

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

GEOTECNOLOGIAS E EMERGÊNCIA CLIMÁTICA:

MAPEAMENTO INTEGRADO DE ENCHENTES, RESÍDUOS E

VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL URBANA EM ALVORADA – RS

Pedro Godinho Verran¹; Marcos Wellausen Dias de Freitas²; Pedro Luis Santos da Silva³; Renan Pereira Antônio Maria⁴

Abstract: This study investigates the socio-environmental vulnerability to flooding and irregular solid waste disposal in the municipality of Alvorada (RS), Brazil, between 2015 and 2024. Using remote sensing techniques, geoprocessing, dasymetric mapping, and drone surveys, the most flood-prone areas and their overlap with critical waste disposal points were analyzed. Results reveal a significant expansion of the flood extent in 2024, with an increased number of directly affected people, especially in peripheral neighborhoods such as Umbu, Salomé, and Onze de Abril. Between 2010 and 2020, irregular waste disposal sites increased by 83.7%, with the Umbu macrozone standing out, where the surroundings of the Águas Belas Stream became the municipality's area of greatest socio-environmental vulnerability. After the removal of families from risk areas, no public actions were taken to preserve the vacated zones, which became occupied by solid waste. The study highlights the relationship between unplanned urbanization, lack of sanitation, and the intensification of climate change effects. It advocates updating the Municipal Integrated Solid Waste Management Plan with a focus on adaptation and mitigation actions, as well as expanding the mapping of the urban hydrographic network. The study concludes that the integrated use of geospatial technologies is essential for identifying critical areas, estimating affected populations, and supporting public policies aimed at urban resilience in the face of the climate emergency.

Resumo: Este estudo investiga a vulnerabilidade socioambiental a enchentes e ao descarte irregular de resíduos sólidos urbanos no município de Alvorada (RS), entre 2015 e 2024. Utilizando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento, mapas dasimétricos e mapeamento com drone, foram analisadas as áreas mais suscetíveis a inundações e a sobreposição com pontos críticos de descarte de resíduos. Os resultados revelam uma significativa ampliação da mancha de inundação em 2024, com aumento do número de pessoas diretamente afetadas, especialmente em bairros periféricos como Umbu, Salomé e Onze de Abril. Entre 2010 e 2020, os focos de descarte irregular aumentaram 83,7%, com destaque para a Macrozona Umbu, onde o entorno do Arroio Águas Belas se tornou a região de maior vulnerabilidade socioambiental do município. Após a remoção de famílias de áreas de risco, não houve ações públicas para preservar as áreas desocupadas, que foram ocupadas por resíduos sólidos. O estudo destaca a relação entre a urbanização desordenada, a ausência de saneamento e a intensificação dos efeitos das mudanças climáticas. Defende-se a atualização do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) com foco em ações de adaptação e mitigação, além da ampliação do mapeamento da rede hidrográfica urbana. Conclui-se que o uso integrado de tecnologias geoespaciais é fundamental para identificar áreas críticas, estimar populações afetadas e subsidiar políticas públicas voltadas à resiliência urbana frente à emergência climática.

Palavras-chave — Vulnerabilidade socioambiental; Enchentes; Geotecnologias.

¹Doutorando pelo Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto da UFRGS. E-mail: pedroverran@gmail.com

²Professor Adjunto do Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto da UFRGS. E-mail: marcoswfreytas@gmail.com

³Fiscal Ambiental da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Alvorada-RS. E-mail: fiscalizacaosmam@gmail.com

⁴Estagiário da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Alvorada-RS. E-mail: fiscalizacaosmam@gmail.com

INTRODUÇÃO

A recente enchente histórica que assolou quase todo o território do Rio Grande do Sul nos revelou a real dimensão de algo que os cientistas ambientais vêm alertando há décadas: nosso planeta já entrou em um cenário de emergência climática, fato que exige mudanças drásticas em nosso modo de viver nas cidades. Nesse sentido, os eventos meteorológicos da última década têm mostrado que os eventos climáticos extremos devem se tornar cada vez mais frequentes, considerando que, entre 2023 e 2024, o Rio Grande do Sul foi palco de grandes volumes de chuva, que literalmente varreram cidades inteiras do mapa devido à força das águas.

Nesse contexto, Sy *et al.* (2023) preveem um crescimento no impacto dos riscos de inundações em razão do aumento populacional, da urbanização, das intervenções antrópicas e das mudanças climáticas. Nessa linha, Weday *et al.* (2022) ressaltam a relevância de identificar áreas suscetíveis e de riscos hidrológicos por meio de tecnologias geoespaciais.

Dentre as diretrizes da Política Nacional de Mudança do Clima (PNMC), podemos citar “a promoção e o desenvolvimento de pesquisas científico-tecnológicas, e a difusão de tecnologias, processos e práticas orientados a identificar vulnerabilidades e adotar medidas de adaptação adequadas” (Lei Federal 12.187/2009, Art. 5, VI, c), fato que destaca a importância do desenvolvimento de instrumentos de análise territorial para a formulação de políticas públicas climáticas.

A partir do mapeamento das inundações, torna-se viável desenvolver modelos que permitam compreender a dinâmica das enchentes, os quais servirão como base para políticas públicas, ações de emergência/evacuação, estimativas de danos e transferência de recursos (KOBAYASHI *et al.*, 2019). Dessa forma, é possível delimitar áreas de risco, otimizando a aplicação de recursos públicos no planejamento (HORA & GOMES, 2009).

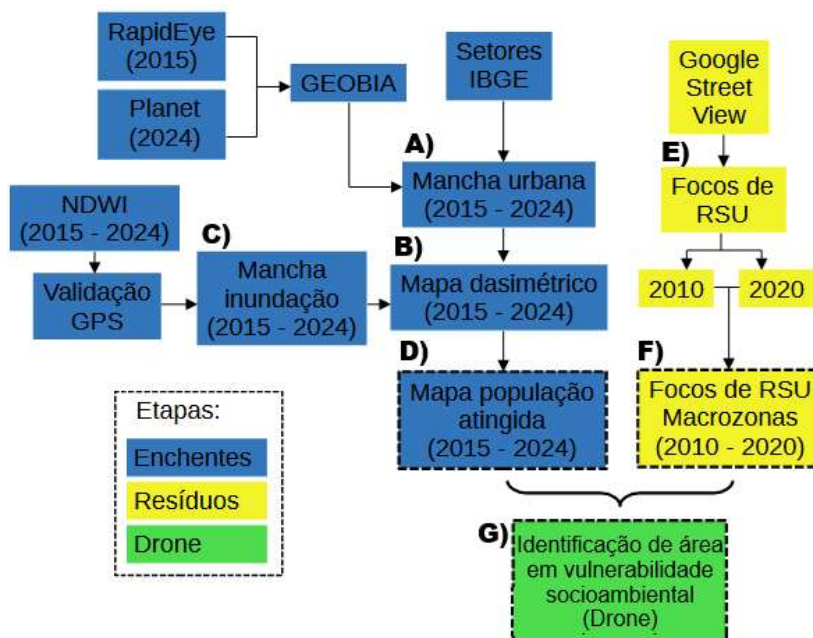
Nos centros urbanos, um dos principais impactos sobre os recursos hídricos é a deficiência nos sistemas de saneamento básico. A ausência de serviços adequados resulta no despejo de esgoto não tratado nos cursos d’água e no acúmulo de resíduos sólidos, comprometendo a qualidade das águas superficiais e subterrâneas (TUCCI, 2008).

Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho é realizar a identificação das áreas de maior vulnerabilidade a riscos de inundação, buscando uma interface com os pontos de descarte irregular em vias públicas em Alvorada. Para isso, o trabalho foi dividido em três etapas metodológicas: utilização de imagens de sensoriamento remoto para o mapeamento da mancha de inundação; uso de ferramentas de geoprocessamento para a identificação dos pontos de descarte irregular de resíduos sólidos urbanos (RSU); e identificação por drone de uma área em condição de vulnerabilidade socioambiental elevada.

MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da Figura 1 resume as etapas metodológicas necessárias para o desenvolvimento da presente pesquisa. Conforme a legenda do fluxograma, a pesquisa foi realizada em três etapas: mapeamento da enchentes (azul); mapeamento do resíduos sólidos urbanos (amarelo); mapeamento por drone (verde).

Fluxograma metodológico (Figura 1).



Mapeamento das enchentes

A) Mancha urbana (2015–2024): Aplicou-se o método de análise orientada a objetos geográficos (GEOBIA) para a classificação das imagens de alta resolução (RapidEye em 2015 e Planet em 2024), com o objetivo de gerar as áreas urbanizadas no período analisado. A principal característica da GEOBIA é sua segmentação multirresolução e organização hierárquica, o que a aproxima do conceito de mapeamento integrado da paisagem (FREITAS, 2013). Dessa forma, oferece-se um método adequado e automatizado para a análise de imagens de alta resolução espacial, descrevendo a realidade da imagem com base em características espectrais, texturais, espaciais e topológicas (LANG & BLASCHKE, 2008). Nesse método, o nível de abstração deixa de ser o pixel e passa a ser o objeto, formado por agregados de pixels espacialmente próximos e com características similares (ANTUNES, 2015).

B) Mapa dasimétrico (2015–2024): Realizou-se a sobreposição da área urbanizada, gerada na etapa anterior, com os dados populacionais do IBGE em nível de setores censitários (2010 e 2022), para a geração dos mapas dasimétricos correspondentes. Sobre o método dasimétrico, Silveira & Kawakubo (2013) destacam que apenas as áreas efetivamente habitadas são consideradas no cálculo da densidade demográfica, sendo que as informações sobre uso da terra são extraídas de fontes complementares e, posteriormente, combinadas com os dados do censo demográfico por meio de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

C) Mancha de inundação (2015–2024): Para a geração da mancha de inundação de 2015, utilizou-se uma imagem RapidEye de setembro daquele ano. Para a enchente de 2024, utilizou-se uma imagem Planet de maio. Em ambas as imagens, aplicou-se o NDWI, conforme proposto por McFeeters (1996), o que permitiu identificar as ruas com acúmulo de água proveniente das enchentes. Por fim, os dados coletados em campo com GPS foram utilizados para a validação dos polígonos de inundação.

D) Mapa da população atingida (2015–2024): Sobrepueram-se os polígonos vetoriais dos mapas dasimétricos (2015 e 2024) com os vetores das manchas de inundação (2015 e 2024). A

partir dessa sobreposição, foi possível estimar o número total de pessoas diretamente residentes nas áreas atingidas pelas inundações no período em análise.

Mapeamentos dos resíduos sólidos urbanos

E) Identificação dos focos de RSU (2010–2020): Os focos de resíduos sólidos urbanos (RSU) foram mapeados por meio do Google Street View, a partir da navegação pelas vias do município de Alvorada nos anos de 2010 e 2020. Cada ponto identificado recebeu um marcador com suas respectivas coordenadas geográficas.

F) Mapeamento dos focos de RSU por Macrozona (2010–2020): Os focos de RSU identificados foram agrupados por Macrozona, possibilitando a geração de indicadores para o monitoramento dos descartes irregulares na escala municipal.

Mapeamentos por drone

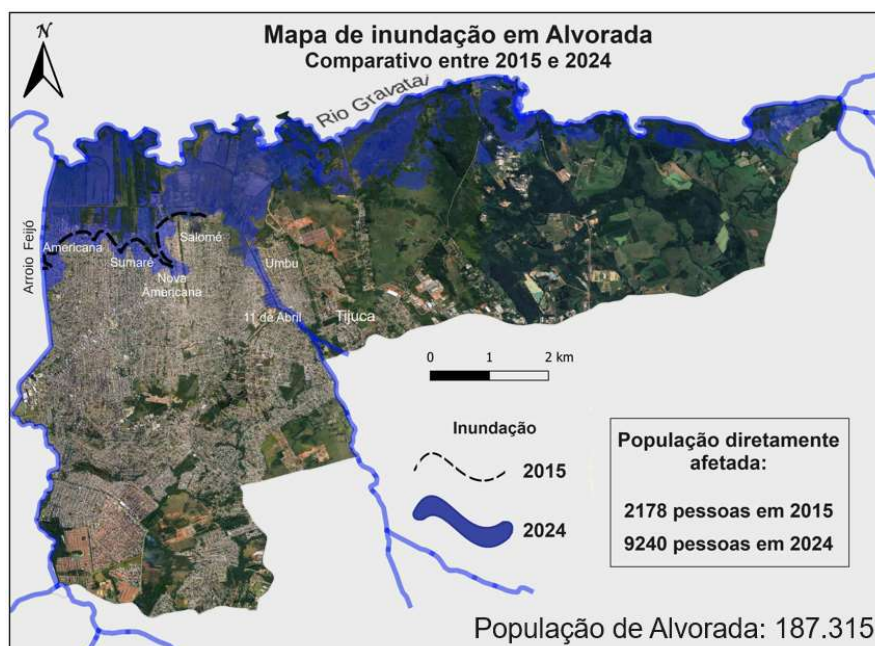
G) Mapeamento dos recursos hídricos: Inicialmente, optou-se por realizar o mapeamento com drone do arroio que atravessa a área urbana da Macrozona que apresentou o maior aumento no volume de resíduos sólidos urbanos (RSU) descartados irregularmente em vias públicas. Para isso, foi utilizado um drone do tipo *DJI Mavic 3 Classic*. O objetivo foi analisar a possível relação entre esse descarte e a intensificação dos impactos das enchentes no município, com a finalidade de identificar uma área em nível de vulnerabilidade socioambiental elevado. Como perspectiva futura, pretende-se ampliar essa metodologia para o mapeamento de todos os recursos hídricos urbanos do município.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Enchentes

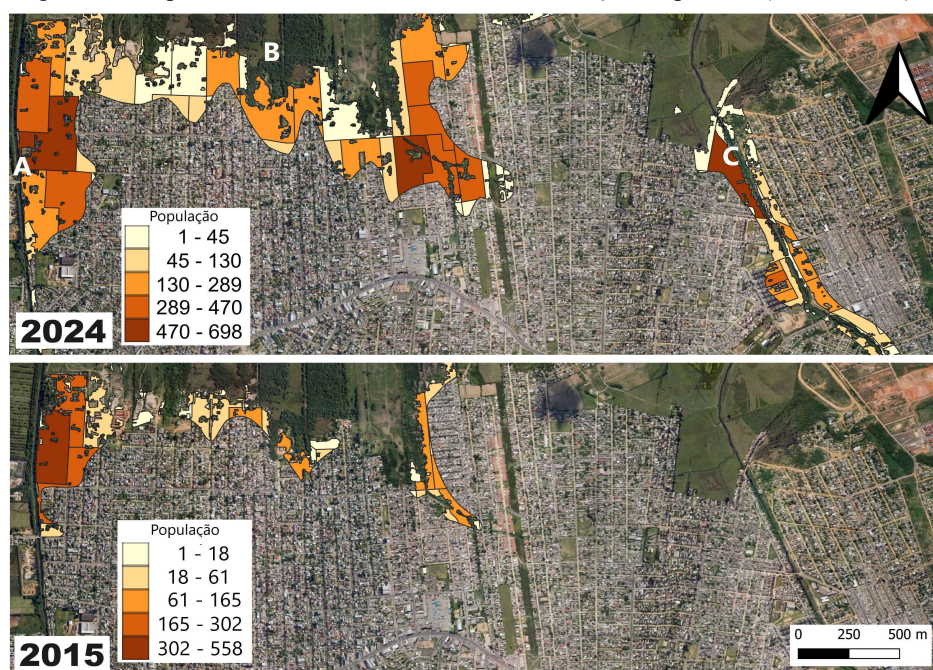
Em Alvorada, a mancha de inundação de 2024 apresentou uma expansão significativa em relação a 2015, afetando não apenas os bairros Americana, Sumaré e Nova Americana, mas também Salomé, Condomínio Onze de Abril, Tijuca e Umbu. O número de pessoas diretamente atingidas aumentou de 2.178 em 2015 para 9.240 em 2024 (Figura 2).

Figura 2 – Mapa da inundação em Alvorada.



Uma análise mais detalhada, por meio da sobreposição dos mapas dasimétricos com as manchas de inundação de 2015 e 2024, indica de forma clara que a incidência de eventos meteorológicos extremos vem afetando, de maneira cada vez mais intensa, a população residente nas áreas de maior vulnerabilidade socioambiental — especialmente nas proximidades do Arroio Feijó (A), da planície de inundação do Rio Gravataí (B) e do Arroio Águas Belas (C). Enquanto, em 2015, as inundações se concentraram principalmente no bairro Americana, na enchente de 2024 houve não apenas um aumento expressivo da população diretamente afetada nesse bairro, como também a inclusão dos bairros Sumaré, Nova Americana, Salomé, Umbu, Onze de Abril e Tijuca entre os mais atingidos (Figura 3).

Figura 3 – Mapas dasimétricos das manchas de inundação no período (2015 – 2024).

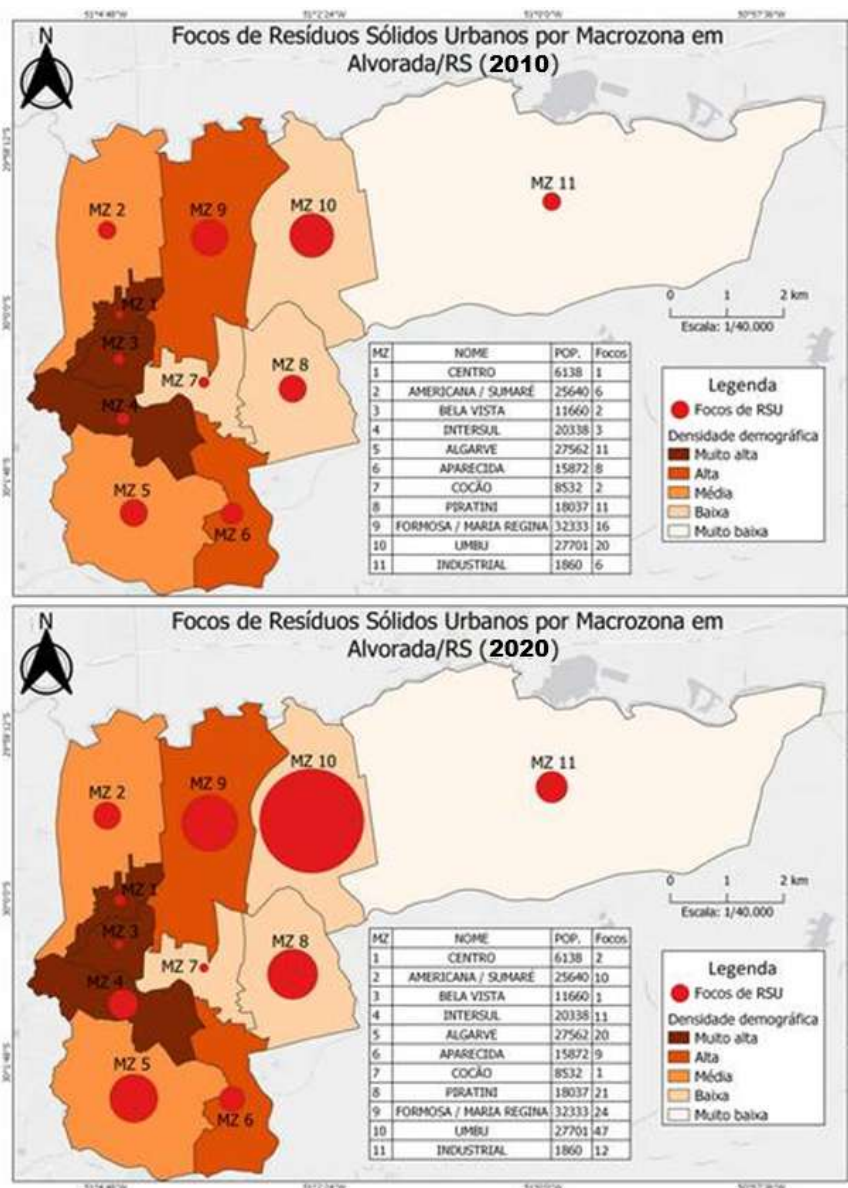


Nesse sentido, cabe ao poder público a formulação de políticas públicas voltadas ao enfrentamento dos fenômenos meteorológicos extremos em áreas urbanas, articuladas com práticas de gestão socioambiental do território. Para tanto, a classificação de imagens de alta resolução, combinada com técnicas de desagregação de dados demográficos — como o método dasimétrico — oferece instrumentos eficazes de gestão territorial em escala local, com potencial para estimar rapidamente, e a baixo custo, a população diretamente afetada. Uma das principais vantagens do uso dessas técnicas é a possibilidade de quantificar com maior precisão o número de pessoas atingidas, fornecendo dados mais confiáveis para o desenvolvimento de ações emergenciais e para a alocação de recursos públicos.

Resíduos

Entre 2010 e 2020, os focos de resíduos em Alvorada aumentaram de 86 para 158 (crescimento de 83,7%), contrariando a meta do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), que prevê a erradicação desses pontos até 2033. A maior concentração foi registrada nas Macrozonas 8, 9 e 10, com destaque para o bairro Umbu (MZ 10), onde se identificou uma faixa crítica de descarte irregular ao longo da margem direita do Arroio Águas Belas (Figura 4).

Figura 4 – Focos de resíduos sólidos por Macrozona em 2010 e em 2020.



Conforme ilustrado no mapa de concentração de resíduos sólidos urbanos (RSU) da Macrozona Umbu (Figura 5), observou-se um aumento de 20 para 47 pontos de descarte irregular. A maior concentração desses focos ocorreu às margens do Arroio Águas Belas, cujas bordas passaram por um processo de desocupação de ocupações irregulares em 2016, por determinação do Ministério Público. Diante disso, foi selecionada a seção do Arroio Águas Belas que atravessa a área urbana da Macrozona Umbu para a realização de um mapeamento em maior nível de detalhamento, utilizando drone (Figura 6).

Figura 5 – Focos de resíduos sólidos na Macrozona Umbu em 2010 e em 2020.

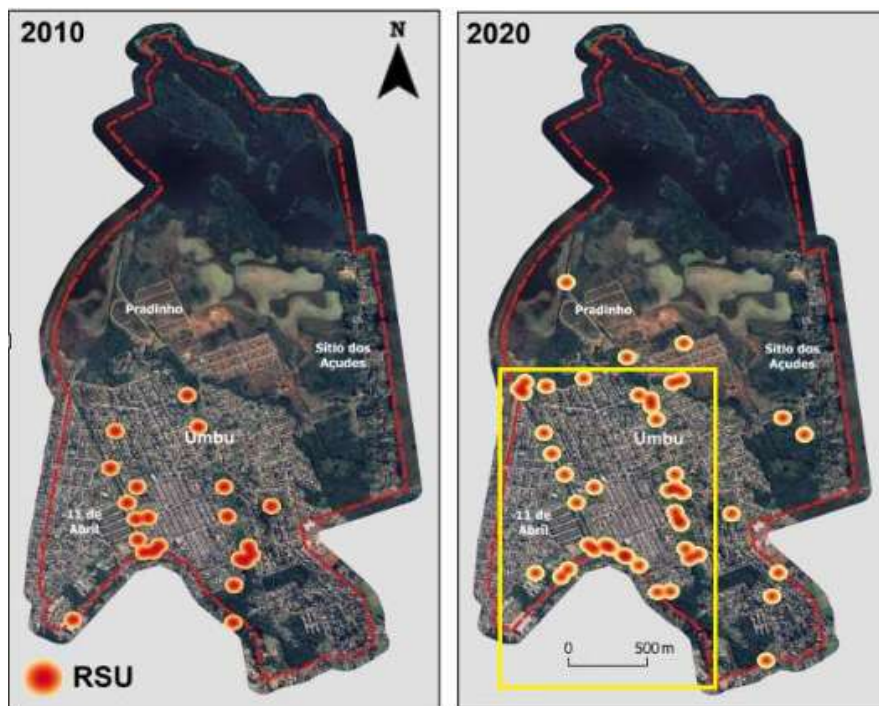
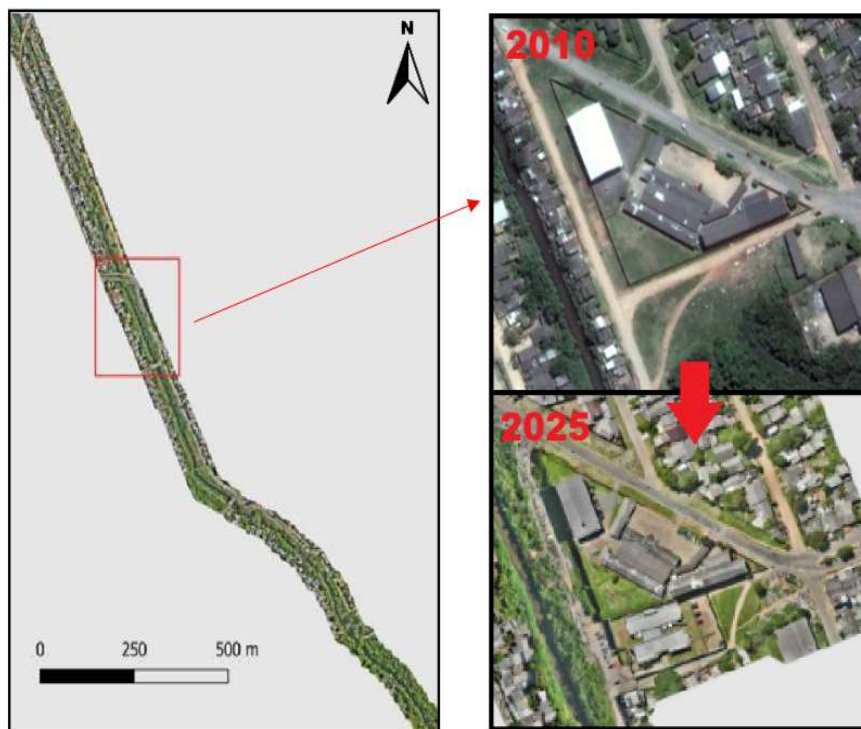


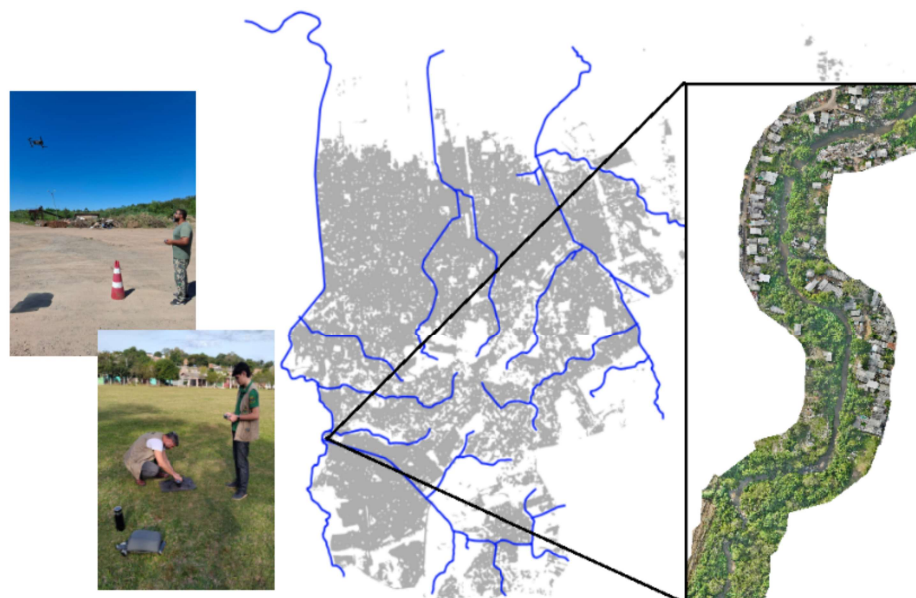
Figura 6 – Mapeamento por drone do Arroio Águas Belas (esquerda) e análise comparativa do aumento descarte de RSU no entorno da Escola Municipal Normélio entre 2010 e 2025 (esquerda).



O mapeamento com drone permitiu identificar, com alto nível de detalhamento, a presença de numerosas residências em áreas de ocupação irregular às margens do Arroio Águas Belas, sendo o trecho mais crítico aquele situado nas proximidades da Escola Municipal Normélio. Em 2016, por determinação do Ministério Público, iniciou-se o processo de desapropriação das famílias residentes na margem direita do arroio, por se tratar de uma Área de Preservação Permanente (APP). Embora essas famílias tenham sido realocadas para um conjunto habitacional no mesmo bairro, não houve planejamento público voltado à proteção da área desocupada, que permaneceu vulnerável do ponto de vista socioambiental.

Pouco tempo após a remoção, teve início o descarte irregular de resíduos sólidos urbanos, agravado pelo acúmulo de outros tipos de lixo, o que transformou o local em uma área de despejo. As imagens apresentadas na Figura 6 evidenciam esse processo: em 2010, a rua aparece sem resíduos; já em 2025, observa-se a formação de um grande foco de lixo. Atualmente, este é o principal ponto de acúmulo de resíduos sólidos na área urbana de Alvorada, tornando o entorno da escola a região de maior vulnerabilidade socioambiental do município.

Figura 7 – Perspectivas futuras de mapeamento por drone de todos os recursos hídricos urbanos de Alvorada.



Diante disso, os resultados apontam para a necessidade de atualização do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), com foco em ações de adaptação e mitigação aos efeitos das mudanças climáticas em escala local. A pesquisa propõe o mapeamento sistemático da rede hidrográfica urbana, com o objetivo de analisar a qualidade ambiental dos arroios e subsidiar o planejamento da gestão de resíduos sólidos, diante do aumento das enchentes e da disposição irregular de resíduos.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam uma intensificação significativa da vulnerabilidade socioambiental no município de Alvorada entre os anos de 2015 e 2024, especialmente em função da ampliação da área atingida por inundações e do crescimento no número de pessoas diretamente impactadas. A expansão da mancha de inundação em 2024, que passou a afetar bairros anteriormente não atingidos, como Salomé, Umbu e Onze de Abril, revela o agravamento dos efeitos das mudanças climáticas em áreas urbanas periféricas e reforça a urgência da adoção de estratégias de planejamento territorial voltadas à mitigação de desastres naturais.

A análise integrada entre os focos de descarte irregular de resíduos sólidos urbanos e as áreas sujeitas a alagamento revelou uma correlação direta entre a ocupação desordenada das margens dos cursos d'água e o acúmulo de resíduos em regiões ambientalmente sensíveis. O caso do Arroio Águas Belas, na Macrozona Umbu, ilustra como a ausência de políticas públicas de proteção e recuperação ambiental após a remoção de famílias em áreas de risco favoreceu o surgimento de um novo passivo ambiental: o despejo sistemático de resíduos em Áreas de Preservação Permanente, agravando os impactos das inundações.

A partir do uso integrado de tecnologias como o sensoriamento remoto, o geoprocessamento, a cartografia dasimétrica e o mapeamento por drone, este estudo demonstra o potencial dessas ferramentas para a identificação de áreas críticas e para a estimativa da população diretamente afetada por eventos extremos. Tais instrumentos oferecem subsídios relevantes à formulação de políticas públicas, como a revisão do PMGIRS e a adoção de medidas adaptativas frente à emergência climática. A continuidade e ampliação dessas metodologias representam uma contribuição decisiva para a construção de um modelo de gestão urbana mais resiliente, inclusivo e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS

- ALVORADA. *Plano Municipal de Saneamento Básico*. Alvorada/RS, 2013.
- ANTUNES, A. L. S. et al. *Abordagens em GEOBIA e aplicação da técnica em imagem RapidEye de uma área da bacia do rio Pitangui* – PR. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 5., 2014, Campo Grande. *Anais [...]*. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2014. p. 631–634. Disponível em: <https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2014/cd/p101.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/12187.htm. Acesso em: 7 jul. 2024.
- FREITAS, M. W. D. de; SANTOS, J. R. *Zoneamento hierárquico da paisagem nos domínios da Bacia do Rio Uruguai*. *Sociedade & Natureza*, v. 26, n. 2, p. 287–300, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/1982451320140207>.
- HORA, S. B. da; GOMES, R. L. *Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA*. *Sociedade & Natureza*, v. 21, n. 2, p. 57–75, 2009.
- KOBAYASHI, K. et al. *Catalogue of Hydrologic Analysis for Asia and the Pacific: Volume 1 – Flood Hazard Mapping*. v. 1, 106 p., 2019.
- LANG, S.; BLASCHKE, T. *Análise da Paisagem com SIG*. Tradução de Hermann Kux. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 423 p.
- SILVEIRA, L. P.; KAWAKUBO, F. S. *Mapa dasimétrico da densidade demográfica de Poços de Caldas (MG) utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. *Anais [...]*. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 999–1005. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1192.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- SY, H. M. et al. *Urban flood risk assessment using Sentinel-1 on the Google Earth Engine: a case study in Thai Nguyen City, Vietnam*. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 31, 2023, Art. 100987. ISSN 2352-9385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100987>.
- TUCCI, C. E. M. *Águas urbanas*. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.
- WEDAY, M. A.; TABOR, K. W.; GEMEDA, D. O. *Flood hazards and risk mapping using geospatial technologies in Jimma City, southwestern Ethiopia*. *Heliyon*, v. 9, 2023, Art. e14617. ISSN 2405-8440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14617>.