

UM ESTUDO BASEADO EM GÊMEOS DIGITAIS 3D PARA SUPORTE À DECISÃO EM CENÁRIOS DE DESASTRES

Guilherme Wegrzyn Albach¹, Leonardo Evangelista², Ionildo José Sanches^{1,2}

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
(guilhermealbach@alunos.utfpr.edu.br)

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Brasil

Resumo: Desastres naturais comprometem simultaneamente a mobilidade urbana, a infraestrutura e o atendimento médico emergencial, evidenciando a necessidade de desenvolver sistemas de apoio à decisão. Esta pesquisa investiga Gêmeos Digitais urbanos 3D para suporte logístico e médico em desastres com foco em inundações, adotando o furacão Harvey, em 2017 (Houston, Texas, EUA) como estudo de caso pela diversidade de dados hidrológicos, urbanos, viários e visuais disponíveis.

Palavras-chave: Gêmeos Digitais; VANTs; Gestão de Crises, Sistema de Suporte à Decisão; Soluções Digitais 3D.

INTRODUÇÃO

A ocorrência de eventos hidrológicos extremos tem aumentado nas últimas décadas, ocasionando elevados impactos sociais, econômicos e estruturais. Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de tecnologias capazes de fornecer informações em tempo real para o auxílio na tomada de decisões (Lagap e Ghaffarian, 2024).

Em situações geradas por desastres naturais, a tomada de decisão depende da capacidade de compreender rapidamente quais regiões foram afetadas, quais vias permanecem acessíveis e onde a população exposta tende a demandar atendimento. Isso se torna ainda mais relevante em enchentes e inundações, pois a água modifica o território de forma espacialmente desigual, afetando ao mesmo tempo a circulação de veículos, o acesso a serviços de saúde e a necessidade de resgate (Lagap e Ghaffarian, 2024).

A tecnologia de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) consiste em representações virtuais dinâmicas de ambientes físicos, capazes de integrar modelos tridimensionais, dados geoespaciais e informações provenientes de sensores ou levantamentos em campo, permitindo acompanhar o estado do ambiente quase em tempo real e apoiar processos de tomada de decisão. Assim, surge como uma ferramenta promissora na gestão de riscos de inundações urbanas, possibilitando a integração de dados em tempo real, a modelagem preditiva e o suporte à decisão (Hlal et al., 2025; Kaynak et al., 2025).

Apesar desses avanços, muitas soluções ainda dependem de bases cartográficas desatualizadas ou

não conseguem representar rapidamente as alterações ocorridas após o desastre, limitando o planejamento logístico e a coordenação das equipes de resposta (Zlatanova et al. 2011).

Com a integração das imagens capturadas pelos VANTs (Veículos Aéreos Não-Tripulados) das áreas afetadas, reconstrução com modelagem 3D do ambiente, algoritmos de análise espacial e expertise clínica, o projeto possibilitará resposta rápida e eficaz, facilitando o monitoramento da situação de crise (Hu e Assaad, 2024).

A pesquisa está centrada no desenvolvimento de um sistema de suporte em zonas de desastre baseado em Gêmeos Digitais urbanos 3D para apoiar a tomada de decisão logística e médica em cenários de inundação, utilizando como estudo de caso o desastre ocorrido em Houston.

MATERIAL E MÉTODOS

Bases de imagens como DeepFlood (Fawakherji et al., 2025) reforçam a utilidade de imagens aéreas e de VANTs para mapeamento pós-desastre e validação local, mas também evidenciam que esses dados devem ser integrados a outras fontes geoespaciais para melhorar a resposta e o planejamento durante situações de crise (Kawai, 2025).

Considerando essa necessidade, foi realizada uma triagem de bases públicas contendo imagens de eventos de inundações obtidas por VANTs, buscando conjuntos de dados que, além do registro visual do desastre, disponibilizassem informações complementares necessárias para a construção de um Gêmeo Digital Urbano 3D.

Os principais conjuntos identificados durante esse levantamento são apresentados na Tabela 1. As bases de dados FloodNet (Rahnemoonfar et al., 2021), RescueNet (Rahnemoonfar et al., 2023), xBD/xView2 (Gupta et al., 2019), BlessemFloods21 (Polushko et al., 2024), DeepFlood (Fawakherji et al., 2025) e 3DAeroRelief (Le et al., 2025), identificadas na triagem, foram comparadas para auxiliar na escolha do estudo de caso.

Tabela 1. Comparação de bases de imagens aéreas e de VANTs de inundações identificadas.

Base de Dados	Origem	Evento	Fontes complementares
FloodNet	VANT	Furacão Harvey, EUA, 2017	LiDAR, voos NOAA, registros para validação.
RescueNet	VANT/aérea	Múltiplos	Limitadas por evento
xBD / xView2	Satélite	Múltiplos (incluindo o Harvey)	Harvey incluído diretamente
BlessemFloods21	Aérea tripulada	Ahr Valley, Alemanha, 2021	Poucas fontes complementares abertas
DeepFlood	Múltiplos	Múltiplos	Área rural
3DAeroRelief	VANT	Furacão IAN, EUA, 2022	Registros urbanos limitados

A triagem também evidenciou que quando existem imagens de VANTs associadas a desastres de inundação, elas tendem a ser coletadas em condições pós-pico ou pós-evento, devido às restrições de segurança, regulação, acesso às áreas afetadas e condições climáticas.

Em muitos eventos, os levantamentos são realizados com objetivo exclusivamente operacional, sem preocupação com requisitos fotogramétricos necessários para reconstrução tridimensional. Como consequência, é comum encontrar imagens com baixa sobreposição, alturas de voo variáveis, georreferenciamento incompleto e cobertura espacial descontínua, fatores que reduzem a qualidade dos modelos tridimensionais produzidos posteriormente. Essas limitações foram consideradas durante o processo de seleção do estudo de caso.

Entre as bases analisadas, a FloodNet, composta de imagens coletadas após a passagem do furacão Harvey, ocorrido em Houston, Texas (Estados Unidos), em 2017, foi escolhida como base principal

da pesquisa. A escolha decorre principalmente da existência de um amplo conjunto de dados públicos referentes ao mesmo evento, incluindo levantamentos LiDAR, modelos digitais de elevação, ortofotos, rede viária, edificações e registros hidrológicos. Essa diversidade permite integrar reconstruções locais obtidas por fotogrametria a uma representação urbana em escala regional, característica essencial para o desenvolvimento de um Gêmeo Digital voltado ao suporte à decisão logística e médica.

A Figura 1 apresenta uma imagem do *dataset* adquirida por um UAS após o furacão Harvey na cidade de Houston, EUA.



Figura 1. Exemplo de imagem do *dataset* (Rahnemoonfar et al., 2021).

Os dados do FloodNet (Rahnemoonfar et al., 2021) foram coletados com uma plataforma de pequenos UAS (*Unmanned Aircraft System*), quadricópteros DJI Mavic Pro. O conjunto completo contém 2.343 imagens obtidas entre os dias posteriores à passagem do furacão Harvey, abrangendo diferentes localidades da região metropolitana de Houston. Entretanto, como as imagens estão distribuídas entre diversos bairros e foram adquiridas em missões independentes, apenas uma parcela do conjunto apresenta continuidade espacial suficiente para reconstrução fotogramétrica enquanto afetada pelo furacão. Dessa forma, foi selecionada a comunidade de Canyon Gate do bairro Cinco Ranch, área residencial severamente atingida pela inundação e que concentra uma sequência contínua de imagens da mesma região.

Antes da reconstrução tridimensional foi realizado um processo de seleção e organização das imagens, removendo fotografias pertencentes a outras localidades, registros distorcidos e imagens sem contribuição para a cobertura da área de interesse. Ao término dessa etapa permaneceram 279 imagens, utilizadas como entrada para o software WebODM, responsável pelo processamento fotogramétrico e geração da ortofoto, nuvem de pontos e demais produtos derivados que compõem a representação tridimensional local do ambiente inundado.

Embora o FloodNet forneça informações detalhadas em escala local, sua cobertura limita-se aproximadamente à comunidade de Canyon Gate. Para representar o restante da infraestrutura urbana necessária às análises de logística médica, foi empregado um segundo conjunto de dados abrangendo toda a região da Reserva Barker, em Houston. Essa base reúne diferentes camadas geoespaciais provenientes de instituições públicas norte-americanas, incluindo nuvens de pontos LiDAR e modelos digitais de elevação disponibilizados pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), malha viária obtida a partir do OpenStreetMap, edificações do Microsoft Building Footprints e ortofotos do *National Agriculture Imagery Program* (NAIP). Em conjunto, essas informações permitem representar aproximadamente 500 km² do ambiente urbano e fornecem o contexto espacial necessário para relacionar áreas inundadas, vias de acesso, edificações e unidades de saúde.

Esses modelos representam a base física do Gêmeo Digital, possibilitando a visualização detalhada do ambiente urbano após o desastre (Josephs et al., 2024).

Por fim, todas as camadas de informação foram organizadas em um banco de dados geoespacial baseado em PostgreSQL com a extensão PostGIS, integrado ao ambiente 3DCityDB para gerenciamento dos modelos urbanos tridimensionais. Nessa estrutura, a reconstrução fotogramétrica obtida a partir do FloodNet representa uma região de maior nível de detalhamento dentro do Gêmeo Digital, enquanto os dados regionais fornecem a infraestrutura urbana necessária para futuras análises espaciais relacionadas a acessibilidade viária, exposição da população e suporte às operações de resposta em cenários de inundação.

Sobre o modelo tridimensional serão realizadas análises espaciais para identificar regiões potencialmente isoladas pelas inundações, vias de acesso comprometidas e áreas prioritárias para atendimento emergencial. Essas análises permitem avaliar o potencial do Gêmeo Digital como ferramenta de suporte à decisão em operações de resposta ao desastre (Zlatanova et al. 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A construção do Gêmeo Digital Urbano 3D foi realizada por meio da integração de diferentes bases geoespaciais públicas referentes ao furacão Harvey. O ambiente virtual resultante abrange aproximadamente 500 km² da região da Reserva Barker, em Houston, reunindo informações de relevo, edificações, rede viária e ortofotos em uma única estrutura geoespacial. Essa integração fornece a base espacial necessária para representar a infraestrutura

urbana e estabelecer relações entre áreas inundadas, vias de acesso e unidades de saúde, permitindo que diferentes camadas de informação sejam consultadas de forma integrada. A Figura 2 apresenta a área de abrangência do modelo desenvolvido.

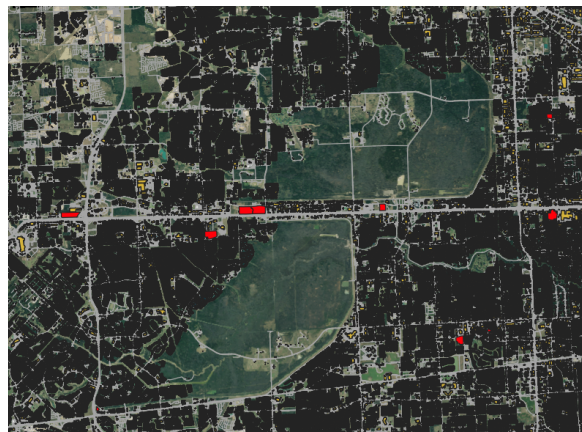


Figura 2. Abrangência da área de reconstrução.

As camadas passaram por uma reprojeção e uma padronização dos sistemas de referência espacial, permitindo uma compatibilidade entre as informações advindas de diferentes instituições. Esses dados passaram a ser integrados ao 3DCityDB, como base unificada para o gerenciamento do Gêmeo Digital. Já para validar a consistência dos dados visualmente, foi utilizado o sistema de informação geográfica QGIS. A Figura 3 apresenta o resultado da integração dos dados armazenados.



Figura 3. Visualização dos dados no QGIS.

Como ponto de análise principal para demanda médica, foi selecionada a comunidade de Canyon Gate no bairro Cinco Ranch para reconstrução a partir de 279 imagens coletadas por VANT, contidas no dataset FloodNet (Rahneemoonfar et al., 2021). Como as imagens não possuíam intuito original de reconstrução 3D do evento, para possibilitar o georreferenciamento da reconstrução, foram associados 23 pontos de controle terrestre distribuídos em 151 imagens distintas. Após o processamento no WebODM (Toffanin, 2026), foram reconstruídas com sucesso 274 imagens, correspondendo a 98,2% do conjunto utilizado. O processamento produziu uma ortofoto cobrindo cerca

de 1 km² da área residencial, além de um modelo digital de superfície, com resolução média de 3,3 cm por pixel. A ortofoto resultante parcial é apresentada na Figura 4.



Figura 4. Ortofoto reconstruída no software WebODM.

Além da ortofoto, o WebODM emprega as técnicas de visão computacional *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-View Stereo* (MVS) para reconstruir a geometria tridimensional da cena a partir das imagens sobrepostas. Como resultado, foi gerada uma nuvem de pontos densa contendo aproximadamente 31,3 milhões de pontos, permitindo representar edificações, vias, vegetação e demais elementos urbanos com elevado nível de detalhamento. Essa reconstrução constitui uma camada tridimensional complementar ao Gêmeo Digital, fornecendo uma representação mais precisa da área de Canyon Gate, do bairro Cinco Ranch e ampliando o potencial para futuras análises relacionadas aos impactos locais da inundação. A nuvem de pontos parcialmente reconstruída é apresentada na Figura 5.

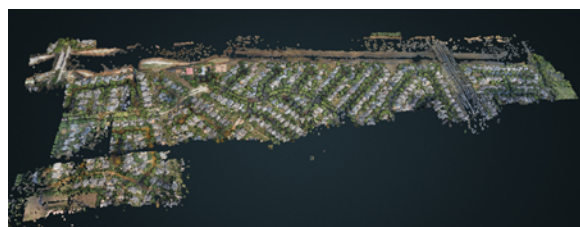


Figura 5. Nuvem de Pontos reconstruída pelo WebODM.

A Figura 6 apresenta uma aplicação da nuvem de pontos reconstruída, em maior detalhamento. Juntamente com a posição relativa das câmeras estimada pelo WebODM durante o processamento fotogramétrico. Essa representação permite visualizar a distribuição espacial das imagens utilizadas na reconstrução e verificar qualitativamente a cobertura da área de estudo.

Os resultados também evidenciam uma característica importante das bases de imagens obtidas durante operações reais de resposta a desastres.



Figura 6. Nuvem de pontos reconstruída pelo WebODM com posição relativa das imagens.

Embora apresentem limitações quanto ao planejamento do voo, sobreposição entre fotografias e qualidade do georreferenciamento, esses conjuntos ainda permitem reconstruções tridimensionais suficientemente detalhadas para representar regiões críticas do ambiente urbano. Dessa forma, a reconstrução obtida em Canyon Gate complementa a representação regional baseada em dados LiDAR, fornecendo uma área com maior nível de detalhamento capaz de enriquecer futuras análises espaciais relacionadas aos impactos locais da inundação e possibilitando a execução de um sistema de rotas dinâmico influenciado por alterações geográficas causadas por inundações (Liang, 2025).

CONCLUSÃO

O desenvolvimento da pesquisa permitiu delimitar o escopo do projeto em torno de desastres de inundações e adotar o furacão Harvey como estudo de caso de referência, a partir de uma triagem sistemática de bases de dados, confirmando escassez de imagens públicas de VANTs que permitam reconstrução fotogramétrica. Apesar disso, ao restringir as imagens da base de dados, foi possível obter resultados promissores, a partir da utilização do WebODM. Durante o desenvolvimento também foi integrado dados públicos geográficos de uma região da cidade de Houston com a base dados do FloodNet.

A etapa atual busca envolver a atribuição de profundidade de inundação à malha viária integrada ao Gêmeo Digital e a formulação de um modelo conjunto de oferta e demanda sob inundação, com inspiração em abordagens recentes de roteamento e expedição dinâmica de forças de resgate. A partir dessa integração será possível utilizar o Gêmeo Digital como base para um sistema de suporte à decisão capaz de avaliar a acessibilidade da rede viária, a exposição da população e o impacto das inundações sobre o atendimento médico emergencial.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo suporte institucional para o desenvolvimento deste projeto.

REFERÊNCIAS

FAWAKHERJI, M.; BLAY, J.; ANOKYE, M.; HASHEMI-BENI, L.; DORTON, J. DeepFlood for Inundated Vegetation High-Resolution Dataset for Accurate Flood Mapping and Segmentation. *Scientific Data*, v. 12, art. 271, 2025. DOI: 10.1038/s41597-025-04554-3.

GUPTA, R. et al. xBD: A Dataset for Assessing Building Damage from Satellite Imagery. *arXiv:1911.09296*, 2019.

HLAL M., et al. Digital Twin Technology for Urban Flood Risk Management: A Systematic Review of Remote Sensing Applications and Early Warning Systems. *Remote Sensing*, v. 17(17), art. 3104, 2025. DOI: 10.3390/rs17173104.

HU X., ASSAAD R. H. A BIM-enabled digital twin framework for real-time indoor environment monitoring and visualization by integrating autonomous robotics, LiDAR-based 3D mobile mapping, IoT sensing, and indoor positioning technologies. *Journal of Building Engineering*, v. 86, art. 108901, 2024. DOI: 10.1016/j.jobee.2024.108901.

JOSEPHS H., GONG J., WANG Y., XIA J. Urban Digital Twin-Based Decision Support for Housing Rebuilding Choices in Catastrophically Flooded Communities. In: *International Conference on Computing in Civil Engineering (i3CE)*, Montreal, Canada, 2024. DOI: 10.1061/9780784485248.001.

KAWAI Y., Construction and Application of Multi-Layered Urban Digital Twin Platform Integrating Open Data and 3D Visualization. In: *IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Osaka, Japan, pp. 1097-1101, 2025. DOI: 10.1109/GCCE65946.2025.11274856.

KAYNAK S., KAYNAK B., MERMER O., DEMIR I., City-scale digital twin framework for flood impact analysis: integrating urban infrastructure and real-time data analytics. *Urban Climate*, v. 64, art. 102640, 2025. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102640.

LAGAP U., GHAFARIAN S. Digital post-disaster risk management twinning: A review and improved conceptual framework. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 110, art. 104629, 2024. DOI: 10.1016/j.ijdr.2024.104629.

LE, N.; KARIMI, E.; RAHNEMOONFAR, M. 3DAeroRelief: The First 3D Benchmark UAV Dataset for Post-Disaster Assessment. *arXiv:2509.11097*, 2025.

LIANG J., LIU M., ZHANG Z., et al. Shortest path planning and dynamic rescue forces dispatching for urban flood disasters. *Sci Rep* 15, 23643, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-06374-2

POLUSHKO, V. et al. BlessemFlood21: Advancing Flood Analysis with a High-Resolution Georeferenced Dataset for Humanitarian Aid Support. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2024. IEEE, 2024. DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10642128.

RAHNEMOONFAR M., CHOWDHURY T., SARKAR A., VARSHNEY D., YARI M., MURPHY R., FloodNet: A High Resolution Aerial Imagery Dataset for Post Flood Scene Understanding. *IEEE Access*, v. 9, p. 89644-89654, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3090981.

RAHNEMOONFAR, M.; CHOWDHURY, T.; MURPHY, R. RescueNet: a high resolution UAV semantic segmentation dataset for natural disaster damage assessment. *Scientific Data*, v. 10, art. 913, 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-02799-4.

TOFFANIN, P., & WebODM Contributors. WebODM: User-friendly, commercial-grade software for processing aerial imagery, 2026. [Computer software]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3965771>.

ZLATANOVA S., STOTER J., ISIKDAG U. Standards for Exchange and Storage of 3D Information: Challenges and Opportunities for Emergency Response. In: *3D GeoInfo Conference*, Québec City, Canada, 2011.