



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Aplicação da extração automática de Rede de Drenagem na Engenharia Urbana a partir de dados de alta resolução do PE3D utilizando softwares livres

Leandro Luiz Silva de França¹, Alessandro Rodrigues de Amorim², Julio César Azevedo Luz de Lima³, Simone Sayuri Sato⁴, Alfredo Ribeiro Neto⁵, Sávía Gavazza dos Santos Pessoa⁶

¹Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, CEP: 50740-550; Recife – PE, Brasil, leandro.silvafranca@ufpe.br, orcid.org/0000-0003-0863-1926; ²Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, CEP: 50740-550; Recife – PE, Brasil, alessandro.amorim@ufpe.br, orcid.org/0009-0001-2839-8036; ³Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, CEP: 50740-550; Recife – PE, Brasil, julio.luz@ufpe.br, orcid.org/0000-0001-5521-4311; ⁴Professora Doutora, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, CEP: 50740-550; Recife – PE, Brasil, simone.sato@ufpe.br, orcid.org/0000-0002-2516-8876; ⁵Professor Doutor, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, CEP: 50740-550; Recife – PE, Brasil, alfredo.ribeiro@ufpe.br, orcid.org/0000-0002-9411-0651; ⁶Professora Doutora, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, CEP: 50740-550; Recife – PE, Brasil, savia@ufpe.br, orcid.org/0000-0002-4433-7735.

Artigo recebido em 23/04/2023 e aceito em 15/12/2023

RESUMO

A perfeita geração de linhas de drenagem ainda é um grande desafio. Existem diversos métodos e ferramentas para a extração automática das feições hidrográficas a partir de Modelos Digitais do Terreno (MDT), tanto em softwares proprietários quanto em soluções livres e de código aberto. Nesta pesquisa, foram comparados os resultados de extração automática de linhas de drenagem utilizando as ferramentas do System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) e o Geographic Resources Analysis Support System (GRASS), ambos softwares livres para Geographic Information System (GIS). Para o estudo, foram utilizados o MDT de 1 metro de resolução do Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D). A alta resolução de MDT é raramente disponível para a aquisição de redes de drenagem o que se torna instigante verificar a qualidade dos dois conjuntos de rede de drenagem gerados. Portanto, o objetivo do estudo realizado foi avaliar quanto a completude e acurácia posicional planimétrica das redes de drenagem geradas por esses dois softwares. Das análises, verificou-se que os algoritmos de geração automática da rede de drenagem do GRASS e SAGA GIS não apresentaram acurácia nem completude satisfatória para aplicações em projetos de engenharia em escalas maiores que 1:5.000. Ou seja, nessas escalas, ainda é necessária a fotointerpretação na aquisição manual da rede de drenagem, e posterior adequação do MDT, para torná-lo hidrológicamente consistente de forma a viabilizar seu uso nas modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas em projetos de Engenharia Urbana.

Palavras-chave: rede de drenagem, qualidade, acurácia posicional, feições lineares, PE3D.

Application of Automatic Drainage Network Extraction in Urban Engineering from High-Resolution PE3D data using Open-Source Software

ABSTRACT

The perfect generation of drainage lines is still a big challenge. There are several methods and tools for the automatic extraction of hydrographic features from Digital Terrain Models (DTM), both in proprietary and in free and open-source software. In this research, the results of automatic extraction of drainage lines were compared using the tools of the System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) and the Geographic Resources Analysis Support System (GRASS), both free software for Geographic Information System (GIS). In this study, the 1-meter resolution MDT of the Pernambuco Tridimensional Project (PE3D) was used with the objective of evaluating the completeness and planimetric positional accuracy of the drainage network generated by this software. From the analyses, it was verified that the algorithms for automatic generation of the GRASS and SAGA GIS drainage network did not show satisfactory accuracy or completeness for applications in engineering projects at scales greater than 1:5,000. That is, at these scales, photointerpretation is still necessary in the manual acquisition of the drainage network, and subsequent adaptation of the MDT, to make it hydrologically consistent to enable its use in hydrological and hydrodynamic modeling in Urban Engineering projects.

Keywords: drainage network, quality, positional accuracy, linear features, PE3D.

Introdução

Uma complexidade inerente à validação das redes de drenagem e à verificação de sua adequação às escalas de projetos em Engenharia Urbana, principalmente quando a rede é obtida por extração automática a partir de insumos cartográficos (França & Portugal, 2022).

Os prejuízos técnicos decorrentes da limitada capacidade de comprovação da qualidade das redes de drenagem destacam a urgência de aprimorar as práticas existentes, fomentando assim a necessidade de técnicas mais robustas e precisas para a avaliação e teste das linhas de drenagem mapeadas.

O mapeamento da rede de drenagem é de vital importância para projetos de engenharia, sendo o aperfeiçoamento de algoritmos de identificação automática dessas feições objeto de estudos a fim de garantir a precisão dos resultados de modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas (de Arruda Gomes et al., 2021; Lima et al., 2022).

A rede de drenagem consiste em uma classe de feições representada por geometrias do tipo linha devidamente conectadas, a qual pode ser gerada automaticamente pelo Modelo Digital do Terreno (MDT), ou adquirida pela interpretação tridimensional do terreno na composição de ortomosaico e MDT, semelhante ao encontrado no trabalho de Silva & Furrier, (2019). Sendo o grau de detalhamento desse produto relacionado principalmente à escala de mapeamento e às limitações de resolução espacial desses insumos, sendo o fluxo de drenagem calculado bastante suscetível à imprecisão em áreas de pequena variação de elevação, ou de incidência de depressões, muito comum em planícies fluviais (Sampaio & Rocha, 2022).

A importância da resolução e do nível de precisão do MDT, são mencionados em estudos como (Muhadi et al., 2020; Rocha et al., 2020; Sidek et al., 2021; Zanandrea et al., 2019). No entanto, um MDT com resolução de 1 metro raramente é encontrado.

A geração automática de rede de drenagem a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) para a produção cartográfica costuma ser objeto de estudo principalmente para MDE com resolução espacial de 10 a 60 metros (Dantas & Paz, 2021; Lima et al., 2022; Paz & Sampaio, 2021; Pereira Toniolo et al., 2021; Tolentino et al., 2018). No entanto, estudos e aplicações de MDE com alta resolução voltadas a projetos de engenharia urbana ainda são pouco exploradas.

Os modelos digitais gerados a partir de varredura a laser (LiDAR) podem proporcionar

notável avanço na qualidade de projetos que demandam conhecimento detalhado do terreno (Mendonça & Paz, 2022; Mose Ferreira et al., 2020). No caso do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D), os dados altimétricos tem resolução espacial de 1 metro, e quando aplicados a estudos de inundações, permite gerar modelos hidrodinâmicos mais precisos na definição das áreas inundáveis (de Arruda Gomes et al., 2021; Muhadi et al., 2020).

A aquisição manual da rede de drenagem, em geral, é bastante trabalhosa e subjetiva, passando a depender da experiência de quem realiza a interpretação das feições e da metodologia de vetorização dos dados. E, em alguns casos, é necessário o levantamento topográfico em campo, para medição de bueiros, canais e galerias subterrâneas. Ou seja, o resultado da vetorização manual das linhas de drenagem deve passar por uma coerente abstração da realidade, identificando e corrigindo problemas que não são obtidos automaticamente pelos algoritmos, seja por inconsistências relacionadas à escala de mapeamento ou a falta de adequação do MDT ao modelo hidrológico (Sampaio & Rocha, 2022).

A acurácia posicional e a completude, são dois dos elementos de qualidade previstos na ISO 19.157 (ISO, 2013) usados para avaliar a qualidade da informação geográfica de dados geoespaciais. No Brasil, a acurácia posicional pode ser indicada pelo Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (França, Penha, et al., 2019; DSG, 2016), onde são verificadas as discrepâncias planimétricas entre as feições de teste e feições de referência, obtidas em medições em campo ou a partir de insumos mais precisos. Já a análise da completude, segundo a ISO 19157:2013, consiste em verificar a presença e a ausência de informações no conjunto de dados.

No caso da rede de drenagem, a acurácia posicional para feições lineares pode se utilizar de técnicas como *buffer* simples, *buffer* duplo e distância de Hausdorff (Miranda et al., 2023; Saito et al., 2019) ou o método do retângulo equivalente (França & Silva, 2018). Já a completude das linhas avaliadas pode ser verificada pelo percentual do comprimento do rio em relação a um *buffer* da feição de referência (Lima et al., 2022).

Neste trabalho, tem-se uma rede de drenagem obtida por meio da geração automática das linhas utilizando os softwares *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS GIS) e *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA GIS). Desta forma, tem-se três conjuntos

de dados, o primeiro é o conjunto de dados de referência, cujas feições da rede de drenagem foram coletadas manualmente, e os outros dois conjuntos são oriundos de processos automáticos.

O GRASS GIS é um software de código aberto que possui conjunto de ferramentas para análise de dados geoespaciais, processamento de imagens, simulação dinâmicas e modelagem espaço-temporal (Bornaetxea & Marchesini, 2022; Cimburova & Blumentrath, 2022) que possuem ferramentas como “*r.stream.extract*”, destinada a extração da rede de drenagem (Amatulli et al., 2022).

O SAGA GIS é um programa utilizado para cartografar e categorizar a vulnerabilidade de uma bacia hidrográfica, tradicionalmente são usados perante a eventos de inundação e ocorrências de chuvas prolongadas (Ighile, 2022). Essa metodologia segundo Costache (2020) permite a realização da gestão das bacias hidrográficas com auxílios do Sistema de Informação Geográfica (SIG). As ferramentas de análise do terreno do SAGA GIS possibilitam cálculos geomorfométricos como inclinação, aspecto, curvaturas, classificação de curvatura, sombreamento analítico, eliminação de sumidouros, análise de caminho de fluxo, delineamento bacias, linhas de canal, altitudes relativas, entre outras aplicações (Lemenkova, 2021).

O objetivo deste trabalho é, portanto, avaliar a qualidade dos conjuntos de rede de drenagem gerados com a extração automática,

usando ferramentas específicas, nos dois softwares *open source* GRASS e SAGA GIS apoiado no MDT com resolução de 1 metro do PE3D. Esta avaliação é composta por dois parâmetros de qualidade: a completude dos dados e a acurácia posicional pelo PEC-PCD, considerando-se escalas do mapeamento cadastral (1:10.000 até 1:1.000) e a adequação a aplicação em projetos de engenharia urbana.

A aplicação de abordagens mais avançadas e automatizadas na extração e avaliação de redes de drenagem em projetos de Engenharia Urbana pode superar as limitações dos métodos tradicionais com a utilização de medidas de controle de qualidade para proporcionar uma comprovação mais eficiente da qualidade das linhas de drenagem, bem como uma melhor adequação às diferentes escalas de projetos urbanos. O entendimento dessas limitações é visto como essencial para mitigar os prejuízos técnicos associados à falta de precisão na validação dessas linhas, promovendo assim indicadores da eficácia e confiabilidade da rede de drenagem.

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo se localiza no entorno do “Córrego da Telha”, à margem da rodovia federal BR-101, no município do Recife, em Pernambuco. Essa área se caracteriza por estar entre morros e com elevada densidade populacional, sujeita a enxurradas, deslizamentos e inundações (Figura 1).

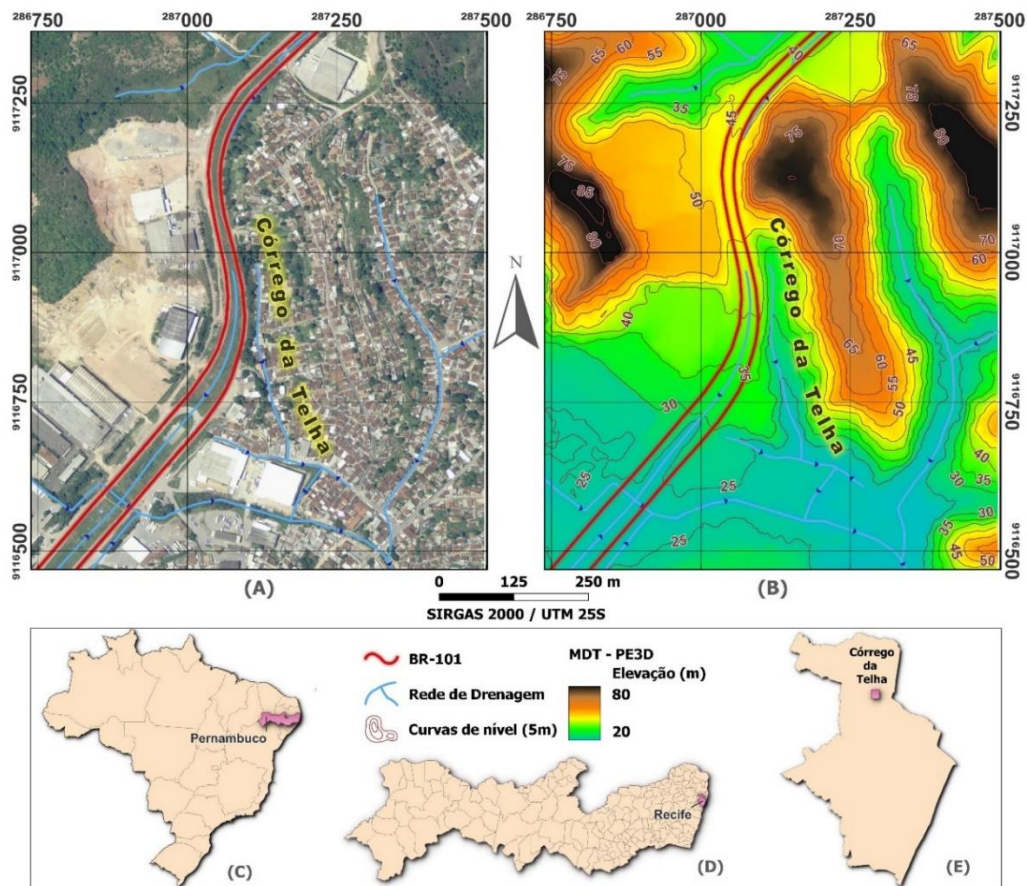


Figura 1: (A) Ortomosaico (B) Hipsometria (C) Estados (D) Municípios (E) Localização da área de estudo.

Insumos Cartográficos

Como insumos para esta pesquisa foram utilizados os Ortomosaicos de alta resolução do PE3D (Ribeiro et al., 2020), referente às cartas SB-25-Y-C-VI-3-SO-F-I e SB-25-Y-C-VI-3-SO-F-III do mapeamento sistemático brasileiro para a escala 1:5.000, acessíveis no endereço eletrônico: www.pe3d.pe.gov.br/mapa.php.

Extração automática da rede de drenagem

Para o pré-processamento do MDT, foi necessário a remoção das depressões existentes. Essas depressões são preenchidas para possibilitar a simulação do escoamento superficial pelo algoritmo, fazendo com que o MDT seja hidrologicamente consistente (Tschiedel et al., 2020).

O princípio da geração da direção do fluxo da água baseia-se no método D8 (Gabriels e Willems, 2022; Li et al., 2022), formado pelos oito pixels vizinhos, onde a orientação do escoamento é dada pela maior amplitude altimétrica entre os pixels circundantes e o pixel central.

O fluxo acumulado é calculado pela quantidade de células que se somam na direção do fluxo da água, mostrando o nível de convergência do escoamento e relacionado à conexão com os

divisores de água a montante, delineando a bacia de contribuição (Sit et al., 2019).

A extração da rede de drenagem e delimitação de microbacias hidrográficas baseadas num limiar de fluxo acumulado, em pixels, de forma que quanto menor este limiar, mais densa será a hidrografia e consequentemente menores serão as áreas de contribuição de cada curso d'água.

O software QGIS 3.28 foi utilizado para a análise dos dados e produção dos mapas. Os softwares SAGA GIS 7.8.2 e GRASS 7.8.7 foram utilizados para a geração automática da rede de drenagem.

Rede de drenagem no SAGA GIS

A extração da rede de drenagem pelo SAGA GIS foi realizada se utilizando das ferramentas *Terrain Analysis – Hydrology* (Figura 2), onde foram inicialmente identificadas e preenchidas as depressões da superfície no MDT com a ferramenta *Fill Sinks* (Baye, 2020). Esta etapa resultou em um arquivo raster *Filled DEM* (MDE Preenchido). A etapa seguinte consistiu na utilização da ferramenta *channel network and drainage basins* em *Terrain Analysis – Channels*,

responsáveis por gerar as linhas de drenagem utilizando o resultado *Filled DEM* (MDE Preenchido).

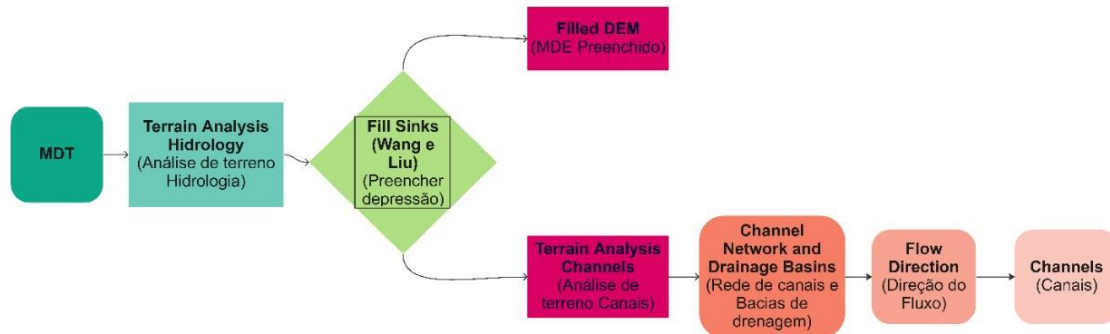


Figura 2: Fluxo de extração de Drenagem pelo SAGA GIS

Os parâmetros empregados no SAGA GIS para esta pesquisa constam na Figura 3, sendo as camadas vetoriais resultantes salvas como arquivo

Geopackage (Campos et al., 2021; Tremmel, 2023) para posterior análise no QGIS.

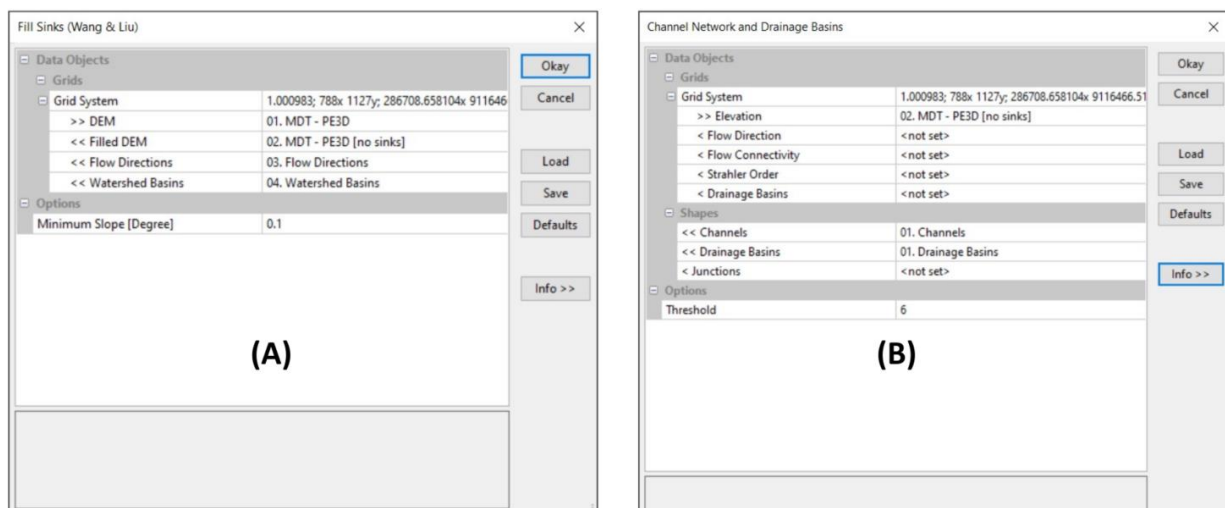


Figura 3: Parâmetros utilizados no SAGA GIS: (a) preenchimento de depressões (b) geração de rede drenagem e bacias.

Rede de drenagem no GRASS

A Figura 4 apresenta o fluxograma das etapas utilizadas no processo de extração da rede de drenagem utilizando as ferramentas GRASS (GRASS Development Team, 2023). Para corrigir

o MDT neste software, foi utilizada a ferramenta raster *r.fill.dir* para preencher as depressões, resultando no arquivo raster *Depression DEM* (MDE sem depressão).

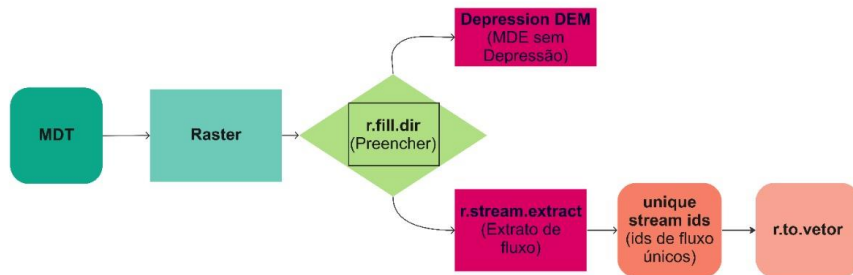


Figura 4: Fluxo de extração de Drenagem pelo SAGA GIS.

Na etapa seguinte foi utilizada a ferramenta *r.stream.extract*, responsável pelo cálculo do fluxo e geração de um raster de acumulação para drenagem (*unique stream ids*), considerando-se limiares mínimos dados em unidade de células (pixels). Por fim, foi utilizada a ferramenta *r.to.vetor* para exportar as linhas de drenagem como arquivo vetorial.

Nesta pesquisa, foram considerados os seguintes parâmetros: 30.000 pixels para a acumulação de fluxo mínima para drenagem e 50 pixels para excluir segmentos de fluxo menores que as células. Na Figura 5, é apresentado um modelo criado no QGIS com o fluxo de trabalho e parâmetros utilizados.

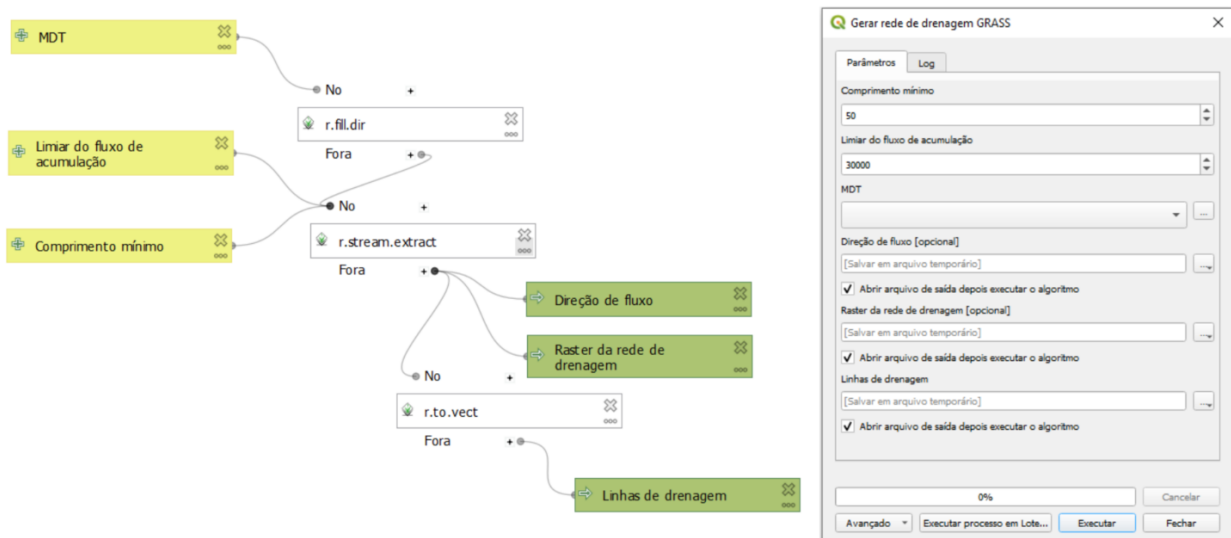


Figura 5: Modelo do QGIS com as ferramentas GRASS e parâmetros utilizados.

Aquisição manual da rede de drenagem

A aquisição vetorial da rede de drenagem que serviu como referência para a comparação e análise de qualidade resultante do GRASS e SAGA GIS, foi realizado considerando-se a interpretação

tridimensional e aquisição manual no QGIS das feições na escala 1:1.000. Para esse processo, utilizou-se conjuntamente o ortomosaico, MDS e MDT do PE3D, conforme observado na Figura 6.



Figura 6: Rede de drenagem de referência em 3D

Avaliação da Completude

A avaliação da Completude foi realizada conforme (Lima et al., 2022), utilizando a medição de porcentagem do comprimento de linha dentro do *buffer*, medindo-se os valores de excesso

(comissão) e omissão, como mostra a Figura 7. Nesta medição, considera-se os valores de Erro Máximo (EM) do PEC-PCD para as escalas 1:10.000, 1:5.000, 1:2.000 e 1:1.000.

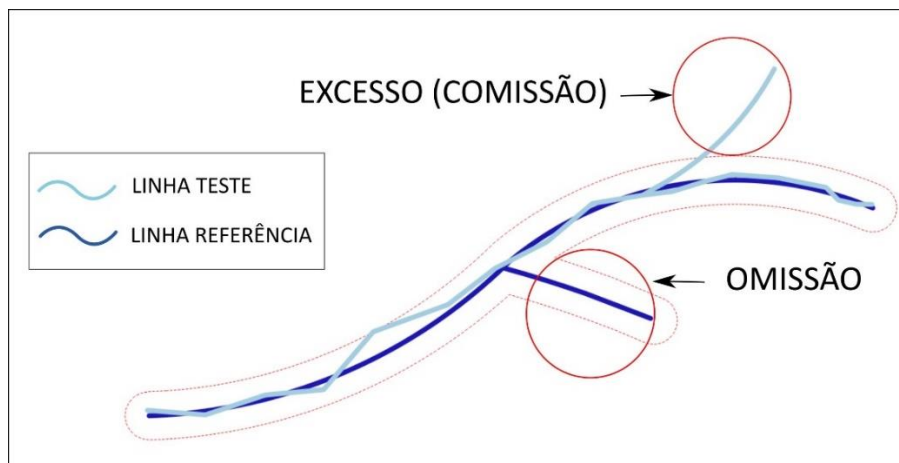


Figura 7: Avaliação da completude da rede de drenagem.

Método dos Retângulos Equivalentes

Já para a avaliação da acurácia posicional das redes de drenagem se utilizou do Método dos Retângulos Equivalentes (MRE) proposto por Ferreira da Silva & Cintra (1999), sendo o PEC-PCD obtido pelos critérios definidos por (França, Silva, et al., 2019) para feições lineares.

A Figura 8, apresenta um exemplo de uma aplicação do MRE, nela, tem-se as representações das feições A e B para uma feição F e seu respectivo retângulo equivalente de lados x_1 e x_2 , onde a área S e perímetro (2p) são obtidos pelas equações 1 e 2, respectivamente.

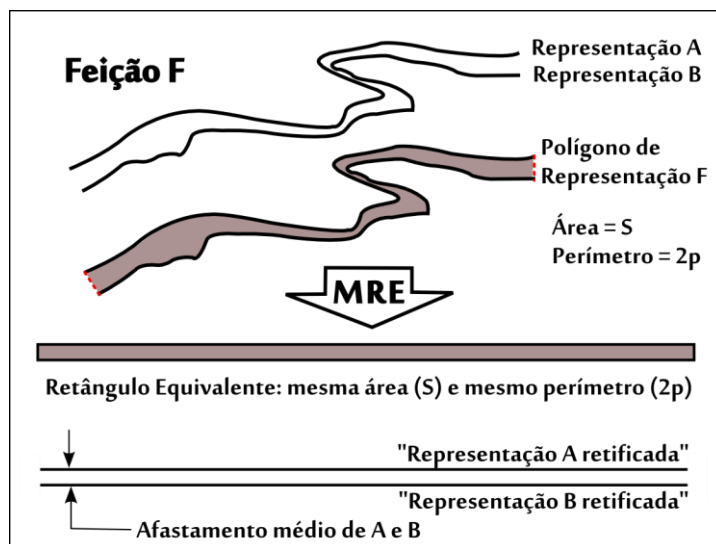


Figura 8: Método do Retângulo Equivalente (Ferreira da Silva & Cintra, 1999)

$$S = x_1 \cdot x_2$$

(1)

$$x_1 = \frac{p - \sqrt{p^2 - 4S}}{2}$$

(4)

$$2p = 2x_1 + 2x_2$$

(2)

De (1) e (2) é obtido a equação quadrática

(3):

$$\begin{aligned} x_2 &= p - x_1 \\ S &= x_1 \cdot (p - x_1) \\ x_1^2 - px_1 + S &= 0 \end{aligned}$$

(3)

O valor de discrepância x_1 (lado menor do retângulo) pode ser calculado a partir da Equação 3, através da Fórmula de Bhaskara:

Avaliação da Acurácia Posicional pelo PEC-PCD para feições lineares

Os valores de referência para avaliação do PEC-PCD foram extraídos das Especificações Técnicas para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) e estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1: Valores em metros do Erro Máximo (EM) e o Erro Padrão (EP) para classificação do PEC-PCD para Conjunto de Dados Geoespaciais Vetoriais (CDGV) em grandes escalas.

Tabela 1: Valores em metros do Erro Máximo (EM) e o Erro Padrão (EP) para classificação do PEC-PCD para Conjunto de Dados Geoespaciais Vetoriais (CDGV) em grandes escalas.

Tipo	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
Planimetria	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70
	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00
	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00

Fonte: DSG (2016)

Para classificar o PEC-PCD das feições lineares, considerou-se o valor das discrepâncias ponderadas pelos respectivos comprimentos (França & Silva, 2018; França et al., 2019), atendendo-se dois critérios:

Primeiro critério: Uma amostra cuja soma dos comprimentos das feições com discrepâncias

inferiores ao EM deve ser incluída numa classe cartográfica (PEC-PCD) quando essa soma for superior a 90% do comprimento total. A Tabela 2 apresenta um exemplo de avaliação que aplica esse critério.

Tabela 2: Exemplo de avaliação do PEC-PCD considerando o Erro Máximo (EM).

Discrepância média	Comprimento (m)
0,79	40
0,87	10
0,41	30
1,36	20

Nesse caso, considerando a escala 1:2.000 e a classe B, onde o EM é de 1 metro (Tabela 1). A soma dos comprimentos em que a discrepância máxima é menor que o EM corresponde a 80,0 metros, ou 80% do comprimento total. Portanto, esta amostra não é classificada na classe B para a escala 1:2.000, entretanto se enquadra na classe C, pois 100% da extensão das feições possui discrepância menor que 1,6 metros.

Segundo Critério: O valor do Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático ponderado ($RMSE_w$) é comparado com o EP da tabela PEC-PCD. Se o valor for menor, a amostra pertencerá à classe avaliada. Se for maior, segue-se na tabela PEC-PCD até encontrar um caso em que o $RMSE_w$ seja menor ou, se não for encontrado, a amostra

seja considerada "não compatível" para qualquer uma das classes, chamada de classe "R".

O $RMSE_w$ é calculado pela Equação 5, onde dm e l correspondem, respectivamente, ao valor da discrepância média e do comprimento para cada feição de referência.

$$RMSE_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N dm_i^2 \cdot l_i}{\sum_{i=1}^N l_i}} \quad (5)$$

Para aplicação do MRE e a avaliação do PEC-PCD, foi desenvolvida uma ferramenta (*script*) em Python para o QGIS 3.28 (Figura 9), onde as camadas de entrada correspondem às linhas de referência e os polígonos de representação das discrepâncias da feição (França, 2022).

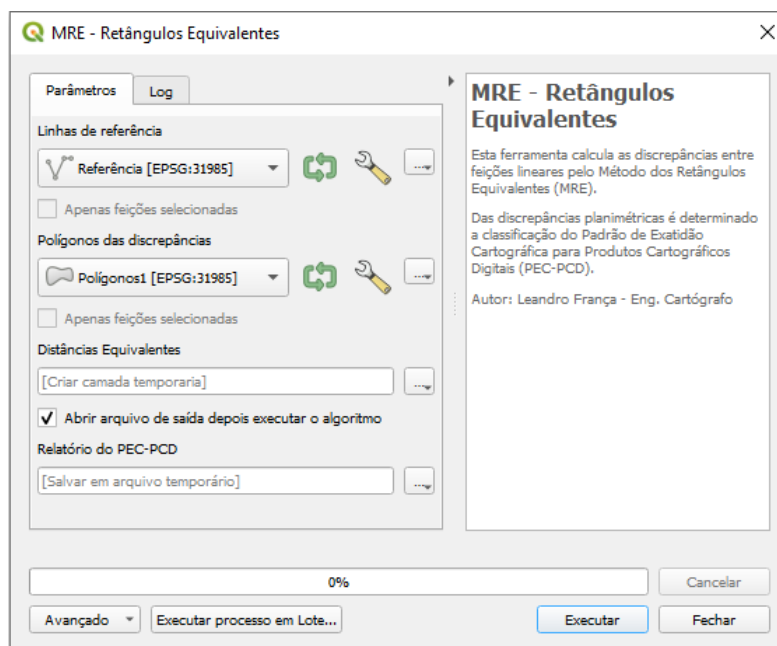


Figura 9: Ferramentas do QGIS para cálculo do MRE e PEC-PCD de feições lineares.

Esta ferramenta tem como saída, uma nova camada de polígonos com as distâncias equivalentes calculadas pelo MRE, bem como o

valor de comprimento da linha de referência que foi utilizada como peso para o cálculo $RMSE_w$ e classificação do PEC-PCD (França, 2023).

Resultados e discussão

O resultado das linhas de drenagem de referência, bem como das linhas geradas

automaticamente pelos softwares SAGA GIS e GRASS estão representadas na Figura 10. Já na Tabela 3 é mostrado o quantitativo de feições e o comprimento total em metros para cada caso.

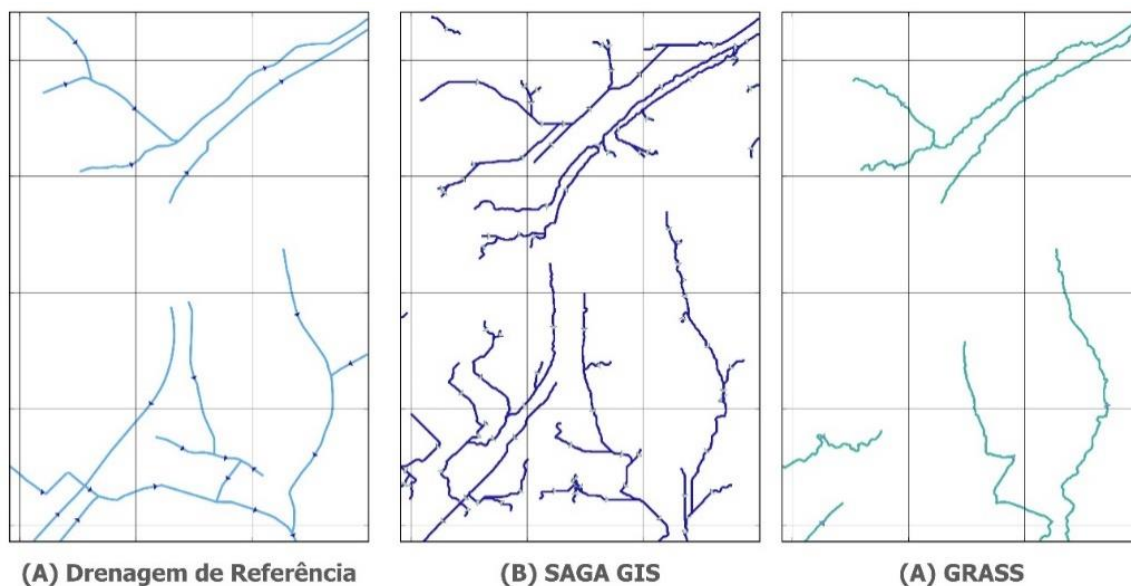


Figura 10: Resultados das redes de drenagem.

Tabela 3: Número de feições e o comprimento total em metros das linhas de drenagem.

Linhas de Drenagem	Número de feições	Comprimento Total
Referência	23	4.723,945
GRASS	8	3.695,641
SAGA GIS	97	8.987,802

Avaliação da Completude

A Tabela 4 apresenta os resultados do percentual de comprimento fora do buffer de referência (excesso ou comissão). Já a Tabela 5,

mostra o resultado do percentual de comprimento de linhas de referência fora do buffer das linhas resultantes do GRASS e SAGA GIS (omissão).

Tabela 4: Resultado de excesso (comissão) considerando as escalas cadastrais

Escala / EM	GRASS		SAGA GIS	
	Comprimento	Percentual	Comprimento	Percentual
1:1.000 / 1m	2744,347 m	74,26%	8181,245 m	91,03%
1:2.000 / 2m	1917,355 m	51,88%	7515,703 m	83,62%
1:5.000 / 5m	764,403 m	20,68%	6121,204 m	68,11%
1:10.000 / 10m	448,571 m	12,14%	4943,997 m	55,01%

Tabela 5: Resultado de omissão considerando as escalas cadastrais

Escala / EM	GRASS		SAGA GIS	
	Comprimento	Percentual	Comprimento	Percentual
1:1.000 / 1m	3772,134 m	79,85%	3925,419 m	83,10%
1:2.000 / 2m	2995,154 m	63,40%	3316,433 m	70,20%
1:5.000 / 5m	1998,753 m	42,31%	2116,012 m	44,79%
1:10.000 / 10m	1742,975 m	36,90%	1208,496 m	25,58%

Dos resultados, verifica-se inicialmente que utilizando um valor de EM maior, ou seja, menor escala, permite uma melhor análise da completude das feições geradas automaticamente, considerando-se que esta análise está correlacionada à acurácia posicional das feições.

Em relação ao elemento de qualidade Excesso (ou comissão), verifica-se que o resultado do GRASS obteve melhor resultado, onde 12,14% das linhas geradas ficaram distantes de 10 metros das linhas de referência.

Já na avaliação da Omissão, verifica-se que o resultado do SAGA GIS foi equiparado ao GRASS, chegando a ser uma pouco melhor na

escala 1:10.000. Isso fica bem destacado ao verificar o comprimento total das linhas geradas indicadas na Tabela 3.

No entanto, o excesso de linhas resultados do SAGA GIS, indica a geração de muitas linhas espúrias que não representam corretamente as feições de interesse.

Avaliação da Acurácia Posicional

A Figura 11 apresenta os polígonos gerados entre as linhas de referência e as linhas geradas automaticamente (homólogas) pelas ferramentas GRASS e SAGA GIS, totalizando 155 e 11 polígonos, respectivamente.

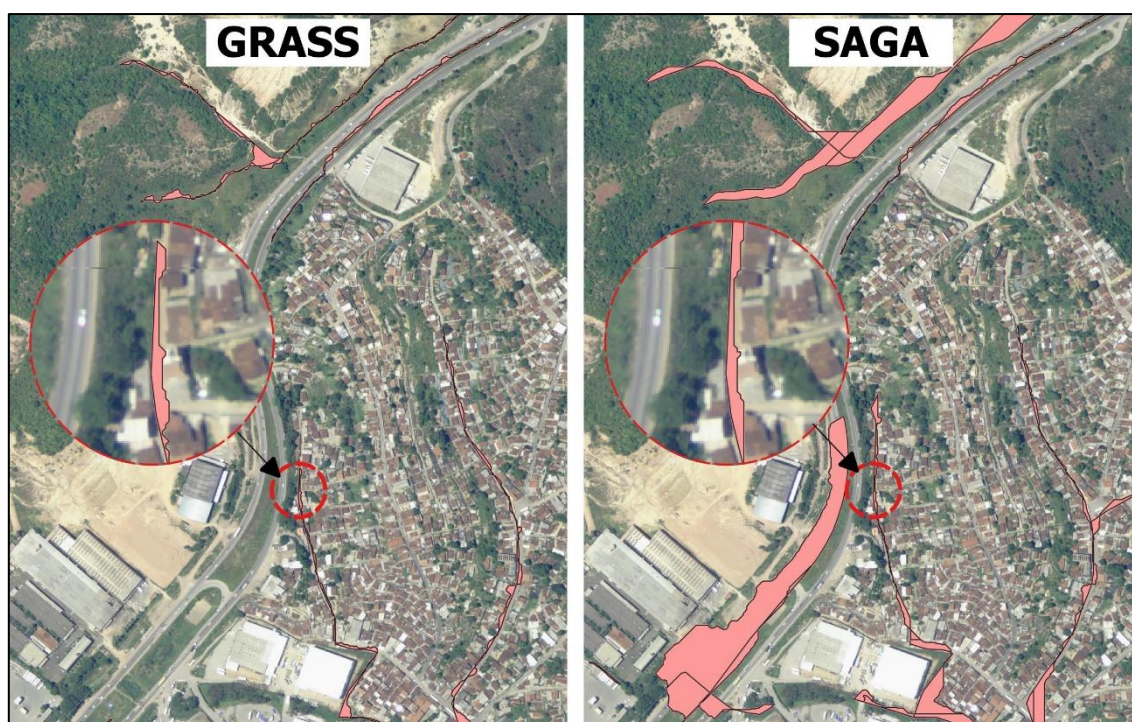


Figura 11: Polígonos gerados entre as linhas homólogas

O resultado das distâncias equivalentes calculadas pelo MRE e o peso (comprimento da linha de referência) podem ser obtidos na tabela de

atributos da camada resultante, conforme verificado na Figura 12.

Distâncias Equivalentes — Total de feições: 155, Filtrado: 155, Selecionado: 0

	discrep	peso
1	2,388396583766273	73,51517732944185
2	3,5342741951825003	20,011579514477344
3	1,7029902064062936	14,100586122635875
4	1,503832656018747	14,144770845714843
5	0,595622834555753	22,366500859875867
6	1,7815929628194782	13,35000026527737
7	6,622872536543142	154,56612966883426
8	1,7523722365233645	5,298271831014696
9	4,089512056689166	14,090664060756115

Mostrar todos os feições

Figura 12: Tabela de atributos com discrepâncias equivalentes e pesos.

As Figuras 13 e 14 apresentam os histogramas ponderados das discrepâncias calculadas pelo MRE, considerando-se os

comprimentos das linhas de referência correspondentes a cada polígono.

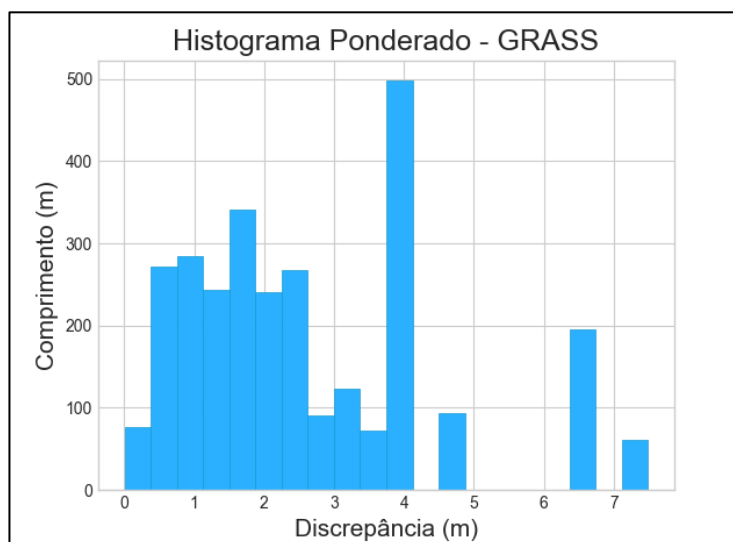


Figura 13: Histograma ponderado para os resultados do GRASS

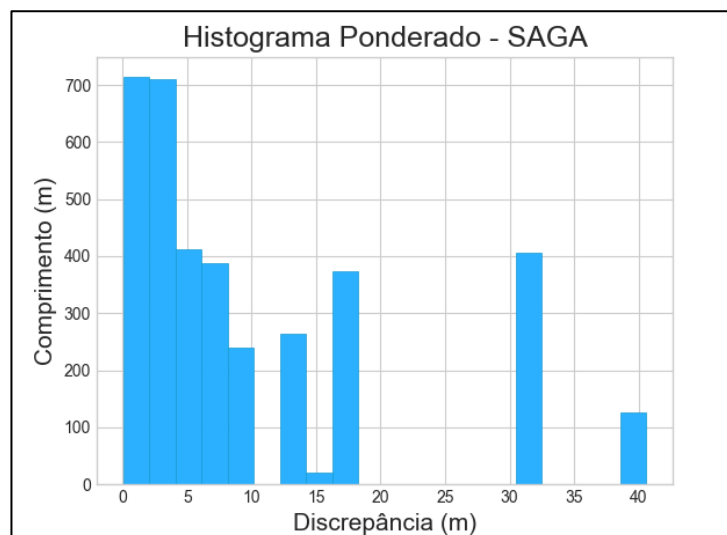


Figura 14: Histograma ponderado para os resultados do SAGA GIS

A Tabela 6 apresenta os valores das discrepâncias máximas e mínimas, a média ponderada, e a

RMSEw para cada caso. Já a Tabela 7 apresenta o resultado de classificação do PEC-PCD.

Tabela 6: Análise estatística das discrepâncias

Discrepâncias	GRASS	SAGA GIS
Máxima	7,4921	40,6186
Mínima	0,0032	0,0164
Média ponderada	2,6354	10,4797
RMSEw	3,1829	15,0446

Tabela 7: Classificação do PEC-PCD

	1:1.000	1:2.000	1:5.000	1:10.000	1:25.000	1:50.000	1:100.000	1:250.000
GRASS	R	R	R	C	A	A	A	A
SAGA GIS	R	R	R	R	R	C	B	A

Dos resultados, verifica-se que o as linhas de drenagem geradas pelo SAGA GIS não se adéqua a nenhuma das escalas do mapeamento cadastral (escalas de 1:10.000 a 1:1.000), no entanto, as linhas geradas no GRASS tiveram um melhor resultado quando comparado as linhas de referência, porém, mesmo assim não atendem às principais escalas do mapeamento cadastral.

No que se refere a utilização do MDE de 1 metro do PE3D, observa-se uma melhor acurácia posicional das linhas de drenagem geradas automaticamente por ambos os algoritmos com esse insumo, onde as discrepâncias médias ponderadas de 2,6m e 10,5m do GRASS e SAGA GIS, respectivamente, são bastante inferiores aos

resultados de 114m e 316m apresentados por Lima et al. (2022), bem como a raiz do erro médio quadrático ponderado de 3,2m e 15,0m são menores que 64,11m e 273,39m obtidos por Tolentino et al. (2017). Isso se deve ao melhor detalhamento do modelo altimétrico PE3D obtido com a tecnologia LiDAR quando comparado ao MDE SRTM (Mendonça & Paz, 2022).

Uma análise qualitativa da região com menor índice de acerto de ambas as ferramentas dos softwares pode ser vista na Figura 15, e pode se chegar às seguintes considerações:

- 1) Como os algoritmos automáticos se baseiam apenas no MDT, nas regiões mais baixas e de pouca declividade, as

linhas de drenagem geradas possuem maior afastamento das linhas de referência vetorizadas manualmente pela fotointerpretação do 3D da região.

2) O MDT do PE3D foi gerado a partir de uma filtragem de nuvem de pontos e interpolação desses pontos filtrados a fim de se gerar uma grade regular (raster). Nas regiões onde existe presença de canais que são atravessados por pontes ou rodovias, o MDT não

representa o nível por onde o fluxo de água passa e, portanto, não é hidrologicamente consistente nesses pontos.

3) A aquisição manual permite a identificação no ortomosaico de feições relativas à drenagem urbana: meio-fio, sarjetas, valetas (valas), descidas d'água, bueiros, entre outros elementos, que facilitam a vetorização manual das linhas de drenagem pelo operador.

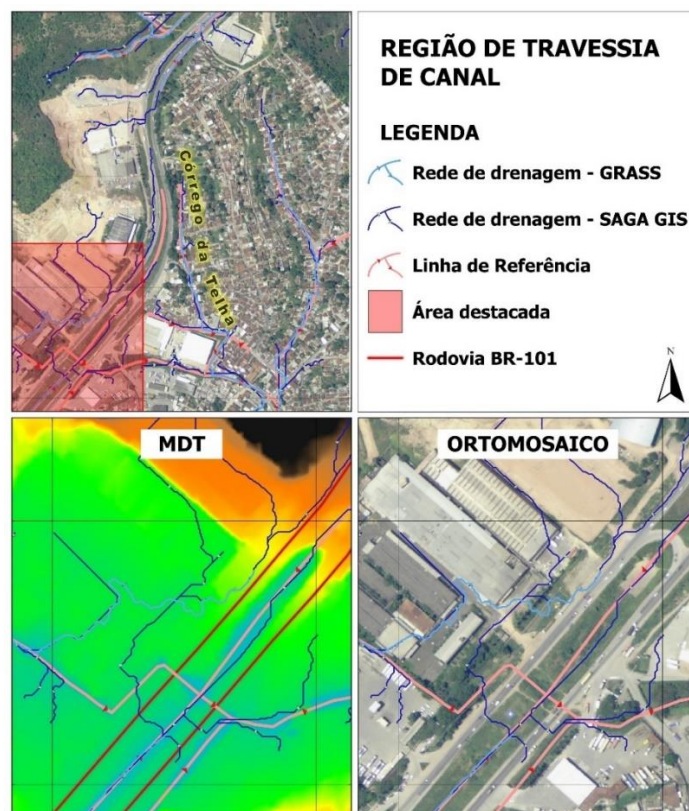


Figura 15: Região com menor índice de acerto dos algoritmos.

Conclusões

Dos resultados, observa-se que os algoritmos de geração automática da rede de drenagem do GRASS e SAGA GIS não apresentaram acurácia nem completude satisfatória para aplicações em projetos de engenharia em escalas maiores que 1:5.000.

Apesar do PEC-PCD das linhas geradas não atender escalas maiores, o uso do MDE de 1 metro do PE3D destacou uma notável precisão posicional, resultando na discrepância média mais baixa registrada de 2,6 metros com o software GRASS. Esse desempenho supera consideravelmente os resultados frequentemente encontrados na literatura, os quais geralmente

empregam MDEs SRTM ou similares, que são menos precisos.

Na comparação dos dois softwares, o GRASS apresentou melhor desempenho, onde na análise da qualidade, os resultados de Completude e, principalmente, de Acurácia Posicional foram superiores.

Entretanto, também foram identificadas inconsistências no MDT, sem a devida filtragem de obras de arte como pontes, passagens sobre canais, bueiros, entre outros, que interferiram na correta geração da rede de drenagem principalmente na região mais ao sudoeste da área de estudo.

A rede de drenagem utilizada como referência foi obtida por vetorização manual e

interpretação 3D de feições utilizando o Ortomosaico, MDS e MDT, e não somente do MDT, isso traz melhor confiabilidade na coleta das feições da rede de drenagem, diferentemente de como ocorre nos algoritmos automáticos utilizados nesta pesquisa que utilizaram apenas o MDT.

No entanto, redes de referência podem ser utilizadas para corrigir o MDT e torná-lo hidrologicamente consistente, empregando técnicas de como o “*Burn Stream Network into DEM*” para a incorporação da rede vetorial ao MDT (Dantas & Paz, 2021). Além disso, sugerem-se outros estudos sobre os parâmetros do SAGA GIS e GRASS. Novas comparações com os resultados de outros algoritmos e plugins do QGIS, ou de outros softwares podem ser realizadas usando a mesma metodologia desta pesquisa.

Outro ponto a ser considerado, é a otimização da filtragem na nuvem de pontos utilizando, por exemplo o *Cloth Simulation Filter* (CSF) (Cai et al., 2019) ou o *Multi-Scale Dimensionality Classification* (Huang et al., 2020) para a extração de um MDT aprimorado e, consequentemente da rede de drenagem, inclusive utilizando dados de melhor resolução obtido por perfilamento laser (LiDAR e fotogrametria).

Por fim, embora os métodos automáticos apresentados neste trabalho não tenham se mostrados satisfatórios para o nível de detalhamento exigido nas escalas cadastrais e aplicações de engenharia urbana, é importante destacar que a metodologia elaborada neste estudo pode servir de referência para a aquisição manual da rede de drenagem, em especial para a validação de completude da rede e direcionamento do fluxo.

Agradecimentos

Os autores do trabalho agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Referências

- Amatulli, G., Garcia Marquez, J., Sethi, T., Kiesel, J., Grigoropoulou, A., Üblacker, M. M., Shen, L. Q., & Domisch, S. 2022. Hydrography90m: a new high-resolution global hydrographic dataset. *Earth System Science Data*, 14(10), 4525–4550. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4525-2022>
- Baye, M. 2020. Watershed Delineation by Arc Hydro Tools. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 9(5), 956–961. <http://dx.doi.org/10.21275/SR20516144818>
- Bornaetxea, T., & Marchesini, I. 2022. r.survey: a tool for calculating visibility of variable-size objects based on orientation. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(3), 429–452. <https://doi.org/10.1080/13658816.2021.1942476>
- Cai, S., Zhang, W., Liang, X., Wan, P., Qi, J., Yu, S., Yan, G., & Shao, J. 2019. Filtering Airborne LiDAR Data Through Complementary Cloth Simulation and Progressive TIN Densification Filters. *Remote Sensing*, 11(9), 1037. <https://doi.org/10.3390/rs11091037>
- Campos, A. C., de Jesus Santos, C. A., & Moreira, C. O. 2021. VGI, Geotecnologias Open Source e Gestão do Turismo em Coimbra, Portugal. *Revista GeoNordeste*, 33(1), 06-25.
- Cimburova, Z., & Blumentrath, S. 2022. Viewshed-based modelling of visual exposure to urban greenery – An efficient GIS tool for practical planning applications. *Landscape and Urban Planning*, 222, 104395. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104395>
- Costache, R., Hong, H., & Pham, Q. B. 2020. Comparative assessment of the flash-flood potential within small mountain catchments using bivariate statistics and their novel hybrid integration with machine learning models. *Science of the Total Environment*, 711, 134514. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134514>
- Dantas, A. A. R., & Paz, A. R. 2021. Use of HAND terrain descriptor for estimating flood-prone areas in river basins. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 56(3), 501–516. <https://doi.org/10.5327/Z21769478892>
- De Arruda Gomes, M. M., de Melo Verçosa, L. F., & Cirilo, J. A. 2021. Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. *Natural Hazards*, 108(3), 3121–3157. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04817-3>
- DSG. 2016. *Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)* - 1ª Edição.
- Ferreira da Silva, L. F. C., & Cintra, J. P. 1999. Quantificação de Discrepâncias entre Feições Lineares por Retângulos Equivalentes. *Revista Brasileira de Cartografia*, 51, 1-8.
- França, L. L. S. de 2023, maio 25. *Como instalar script Python no QGIS – caso discrepâncias*

- de feições lineares. YouTube. <https://youtu.be/38ILIVqkH0w>
- França, L. L. S. 2022. Script Python: MRE - Retângulos Equivalentes. GitHub. <https://github.com/LEOXINGU/doutorado/blob/main/QGIS/processing/scripts/MRE.py>
- França, L. L. S. de, Penha, A. de L. T. da, & Carvalho, J. A. B. de. 2019. Comparison between absolute and relative positional accuracy assessment - a case study applied to Digital Elevation Models. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25(1). <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000100003>
- França, L. L. S. de, & Portugal, J. L. 2022. Consistência Topológica de Dados Geoespaciais. *Revista Brasileira De Cartografia*, 74(3), 480–498. <https://doi.org/10.14393/rbcv74n3-61508>
- França, L. L. S. de, Silva, T. A. da, Passos, J. B. dos, Barros, E. R. de O., & Seixas, A. de. 2019. Methodology for the positional accuracy assessment of GNSS tracking data collected from navigation receivers. *Anais Do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- França, L. L. S. de ., & Silva, L. F. C. F. da .2018. Comparison between the Double Buffer Method and the Equivalent Rectangle Method for the quantification of discrepancies between linear features. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 24(3), 300–317. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702018000300020>
- Gabriels, K., & Willems, P. 2022. An iterative runoff propagation approach to identify priority locations for land cover change minimizing downstream river flood hazard. *Landscape and Urban Planning*, 218, 104262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104262>
- GRASS Development Team. 2023. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2. Open Source Geospatial Foundation*. GRASS Development Team. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.stre.am.extract.html>
- Huang, R., Hong, D., Xu, Y., Yao, W., & Stilla, U. 2020. Multi-Scale Local Context Embedding for LiDAR Point Cloud Classification. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(4), 721–725. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2927779>
- Ighile, E. H., Shirakawa, H., & Tanikawa, H. 2022. Application of GIS and machine learning to predict flood areas in Nigeria. *Sustainability*, 14(9), 5039. <https://doi.org/10.3390/su14095039>
- Lemenkova, P. 2021. SAGA GIS for Computing Multispectral Vegetation Indices by Landsat TM for Mapping Vegetation Greenness. *Contemporary Agriculture*, 70(1–2), 67–75. <https://doi.org/10.2478/contagri-2021-0011>
- Li, Z., Shi, P., Yang, T., Wang, C., Yong, B., & Song, Y. 2022. An Improved D8-LTD for the Extraction of Total Contributing Area (TCA) by Adopting the Strategies of Path Independency and Local Dispersion. *Water Resources Research*, 58(2), e2021WR030948. <http://dx.doi.org/10.1029/2021WR030948>
- Lima, D. M., Paz, A. R. da, Lopes, A. G., Sena, T. de S., & Claudino, C. M. de A. 2022. Avaliação da Qualidade da Rede de Drenagem Fornecida pelo MERIT Hydro: uma Base de Dados com a Rede Hidrográfica Disponibilizada em Escala Global. *Revista Brasileira de Cartografia*, 74(2), 214–227. <https://doi.org/10.14393/rbcv74n2-63736>
- Mendonça, R. L., & Paz, A. R. da. 2022. LiDAR data for topographical and river drainage characterization: capabilities and shortcomings. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 27(42). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220092>
- Miranda, G. H. B., Ramos, R. S., Santos, A. de P. dos, Barbosa, L. da S., Cunha, M. M., & Medeiros, N. das G. 2023. Avaliação da Acurácia Posicional e da Completude em Áreas de Pivôs Centrais Identificadas com a Transformada de Hough em uma Análise Multitemporal. *Revista Brasileira de Cartografia*, 75, 1–21. <https://doi.org/10.14393/rbcv75n0a-63468>
- Mose Ferreira, L. D. C., Francisco, C. N., & Fernandes, P. J. F. 2020. Análise do modelo digital de altura derivado de perfilamento LiDAR em relevo montanhoso. *Revista Tamoios*, 16(2). <https://doi.org/10.12957/tamoios.2020.48507>
- Muhadi, N. A., Abdullah, A. F., Bejo, S. K., Mahadi, M. R., & Mijic, A. 2020. The Use of LiDAR-Derived DEM in Flood Applications: A Review. *Remote Sensing*, 12(14), 2308. <https://doi.org/10.3390/rs12142308>
- Paz, O. L. de S. da, & Sampaio, T. V. M. 2021. Análise estatística dos parâmetros

- geomorfológicos do relevo em bacias hidrográficas de primeira ordem perenes e intermitentes no oeste paranaense. *Geography Department University of Sao Paulo*, 41, e174393. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.174393>
- Pereira Toniolo, B., Collins da Cunha e Silva, D., & Lourenço, R. W. 2021. Estudo comparativo de rede de drenagem na SABESP Oeste com auxílio de provedores SIG. *Geografia Em Atos (Online)*, 5, 1–20. <https://doi.org/10.35416/geoatos.2021.8081>
- Ribeiro, A. A. da S., Oliveira, G. A. de, Cirilo, J. A., Alves, F. H. B., Batista, L. F. D. R., & Melo, V. B. 2020) Floodplain reconstitution based on data collected via smartphones: a methodological approach to hydrological risk mapping. *RBRH*, 25. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190179>
- Rocha, J., Duarte, A., Silva, M., Fabres, S., Vasques, J., Revilla-Romero, B., & Quintela, A. 2020. The Importance of High Resolution Digital Elevation Models for Improved Hydrological Simulations of a Mediterranean Forested Catchment. *Remote Sensing*, 12(20), 3287. <https://doi.org/10.3390/rs12203287>
- Saito, Y. K., Viana, L. J. F., Silva, S. R. da, Fonseca, I. G. R. da, & Santos, A. de P. dos. 2019. Métodos Distância de Hausdorff e Influência do Vértice a partir da densificação de feições lineares. *Revista Brasileira de Cartografia*, 71(2), 598–618. <https://doi.org/10.14393/rbcv71n2-44126>
- Sampaio, T. V. M., & Rocha, J. 2022. On the quality of the drainage network cartographic representation. *Ecological Indicators*, 143, 109350. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109350>
- Sidek, L. M., Jaafar, A. S., Majid, W. H. A. W. A., Basri, H., Marufuzzaman, M., Fared, M. M., & Moon, W. C. 2021. High-Resolution Hydrological-Hydraulic Modeling of Urban Floods Using InfoWorks ICM. *Sustainability*, 13(18), 10259. <https://doi.org/10.3390/su131810259>
- Silva, I. C. da, & Furrier, M. 2019. Análise morfológica e morfométrica das sub-bacias dos rios cascata e tinto, litoral norte do estado da Paraíba – Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20(2). <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i2.1505>
- Sit, M., Sermet, Y., & Demir, I. 2019. Optimized watershed delineation library for server-side and client-side web applications. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0068-9>
- Tolentino, F. M., Silva, C. R. da, & Santil, F. L. de P. 2018. Avaliação da acurácia posicional de redes de drenagem obtidas a partir de modelos SRTM e ASTER com o uso dos softwares ARCGIS e QGIS. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(7). <https://doi.org/10.14393/rbcv69n7-43989>
- Tremmel, M. 2023. COMTILES: a case study of a cloud optimized tile archive format for deploying planet-scale tilsets in the cloud. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 231-237. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W7-2023-231-2023>
- Tschiedel, A. da F., Paiva, R. C. D. de, & Fan, F. M. 2020. Use of large-scale hydrological models to predict dam break-related impacts. *RBRH*, 25. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190128>
- Zanandrea, F., Michel, G. P., Kobiyama, M., & Cardozo, G. L. 2019. Evaluation of different DTMs in sediment connectivity determination in the Mascarada River Watershed, southern Brazil. *Geomorphology*, 332, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.005>