AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA INTEGRAÇÃO DO EPANET AO QGIS PARA O DIMENSIONAMENTO E A ANÁLISE DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Beatriz Di Francesco Picciafuoco
Engenheira Ambiental pela UNESP de Rio Claro, Tecnóloga em Hidráulica e Saneamento Ambiental pela FATEC-SP com especialização profissional em Gestão de Projetos. Desenvolve projetos e estudos técnicos nas áreas de saneamento, recursos hídricos, geotecnologias e meio ambiente, com ênfase em geoprocessamento, modelagem hidráulica e licenciamento ambiental.

Endereço: Rua José de Magalhães, 198 - Vila Clementino, São Paulo - SP, 04026-090 - Brasil - Tel: +55 (11) 5081-9900 - e-mail: beatriz.picciafuoco@setec.com.

RESUMO

A modelagem hidráulica é fundamental para o planejamento e a gestão de sistemas de abastecimento de água, permitindo a simulação de condições operacionais e a avaliação de cenários. No entanto, a abordagem tradicional gratuita baseada exclusivamente no uso do EPANET apresenta limitações relacionadas à inserção manual de dados, à ausência de integração espacial e à restrita capacidade de visualização dos resultados. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo comparar a modelagem convencional no EPANET com uma abordagem integrada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o QGIS com o plugin QWater. A metodologia baseou-se na construção de um modelo hidráulico representativo, aplicado em ambas as abordagens, garantindo condições equivalentes de análise. Adicionalmente, foram avaliadas diferentes fontes de dados topográficos quanto à sua influência na confiabilidade dos resultados. Os resultados evidenciam que a integração com SIG proporciona ganhos significativos, como automatização de processos, maior consistência geométrica, redução de erros operacionais e possibilidade de visualização simultânea de múltiplas variáveis hidráulicas. Conclui-se que a abordagem integrada representa uma alternativa gratuita mais eficiente e robusta para o dimensionamento e a análise de redes de abastecimento de água.

PALAVRAS-CHAVE: modelagem hidráulica, QGIS, EPANET

1 Introdução

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) são constituídos por um conjunto de unidades e dispositivos destinados à captação, tratamento, armazenamento e distribuição de água potável, assegurando quantidade, qualidade e pressão adequadas ao atendimento da população (TSUTIYA, 2006). A concepção desses sistemas envolve a definição de diretrizes técnicas, avaliação de cenários e seleção de soluções que orientam o desenvolvimento do projeto.

Nesse contexto, a capacidade de integrar informações espaciais e hidráulicas torna-se fundamental para o planejamento eficiente, permitindo a identificação de restrições técnicas, ambientais e operacionais já nas etapas iniciais de concepção. Sistemas de Informação Geográfica (SIG) destacam-se como ferramentas essenciais para consolidar dados, analisar relações espaciais e apoiar a tomada de decisão em projetos de saneamento (CÂMARA et al., 2001).

Paralelamente, a modelagem hidráulica desempenha papel central na avaliação do comportamento dessses sistemas, possibilitando a simulação de pressões, vazões, velocidades e perdas de carga sob diferentes condições operacionais. Dentre as ferramentas disponíveis, o EPANET é amplamente utilizado devido à sua robustez, gratuidade e confiabilidade matemática, embora apresente limitações relacionadas à interface, interoperabilidade e inserção manual de dados (KELLNER, 2022).

A integração entre modelagem hidráulica e geoprocessamento, especialmente por meio do uso do QGIS associado ao plugin QWater, surge como uma alternativa para superar essas limitações, permitindo a automação de rotinas, maior consistência geométrica e a análise espacial integrada dos resultados. Além disso, possibilita a visualização simultânea de múltiplas variáveis hidráulicas, favorecendo a interpretação e a identificação de áreas críticas.

Dessa forma, este trabalho propõe a análise comparativa entre a abordagem convencional no EPANET e a modelagem integrada em ambiente SIG, avaliando suas implicações na eficiência do processo, na qualidade dos dados e na capacidade de análise dos sistemas de abastecimento de água.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Comparar a modelagem hidráulica de sistemas de abastecimento de água utilizando o software EPANET em sua forma convencional e numa abordagem integrada QGIS–EPANET com o plugin QWater, avaliando também a influência de diferentes metodologias de obtenção de dados topográficos na qualidade e na confiabilidade dos resultados.

2.2 Objetivos Específicos

- Estruturar e aplicar dois fluxos de modelagem hidráulica:
  (i) abordagem convencional no EPANET e
  (ii) abordagem integrada em ambiente QGIS com o plugin QWater;
- Construir um modelo hidráulico de SAA equivalente para ambas as abordagens, garantindo condições comparáveis de análise;
- Avaliar o processo de inserção, tratamento e organização dos dados em cada ambiente de modelagem;
- Analisar diferentes metodologias de obtenção de dados topográficos (levantamento tradicional, MDT de fontes públicas e LiDAR), considerando precisão, custo e aplicabilidade;
- Identificar vantagens, limitações e contextos de aplicação de cada metodologia, propondo diretrizes para sua utilização em projetos de sistemas de abastecimento de água.

3 Metodologia Utilizada

A presente pesquisa adotou uma abordagem comparativa estruturada a partir de dois eixos principais:

(i) avaliação da influência da qualidade dos dados topográficos na confiabilidade do modelo; e
(ii) comparação entre diferentes fluxos de modelagem hidráulica de sistemas de abastecimento de água (SAA).

Para o primeiro eixo, foi feita uma comparação da literatura relevante comparando o que se sabe sobre os erros, os custos, as vantagens e desvantagens de cada método de obtenção de dados topográficos.
Para o segundo eixo, foram analisadas duas abordagens de modelagem:

(i) uso convencional do software EPANET;e
(ii) modelagem integrada em ambiente SIG, por meio do QGIS com o plugin QWater.

O estudo foi conduzido a partir da construção de um sistema hidráulico hipotético representativo de uma rede de distribuição urbana, estruturado com base em dados reais de topografia e parâmetros simplificados de operação. O modelo foi mantido equivalente entre os diferentes cenários, permitindo a comparação direta dos resultados obtidos. A representação do relevo foi realizada por meio de um modelo matricial (raster), gerado a partir de dados topográficos coletados em campo, utilizado como base para a atribuição das cotas altimétricas dos elementos do sistema, condição essencial para a determinação das pressões e do comportamento hidráulico da rede.

3.1 Metodologia da Avaliação da Influência da Qualidade dos Dados Topográficos na Confiabilidade do Modelo

Com o objetivo de avaliar as bases altimétricas possivelmente utilizadas na modelagem hidráulica, foram consideradas três principais metodologias de obtenção de dados topográficos, amplamente utilizadas em projetos de saneamento:

(i) Levantamento topográfico tradicional - Estação total

Caracteriza-se pela obtenção de pontos planialtimétricos com alta precisão, permitindo a geração de modelos altimétricos com erros reduzidos, da ordem de centímetros. Essa abordagem é indicada para projetos executivos, porém apresenta maior custo e necessidade de mobilização de equipes em campo.

(ii) Modelos Digitais de Terreno de fontes públicas
Incluem dados oriundos de missões como SRTM, ASTER e Copernicus, com resolução espacial da ordem de dezenas de metros e erros altimétricos que podem variar significativamente conforme o terreno. Esses dados são de baixo custo e ampla disponibilidade, sendo mais adequados para estudos preliminares e análises de viabilidade.

(iii) Levantamento LiDAR aerotransportado
Apresenta elevada densidade de pontos e alta precisão altimétrica, podendo atingir erros reduzidos e representar detalhadamente o relevo. Apesar do desempenho superior, o método envolve custos mais elevados e demanda processamento especializado.

A comparação dessas metodologias permitiu avaliar como diferentes níveis de qualidade da informação altimétrica podem impactar a construção e os resultados do modelo hidráulico.

3.2 Modelagem em ambiente SIG - QGIS com QWater

A modelagem integrada foi desenvolvida no software QGIS com o plugin QWater, permitindo a associação entre dados geoespaciais e a simulação hidráulica. As camadas vetoriais representativas do sistema (tubulações, nós, reservatórios e dispositivos operacionais) foram estruturadas diretamente no ambiente SIG, sendo posteriormente vinculadas ao modelo hidráulico. Os parâmetros geométricos foram obtidos de forma automatizada, incluindo o cálculo de comprimentos e a extração das cotas altimétricas a partir do raster adotado, reduzindo inconsistências associadas à inserção manual de dados.
A simulação hidráulica foi realizada utilizando o motor de cálculo do EPANET integrado ao plugin, e os resultados foram diretamente associados às feições espaciais, permitindo análise geográfica das variáveis hidráulicas.

3.3 Modelagem convencional no EPANET

Para fins comparativos, o mesmo sistema foi modelado no software EPANET de forma isolada, sem integração com ambiente SIG. Nesse processo, todos os elementos da rede e seus respectivos atributos foram inseridos manualmente, incluindo cotas altimétricas, comprimentos e parâmetros hidráulicos, com base nas mesmas informações utilizadas na modelagem integrada. A simulação hidráulica foi então executada, permitindo a obtenção dos parâmetros necessários para comparação entre os métodos.

4 Resultados Obtidos

4.1 Avaliação da influência da qualidade dos dados topográficos na confiabilidade do modelo

4.1.1 Base Cartográfica

No ambiente do QGIS, é fundamental utilizar uma base cartográfica de referência espacial para assegurar a precisão geométrica e a consistência dos dados incorporados ao estudo. Recomenda-se a utilização de produtos oficiais de órgãos governamentais, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC), bem como fontes consolidadas como Google e Esri. Essas bases cartográficas devem conter elementos planimétricos (hidrografia, sistema viário, limites administrativos) e informações altimétricas preliminares, garantindo a integridade da representação espacial e facilitando a integração de múltiplos conjuntos de dados.
A verificação e a correta definição do sistema de referência espacial são etapas críticas para o processamento cartográfico. Para estudos no território brasileiro, recomenda-se a adoção do SIRGAS 2000, associado ao sistema de projeção UTM (Universal Transverse Mercator), na zona correspondente à área de interesse. O SIRGAS 2000 é o sistema geodésico oficial do Brasil, garantindo compatibilidade e precisão na localização geográfica. O sistema UTM subdivide o globo em zonas longitudinais de 6 graus de largura, projetando a superfície terrestre em coordenadas cartesianas (metros), o que facilita operações matemáticas, medições de distâncias e análises espaciais precisas em ambiente SIG. Cada zona UTM possui um sistema de coordenadas próprio, minimizando distorções locais e permitindo a manipulação eficiente de dados vetoriais e raster. Antes da integração dos diversos conjuntos de dados, é indispensável harmonizar os sistemas de coordenadas, realizando reprojeções quando necessário, para garantir que todos os elementos estejam referenciados ao mesmo sistema e zona UTM, evitando erros de sobreposição e inconsistências geométricas.

4.1.2 Bases de Dados e Cadastros Técnicos

As bases de dados georreferenciadas públicas têm como finalidade primordial a integração, organização e disponibilização de informações espaciais do território, visando subsidiar a gestão pública, o planejamento urbano e a tomada de decisões estratégicas (ESCOLA NACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA, 2006). Entre os principais exemplos destacam-se o GeoSampa (São Paulo), o BHGeo (Belo Horizonte) e as bases do INCRA destinadas a áreas rurais. Por meio dessas plataformas, torna-se possível identificar restrições socioambientais para os projetos, como a sobreposição da área de implantação do sistema a Unidades de Conservação, sítios arqueológicos ou áreas contaminadas, entre outros impedimentos.

Além disso, é comum que concessionárias e prefeituras mantenham cadastros técnicos das redes de infraestrutura (abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem urbana, distribuição de energia elétrica e telecomunicações), disponibilizando arquivos vetoriais em formatos como SHP, KML ou DWG/DXF, mediante solicitação ou consulta formal.

Dessa forma, o desenvolvimento do projeto é iniciado com premissas que evitam a sobreposição a áreas restritas e a interseção com redes já existentes, garantindo a viabilidade técnica e a adequação normativa.

4.1.3 Processamento dos Dados de Topografia e Geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT)

No dimensionamento de SAAs integrados a ferramentas de geoprocessamento, como o plugin QWater no QGIS acoplado ao EPANET, um passo fundamental é a obtenção de um Modelo Digital de Terreno (MDT) fidedigno da área de estudo. As cotas altimétricas dos reservatórios, das adutoras e dos pontos de abastecimento influenciam diretamente os cálculos de pressão e energia hidráulica no EPANET, assim, a representação correta do relevo é indispensável para avaliar diferenças de nível e planejar setorização de pressões. A seguir são discutidas as principais estratégias para coleta e processamento de dados topográficos na geração de MDTs, com suas características técnicas, aplicações e limitações.

4.1.4 Topografia Tradicional com Estação Total

A topografia planialtimétrica com estação total é considerada uma das técnicas mais precisa para levantamento do terreno em projetos de SAA. Nesse método, equipes especializadas utilizam estações totais, equipamentos eletro-ópticos de medição de ângulos e distâncias, para obter coordenadas x, y, z de pontos notáveis do relevo, geralmente com auxílio de marcos geodésicos ou Global Navigation Satellite System - GNSS para georreferenciamento ao sistema de coordenadas oficial. Essa abordagem fornece medidas de alta confiabilidade, pois uma estação total calibrada e de alta precisão consegue obter erros subcentimétricos em distâncias da ordem de centenas de metros, permitindo gerar modelos altimétricos com precisão vertical da ordem de centímetros (LIMA; SILVA, 2017).

Outro ponto importante é que o levantamento topográfico convencional possibilita coletar informações adicionais em campo. Por exemplo, durante o reconhecimento detalhado do terreno, é possível identificar e registrar o número de ligações domiciliares existentes ao longo das vias, a localização de caixas de manobra, válvulas e outras infraestruturas presentes, bem como possíveis interferências e obstáculos locais como redes de esgoto, galerias pluviais, entre outras. Esses dados levantados in loco podem se tornar parâmetros diretos para o projeto do SAA, quando, por exemplo, o número de ligações e lotes a serem ocupados ajudam a estimar as demandas de água atual e futura e orientar o traçado das redes de distribuição. Tais informações de campo complementam a base cartográfica e aprimoram a qualidade do cadastro técnico da área de estudo (SANEAGO, 2022).

Os pontos topográficos obtidos por estação total são geralmente exportados em formatos digitais padronizados como CSV ou TXT contendo coordenadas e cotas e, em seguida, tratados em ambiente de SIG. No SIG, forma-se uma malha de pontos georreferenciados e cotados, a partir da qual o projetista pode gerar a superfície interpolada representando o terreno. É comum a utilização de métodos de interpolação apropriados para construir o MDT a partir dos pontos medidos: por exemplo, cria-se uma Triangulação Irregular em Rede (TIN) conectando os pontos por triângulos. Outro método possível é o IDW (Inverse Distance Weighting), um método determinístico que estima valores de cota ao longo da superfície por meio de uma média ponderada dos pontos amostrais, na qual os pontos mais próximos exercem maior influência. Esse método é mais indicado quando os pontos coletados em campo estão distribuídos de forma relativamente uniforme, pois assume que a influência dos dados diminui com a distância e não considera tendências espaciais mais complexas. Destaca-se que a escolha e o desempenho do método de interpolação dependem diretamente da forma de aquisição dos dados, especialmente de sua distribuição espacial e densidade.

4.1.5 Imagens de Satélite e Modelos Digitais de Terreno de Fontes Públicas

Quando não é viável realizar um levantamento topográfico primário, seja por restrições de prazo, orçamento ou acesso ao local, uma alternativa é recorrer a MDTs obtidos de fontes públicas de dados remotos, como modelos de elevação derivados de imagens de satélite ou radar orbital. No contexto brasileiro, destacam-se bases gratuitas de alcance global, por exemplo:

- MDT do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) da NASA, com resolução original de ~90 m (3 arc-seconds) posteriormente refinada para ~30 m (1 arc-second);
- ASTER GDEM (Modelo Global de Elevação obtido pelo sensor óptico ASTER, resolução ~30 m);
- ALOS PALSAR (modelo radar L-band, ~12,5 m);
- Copernicus DEM (derivado da missão alemã TanDEM-X, disponibilizado em resoluções de 30 m e 90 m) e,
- Topodata/INPE (que refinou o SRTM de 90 m para ~30 m sobre o Brasil).

Essas fontes oferecem cobertura ampla e custo zero, porém envolvem compromissos significativos em termos de resolução e precisão.

Em geral, os MDTs de satélite apresentam erros altimétricos na ordem de vários metros, decorrentes tanto da resolução espacial limitada quanto de imperfeições inerentes aos sensores e algoritmos de geração. Estima-se, por exemplo, que o SRTM (30 m) possua um erro médio quadrático vertical ~6–10 m em terrenos de relevo moderado, podendo ultrapassar ±10 m em áreas de topografia complexa ou densa cobertura vegetal. Estudos comparativos revelam variações consideráveis conforme a região e a fonte do modelo: Souza (2015) avaliou os dados SRTM, Topodata e ASTER GDEM no Nordeste brasileiro semiárido e constatou que apenas o ASTER (30 m) atingiu precisão compatível com cartas 1:25.000 (erro ~4,3 m), enquanto o SRTM bruto não atendeu sequer à classe de erro exigida para 1:50.000, ficando adequado apenas a levantamentos em pequena escala (≤1:100.000) (SOUZA, 2015). Resultados similares são reportados em outras pesquisas, indicando que a acurácia altimétrica do SRTM pode variar de cerca de 3 m a quase 18 m de RMSE (da sigla em inglês *Root Mean Squared Error*, ou Raiz do Erro Quadrático Médio) conforme o terreno e a vegetação com erros de ~9,6 m em áreas montanhosas do Brasil, e chegando a ~18 m em condições adiversas (RODRIGUES et al., 2011; SAHOLIARILIVA et al., 2011 apud SOUZA, 2015). Mesmo modelos mais novos ainda apresentam limitações: o Copernicus DEM (30 m) e o NASADEM (refinamento do SRTM) tendem a reproduzir o relevo de forma semelhante ao SRTM original, enquanto o ASTER GDEM, apesar da resolução nominal de 30 m, sofre com ruídos e “artefatos” em áreas de floresta densa que degradam sua confiabilidade. Em síntese, os MDTs de imagens orbitais apresentam resolução espacial relativamente grosseira (células de dezenas de metros) e imprecisões verticais que podem chegar à ordem de 5–15 metros, dependendo da fonte e das características do terreno (FATHY et al., 2019).

Consequentemente, o uso de MDTs públicos deve restringir-se às fases iniciais de estudo e concepção do projeto, nunca servindo como base altimétrica única para o projeto básico ou executivo de um SAA. Essas bases são valiosas para análises preliminares de viabilidade e alternativas de traçado, por exemplo, para estimar a inclinação média de um possível trajeto de adutora, delinear bacias de drenagem ou delimitar setores de pressão aproximados. De fato, integrar dados remotos ao SIG possibilita identificar relações espaciais importantes, como sobrepor a rede de distribuição a mapas de relevo, indicando em quais bairros podem ocorrer pressões críticas. Dongare et al. (2024) demonstraram, em um estudo na Índia, que imagens de satélite combinadas a ferramentas GIS auxiliaram na identificação de zonas com baixa pressão e alto percurso hidráulico em uma rede urbana, orientando melhorias antes mesmo do levantamento detalhado de campo (DONGARE et al., 2024). Da mesma forma, Yogi e Stanganini (2023), ao avaliarem diversos modelos globais de elevação para uso em saneamento, enfatizam a necessidade de verificar a confiabilidade locacional de cada produto antes de aplicá-lo. A pesquisa observou discrepâncias altimétricas sutis entre diferentes fontes de MDT sobre a mesma área, as quais podem afetar resultados de simulações hidráulicas se ignoradas (YOGI; STANGANINI, 2023).

Outro aspecto crítico é a interpretação desses MDTs remotos quanto a meta-dados de qualidade, sendo recomendável analisar cada produto considerando:

(a) sua resolução espacial e se é adequada à escala do projeto;

(b) o método original de obtenção/interpolação (p.ex., radar interferométrico no caso do SRTM, estereoscopia óptica no ASTER, etc.), que influencia o tipo de erro;

(c) a precisão altimétrica declarada (RMSEz) e se atende ao Padrão de Exatidão Cartográfica exigido; e

(d) a cobertura e presença de lacunas ou anomalias (por exemplo, áreas de sombra radar sem dados ou depressões).

Muitos modelos exigem pós-processamento adicional, como preenchimento de falhas (“no data”) e filtragem de ruídos. Na prática, a utilização de MDTs de satélite em projetos de abastecimento deve vir acompanhada de validação, ou seja, sempre que possível, comparar as cotas oriundas do MDT público com alguns pontos de referência medidos em campo (GPS geodésico ou nivelamento) para quantificar o erro. Essa calibração simples pode evitar distorções, por exemplo, ajustando-se um MDT com base em poucos marcos altimétricos conhecidos, o erro médio sistemático pode ser removido, melhorando as estimativas de pressão no EPANET. Ainda assim, devido ao elevado grau de incerteza, os produtos altimétricos de satélite “devem ser usados apenas em fases preliminares para concepção e nunca em fase de projeto executivo”, conforme alerta a literatura técnica e a experiência das companhias de saneamento (FATHY et al., 2019; ABRAHÃO, 2020).

4.1.6 Dados LiDAR

Uma terceira via tecnológica para geração de MDT, cada vez mais difundida, é o levantamento LiDAR (Light Detection and Ranging), inclusive com uso de drones ou outras plataformas aéreas de baixa altitude. O LiDAR emite pulsos laser de alta frequência e registra seus retornos a partir do solo, produzindo uma nuvem de pontos tridimensional extremamente densa. Essa nuvem de pontos pode ter milhares de pontos por segundo de varredura, atingindo densidades superiores a 100 pontos/m², o que permite representar detalhes finos da superfície terrestre, inclusive capturando edificações, vegetação e até o terreno sob cobertura vegetal, por meio de múltiplos retornos do laser. Com processamento adequado, filtrando-se os pontos correspondentes à vegetação e objetos para reter apenas os pontos no terreno, obtém-se um MDT de altíssima resolução, seja na forma de malha irregular triangulada ou grade raster de poucos centímetros de passo.

A principal vantagem do LiDAR é a sua precisão e nível de detalhe. Em condições controladas, levantamentos com LiDAR aerotransportado por drone têm demonstrado precisão altimétrica da ordem de 5 cm (0,05 m) de RMSE, e mesmo em terrenos complexos ou florestados costuma-se obter erros menores que 10 cm (SALACH et al., 2018; TAMIMI; TOTH, 2024). Ou seja, o erro vertical típico do LiDAR é da mesma magnitude que o erro planialtimétrico de métodos topográficos tradicionais, tornando-o plenamente capaz de gerar MDTs confiáveis para projetos de infraestrutura. Estudos de comparação revelam que, sob condições favoráveis, sensores LiDAR modernos atingem acurácia similar à de levantamentos terrestres, por vezes com diferença inferior a 3 cm em terrenos abertos (JÓZKÓW; TOTH, 2016; HUI et al., 2021). Além disso, como o feixe laser penetra entre folhas e galhos, o LiDAR consegue mapear o solo mesmo em áreas de vegetação densa onde métodos fotogramétricos convencionais falhariam, o que pode ser um fator importante para o planejamento de adutoras em regiões de mata ou traçados de difícil acesso.

Para aplicações em SAA, os dados LiDAR podem suprimir a necessidade de medições tradicionais em campo, desde que sejam obtidos e processados seguindo rigorosos procedimentos de controle de qualidade como uso de pontos de controle topográfico para amarração e verificação. Quando bem executado, o MDT LiDAR resultante possui detalhe suficiente para gerar curvas de nível de equidistância de 1 m para projeto de redes, extrair perfis topográficos precisos para cálculos de perda de carga ao longo de trechos, e identificar micro-relevos que favoreçam ou restrinjam a passagem de tubulações. Alguns sistemas LiDAR vêm acoplados a câmeras fotográficas de alta resolução, permitindo coletar simultaneamente imagens georreferenciadas, assim, além do modelo de terreno, pode-se obter um modelo tridimensional da superfície (MDS) e ortofotos de alta resolução. Esses produtos enriquecem a análise de traçado permitindo localizar construções, vegetação ou corpos d’água que interfiram na implantação das tubulações.

Apesar dos benefícios, o LiDAR apresenta desafios e limitações que devem ser considerados. O custo ainda é relativamente elevado já que os sensores a laser, especialmente os de maior acurácia, e as operações de drone representam um investimento alto, o que pode ser proibitivo para pequenos municípios ou projetos de baixo orçamento. Adicionalmente, o processamento dos dados LiDAR requer softwares especializados e mão de obra treinada, dada a grande quantidade de pontos a ser filtrada e classificada, o que incorpora tempo e custo à fase de processamento. Há também restrições de ordem prática pois o uso de drones depende de condições meteorológicas favoráveis e de autorização de espaço aéreo junto aos órgãos competentes, podendo haver áreas onde o voo não é permitido ou é arriscado. Por fim, o LiDAR não elimina completamente a necessidade de verificações em campo já que pontos de controle topográficos obtidos por métodos tradicionais são normalmente usados para calibrar e validar o MDT LiDAR, sobretudo para alinhamento vertical, essencial para modelagem de SAA, evitando erros sistemáticos de altitude. Também permanece imprescindível realizar o cadastro de interferências subterrâneas por equipes de campo, já que o LiDAR só detecta o relevo aparente, ou seja, ele não identifica tubulações subterrâneas, condição que continua demandando sondagens ou mapas de concessionárias.

4.1.7 Comparação de Métodos de Topografia

Para efeito de síntese, a tabela a seguir resume a comparação entre os métodos de obtenção de dados topográficos discutidos, em termos de precisão altimétrica típica, resolução espacial, custo relativo e aplicabilidade no contexto de projetos de SAA.

Tabela 1 – Comparação de Métodos de Obtenção de Informação Topográfica

Método de Obtenção de Informação	Precisão Altimétrica	Resolução Espacial	Custo/Esforço	Aplicações e Limitações
Levantamento Tradicional - Estação Total	Alta Erro vertical ~1–5 cm, dependendo da distância e equipamentos utilizados	Variável Pontos medidos conforme a necessidade; densidade de pontos definida pelo projetista, podendo ser elevada em áreas críticas.	Elevado Necessita equipe em campo, linha de visada desobstruída; método mais moroso e custoso em grandes áreas.	Ideal para projeto executivo e áreas urbanizadas: fornece máxima confiabilidade na representação do relevo e detalhamento de feições (cotas de terreno, soleiras, pontos singulares). Limitações: baixo rendimento em terrenos extensos ou de difícil acesso; depende de profissionais especializados e controle geodésico.
MDT de Imagens de Satélite (SRTM, ASTER, Copernicus, etc.)	Baixa Erro vertical típico 5–15 m; piores casos até >15 m em terreno complexo	Baixa Modelos globais com células de 30 m ou 90 m; alguns produtos com ~12 m mas com cobertura limitada	Baixíssimo Dados gratuitos, disponíveis publicamente; processamento inicial geralmente já fornecido; esforço de aquisição e processamento mínimo.	Adequado apenas para estudos preliminares e análises regionais: permite reconhecimentos iniciais do relevo, estudo de traçados conceituais e estimativas aproximadas de cotas para concepção. Não indicado para projetos detalhados devido à baixa resolução e possíveis erros altimétricos significativos, que podem levar a dimensionamentos incorretos (ex.: pressões mal estimadas em simulações hidráulicas).
	Muito alta	Alta	Elevado	

Método de Obtenção de Informação	Precisão Altimétrica	Resolução Espacial	Custo/Esforço	Aplicações e Limitações
Levantamento LiDAR Aéreo Drone	Erro vertical ~0,05–0,1 m em condições favoráveis; acurácia comparável à topografia convencional	Nuvem de pontos muito densa, e.g. >100 pts/m²; permite gerar MDTs raster com resolução de 0,5–1 m ou ainda maior se necessário	Mobilização de drone/equipe, equipamentos e software especializados; custo tende a ser proporcional à área, porém em queda com avanço tecnológico	Útil tanto para etapas de planejamento (rápida cobertura de áreas extensas) quanto para projeto executivo (detalhamento altimétrico preciso). Indicado especialmente quando se requer alta densidade de dados ou há dificuldade para acesso terrestre. Limitações: custo ainda alto e demanda capacitação técnica; necessidade de pontos de controle para conferir qualidade; regulamentos de voo e clima podem impor restrições.

Fonte: elaboração própria a partir de dados de FATHY et al., 2019; SOUZA, 2015.

A análise das diferentes metodologias de obtenção de MDT evidencia que a escolha da base altimétrica exerce influência direta sobre a qualidade e a confiabilidade dos projetos de SAA. Os levantamentos topográficos convencionais com estação total permanecem como a referência de maior precisão, sendo indispensáveis nas fases de projeto executivo. Ainda que demandem maior investimento em termos de tempo, equipe de campo e custos operacionais, tais levantamentos garantem as informações de cadastramento obtidas em campo.

Por outro lado, os MDTs derivados de técnicas de sensoriamento remoto, como modelos orbitais e aerofotogramétricos, cumprem papel relevante nas etapas iniciais de planejamento e diagnóstico, ao fornecerem uma visão geral do relevo de forma ágil e econômica. No entanto, sua aplicação deve ser restrita a estudos preliminares, visto que, isoladamente, não atendem aos requisitos de precisão exigidos para o detalhamento do projeto. Nesse contexto, destaca-se o uso crescente do LiDAR embarcado em drones, que desponta como uma alternativa altamente acurada e eficiente, capaz de combinar a precisão dos métodos tradicionais com a rapidez e abrangência dos levantamentos remotos. Ainda assim, sua aplicação mais robusta ocorre quando integrada a controles de campo e a levantamentos complementares das infraestruturas não visíveis superficialmente.

Independentemente da metodologia adotada, é a partir da consolidação dessas informações altimétricas que se definem as cotas precisas dos elementos do sitema permitindo a determinação confiável dos desníveis e gradientes hidráulicos ao longo do traçado. Tais dados constituem a base para o cálculo das pressões operacionais e para a avaliação do comportamento do sistema sob diferentes cenários de demanda. Assim, a qualidade, a coerência e a integração da base espacial condicionam diretamente a robustez técnica do projeto e a segurança das decisões de engenharia.

Nesse sentido, as informações topográficas estabelecem o alicerce técnico necessário para a etapa subsequente, dedicada à modelagem do sistema de abastecimento de água. A partir de uma base altimétrica confiável, torna-se possível representar matematicamente o funcionamento hidráulico do SAA, simular condições operacionais reais e prospectivas e avaliar o desempenho da rede com maior precisão, reforçando o papel estratégico da integração entre dados espaciais de alta qualidade e ferramentas de modelagem hidráulica.

4.2 Comparação entre diferentes fluxos de modelagem hidráulica de sistemas de abastecimento de água (SAA)

4.2.1 EPANET: Visão Geral e Contexto

O EPANET é um software amplamente utilizado para a simulação do comportamento hidráulico e da qualidade da água em sistemas de distribuição, sendo desenvolvido originalmente pela EPA. Trata-se de uma ferramenta consolidada na área de saneamento, empregada tanto em estudos acadêmicos quanto em aplicações profissionais voltadas ao planejamento, operação e análise de redes de abastecimento.

Uma de suas principais características é a capacidade de realizar simulações em período estendido, permitindo avaliar a evolução de grandezas hidráulicas e parâmetros de qualidade da água ao longo do tempo. O programa representa o sistema por meio de elementos como tubulações, nós, reservatórios, bombas e válvulas, possibilitando a análise integrada do funcionamento da rede e do transporte de substâncias dissolvidas (EPA, 2025).

Do ponto de vista funcional, o EPANET permite:

(i) a determinação de vazões, pressões e perdas de carga em redes pressurizadas;
(ii) a simulação do transporte e decaimento de espécies químicas, como o cloro residual;
(iii) a avaliação de indicadores como idade da água e tempo de permanência em reservatórios; e
(iv) a análise do desempenho de sistemas de bombeamento, incluindo estimativas de consumo energético e custos operacionais (EPA, 2025).

Além disso, embora seja essencialmente uma ferramenta de simulação, o EPANET é frequentemente empregado como suporte ao dimensionamento de sistemas de abastecimento. A partir da análise iterativa de cenários, é possível verificar o atendimento a critérios operacionais, como limites de pressão e velocidades admissíveis, subsidiando decisões de projeto e identificação de melhorias necessárias. A ampla difusão do EPANET está associada à sua disponibilidade gratuita e ao fato de possuir código aberto, o que possibilita a sua adaptação e integração com outras ferramentas computacionais. Essa característica favoreceu o desenvolvimento de extensões e o uso do software em diferentes contextos, incluindo ambientes acadêmicos, empresas de engenharia e operadores de serviços de saneamento. As limitações de interoperabilidade do EPANET, especialmente em relação à integração com ferramentas modernas, têm impulsionado o desenvolvimento de soluções complementares. Entre elas, destaca-se sua integração com sistemas de informações geográficas, como o QGIS por meio do plugin QWater, que possibilita associar a simulação hidráulica a funcionalidades de análise e visualização espacial, promovendo maior eficiência e consistência na modelagem de sistemas de abastecimento de água.

A partir dessa abordagem, este trabalho propõe a aplicação integrada dessas ferramentas, sendo, portanto, apresentados a seguir os procedimentos metodológicos empregados na estruturação dos modelos hidráulicos no EPANET, que fundamentam o desenvolvimento da solução proposta.

4.2.2 Configuração de Modelos Hidráulicos no EPANET

A elaboração de um modelo hidráulico no EPANET envolve uma série de etapas metodológicas bem definidas, que garantem a representação fiel do sistema real e a obtenção de resultados confiáveis. Esses procedimentos incluem: a definição de propriedades hidráulicas globais do projeto, o ajuste das opções de simulação (parâmetros de cálculo), a especificação das características dos componentes físicos da rede (nós, tubulações, reservatórios, bombas, válvulas), a atribuição de demandas de consumo aos pontos de consumo e respectivos padrões temporais, e, por fim, a configuração de dispositivos especiais como bombas, válvulas e reservatórios com os parâmetros operacionais adequados. A seguir, cada uma dessas etapas é detalhada.

4.2.3 Parametrização de Modelos Hidráulicos no EPANET

No EPANET, a construção de modelos hidráulicos ocorre de forma estruturada, a partir de diferentes níveis de parametrização que abrangem desde configurações gerais do projeto até a definição detalhada das propriedades individuais dos componentes da rede. Inicialmente, são estabelecidos valores padrão (defaults), que funcionam como referência para a inserção de novos elementos e contribuem para a padronização do modelo. Esses parâmetros, configurados no ambiente de projeto, podem incluir identificação automática de componentes, valores típicos de elevação e características iniciais de tubulações, reduzindo retrabalho e promovendo maior agilidade na modelagem (KELLNER, 2022).

Em seguida, são definidas as opções de análise hidráulica, que constituem a base dos cálculos realizados pelo software. Entre essas definições, destacam-se a escolha da unidade de vazão, o método de cálculo de perdas de carga e parâmetros físicos do fluido. O EPANET permite a utilização de diferentes formulações consagradas,

como Hazen-Williams, Darcy-Weisbach e Chezy-Manning, cuja seleção deve considerar a disponibilidade de dados, o nível de detalhamento desejado e a consistência com o contexto do estudo. A definição apropriada desses parâmetros é essencial para garantir a coerência matemática da simulação e a confiabilidade dos resultados (KELLNER, 2022).

Em nível mais detalhado, cada elemento da rede, como nós, tubulações, bombas e válvulas, possui atributos específicos que devem ser parametrizados individualmente. Nos nós, por exemplo, são definidos dados como elevação e demanda de consumo, que influenciam diretamente a distribuição de pressões e o balanço de massa do sistema. Já nas tubulações, é necessário especificar propriedades hidráulicas como comprimento, diâmetro interno e coeficiente de rugosidade, além da possibilidade de representar perdas localizadas por meio de coeficientes adicionais. O correto detalhamento desses parâmetros permite representar de forma mais fiel o comportamento físico da rede modelada (KELLNER, 2022).

4.2.4 Atribuição de Demandas e Padrões de Consumo

A representação do consumo de água no modelo é realizada por meio da atribuição de demandas aos nós da rede. Cada ponto de consumo pode concentrar diferentes parcelas de uso, sendo comum a definição de uma demanda base associada à vazão média naquele ponto. Esse valor é fundamental para o equilíbrio hidráulico do sistema, uma vez que o modelo está fundamentado no princípio de conservação de massa, garantindo que as vazões fornecidas pelas fontes sejam compatíveis com as retiradas e o comportamento dos reservatórios (KELLNER, 2022).

Para simulações em período estendido, é necessário incorporar a variabilidade temporal do consumo. Nesse sentido, o EPANET utiliza padrões de demanda, que consistem em séries de fatores multiplicadores aplicados à demanda base ao longo do tempo. Esses padrões permitem reproduzir variações típicas de consumo, como picos em determinados períodos do dia e reduções em horários de menor atividade. A aplicação adequada desses fatores possibilita representar condições operacionais mais realistas e avaliar o desempenho do sistema sob diferentes cenários de uso (KELLNER, 2022).

4.2.5 Inserção de Bombas, Válvulas e Reservatórios

Elementos operacionais como bombas, válvulas e reservatórios desempenham papel fundamental na representação do funcionamento do sistema e exigem parametrização adequada no modelo. As bombas são inseridas como ligações entre nós e requerem a definição de curvas características que relacionam vazão e altura manométrica. Essas curvas são indispensáveis para o cálculo do desempenho hidráulico do sistema, pois descrevem o comportamento da bomba sob diferentes condições de operação. Informações adicionais, como eficiência energética e custos de operação, podem ser incorporadas em análises específicas, ampliando o potencial de avaliação do modelo (KELLNER, 2022).

As válvulas atuam como dispositivos de controle das condições hidráulicas, permitindo regular pressão, vazão ou perdas de carga. O EPANET dispõe de diferentes tipos, cada um com parâmetros específicos de configuração, os quais devem ser definidos conforme o objetivo da simulação. A correta aplicação desses dispositivos exige atenção às regras de modelagem, de modo a garantir a estabilidade numérica e a representação adequada do comportamento hidráulico (KELLNER, 2022).

Os reservatórios, por sua vez, podem ser representados de duas formas: como fontes de carga constante ou como estruturas com nível variável. No primeiro caso, são utilizados para representar condições de contorno do sistema, enquanto no segundo permitem simular o armazenamento e a variação de volume ao longo do tempo. A definição dos parâmetros associados, como níveis operacionais e características geométricas, é fundamental para a avaliação do comportamento dinâmico da rede (KELLNER, 2022).

4.2.6 Considerações sobre a Aplicação do EPANET

Após a configuração dos parâmetros e componentes do modelo, o EPANET possibilita a execução de simulações hidráulicas e de qualidade da água, fornecendo resultados que subsidiam a análise do desempenho do sistema. O processo iterativo de verificação e ajuste do modelo, a partir de eventuais inconsistências apontadas pelo software, constitui etapa essencial para garantir a confiabilidade das simulações.

Apesar de limitações relacionadas à interface e à integração nativa com outras plataformas, o EPANET permanece como uma ferramenta amplamente consolidada na análise de sistemas de abastecimento de água (KELLNER, 2022).

4.2.7 Modelo integrado QGIS–EPANET com Plugin QWater

Diante desse contexto, a abordagem proposta neste trabalho busca potencializar a aplicação do EPANET por meio de sua integração com um ambiente de geoprocessamento, visando aprimorar a gestão de dados e a consistência na construção de modelos hidráulicos. A utilização conjunta dessas ferramentas, por meio do plugin QWater no ambiente QGIS, permite associar a capacidade de simulação hidráulica do EPANET às funcionalidades de organização, análise e visualização espacial de dados georreferenciados. Como resultado,

observa-se maior eficiência no processo de modelagem, com ganhos em termos de padronização das informações, rastreabilidade dos dados e reprodutibilidade das análises, aspectos fundamentais para o desenvolvimento de soluções técnicas no setor de saneamento.

Nesse contexto, a implementação da modelagem integrada pode ser estruturada a partir de um fluxo metodológico que articula as funcionalidades de geoprocessamento do QGIS com o mecanismo de cálculo hidráulico do EPANET. Inicialmente, realiza-se a configuração do ambiente de trabalho em sistema de coordenadas projetadas, condição necessária para garantir a coerência geométrica e o cálculo adequado de extensões lineares. Em seguida, estruturam-se as camadas vetoriais representativas dos elementos do sistema de abastecimento, incluindo nós, tubulações, reservatórios, bombas e válvulas, com tipologias compatíveis à sua representação espacial.

A etapa subsequente consistiu na vinculação dessas camadas ao modelo hidráulico, com a definição da correspondência entre os elementos geoespaciais e os componentes simulados. A partir dessa associação, é possível estruturar automaticamente os atributos necessários à modelagem, reduzindo a necessidade de inserção manual de dados e contribuindo para a padronização das informações. Ainda nessa etapa, ferramentas de identificação e numeração automática devem ser utilizadas para garantir a consistência topológica e lógica da rede modelada.

No que se refere à atribuição de parâmetros técnicos, destacam-se as rotinas de extração automatizada de elevações a partir de modelos digitais de terreno, bem como o cálculo de comprimentos das tubulações com base na geometria georreferenciada. Tais procedimentos reduzem incertezas associadas à inserção manual de dados e aumentam a confiabilidade do modelo. Adicionalmente, propriedades hidráulicas como diâmetros, rugosidades e demandas foram inseridas e ajustadas diretamente nas tabelas de atributos, permitindo a integração entre dados tabulares e espaciais.

Para os componentes operacionais, como bombas e válvulas, devem ser definidos parâmetros específicos de funcionamento, incluindo curvas características e condições de controle, de forma compatível com os cenários de simulação propostos. Esses elementos foram incorporados ao modelo de maneira integrada ao ambiente SIG, garantindo consistência entre a representação espacial e o comportamento hidráulico.

Por fim, a simulação é realizada utilizando o motor de cálculo do EPANET, acionado pelo plugin a partir do ambiente QGIS. Os resultados obtidos, como pressões, vazões e velocidades, são automaticamente associados às feições espaciais, permitindo sua análise diretamente no ambiente geográfico. Essa integração possibilita a aplicação de técnicas de visualização temática, facilitando a interpretação dos resultados e a identificação de pontos críticos no sistema.

5 Análise e Discussão dos Resultados

5.1 EPANET X Ambiente QGIS com Plugin QWATER

Com o objetivo de comparar a modelagem hidráulica convencional no EPANET com a abordagem integrada em ambiente SIG, foi desenvolvido um cenário hipotético de rede de abastecimento de água, construído a partir de dados reais de topografia e parâmetros simplificados de operação.

A representação do terreno foi baseada em dados de Modelo Digital do Terreno (MDT) disponibilizados pelo portal GeoSampa, utilizando-se as folhas cartográficas 3316-242, 3316-251 e 3316-252. Esses dados, originalmente no formato .laz, foram processados no ambiente QGIS, sendo convertidos para formato raster, permitindo a análise espacial das variações altimétricas do terreno. A partir desse modelo, foram identificadas áreas representativas com diferentes cotas altimétricas, possibilitando a simulação de condições hidráulicas variadas, incluindo zonas de alta e baixa pressão.

Para fins de comparação metodológica, foi configurado um sistema de distribuição hipotético composto por 12 quarteirões, abrangendo áreas com diferentes características altimétricas; um reservatório de alimentação, posicionado de forma arbitrária na região de estudo; vazão de entrada definida de forma simplificada, visando possibilitar a simulação hidráulica.

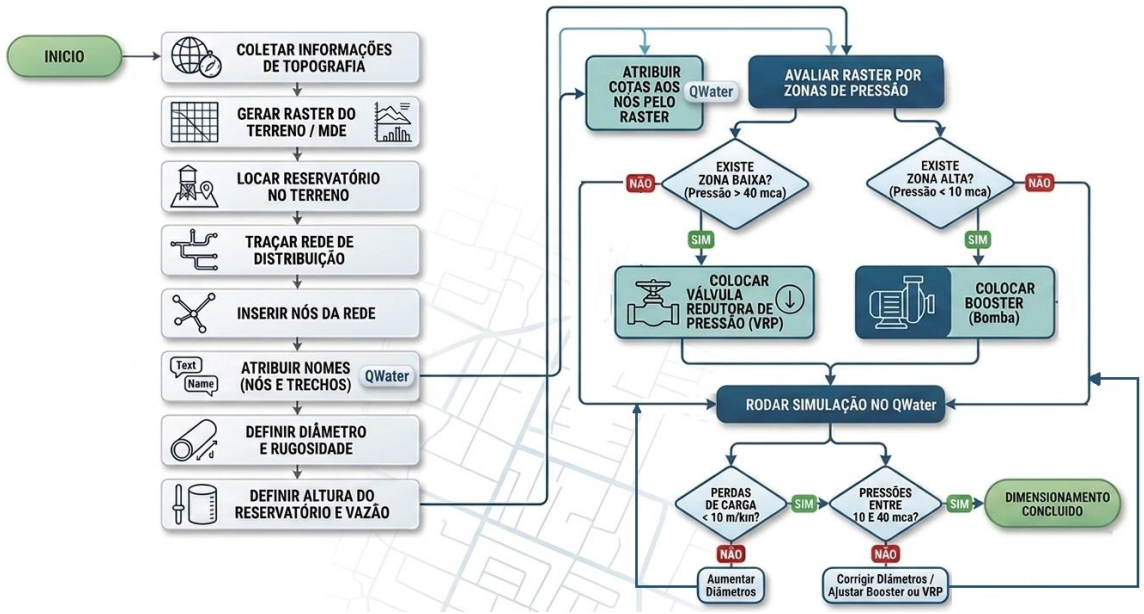
O traçado da rede foi elaborado de modo a representar uma malha típica de distribuição urbana, com inserção de nós em pontos de mudança de direção das tubulações, coincidindo com esquinas dos quarteirões e extremidades da rede (pontas secas). Essa escolha garante coerência hidráulica e compatibilidade com práticas usuais de modelagem.

5.1.1 Modelagem no ambiente QGIS com QWater

A modelagem espacial foi realizada no software QGIS, com o uso do plugin QWater, que integra funcionalidades de geoprocessamento ao motor de cálculo hidráulico do EPANET. Inicialmente, foram criadas camadas vetoriais específicas para cada elemento da rede: tubulações (camadas do tipo linha) e componentes pontuais, como nós, reservatórios, válvulas redutoras de pressão (VRP) e sistemas de bombeamento (booster).

Após a digitalização da rede, procedeu-se à vinculação das camadas ao modelo hidráulico por meio do QWater, possibilitando a associação entre a geometria espacial e as propriedades hidráulicas de cada elemento.
Na etapa de parametrização, os principais atributos foram atribuídos automaticamente com o auxílio do plugin, incluindo, para os nós, identificação, demanda e cota altimétrica; para os reservatórios, cota piezométrica; para as tubulações, comprimento, diâmetro e coeficiente de rugosidade; e, para os dispositivos operacionais (VRP e booster), cotas e parâmetros específicos de operação.
Destaca-se que as cotas altimétricas foram obtidas de forma automatizada a partir do modelo raster previamente gerado, o que contribui para maior consistência dos dados e redução de incertezas associadas à inserção manual.
A simulação hidráulica foi executada diretamente no ambiente QGIS, utilizando o motor de cálculo do EPANET integrado ao QWater, permitindo ajustes iterativos no projeto conforme necessário. A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas para a elaboração do dimensionamento no ambiente QGIS com o uso do plugin QWater.

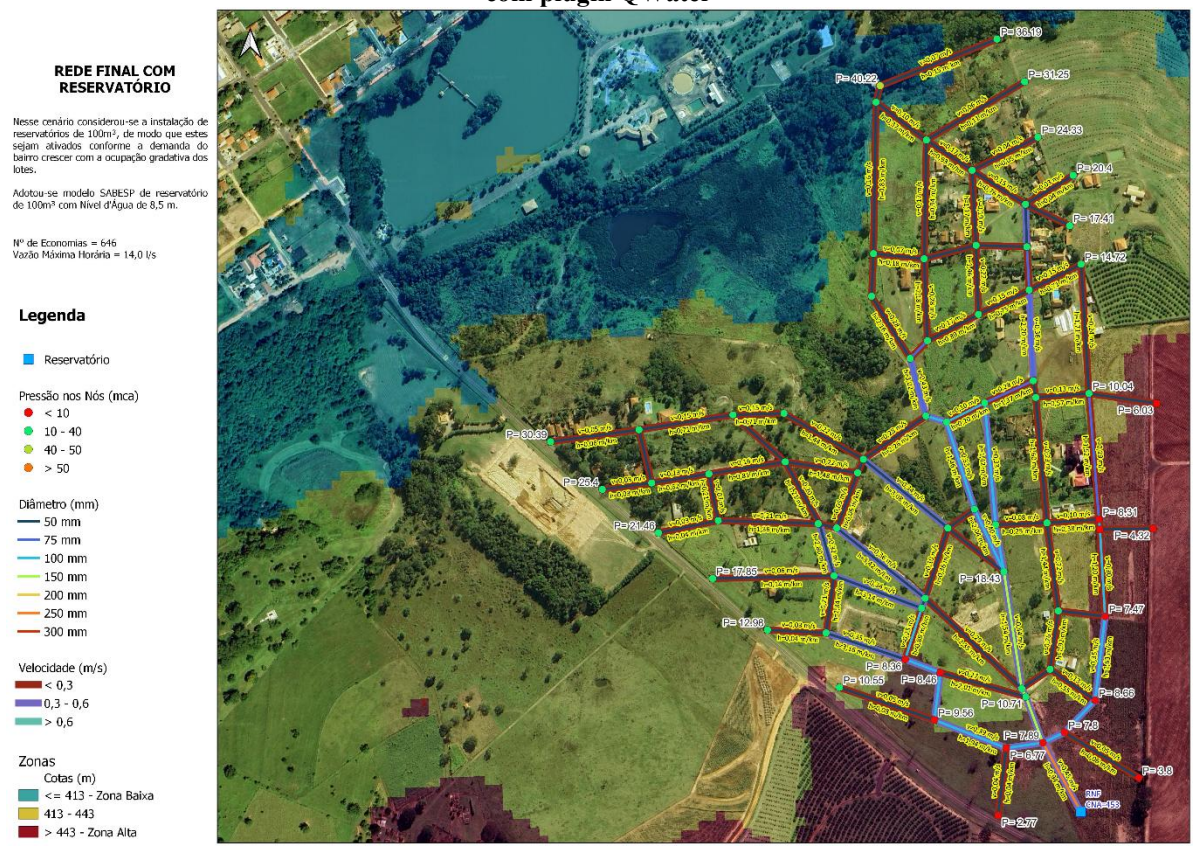
Figura 1 - Fluxograma para a elaboração do dimensionamento utilizando o ambiente QGIS com plugin QWater



Fonte: Elaboração própria, 2026.

Após a execução da simulação, foram avaliados parâmetros hidráulicos relevantes, tais como pressões nos nós; vazões e velocidades nos trechos e perdas de carga ao longo da rede. Esses resultados foram posteriormente representados por meio de mapas temáticos no QGIS, permitindo a visualização espacial das variáveis hidráulicas e a identificação de áreas críticas do sistema. Adicionalmente, a análise da topografia foi utilizada para apoiar a locação de dispositivos auxiliares, como estações de bombeamento (booster) e válvulas redutoras de pressão (VRP), visando adequar o comportamento hidráulico às variações de cota do terreno. A Figura 2 apresenta a imagem de satélite da área de estudo, bem como a delimitação das zonas alta e baixa, definidas a partir da análise do raster gerado com base nos dados topográficos. Também são apresentados os resultados da modelagem hidráulica, incluindo a classificação das pressões nos nós, das velocidades e dos diâmetros das tubulações, diferenciados por cores, além das perdas de carga indicadas por trecho.

Figura 2 – Visualização de Resultados do Dimensionamento de um SAA Utilizando o Ambiente QGIS com plugin QWater



Fonte: Elaboração própria, 2026.

5.1.2 Modelagem convencional no EPANET

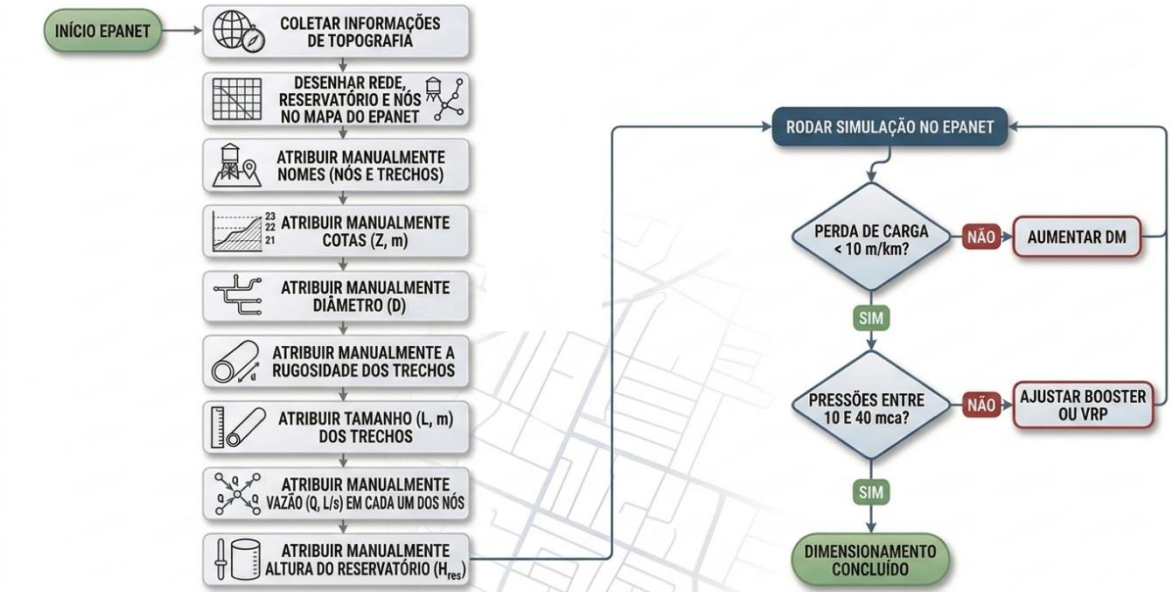
Para fins comparativos, o mesmo cenário hidráulico foi modelado no software EPANET, utilizando a abordagem tradicional baseada na inserção manual dos dados. Nesse processo, todos os elementos da rede, incluindo nós, tubulações, reservatórios e demais componentes, são inseridos diretamente na interface do software, assim como seus respectivos atributos hidráulicos. As cotas, comprimentos e demais parâmetros foram atribuídos manualmente, com base nos mesmos dados utilizados na modelagem em ambiente SIG, garantindo a equivalência entre os cenários analisados.

A simulação hidráulica foi então executada no EPANET, possibilitando a obtenção dos mesmos parâmetros avaliados na abordagem integrada. A Figura 3 apresenta o fluxograma das etapas para a elaboração do dimensionamento utilizando o EPANET.

Após a execução da simulação, foram analisados parâmetros hidráulicos relevantes, tais como pressões nos nós, vazões e velocidades nos trechos e perdas de carga ao longo da rede. Esses resultados foram representados por meio de esquemas, permitindo a visualização das variáveis hidráulicas. Destaca-se, no entanto, que o EPANET permite a visualização de apenas um atributo por vez para cada elemento da rede, como, por exemplo, somente as velocidades, ou somente as perdas de carga, ou ainda apenas os diâmetros.

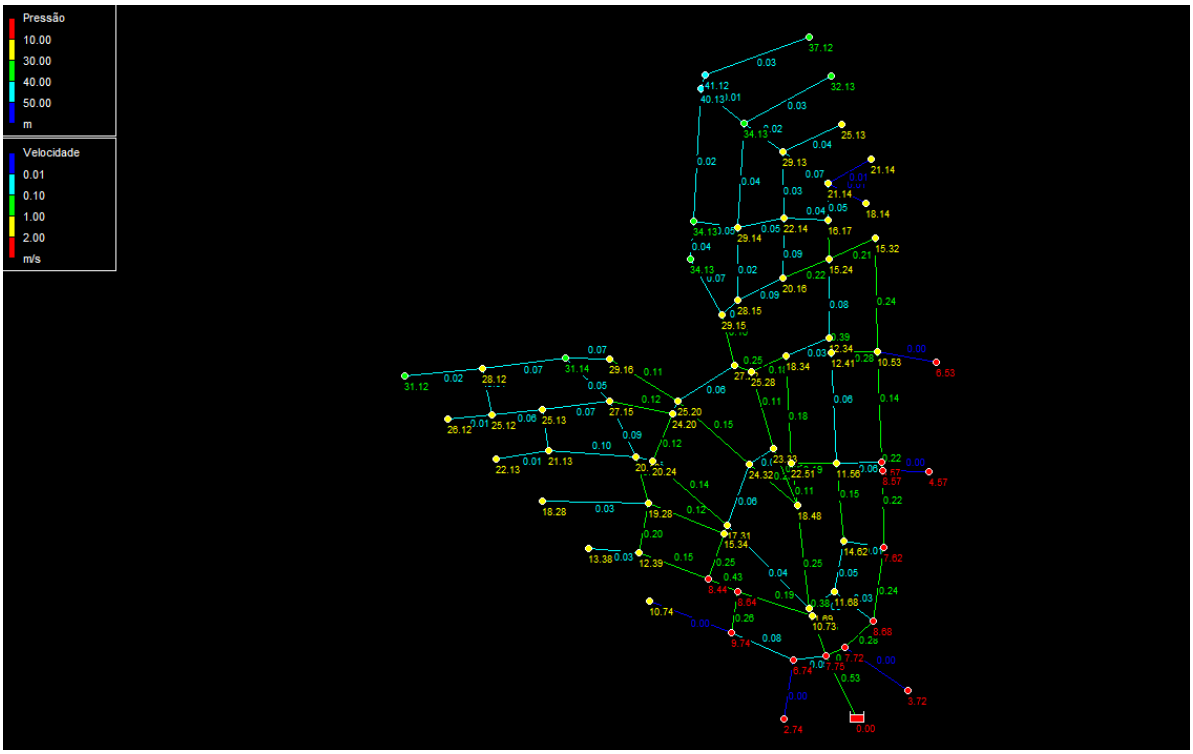
A Figura 4 apresenta os resultados da modelagem hidráulica, incluindo a classificação das pressões nos nós e das velocidades das tubulações, diferenciadas por cores.

Figura 3 - Fluxograma para a elaboração do dimensionamento utilizando EPANET



Fonte: Elaboração própria, 2026.

Figura 4 – Visualização de Resultados do Dimensionamento de um SAA Utilizando o EPANET



Fonte: Elaboração própria, 2026.

5.1.3 Comparação EPANET e QWATER

A comparação entre a modelagem hidráulica realizada no ambiente SIG (QGIS com plugin QWater) e a abordagem convencional no EPANET evidencia diferenças relevantes sob critérios objetivos de análise. No QGIS, observa-se maior eficiência na inserção e tratamento dos dados, devido à automatização de atributos geométricos, como comprimentos e cotas, reduzindo erros operacionais e aumentando a consistência espacial do modelo. Além disso, a integração com dados georreferenciados permite a visualização simultânea de

múltiplos parâmetros hidráulicos, favorecendo uma análise mais abrangente e integrada do sistema. Em contraste, o EPANET apresenta maior dependência de inserção manual de dados, o que aumenta o tempo de modelagem e a suscetibilidade a inconsistências, além de limitar a visualização das variáveis hidráulicas à exibição de um único atributo por vez. Por outro lado, o EPANET mantém vantagem em termos de simplicidade operacional e tradição de uso, sendo amplamente consolidado como ferramenta de cálculo hidráulico. Dessa forma, a abordagem integrada em ambiente SIG demonstra desempenho superior em critérios como eficiência operacional, qualidade dos dados e capacidade analítica, enquanto o EPANET permanece relevante como motor de cálculo hidráulico e ferramenta de referência no setor. A Tabela 2 mostra de forma concisa as diferenças entre os dois métodos.

Tabela 2 – Comparação entre QGIS (QWater) e EPANET

Critério	QGIS + QWater	EPANET
Inserção de dados	Automatizada (geometria e atributos)	Manual
Consistência espacial	Alta (dados georreferenciados)	Limitada (sem integração espacial direta)
Tempo de modelagem	Reduzido	Elevado
Suscetibilidade a erros	Baixa (menos intervenção manual)	Mais elevada
Visualização de resultados	Simultânea (múltiplas variáveis por mapa temático)	Restrita (um atributo por vez)
Análise territorial	Integrada (SIG)	Não integrada
Automatização	Alta (cálculo de cotas, comprimentos, topologia)	Baixa
Interface gráfica	Avançada e customizável	Simplificada
Motor de cálculo hidráulico	Utiliza o EPANET	Nativo
Aplicabilidade	Planejamento, análise espacial e dimensionamento integrado	Simulação hidráulica consolidada

Fonte: Elaboração própria, 2026

6 Conclusão

A presente pesquisa permitiu avaliar a aplicação integrada de ferramentas de modelagem hidráulica e geoprocessamento, evidenciando ganhos significativos em relação à abordagem tradicional baseada exclusivamente no uso do EPANET.

A utilização do ambiente SIG possibilitou a redução de inconsistências geoespaciais, uma vez que a modelagem passou a estar diretamente vinculada a dados georreferenciados, garantindo maior coerência entre a representação espacial da rede e suas propriedades hidráulicas. Nesse contexto, a integração com arquivos raster contribuiu para uma atribuição mais precisa das cotas altimétricas, refletindo de forma mais fiel as condições reais do sistema modelado.

Outro aspecto relevante refere-se à automação proporcionada pelo QGIS, particularmente por meio do plugin QWater. A geração automática de atributos, o cálculo de comprimentos e a extração de cotas reduziram significativamente a necessidade de inserção manual de dados, tornando o processo de modelagem mais ágil, padronizado e menos suscetível a erros operacionais. Além disso, a possibilidade de vincular diretamente os resultados da simulação ao ambiente geográfico permitiu uma visualização mais clara e intuitiva das variáveis hidráulicas, facilitando a identificação de trechos críticos e a interpretação do comportamento da rede.

Do ponto de vista operacional, os resultados obtidos evidenciam benefícios diretos para o planejamento e a gestão de sistemas de abastecimento de água. A integração entre SIG e modelagem hidráulica proporciona uma visão territorial mais abrangente, permitindo analisar simultaneamente aspectos hidráulicos e espaciais. Ademais, a estrutura baseada em banco de dados geográficos favorece a atualização contínua do modelo, possibilitando a incorporação de novos dados de campo de forma eficiente e consistente.

Além disso, a ampla gama de possibilidades de representação gráfica oferecida pelo QGIS permite a visualização simultânea de múltiplas informações, possibilitando ao projetista destacar os aspectos mais relevantes e favorecer uma compreensão mais rápida e integrada do cenário analisado.

Em contraste, a abordagem tradicional no EPANET apresentou limitações importantes, destacando-se a necessidade de inserção manual dos parâmetros, maior suscetibilidade a erros de conectividade e dificuldades na verificação da consistência espacial da rede. A ausência de integração nativa com ferramentas de geoprocessamento também restringe a capacidade de análise territorial e dificulta a visualização espacial dos resultados, tornando o processo mais oneroso e menos intuitivo.

No entanto, ressalta-se que a qualidade da modelagem integrada permanece diretamente dependente da qualidade da base geográfica utilizada. Inconsistências em dados de entrada, como modelos digitais de terreno imprecisos ou erros no cadastro da rede, podem comprometer os resultados obtidos, independentemente da ferramenta utilizada.

Diante dessas considerações, conclui-se que a integração entre QGIS e EPANET representa uma abordagem superior ao método tradicional, ao possibilitar maior precisão espacial, interface mais amigável para edição das redes e maior capacidade de análise territorial. Adicionalmente, observa-se redução de erros de conectividade e maior facilidade na atualização contínua do cadastro técnico, aspectos essenciais para a evolução dos sistemas de saneamento e para a tomada de decisão baseada em dados.

Assim, a adoção de fluxos de trabalho integrados entre modelagem hidráulica e geoprocessamento mostra-se alinhada às demandas atuais do setor de saneamento, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes, confiáveis e reprodutíveis.

7 Referências

1. ABRAHÃO, N. Aplicações GIS para empresas de saneamento básico. São Paulo: ABES, 2020. 441p.
2. CÂMARA, G. et al. Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2001.
3. DONGARE, et al. *Water distribution system modelling of GIS-remote sensing and EPANET for the integrated efficient design*, 2024.
4. ESCOLA NACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA (ENAP). Bases de dados georreferenciadas públicas: integração e disponibilização de informações espaciais. Brasília: ENAP, 2006.
5. FATHY, I.; ABD-ELHAMID, H.; ZELENAKOVA, M.; KAPOSZTASOVA, D. Effect of topographic data accuracy on watershed management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 21, p. 4245, 2019.
6. KELLNER, E. Introdução ao EPANET: simulação e dimensionamento de sistemas de abastecimento de água. São Carlos: UFSCar/CPOI, 2022.
7. LIMA, A. P. B.; SILVA, L. R. Calibração de estações totais à luz das normas nacionais e internacionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27., 2017, Rio de Janeiro; EXPOSICARTA, 26., 2017, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: SBC, 2017. p. 101–105.
8. RODRIGUES, T. G.; PARADELLA, W. R.; OLIVEIRA, C. G. *Evaluation of the altimetry from SRTM 3 and planimetry from high-resolution PALSAR FBD data for semi-detailed topographic mapping in the Amazon Region. Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 83, p. 953–966, 2011.
9. SANEAGO. Critérios para elaboração e aceitação de levantamentos topográficos de urbanização e de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário. 2022.
10. SAHOLIARILIVA, N. G.; GUNNELL, Y.; PETIT, C.; MERING, C. *Techniques for quantifying the accuracy of gridded elevation models and for mapping uncertainty in digital terrain analysis. Progress in Physical Geography,* v. 35, p. 739–764, 2011.
11. SOUZA, J. O. P. de. Análise da precisão altimétrica dos modelos digitais de elevação para área semiárida do Nordeste brasileiro. Revista do Departamento de Geografia (USP), v. 30, p. 56–64, 2015.
12. TAMIMI, R.; TOTH, C. *Accuracy assessment of UAV LiDAR compared to traditional total station for geospatial data collection in land surveying contexts. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLVIII-2, p. 421–428, 2024.
13. TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 4. Ed. Edusp São Paulo: [s.n.], 2006.
14. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *EPANET: software for modeling drinking water distribution systems*. Disponível em: https://www.epa.gov/water-research/epanet. Acesso em: 18 maio 2026.

15. YOGI, F.; STANGANINI, F. N. Comparação e avaliação de modelos digitais de elevação dos sensores SRTM, ASTER, TanDEM/TerraSAR-X, NASADEM, Copernicus DEM e ALOS PALSAR para aplicações no saneamento básico. Research, Society and Development, 2023.