Integração Radar–Pluviômetro à Modelagem Hidrodinâmica de Inundações por Chuva Direta

Elton John Robaina da Silva [1]; José Carlos Cesar Amorim [2] & Igor Paz [3]

Palavras-Chave – Radar Meteorológico, Pluviômetros, Modelagem Hidrodinâmica.

INTRODUÇÃO

Eventos de precipitação intensa frequentemente provocam inundações e enxurradas em áreas urbanas e montanhosas, resultando em impactos significativos à população e à infraestrutura (SILVA *et al.*, 2022). No município de Petrópolis/RJ, a combinação entre relevo acidentado, elevada densidade urbana e chuvas extremas favorece a ocorrência recorrente de desastres hidrológicos. A estimativa de precipitação por radar meteorológico oferece alta resolução espacial e temporal, porém está sujeita a diferentes fontes de incerteza (RINEHART, 2010). Por outro lado, pluviômetros fornecem medições mais precisas da chuva na superfície, embora possuam limitada representatividade espacial (PAZ; TCHIGUIRINSKAIA et al., 2020). A integração radar–pluviômetro surge como uma alternativa para combinar as vantagens de ambos os sistemas, produzindo campos de precipitação mais consistentes e precisos (OCHOA-RODRIGUEZ et al., 2019).

Este trabalho apresenta uma metodologia para simulação de inundação por chuva direta em Petrópolis/RJ, utilizando dados dos radares meteorológicos Banda S do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), ajustados com observações pluviométricas do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). A abordagem integra um Modelo Digital de Elevação (DEM), JAXA (2007), técnicas de pré-processamento hidrológico e modelagem hidrodinâmica para estimar a profundidade da lâmina d'água e identificar áreas potencialmente inundáveis a partir de campos de precipitação espacialmente distribuídos.

METODOLOGIA

Inicialmente, foi utilizado o mosaico de refletividade dos radares Banda S operados pelo INEA, posteriormente convertido em campos de precipitação acumulada. A adoção do mosaico teve como objetivo minimizar os efeitos do bloqueio parcial do feixe radar causados pelo relevo da Região Serrana do Rio de Janeiro. Estudos de Silva, Amorim e Paz (2023a, 2023b) demonstram que o radar de Guaratiba apresenta redução de cobertura na direção de Petrópolis, enquanto o radar de Macaé complementa parcialmente essa limitação. Dessa forma, a combinação dos dados de ambos os radares amplia a cobertura espacial e reduz áreas sem observação, produzindo campos de precipitação mais adequados para aplicações hidrológicas.

Os volumes de radar foram submetidos a um controle de qualidade para estimativa quantitativa de precipitação (QPE), incluindo correção de atenuação, filtragem adaptativa e remoção de ecos espúrios. A taxa de precipitação foi estimada a partir da refletividade corrigida (ZH) e do gradiente específico da fase diferencial (KDP), obtido pelo método de Vulpiani et al. (2012). Foi empregada uma abordagem híbrida Z–KDP, utilizando a relação R(Z) para refletividades inferiores a 40 dBZ e

1) Afiliação: Instituto Militar de Engenharia, elton.john@ime.eb.br, jcamorim@ime.eb.br, igorpaz@ime.eb.br

a relação R(KDP) para precipitações mais intensas. Os campos instantâneos de chuva foram posteriormente integrados para gerar acumulados de 10 minutos, utilizados nas etapas de ajuste por pluviômetros e modelagem hidrodinâmica.

Os dados pluviométricos da rede CEMADEN referentes ao evento de 15 de fevereiro de 2022 em Petrópolis foram submetidos a controle de qualidade para remoção de registros inconsistentes e verificação da coerência temporal. Os dados validados foram utilizados no ajuste das estimativas de precipitação por radar pelo Modelo de Erro Misto de Pfaff (2010), que combina correção do viés sistemático e Krigagem Ordinária dos erros residuais. O desempenho do ajuste foi avaliado por diferentes métricas estatísticas, considerando o acumulado de 10 minutos às 20:30 UTC e 56 estações pluviométricas.

O DEM foi recortado pelo limite municipal de Petrópolis e reprojetado para o sistema SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S (EPSG:31983). Em seguida, foram aplicados procedimentos de pré-processamento hidrológico, incluindo o preenchimento de depressões espúrias, visando garantir a continuidade do escoamento superficial e a consistência hidrológica do terreno. Os campos de precipitação ajustados por radar foram posteriormente reprojetados e reamostrados para coincidir com a grade, resolução e sistema de coordenadas do DEM, assegurando a compatibilidade espacial necessária à modelagem hidrodinâmica.

O modelo de terreno foi utilizado como campo de elevação da grade computacional, enquanto os campos de precipitação ajustados por radar foram empregados como forçante espacialmente distribuída. Os acumulados de chuva em intervalos de 10 minutos foram convertidos para intensidade de precipitação (ms^{-1}), compatível com o modelo hidrodinâmico. Para garantir a estabilidade numérica da simulação, foi adotada uma lâmina d'água inicial de 10^{-5} m em todas as células da grade.

A simulação hidrodinâmica foi realizada com o componente OverlandFlow do Landlab (ADAMS et al., 2017), que resolve uma forma bidimensional simplificada das equações de águas rasas para representar o escoamento superficial. Foi adotado um coeficiente de Manning uniforme de (n=0,035), tempo de simulação de 600 s e passo de tempo controlado automaticamente pelo modelo, limitado a 5 s. As áreas potencialmente inundadas foram delimitadas a partir dos campos simulados de profundidade da água, considerando-se um limiar mínimo de 0,005 m.

RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta o desempenho das estimativas de precipitação antes e após o ajuste radar–pluviômetro.

Tabela 1 - Comparação das métricas estatísticas entre as estimativas de precipitação por radar antes e após o ajuste por pluviômetros.

Métrica	Antes do ajuste	Após o ajuste
Corr	0,41	0,94
R^2	0,17	0,88
MAE (mm)	3,07	0,84
RMSE (mm)	6,07	3,23
NSE	0,04	0,73

Os resultados demonstram que o ajuste radar–pluviômetro aumentou a concordância com as observações e reduziu os erros das estimativas, produzindo um campo de precipitação mais consistente para utilização como forçante na modelagem hidrodinâmica.

A Figura 1 apresenta os principais produtos da metodologia. O campo de precipitação ajustado evidência maior concentração da chuva na porção sul de Petrópolis, enquanto a modelagem hidrodinâmica indica áreas preferenciais de concentração do escoamento associadas às regiões de maior precipitação e aos principais talvegues. A profundidade máxima simulada atingiu 1,803 m e a média 0,004 m. Considerando o limiar de 0,005 m, a área simulada foi de aproximadamente 107,78 km², concentrada principalmente nas porções sul e sudoeste do município. Esses resultados evidenciam a influência conjunta da distribuição espacial da precipitação e da topografia na resposta hidrodinâmica.

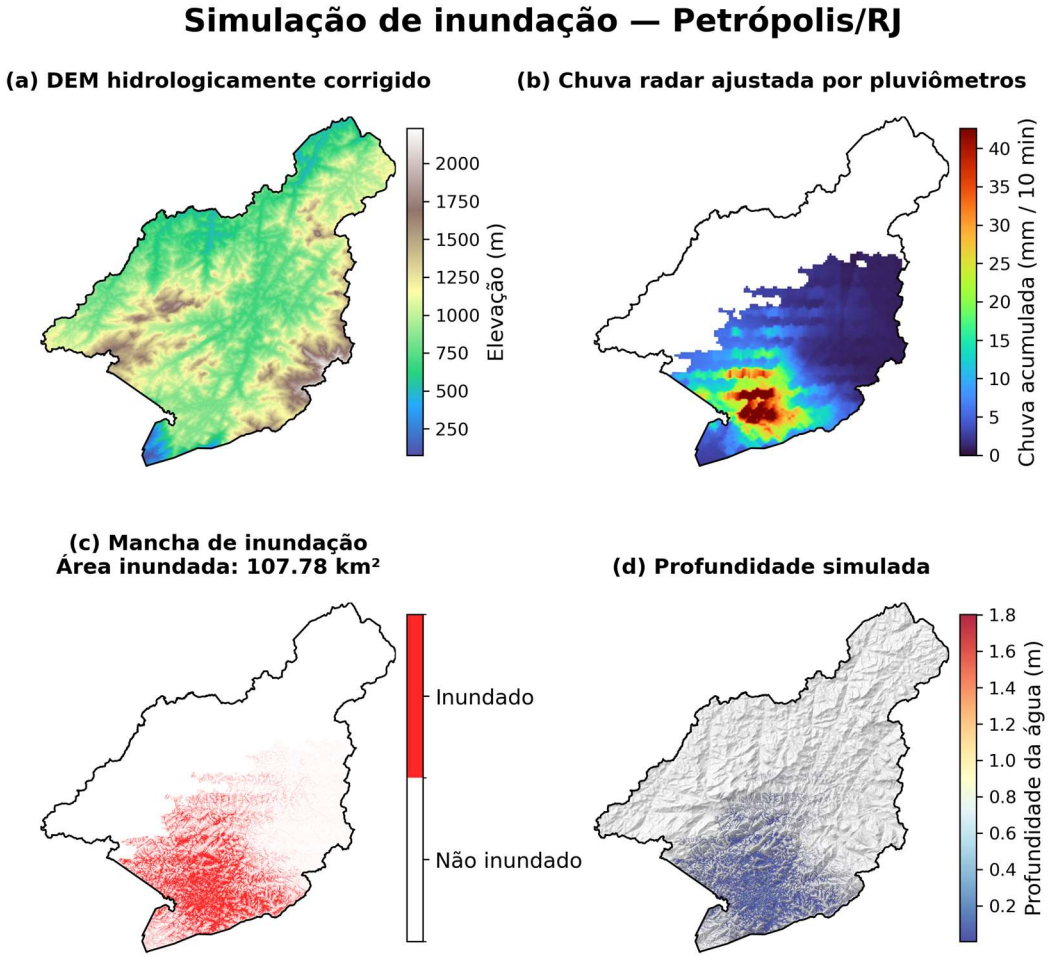


Figura 1 - Produtos gerados pela metodologia proposta para o evento de 15 de fevereiro de 2022 às 20:30 UTC: (a) DEM hidrologicamente corrigido; (b) campo de precipitação acumulada em 10 minutos estimado por radar meteorológico e ajustado por pluviômetros; (c) mancha de inundação obtida a partir da profundidade simulada; e (d) profundidade máxima da lâmina d'água simulada.

CONCLUSÕES

A metodologia proposta demonstrou o potencial da integração entre dados de radar meteorológico, pluviômetros e modelagem hidrodinâmica para a identificação de áreas potencialmente suscetíveis à inundação por chuva direta. A utilização de campos de precipitação espacialmente distribuídos permitiu representar a variabilidade espacial da chuva e identificar áreas preferenciais de concentração do escoamento superficial, reforçando o potencial do uso de radares meteorológicos em aplicações de monitoramento e gestão de riscos hidrológicos. A avaliação quantitativa concentrou-se na validação da precipitação utilizada como forçante da modelagem, mediante comparação entre estimativas de radar e observações pluviométricas. A resposta hidrodinâmica não foi validada diretamente devido à indisponibilidade de dados observacionais que permitissem comparar as

profundidades e as áreas inundadas simuladas com as efetivamente observadas durante o evento. Assim, os resultados devem ser interpretados como indicativos das áreas potencialmente sujeitas à concentração do escoamento superficial, e não como uma reconstrução validada da inundação observada. Além disso, a simulação não considerou processos de infiltração e drenagem urbana e adotou coeficiente de Manning uniforme, aspectos que, juntamente com a incorporação de dados observacionais de inundação, deverão ser considerados em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

SILVA, E. J. R. da; ALVES, C. N.; CAMPOS, P. C. de O.; OLIVEIRA, R. A. A. C. e; MARQUES, M. E. S.; AMORIM, J. C. C.; PAZ, I. (2022). *"Comparison of Rain Gauge Network and Weather Radar Data: Case Study in Angra dos Reis, Brazil"*. Water, v.14, n.23, artigo 3944. DOI: 10.3390/w14233944.

RINEHART, R. E. (2010). *Radar for Meteorologists*. 5. ed. Rinehart Publications, Fargo/ND, 482 p. ISBN 978-0-9658002-3-5.

PAZ, I., TCHIGUIRINSKAIA, I., SCHERTZER, D. "Rain gauge networks' limitations and the implications to hydrological modelling highlighted with a X-band radar", Journal of Hydrology, v. 583, p. 124615, 1 abr. 2020. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2020.124615.

OCHOA-RODRIGUEZ, S.; WANG, L.; WILLEMS, P.; ONOF, C. A review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications. Water Resources Research, John Wiley e Sons, Ltd, v. 55, p. 6356–6391, 8 2019. DOI: 10.1029/2018WR023332.

JAXA. Advanced Land Observing Satellite (ALOS) PALSAR Dataset.
Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency, 2007.

SILVA, E. J. R.; AMORIM, J. C. C.; PAZ, I. (2023a). "Bloqueio de Feixe de Radar Meteorológico em Evento Extremo: Análise com PPI" in Anais do III Encontro Nacional de Desastres, Niterói, RJ, Brasil, 2023.

SILVA, E. J. R.; AMORIM, J. C. C.; PAZ, I. (2023b). "Bloqueio de Feixe de Radar Meteorológico em Evento Extremo: Análise com CAPPI" in Anais do III Encontro Nacional de Desastres, Niterói, RJ, Brasil, 2023.

VULPIANI, G.; MONTOPOLI, M.; PASSERI, L. D.; GIOIA, A. G.; GIORDANO, P.; MARZANO, F. S. (2012). "On the Use of Dual-Polarized C-Band Radar for Operational Rainfall Retrieval in Mountainous Areas". Journal of Applied Meteorology and Climatology, v.51, p.405–425.

PFAFF, T. (2010). "Radargestützte Schätzung von Niederschlagsensembles" in BADER, J. et al. (Ed.). Operationelle Abfluss- und Hochwasservorhersage in Quellgebieten. Final Project Report, p.113–118.

ADAMS, J. M.; GASPARINI, N. M.; HOBLEY, D. E. J.; TUCKER, G. E.; HUTTON, E. W. H.; NUDURUPATI, S. S.; ISTANBULLUOGLU, E. (2017). "The Landlab v1.0 OverlandFlow Component: A Python Tool for Computing Shallow-Water Flow across Watersheds". Geoscientific Model Development, v.10, n.4, p.1645–1663. DOI: 10.5194/gmd-10-1645-2017.