/local, isso reforça a relevância de uso daquelas desenvolvidas por Tenório et al. (2010), pois elas foram construídas a partir das observações em Alagoas.

Nas Figuras 4(b) e 4(d) observa-se que não houve grande variabilidade espacial da precipitação, o que se justifica, em parte, pelo fato de as equações de Marshall e de Tenório (T1AL) terem sido desenvolvidas para eventos de chuva predominantemente estratiforme. Entretanto, ao comparar os mapas gerados com a equação de Marshall (Figura 4b) e com a equação de Tenório (Figura 4f), nota-se uma diferença significativa. Isso ocorre porque a equação T2AL, implementada no software Rainbow, permite que o sistema identifique, por meio da análise da Distribuição do Tamanho de Gotas (DTG), se a precipitação é estratiforme ou convectiva, aplicando, assim, a relação Z-R mais adequada a cada situação.

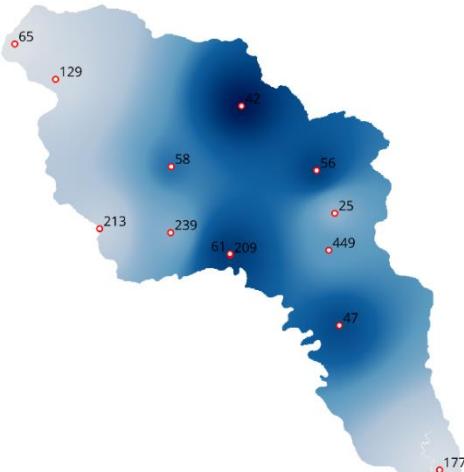
Figura 4 – Interpolação da chuva estimada pelo radar meteorológico e pontos com as respectivas chuvas acumuladas nas estações



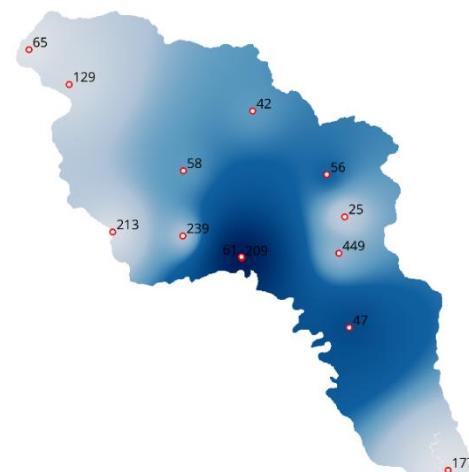
(a) MP – polarização simples.



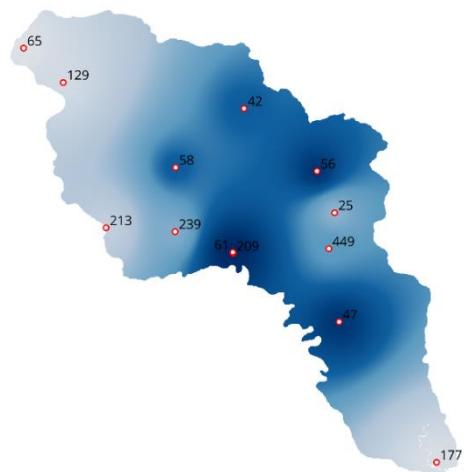
(b) MP – dupla polarização.



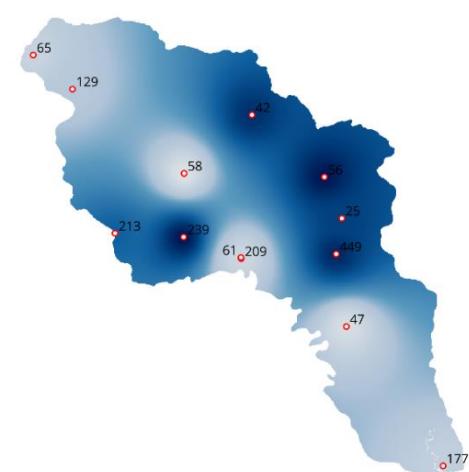
(c) T1AL – polarização simples.



(d) T1AL – dupla polarização.



(e) T2AL – polarização simples.



(f) T2AL – dupla polarização.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foi avaliado o desempenho do radar meteorológico utilizando tanto a relação Z-R específica/local — considerando características gerais da precipitação (estratiforme e convectiva) — quanto a relação Z-R específica para eventos convectivos, além da clássica equação desenvolvida por Marshall-Palmer (1948).

O principal caminho para ampliar a robustez desta análise consiste na avaliação de outros eventos com características sinóticas semelhantes, de modo a compreender melhor o comportamento das diferentes relações Z-R. Outro fator fundamental é a utilização de uma rede pluviométrica mais densa e com distribuição espacial adequada, o que contribui significativamente para a qualidade das análises.

No presente trabalho, também foram exploradas diferentes abordagens de processamento dos dados brutos, considerando tanto a polarização simples quanto a dupla. Ressalta-se que a metodologia para conversão dos dados brutos (variáveis polarimétricas) em produtos de estimativa de chuva envolve inúmeras possibilidades, que incluem a escolha da relação Z-R, o tipo de polarização utilizada, bem como parâmetros operacionais do radar, como ângulo e altura de elevação do feixe.

Diante disso, recomenda-se que, para um mesmo evento, sejam aplicados diferentes tipos de processamento, a fim de comparar seus desempenhos e aperfeiçoar as estimativas. Para estudos futuros, destaca-se ainda a importância da atualização das relações Z-R desenvolvidas para Alagoas, uma vez que foram concebidas em 2010, e atualmente o estado apresenta alterações nas características climáticas, além de dispor de uma rede pluviométrica diferente, mais moderna e, possivelmente, mais abrangente.

REFERÊNCIAS

- CALHEIROS, R. V. e ZAWADZKIB, I. Reflectivity-Rain Rate Relationships for Radar Hydrology in Brazil. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v. 26, p. 118–132, 1986.
- GIANGRANDE, S. E., AND RYZHKOV A. V. Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 2445–2462. 2008.
- JIMENEZ, K. Q.; DOMEcq, F. M. Estimação de chuva usando métodos de interpolação. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 16 p.
- Marshall, J. S., & Palmer, W. M. (1948). The distribution of raindrops with size. Em *Journal of Meteorology* (Vol. 5, p. 165–166). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2)
- MIRANDA, J. I. Fundamentos de sistemas de informações geográficas. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2005. 425 p.
- SGB –Serviço Geológico do Brasil. Relatório anual do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do rio Mundaú –2022. Brasília: SGB/CPRM, 2023. Disponível em: <<https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/23296>>. Acesso em: 19 mai. 2025.
- Rendon, S., Vieux, B., & Pathak, C. (2010). Estimation of regionally specific Z-R relationships for radar-based hydrologic prediction. In *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*, 2, 4668–4680. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/41114\(371\)474](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/41114(371)474)
- Smith, M. B., Seo, D.-J., Koren, V. I., Reed, S. M., Zhang, Z., Duan, Q., Moreda, F., & Cong, S. (2004). The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design. *Journal of Hydrology*, 298(1–4), 4–26. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.040>
- Tenório, R. S., Moraes, M. cristina da silva, & Sauvageot, H. (2012). Raindrop size distribution and radar parameters in coastal tropical rain systems of northeastern Brazil. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(11), 1960–1970. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0121.1>

Wang, J., Dong, X., Xi, B., & Heymsfield, A. J. (2016). Investigation of liquid cloud microphysical properties of deep convective systems: 1. Parameterization raindrop size distribution and its application for stratiform rain estimation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(18). <https://doi.org/10.1002/2016JD024941>

AGRADECIMENTOS

Ao Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas (SIRMAL), pela permissão de uso do Software Selex's Rainbow® 5 e espaço físico para o processamento dos dados do radar meteorológico.

Os autores agradecem, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do Projeto de Pesquisa Rede Alagoas-Pernambuco de monitoramento e alerta de inundações urbanas – REALPE, sob número 406550/2022-0.