Integração geodésica entre sensor de nível e dados LiDAR para simulação de inundações urbanas

Geodetic integration between a level sensor and a LiDAR topographic model for urban flood simulation

Gabriele Francis Dezoune)[1]

Alexandre Bernardino Lopes[2]

Rogério Rodrigues de Vargas3

RESUMO: As inundações tornam-se cada vez mais recorrentes devido à expansão urbana desordenada, causando severos prejuízos socioambientais e demandando intervenções ágeis do poder público. Este trabalho apresenta o Projeto Risco, um sistema de alerta e previsão de inundações baseado na integração automatizada de infraestrutura geodésica, sensores Internet of Things (IoT) e modelos topográficos de alta resolução derivados de tecnologia LiDAR. A área de estudo compreende o bairro Jardim Guaraituba, em Paranaguá (PR), caracterizado por relevo plano e influência estuarina. O rigor metodológico baseia-se na estrita vinculação do sensor de medição de nível ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). O fluxo de trabalho foi estruturado no rastreio GNSS (Posicionamento por Ponto Preciso) para implantação de marco geodésico de apoio e no transporte de altitude geométrica e normal para o referencial zero do equipamento por meio de nivelamento geométrico. Essa estruturação altimétrica viabilizou o cálculo preciso da cota da lâmina d'água e sua compatibilização espacial com a nuvem de pontos LiDAR (referenciada ao SIRGAS2000). Os resultados originaram uma plataforma tecnológica que compila métricas de maré, previsão meteorológica e nível da água em tempo real, permitindo aos usuários simular manchas de inundação e receber alertas automatizados. Conclui-se que a precisão altimétrica alcançada provê subsídios técnicos não apenas para as ações de resposta da Defesa Civil, mas integra-se diretamente ao Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM), qualificando a identificação de parcelas vulneráveis e o planejamento urbano em áreas de risco costeiro.

Palavras-chave: : Inundação Urbana; Levantamento LiDAR; IoT; Cadastro Territorial Multifinalitário.

ABSTRACT: Floods are becoming increasingly frequent due to disorganized urban expansion, causing severe socio-environmental damage and demanding agile interventions from public authorities. This paper presents the Risco Project, an early warning and flood forecasting system based on the automated integration of geodetic infrastructure, Internet of Things (IoT) sensors, and high-resolution topographic models derived from LiDAR technology. The study area comprises the Jardim Guaraituba neighborhood in Paranaguá (PR), characterized by flat relief and estuarine influence. The methodological rigor is based on the strict linkage of the water level sensor to the Brazilian Geodetic System (SGB). The workflow was structured around GNSS tracking (Precise Point Positioning) for the implementation of a geodetic control mark, followed by the transfer of geometric and normal altitude to the equipment's zero reference via geometric leveling. This altimetric structuring enabled the precise calculation of the water level elevation and its spatial compatibility with the LiDAR point cloud (referenced to SIRGAS2000). The results led to a technological platform that compiles tide metrics, weather forecasts, and real-time water levels, allowing users to simulate flood extents and receive automated alerts. It is concluded that the altimetric precision achieved provides technical support not only for Civil Defense response actions but also integrates directly into the Multipurpose Territorial Cadastre (CTM), qualifying the identification of vulnerable

[1] Universidade Federal do Paraná - Campus Pontal do Paraná - CEM / E-mail (francisdezounet@ufpr.br)

[2] Universidade Federal do Paraná - Campus Pontal do Paraná - CEM / E-mail (ablopesrp@ufpr.br)

[3] Universidade Federal do Paraná - Campus Pontal do Paraná - CEM / E-mail (rogeriovargas@ufpr.br)

land parcels and urban planning in coastal risk areas.

Keywords: Urban Flooding; Geodesy; LiDAR Surveying; IoT; Multipurpose Territorial Cadastre.

1 INTRODUÇÃO

Segundo TONETTI *et al.* 2013, fontes de água doce sempre foram importantes, historicamente, para o desenvolvimento das civilizações, assim, a expansão urbana sempre esteve próxima às margens de rios. Dessa forma, o crescimento acelerado e desordenado de cidades impactou no aumento da taxa de impermeabilização do solo e alterou a vazão natural de rios, principalmente em eventos de precipitação intensa. Por consequência, esses fatores acarretam na diminuição dos espaços de infiltração e aumento de áreas suscetíveis a inundações e enchentes. Além da impermeabilização do solo, a ocupação de área de várzeas e a deficiência da infraestrutura de drenagem são fatores que intensificam esse problema, resultando em prejuízos econômicos, sociais e ambientais (Tucci, 2005).
Nesse contexto, o aumento da vulnerabilidade, principalmente de áreas mais carentes, a eventos hidrológicos extremos já é uma realidade, e necessita de uma gestão territorial especializada. O município de Paranaguá é caracterizado por apresentar sérios problemas de drenagem das águas pluviais (TONETTI, 2013) além de ser uma cidade costeira, estando sujeita à influência de maré.

Para isso, as geotecnologias têm se destacado como uma ferramenta eficiente para análise espacial e monitoramento de inundações. O uso do sensoriamento remoto, Modelos Digitais de Terreno (MDT) e levantamentos topográficos georreferenciados permitem compreender a dinâmica do relevo, da drenagem e seu escoamento superficial. Além disso, as geotecnologias desempenham um papel fundamental na organização e análise de dados espaciais, permitindo que diferentes informações territoriais sejam integradas em uma mesma base de dados georreferenciada (Câmara et al., 2001).

Tradicionalmente, o monitoramento do nível de rios e estuários é realizado com equipamentos de medição *in situ* que, quando isolados, fornecem apenas dados pontuais relativos. Para que essas réguas e sensores subsidiem o planejamento urbano em larga escala, é imperativo que suas medições sejam rigorosamente vinculadas a um sistema geodésico de referência espacial absoluto. Essa integração geodésica garante a compatibilização altimétrica entre a lâmina d'água e a topografia do terreno, permitindo modelagens de alta acurácia. Nesse cenário, o uso de sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) embarcados em Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) destaca-se por fornecer Modelos Digitais de Terreno (MDT) de precisão centimétrica. A fusão desses dados espaciais qualifica diretamente o Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM), pois converte a simulação hidrológica em um indicador geométrico capaz de identificar exatamente quais parcelas, lotes e benfeitorias estão sob risco, instrumentalizando as políticas públicas de Defesa Civil e ordenamento territorial (LOCH, 2005).

A importância de relacionar as medições do nível da água a uma referência altimétrica

conhecida está na necessidade de estabelecer uma referência espacial absoluta, o que permite a comparação sistemática e homogênea de dados coletados em diferentes épocas, missões e localizações globais.

O levantamento planialtimétrico para o monitoramento de inundações pode ser eficaz e com precisão utilizando a tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*). O LiDAR mapeia e mede superfícies a partir da emissão de feixes de luz laser. Segundo Graça (2020), a fotogrametria, mais recentemente com novos algoritmos de processamento de dados e plataformas não-tripuladas, bem como outras técnicas de mensuração, como sistemas de varredura a laser, vem contribuindo para a aquisição de dados tridimensionais, como resultado, essas novas tecnologias permitem a modelagem e construção de modelos físicos da realidade em três dimensões.

Para tanto, o levantamento por drones com sensores LiDAR embarcados, podem derivar produtos pós processados de alta acurácia planimétrica e altimétrica. Tais produtos, que podem ser MDT e Modelos Digitais de Superfície (MDS), podem subsidiar estudos de previsão e suscetibilidade à inundação, auxiliando diretamente na gestão pública. Neste contexto, o presente trabalho apresenta o Projeto Risco, uma iniciativa que busca superar as limitações do monitoramento hidrológico convencional através da automatização e transformação digital. Ao integrar Geodésia, sensores IoT a modelos topográficos gerados por tecnologia LiDAR, o sistema viabiliza simulações tridimensionais dinâmicas de inundação. A gestão de risco de inundações e mapeamento de áreas suscetíveis a inundações tem vínculo direto ao Cadastro Territorial Multifinalitário, pois traz mais uma variável para compor o cadastro e direcionar políticas públicas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A integração de dados oriundos de sensores de nível d'água com nuvens de pontos obtidas por perfilamento a laser (LiDAR) pressupõe a compatibilização de referenciais de altitude. Essa compatibilização exige rigorosa estruturação geodésica, que perpassa o posicionamento espacial absoluto e o transporte da altitude para o sensor e por sua vez à cota de água.

2.1. Posicionamento GNSS Absoluto e o Referencial Altimétrico no SGB

O estabelecimento da infraestrutura de referência local para o levantamento integrado tem como premissa a implantação de um marco geodésico de apoio, cujas coordenadas são determinadas por rastreio GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em modo absoluto (como, por exemplo, o Posicionamento por Ponto Preciso – PPP). Essa etapa materializa o referencial coordenado tridimensional compatível com o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000). O emprego do GNSS, contudo, fornece a altitude elipsoidal (ou geométrica, *h*), uma grandeza estritamente matemática referenciada à superfície do elipsoide GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*), desprovida de significado físico (Gemael, 1999). Em cada ponto de apoio também é determinada a altitude normal (H^N) por meio do modelo de superfície de conversão atualizado do IBGE, o hgeoHNOR2020, cujo fator de

correção é representado por ζ. Diferente de um modelo geoidal ou quase-geoidal puro, o hgeoHNOR2020 atua como uma ferramenta prática de conversão das altitudes geométricas obtidas pelo GNSS em altitudes normais, sendo $H^N = h-\zeta$ (REALT-2018).

2.2. Nivelamento e Contranivelamento Geométrico para Vinculação do Sensor de Nível

Sensores medidores de coluna de água (tais como linígrafos, marégrafos ou piezômetros) registram variações altimétricas relativas a uma origem física local, denominada cota zero do instrumento. Para que as séries temporais ou perfis do nível d'água sejam integrados a um modelo espacial absoluto, essa cota relativa precisa ser transformada em uma altitude geométrica e/ou normal, inserindo o sensor no referencial do SGB. Esse transporte é realizado por meio do nivelamento geométrico de alta precisão. O nivelamento geométrico é o método de maior exatidão para a determinação de desníveis, fundamentado na leitura de miras verticais a partir de um plano de visada estritamente horizontal estabelecido pelo equipamento, enquanto o contranivelamento consiste na repetição imediata dessa mesma linha de levantamento no sentido inverso (da estação final de volta à inicial). Esse procedimento de via dupla atua como o principal mecanismo metodológico e matemático de controle de qualidade, sendo indispensável para anular ou mitigar a propagação de erros sistemáticos (como desvios de colimação do instrumento, refração atmosférica e curvatura terrestre) e para evidenciar a ocorrência de falhas grosseiras. A discrepância algébrica entre o desnível transportado no trajeto de ida e o mensurado na volta resulta no erro de fechamento altimétrico da seção, que deve obrigatoriamente respeitar limites estatísticos para validar o transporte de cotas. Nos nivelamentos realizados neste trabalho adotou-se um nivelamento com tolerância de $3mm\sqrt{K}$, onde *K é* a extensão total nivelada expressa em quilômetros.

2.3. Sistema LiDAR e a Natureza Geométrica das Nuvens de Pontos

Os levantamentos aéreos utilizando sensores LiDAR embarcados em Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), como o sistema DJI Zenmuse L2, resolvem a trajetória da plataforma de voo por meio de acoplamento direto entre receptores GNSS (operando em modo RTK ou PPK) e Unidades de Medida Inercial (IMU). A nuvem de pontos tridimensional gerada pelo escâner a laser é calculada a partir dos ângulos de varredura e das distâncias medidas pelos pulsos de retorno (tempo de voo), combinados com a posição e a atitude (*roll, pitch, yaw*) da aeronave a cada instante de emissão. Devido a essa base de posicionamento por satélites, a nuvem de pontos bruta e os modelos digitais (MDT/MDS) dela derivados são intrinsecamente gerados e exportados em altitude geométrica (h). Assim, a integração efetiva entre a cota d'água (usar apóstrofo reto, não crase) e os dados capturados pelo Zenmuse L2 ocorre por meio da compatibilização das superfícies. Uma vez que tanto a cota da água quanto os dados LiDAR estão, inicialmente, em altitude geométrica, ambas podem ser convertidas em altitudes normais.

2.4 Cadastro Territorial Multifinalitário e gestão de riscos como aplicação da metodologia

Segundo OLIANI (2016), o Cadastro Territorial é o inventário oficial e sistemático do município, baseado no levantamento dos limites de cada parcela (a unidade básica do cadastro, também chamada de lote). É definido como um registro público dos bens imóveis de uma determinada jurisdição, estruturado sob três aspectos fundamentais: o jurídico (direitos e posse), o geométrico (localização, forma e dimensões) e o econômico (valor venal para fins fiscais) (Erba, 2005). Uma vez que o cadastro é sistemático, exige atualizações metodológicas constantes para acompanhar as dinâmicas urbanas e ambientais, como as alterações nos limites das parcelas e as transformações no uso do solo, cursos hídricos e vegetação, garantindo que a base de dados reflita com precisão os espaços reais da cidade. Portanto, de acordo com Silva (2023), o cadastro passa a representar, por meio de seus registros, o arcabouço legal relacionado ao território, no que se refere aos direitos, obrigações, restrições e interesses sobre a terra.

Nesse contexto, a análise de riscos de inundações qualifica o Cadastro Territorial Multifinalitário ao integrar camadas de dados hidrológicos e geodésicos de alta acurácia. Essa integração é fundamental para a gestão urbana, pois permite que o poder público atue de forma preventiva no ordenamento do território, garantindo o desenvolvimento sustentável, a segurança habitacional e a eficiência das políticas públicas contra eventos extremos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

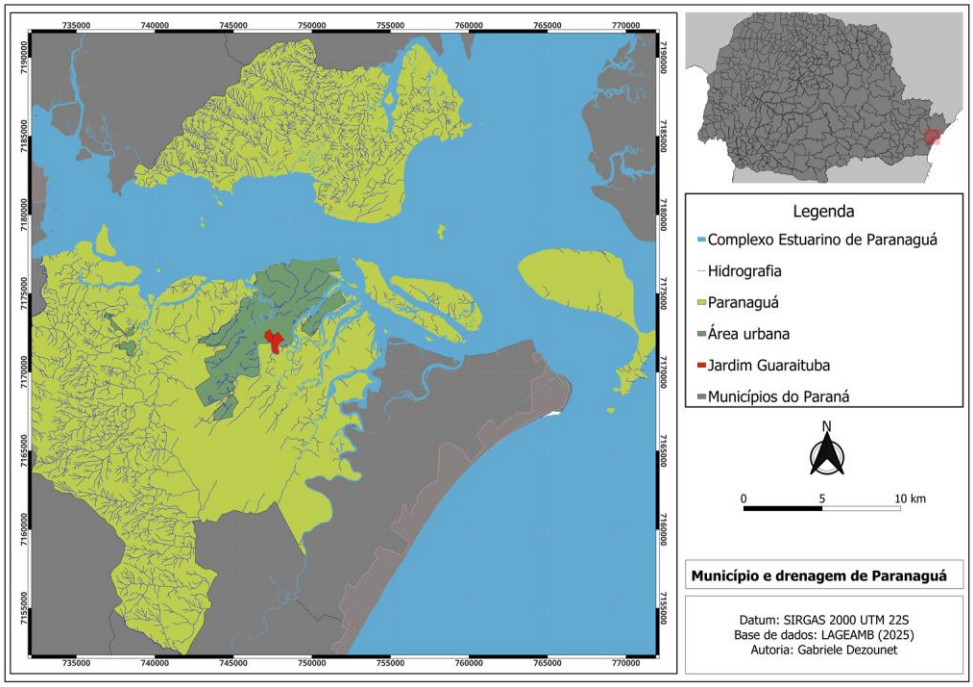
O bairro de Jardim Guaraituba (Paranaguá, PR) é um dos bairros inseridos na bacia hidrográfica do rio Itiberê (Faria, 2025), criado em 1970 e classificado como ocupação irregular, do tipo favela (PEHIS/PR-COHAPAR, 2023). Está situado no município de Paranaguá (PR) que possui área total de 826,65 km² e área urbana de 95,15 km². Segundo IPARDES 2020, a cidade possui 153.666 habitantes e densidade demográfica média de 188,32 habitantes/km², dessa forma, a área urbana concentra a metade da população dos sete municípios do litoral. Sua alta densidade demográfica limitou a expansão horizontal, já que a cidade é cercada por mangues e deu origens a projetos de verticalização para o planejamento urbano (TONETTI, 2011). A maior parte da população localiza-se às margens da Baía de Paranaguá e entre entre os rios Itiberê e Emboguaçu (Caneparo; Passos, 2005).

Situada na maior porção contínua da Floresta da Mata Atlântica, a cidade é caracterizada por ter um relevo suave, com apenas algumas elevações - como a porção distal da Serra do Mar - estando situada apenas a 5 metros acima do nível do mar (TONETTI, 2013). Compreende-se como uma das cidades banhadas pelo Complexo Estuarino de Paranaguá, que, dessa forma, está sujeita à influência da maré (Figura 1) a qual faz com que o aumento do nível das águas impeça o escoamento natural e se torne vulnerável no momento de chuvas intensas (de Souza, Francisco Xavier Da & Carmo, Marcio & Silva, 2022).

A escolha do bairro Jardim Guaraituba como área de estudo justifica-se por reunir características que o tornam representativo para a análise da influência da altimetria na suscetibilidade a inundações em ambientes urbanos costeiros. Inserido em uma planície estuarina de baixa altitude e sujeito à influência das marés, o bairro apresenta elevada vulnerabilidade à ocorrência de alagamentos, condição agravada pela ocupação irregular, pela elevada densidade construtiva e pelas limitações naturais ao escoamento superficial. Além disso, sua localização em uma área urbanizada de relevo predominantemente plano favorece a avaliação da sensibilidade dos modelos altimétricos e dos métodos de determinação de altitude, uma vez que pequenas diferenças altimétricas podem representar alterações significativas na

delimitação de áreas suscetíveis à inundação.

Figura 1 - Mapa do município e da drenagem de Paranaguá.



Fonte: Os autores.

3.2 METODOLOGIA

Para viabilizar a integração entre os perfis topográficos derivados do levantamento LiDAR e a superfície real do corpo hídrico, a metodologia foi estruturada em quatro etapas consecutivas. O fluxo de trabalho garante que o referencial local do sensor de nível seja rigorosamente vinculado ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), compatibilizando as altitudes geométrica (h) e/ou normal (H^N), possibilitando assim a simulação de inundação.

Etapa 1: Estabelecimento do Apoio Geodésico - A infraestrutura de referência local foi materializada pela instalação de um marco geodésico nas imediações da área de estudo, sobre o qual realizou-se o rastreio GNSS estático com duração de 2 horas. Para a determinação das coordenadas tridimensionais e da altitude geométrica (h) do vértice, optou-se pelo processamento dos dados brutos por meio do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), em detrimento do posicionamento relativo com ajustamento em rede vinculado à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Essa escolha metodológica justifica-se pelo fato de que, em áreas afastadas das estações de monitoramento contínuo, o incremento do comprimento das linhas de base no posicionamento relativo tende a degradar o transporte de coordenadas, especialmente na componente vertical. O PPP contorna essa limitação ao fornecer um posicionamento absoluto padronizado e espacialmente homogêneo, independente da distância em relação a estações base. O processamento em órbita final na área de estudo obteve precisão altimétrica de alta confiabilidade, resultando em um desvio-padrão de 0,007 m, valor estritamente compatível e superior à precisão esperada no modelo topográfico LiDAR utilizado.

Imediatamente após a obtenção da altitude geométrica, aplicou-se o modelo de superfície de conversão hgeoHNOR2020 para derivar a altitude normal correspondente.

Etapa 2: Transporte de Altitude por Nivelamento Geométrico **-** Para transferir o referencial do SGB para o instrumento de medição de nível, executou-se um nivelamento geométrico entre o marco geodésico implantado (Etapa 1) e o sensor. Esse procedimento determinou o desnível topográfico exato entre as duas feições, permitindo o transporte rigoroso das altitudes (geométrica e normal) para o "zero da régua" (ou cota de referência do sensor). O erro de fechamento do nivelamento e contra nivelamento entre o marco implantado e o zero do sensor foi de 1 mm, dentro da tolerância para o nivelamento topográfico Classe IIN (Alta precisão), cuja tolerância é de 1,90 mm.

Etapa 3: Determinação Altimétrica do Nível d'Água **-** Com o sensor devidamente georreferenciado e vinculado altimetricamente, a cota da lâmina d'água foi calculada a partir da relação geométrica direta entre a referência do equipamento e a superfície livre do fluido (1). A altitude da água (seja ela geométrica ou normal, dependendo do referencial adotado para a análise) foi definida pela seguinte equação:

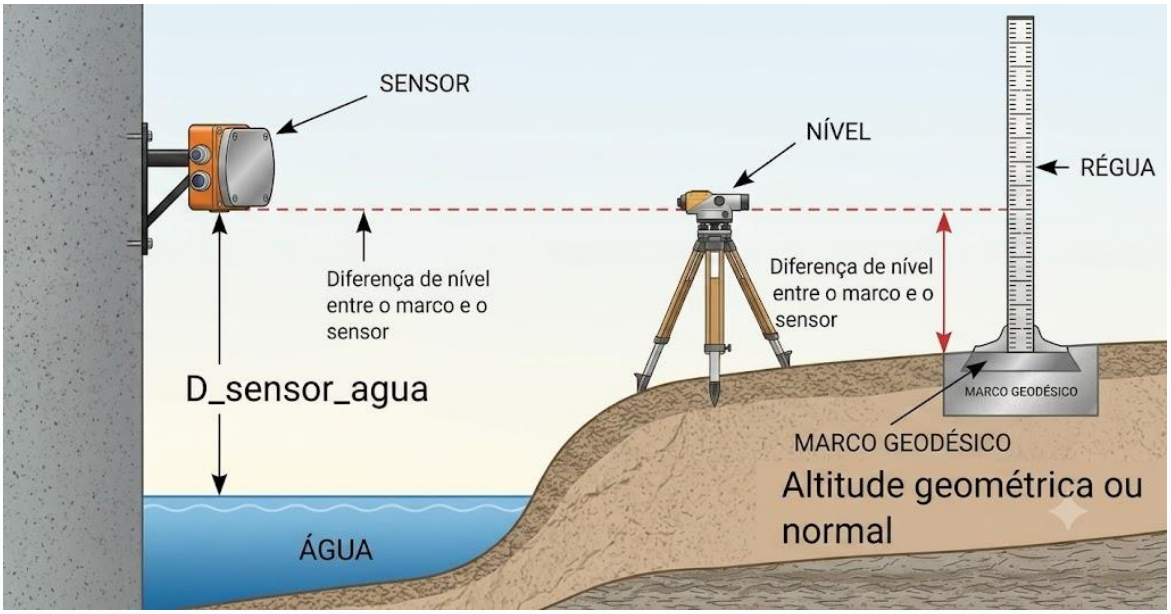
$$Altitude_{água} = Altitude_{marco} + DH_{(marco-sensor)} - D_{(sensor-agua)} \quad (1)$$

onde: $Altitude_{marco}$ e a Altitude (geométrica ou normal calculada) do marco geodésico; $DH_{(marco-sensor)}$ e a *di*ferença de nível transportada pelo nivelamento geométrico e $D_{(sensor-agua)}$ é a distância vertical medida instantaneamente entre o zero do sensor e a superfície da água.

Etapa 4: Levantamento e Processamento da Nuvem de Pontos (LiDAR) **-** A etapa final consistiu no mapeamento aéreo utilizando a Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) modelo Matrice 350 equipada com o sensor perfilador a laser Zenmuse L2, ambos da fabricante DJI. A solução de navegação e o controle de qualidade posicional da nuvem de pontos fundamentaram-se no acoplamento direto da Unidade de Medida Inercial (IMU) com o receptor GNSS da aeronave operando em modo RTK (Real-Time Kinematic). Essa técnica de georreferenciamento direto permitiu a determinação da trajetória com acurácia centimétrica, o que dispensou a necessidade de implantação de pontos de controle terrestres (GCPs - Ground Control Points) na área de estudo. O processamento dos dados brutos para a reconstrução da nuvem de pontos foi executado no software DJI Terra. Devido à natureza do posicionamento baseado em satélites, o modelo tridimensional é gerado e exportado nativamente referenciado em altitude geométrica (h) atrelada ao SIRGAS2000. Contudo, para viabilizar a modelagem hidrológica coerente, é imprescindível que os dados estejam referenciados a superfícies com significado físico. Para isso, procedeu-se ao cálculo das altitudes normais da nuvem de pontos através da aplicação do modelo de conversão oficial do IBGE (hgeoHNOR2020) sobre a componente vertical de cada ponto, replicando exatamente o critério adotado na vinculação do marco geodésico (Etapa 1). Por fim, com a topografia LiDAR e o referencial do sensor de nível

rigorosamente compatibilizados sob a mesma superfície altimétrica normal, a lâmina d'água simulada pôde ser sobreposta de forma matematicamente consistente, assegurando a extração de métricas de inundação exatas na zona de interface terra-água.

Figura 2 – Vinculação da cota d'água ao SGB.



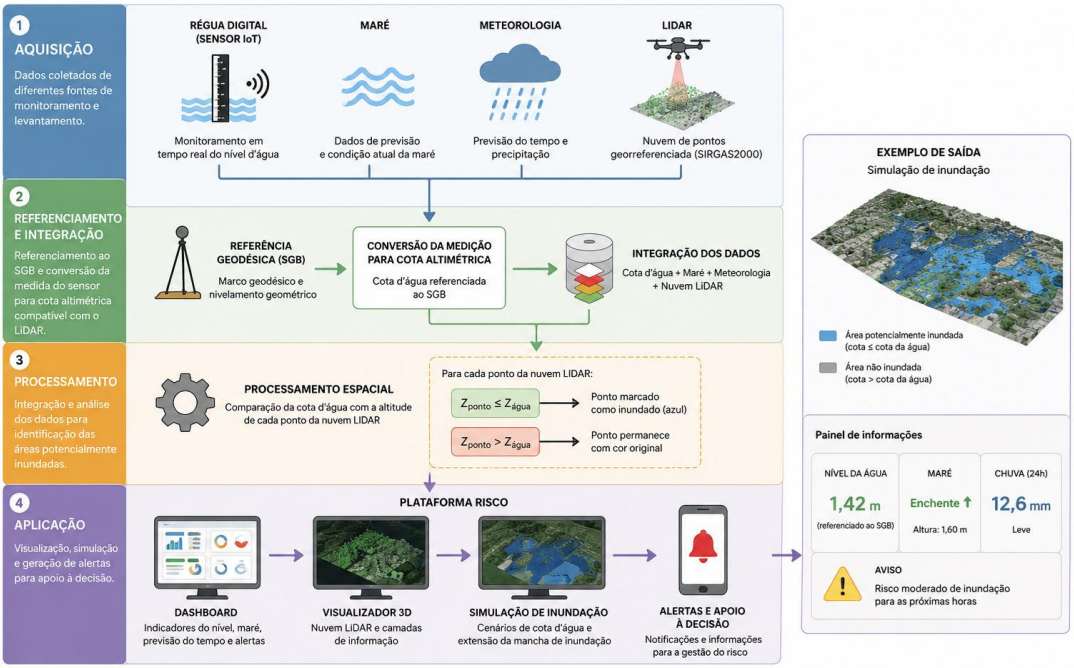
Fonte: Os Autores

3.3 DESENVOLVIMENTO E ARQUITETURA DA PLATAFORMA RISCO

A plataforma Risco foi desenvolvida para integrar, em um único ambiente, os dados provenientes da régua digital, informações de maré, previsão meteorológica e a nuvem de pontos LiDAR. O fluxo de processamento considera inicialmente o referenciamento da cota d'água ao Sistema Geodésico Brasileiro, permitindo sua compatibilização com as altitudes da nuvem LiDAR. A arquitetura funcional da plataforma, desde a aquisição dos dados até sua disponibilização ao usuário, é apresentada na Figura 3.

Na etapa de processamento espacial, a cota d'água é comparada com a altitude de cada ponto da nuvem LiDAR. Os pontos cuja altitude é igual ou inferior à cota definida são destacados em azul, representando áreas potencialmente inundadas. O resultado é disponibilizado em um ambiente visual que reúne painel de indicadores, visualização tridimensional e simulação de cenários, facilitando a interpretação dos dados e o apoio à tomada de decisão.

Figura 3 - Arquitetura funcional da plataforma

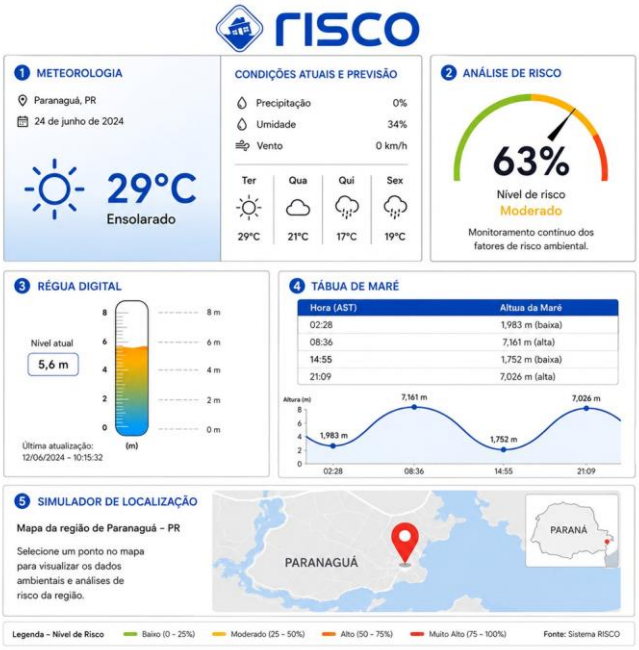


Fonte: Os Autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O aplicativo desenvolvido possui um painel que compila as principais informações que auxiliam o usuário a compreender o alerta de risco e como será o risco. Na interface, são mostradas informações como tábua de maré, previsão do tempo e nível da água. O painel funciona compilando indicadores atualizados e dados críticos em um único ambiente. A integração de variáveis como a cota d'água e a maré com a previsão meteorológica permite que o sistema, além de mostrar o estado atual, sirva como base para simulações de cenários futuros. Além disso, é disponibilizado uma seção de cenários de inundação ao usuário, com base no levantamento obtido pelo LiDAR. O aplicativo pode ser acessado no site: https://risco.app.br/ . Ao se cadastrar e fazer LOGIN o usuário pode simular inundações no local através de dados LiDAR e cotas d`água, ambas referenciadas ao SGB. A Figura 4 ilustra a inteface do aplicativo.

Figura 4 – Inteface gráfica do aplicativo.



Fonte: Os Autores.

4.1 Implementação do Sistema IoT e Coleta de Dados

A rede de monitoramento fundamenta-se em réguas linimétricas digitais autossuficientes. estas unidades, produzidas em impressão 3D e alimentadas por energia solar, realizam a medição contínua dos níveis e transmitem os dados via rede de telefonia para a plataforma. O painel integra (Figura 5) os níveis medidos em tempo real com a tábua de maré e a previsão do tempo.

Figura 5 – Régua digital.

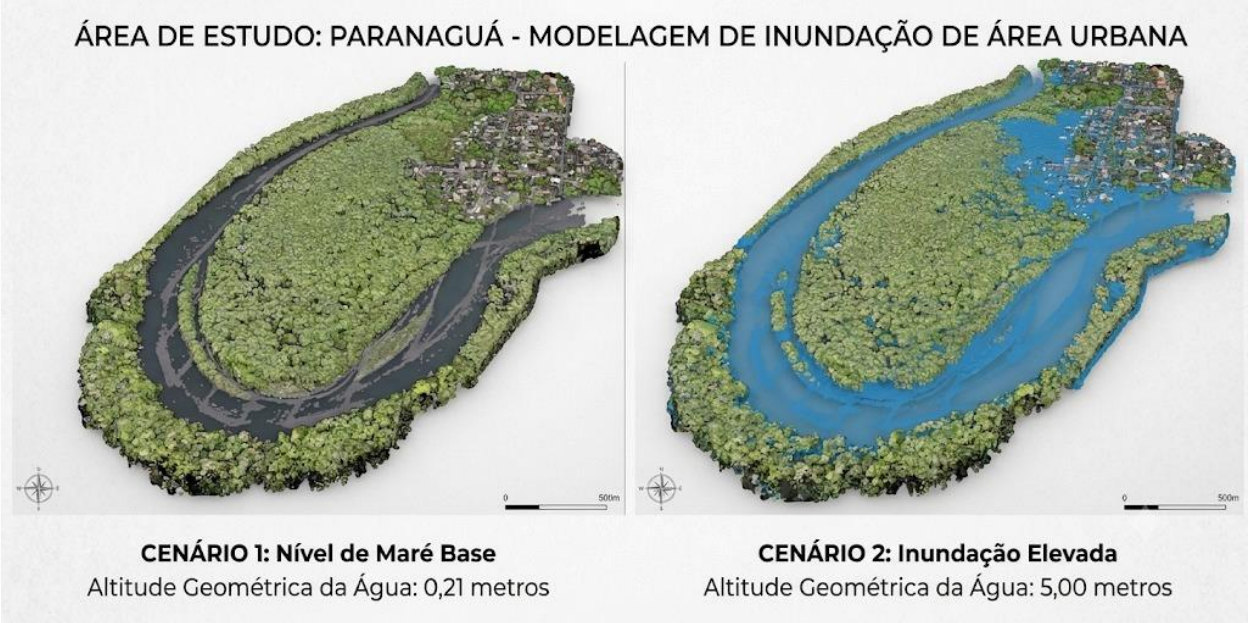


Fonte: Os Autores.

4.2 Visualizador LiDAR e Simulações Tridimensionais

O portal disponibiliza uma interface para visualização de dados LiDAR, processados a partir de nuvens de pontos capturadas por sensores laser embarcados em aeronaves remotamente pilotadas. O sistema compara a cota definida para a simulação com as altitudes de cada ponto da nuvem, que estão vinculadas ao referencial SIRGAS2000. Aqueles pontos cuja altitude é igual ou inferior ao valor simulado são graficamente destacados como áreas inundadas. A presença simulada da lâmina d'água recebe a coloração azul. As simulações funcionam como um modelo preditivo que auxilia na compreensão da dinâmica de inundação em cenários de eventos climáticos extremos ou variações anômalas de maré. Na Figura 6 aparece o cenário em tempo real onde não há áreas inundadas e um cenário onde a altitude geométrica da cota de água está em 5 metros na área de estudo na área de estudo.

Figura 6 – Simulação de áreas de inundação no bairro de Jardim Guaraituba em Paranaguá, PR.



Fonte: Os Autores.

A simulação de cenários de cheias em uma cidade costeira de planície estuarina como Paranaguá , historicamente sujeita a influências de maré e deficiências no escoamento superficial , demonstra-se fundamental para a gestão preventiva de riscos urbanos. Ao atuar como um sistema de integração entre dados topográficos de alta resolução obtidos por tecnologia LiDAR e a cota de água georreferenciada, o aplicativo permite além da visualização espacial, dados de cotas de inundação precisas. Essa integração confere à ferramenta um papel estratégico direto no Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM), pois permite o cruzamento geométrico da mancha de inundação simulada com as parcelas cadastrais do município. Consequentemente, o poder público ganha a capacidade de identificar com exatidão os lotes, edificações e infraestruturas críticas vulneráveis, fornecendo subsídios técnicos quantificáveis para o ordenamento territorial, para o

direcionamento de políticas habitacionais em áreas de ocupação irregular e para a otimização das ações de resposta da defesa civil.

5 CONCLUSÃO

O Projeto Risco cumpriu seu objetivo principal ao demonstrar a viabilidade técnica de gerar simulações dinâmicas de inundação em tempo real. Este resultado foi alcançado por meio da rigorosa determinação geodésica da cota de referência da régua digital e de sua exata compatibilização com o referencial altimétrico do modelo topográfico LiDAR. O estudo evidencia que a precisão no transporte de cotas e na unificação dos referenciais altimétricos atua como a premissa fundamental para transformar dados brutos oriundos de sensores locais em representações espaciais fidedignas da realidade urbana. Além do avanço metodológico, a contribuição de maior impacto deste trabalho reside na vinculação direta do sistema de monitoramento e alertas ao Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM). Ao sobrepor o modelo preditivo à base cadastral, a plataforma permite a identificação espacializada de edificações e infraestruturas urbanas vulneráveis. Dessa forma, o processamento de indicadores hidrológicos e topográficos atualizados garante não apenas a automação de alertas aos gestores, mas fornece, de forma centralizada e segura, subsídios técnicos quantificáveis para as ações de defesa civil e de planejamento urbano. Essa capacidade de gestão preventiva demonstra-se essencial para a promoção da resiliência territorial, especialmente em ocupações de alta densidade demográfica estabelecidas sobre planícies estuarinas

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao servidor público municipal Koiti Cláudio Takiguti, por sua fundamental contribuição como um dos idealizadores deste projeto, e à empresa Interalli Grãos Terminais Ltda., pelo indispensável apoio financeiro que viabilizou a realização desta pesquisa

Referências

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CANEPARO, S. C. **Manguezais de Paranaguá**: uma análise da dinâmica espacial da ocupação antrópica: 1952-1996. 1999. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999. Disponível em: https://hdl.handle.net/1884/88377. Acesso em: 29 jul. 2026.

ERBA, D. A.; OLIVEIRA, F. L.; LIMA JUNIOR, P. N. **Cadastro multifinalitário como instrumento de política fiscal e urbana**. Rio de Janeiro: IPPUR, 2005.

FARIA, G. G. D. **Paisagem e crescimento urbano no contexto das bacias hidrográficas de**

Paranaguá-Paraná–Brasil. 2025. Relatório (Pós-doutorado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2025. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/3555312f-f374-448f-81b8-849c20a30098/content. Acesso em: 29 jul. 2026.

GRAÇA, A. J. S.; FOSSE, J. M.; VEIGA, L. A. K.; BOTELHO, M. F. **A impressão 3D no âmbito das representações Cartográficas**. Revista Brasileira de Cartografia, [s. l.], v. 73, n. 3, p. 809-826, 2021.

GEMAEL, C. **Introdução à geodésia física**. Curitiba: Editora da UFPR, 1999. 302 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Coordenação de Geodésia. **Relatório:** reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais: REALT-2018. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. 47 p.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Caderno Estatístico do Município de Paranaguá-PR. Curitiba:** IPARDES, 2020. Disponível em: http://www.ipardes.gov.br/cadernos/Montapdf.php?Municipio=83200&btOk=ok. Acesso em: 28 jul. 2026.

LOCH, C. O Cadastro Territorial Multifinalitário. In: ERBA, D. A. (Org.). **Cadastro multifinalitário como instrumento de política fiscal e urbana**. Brasília: Ministério das Cidades, 2005. p. 15-46.

OLIANI, L. O. **Noções de Cadastro Territorial Multifinalitário–CTM**. Curitiba: Crea-PR, 2016. (Série de Cadernos Técnicos).

PARANÁ (Estado). Companhia de Habitação do Paraná – COHAPAR. **Plano Estadual de Habitação de Interesse Social do Paraná – PEHIS/PR**: conceitos e orientações. Curitiba: COHAPAR, 2023. Disponível em: https://www.cohapar.pr.gov.br/PEHIS-PR-Conceitos-e-Orientacoes. Acesso em: 23 jul. 2026

SILVA, E. D. et al. **Cadastro territorial multifinalitário aplicado à gestão municipal**. Florianópolis: UFSC, 2023.

SOUZA, F. X. da; CARMO, M.; SILVA, L. **Os condicionantes socioambientais dos alagamentos no bairro da Ponta do Caju – Paranaguá – Brasil**. [S. l.: s. n.], 2022.

TONETTI, E. L. et al. Alagamentos frequentes na área urbana de Paranaguá-PR. **Geografia: Revista do Departamento de Geociências da Universidade Estadual de Londrina**, Londrina, v. 22, n. 2, p. 43-56, maio/ago. 2013.

TONETTI, E. L. **Potencialidades de adensamento populacional por verticalização das edificações e qualidade ambiental urbana no município de Paranaguá, Paraná, Brasil**. 2011. 235 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: http://200.17.203.155/index.php. Acesso em: 17 jul. 2026.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Porto Alegre: ABRH, 2005.