

# Sensibilidade da estimativa de vazões máximas para o dimensionamento de obras hidráulicas com informações derivadas de Modelo Digital de Elevação

*Sensitivity of maximum discharge estimation for dimensioning hydraulic structures considering information derived from Digital Elevation Model*

- **Data de entrada:** 23/02/2021
- **Data de aprovação:** 13/09/2021

Rosa Lindjhenys de Oliveira Jorge<sup>1\*</sup> | Adriano Rolim da Paz<sup>2</sup> | Karolyne Aquino Alexandre Breckenfeld<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.071>

## ORCID ID

Jorge RLO  <https://orcid.org/0000-0001-7474-0050>

Paz AR  <https://orcid.org/0000-0003-0243-7006>

Breckenfeld KAA  <https://orcid.org/0000-0002-0642-5734>

## Resumo

A estimativa da vazão máxima impacta custos e segurança de obras hidráulicas. Modelos hidrológicos são usados para tais estimativas, com a caracterização física da bacia hidrográfica e da rede de drenagem, dados cada vez mais extraídos a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE), embora métodos manuais ainda sejam usados. Neste trabalho, fez-se a incorporação de geoprocessamento nos estudos hidrológicos para a determinação da vazão máxima para dimensionamento de uma ponte, tomando cinco algoritmos de determinação de direções de fluxo e avaliando a sensibilidade a erros na caracterização física da bacia e do curso d'água. Frente ao método manual, o processamento do MDE aumentou o comprimento do curso d'água principal, reduziu a declividade e reduziu a área da bacia hidrográfica, levando à redução da vazão máxima. Erros na quantificação da área da bacia hidrográfica são mais impactantes na estimativa da vazão máxima do que erros de mesma ordem no comprimento do rio.

**Palavras-chave:** SIG. Modelagem hidrológica. Direção de fluxo. Rede de drenagem.

## Abstract

*The estimate of maximum discharge impacts costs and safety of hydraulic structures. Hydrological models are used for obtaining such estimates, considering physical characteristics of the catchment and river drainage networks, information increasingly derived from Digital Elevation Models (DEM), although manual extraction is still used. In this work, geoprocessing is incorporated to the hydrological studies for determining the maximum discharge for dimensioning a bridge, considering five flow direction algorithms and evaluating the sensitivity to errors on physical characteristics of the watershed and stream. In comparison to the manual approach, the DEM processing increased the length of the main stream, reduced its slope and reduced the catchment area, leading to maximum discharge decrease. Errors on catchment area quantification are more impactful on maximum discharge estimation than errors of the same order in the stream length.*

**Keywords:** GIS. Hydrologic modeling. Flow direction. Drainage network.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará - Mauriti - Ceará - Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa - Paraíba - Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil.

\* **Autora correspondente:** lindjhenysrosa@hotmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

A estimativa da vazão máxima de uma bacia hidrográfica tem relevância decisiva nos custos e na segurança dos projetos de engenharia, como os que envolvem o dimensionamento de dispositivos de drenagem de águas pluviais. Na ausência de dados observados de vazão, pode-se trabalhar com uma estimativa de vazão, chamada de vazão de projeto, a partir de modelos hidrológicos chuva-vazão. Modelos matemáticos têm sido usados para simular a geração de escoamento pluvial desde a década de 1970 (ZOPPOU, 2001). Existem diferentes abordagens, cuja adequabilidade depende, principalmente, do objetivo do estudo, das características da região e da disponibilidade de dados, dentre outros fatores (SINGH; FREVERT, 2006).

Para o dimensionamento de obras hidráulicas, abordagens como o método da estimativa de chuva excedente do NRCS (Natural Resources Conservation Service; USDA, 2007) baseado no parâmetro CN (Curve Number) em combinação ao hidrograma unitário triangular (HUT; USDA, 1986, 2007) prevalecem como os mais utilizados. Contribuem para isso a simplicidade, facilidade de uso e ampla aceitação desse método pelos usuários (ZHANG; PAN, 2014; VERMA et al., 2017; RAJIB; MERWADE, 2016; BARTLETT et al., 2016), até porque a experiência anterior e a familiaridade com um modelo hidrológico são fatores decisivos na escolha do modelo (ADDOR; MELSEN, 2018).

Esse tipo de abordagem depende de dados relativamente simples de obter, como características físicas da bacia hidrográfica como área, declividade do curso d'água principal, tipo de solo e uso e ocupação da terra. Tradicionalmente, atividades como a delimitação de bacias hidrográficas e a obtenção da rede de drenagem eram executadas de forma manual, por meio de dados levantados em campo, cartas topográficas e fotos aéreas (SIQUEIRA et al., 2016). Os avanços tecnológicos dos últimos anos, bem como a maior oferta, diminuição de custos e coleta de dados

de sensores remotos, vêm contribuindo para a disseminação e a popularização das tecnologias que possibilitam a análise espacial, como o conjunto de tecnologias que formam o geoprocessamento (DE SMITH, 2007; SHEFFIELD et al., 2018).

Nesse sentido, as técnicas de geoprocessamento apresentam ferramentas úteis na aplicação dos modelos chuva-vazão (TASSI et al., 2005). Um aspecto principal são as melhorias na representação topográfica obtidas a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e o desenvolvimento de procedimentos automatizados para processamento do MDE e extração de produtos como caminhos de fluxo, rede de drenagem, comprimentos e declividades dos cursos d'água (OLIVEIRA, 2001; PAZ; COLLISCHONN, 2007).

O MDE pode ser entendido simplesmente como uma matriz ou imagem raster, onde cada elemento ou pixel tem como atributo a elevação do terreno em relação a um determinado referencial. Existem muitos softwares que podem ser utilizados para o processamento do MDE, tanto comerciais como gratuitos, a exemplo do ArcGIS, TerrSet, QGIS, MapWindow GIS e GRASS, e pacotes de ferramentas computacionais que podem ser implementadas como plugins em alguns desses softwares, a exemplo do ArcHydro, TauDEM e do próprio GRASS. Embora com mesmo propósito, os algoritmos desses softwares diferem entre si, principalmente quanto à determinação do plano de informações fundamental, que são as direções de fluxo – isto é, definir a direção do escoamento oriundo de cada pixel do MDE.

A determinação de direções de fluxo tem sido abordada desde a década de 1980 (O'CALLAGHAN; MARK, 1984; JENSON; DOMINGUE, 1988) e continua sendo alvo de pesquisas (e.g. WU et al., 2019; PERSENDT; GOMEZ, 2016; STANISLAWSKI et al., 2017; YILDIRIM et al., 2015), principalmente quanto ao tratamento de áreas planas, remoção de depressões e eficiência computacional (ZHANG; JIA, 2020; PERSENDT.

GOMEZ, 2016; SOUSA; PAZ, 2017). Isso impacta as características da rede de drenagem derivada do MDE, como o comprimento, a declividade dos trechos e a área da bacia (Siqueira et al., 2016), influenciando a aplicação de modelos hidrológicos baseados nesses dados (LEE et al., 2010).

Erros na quantificação e na delimitação da área da bacia podem influenciar diretamente a simulação da transformação chuva-vazão por alterar a quantidade de precipitação captada pela bacia (WU et al., 2008), alterar as áreas de contribuição em termos quantitativos (Lai et al., 2016) e em termos da representação do tipo de solo e do uso e ocupação da terra na modelagem (SOUSA; PAZ, 2017).

Por sua vez, o dimensionamento de estruturas de drenagem deve ser respaldado em um rigoroso estudo hidrológico, para que a vazão de projeto obtida repercuta na operação eficiente e na segurança hidráulica da obra (Cunha et al., 2015). No Departamento de Estradas de Rodagem do Estado da Paraíba (DER/PB), os procedimentos para determinação da vazão máxima de uma bacia são fundamentados na metodologia do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT; DNIT, 2005; DNIT, 2006). No entanto, não é estabelecido como os dados de comprimento do rio principal e área da bacia podem ser obtidos, cabendo ao projetista decidir sobre o método utilizado.

Este trabalho aborda a incorporação do geoprocessamento nos estudos hidrológicos para a determinação da vazão máxima de bacias hidrográficas do DER/PB, para avaliar os seguintes aspectos: i) influência de incorporar ou não o geoprocessamento; ii) efeito de considerar cinco diferentes algoritmos de determinação de direções de fluxo; iii) sensibilidade a erros na caracterização física da bacia hidrográfica e do curso d'água. O estudo de caso é baseado no estudo hidrológico realizado pelo DER/PB para definição da vazão máxima e respectivo nível máximo de enchente para fins de dimensionamento de uma obra de engenharia de alto custo, uma ponte, a partir da área de contribuição de uma parte da bacia hidrográfica do Rio Gramame, na Paraíba, com 271 km<sup>2</sup>.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Área de estudo e dados disponíveis

A parcela da bacia hidrográfica do Rio Gramame estudada no presente trabalho corresponde à bacia hidrográfica da seção desse rio que secciona a obra rodoviária PB-016, que liga o distrito de Odilândia, no município de Santa Rita (PB), ao entroncamento com a BR-101 (Fig. 1). A bacia possui cerca de 271 km<sup>2</sup> e seu exutório fica a jusante dos reservatórios Gramame – Mamuaba.

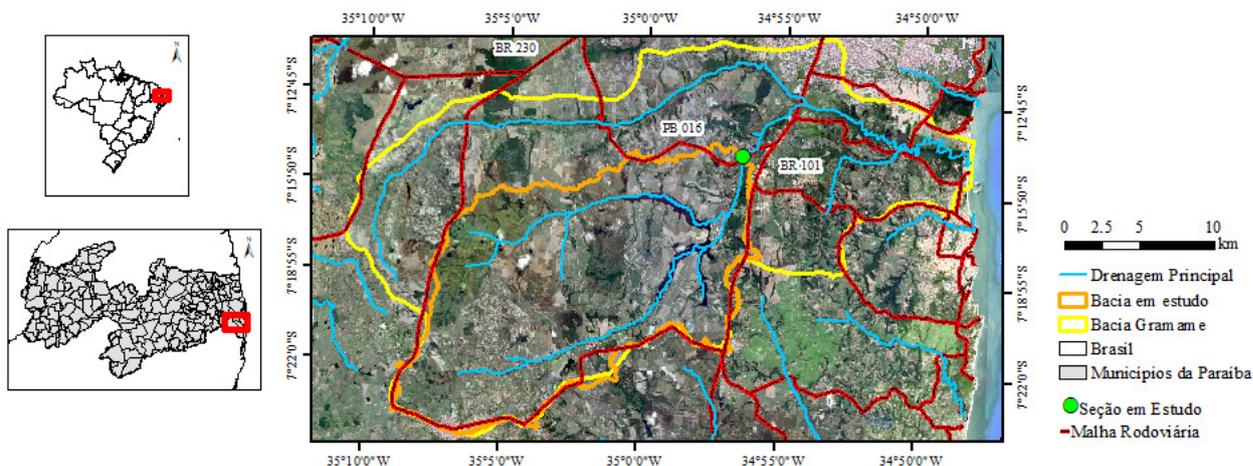


Figura 1 - Localização da seção do rio Gramame tomada para estudo de vazões máximas.

A seção em análise foi estudada pelo DER/PB para definição da vazão máxima e seu respectivo nível máximo, a fim de dimensionar e locar a estrutura da ponte a ser construída no local. Dados do perfil transversal dessa seção foram disponibilizados a partir de levantamento planialtimétrico realizado pelo DER/PB.

Os dados pluviométricos utilizados foram obtidos no Portal Hidroweb (Agência Nacional de Águas) e são provenientes da estação pluviométrica Santa Rita (código 00734001). Ao todo, a série histórica de chuva contém 78 anos de dados (1910 a 1989), dos quais 30 anos foram descartados por falhas nas informações, sendo aproveitados 48 anos para análise (1926 a 1929, 1932, 1933, 1935 a 1943, 1945 a 1976 e 1981).

Como dados topográficos da bacia hidrográfica, foram trabalhadas as cartas planialtimétricas da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e o MDE do SRTM30 (Shuttle Radar Topography Mission, resolução espacial de 30m). Foram utilizadas as folhas das cartas planialtimétricas de Sapé (SB.25-Y-C-II) e de João Pessoa (SB.25-Y-C-III), disponibilizadas em formato digital pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESÁ).

Os tipos de solo presentes na área em estudo foram especificados a partir do mapa de solos elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e disponíveis em formato digital no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para análise do uso da terra e cobertura vegetal, foram usadas imagens disponibilizadas no Google Earth Pro.

## 2.2 Determinação da vazão máxima de projeto

Para estimativa da vazão máxima de projeto, seguiram-se os procedimentos recomendados pelo DNIT no Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem (DNIT, 2005), com adap-

tações para o que é praticado rotineiramente no DER-PB, constando de cinco etapas: determinação do tempo de concentração; definição da chuva de projeto; estimativa de chuva excedente; aplicação do método do Hidrograma Unitário Sintético; estimativa do nível e vazão máximos.

O tempo de concentração foi obtido por meio da média das estimativas obtidas pelos métodos de Kirpich Modificado (Eq. 1), Fórmula do DNOS (Eq.2), Método Lag (Eq. 3) e Equação do California Highways and Public Works (Eq. 4). Os primeiros três métodos são os mais recomendados pelo Manual do DNIT e o quarto tem sido incluído nos estudos técnicos do DER-PB, com a prática de considerar a média de todos eles, dadas as incertezas relacionadas a essas estimativas.

$$T_c = 1,42 \cdot (L^2/H)^{0,385} \quad (1)$$

$$T_c = (10/K) \cdot A^{0,3} \cdot (10^3 \cdot L)^{0,2} / I^{0,4} \quad (2)$$

$$T_c = 16,00 \cdot Kn \cdot (L^{2,5}/H^{0,5})^{0,33} \quad (3)$$

$$T_c = [(0,87 \cdot L)^3 / H]^{0,385} \quad (4)$$

Onde:  $T_c$  é o tempo de concentração (h);  $L$  é o comprimento do curso principal (km);  $H$  é o desnível máximo (m);  $A$  é a área da bacia hidrográfica (ha);  $I$  é a declividade (%);  $K$  é o coeficiente que depende das características da bacia hidrográfica em análise;  $Kn$  é a média dos coeficientes de rugosidade de Manning ao longo dos cursos d'água mais importantes. Segundo o Manual do DNIT,  $Kn = 0.07$  para bacias com áreas superiores a 10 km<sup>2</sup>.

A chuva de projeto foi definida a partir de estudo estatístico, correlacionando os dados de chuva da estação Santa Rita à precipitação no posto pluviográfico João Pessoa com base no método de Pfasstetter (1957). Foi considerado um tempo de retorno de 100 anos.

A chuva excedente foi estimada a partir do método Natural Resources Conservation Service – Curve Number (NRCS– CN; Eq. 5, 6 e 7), amplamente utilizado na literatura e em estudos técnicos de obras hidráulicas. Foi considerada a condição II de umidade antecedente e definido o valor de CN da bacia estudada a partir das tabelas específicas apresentadas no referido manual do DNIT, em função da cobertura vegetal e grupo hidrológico do solo.

$$P_{exc} = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S), \text{ quando } P_{exc} > I_a \text{ e} \\ P_{exc} = 0, \text{ quando } P \leq I_a \quad (5)$$

$$I_a = \lambda \cdot S \quad (6)$$

$$S = (25400/CN) - 254 \quad (7)$$

Onde  $P_{exc}$  é o escoamento superficial gerado ao longo do evento (mm);  $P$  é a precipitação total (mm);  $I_a$  são as perdas iniciais (mm);  $S$  é a quantidade da retenção máxima potencial (mm);  $\lambda$  o fator para estimativa das perdas iniciais e CN é um parâmetro adimensional chamado de Curve Number.

A partir da chuva excedente, a teoria do hidrograma unitário foi aplicada, considerando o HUT sintético do NRCS, segundo o qual a resposta a uma chuva excedente unitária tem a forma de um hidrograma triangular representado pelas Eq. 8, 9 e 10.

$$T_p = (d/2) + 0,6 \cdot T_c \quad (8)$$

$$t_b = T_p + 1,67 \cdot T_p \quad (9)$$

$$q_p = 0,208 \cdot A_b / T_p \quad (10)$$

Onde  $T_p$  é o tempo de subida do HUT (h),  $t_b$  é o tempo de base do HUT (h),  $d$  é a duração da chuva (h),  $q_p$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ ) e  $A_b$  é a área da bacia ( $km^2$ ).

O nível máximo de enchente foi determinado utilizando como referência DNIT (2005) e DNIT (2006) e considerando o perfil da seção transversal do rio obtido pelo levantamento planialtimétrico realizado pelo DER/PB.

Ao estabelecer que a ponte a ser construída na seção em estudo tem 40 m de comprimento, determinou-se, para cada altura (h) do nível d'água, a área molhada (A), o perímetro molhado (P) e, conseqüentemente, o raio hidráulico (R). A partir disso, a vazão máxima (Q) para cada h foi determinada por meio da fórmula de Manning (Eq. 11).

$$Q = (A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}) / n \quad (11)$$

Onde:  $I$  é a declividade do canal (m/m);  $n$  é o coeficiente de Manning.

### 2.3 Aplicação da metodologia usando o procedimento padrão no DER/PB

A metodologia para estimativa de vazão máxima e seu respectivo nível máximo de enchente foi aplicada inicialmente utilizando o procedimento padrão usado no DER/PB, que inclui a extração de informações da bacia hidrográfica de forma manual.

A bacia hidrográfica foi delimitada manualmente com base na rede de drenagem presente nas cartas e conectando os pontos mais elevados (divisores de água), tomando como orientação as curvas de nível e os pontos cotados. A vetorização dessa delimitação permitiu a posterior quantificação da área da bacia, assim como procedimento análogo foi realizado para quantificar o comprimento do curso d'água. As elevações de cabeceira e do exutório do curso d'água foram obtidas das cartas para determinação da declividade, pela divisão pelo comprimento do traçado do curso d'água. A inspeção dos pontos cotados no interior da delimitação da bacia permitiu a identificação do desnível máximo. Foi calculada,

também, a sinuosidade do curso d'água principal, a partir da divisão do comprimento medido ao longo do traçado desse rio pelo comprimento medido em linha reta desde a cabeceira até a foz.

Para a estimativa do CN da bacia, foram quantificadas as parcelas de diferentes tipos de solo, usos da terra e cobertura vegetal sobre a delimitação manual da bacia. Três tipos de solos foram identificados (Argissolo Vermelho-Amarelo; Argissolo Acinzentado; Espodosolo Ferrocárbico), todos eles associados ao grupo hidrológico C do método NRCS. Logo, a atribuição do parâmetro CN variou unicamente em função das quatro categorias consideradas para o uso e cobertura da terra: mata ou bosque (CN = 77); terreno cultivado (CN = 88); terreno não cultivado com pouca vegetação (CN = 91); área urbana (CN = 87).

As informações levantadas acerca da caracterização da bacia hidrográfica foram usadas para estimar o tempo de concentração, definir a chuva de projeto, determinar a chuva excedente e estimar o hidrograma resultante desse evento de projeto e, assim, estimar a vazão e nível máximos necessários ao dimensionamento da ponte.

#### 2.4 Aplicações da metodologia com extração de informações via geoprocessamento

A mesma metodologia de estimativa de vazões máximas foi aplicada, mas agora com a delimitação da bacia e extração da drenagem de forma automatizada a partir do MDE, considerando cinco diferentes algoritmos de direções de fluxo presentes em softwares de geoprocessamento: ArcGIS, TerrSet e QGIS. No QGIS, foram trabalhadas as extensões TauDEM e GRASS, nesta última com uso de dois algoritmos distintos: `r.watershed` e `r.terraflow`.

O algoritmo do ArcGIS segue o proposto na concepção original do método Deterministic Eight Neighbours (D8), segundo o qual a cada pixel é atribuída uma única direção de fluxo, dentre as

8 possíveis em uma janela 3 x 3, determinada em função da maior declividade (JENSON; DOMINGUE, 1988; O'CALLAGHAM; MARK, 1984). Tal regra da declividade não resolve as áreas planas nem as depressões e, para essa última, o algoritmo do ArcGIS faz o processo de preenchimento, aumentando artificialmente as elevações em função da vizinhança até encontrar uma saída da depressão (BUARQUE et al., 2009; PAZ; COLLISCHONN, 2008). Embora seja o software mais utilizado em geoprocessamento, tal algoritmo tem a tendência de gerar linhas de drenagens paralelas irreais (PAZ; COLLISCHONN, 2008; PAZ et al., 2006).

Todos os demais algoritmos testados também adotam a definição de direções de fluxo em 8 possibilidades como o método D8, além de garantirem que nenhum caminho cíclico é formado e que a partir de qualquer pixel do terreno se segue um caminho de fluxo até a borda da imagem. Porém, esses algoritmos se distinguem entre si quanto ao tratamento das depressões e das áreas planas.

O software TerrSet emprega um algoritmo para determinação de direções de fluxo que é do tipo busca por prioridade (Priority First Search – PFS), elaborado por Sedgewick (1992). Tal algoritmo é baseado em critérios de prioridade para definição do caminho de fluxo, em dois estágios. Primeiro, é feita a busca por um caminho que direcione o fluxo para fora do pixel da depressão. Em seguida, os valores de elevação das células ao longo do caminho do fluxo são ajustados para que eles diminuam até a célula final. Essa célula deve ter um valor menor que a depressão ao longo do caminho do fluxo ou a célula localizada em uma borda do MDE (BUARQUE et al., 2009). Ao procurar uma saída para a depressão, o algoritmo busca a menor passagem disponível. Caso exista mais de um caminho que satisfaça esse critério, é selecionado o caminho com o comprimento total mais curto (Jones, 2002).

No módulo `r.watershed` da extensão do GRASS associada ao QGIS, é utilizada uma adaptação de um

método de pesquisa de menor custo como alternativa para evitar as alterações no MDE realizadas pelos métodos tradicionais no tratamento de depressões no terreno (METZ et al., 2011). A ideia central do algoritmo é ranquear os pixels a serem trabalhados em ordem de custo medido pela elevação e pela ordem de inserção em uma lista de prioridade de busca. O processamento segue resolvendo os pixels segundo um caminho identificado como de menor custo.

O módulo r.terraflow da extensão do GRASS utiliza um algoritmo proposto para lidar com quantidades massivas de dados como apresentado por Arge et al. (2003), o qual é composto por quatro etapas. Primeiro, é feita a identificação de áreas planas e depressões e a determinação das direções de fluxo para as demais regiões. Em seguida, atribuem-se as direções de fluxo das áreas planas, iniciando-se pelos pixels da borda da área plana e depois consecutivamente pelos vizinhos para dentro da área. A terceira etapa é inundar o terreno e, como última etapa, determina as direções de fluxo do terreno agora inundado, repetindo os procedimentos das duas primeiras etapas.

A extensão do TauDEM emprega um algoritmo cujo procedimento para remoção das depressões consiste em identificá-las e realizar a elevação de cada uma ao nível do ponto mais baixo em torno da borda, ou seja, é realizado o procedimento de preenchimento dos pixels da depressão. Para as áreas planas, o TauDEM usa o método de Garbrecht e Martz (1997), no qual as elevações dos pixels são incrementadas e as direções atribuídas no sentido de áreas mais baixas da vizinhança.

A partir das direções de fluxo obtidas com cada algoritmo, foram geradas as áreas acumuladas de drenagem correspondentes e, em seguida, a derivação das redes de drenagem. O critério de área mínima acumulada de 0,09 km<sup>2</sup> foi adotado para denotar o início da rede de drenagem em todos os casos (FAN et al., 2016), por ser considerada como adequada para representar a extensão da drenagem das cartas planialtimétricas.

A delimitação automática da bacia foi realizada a partir do raster das direções de fluxo e da especificação do exutório correspondente à seção de estudo. Assim, para cada um dos cinco conjuntos de planos de informação gerados, foram extraídas as informações necessárias (área da bacia, comprimento do curso d'água, declividade, desníveis etc.) para estimar o tempo de concentração, definir a chuva de projeto (cuja duração foi relacionada ao tempo de concentração), computar a chuva excedente e estimar a vazão máxima.

## 2.5 Análise de sensibilidade da metodologia

Foram realizadas também 16 simulações para analisar a sensibilidade do método de estimativa de vazões máximas a partir de variações percentuais hipotéticas (-20%, -10%, 10% e 20%) em dois parâmetros de entrada principais (Tabela 1): a área da bacia hidrográfica e o comprimento do curso d'água. Todo o restante dos dados de entrada e demais considerações foram mantidas inalteradas entre essas 16 simulações, tomando o estudo de caso e as informações extraídas manualmente.

**Tabela 1** - Combinações de variação do comprimento do curso d'água (L) e da área da bacia hidrográfica (A) para a análise de sensibilidade.

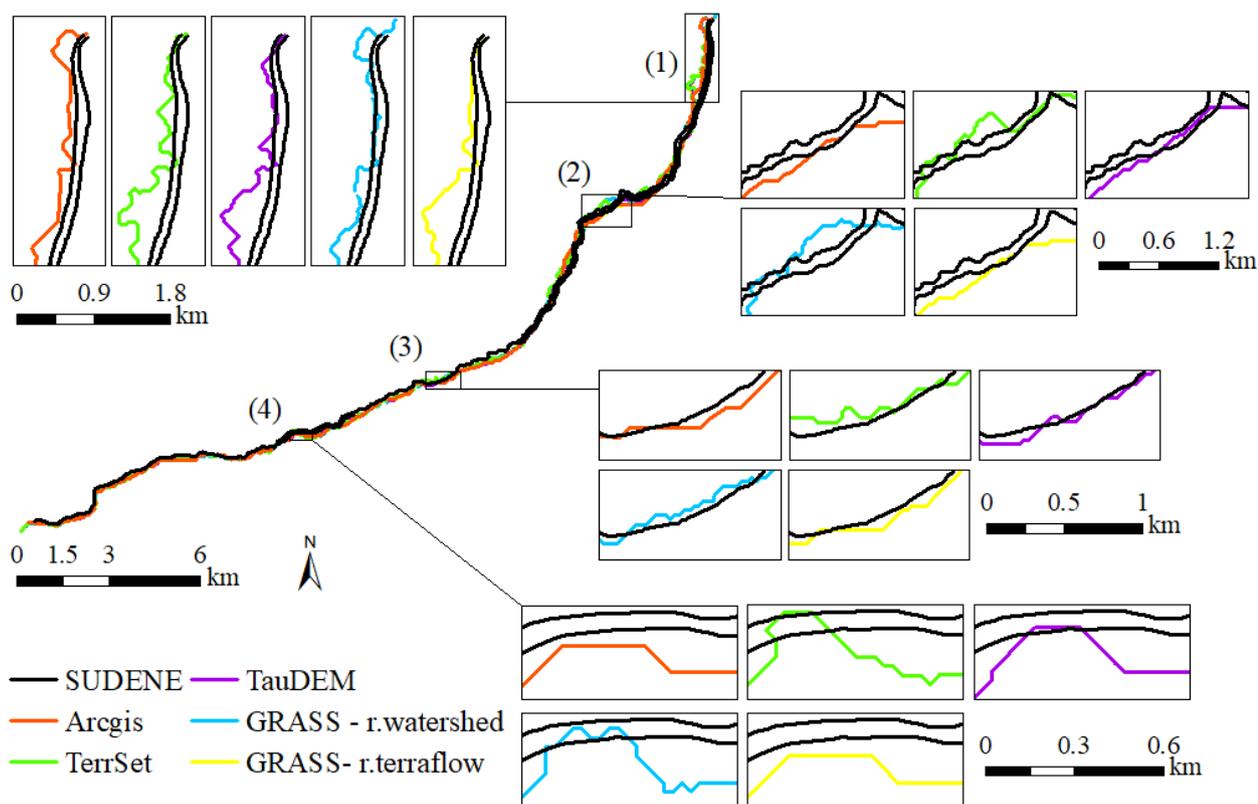
Variação de L →	-20%	-10%	10%	20%
Variação de A ↓				
-20%	-20L-20A	-10L-20A	+10L-20A	+20L-20A
-10%	-20L-10A	-10L-10A	+10L-10A	+20L-10A
+10%	-20L+10A	-10L+10A	+10L+10A	+20L+10A
+20%	-20L+20A	-10L+20A	+10L+20A	+20L+20A

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Características do curso d'água principal

Os traçados do curso d'água principal derivados do MDE são comparados ao traçado vetorizado baseado na carta da SUDENE (Fig. 2). Percebe-se que todos seguem, em geral, o traçado digitalizado da carta da SUDENE, mas apresentam maior sinuosidade. A hidrografia da SUDENE é originada de mapeamento obtido por levantamento

aerofotogramétrico e tende a apresentar representatividade mais simplificada da rede de drenagem, relativamente àquelas derivadas do MDE do SRTM (pixel de 30 m). Nem a rede da SUDENE nem as redes derivadas do MDE podem ser consideradas corretas – todas apresentam incertezas e erros associados à obtenção. Mas a referência da comparação aos dados da SUDENE foi adotada por ser a fonte de dados usada de forma padrão no DER/PB.



**Figura 2** - Comparação entre si dos traçados do curso d'água principal obtidos a partir dos cinco algoritmos utilizados para o processamento do MDE com a hidrografia disponibilizada pela SUDENE.

O comprimento do curso d'água principal da bacia estudada variou de 33,8 a 38,5 km de acordo com o algoritmo usado (Tabela 2), cerca de 2% a 17% de aumento em relação ao comprimento a partir da carta da SUDENE (Fig. 3-a). Um erro de superestimativa no comprimento de rio de-

rivado de MDE está associado, principalmente, à situação em que o tamanho do pixel do MDE é inferior à largura do curso d'água e ocorre uma sinuosidade artificial dentro da calha, já que no MDE toda a calha é praticamente uma área plana (Paz et al., 2008; Sousa e Paz, 2017). Esse não

é o caso na maior parte do traçado (~60%) do rio estudado, cuja largura não é notavelmente superior à resolução espacial do MDE, mas sim no traçado na região do reservatório Gramame. Entretanto, observa-se a sinuosidade acentuada ao longo de todo o percurso derivado do MDE, indicando duas possibilidades, ou a combinação delas: i) a região da calha maior do rio é relativamente plana, induzindo os algoritmos ao aumento artificial da sinuosidade; ii) a hidrografia representada na carta da SUDENE é, de fato, simplificada quando à representação da rede de drenagem nessa área.

Na ocorrência do primeiro caso, a diferença entre uma linha de referência e outra linha gerada dentro da calha do rio não caracteriza, necessariamente, um erro, mas sim uma diferença entre localizações das redes, e ambas

podem ser representativas do trecho (Buarque et al., 2009).

Os resultados obtidos indicam essa ocorrência, já que o algoritmo do ArcGIS induziu à menor sinuosidade (1,21 m/m) dentre os algoritmos, por ser idêntico ao algoritmo original proposto na década de 1980, não tendo bom desempenho no tratamento de áreas planas (Buarque et al., 2009). Por outro lado, o algoritmo do TerrSet resultou na maior sinuosidade (1,37 m/m). Esses resultados a partir do ArcGIS e TerrSet se mostram coerentes entre si, pois o algoritmo empregado no primeiro software tem a tendência de criar linhas de drenagem paralelas e retilíneas irreais (Paz e Collischonn, 2008; Paz et al., 2006), ao passo que o algoritmo do segundo não apresenta tal tendência e, assim, é esperado que tenha traçado da drenagem com maior sinuosidade do que o primeiro.

**Tabela 2** - Características do curso d'água e da bacia hidrográfica obtidas pelo procedimento manual e a partir do processamento do MDE segundo diferentes algoritmos.

Método	Comprimento (km)	Sinuosidade (m/m)	Elevação mínima (m)	Elevação máxima (m)	Declividade (m/km)	Área da bacia (km <sup>2</sup> )
Manual	33,0	1,20	11	150	4,21	275,25
ArcGIS	33,6	1,21	11	151	4,17	271,32
TerrSet	38,5	1,37	11	167	4,05	271,16
TauDEM	35,4	1,27	11	163	4,29	271,30
GRASS - r.watershed	37,8	1,36	11	143	3,49	271,87
GRASS - r.terraflow	33,8	1,22	11	147	4,03	271,29

Mesmo quando não se pode afirmar a existência de erro no traçado do curso d'água, o fato é que a grandeza comprimento derivada desse traçado é usada numericamente nos métodos hidrológicos, permanecendo o impacto da existência dessa variação. Em combinação com as elevações máxima e mínima obtidas para a bacia hidrográfica, esse comprimento é usado, ainda, para obter diretamente outra grandeza usada nos cálculos hidrológicos, que é a declividade do curso d'água. Os resultados obtidos a partir dos algoritmos indicam predomínio de subestimativa da declividade em relação ao resultado do método manual, com variação de -1% a -17%, à exceção

de um algoritmo que levou ao aumento da declividade por 2% (Tabela 2 e Fig. 3). Isso decorre principalmente do efeito da superestimativa do comprimento, em combinação com as diferenças das elevações causadas pela variação da delimitação da bacia hidrográfica – mas que teve menor peso, como detalhado a seguir.

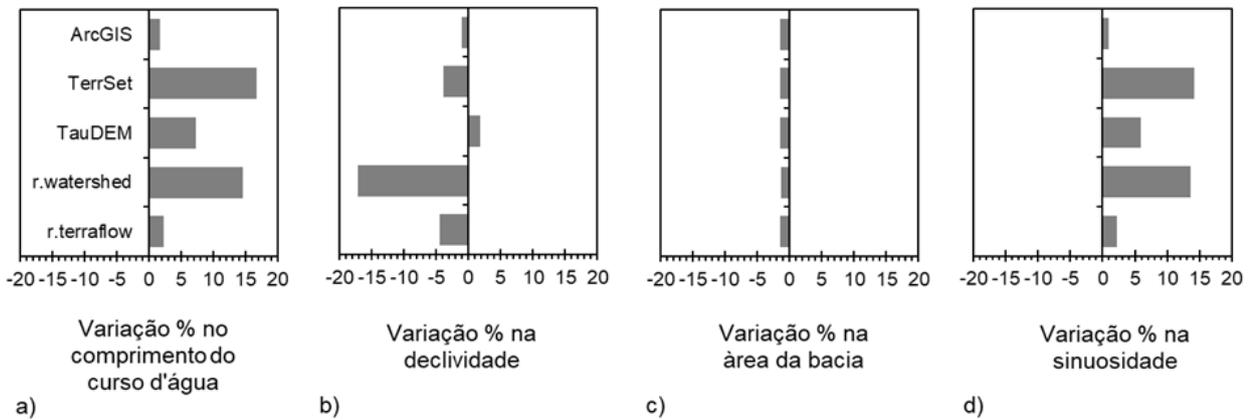
### 3.2 Características da bacia hidrográfica

A delimitação da bacia hidrográfica correspondente à seção em estudo apresenta menor variação de resultados do que o traçado do rio, com

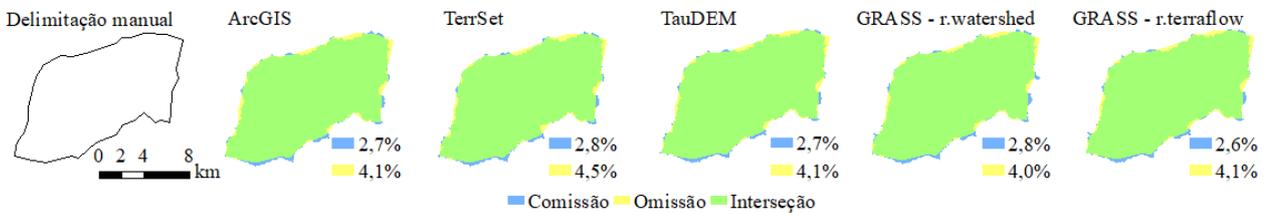
áreas obtidas a partir do processamento do MDE sendo inferiores àquela delimitada manualmente sobre a carta da SUDENE (cerca de 1,2 a 1,5% menor, a depender do algoritmo; Tabela 2 e Fig. 3). Esses resultados muito similares dentre os algoritmos e também relativamente à delimitação manual têm relação com o efeito de compensação inerente à análise de áreas: a existência de diferenças em distintas regiões, ora para mais ora para menos, que podem se compensar e facilitar a coincidência no total numérico da área, sem ne-

cessariamente haver a concordância no traçado das delimitações e muito menos na rede de drenagem em si (Sousa e Paz, 2017; Wu et al., 2011).

A comparação espacial dentre as delimitações mostra percentuais de omissão de 4,0% a 4,5% e de comissão variando de 2,6% a 2,8% (Fig. 4), relativamente à delimitação manual. Isso evidencia maior discrepância no traçado das delimitações da bacia relativamente ao quantitativo da área, mas mesmo assim em patamar reduzido.



**Figura 3** - Variação percentual do comprimento do curso d'água (a), da declividade (b) e da área da bacia hidrográfica (c) a partir do processamento do MDE segundo diferentes algoritmos, relativamente ao método manual de extração de informações.



**Figura 4** - Comparação das delimitações da bacia hidrográfica a partir do MDE usando diferentes algoritmos relativamente à delimitação manual, com indicação das áreas e percentuais de comissão, inclusão e interseção.

Em função da variação da área de drenagem da bacia conforme o algoritmo de processamento do MDE, as elevações máximas variaram entre +11% e -12% relativamente ao método manual, enquanto as elevações mínimas foram idênticas. Como a diferença entre as delimitações foi muito pequena, a omissão ou comissão de pequenas

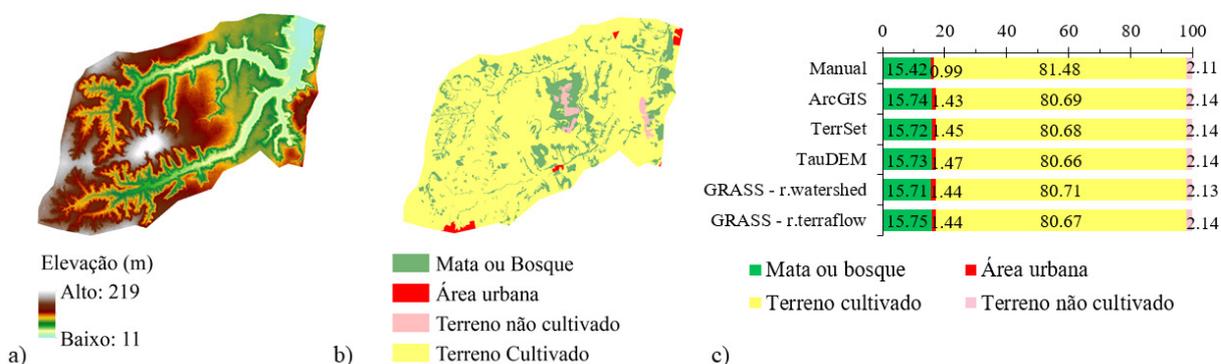
porções já foi suficiente para impactar as elevações máximas, que se situam justamente nas bordas da delimitação, representando os divisores topográficos. Já a inexistência de diferença na elevação mínima é coerente por ocorrerem em áreas das calhas da drenagem, que ficaram todas incluídas em qualquer delimitação (Fig. 5-a). Isso

indica, adicionalmente, a concordância numérica da elevação mínima entre o MDE SRTM e as cartas da SUDENE nessa região – embora não se possa afirmar sobre a concordância espacial do ponto em que ocorre tal elevação mínima.

### 3.3 Estimativa da vazão máxima

Para a estimativa das vazões máximas, o cruzamento dos tipos de solo, que foram todos associados ao mesmo grupo hidrológico do método

SCS, com o mapa de classificação de uso e ocupação da terra resultou no mesmo valor de CN médio atribuído para a bacia, com valor de 86. Isso ocorreu em função da pequena variação na delimitação da bacia hidrográfica dentre os métodos, e por haver relativa pouca variação do uso e ocupação da terra justamente nas porções de borda da bacia, fazendo com que a distribuição percentual entre as quatro classes consideradas fosse praticamente idêntica, independentemente de se a delimitação foi manual ou a partir de algum dos algoritmos testados (Fig. 5-b e 5-c).



**Figura 5** - a) MDE do SRTM-30 e b) Mapa de classificação de uso e ocupação da terra para a bacia em estudo considerando a delimitação manual; c) Distribuição % das classes de uso e ocupação na delimitação manual e obtida a partir de cada algoritmo.

As estimativas de tempo de concentração apresentaram variação de 8,4 h para o método manual até 9,6 h para o algoritmo do r.watershed (Tabela 3), o que é diretamente relacionado à superestimativa dos comprimentos extraídos do processamento do MDE em relação ao traçado manual (Figura 6-a) e da redução das declividades. O aumento do comprimento e a redução da declividade contribui no sentido de retardar o tempo de concentração.

Considerando a prática do DER-PB de adotar uma duração de chuva com valor inteiro imediatamente superior ao  $t_c$  para a definição da chuva de projeto, houve a anulação da diferença nes-

se parâmetro extraído a partir de dados de três algoritmos e restou uma diferença de 1 h (11%) para os outros dois algoritmos testados. Ou seja, por esse procedimento metodológico, tem-se um fator atenuador dos possíveis efeitos da variação das características fisiográficas extraídas para estimativa do  $t_c$  e definição da chuva de projeto.

A vazão máxima estimada a partir de informações derivadas do MDE foi inferior (entre -1,4% e -7,9%) àquela estimada a partir das informações extraídas manualmente (Fig. 6-b). Isso é resultado da combinação da tendência de aumentar o comprimento do curso d'água principal (maior amortecimento na vazão de pico), reduzir a de-

clividade (também induz ao amortecimento da vazão de pico) e de reduzir o tamanho da bacia (reduz a área de captação tem-se menor volume a escoar). Mas a variação na vazão máxima pode ser considerada pequena para todos os casos. A

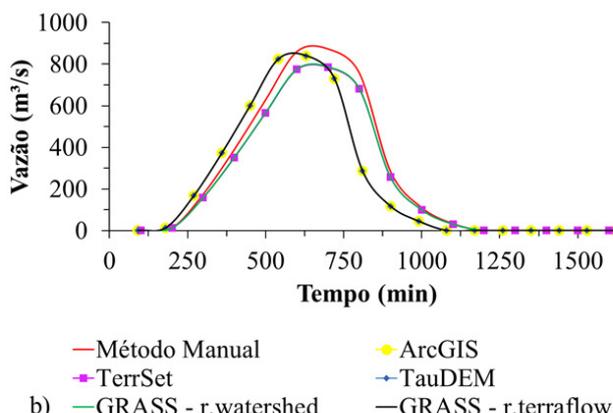
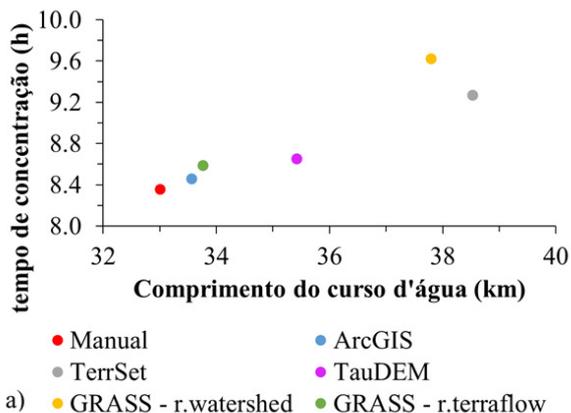
maior diferença beira os 8%, ao usar as informações extraídas pelos algoritmos do TerrSet e r.watershed, pelo maior aumento do comprimento do curso d'água nesses dois casos, relativamente ao método manual.

**Tabela 3** - Resultados dos estudos hidrológicos em função do método usado para extrair as informações de caracterização da bacia hidrográfica e do curso d'água principal.

Método	Tc calculado (horas)	Duração da chuva de projeto adotada (horas)	Vazão máxima (Q <sub>máx</sub> - m <sup>3</sup> /s)	Varição de Q <sub>máx</sub> em relação ao método manual (%)	Nível máximo de enchente calculado (m)	Varição absoluta em m (e %) do nível máximo calculado em relação ao método manual	Nível máximo de enchente adotado (m)
Manual	8,4	9	852,70	-	3,35	-	3,5
ArcGIS	8,5	9	840,49	-1,43	3,35	0,0 (0,0%)	3,5
TerrSet	9,3	10	785,71	-7,86	3,25	-0,10 (-3,0%)	3,5
TauDEM	8,7	9	840,46	-1,44	3,30	-0,05 (-1,5%)	3,5
GRASS - r.watershed	9,6	10	787,69	-7,62	3,40	0,05 (+1,5%)	3,5
GRASS - r.terraflow	8,6	9	840,38	-1,44	3,35	0,0 (0,0%)	3,5

O efeito da variação das vazões máximas, contudo, foi amortecido na continuidade dos métodos hidrológicos aplicados, resultando em diferença do nível máximo de enchente calculado que variou de +5,0 cm a -10 cm (+1,5% a -3,0%). Pelo

critério de utilizar, por questões práticas, a fórmula de Manning com uma variação da lâmina d'água de 50 cm, o nível máximo de enchente resultou no mesmo valor, de 3,5 m, independentemente de como as informações foram extraídas.



**Figura 6** - a) Relação entre comprimento do curso d'água principal e tempo de concentração estimado a partir de cada método/algoritmo de extração de informações; b) Hidrograma resultante.

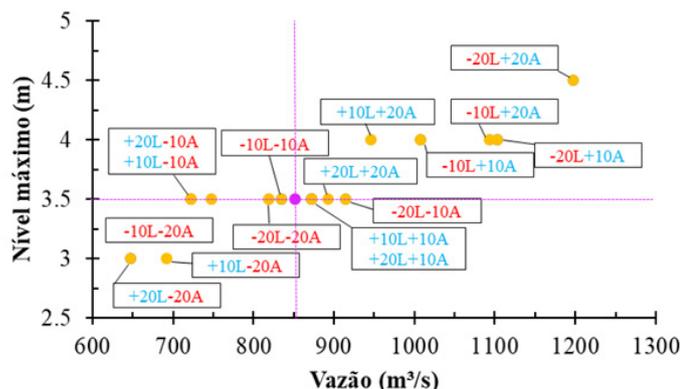
### 3.4 Sensibilidade do nível e vazão máximos a variações de comprimento do curso d'água e área da bacia

Na análise de sensibilidade realizada, variando-se comprimento do curso d'água principal (L) e área

da bacia hidrográfica (A) por +/-10% e +/-20%, observa-se que as vazões máximas variaram de 647 a 1197 m<sup>3</sup>/s (Fig. 7). A maior redução de vazão (-24%) ocorreu com a combinação de aumento de 20% em L (maior tempo de deslocamento e maior

amortecimento das vazões) com a redução de 20% em A (menor área de captação e menor volume a escoar). No sentido inverso, a combinação da re-

dução de 20% em L com o aumento de 20% em A provocou o maior aumento de vazão (+40%), quase o dobro do efeito do ponto extremo anterior.



**Figura 7** - Vazão e nível máximo de enchente em função das 16 combinações de variações de comprimento do curso d'água (L) e de área da bacia (A) (as variações percentuais de cada simulação estão indicadas junto aos pontos, sendo as positivas em cor azul e as negativas em vermelho).

Na Fig. 7, o ponto roxo indica a situação de cálculo original, sem variação em L e A. Observa-se que todos os demais pontos estão em dois quadrantes apenas: no inferior esquerdo e no superior direito, ou alinhados na horizontal com a borda desses quadrantes. Isso representa que as combinações de variação de L e A levaram às seguintes situações: i) redução da vazão máxima, com redução ou não variação do nível máximo; ii) aumento da vazão máxima, com aumento ou não variação do nível máximo. O primeiro caso representa todos os pontos de redução em A (localizados à esquerda do ponto da situação original de cálculo), exceto o ponto -20L-10A. O segundo caso representa todos os pontos de aumento em A (à direita do ponto da situação original de cálculo), além do ponto -20L-10A. Ou seja, independentemente da variação em L, o sentido da variação em A direcionou para indicar o mesmo sentido na variação da vazão máxima, podendo ocorrer ou não o mesmo efeito no nível máximo. Quando não há a ocorrência desse mesmo efeito no nível máximo, isso se deve ao último

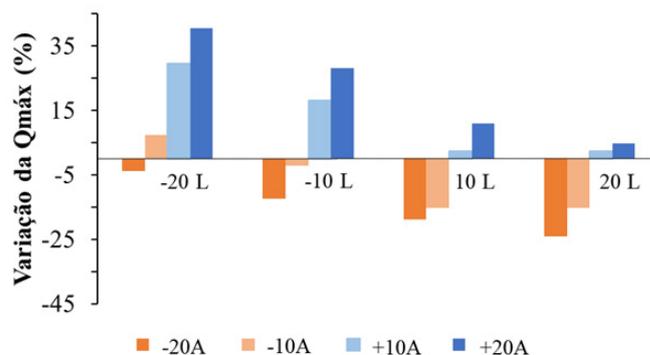
passo da metodologia, de adotar um valor mais inteiro por questões práticas. O ponto de exceção, -20L-10A, indica que quando houve apenas redução de 10% na área, que induz à redução da vazão máxima, o efeito de reduzir 20% em L contrabalançou e superou isso, levando ao aumento da vazão máxima como efeito final.

O efeito sobre a vazão máxima causado pela variação isolada em L ou em A e a combinação dessas variações ficam claros com os resultados da Fig. 8. Por exemplo, mantendo a mesma variação de redução de 10% em L, ao reduzir -10% e -20% em A tem-se reduções em  $Q_{max}$  de -2% e -12%, respectivamente. Já o aumento de +10% e +20% em A levou a aumento de +18% e +28% em  $Q_{max}$ .

As variações impostas a L e A nessa análise de sensibilidade são bem superiores aos valores ocorridos em função dos diferentes algoritmos utilizados para processamento do MDE no estudo de caso. De fato, é menos provável que ocorram erros de 10% a 20% na caracterização fisiográfica da bacia,

mas ao impor tamanha variação de L e A, permitiu-se melhor identificação de padrões. Além disso, o impacto consequente na estimativa da vazão para

essa situação mais extrema de 10% a 20% de erro denota envoltória limite do que pode ocorrer ao ter variações em L e A menores e mais usuais.



**Figura 8** - Variação da vazão máxima para as 16 combinações de variações de comprimento do curso d'água (L) e área da bacia (A).

#### 4 CONCLUSÕES

Este trabalho possibilitou analisar as contribuições do geoprocessamento na extração de informações para determinação da vazão máxima de bacias hidrográficas seguindo metodologia praticada no DER/PB. Cinco algoritmos distintos foram usados para o processamento do MDE, com resultados que indicaram padrão de aumento do comprimento do curso d'água principal, redução da declividade e redução da área da bacia hidrográfica, relativamente à extração de informações de forma manual a partir de cartas da SUDENE. O traçado obtido por processamento do MDE tendeu a captar maior sinuosidade na rede de drenagem, indicando que a hidrografia da SUDENE apresenta traçado simplificado, mas de padrão geral alinhado com as drenagens derivadas do MDE. Os algoritmos usados resultaram em variações nas informações extraídas praticamente no mesmo sentido relativamente às informações extraídas com a abordagem manual.

Os três fatores, aumento do comprimento do rio, redução da declividade do rio e redução da área

da bacia hidrográfica, atuam no mesmo sentido de reduzir a vazão máxima gerada, pelo maior efeito de amortecimento combinado com a menor área de captação. Mas destaca-se também que há considerável amortecimento do efeito da variação desses fatores extraídos com diferentes algoritmos, em função das próprias considerações metodológicas praticadas pelo DER-PB. Pelos métodos hidrológicos aplicados para estimativa dessa vazão máxima, esses fatores induziram à redução na vazão máxima. Contudo, esse efeito foi desprezível para impactar a última etapa, que é a estimativa de nível máximo de enchente, por ter sido variação inferior ao próprio arredondamento que é feito por questões práticas.

Com a análise de sensibilidade realizada, concluiu-se que possíveis erros na quantificação da área da bacia hidrográfica são mais impactantes na estimativa da vazão máxima do que possíveis erros de mesma grandeza percentual no comprimento do rio, considerando a metodologia utilizada. Ainda mostrou que, ocorrendo a combinação de erros na área e no comprimento que levem in-

dividualmente a situações opostas (redução x aumento da vazão máxima), predomina fortemente o sentido provocado pelo erro na área.

Por fim, recomenda-se a incorporação do processamento do MDE para obter informações necessárias aos estudos hidrológicos para dimensionamento de obras hidráulicas. Pois junta-se a maior facilidade de uso atual das ferramentas de processamento de MDE com a disponibilidade crescente de dados de MDE, a tendência desses dados com melhor resolução espacial e maior qualidade das informações, além de eliminar questões de subjetividade no traçado da delimitação da bacia e erros do processo de vetorização manual da hidrografia.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado da Paraíba (DER/PB) pela disponibilização de alguns dados necessários para o desenvolvimento do presente artigo; ao CNPq, pela concessão de bolsa ao segundo autor.

## 6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

**Conceitualização:** Jorge RLO, Breckenfeld KAA e Paz AR; **Metodologia:** Jorge RLO, Breckenfeld KAA e Paz AR; **Investigação:** Jorge RLO, Breckenfeld KAA e Paz AR; **Redação – Primeira versão:** Jorge RLO, Breckenfeld KAA e Paz AR; **Redação – Revisão & Edição:** Jorge RLO e Paz AR; **Recursos:** Breckenfeld KAA; **Supervisão:** Breckenfeld KAA

## 7 REFERÊNCIAS

ADDOR, N.; MELSEN, L. Legacy, rather than adequacy, drives the selection of hydrological models. **Water Resources Research** 55, 378-390, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018WR022958>

ARGE, L.; CHASE, J.; HALPIN, P.; TOMA, L.; VITTER, J.; URBAN, D.; WICKREMESINGHE, R. Flow computation on massive grid terrains, **Geoinformatica** 7, 283-313, 2003. <https://doi.org/10.1145/512161.512180>

BARTLETT, M. et al. Beyond the SCS-CN method: A theoretical framework for spatially lumped rainfall-runoff response. **Water Resources Research** 52(6), 4608-4627, 2016. <https://doi.org/10.1002/2015WR018439>

BUARQUE, D. et al. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 14(2), 91-103, 2009. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v14n2.p91-103>

BURROUGH, P.; MCDONNELL, R.; 1998. **Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics**. Oxford University Press, Oxford, 333pp.

CUNHA, S. et al. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 20(4), 837-848, 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p837-848>

DE SMITH, M.; GOODCHILD, M.; LONGLEY, P. **Geospatial Analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software**. Leicester: Trobador Publishing 2ª edição, 2007.

DNIT. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, publicação IPR 715, 2005.

DNIT. **Manual de Drenagem de Rodovias**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, publicação IPR 724, 2006.

FAN, F. et al. Sobre o Início da Rede de Drenagem Definida a Partir dos Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 18(3), 241-257, 2013. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n3.p241-257>

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Journal of Hydrology** 193(1-4), 204-213, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03138-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03138-1)

JENSON, S.; DOMINGUE, J. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 54(11), 1593-1600, 1988.

JONES, R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. **Computers and Geosciences** 28, 1051-1060, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00022-5)

LAI, Z.; LI, S.; LV, G.; PAN, Z.; FEI, G. Watershed delineation using hydrographic features and a DEM in plain river network region, **Hydrological Processes** 30(2), 276-288, 2016. <https://doi.org/10.1002/hyp.10612>

LEE, G.; TACHIKAWA, Y.; TAKARA, K. Interaction between topographic and process parameters due to the spatial resolution of DEMs in distributed rainfall-runoff modeling, **Journal of Hydrologic Engineering** 14(10), 1059-1069, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000098](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000098)

- METZ, M.; MITASOVA, H.; HARMON, R. Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search. **Hydrology and Earth System Sciences** **15**, 667-678, 2011. <https://doi.org/10.5194/hess-15-667-2011>
- O'CALLAGHAN, J.; MARK, D. The extraction of drainage networks from elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing** **28**, 323-344, 1984. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- OLIVERA, F. Extracting Hydrologic Information from Spatial Data for HMS Modeling. **Journal of Hydrologic Engineering** **6(6)**, 524-530. 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:6\(524\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:6(524))
- PAZ, A.; COLLISCHONN, W. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. **Journal of Hydrology** **343(3-4)**, 127-139, 2007. <https://doi.org/10.1029/2005WR004544>
- PAZ, A.; COLLISCHONN, W.; Silveira, A. Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models. **Water Resources Research** **42(W08502)**, 2006.
- PAZ, A.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. **Revista Geográfica Acadêmica** **2**, 84-95, 2008.
- PERSENDT, F.; GOMEZ, C. Assessment of drainage network extractions in a low-relief area of the Cuvelai Basin (Namibia) from multiple sources: LiDAR, topographic maps, and digital aerial orthophotographs. **Geomorphology** **260**, 32-50, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.047>
- PFASFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento – DNOS, 1957.
- RAJIB, M.; MERWADE, V. Improving soil moisture accounting and streamflow prediction in SWAT by incorporating a modified time-dependent Curve Number method. **Hydrological Processes** **30**, 603-624, 2016. <https://doi.org/10.1002/hyp.10639>
- SEdgeWICK, R. **Algorithms in C++**. Addison-Wesley, Reading, MA, 1992.
- SHEFFIELD, J.; WOOD, E.; PAN, M.; COCCIA, G.; SERRAT-CAPDEVILA, A.; VERBIST, K. Satellite remote sensing for water resources management - potential for supporting sustainable development in data poor regions. **Water Resources Research** **54(12)**, 9724-9758, 2018. <https://doi.org/10.1029/2017WR022437>
- SINGH, V.; FREVERT, D. **Watershed models**. Taylor & Francis. Boca Raton (EUA), 653 p., 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420037432>
- SIQUEIRA, V. ET AL. IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** **21(1)**, 274 – 287, 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>
- SOUZA T.; PAZ, A. How to evaluate the quality of coarse-resolution DEM-derived drainage networks. **Hydrological Processes** **1-18**, 2017. <https://doi.org/10.1002/hyp.11262>
- STANISLAWSKI, L.; SURVILA, K.; WENDEL, J.; LIU, Y.; BUTTENFIELD, B. An open source high-performance solution to extract surface water drainage networks from diverse terrain conditions. **Cartography and Geographic Information Science** **45(4)**, 319-328, 2017. <https://doi.org/10.1080/15230406.2017.1337524>
- TASSI, R. et al. Aspectos metodológicos sobre o emprego do método do SCS com auxílio de ferramentas de geoprocessamento no projeto de estruturas de drenagem de uma rodovia. **Teoria e Prática na Engenharia Civil** **7**, 27-37, 2005.
- USDA – United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. **Technical Release 55 (TR-55) – Urban Hydrology for Small Watersheds**, 2o ed., 1986.
- USDA – United States Department of Agriculture. NRCS – Natural Resources Conservation Service. **NEH: National Engineering Handbook**. Part 630: hydrology, ch. 10, 2007.
- VERMA, S.; VERMA, R.; MISHRA, S.; SINGH, A.; JAYARAJ, G. A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation. **Hydrological Sciences Journal** **62(12)**, 1891-1930, 2017. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1334166>
- WU, H.; KIMBALL, J.; MANTUA, N.; STANFORD, J. Automated upscaling of river networks for macroscale hydrological modeling. **Water Resources Research** **47(3)**, 1-18, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.006>
- WU, S.; LI, J.; HUANG, G. A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: sensitivity to elevation data resolution. **Applied Geography** **28**, 210-223, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.022>
- WU, T.; LI, J.; LI, T.; SIVAKUMAR, B.; ZHANG, G.; WANG, G. High-efficient extraction of drainage networks from digital elevation models constrained by enhanced flow enforcement from known river maps. **Geomorphology** **340**, 184-201, 2019.
- YILDIRIM, A. et al. A virtual tile approach to raster-based calculations of large digital elevation models in a shared-memory system. **Computers and Geosciences** **82**, 78-88, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.05.014>
- ZHANG, S.; PAN, B. An urban storm-inundation simulation method based on GIS. **Journal of Hydrology**, 517, 260-268, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.044>
- ZHANG, Y.; JIA, Y. Watershed Merging: A simple and effective algorithm for channel network identification and extraction. **Water Resources Research** **56(10)**, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019WR026943>
- ZOPPOU, C. Review of urban storm water models. **Environmental Modelling & Software**, 16(3), 195-231, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)