

**EXTRAÇÃO AUTOMATIZADA DE DRENAGENS E NASCENTES:
AVALIAÇÃO DOS ALGORITMOS HIDROLÓGICOS**

AUTOMATED EXTRACTION OF DRAINS AND SPRINGS: EVALUATION OF HYDROLOGICAL
ALGORITHMS

EXTRACCIÓN AUTOMATIZADA DE DESAGUES Y MANANTIALES: EVALUACIÓN DE
ALGORITMOS HIDROLÓGICOS

Débora Maciel Castelo Holanda
Doutoranda em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC)

Email: debholand@alu.ufc.br

Orcid: 0000-0002-1584-8296

Carlos Henrique Sopchaki
Professor do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC)

Email: carlos.geografia@ufc.br

Orcid: 0000-0001-8127-4529

Resumo

A extração automática de feições hidrológicas a partir de modelos digitais de elevação tem se consolidado como uma ferramenta essencial para o mapeamento e a análise de elementos hidrológicos. Dessa forma, este estudo teve como objetivo comparar o desempenho das ferramentas SAGA GIS, GRASS GIS e TauDEM, disponíveis na plataforma QGIS, na extração automatizada de drenagem e nascentes, utilizando os padrões e métodos nativos de cada algoritmo. Para execução da análise foi escolhida como área de estudo a bacia hidrográfica do rio Pacoti (CE), e como dado de entrada foi utilizado o MDE TanDEM-X, com resolução espacial de 12 metros. A avaliação considerou principalmente os métodos de tratamento de sumidouros dos modelos altimétricos, além da comparação dos dados de nascentes com informações validadas em campo. Os resultados mostraram que o SAGA GIS apresentou melhor desempenho na geração de redes de drenagem contínuas ao utilizar o método de Wang e Liu (2007), em comparação ao método de Planchon e Darboux (2001). O TauDEM, por sua vez, destacou-se na identificação de nascentes, enquanto o GRASS GIS apresentou as menores distâncias médias entre as nascentes reais e as extraídas automaticamente, demonstrando também uma eficiência no apoio à identificação de nascentes em campo. Por fim, demonstrou-se que o desempenho de cada ferramenta está diretamente relacionado aos métodos utilizados para o tratamento de sumidouros. Além disso, observou-se que a extração de dados de modelos altimétricos possui potencial para subsidiar mapeamentos de áreas prioritárias voltadas à identificação de nascentes em campo.

Palavras-chave: Mapeamento hidrológico. Nascentes. Rede de drenagem. Extração automática.

Abstract

The automatic extraction of hydrological features from digital elevation models has become an essential tool for mapping and analyzing hydrological elements. Therefore, this study aimed to compare the performance of the SAGA GIS, GRASS GIS, and TauDEM tools available on the QGIS platform in the automated extraction of drainage networks and springs, using the native patterns and methods of each algorithm. The Pacoti River basin (Ceará, Brazil) was selected as the study area, and the TanDEM-X DEM with a spatial resolution of 12 meters was used as the input dataset. The evaluation mainly considered the sink-filling methods applied to the elevation models, in addition to comparing the extracted spring data with field-validated information. The results showed that SAGA GIS presented better performance in generating continuous drainage networks when using the Wang and Liu (2007) method, compared to the Planchon and Darboux (2001) approach. TauDEM, in turn, performed best in spring identification, while GRASS GIS showed the smallest average distances between real and automatically extracted springs, also demonstrating efficiency in supporting field spring identification. Finally, the study demonstrated that the performance of each tool is directly related to the methods used for sink treatment. Furthermore, the extraction of data from elevation models proved to be a valuable approach for supporting the mapping of priority areas for field-based spring identification.

Keywords: Hydrological mapping. Springs Ecosystems. Drainage network. Automatic extraction.

Resumen

La extracción automática de características hidrológicas a partir de modelos digitales de elevación se ha convertido en una herramienta esencial para el mapeo y análisis de elementos hidrológicos. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo comparar el desempeño de las herramientas SAGA GIS, GRASS GIS y TauDEM, disponibles en la plataforma QGIS, en la extracción automatizada de drenaje y manantiales, utilizando los patrones y métodos nativos de cada algoritmo. Se seleccionó la cuenca del río Pacoti (Ceará, Brasil) como área de estudio y se utilizó el MDE TanDEM-X, con una resolución espacial de 12 metros, como datos de entrada. La evaluación consideró principalmente los métodos de tratamiento de sumideros de los modelos altimétricos para comparar los datos digitales de manantiales con información de campo validada. Los resultados mostraron que SAGA GIS tuvo un mejor desempeño en la generación de redes de drenaje continuas utilizando el método de Wang y Liu (2007) en comparación con el método de Planchon y Darboux (2001). TauDEM, por su parte, destacó en la identificación de manantiales, mientras que GRASS GIS presentó las menores distancias promedio entre los manantiales reales y los extraídos automáticamente, demostrando también su eficiencia para apoyar la identificación de manantiales en campo. Finalmente, se demostró que el rendimiento de cada herramienta está directamente relacionado con los métodos empleados para el tratamiento de sumideros. Además, se observó que la extracción de datos de modelos altimétricos tiene el potencial de contribuir a la cartografía de áreas prioritarias para la identificación de manantiales en el terreno.

Palavras clave: Cartografía hidrológica. Manantiales. Drenaje. Extracción automatizada.

1. Introdução

A produção de dados espaciais constitui uma etapa essencial para o conhecimento do território e, conseqüentemente, para o desenvolvimento de análises científicas, especialmente no que se refere aos elementos naturais.

No que diz respeito à água, esses dados tornam-se ainda mais relevantes, visto que esse recurso tem sido cada vez mais ameaçado pela intensidade das atividades que impactam a dinâmica do planeta. Conhecer e, sobretudo, dispor de instrumentos para monitorar, prevenir e agir de forma eficaz é essencial para a gestão responsável do meio ambiente.

Nesse contexto, a evolução das geotecnologias tem ampliado de forma significativa as possibilidades de análise espacial voltadas à compreensão dos processos naturais. Desse modo, os modelos digitais de elevação - MDE e os modelos digitais do terreno – MDT tornaram-se ferramentas fundamentais para a obtenção de informações topográficas e ambientais.

No campo dos recursos hídricos, esses produtos têm se mostrado essenciais para a delimitação de bacias hidrográficas, o mapeamento de redes de drenagem e a modelagem do escoamento superficial, subsidiando estudos ambientais e estratégias de gestão da água (Buarque *et al.*, 2009, Bosquillia *et al.*, 2015, Li *et al.*, 2020, Bortolini *et al.*, 2025).

Entretanto, a confiabilidade das informações extraídas depende diretamente da qualidade dos modelos altimétricos e dos algoritmos hidrológicos empregados. Entre as variáveis que influenciam o desempenho desses algoritmos, destacam-se o tipo de modelo de entrada (MDE ou MDT), a resolução espacial e o método utilizado na extração das feições hidrológicas (McMaster, 2002, Garbrecht e Martz, 2003, Santos *et al.*, 2011, Oliveira *et al.*, 2012, Ariza-Villaverde *et al.*, 2015, Faria *et al.*, 2023).

Com base nesse contexto, este estudo teve como objetivo comparar o desempenho das ferramentas SAGA GIS (Sistema de Análises Geocientíficas Automatizado), GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*) e TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), disponíveis na plataforma QGIS, quanto à extração automatizada de drenagens e nascentes. Buscou-se analisar os resultados a partir da manutenção dos parâmetros e métodos padrão de cada ferramenta.

Para execução dos processos nas ferramentas hidrológicas é necessário a inserção de um MDE como arquivo de entrada. Nesse estudo foi utilizado o *TerraSAR add-on for Digital Elevation Measurement* - TanDEM-X, obtido pelo Centro Aeroespacial Alemão. Este produto escolhido por representar o produto orbital com melhor resolução espacial disponível gratuitamente (12 metros nativo). A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Pacoti, localizada na região serrana do estado do Ceará, cuja morfologia acidentada e

presença de nascentes tornam-se adequadas para testar o desempenho comparativo dos algoritmos.

Os resultados obtidos foram organizados com base nas informações geradas por cada ferramenta, com ênfase nas feições de drenagem e na identificação de nascentes, sendo posteriormente confrontados com dados de campo validados, a fim de avaliar a coerência e o potencial de aplicação dos produtos automatizados em estudos hidrológicos e ambientais.

2. Extração automática de dados hidrológicos

No QGIS, as ferramentas TauDEM, SAGA e GRASS destacam-se por dispor de recursos para análise hidrológica que executam algoritmos para a extrair essas informações. Cada algoritmo adota um método específico que comanda essa ação.

De modo geral, os algoritmos operam em duas etapas: 1. Pré-processamento – Etapa voltada à correção do modelo altimétrico com a remoção ou preenchimento de sumidouros, suavização de ruídos e preparação da superfície para o cálculo do escoamento hídrico e 2. Extração das feições – Fase em que são calculadas as direções de fluxo, acúmulo de água, aplicação de limiar para delimitação da rede de drenagem, bacias hidrográficas, nascentes e outras variáveis hidrológicas.

Em relação ao pré-processamento, os métodos mais usuais para o preenchimento de depressões em modelos altimétricos são os descritos por Jenson e Domingue, (1988) (convencional), o de Planchon e Darboux, (2001) (baseado em inundação e drenagem) e o de Wang e Liu (2007) (baseado em elevação de vazamento e busca de custo mínimo).

O Método de Jenson e Domingue (1988) é o algoritmo convencional e mais implementado em pacotes de programa de GIS, como a exemplo do GRASS. Sua abordagem de condicionamento inicial visa produzir um modelo sem depressões, direções e acúmulo de fluxo. Inicialmente, depressões de célula única são preenchidas elevando a célula à elevação do vizinho mais baixo. Para depressões complexas ou aninhadas, o método rastreia o caminho dos pontos de vazamento adjacentes até a borda do modelo. O limiar de preenchimento é definido pelo ponto de vazamento de maior elevação nesse caminho, e todas as células da bacia abaixo desse valor são elevadas a ele. Embora possa lidar com depressões complexas de uma só vez, este método é computacionalmente intensivo e demorado, especialmente para grandes conjuntos de dados.

O método de Planchon e Darboux (2001) propôs uma abordagem distinta e mais rápida que as metodologias tradicionais. Em vez de preencher as depressões gradualmente, o algoritmo inunda primeiro a superfície com uma camada espessa de água (inicializando com altitudes infinitas, exceto nas bordas) e, em seguida, drena iterativamente o excesso de

água. O método garante que a superfície final seja sempre maior ou igual à superfície original e que cada célula tenha um caminho descendente definido até a borda do modelo.

O método de Wang e Liu (2007) é projetado para ser altamente eficiente para atuar com MDEs/MDTs de alta resolução espacial, como os gerados por LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Os pilares do método são o conceito de elevação de vazamento e a técnica de busca de custo mínimo. A elevação de vazamento de uma célula é a elevação mínima que ela precisa ser elevada para garantir o fluxo para uma saída na borda. O algoritmo progressivamente propaga os valores de elevação de vazamento a partir dos *outlets* (saídas) para as células interiores. O "custo" na busca é a própria elevação de vazamento, e o método utiliza uma fila de prioridade para expandir o caminho a partir da célula de menor custo, garantindo que o caminho ótimo seja encontrado. Uma vantagem significativa é que o método pode simultaneamente determinar os caminhos de fluxo, preencher as depressões e realizar a partição espacial das bacias hidrográficas em uma única passagem de processamento. Seu desempenho é uma grande melhoria em relação aos métodos anteriores e não é influenciado pela complexidade do terreno ou dos sumidouros.

Assim, cada ferramenta se utiliza de um método deste descrito constituindo seu próprio caminho para extrair os dados automáticos. Nesse contexto, o TauDEM, desenvolvido pela *Utah State University* - USU, utiliza em seu processamento o método descrito por Jenson e Domingue (1988) para o preenchimento dos sumidouros (depressões contidas do modelo altimétrico). A execução dessa ferramenta para a extração de dados é, comumente, operacionado por meio de linhas de comando executados no prompt. O diferencial dessa ferramenta é a exigência da inserção de um exutório conhecido para formação das bacias e sub-bacias.

O GRASS GIS também adota o método de Jenson e Domingue (1988), contudo, não opera através de linhas de comando como o TauDEM nem exige a inserção de um ponto conhecido do exutório, ainda que também disponha de um caminho em que pode ser incluída esta informação. O programa possui módulos específicos onde se encontram todos os comandos automatizados para o fluxo do processo.

O SAGA apresenta dois métodos para a resolução de sumidouros dos modelos de entrada. O primeiro foi proposto por Wang e Liu (2007), em contraposição ao método convencional de Jenson e Domingue (1988), cuja limitação principal era a lentidão computacional. Nesse sentido, Wang e Liu (2007) desenvolveram um procedimento de preenchimento de depressões capaz de otimizar a aplicação em modelos de maior extensão, reduzindo o tempo de execução. De forma simultânea, o algoritmo consegue determinar a direção do fluxo de drenagem e realizar a delimitação de bacias hidrográficas.

O segundo método, descrito por Planchon e Darboux (2001), introduziu uma abordagem inovadora ao lidar com as depressões de forma gradativa, diferenciando-se dos modelos usuais. Esse procedimento ocorre em duas etapas: (1) inundação de toda a superfície com uma camada espessa de água e (2) retirada do excesso. Essa lógica confere maior rapidez e simplicidade ao algoritmo. Nesse caso, os sumidouros podem ser representados como superfícies horizontais, úteis para o cálculo de armazenamento ou como superfícies ligeiramente inclinadas, a partir das quais são extraídas as redes de drenagem superficial.

Para a segunda fase, relacionada a extração dos dados, encontram-se os algoritmos para o cálculo da direção do fluxo, e a adoção de um limiar mínimo para geração da rede de drenagem.

O método mais convencional para calcular a direção de fluxo é o D8 (*Eight Direction Pour Point Model*), que define o escoamento de cada célula para a vizinha de maior declividade descendente. Embora o D8 seja adequado para zonas de fluxo convergente, para a análise de fluxo terrestre ou em terrenos mais planos, podem ser preferidos métodos de fluxo múltiplo ou o D-infinity, que divide o fluxo entre, no máximo, duas células vizinhas.

Uma vez que a matriz de área de drenagem acumulada é calculada, a delimitação da rede de drenagem exige a definição de um limiar de área de drenagem mínima.

O método tradicional de limiar constante (ou único valor) é amplamente criticado por ser subjetivo (Matsunaga *et al.*, 2009, Wu *et al.*, 2019, Yan *et al.*, 2020, Li *et al.*, 2020), baseado em julgamento pessoal ou comparação visual, e por assumir uma paisagem homogênea, o que resulta em redes de drenagem que não refletem a realidade. Assim como, não representa a variabilidade das nascentes, dependente de fatores físicos complexos como clima, geologia e propriedades do solo. Para definir o limiar de forma mais objetiva, estudos propõem diversas abordagens, como: a identificação do ponto de quebra na relação entre inclinação local e área de contribuição, o uso de fluxo acumulado ponderado pela declividade para adequar o escoamento em superfícies planas, definindo o limiar por um "ponto de viragem" estatístico na distribuição de frequência, a definição de um limiar espacialmente variável através da caracterização e estratificação da paisagem com base em múltiplos fatores ambientais (clima, relevo, litologia), ou a determinação de um limiar objetivo por meio da normalização do escore padrão da área acumulada ponderada pela morfologia. Estas metodologias buscam definir o limiar com base em correlações com as características físico-naturais, reconhecendo que o uso de um único valor de limiar pode ser inadequado para bacias heterogêneas.

Nas ferramentas de análise hidrológica, o valor do limiar geralmente segue o método padrão de cada programa. Por exemplo, o GRASS GIS adota o valor 1 como limiar padrão,

enquanto o SAGA GIS utiliza o valor 5. Já no TauDEM, executado através das linhas de comando, geralmente é recomendado sob dois limiares distintos: o primeiro, com valor 100, o qual define o acúmulo de pixels sequenciados e a contribuição dos fluxos, e o segundo, com valor 200, onde é estabelecido a contribuição que chega ao exutório, delimitando assim a rede de drenagem. Para a avaliação comparativa das ferramentas, foram utilizados os valores padrão de cada uma, garantindo consistência na comparação dos resultados.

Assim, a compreensão dos métodos de pré-processamento e extração hidrológica em SIG evidencia que não há um algoritmo universalmente superior, mas sim diferentes estratégias adaptáveis às condições do dado e aos objetivos da análise.

3. Funcionamento das ferramentas hidrológicas: saga, grass e taudem

Nas ferramentas hidrológicas, a etapa de tratamento dos sumidouros artificiais dos modelos altimétricos é também denominada como *sinks* ou *pits*, os quais correspondem a células ou conjuntos de células que não possuem saída de fluxo para as vizinhanças mais baixas, interrompendo a continuidade do escoamento superficial modelado. Em parte dos casos, essas feições não representam elementos topográficos reais, mas resultam de ruídos inerentes ao processo de interpolação, resolução espacial limitada ou erros de aquisição dos dados altimétricos.

Quando não tratadas, esses sumidouros podem comprometer significativamente a coerência hidrológica, interferindo no cálculo de direções de fluxo, na determinação da rede de drenagem e na delimitação das bacias hidrográficas. Assim, o objetivo do tratamento desses vazios é assegurar que toda célula do modelo possua um caminho de escoamento contínuo até um exutório, restabelecendo a conectividade hidrológica da superfície.

No SAGA GIS, o módulo *Fill Sinks* (Wang & Liu) adota o algoritmo proposto por Wang & Liu (2007) para identificar e preencher depressões do modelo, simultaneamente preservando um gradiente mínimo de escoamento entre células adjacentes, de modo que não sejam criadas superfícies perfeitamente planas que inviabilizem a drenagem.

O algoritmo consiste em propagar internamente por uma busca de menor custo através da topografia, elevando progressivamente as células deprimidas até que uma conexão de drenagem plausível seja restabelecida, e rotulando zonas de bacia (*watersheds*) no mesmo fluxo de processamento (Wichmann, 2007).

Já o método de Planchon & Darboux (2001) utiliza uma abordagem de varredura dupla, em que o MDE é percorrido em direções opostas (de cima para baixo e de baixo para cima) a fim de preencher as depressões de forma progressiva até que todas as células possuam um caminho de escoamento contínuo para níveis inferiores (Wichmann, 2003).

Após esse preenchimento, o módulo *Channel Network and Drainage Basins* deriva a rede de canais sobre o modelo altimétrico corrigido. Nesse módulo, o usuário define critérios de iniciação e o algoritmo traça segmentos de canal rastreando o fluxo descendente, produzindo grades *raster* de ordem de canal, direções de canal e também uma saída vetorial de segmentos e traços da rede. A iniciação de canal pode ser condicionada por valores mínimos de área contributiva ou comparações, e segmentos muito curtos podem ser descartados.

No GRASS GIS, o módulo *r.fill.dir* implementa uma técnica clássica de preenchimento de depressões baseada em Jenson & Domingue (1988). Desse modo, executa a passagem por vizinhança para elevar as depressões de modo a gerar um modelo altimétrico sem *sinks* e em seguida calcula a direção de fluxo (algoritmo D8), atribuindo para cada célula aquela direção (entre as 8 vizinhas) que representa a maior inclinação descendente. Em áreas planas o algoritmo tenta propagar direções conhecidas de áreas próximas para resolver ambiguidades, iterando até resolver falhas locais ou delimitando áreas problemáticas que podem permanecer não resolvidas.

Em seguida, o módulo *r.stream.extract* extrai a rede de drenagem, recebendo como entrada o modelo (sem dados espúrios), opcionalmente um mapa de acumulação de fluxo, um mapa de depressões reais (para evitar rotear fluxos incorretamente), e um limiar mínimo de acumulação para iniciar canais (*threshold*). O módulo calcula a acumulação de fluxo usando abordagem *Multiple Flow Direction* (MFD ou FD8) e, a partir daí, identifica células que excedem o limiar como início de canais, traçando o canal até o ponto de saída. Sob certas condições pode reverter ao modelo D8 para estabilizar o roteamento.

Além do *r.stream.extract*, o mesmo processo de extração de drenagem pode ser realizado utilizando o *r.watershed*, que permite gerar mapas de acúmulo de fluxo, direção de escoamento, drenagem e bacias hidrográficas. Embora ambos os módulos realizem a extração da rede de drenagem, os tipos de dados de saída são diferentes (Ehlschlaeger, Metz, 2024). O *r.stream.extract* produz diretamente dados vetoriais de pontos, como nascentes, exutórios e confluências, enquanto o *r.watershed* foca em informações de bacias, direção de fluxo, acumulação e rede de drenagem em formato *raster*. Dessa forma, o *r.watershed* é mais indicado quando se deseja construir toda a base hidrológica de forma integrada, incluindo bacias e mapas de fluxo acumulado, enquanto o *r.stream.extract* é útil para gerar dados sobre os inícios dos canais. Além disso, o GRASS GIS dispõe de ferramentas complementares, como o *r.water.outlet*, que permite delimitar bacias a partir de um ponto de exutório conhecido.

Quanto ao TauDEM executado por linhas de comando, trata-se de um conjunto ou rotina especializada em análise hidrológica que responde a métodos avançados de direção

de fluxo, acumulação, delineamento de bacias e redes de drenagem. Ele oferece algoritmos como o D8 tradicional, o *D-infinity* (método contínuo de fluxo fracionado) para determinar direção e acumulação específica em que o fluxo de cada célula pode ser repartido entre dois vizinhos conforme o ângulo descendente mais acentuado (Hydrology Research Group, 2015).

Em particular, TauDEM inclui ferramentas para gerar grades de direção e acumulação com base no método *D-infinity*, bem como para extrair redes de canais e definir bacias otimizadas. A adoção de *D-infinity* permite superar limitações do modelo ao executar uma distribuição fracionada do fluxo e continuidade de direção representada por ângulos contínuos em radianos (Hydrology Research Group, 2015).

Frente a esse contexto, percebe-se que as ferramentas como o SAGA e o GRASS operam sob o paradigma clássico de preenchimento de sumidouros seguido de roteamento D8, enquanto o TauDEM oferece métodos mais sofisticados de atribuição de direção e acumulação como *D-infinity*. Contudo, para padronização das análises os modelos altimétricos foram processados seguindo o método D8 em todas as ferramentas.

4. Materiais e métodos

Área de estudo

As análises foram realizadas na bacia hidrográfica do rio Pacoti, situada na porção centro-norte do estado do Ceará, abrangendo os municípios de Guaramiranga e Pacoti, com área aproximada de 4.500 hectares (Figura 1)



Figura 1. Mapa de localização. Elaboração: Autora, 2025.

A bacia abriga parte das nascentes do rio Pacoti, que alimentam o curso principal com cerca de 130 km de extensão, até sua foz no município de Aquiraz, litoral leste. Esse sistema integra o conjunto sistema hidrográficos e possui expressiva relevância ambiental e socioeconômica, destacando-se tanto pelo papel no abastecimento hídrico quanto pela demanda associada às atividades industriais na região.

Processamentos dos dados

a) SAGA GIS

No QGIS, o processamento com o SAGA GIS iniciou-se com o carregamento do modelo Tandem-X. Para a correção dos dados espúrios artificiais, foram empregados dois métodos distintos disponíveis no conjunto de ferramentas de Análise de Terreno – Pré-processamento (*Terrain Analysis – Preprocessing*): o algoritmo *Fill Sinks* (Wang & Liu) e o método “*Fill Sinks* (Planchon & Darboux, 2001)”.

Após a aplicação dos métodos de preenchimento, obteve-se um MDE hidrologicamente consistente - MDEHC, sem dados espúrios. Em seguida, procedeu-se à extração da rede de drenagem por meio do módulo “*Channel Network and Drainage Basins*”.

Esse módulo tem como finalidade gerar simultaneamente a rede de canais e as bacias hidrográficas a partir do MDE, utilizando o modelo de fluxo determinístico de oito direções (D8) para calcular o escoamento superficial entre as células do terreno. O algoritmo determina a direção e a conectividade do fluxo, calcula a ordem de *Strahler* e identifica os trechos que compõem a rede de drenagem conforme o limiar de ordem definido pelo usuário, o qual controla o nível de detalhamento dos canais extraídos. Como produtos, o processamento gera grades *raster* de direção de fluxo, conectividade, ordem de drenagem e bacias hidrográficas, além de arquivos vetoriais contendo os segmentos de canais, os limites das bacias e os nós de junção (e nascentes) da rede hidrográfica (Conrad, 2003). (Figura 2).

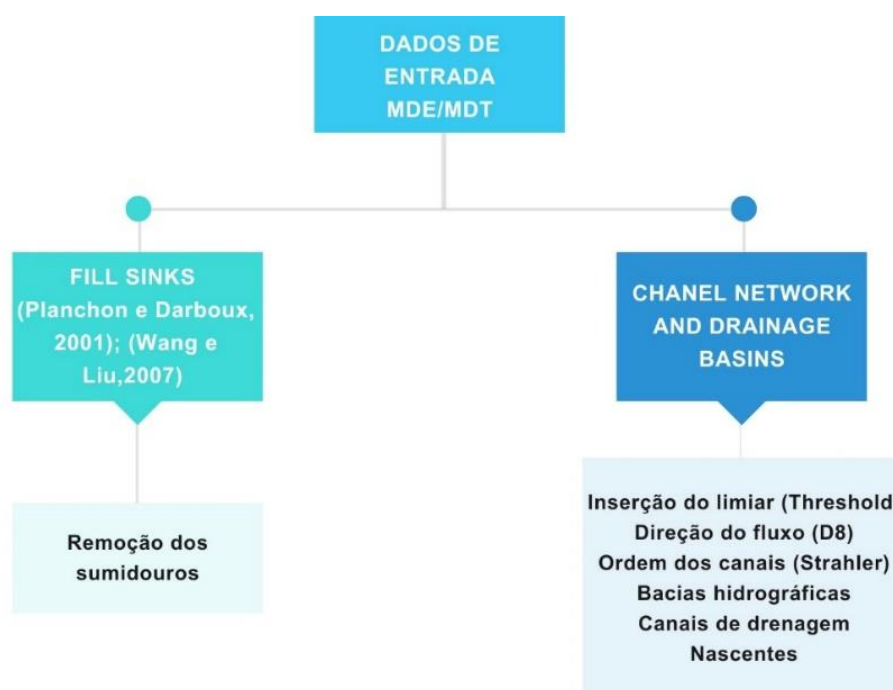


Figura 2. Procedimentos no SAGA GIS. Elaboração: Autora, 2025.

b) GRASS GIS

O processamento com o GRASS GIS foi realizado a partir do módulo *r.fill.dir*, acessado em *GRASS* → *Raster* → *Hydrology* → *r.fill.dir*. Esse módulo corrige as depressões artificiais elevando as células internas até o ponto de saída mais baixo e, simultaneamente, calcula a direção de fluxo (*flow direction*) e gera o MDE corrigido (MDEHC). O método baseia-se no algoritmo D8, que atribui a direção de escoamento à vizinhança de maior declividade descendente, garantindo uma superfície hidrologicamente consistente (Srinivasan, Miller, 2024).

Com o MDEHC, foi utilizado o módulo *r.stream.extract* para a extração da rede de drenagem. Essa ferramenta recebe o MDEHC e um valor de limiar de acumulação de fluxo,

que define o início dos canais. O módulo calcula a acumulação de fluxo, identifica as células que excedem o limiar e traça o percurso até o exutório, gerando as saídas *raster* e vetorial da rede hidrográfica. Assim como nas demais ferramentas, o método D8 foi mantido para o cálculo direcional, a fim de garantir a padronização entre os resultados (Metz, 2024) (Figura 3).

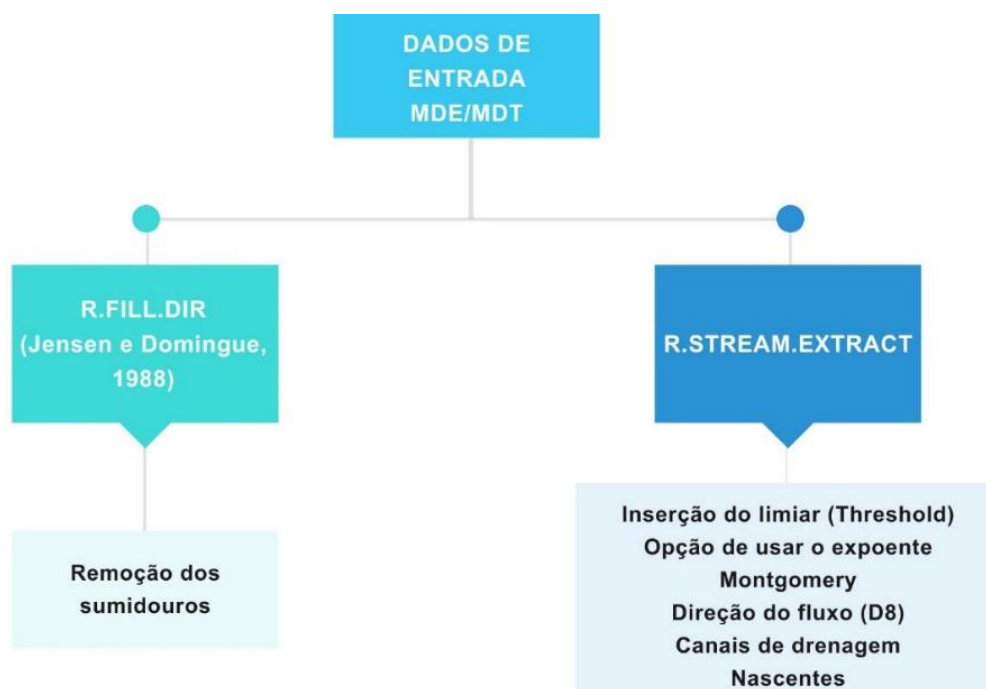


Figura 3. Procedimentos no GRASS GIS. Elaboração: Autora, 2025.

No GRASS GIS ainda é possível encontrar o expoente de Montgomery (ou *Montgomery exponent*). Este método vem do modelo proposto por Montgomery e Dietrich (1992), que buscou descrever o equilíbrio entre erosão e deposição em encostas e canais de drenagem.

A ideia central é que o início da canalização (onde a água começa a concentrar-se para formar um canal) depende da relação entre a área de contribuição e a declividade.

No módulo *r.stream.extract*, o expoente de Montgomery aparece como o parâmetro *exp* (ou *Montgomery exponent*). Ele influencia a forma como o algoritmo identifica segmentos de drenagem reais a partir da superfície modelada. Assim, quanto maior o expoente, mais peso é dado à área de contribuição e quanto menor, mais peso é dado à declividade. Contudo, este expoente não foi traçado na avaliação do presente estudo.

c) TauDEM

O processamento com o TauDEM foi conduzido por meio de linhas no prompt de comando. Inicialmente, foi executado a etapa *"Pit Remove"*, responsável por eliminar os

sumidouros artificiais e gerar um MDEHC. Na sequência, aplicou-se o “Método D8”, para determinar a direção de escoamento.

Posteriormente, o produto “D8 Contributing Area” foi utilizado para calcular a acumulação de fluxo, representando o número de células que contribuem para o escoamento em cada ponto da grade. O curso principal foi delineado com base em um limiar de área de contribuição previamente definido.

Após esse processo foi inserido um ponto de exutório conhecido e em seguida gerou-se o delineamento da drenagem. Por fim, seguiu-se a etapa de definição de cada segmento de drenagem à respectiva bacia e microbacias de contribuição (Figura 4).



Figura 4. Procedimentos no TauDEM. Elaboração: Autora, 2025.

Validação dos dados automáticos

Após a extração dos dados através de cada ferramenta hidrológica apresentada, realizou-se a validação dos dados automáticos com uma base de dados georreferenciada com levantamento de campo.

Essa etapa foi de fundamental importância para verificar o comportamento dos dados automáticos, não se limitando apenas a comparações entre os diferentes métodos de extração dos algoritmos executadas pelas ferramentas.

Para essa comparação foi necessário delimitar uma área de controle para observação dos dados reais e os dados digitais. Diante disso, foi adotado o raio de 50 metros correspondente a área de preservação permanente – APP de nascentes estipulada pela lei 12.651/2012. Assim foi possível observar quais feições automáticas tiveram um alcance aproximado das feições reais.

5. Resultados e discussão

O processamento em cada ferramenta revelou uma dualidade nas etapas: apesar de apresentarem comandos acessíveis e de fácil aplicação, há uma complexidade intrínseca em seus mecanismos de operação, marcada pelas diversas possibilidades e caminhos que podem ser seguidos dentro de uma mesma ferramenta. Além disso, a variedade de parâmetros disponíveis possibilita diferentes combinações e ajustes, permitindo testar e identificar aqueles que melhor representam as condições da área de estudo.

Assim, neste artigo, ambas as ferramentas foram executadas com padronização dos limiares e dos métodos de tratamento de sumidouros e direção de fluxo, o que possibilitou analisar e comparar os resultados obtidos para uma mesma área sob diferentes abordagens e processos de modelagem.

O SAGA GIS apresentou respostas totalmente diferentes quando aplicado o método Planchon e Darboux (2001) e o método proposto por Wang e Liu (2007). Para área da bacia hidrográfica do rio Pacoti, o tratamento aos dados espúrios proposto pelo primeiro método foi insuficiente, não conseguindo gerar nenhuma rede de drenagem. Ainda assim, gerou 40 feições de pontos, no qual o programa define na tabela de atributos como de *mouth*, referente a desembocadura, *spring*, as nascentes, *junctions* as confluências e *outlet* o exutório. Dessa forma foi gerada 14 *springs*, 2 *mouth*, 1 *junction* e 23 *outlet*.

No segundo método, as drenagens foram plenamente formadas com canais de até 4ª ordem. Quanto as feições de pontos foram geradas 78 *mouth*, 39 *spring*, as nascentes e 39 *junctions*. Não houve dados referentes ao *outlet*.

No TauDEM também foi possível delimitar uma rede de drenagem concisa, com canais de até 4ª ordem. Com relação as nascentes, os resultados foram de 65 feições. A execução do GRASS GIS por meio do módulo *r.stream.extract* apresentou limitações ao salvar os vetores de nascentes. Diante disso, optou-se pela utilização do módulo *r.watershed*, que permitiu a geração das nascentes a partir dos pontos iniciais da drenagem extraída. Entre os produtos gerados por essa ferramenta, destaca-se o *raster* que indica o número de células drenadas e constitui um dado fundamental para a definição do curso principal. A ferramenta identificou 117 nascentes, resultando em uma rede de drenagem com maior densidade e grau de ramificação (Figura 5).

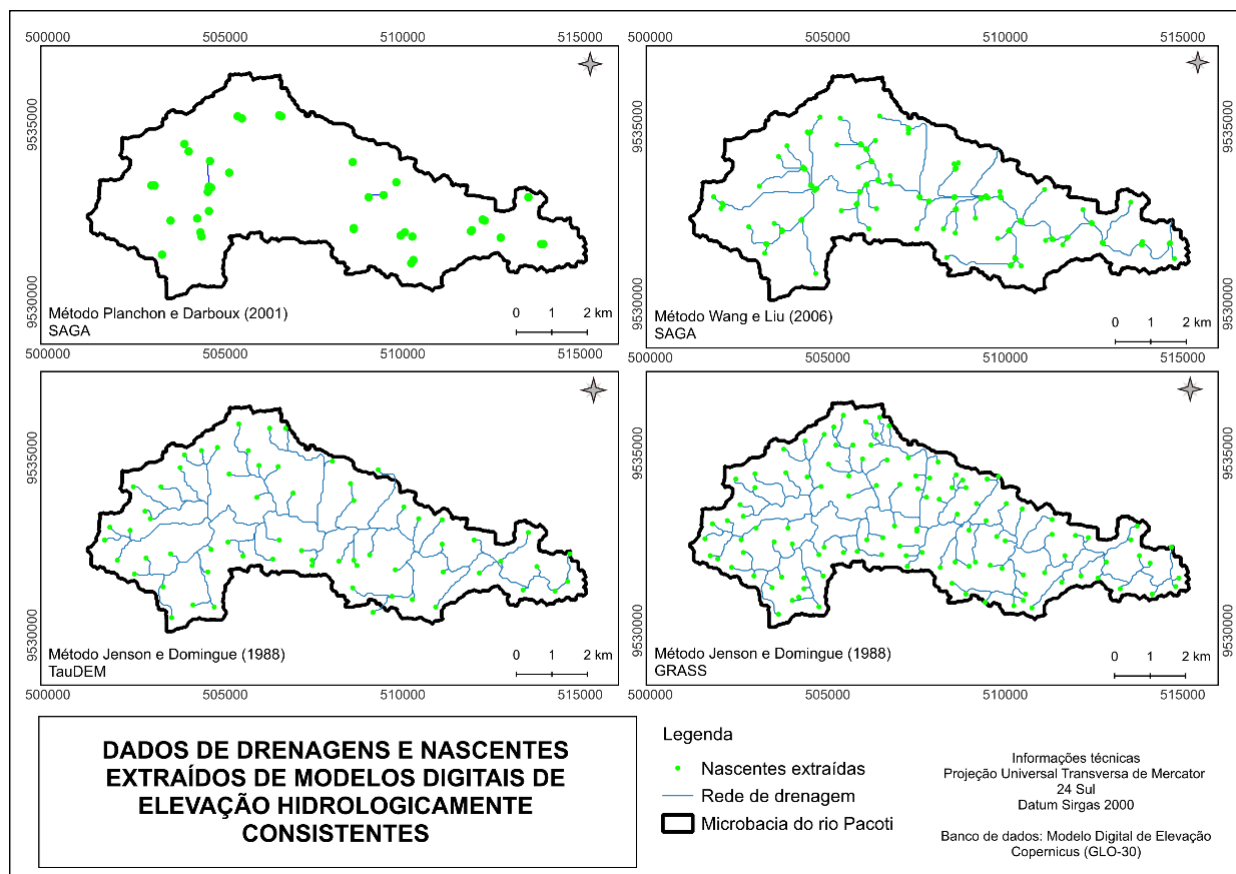


Figura 5. Mapa dos dados extraídos por diferentes algoritmos hidrológicos. Elaboração: Autora, 2025.

Aliado aos resultados obtidos por cada ferramenta hidrológica, os dados extraídos foram confrontados com informações validadas de nascentes. Assim, buscou-se avaliar a distância média entre as nascentes extraídas automaticamente e as nascentes reais, além de verificar possíveis acertos posicionais dentro de um raio de observação correspondente à área de preservação permanente - APP das nascentes reais.

Na microbacia do rio Pacoti, foram mapeadas em campo 28 nascentes. Diferentemente do comportamento observado para a feição de drenagem, o método de Planchon e Darboux (2001) apresentou melhor desempenho na identificação de nascentes, gerando uma amostragem mais consolidada. No entanto, das 28 nascentes conhecidas, apenas uma coincidiu com o ponto automático dentro do raio de observação, apresentando distância média de 50 m em relação à nascente real. O segundo método também obteve um único acerto, mas com distância média menor, de 34 m. As demais nascentes próximas, embora fora do raio de observação, apresentaram distâncias médias entre 150 e 200 m.

Os resultados obtidos pelo TauDEM indicaram dois acertos, com distância média entre 20 e 30 m das nascentes reais, enquanto as demais permaneceram na faixa de 150 a 200 m.

Por fim, os dados gerados no GRASS GIS identificaram uma nascente correta, com distância de 40 m da nascente real, sendo que as demais se situaram em uma faixa média de 100 a 150 m (Figura 6)

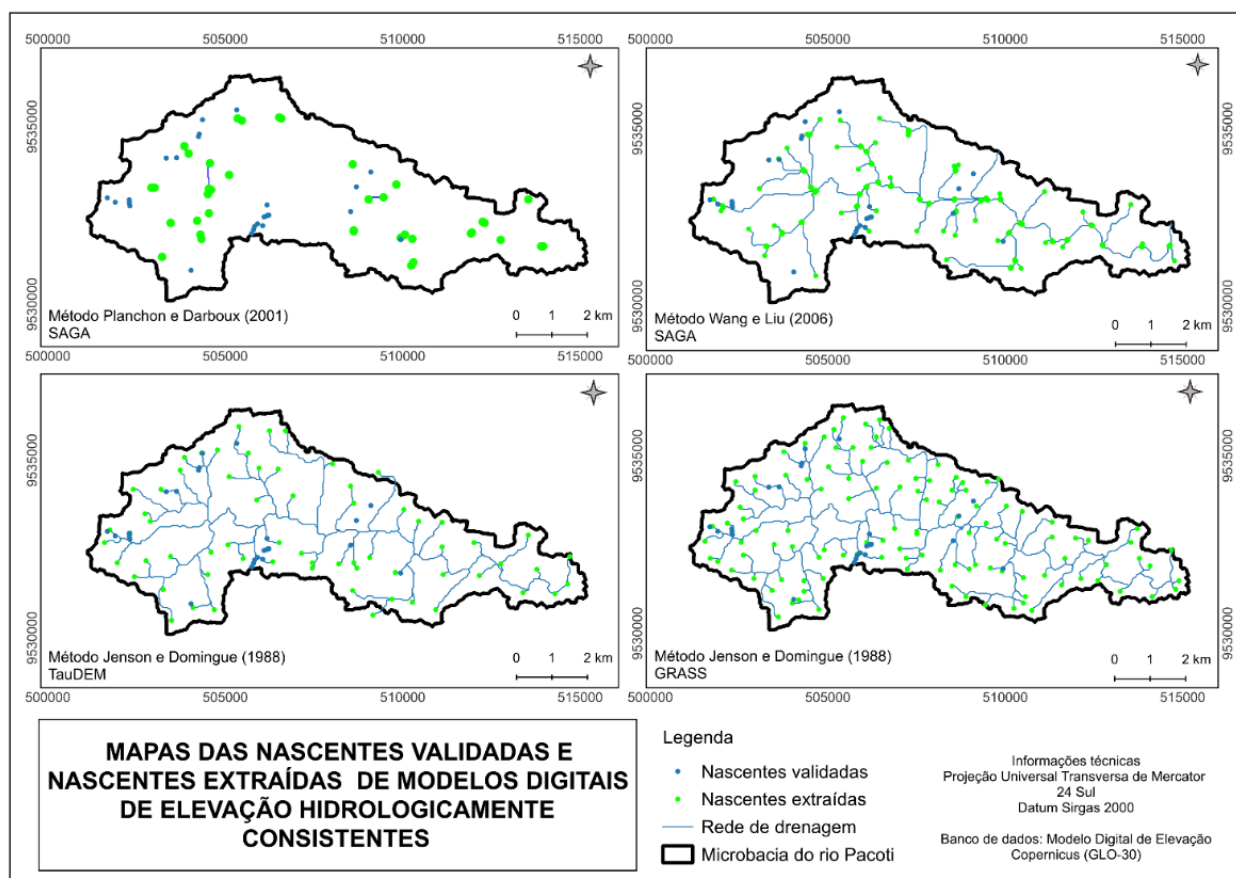


Figura 6. Mapa de validação das nascentes reais e automáticas. Elaboração: Autora, 2025.

Em síntese, os resultados indicam que o desempenho de cada ferramenta hidrológica depende da interação entre o método empregado e as características físico-ambientais da área de estudo. Contudo, como observado, uma mesma área pode apresentar respostas distintas quando processada por métodos diferentes, evidenciando a influência do algoritmo sobre a interpretação do relevo e da rede de drenagem. A configuração dos limiares de contribuição, embora possa ser ajustada para melhorar a representatividade dos resultados, neste estudo foi mantida em seus parâmetros nativos, permitindo avaliar o desempenho padrão de cada método. Mesmo assim, três dos métodos analisados foram capazes de gerar redes de drenagem completas associadas às nascentes.

Destaca-se, ainda, a importância fundamental da validação dos dados automáticos com informações de campo, uma vez que somente essa etapa confere confiabilidade e aplicabilidade aos resultados obtidos por meio do processamento automatizado. Ademais, no caso específico das nascentes, a integração dos dados automáticos com variáveis complementares, como declividade e formas de relevo, pode fortalecer a identificação de

áreas prioritárias para o mapeamento em campo, ampliando a eficiência e a precisão das análises hidrológicas.

6. Considerações finais

A análise comparativa entre os algoritmos hidrológicos implementados nas ferramentas SAGA GIS, GRASS GIS e TauDEM evidenciou que o desempenho de cada método está diretamente condicionado às abordagens adotadas para o tratamento de sumidouros e à forma como cada algoritmo representa a dinâmica do escoamento superficial. As diferenças observadas na geração das feições de drenagem e na identificação das nascentes revelam que a escolha do método pode exercer influência significativa sobre a coerência dos produtos derivados de modelos digitais de elevação.

O método de Wang e Liu (2007), disponível no SAGA GIS, demonstrou eficiência na geração de redes de drenagem contínuas e bem estruturadas, ao passo que o GRASS GIS apresentou menor distância média entre as nascentes reais e as extraídas automaticamente. O TauDEM, por sua vez, também apresentou um bom desempenho na identificação e na delimitação de nascentes.

Tais resultados reforçam que não há um algoritmo superior, mas sim metodologias com desempenhos distintos, cuja eficácia depende da interação entre o método de processamento e as características físico-ambientais da área analisada. Assim, a seleção da ferramenta e dos parâmetros de extração deve considerar o propósito analítico, bem como a natureza dos dados de entrada.

Destaca-se, ainda, a importância da validação em campo como etapa imprescindível para garantir a confiabilidade e aplicabilidade das feições hidrológicas extraídas automaticamente. A integração entre os produtos gerados por técnicas automatizadas e as informações obtidas empiricamente constitui um caminho metodológico promissor para o aprimoramento do mapeamento de drenagens e nascentes. Essa integração contribui significativamente para o avanço da gestão ambiental principalmente de nascentes, que ainda são feições desfavorecidas quanto ao seu conhecimento espacial.

Referências

Ariza-Villaverde, A. B, Jiménez-Hornero, F.J, Gutiérrez de Ravé, E. (2015). **Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis.** *Geomorphology*, v. 241, p. 243-254. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.040>.

Bortolini, W., Taborda Da Silveira, C., Siame, L. (2025). **Comparison of drainage network extracted from global digital elevation models with simple-flow and multi-flow direction.** *RAEGA – O Espaço Geográfico em Análise*, v. 62, n. 1, p. 90–110. DOI: 10.5380/raega.v62i1.98168.

Buarque, Diogo Costa. et al. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. **Rbrh: Revista brasileira de recursos hídricos**. Porto Alegre, RS. Vol. 14, n. 2 (abr./jun. 2009), p. 91-103, 2009.

Bosquilia, R. W. D, Fiorio, P.R, Duarte, S.N, Mingoti, R. (2015). **Comparação entre métodos de mapeamento automático de rede de drenagem utilizando SIG**. *Irriga*, v. 20, n. 3, p. 445–457. <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n3p445>.

Conrad, O. *Module Channel Network and Drainage Basins*. (2003). Disponível em: https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.1/ta_channels_5.html. Acesso em: 11 out. 2025.

Ehlschlaeger, C, Metz, M. (2024). *GRASS: r.watershed*. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/grass-stable/manuals/r.watershed.html>. Acesso em: 11 out. 2025.

Faria, V. D, Nunes, D. M, Botelho, R. G. M. **DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS: APLICAÇÃO E ANÁLISE EM DIFERENTES PAISAGENS NO BRASIL**. *GeoUERJ*, n. 42, p. 68545. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2023.68545>.

Garbrecht, Jurgen; Martz, Lawrence W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 193, n. 1-4, p. 204-213, jun. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(96\)03138-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(96)03138-1).

Hydrology Research Group (Utah). (2015). *TauDEM: documentation*. Disponível em: <https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/documentation.html>. Acesso em: 11 out. 2025.

Jenson, S. K, Domingue, J. O. (1988). **Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis**. *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, [S.L.], v. 54, n. 11, p. 1593-1600.

Li, Jiaye, Li, Tiejian, Zhang, Li, Sivakumar, Bellie, Fu, Xudong, Huang, Yuefei, Bai, Rui. (2020). **A D8-compatible high-efficient channel head recognition method**. *Environmental Modelling & Software*, [S.L.], v. 125, p. 104624. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104624>.

Matsunaga, K., Nakaya, T., Sugai, T. (2009). **Simple DEM-Based Methods to Delineate Channel Networks for Hydrogeomorphological Mapping**. *Transactions In Gis*, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 87-103. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9671.2009.01145.x>.

McMaster, Kevin J. Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 38, n. 4, p. 131-138, abr. 2002. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2000wr000150>.

Metz, M. *GRASS: r.stream.extract*. (2024). Disponível em: <https://grass.osgeo.org/grass-stable/manuals/r.stream.extract.html>. Acesso em: 11 out. 2025.

Montgomery, D. R., Dietrich, W. E. (1992). Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale. *Science*, [S.L.], v. 255, n. 5046, p. 826-830. **American Association for the Advancement of Science (AAAS)**. <http://dx.doi.org/10.1126/science.255.5046.826>.

Oliveira, A. H. et al. Consistência hidrológica de modelos digitais de elevação (MDE) para definição da rede de drenagem na sub-bacia do horto florestal Terra Dura, Eldorado do Sul, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, p. 1259- 1268, 2012.

Planchon, O., Darboux, F., (2002). **A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models**. *Catena*, [S.L.], v. 46, n. 2-3, p. 159-176. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0341-8162\(01\)00164-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0341-8162(01)00164-3).

Santos, L.C.S. et al. **Avaliação dos Modelos Digitais de Elevação aplicados à extração automática de redes de drenagem**. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, Curitiba, Paraná. Anais [...] 2011. p. 1311- 1318.

Srinivasan, R., Miller, R. S. (2024). *GRASS: r.fill.dir*. Disponível em: https://grass.osgeo.org/grass-stable/manuals/r.fill.dir.html?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 11 out. 2025.

Yan, Y., Lidberg, W., Tenenbaum, D. E., Pilesjö, P. (2020). **The accuracy of drainage network delineation as a function of environmental factors: a case study in central and northern sweden.** *Hydrological Processes*, [S.L.], v. 34, n. 26, p. 5489-5504. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.13963>.

Wang, L., Liu, H. (2007). **An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling.** *International Journal Of Geographical Information Science*, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 193-213, fev. 2007. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13658810500433453>.

Wichmann, V. (2003). *Module Fill Sinks (Planchon/Darboux, 2001)*. Disponível em: https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.0/ta_preprocessor_3.html. Acesso em: 11 out. 2025.

Wichmann, V. (2007). *Module Fill Sinks (Wang e Liu)*. Disponível em: https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.0/ta_preprocessor_4.html. Acesso em: 11 out. 2025.

Wu, T., Li, J., Li, T., Sivakumar, B., Zhang, G., Wang, G. (2019). **High-efficient extraction of drainage networks from digital elevation models constrained by enhanced flow enforcement from known river maps.** *Geomorphology*, [S.L.], v. 340, p. 184-201. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.022>.