

PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR SATÉLITE PARA ALERTA DE INUNDAÇÕES: ESTUDO DE CASO EM SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ, RIO GRANDE DO SUL (RS), BRASIL

Nicholas Becker Pires Pi¹, Guilherme Garcia de Oliveira²

^{1,2} Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS. E-mail: nickbpy@gmail.com¹; g.g.oliveira10@gmail.com²

RESUMO

Os produtos de chuva estimada por satélites permitem avaliar a variabilidade espacial da precipitação em grandes bacias, suscitando sua aplicação para previsão de desastres hidrológicos. O objetivo deste estudo foi desenvolver um método para alerta de inundações com uso de precipitação estimada por sensoriamento remoto, tendo como estudo de caso o município de São Sebastião do Caí/RS. A metodologia proposta envolve: a identificação de cheias e de inundações; o cálculo da precipitação antecedente aos eventos extremos, a partir do produto MERGE, em diferentes horizontes temporais, considerando a área de drenagem; a limiarização da precipitação para alertas de inundação. Utilizando a abordagem de múltiplos limiares, considerando as chuvas acumuladas em 2, 3 e 7 dias, obteve-se 94,4% de acertos no alerta de inundações. Concluímos que o método é eficiente e acurado, podendo-se expandir sua aplicação para grandes bacias hidrográficas.

Palavras-chave — limiar de precipitação, produto MERGE, desastres hidrológicos, eventos extremos.

ABSTRACT

Satellite-estimated rainfall products allow the evaluation of the spatial variability of precipitation in large basins, which enables their application to predict hydrological disasters. In this paper, we developed a method for flood alerting using precipitation estimated by remote sensing, having as a case study the municipality of São Sebastião do Caí/RS. The methodology includes: the identification of floods and inundations; the calculation of rainfall in the days prior to extreme events, using the MERGE product, in different temporal lags, considering the drainage area; the investigation by precipitation thresholds for flood alerts. We were able to get 94.4% of the flood forecasts right using the multi threshold approach, considering rainfall accumulated in 2, 3 and 7 days. We conclude that the method is efficient and accurate, and its application can be expanded to large hydrographic basins.

Keywords — precipitation threshold, MERGE product, hydrological disasters, extreme events.

1. INTRODUÇÃO

Inundações se caracterizam pelo extravasamento gradual das águas dos rios para suas áreas marginais [1]. São eventos extremos que ocorrem naturalmente, ainda que algumas ações antrópicas intensifiquem seus efeitos e/ou os tornem mais frequentes [2]. Quando inundações atingem áreas ocupadas pela sociedade, são capazes de causar extensivos danos humanos e materiais [3].

A previsão de inundações permite a mobilização de esforços para reduzir seus impactos. No Brasil, os sistemas de alerta implementados pelo Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) configuram-se como importantes ferramentas para gestão de riscos. Porém, algumas limitações devem ser apontadas para melhorias no alerta de inundações: i) a necessidade de se ajustar modelos e limiares de precipitação adequados às especificidades de cada bacia [4]; ii) a distribuição espacial heterogênea das estações fluviométricas e pluviométricas, bem como as dificuldades de manutenção e investimento na expansão da rede hidrometeorológica [5], o que dificulta, por exemplo, a representação da variabilidade espacial da precipitação.

Os produtos de chuva estimada por sensoriamento remoto, incluindo os que mesclam os dados obtidos por satélites com medições de estações pluviométricas, apresentam como principal vantagem, em relação aos métodos tradicionais, a sua abrangência espacial, a qual permite estudar a variabilidade da precipitação em grandes bacias, sem necessidade de interpolação dos dados. Diversas são as aplicações dos produtos de chuva estimada por satélites, incluindo a temática de desastres hidrológicos [6].

O objetivo deste estudo foi desenvolver um método para alerta de inundações com uso de precipitação estimada por sensoriamento remoto, tendo como estudo de caso o município de São Sebastião do Caí/RS.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

São Sebastião do Caí situa-se no nordeste do RS (Figura 1), possui 21.932 habitantes e densidade demográfica de 197 hab./km² [7]. A maior parte da sua área urbana está localizada na planície de inundação do Rio Caí, com tempo de retorno das inundações estimado em 1,6 anos [8]. O Rio Caí, na seção fluvial referente à cidade, possui área de drenagem de 3.030

km², é monitorado pela CPRM desde a década de 1940 pela estação 87170000 (Barca do Caí). A vazão média no local é de 71,7 m³/s, porém seu regime hídrico apresenta forte variação, tendo superado 1.200 m³/s nas maiores inundações registradas, situações em que o rio sobe mais de 12 m em relação ao seu nível médio histórico.

2.2 Metodologia

A metodologia proposta envolve três etapas (Figura 2): i) identificação de cheias e de inundações; ii) cálculo da precipitação antecedente aos eventos extremos, em diferentes horizontes temporais, na área de drenagem; iii) limiarização da precipitação para alertas de inundação.

Na primeira etapa, foram utilizados os seguintes dados: série histórica das cotas fluviais da estação Barca do Caí, Portal HidroWeb, Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) [9]; série histórica de reconhecimento de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública, do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC) [10].

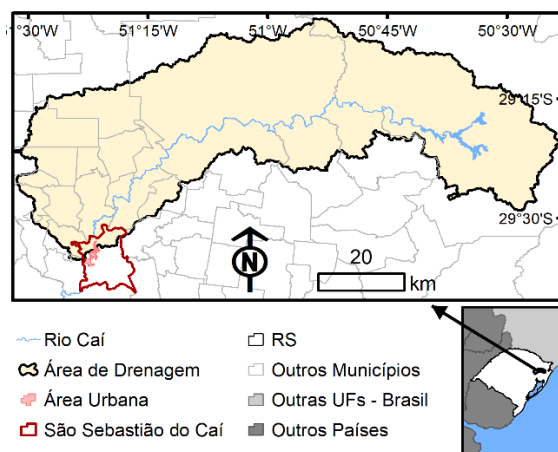


Figura 1. Localização de São Sebastião do Caí/RS e área de drenagem do Rio Caí a montante da sua área urbana.

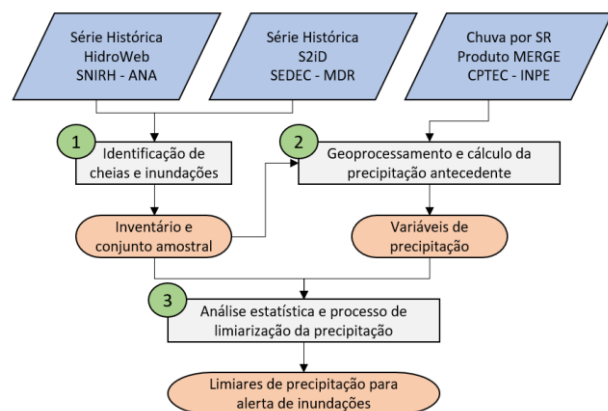


Figura 2. Fluxograma da metodologia de pesquisa.

A partir da análise combinada das séries, por meio de um algoritmo escrito no editor de *scripts* do MATLAB, foram identificadas ocorrências de cheias (cotas fluviais entre 8 e 10 m, sem registros no S2iD) e inundações (cotas > 10 m, com registros no S2iD). Nossa proposta metodológica foi utilizar as cheias como amostras de não ocorrência de inundação, sendo importantes para aumentar a precisão na escolha dos limiares (última etapa). O inventário obtido foi composto por 102 cheias e 119 inundações desde 1945, todas independentes no tempo.

Em seguida, na Etapa 2, foi realizado o *download* da precipitação por satélite MERGE [11], disponibilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O produto MERGE é gerado a partir do *Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement* (IMERG-GPM) [12]. A série temporal de imagens diárias de precipitação, com resolução espacial de 0,1°, iniciou em 2000. Em função disso, nosso conjunto amostral foi restringido, resultando em 35 ocorrências de inundações e 28 cheias. Para cada cheia ou inundação, foram extraídas 11 imagens de chuva diária, do intervalo de tempo t (dia do evento) até $t-10$ (10 dias antes do evento).

No ArcGIS 10.5, por meio do *Model Builder*, todas as imagens foram recortadas pelo limite da área de drenagem. As variáveis de precipitação foram definidas considerando a bacia, tendo em vista que as inundações respondem à precipitação acumulada em sua área de drenagem. Em seguida, a partir de um algoritmo criado no MATLAB, calculamos a chuva acumulada (pixel a pixel; e média na bacia) em diferentes horizontes temporais (Tabela 1), considerando cada um dos eventos extremos.

| Variáveis de Precipitação Acumulada | Horizontes Temporais |
|-------------------------------------|--------------------------|
| P0 | $P(t)$ |
| P1 | $P(t) + P(t-1)$ |
| P2 | $P(t) + [...] + P(t-2)$ |
| P4 | $P(t) + [...] + P(t-4)$ |
| P6 | $P(t) + [...] + P(t-6)$ |
| P10 | $P(t) + [...] + P(t-10)$ |

Tabela 1. Variáveis usadas para análise da precipitação acumulada antecedente aos eventos extremos.

Métodos estatísticos descritivos de identificação de *outliers* foram utilizados para remover amostras duvidosas e equilibrar os conjuntos de inundação (ocorrência) e cheia (não ocorrência). Após a análise, selecionamos 54 eventos (27+27) para cálculo dos melhores limiares de chuva para alerta. Desenvolvemos um algoritmo de validação cruzada no MATLAB, que testa todos os valores de chuva possíveis (números inteiros de 1 mm até a maior chuva registrada). A escolha do limiar ocorre após a criação de uma matriz de confusão, na qual se calcula a acurácia (Equação 1) a partir

do número de alertas corretos, considerando os Verdadeiros Positivos (VP), Verdadeiros Negativos (VN), Falsos Positivos (FP) e Falsos Negativos (FN). Esse processo foi realizado de forma univariada (limiar simples, por variável de precipitação) e multivariada (limiares múltiplos).

$$\text{Acurácia (\%)} = \frac{VP+VN}{VP+VN+FP+FN} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi analisada a chuva acumulada antecedente na área de drenagem do ponto de interesse do Rio Caí, considerando as variáveis identificadas na Tabela 1, para os eventos de inundações (ocorrência) e cheias (sem ocorrência de extravasamento das águas). Observou-se que a precipitação média na bacia em todos os horizontes temporais foi superior em eventos de inundações, com acumulados entre 47,2 mm (P0) e 154,5 mm (P10). Nas amostras de não ocorrência, os acumulados ficaram entre 34,1 mm (P0) e 107,8 mm (P10) (Tabela 2). O coeficiente de variação das chuvas acumuladas foi levemente inferior nas inundações, indicando maior homogeneidade na precipitação que culmina com o extravasamento das águas para a planície.

Ainda que, de modo geral, as chuvas antecedentes aos eventos de inundação tenham apresentado acumulados superiores aos demais eventos, algumas discrepâncias foram observadas. Por exemplo, o evento do dia 18/10/2016 apresentou a maior cota de inundação (14,35 m), com precipitação acumulada (P10) de 185 mm. Entretanto, foi o evento iniciado em 12/09/2009 (cota de 12,03 m) que demonstrou maior precipitação acumulada nesse horizonte temporal, com 263,9 mm.

Na Figura 3 apresentamos a chuva acumulada no horizonte temporal de 11 dias para dois eventos de inundação, ocorridos em 12/09/2009 (Figura 3A) e em 24/08/2013 (3B). Ambos ultrapassaram a cota de inundação de 10 m, apesar de possuírem significativa diferença entre seus acumulados (P10). Esse resultado pode indicar uma diferente condição de umidade do solo antecedente ao evento ou até mesmo uma imprecisão no produto MERGE em relação à altura precipitada ou variabilidade espacial da precipitação.

Em relação ao alerta de inundações em São Sebastião do Caí, identificamos os melhores limiares de chuva em função da acurácia no processo de previsão. Constatamos que as variáveis de precipitação P1, P2, P4 e P6 são as que melhor discriminam os eventos de inundações dos demais (Tabela 3).

| Variável | Estatísticas de precipitação acumulada (mm) para inundações (1) e cheias (0) | | | | | | | | | |
|----------|--|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| | min | | med | | max | | s | | cv | |
| | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| P0 | 2,5 | 3,2 | 47,2 | 34,1 | 95,7 | 75,1 | 29,6 | 21,8 | 0,63 | 0,64 |
| P1 | 54,3 | 23,3 | 94,2 | 56,3 | 165,9 | 93,3 | 28,7 | 18,2 | 0,30 | 0,32 |
| P2 | 65,8 | 23,3 | 102,6 | 64,5 | 167,9 | 121,7 | 26,8 | 20,5 | 0,26 | 0,32 |
| P4 | 76,2 | 23,3 | 119,8 | 78,1 | 169,9 | 127,5 | 26,5 | 22,7 | 0,22 | 0,29 |
| P6 | 85,9 | 23,4 | 135,5 | 86,5 | 187,6 | 127,5 | 25,4 | 21,5 | 0,19 | 0,25 |
| P10 | 109,9 | 27,4 | 154,5 | 107,8 | 263,9 | 169,0 | 38,5 | 29,4 | 0,25 | 0,27 |

Legenda: min = mínima; med = média; max = máxima; s = desvio padrão; cv = coeficiente de variação.

Tabela 2. Sumário estatístico da precipitação acumulada antecedente nos eventos extremos de inundações e cheias.

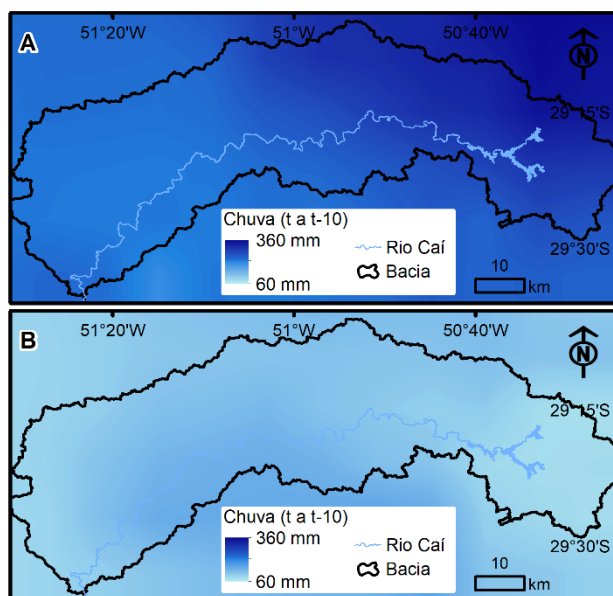


Figura 3. Precipitação antecedente em duas inundações: (A) 12/09/2009, chuva acumulada (P10) média na bacia de 263,9 mm; (B) 24/08/2013, P10 média na bacia de 109,9 mm.

| Método | Variável | Limiar de chuva (mm) | Alertas corretos | Acurácia (%) |
|--------------|----------|----------------------|------------------|--------------|
| Univariado | P0 | 59 | 35 | 64,8 |
| | P1 | 76 | 46 | 85,2 |
| | P2 | 81 | 46 | 85,2 |
| | P4 | 96 | 45 | 83,3 |
| | P6 | 105 | 49 | 90,7 |
| | P10 | 116 | 44 | 81,5 |
| Multivariado | P1;P2;P6 | 78;93;118 | 51 | 94,4 |

Tabela 3. Limiares de precipitação que precisam ser superados para alerta de inundações em São Sebastião do Caí, RS.

Na abordagem univariada, o limiar de 105 mm para a chuva acumulada de 7 dias (P6, t a $t-6$) resulta na maior acurácia possível (90,7%), permitindo a previsão correta de 49 dos 54 eventos extremos considerados (Tabela 3).

Considerando múltiplos limiares de chuva para o alerta de inundações (abordagem multivariada), a melhor combinação é a composta por P1, P2 e P6. Nesta, o alerta seria emitido se uma das seguintes condições fosse satisfeita: i) P1 superior a 78 mm; ii) P2 superior a 93 mm; iii) P6 superior a 118 mm. Com esses limiares combinados, obteve-se 51 acertos, acurácia de 94,4%.

Os índices de acurácia obtidos nesta pesquisa são compatíveis com os resultados obtidos por pesquisadores em outras áreas de estudo, com abordagens metodológicas semelhantes [13]. Nossos resultados indicam que, a partir do produto MERGE, é possível diferenciar as chuvas que causam inundações em relação aos eventos hidrológicos de menor magnitude. Os novos produtos de chuva estimada por

satélites, com apoio de estações pluviométricas, têm demonstrado bom potencial para monitoramento de desastres naturais [14].

Os limiares de precipitação identificados neste estudo podem ser usados de forma complementar ao sistema de previsão e alerta existente e operado pela CPRM [15]. O sistema de alerta atual, embora preciso para indicação de nível fluvial a ser atingido, possui curto alcance temporal. A utilização de limiares de precipitação tem como principal vantagem a possibilidade de usar a previsão de chuva de modelos atmosféricos para prever a ocorrência de inundações com maior antecedência, uma vez que não dependeria de dados fluviométricos para isso.

Em relação à abordagem matemática para obtenção do melhor limiar (ou conjunto de limiares), pode-se testar outros métodos, como, por exemplo, os que se baseiam em aprendizagem de máquinas. Tais métodos necessitam de um conjunto de dados maior, o que poderia ser contornado com a inclusão de amostras de dois ou mais lugares no mesmo processo de calibração e validação, buscando-se incorporar ao modelo atributos do terreno de cada área que permitam a determinação de limiares no contexto espacial.

Por fim, destacamos que a metodologia aqui proposta pode ser replicada em larga escala, desde que esteja disponível um inventário de inundações, ou sua obtenção seja possível a partir de dados fluviométricos ou outro tipo de registro histórico.

4. CONCLUSÕES

A utilização de chuva estimada por satélite para a identificação de limiares de precipitação, em relação a previsão de cheias e inundações, mostra-se promissora. A partir dos resultados obtidos neste estudo, com acurácia global de 94,4% nos alertas de inundação, concluímos que a metodologia utilizada é eficiente e acurada. Além disso, em função da simplicidade da abordagem matemática adotada e da praticidade para obtenção dos dados, podemos afirmar que o método é replicável ou adaptável para outras bacias.

Em relação ao limiar ajustado para alertas em São Sebastião do Caí, a considerável diferença de acurácia obtida a partir das variáveis de precipitação acumulada antecedente, demonstra que o método multivariado é o mais adequado para utilização no futuro.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo financiamento da pesquisa pela Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 18/2021, Processo 408489/2021-9.

6. REFERÊNCIAS

[1] A. L. C. de Castro. *Glossário De Defesa Civil Estudos De Riscos E Medicina De Desastres*, Ministério do Planejamento e Orçamento, Departamento de Defesa Civil, ed. 2, p. 238, 1998.

[2] P. C. D. Milly, R. T. Wetherald, K. A. Dunne et al. Increasing risk of great floods in a changing climate, *Nature*, v. 415, p. 514–517, 2002.

[3] L. Stein, F. Pianosi and R. Woods. Event-based classification for global study of river flood generating processes, *Hydrological Processes*, v. 34, p. 1514–1529, 2020.

[4] S. Golian, B. Saghafian and R. Maknoon. Derivation of probabilistic thresholds of spatially distributed rainfall for flood forecasting. *Water Resources Management*, v. 24, n. 13, p. 3547–3559, 2010.

[5] A. P. Magalhães Junior. A situação do monitoramento das águas no Brasil - instituições e iniciativas, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, p. 113-135, 2000.

[6] F. Yuan, et al. Applications of TRMM-and GPM-era multiple-satellite precipitation products for flood simulations at sub-daily scales in a sparsely gauged watershed in Myanmar. *Remote Sensing*, v. 11, n. 2, p. 140, 2019.

[7] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Censo*. Brasil, 2010.

[8] M. C. R. Pedrollo, A. O. Germano, P. Sotério, E. Rodrigues and J. C. Maduell. Alerta hidrológico da Bacia do Rio Caí: concepção e implantação do sistema, *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, pp. 14, 2011.

[9] Agência Nacional de Águas (ANA), *HIDROWEB*. Acessado em: Out/2022.

[10] Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional da Defesa Civil. *Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID)*, 2012. Acessado em: Out/2022.

[11] J. R. Rozante, D. S. Moreira, L. G. G. Gonçalves and D. A. Vila. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America, *Weather and Forecasting*, v. 25, p. 885-894, 2010.

[12] G. J. Huffman, D. T. Bolvin and E. J. Nelkin. Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation. *NASA Doc*. pp. 53, 2017.

[13] M. Santos and M. Fragoso. Precipitation thresholds for triggering floods in the Corgo basin, Portugal. *Water*, v. 8, n. 9, p. 376, 2016.

[14] A. Getirana, et al. Potential of GPM IMERG precipitation estimates to monitor natural disaster triggers in urban areas: the case of Rio de Janeiro, Brazil. *Remote Sensing*, v. 12, n. 24, p. 4095, 2020.

[15] O. C. PEDROLLO and M. C. R. PEDROLLO. Sistema de alerta de cheias da bacia do rio Caí: previsão de níveis com redes neurais artificiais In: *Eventos Extremos no Rio Grande do Sul: Inundações e Movimentos de Massa*. Porto Alegre: Evangraf, 2013, pp. 102-120.