

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

SISTEMA SIMPLIFICADO DE PREVISÃO DE ÁREAS INUNDÁVEIS EM TEMPO REAL A PARTIR DE MODELAGEM HIDROLÓGICA, MDE E CURVAS-CHAVE SINTÉTICAS

Karolyne Aquino Alexandre Breckenfeld¹; Adriano Rolim da Paz²; Emanuel Fernández de Melo³;

Natália Maria Mendes Silva⁴; Dário Macedo Lima⁵ & João Vitor Dias da Silva Lima⁶

Abstract: Real-time flood forecasting systems are essential tools for risk mitigation and for supporting decision-makers in taking timely and informed actions. This study proposes a simplified real-time forecasting system for estimating flood-prone areas using pixel-based distributed hydrological modeling (Hidropixel) combined with high-resolution LiDAR-derived DEM (1 m). Synthetic rating curves were derived from the HAND (Height Above the Nearest Drainage) terrain descriptor, allowing for differentiated flood thresholds to be applied to the main river and its tributaries. Visual analysis indicated that the resulting flood extents showed satisfactory performance in both the main channel and tributaries, outperforming the extent generated using observed discharge and a single HAND threshold across the drainage network. However, further investigation is recommended, particularly to improve flood estimation in confluence zones, as omission or commission errors may arise depending on the method employed.

Resumo: Sistemas de previsão de inundação em tempo real são importantes ferramentas para mitigar riscos e apoiar gestores em tomadas de decisão assertivas. Este trabalho propõe um sistema simplificado de previsão em tempo real para estimativa de áreas inundáveis por meio de modelagem hidrológica distribuída por pixel, Hidropixel, com uso de MDE LiDAR de alta resolução espacial (1m). Curvas-chave sintéticas foram estimadas a partir do descriptor de terreno HAND para adoção de limiares distintos de inundação no rio principal e seus afluentes. Por meio de análise visual, identificou-se que as manchas de inundação geradas apresentaram resultado satisfatório no rio principal e afluentes, com desempenho superior à mancha obtida utilizando vazão observada e limiar único de HAND para toda a drenagem. No entanto, recomenda-se um estudo mais detalhado com potenciais melhorias na estimativa de inundação em áreas de confluência, uma vez que a depender do método utilizado podem ocorrer falhas de omissão ou comissão.

Palavras-Chave – Modelo Digital de Elevação, Hidropixel, HAND.

INTRODUÇÃO

Inundações promovem múltiplos impactos na sociedade: vítimas (mulheres são ainda mais impactadas – principais cuidadoras de idosos e crianças, maior dificuldade na procura por abrigos e suscetibilidade à violência de gênero), infraestrutura, segurança hídrica e alimentar, produção de

1) Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental/UFPB, João Pessoa (PB), (83) 99931-9415, breckenfeldkarol@gmail.com

2) Professor Associado na Universidade Federal da Paraíba/UFPB, João Pessoa (PB), (83) 3216-7355, adrianorpaz@yahoo.com.br

3) Mestrando da Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental/UFPB, João Pessoa (PB), emanuelfm2000@gmail.com

4) Mestranda da Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental/UFPB, João Pessoa (PB), nataliammendes.07@gmail.com

5) Pesquisador na Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Fortaleza (CE), (85) 3101-1088, dario.lima@funceme.br

6) Graduando em Engenharia Ambiental/UFPB, João Pessoa (PB), (81) 99461-4905, jvds@academico.ufpb.br

energia, interrupção de serviços públicos, questões sanitárias, perdas de serviços ecossistêmicos, comércio (lucros cessantes e outros), interrupção de cadeias de suprimentos e outras atividades (Strömberg, 2007; Tellman et al., 2021; Smiley et al., 2022; Gourevitch et al., 2023).

Porém é preciso compreender que as inundações são fenômenos naturais, sendo a vulnerabilidade a real causa dos desastres, que ocorre quando a capacidade de uma comunidade lidar com um evento é superada. A vulnerabilidade pode ser compreendida como um processo construído no passado, através de ações e decisões que levaram àquela comunidade ao estado atual; no presente, expondo o estado atual e suas manifestações; e, no futuro, no qual tem-se um potencial para mudança e melhoria das condições de vulnerabilidade (Kelman, 2007).

Pode-se esperar que tais padrões continuem à medida que as pressões climáticas e de uso da terra se amplificam (Hirabayashi et al., 2013; Yin et al., 2018). Embora os danos causados pelas inundações não possam ser eliminados, estes podem ser mitigados. Isto é particularmente verdadeiro quando as populações recebem aviso prévio, confiam na precisão das previsões e recebem inteligência açãoável (Johnson et al., 2019).

Os sistemas de previsão e alerta para riscos de inundações são ferramentas essenciais para a gestão de desastres, agindo com significativo potencial de redução na vulnerabilidade. Esses sistemas utilizam uma combinação de diversas tecnologias, especialmente unindo modelagem hidrológica e sensoriamento remoto (Johnson et al., 2019).

O descritor de terreno HAND (Height Above the Nearest Drainage), gerado a partir de um MDE, tem sido amplamente usado para estimar áreas inundáveis, normalizando os dados topográficos através do cálculo da diferença entre a elevação de um pixel do terreno e a elevação do pixel ao qual ele se conecta segundo os caminhos de fluxo (Rennó et al., 2008; Nobre et al., 2016). O HAND também vem sendo aplicado na obtenção de curvas-chave sintéticas de locais onde não existem essas informações (Zheng et al., 2018; Johnson et al., 2019).

Por outro lado, uma vez que o HAND está limitado a estimar inundações para um ponto do terreno apenas quando proveniente do ponto do rio ao qual ele se conecta segundo o caminho de fluxo, o mesmo não tem a capacidade de gerar inundações provenientes de múltiplas fontes fluviais. Nessa abordagem, as bacias de contribuição são independentesumas das outras para determinar as manchas de inundações correspondentes. Isso resulta que, em pontos de confluência de um rio de maior ordem com afluentes de menor fluxo, pode haver uma incoerência nas manchas de inundações obtidas (Aristzábal et al., 2023).

Uma vez que falhas e omissões de áreas de risco em sistemas de previsão e alerta estão relacionados ao aumento da vulnerabilidade da população suscetível a eventos extremos de inundações, o aperfeiçoamento de métodos e ferramentas que auxiliam na gestão de riscos a desastres são de grande importância. Desta forma, este trabalho propõe um sistema simplificado de previsão de inundações a partir da combinação entre as vazões geradas por um modelo hidrológico distribuído por pixel Hidropixel (Lima et al., 2024), a obtenção de curvas-chave sintéticas derivadas do MDE e HAND e a melhoria da estimativa de manchas de inundações a partir desse mesmo descritor de terreno. Como estudo de caso, toma-se a bacia hidrográfica do rio Tapacurá (PE), que tem histórico de cheias e prejuízos associados principalmente aos núcleos urbanos de Pombos e Vitória de Santo Antão.

METODOLOGIA

Concepção do sistema de previsão de áreas inundáveis

O sistema proposto para previsão de áreas inundáveis nesse estudo é composto da seguinte forma:

- i) Definição da área de estudo com disponibilidade de dados – MDE com alta resolução espacial; postos fluviométricos (curva-chave) e pluviométricos; e, mapeamento de área inundada a ser utilizada como referência;
- ii) Processamento básico do MDE para obtenção dos arquivos de áreas acumuladas de drenagem, direção de fluxo, drenagem e delimitação das bacias hidrográficas;
- iii) Caracterização da bacia hidrográfica (tipo, uso e ocupação do solo) e aplicação do modelo hidrológico distribuído por pixel, Hidropixel. Calibração dos parâmetros e validação a partir de dados de vazões observados.
- iv) Estimativa das curvas-chaves sintéticas a partir de características geométricas de inundação da região e do descritor de terreno HAND.
- v) Aplicação do HAND para gerar manchas de inundação com adoção de limiares distintos para cada trecho de rio a partir das curvas-chave sintéticas e vazão calculada para cada rio, tomando como entrada ao modelo hidrológico as previsões de chuva.

Modelagem hidrológica

O sistema concebido adota o modelo Hidropixel versão DLR (Distributed Linear Reservoirs), apresentada em Lima et al. (2024) como uma melhoria das versões anteriores desse modelo (Veeck et al., 2021). Trata-se de um modelo distribuído por pixel, em que a bacia hidrográfica é discretizada segundo a resolução espacial do MDE disponível. O modelo é composto por três módulos principais. O primeiro é o cálculo do tempo de viagem do escoamento de cada pixel até o exutório da bacia (Tv), a partir do método da velocidade e se baseando em características como uso e ocupação do solo, produtos derivados do MDE (rede de drenagem, comprimentos e declividades de caminhos de fluxo) e características hidráulicas dos canais de drenagem. O segundo módulo é a determinação de chuva excedente, que aplica o método do Curve-Number (CN) a partir da combinação entre tipos de solos e classes de uso e ocupação do solo para cada pixel. O terceiro módulo faz a translação até o exutório das chuvas excedente discretizadas no intervalo de tempo, levando em conta o Tv de cada pixel, e depois um reservatório linear simples de cada pixel atenua essas vazões, simulando efeitos de armazenamento. Apenas dois parâmetros são calibráveis: o CN e o parâmetro β associado aos reservatórios lineares (constante para a bacia; varia de 0 a 1, quanto maior mais efeito de amortecimento; Lima et al., 2024).

Curva-chave sintética

Esta etapa da metodologia proposta consiste em estimar curvas-chave sintéticas (CCS) para pontos de interesse na rede de drenagem a partir do processamento do MDE e HAND, seguindo abordagem de Zheng et al. (2018). Para um determinado ponto de interesse de geração da CCS, define-se uma extensão de trecho de rio centrado nesse ponto. Para diferentes cotas de nível de água, estima-se a área inundada pelo HAND nesse trecho, o volume de inundação correspondente e outras características como largura média da inundação, perímetro molhado e radio hidráulico. Aplica-se a equação de Manning com base nessas características e na adoção de um coeficiente de rugosidade para essa área, estimando-se a vazão correspondente. Os pares de pontos de cota de nível de água e vazão configuram a CCS desse ponto.

Áreas inundadas a partir do HAND

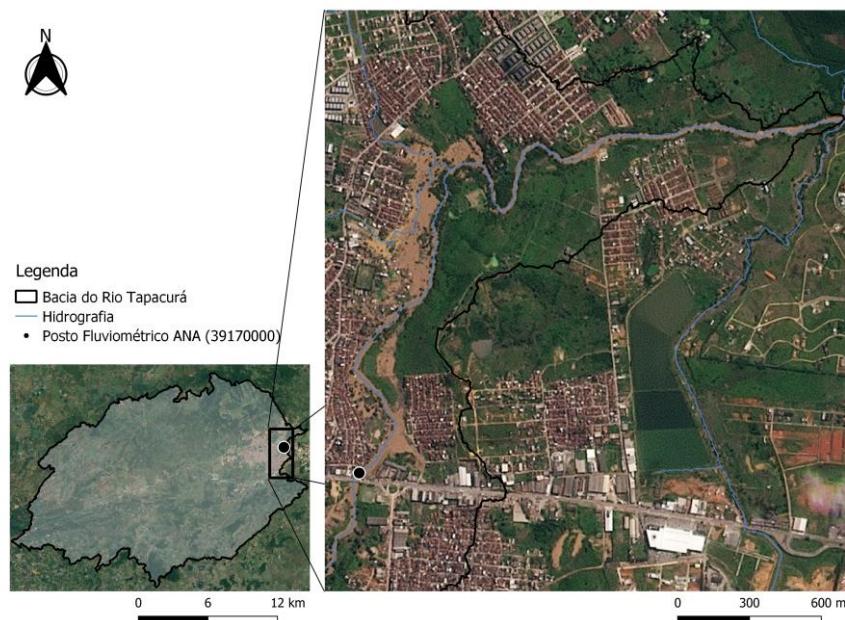
No sistema concebido, as áreas inundadas são estimadas a partir do processamento do HAND, mas seguindo uma abordagem adaptada da proposta por Aristizábal et al. (2023). A rede de drenagem é discretizada em trechos de rio de interesse para diferenciação de níveis de inundação. Em cada um desses trechos, pelas etapas anteriores tem-se a vazão máxima e a cota máxima de inundação. A cota máxima estimada para cada trecho é usada como limiar específico da sub-bacia contribuinte para identificar que áreas se inundam. Todos os pixels com valor do atributo HAND inferior a tal limiar são inundados. A mancha de inundação final é dada pela superposição das áreas de inundação identificadas nas diferentes sub-bacias drenantes aos trechos de rio adotados.

Aplicação a uma área de estudo

Localização, caracterização e seleção do evento de cheia

A região estudada é a bacia hidrográfica do Rio Tapacurá (Pernambuco), delimitada em uma seção a pouco mais de 3 km a jusante da estação fluviométrica Vitória de Santo Antão (código 39170000; Figura 1). Essa bacia abrange o trecho do Rio Tapacurá situado no perímetro urbano do município de Vitória de Santo Antão, caracterizado por problemas recorrentes de inundação. Possui uma área de drenagem 283,52 km² e pertence à bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, que abrange seis municípios: Vitória de Santo Antão, Pombos, São Lourenço da Mata, Gravatá, Moreno e Chã Grande (Braga, 2001).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo com imagem do satélite PlanetScope durante a cheia de 23/06/2022.

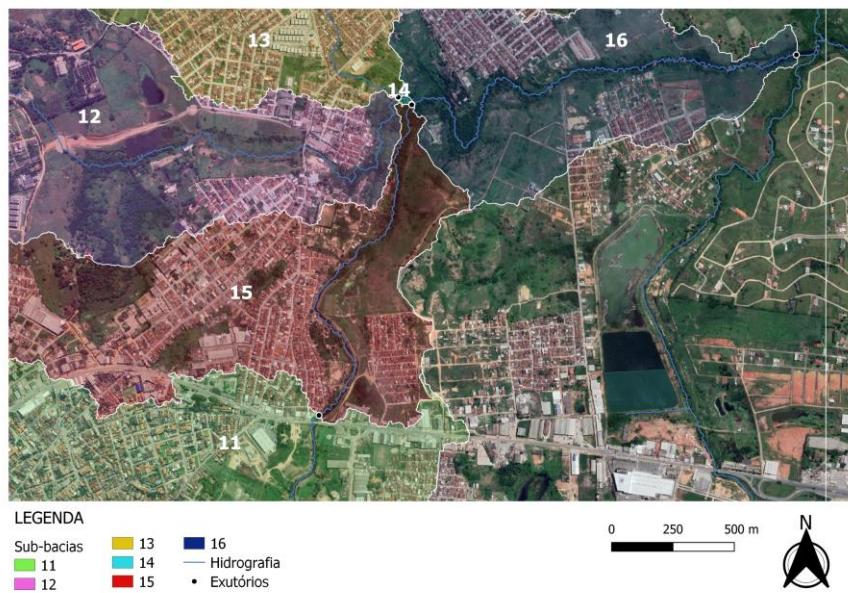


Foi escolhido o evento de 22 e 23 de junho de 2022 para estudo, devido à disponibilidade de imagem de satélite do sistema de sensoriamento remoto PlanetScope, com resolução espacial de 3 metros, capturada às 09h30 dessa data. Dados de chuva de três estações com discretização temporal (dt) de 10 min ou 15 min estavam disponíveis para esse evento, e dados de vazão com dt de 15 min para a estação Vitória de Santo Antão. Nesse evento, choveu um acumulado entre 50 e 70 mm entre as três estações, ao longo de quase 22 h entre 12h00 e 21h15 do dia 22/06/2023, resultando na vazão máxima ocorrida às 03h00 do dia seguinte.

Simulação com o Hidropixel

A bacia de estudo foi simulada com o Hidropixel adotando-se uma discretização espacial de 30 m, o que configurou 290.854 elementos de simulação. O MDT proveniente do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D; Cirilo et al., 2014), com resolução espacial de 1m, foi reamostrado para 30 m. Esse MDT 30 m foi processado para remoção de depressões, definição de direções de fluxo, determinação de áreas acumuladas de drenagem, rede de drenagem e delimitação da bacia hidrográfica - todos produtos requeridos como entrada ao Hidropixel. Mapa de uso e ocupação do solo do projeto MapBiomas, também com 30 m de resolução espacial, foi obtido e analisado, sendo reclassificado em quatro classes principais: mata/floresta, pastagem/agricultura, áreas urbanas e água. Os tipos de solo da região foram classificados segundo os grupos hidrológicos do solo do método CN, para cruzamento com as classes de uso e ocupação do solo. Esse cruzamento serviu de guia para a definição dos valores iniciais do parâmetro CN, na condição de umidade antecedente II. Foram definidas 16 sub-bacias de interesse para obtenção de hidrogramas e vazões máximas - a Figura 2 ilustra parte dessa subdivisão, focada na área urbana de Vitória de Santo Antão. O ajuste do modelo foi realizado ajustando-se a faixa de condição de umidade antecedente para definição dos CNs e variando-se o parâmetro β , ambos de forma manual por tentativa e erro, e seguindo abordagem proposta por Lima et al. (2024).

Figura 2 – Delimitação de parte das sub-bacias simuladas, na área urbana de Vitória de Santo Antão.



Estimativa de curvas-chave sintéticas

Inicialmente, foi gerada a curva-chave sintética (CCS) para o trecho de rio onde se situa a estação fluviométrica Vitória de Santo Antão. A comparação entre CCS e curva-chave observada disponível para esse posto serviu para ajustar a definição da extensão de trecho de rio e coeficiente de Manning da metodologia de extração da CCS. Foi definido uma extensão de trecho de 2,5 km e Manning de 0,07 uniforme espacialmente. Esses parâmetros foram fixados e adotados para extrair as CCS para trechos centrados nos exutórios das demais 15 sub-bacias da área de estudo.

Estimativa das manchas de inundação

Dois procedimentos foram adotados para estimar as manchas de inundação. O primeiro procedimento segue o concebido no sistema de previsão simplificado descrito neste trabalho. Em cada uma das 16 sub-bacias, tomou-se a vazão máxima simulada pelo Hidropixel e, a partir das curvas-chave sintéticas correspondentes, estimou-se a cota máxima de inundação. Essa cota máxima

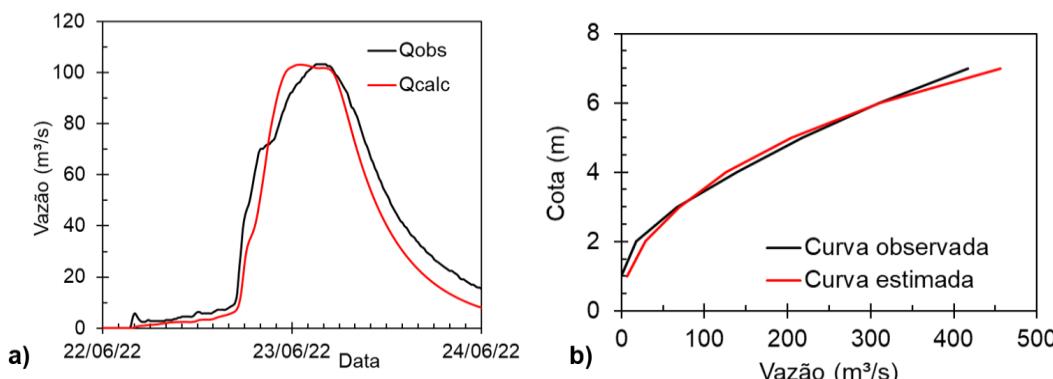
foi adotada como limiar do valor máximo de HAND que caracteriza as áreas que se inundam, de forma individualizada por sub-bacia. O segundo procedimento consistiu em seguir a abordagem mais simplificada, de adotar um único limiar do valor máximo de HAND para toda a área de estudo. Nesse caso, tomou-se a vazão máxima observada e a correspondente cota de inundação derivada da curva-chave observada na estação Vitória de Santo Antônio (39170000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desempenho do modelo hidrológico

O modelo Hidropixel-DLR teve um desempenho satisfatório em reproduzir o hidrograma de cheia do evento (Figura 3-a), principalmente quanto à representação da subida do hidrograma e da intensidade da vazão de pico. A faixa da condição de umidade foi a penúltima em termos de maior umidade, inferior apenas à condição clássica III do método CN. O parâmetro β foi ajustado como valor 0,45.

Figura 3 – a) Comparação entre hidrograma observado (Q_{obs}) e calculado (Q_{calc}) na estação Vitória de Santo Antônio;
b) Comparação entre curvas-chave sintética e observada na mesma estação.



Ajuste da curva-chave sintética

O ajuste da curva-chave sintética à curva observada na estação Vitória de Santo Antônio foi satisfatório, como ilustrado na Figura 3-b, demonstrando o potencial da metodologia baseada no processamento do MDE e HAND. Os parâmetros ajustados para obtenção da curva-chave dessa estação foram replicados para gerar as curvas-chave nas demais sub-bacias e trechos de interesse.

Avaliação das manchas de inundação

Os resultados obtidos na simulação do Hidropixel e nas CCS, sendo vazões máximas e alturas, bem como a vazão máxima observada no posto fluviométrico e respectiva altura de inundação são apresentadas na Tabela 1.

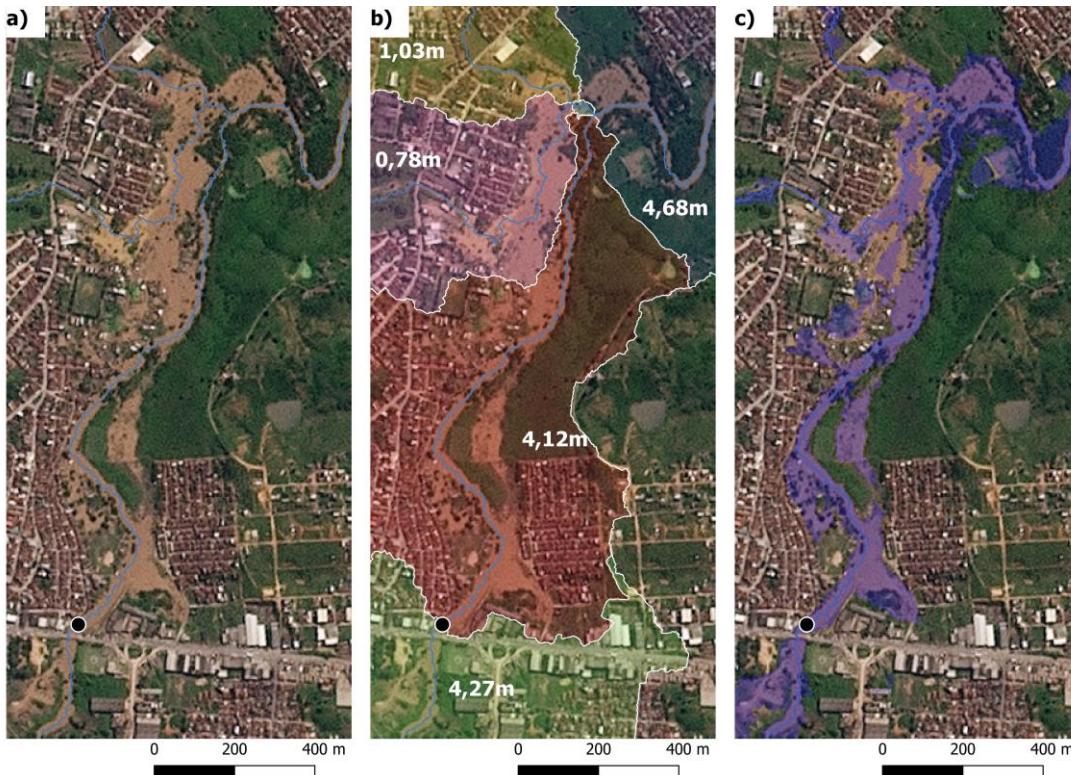
Para o primeiro procedimento, as alturas “Ymáx estimada” foram utilizadas para aplicar na rotina computacional e gerar as manchas de inundação com limiares diferentes de HAND para cada sub-bacia. A mancha de inundação é apresentada na Figura 4.

Tabela 1 – Relação das vazões (Q) máximas e cotas (Y) por sub-bacia.

Sub-bacia	Área (km ²)	Qmáx Obs. (m ³ /s)	Qmáx Calc. (m ³ /s)	Ymáx Obs. (m)	Ymáx Estimada (m)
11	262,13	103,40	103,03	3,51	4,27
12	16,00	-	14,44	-	0,78
13	2,72	-	22,51	-	1,03
14*	18,70	-	-	-	1,50
15	263,73	-	101,70	-	4,12
16	283,52	-	104,16	-	4,68

*Não foi realizada simulação hidrológica para o incremento da sub-bacia 14 e adotado limiar HAND com melhor ajuste visual.

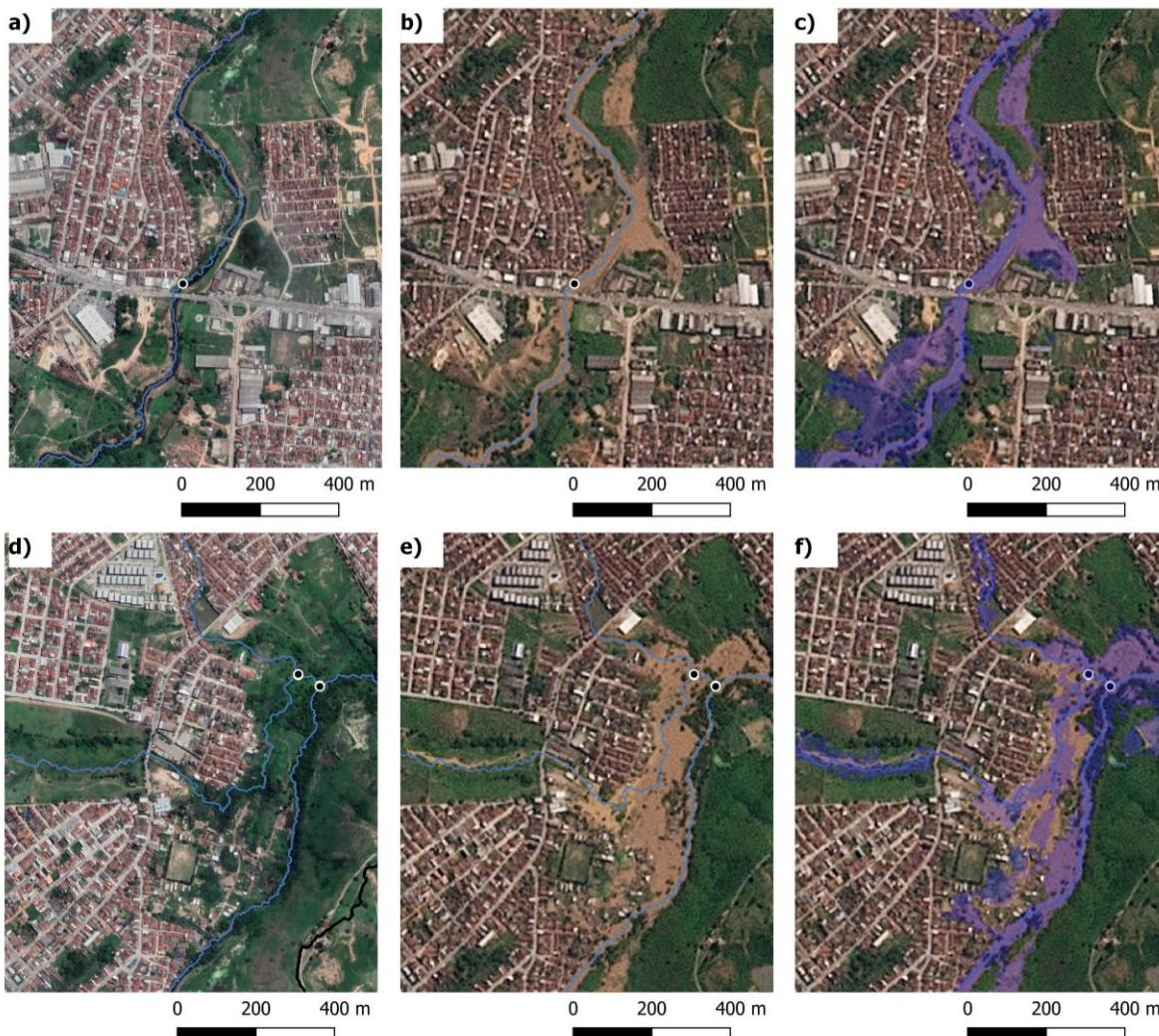
Figura 4 – a) Inundação registrada em 23/06/2022 em imagem *PlanetScope*; b) Limiares de HAND aplicados por sub-bacia; c) Mancha de inundação obtida com tais limiares de HAND.



Para uma melhor avaliação do resultado obtido, optou-se por dividir em duas regiões (Figura 5), sendo uma localizada ao sul do Rio Tapacurá (a), (b) e (c) no qual encontra-se apenas o rio principal sem contribuição de outras sub-bacias e outra ao norte (d), (e) e (f) na qual existem duas importantes confluências com os riachos das sub-bacias 12 e 13.

A partir do que foi gerado, percebeu-se na imagem c) que a inundação no rio principal foi representada com uma boa acurácia e sem omissões de áreas inundadas. Em contrapartida, ao analisar a imagem f) percebeu-se a omissão de áreas inundadas referentes ao riacho da sub-bacia 12. Limitação essa já descrita na literatura como destacado por Aristzábal et al. (2023).

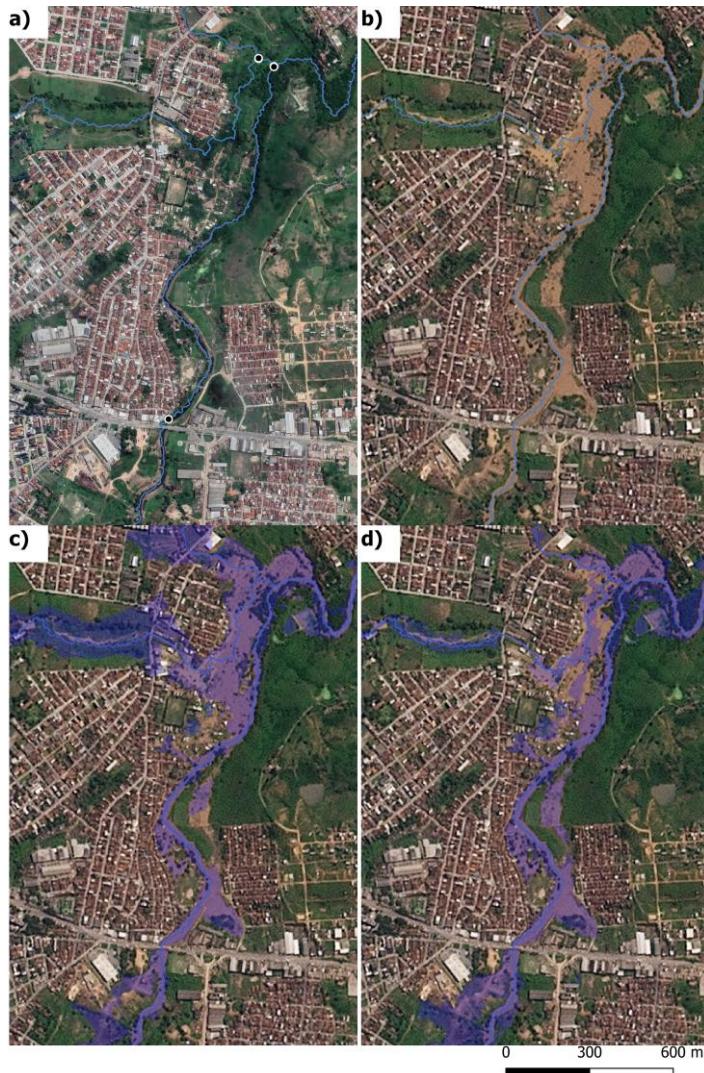
Figura 5 – a) e d) Imagem Google Satélite com o Rio Tapacurá ocupando calha principal; b) e e) Inundação registrada em 23/06/2022 em imagem *PlanetScope*; c) e f) Mancha de inundação estimada.



O segundo procedimento de resultados tomou por análise aplicando um único limiar de HAND com base na vazão máxima observada no evento de 23 de junho de 2022 no valor de 103,40 m^3/s no Rio Tapacurá e sua respectiva altura de inundação de 3,51 m obtida pela curva-chave do posto fluviométrico 39170000. Um comparativo entre os dois procedimentos pode ser analisado a partir da Figura 6.

Ao comparar as duas manchas, algumas constatações podem ser feitas: i) a altura de inundação correspondente à vazão máxima observada representou com boa acurácia a inundação no rio principal, porém omitiu algumas áreas alagadas; ii) nas áreas de confluência com os riachos de menor ordem, houve um melhor ajuste com a aplicação do HAND de limiar único, porém houve uma superestimativa à montante dos riachos, uma vez que a vazão nesses rios é menor que a observada no rio principal, e, consequentemente, menor altura de inundação.

Figura 6 - a) Imagem Google Satélite com o Rio Tapacurá ocupando calha principal; b) Inundação registrada em 23/06/2022 em imagem *PlanetScope*; c) Mancha de inundação para HAND como limiar único; d) Mancha de inundação para HAND com limiares distintos por sub-bacias



CONCLUSÕES

O sistema simplificado de previsão de áreas inundáveis desenvolvido neste trabalho demonstrou ser uma alternativa promissora para estimativas em tempo real, ao integrar modelagem hidrológica distribuída por pixel (Hidropixel), curvas-chave sintéticas e o descriptor de terreno HAND.

A aplicação à bacia do Rio Tapacurá apresentou desempenho satisfatório na simulação do hidrograma de cheia, bem como na estimativa da curva-chave sintética e consequente representação das manchas de inundação. Na adoção de um limiar único de HAND, percebeu-se uma superestimativa nas áreas inundadas dos riachos de menor ordem. Diferentemente do procedimento que foram adotados limiares distintos por sub-bacia e possibilitaram um melhor ajuste. Entretanto foi observado que houve uma omissão de áreas inundadas em pontos de confluência com esses riachos.

Conclui-se que o sistema proposto apresenta uma relevante contribuição para estudos de gestão de riscos à desastres e mapeamento de áreas de inundações, especialmente em locais com baixa disponibilidade de dados de vazão. Recomenda-se para estudos futuros aprofundamento na utilização do HAND para aperfeiçoar as estimativas em zonas de confluência com rios de menor ordem.

REFERÊNCIAS

- ARISTIZABAL, F. et al. “Extending Height Above Nearest Drainage to Model Multiple Fluvial Sources in Flood Inundation Mapping Applications for the U.S. National Water Model”. *Water Resources Research*, 59, e2022WR032039, 2023.
- BRAGA, Ricardo Augusto Pessoa. Gestão ambiental da bacia do Tapacurá: Plano de ação. UFPE/CTG/DECIVIL/GRH; Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2001.
- CIRILO, J.A. et al. “Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial”. *Revista Brasileira de Geografia Física* 7 (4), 2014.
- GOUREVITCH, J.D. et al. “Unpriced climate risk and the potential consequences of overvaluation in US housing markets”. *Nature Climate Change* 13, 250–257, 2023.
- HIRABAYASHI, Y. et al. “Global flood risk under climate change”. *Nature Publishing Group*, 3, 816, 2013.
- JOHNSON, J.M. et al. “An integrated evaluation of the National Water Model (NWM)-Height Above Nearest Drainage (HAND) flood mapping methodology”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19, 2405-2420, 2019.
- KELLMAN, I. “Understanding vulnerability to understand disasters”. Panel contribution to the population-environment research network cyberseminar on population and natural hazards, 2007.
- LIMA, D.M. et al. “Incorporating spatial variability in surface runoff modeling with new DEM-based distributed approaches”. *Computational Geosciences*, 28, 1331–1348, 2024.
- NOBRE, A.D. et al. “HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent”. *Hydrological Processes* 30, 320-333, 2016.
- RENNÓ, C.D. et al. “HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia”. *Remote Sensing of Environment* 112, 3469-3481, 2008.
- SMILEY, K.T. et al. “Social inequalities in climate change-attributed impacts of Hurricane Harvey”. *Nature Communications*, 13, 1–10, 2022.
- STRÖMBERG, D. “Natural disasters, economic development, and humanitarian aid”. *Journal of Economic Perspectives* 21, 199–222, 2007.
- TELLMAN, B. et al. “Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods”. *Nature* 596, 80–86, 2021.
- VEECK, S. et al. “Scale dynamics of the HIDROPIXEL high-resolution DEM-based hydrologic modeling approach”. *Environmental Modelling & Software* 127, 104695, 2020.
- ZHENG, X. et al. “River channel geometry and rating curve estimation using Height Above the Nearest Drainage”. *Journal of the American Water Resources Association* 54, 785-806, 2018.