DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA MODELAGEM DE ÁREAS INUNDÁVEIS APLICANDO REDES NEURAIS.

Fidel Morais Lucas[1]; Paulo Roberto Lacerda Tavares[2] ; Ana Rute Batista Pereira[3];José Eron Pinheiro Neto[4]; Artur David Fernandes Silva[5]; Antônio Marcus Aurélio Oliveira do Nascimento[6]; Rayanne Bezerra de Melo[7]; Adélia Alencar Brasil[8]; Isaac Felix Victor[9] & Celme Torres Ferreira da Costa[10]

Palavras-Chave – Modelagem Hidrológica, Redes Neurais Artificiais, Previsão de Inundações.

INTRODUÇÃO

As inundações constituem um dos fenômenos naturais mais recorrentes e danosos no mundo, impactando tanto ambientes urbanos quanto rurais. A intensificação de eventos extremos de precipitação, associada ao crescimento desordenado das cidades e à impermeabilização do solo, tem agravado a frequência e a severidade desses eventos, gerando prejuízos econômicos, ambientais e sociais significativos. Em áreas urbanas, as inundações provocam destruição de infraestrutura, interrupção de serviços essenciais e, em casos mais graves, perdas de vidas humanas, evidenciando a necessidade de ferramentas eficazes de monitoramento e previsão (IPCC, 2023).

O avanço do sensoriamento remoto, dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e das técnicas de inteligência artificial tem ampliado a capacidade de análise de riscos hidrológicos. A integração de dados de topografia, uso e cobertura do solo e precipitação possibilita o desenvolvimento de modelos computacionais capazes de identificar padrões complexos e não lineares, contribuindo para o aprimoramento da modelagem e previsão de inundações.

Entre essas técnicas, as redes neurais artificiais (RNAs) se destacam pela capacidade de aprendizado a partir de dados históricos e pela habilidade de generalizar relações subjacentes entre múltiplos fatores condicionantes de inundação (Mosavi, Ozturk e Chau, 2018). Aplicadas ao contexto urbano, essas redes permitem prever áreas suscetíveis à formação de alagamentos com base em variáveis topográficas, pluviométricas e de cobertura do solo, fornecendo subsídios para o planejamento urbano resiliente e a gestão de riscos ambientais.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um software em linguagem Python para modelagem de áreas inundáveis, aplicando redes neurais artificiais em dados geoespaciais. A

[1] Universidade Federal do Cariri; fidel.morais@aluno.ufca.edu.br
[2] Universidade Federal do Cariri; paulo.tavares@ufca.edu.br
[3] Universidade Federal do Cariri; anarutebpereira@gmail.com
[4] Universidade Federal do Cariri; eron.neto@aluno.ufca.edu.br
[5] Universidade Federal do Cariri; artur.silva@aluno.ufca.edu.br
[6] Universidade Federal do Cariri; antonio.nascimento@aluno.ufca.edu.br
[7] Companhia de Água e Esgoto do Ceará, Cagece; rayannebmelo@gmail.com
[8] Universidade Regional do Cariri; adeliaalencar@gmail.com
[9] Universidade Federal do Cariri; isaac.victor@aluno.ufca.edu.br
[10] Universidade Federal do Cariri; celme.torres@ufca.edu.br

proposta busca oferecer um método automatizado e replicável para apoiar a tomada de decisão em políticas públicas de prevenção e mitigação de desastres.

METODOLOGIA

A área de estudo foi delimitada, em ambiente Python, a partir das coordenadas centrais e aplicação de buffer métrico, garantindo a projeção cartográfica adequada (UTM), com base em registros históricos de inundações e na disponibilidade de dados geoespaciais públicos.

Foram integradas quatro categorias principais de dados: Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido do banco público da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), com resolução espacial de 30 metros; Mapas de uso e cobertura do solo (LULC), provenientes da base *Dynamic World* (Google/ESA), que oferecem atualização quase em tempo real com resolução de 10 metros; Máscaras históricas de inundação, derivadas de imagens de radar *Sentinel-1*, as quais indicam as manchas d'água observadas em diferentes eventos pluviométricos; Séries temporais de precipitação diária, coletadas em estações pluviométricas da ANA. O alinhamento espacial foi implementado com a função "reproject ( )" da biblioteca *Rasterio*, garantindo a correspondência exata entre pixels das diferentes camadas.

A declividade foi derivada do MDE por meio do gradiente topográfico (função "numpy.gradient"), enquanto as classes de uso e cobertura do solo foram reagrupadas em cinco categorias: áreas urbanas, vegetação, agricultura, solo exposto e corpos hídricos. As máscaras de inundação foram convertidas em uma variável binária (1-áreas inundadas; 0-não inundadas), e os valores de precipitação foram incorporados como variável dinâmica. Assim, cada pixel foi caracterizado por um vetor de atributos composto por: altitude, declividade, tipo de uso do solo e precipitação associada.

O modelo preditivo foi implementado sob a forma de uma Rede Neural Artificial (RNA) do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP). O algoritmo foi desenvolvido em Python com as bibliotecas *TensorFlow* e *Keras*, empregando uma arquitetura composta por camadas densas totalmente conectadas e função de ativação ReLU. O modelo foi treinado com dados rotulados (supervisionados), utilizando a função de perda *binary cross-entropy* e o otimizador *Adam*. O conjunto de dados foi dividido em 70% para treinamento e 30% para teste, com validação cruzada para evitar sobreajuste (*overfitting*). As métricas de avaliação incluíram acurácia, precisão, revocação e F1-score.

As predições da rede neural foram comparadas às manchas reais de inundação, obtidas das imagens *Sentinel-1*. As saídas do modelo foram refinadas por pós-processamento morfológico, com uso das funções "remove_small_objects" e "remove_small_holes" da biblioteca *Scikit-image*, removendo ruídos e preenchendo pequenas falhas espaciais. O resultado final foi exportado em formato GeoTIFF e visualizado por meio de *Matplotlib* e *Geopandas*, permitindo a geração de mapas de suscetibilidade à inundação e sua sobreposição a camadas geográficas de referência.

RESULTADOS

A matriz de confusão gerada pelo modelo após o processo de treinamento e validação é apresentada na Figura 1. Embora os valores quantitativos variem conforme o ajuste dos parâmetros, observou-se que o classificador foi capaz de distinguir adequadamente as áreas de risco elevado (rotuladas como "inundadas") das zonas não afetadas, com padrões de predição coerentes em termos espaciais. A Figura 2 exibe um exemplo de predição espacial obtida pelo software, no qual as áreas destacadas em azul representam as zonas estimadas como de maior propensão à inundação. É possível observar

correspondência entre essas regiões e as zonas historicamente alagadas, especialmente em áreas de baixa altitude e declividade reduzida.

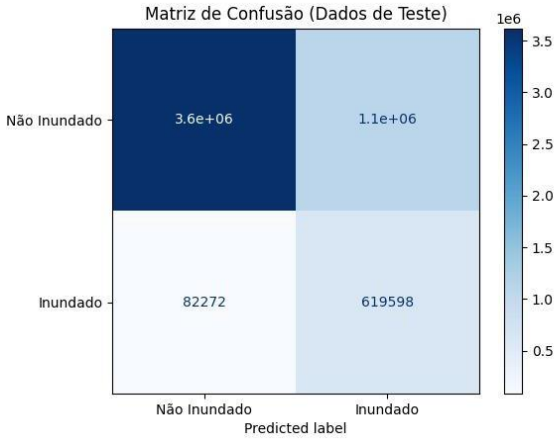


Figura 1. Matriz de confusão dos dados de teste. Fonte: autoria própria.

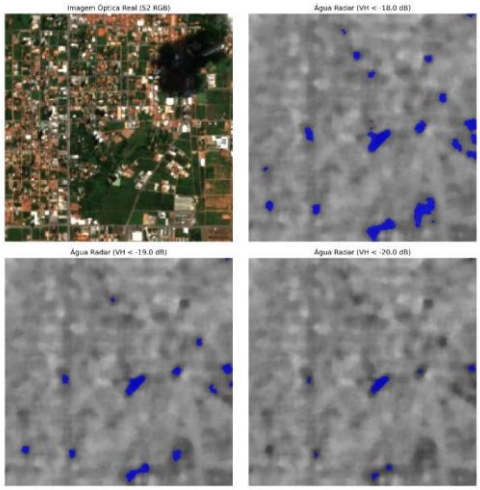


Figura 2. Comparação entre imagem óptica e detecção de água por radar. Fonte: autoria própria.

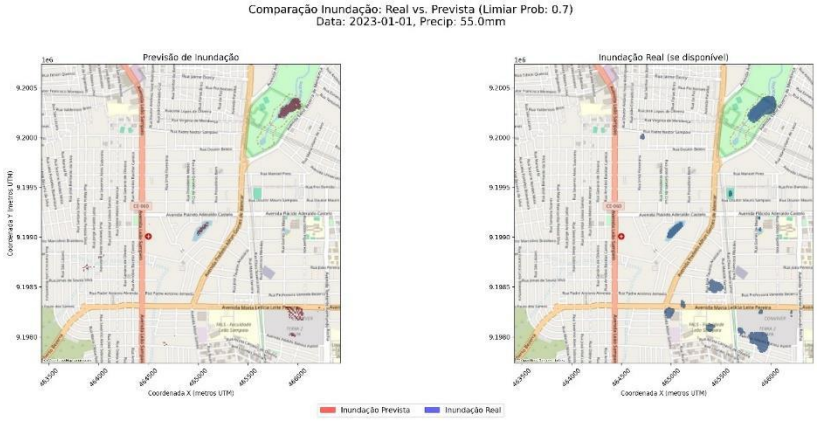


Figura 3. Comparação entre previsão de inundação e evento real. Fonte: autoria própria.

Por fim, a Figura 3 apresenta um confronto lado a lado entre o mapa previsto de inundação (saída do modelo) e um mapa de referência. Observa-se correspondência espacial nas áreas próximas a cursos d'água e zonas planas. As divergências localizadas foram discutidas à luz de três fatores: (i) resolução

e ruído das imagens de radar; (ii) imperfeições das máscaras de referência; e (iii) simplificação de alguns insumos (por exemplo, precipitação tratada de forma agregada). Esses pontos indicam caminhos de melhoria (pós-processamento morfológico e inclusão de variáveis adicionais) sem alterar a fidedignidade dos resultados apresentados.

Os resultados visuais obtidos demonstraram consistência hidrológica e aderência ao comportamento físico do terreno, em conformidade com o esperado pela literatura (Beven, 1979; Arnold & Gibbons, 1996). As áreas mais planas, próximas a cursos d'água e com maior impermeabilização do solo, foram corretamente indicadas como de risco mais elevado. Essa correspondência sugere que o modelo conseguiu identificar as relações entre variáveis topográficas e hidrológicas de forma eficaz.

CONCLUSÕES

O software desenvolvido demonstrou a viabilidade da aplicação de redes neurais artificiais na modelagem e previsão de eventos hidrológicos extremos. O projeto resultou em um protótipo funcional e metodologicamente robusto, que permite a identificação de áreas com maior suscetibilidade a inundações, contribuindo para o monitoramento e a mitigação de riscos hidrológicos.

Os resultados obtidos apresentaram coerência com os fundamentos da hidrologia e da modelagem computacional, evidenciando padrões espaciais compatíveis com registros históricos de alagamentos, o que mostra o potencial de aplicação no planejamento urbano e na gestão de riscos ambientais.

As principais limitações do estudo estão relacionadas à resolução dos dados utilizados e à simplificação das variáveis climáticas consideradas.

Trabalhos futuros poderão incorporar dados pluviométricos de alta resolução, ampliar a base amostral e avaliar diferentes algoritmos de aprendizado profundo.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, Chester L.; GIBBONS, C. James. *"Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator"*. Journal of the American Planning Association, v. 62, n. 2, p. 243–258, 1996.

BEVEN, Keith J.; KIRKBY, Mike J. *"A physically based, variable contributing area model of basin hydrology"*. Hydrological Sciences Bulletin, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

IPCC (2023). *"Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report"*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34.

MOSAVI, A.; OZTURK, P.; CHAU, K.-W. *"Flood prediction using machine learning models: Literature review"*. Water, v. 10, n. 11, p. 1536, 2018.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à FUNCAP e à UFCA pelo apoio institucional, científico e financeiro concedido para o desenvolvimento deste trabalho.