



Gestão & Gerenciamento

USO DE GEOTECNOLOGIA NA MODELAGEM DE ÁGUA PLUVIAL PARA GESTÃO DE DRENAGEM URBANA

USE OF GEOTECHNOLOGY IN STORMWATER MODELING FOR URBAN DRAINAGE MANAGEMENT

Victoria Silvia Guimarães de Oliveira

Engenheira Sanitarista e Ambiental; Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

victoriaoliveira@poli.ufrj.br

Matheus Martins de Sousa

Doutor em Engenharia Civil; Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

matheus@poli.ufrj.br

Osvaldo Moura Rezende

Doutor em Engenharia Civil; Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

omrezende@poli.ufrj.br

Resumo

Ocupações urbanas desordenadas e informais, a falta de informações das infraestruturas de drenagem e terrenos acidentados com alta declividades são fatores que exigem uma análise meticulosa para uma adequada gestão das águas urbanas. O manejo de águas pluviais urbanas apresenta desafios característicos de cada localidade, o que torna a criação de uma metodologia de modelagem hidrodinâmica para eventos de inundação e análise das redes de drenagem uma tarefa complexa e de difícil padronização. O presente artigo analisa uma etapa integrante da maioria dos modelos hidrodinâmicos usualmente empregados para simulação de inundações e do comportamento da drenagem pluvial urbana: a divisão das áreas de contribuição para o escoamento pluvial. O uso de ferramentas geotecnológicas pode facilitar a tomada de decisão do modelador para que a divisão dessas áreas resulte em um modelo representativo do escoamento que ocorre na realidade. Assim, são analisadas no estudo ferramentas do *software* GRASS GIS e de MDEs gerados por sensoriamento remoto para auxiliar a divisão de áreas de contribuição em uma sub-bacia do Rio Camarajipe, em Salvador – Bahia.

Palavras-chaves: Modelagem hidrodinâmica; águas pluviais; drenagem urbana; SIG.

Abstract

Disordered and informal urban occupations, the lack of information on drainage infrastructures, and steep, hilly terrain are factors that require meticulous analysis for adequate urban water management. Urban stormwater management presents challenges specific to each locality, making the creation of a hydrodynamic modeling methodology for flood events and drainage network analysis a complex and difficult-to-standardize task. This article aims to analyze a component integral to most hydrodynamic models usually employed for flood simulation and urban stormwater drainage behavior analysis: the division of contributing areas for stormwater runoff. The use of GIS geotechnological tools can facilitate the decision-making process for the modeler so that the division of these areas results in a model representative of the actual runoff. Thus, the study analyzes tools from GRASS GIS software and DEMs generated by remote sensing to assist in dividing contributing areas in a sub-basin of the Rio Camarajipe in Salvador, Bahia.

Keywords: Hydrodynamic modeling; rainwater; urban drainage; GIS.

1. Introdução

A crescente complexidade dos ambientes urbanos, agravada pela infraestrutura inadequada de drenagem, exige abordagens inovadoras para o planejamento urbano e a mitigação de desastres. Segundo o diagnóstico elaborado para o ano de referência de 2022, com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento para Águas Pluviais - SNIS-AP - a taxa de cobertura de vias públicas com redes ou canais pluviais subterrâneos na área urbana no Brasil era em média de 30,8% nos municípios e 34,9% nas capitais (BRASIL, 2023). Em relação à gestão, apenas 16,8% dos municípios contavam com Plano Diretor de Drenagem e 42,5% com cadastro técnico de obras lineares, instrumento de gestão que reúne informações das infraestruturas físicas e operacionais dos sistemas de drenagem (BRASIL, 2023). É necessário ressaltar que tais informações são coletadas por autodeclaração dos municípios e prestadores de serviços de saneamento básico, sem verificações externas, o que leva a desconfiar sobre a precisão dos dados (COSTA *et al.*, 2013).

Os desafios para o manejo de águas pluviais estão ligados a problemas estruturais de gestão, dificuldades históricas de planejamento, limitações financeiras e técnicas e ausência

de normas técnicas de abrangência nacional para projetos. Em ambientes urbanos encontram-se questões singulares, como em áreas de ocupação desordenada e de urbanização deficiente, onde é complexo o conhecimento topográfico detalhado da área e faltam informações sobre a infraestrutura existente.

Alguns modelos para simulações hidrodinâmicas ou hidrológicas utilizam uma combinação de equações 1D e 2D para as simulações de inundações e do escoamento pluvial, ou modelos denominados quasi-2D, em que as características das bacias de contribuição são representadas de forma bidimensional, porém, somente são utilizadas equações unidimensionais para as simulações hidrodinâmicas (MIGUEZ *et al.*, 2017).

As abordagens hidrológicas e geomorfológicas, podem ser adequadas para regiões com poucos dados, mas a modificação urbana e a desconsideração da influência da infraestrutura das redes de drenagem comprometem sua precisão (GUO *et al.*, 2021). Alves *et al.* (2018) demonstraram a aplicabilidade de uma abordagem espacial multicritério baseada em SIG (Sistema de informações georreferenciadas) para mapear a suscetibilidade a inundações em Campina Grande, Brasil. Analogamente, Miranda *et al.* (2023) propuseram um método para mapeamento da susceptibilidade a inundações em regiões costeiras, com uma aplicação na Cidade do Rio de Janeiro, a qual obteve bons resultados. No entanto, sua eficácia depende da precisão e abrangência dos dados utilizados, enfatizando a necessidade de fontes de dados confiáveis nos processos de planejamento urbano (ALVES *et al.*, 2018).

O modelo apresentado por Miguez *et al.* (2017), o MODCEL, é um modelo quasi-2D que representa a superfície por uma divisão em células de armazenamento de águas pluviais, podendo representar o escoamento entre células localizadas em várias direções no plano bidimensional, mas que utiliza equações unidimensionais amplamente testadas para calcular o escoamento entre elas. O MODCEL é também classificado como um modelo multicamadas, capaz de simular de forma integrada os escoamentos que ocorrem sobre as superfícies e no interior de redes de galerias, conectando essas camadas por ligações que simulam o funcionamento de bocas-de-lobo e caixas-raio, além de extravasamentos de poços de visitas (RADESCA *et al.*, 2021).

Dentre as etapas iniciais para os estudos do escoamento pluvial e previsão de inundações, de grande parte dos métodos mais utilizados, está a divisão da área em estudo em bacias de contribuição para o sistema de drenagem analisado, cursos d'água naturais ou pontos de controle. Entretanto, um dos problemas dos métodos atuais de divisão de áreas de contribuição, que usam modelos hidrológicos acoplados, está relacionado ao fato de que os aspectos topográficos das bacias de contribuição são representados por uma declividade média, o que não representa a condição topográfica real e acaba acumulando erros à medida em que a variação da elevação no interior das áreas delimitadas aumenta (WU *et al.*, 2020).

O estudo de Wu *et al.* (2020) analisa metodologias para a delimitação de áreas de contribuição de drenagem pluvial urbana, introduzindo um novo método baseado em Modelos Digitais de Elevação - MDE. O estudo propõe um método que combina contornos naturais/artificiais com dados de um MDE produzido com resolução de 2 m. As bacias de contribuição são delimitadas inicialmente pelo método de contornos naturais/artificiais e analisadas quanto à distribuição da elevação (WU *et al.*, 2020). Bacias de contribuição que apresentem desvio padrão da elevação menor que 0,6 foram consideradas suaves, podendo

utilizar a declividade média, e as que apresentaram desvio padrão maior são subdivididas automaticamente com o MDE (WU *et al.*, 2020). Ao comparar as simulações de inundações no campus da Universidade de Zhengzhou (China), o estudo conclui que a subdivisão adicional das bacias de contribuição originais pelo critério do desvio padrão de elevação melhora a precisão da simulação, recomendando a escolha de um limiar de desvio padrão adequado para equilibrar a precisão e a carga de trabalho (WU *et al.*, 2020).

Integrando dados de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução (2 m × 2 m) do Instituto de Pesquisa da Cidade de Fuzhou (China) com dados de estrada e redes de drenagem, e identificação com precisão das áreas edificadas a partir do processamento de imagens de satélite, os pesquisadores reconstruíram um MDE mais preciso para estudar a influência da qualidade dos MDEs nas simulações de inundações em áreas urbanas (YANG *et al.*, 2023). Após realizar simulações em 1D e 2D para comparar a utilização do MDE com e sem o processamento adicional, o MDE melhorado obteve previsões mais confiáveis das extensões e profundidades de alagamentos quando comparadas com dados históricos reais, especialmente em áreas densamente construídas, o que demonstra a importância da qualidade dos MDEs utilizados nas modelagens de alagamentos (YANG *et al.*, 2023).

Um ponto de atenção importante para utilização de MDEs para modelagem hidrológica ou hidrodinâmica é o tratamento de barreiras artificiais geradas pela representação da elevação de elementos urbanos como aterros rodoviários, desconsiderando estruturas que permitem o escoamento pluvial abaixo da superfície, como a presença de bueiros e pontes (LIDBERG *et al.*, 2017). Lidberg *et al.* (2017) avaliaram que o método de criar “passagens” para o escoamento superficial nos MDEs em trechos onde localizam-se interrupções artificiais dos fluxos por estruturas como pontes, bueiros e similares, foi o mais eficaz para extrair a hidrografia para as diferentes resoluções de MDEs analisadas, enquanto o preenchimento das depressões geradas por essas estruturas foi o menos preciso. Além disso, a “queima” da elevação no percurso de cursos d’água conhecidos, subtraindo o valor da elevação no MDE onde localizam-se esses cursos d’água, aumentou a precisão para todos os métodos e resoluções analisados (LIDBERG *et al.*, 2017).

No estudo de Sousa *et al.* (2022) foram comparadas, a partir da utilização de um teste proposto pela *British Environment Agency* (NÉELZ; PENDER, 2013), duas metodologias para a modelagem hidrodinâmica com o MODCEL: uma forma automática com um MDE e um método interpretativo. A simulação no MODCEL para divisão automática das células de escoamento utilizou a grade de pixels do MDE de alta resolução como unidade para a representação das células (43.148 células de 9 m² cada), enquanto o método interpretativo utilizou 163 células irregulares, definidas a partir da análise da área por critérios teóricos pelo usuário do modelo (SOUSA *et al.*, 2022). A simulação com o método automático demorou 3 dias para finalizar, enquanto com o interpretativo, 190 segundos, apesar de ambos apresentaram resultados semelhantes nos pontos de controle (SOUSA *et al.*, 2022).

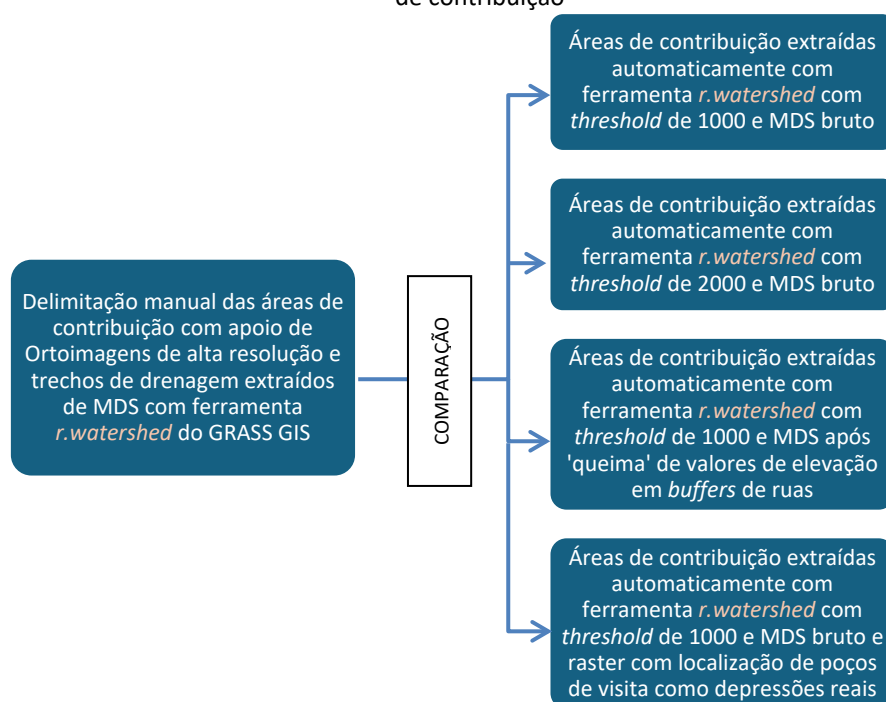
O estudo apontou as vantagens e desvantagens de cada método, considerando o maior tempo e custo computacional para simulação com a divisão automática das células de escoamento, em contraste com o curto tempo de simulação e maior entendimento e controle do modelo com o método interpretativo, apesar do maior tempo requerido para a etapa inicial de divisão manual das células (SOUSA *et al.*, 2022).

O presente artigo tem por objetivo analisar diferentes métodos de divisão das áreas de contribuição de uma sub-bacia para um sistema de drenagem pluvial, para posterior modelagem e estudo dos processos de escoamento pluvial e inundações. Pretende-se analisar a utilização de ferramentas de SIG e dados de alta resolução para auxiliar a delimitação manual das áreas de contribuição e para o processamento de um modelo digital de superfície (MDS) e extração automatizada de bacias de contribuição por métodos diferentes. Para isso, o estudo apresenta os resultados da aplicação das diferentes metodologias para uma sub-bacia urbana, altamente adensada e com ocupações desordenadas, na cidade de Salvador, Bahia (Brasil).

2. Metodologia

Foram utilizadas diferentes abordagens e métodos para delimitação das áreas de contribuição para a sub-bacia do estudo de caso para comparação posterior dos resultados obtidos, conforme as etapas resumidas no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Metodologia empregada no estudo para comparação entre métodos de delimitação de áreas de contribuição



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O emprego de diferentes modelos de delimitação de bacias de contribuição utilizados nas simulações hidrológicas e hidrodinâmicas influenciam nos resultados obtidos. Os resultados das equações empregadas para o cálculo das variáveis de escoamento na área em estudo dependem dos parâmetros relacionados à divisão do terreno em áreas de contribuição. Conforme a metodologia empregada, as bacias de contribuição delimitadas irão resultar em um padrão de escoamento distinto, além de apresentarem alterações para os parâmetros, como área e elevação, utilizados nas modelagens.

Para os modelos hidrológicos, considerando a utilização de valores médios de elevação, quanto maior a variação do relevo no interior das bacias delimitadas, maior será a imprecisão da representação dos efeitos da topografia no interior das bacias no escoamento superficial. Em modelos hidrodinâmicos, que utilizem a divisão das bacias de contribuição como células de escoamento, por exemplo, os diferentes valores de área das bacias e o valor da elevação em seus centros geram resultados distintos para a vazão e velocidade dos escoamentos simulados no modelo.

Desta forma, o presente estudo irá analisar os resultados para diferentes parâmetros das áreas de contribuição delimitadas para um mesmo local, a partir da utilização de diferentes metodologias. Com base na análise de variáveis como o número de bacias de contribuição geradas, suas áreas e o valor do desvio padrão das elevações no interior de cada bacia, o estudo apresenta uma comparação entre a delimitação manual de áreas de contribuição com métodos parcialmente automatizados com a utilização de ferramentas de SIG. Será apresentada também a discussão sobre a utilização de um MDS e de ortoimagens de alta resolução para o auxílio no processo de delimitação de áreas de contribuição. Os Modelos Digitais de Superfície (MDSs) são um tipo de MDE que oferecem uma representação mais completa e detalhada da superfície terrestre, o que pode ser especialmente útil em áreas urbanas, apresentando a elevação de edificações e outras construções.

A ferramenta *r.watershed* do GRASS GIS realiza uma análise hidromorfológica que calcula bacias hidrográficas e linhas de fluxo de drenagem superficial a partir de um MDE. Ele utiliza algoritmos baseados em direção de fluxo para identificar áreas de captação de água, delinear sub-bacias, e gerar mapas de acúmulo de fluxo, linhas de fluxo, e divisores de águas. Esse método *r.watershed* define como parâmetro de entrada o número mínimo de células que uma área de captação de água deve ter para ser considerada uma bacia (*threshold*). Os valores de *threshold* possuem relação diretamente proporcional com o tamanho das bacias geradas e inversamente proporcional com a quantidade de bacias para uma mesma área. Para o presente estudo, foram utilizados dois valores para o parâmetro *threshold*:

- *Threshold* de 1000: Gera mais bacias de contribuição com tamanhos menores, capturando mais detalhes da topografia;
- *Threshold* de 2000: Gera menos bacias, mas de maior tamanho, agregando áreas de captação maiores e simplificando a rede de drenagem.

O método *r.watershed* do GRASS GIS pode ser ajustado para considerar pontos de captação do escoamento superficial por estruturas de drenagem, como poços de visita, identificados pelo algoritmo como depressões reais. Foi realizada a transformação do arquivo vetorial de pontos representando a localização de poços de visita em um arquivo *raster* com pixels de 0,5 x 0,5 metros e elevação de -3 metros, para que o algoritmo considere essas áreas como depressões no terreno durante o processamento para geração das bacias de contribuição.

Foi utilizado também o método de "queimar" valores de elevação no raster do MDS para ajustar artificialmente a elevação em áreas específicas, refletindo modificações reais ou simuladas no terreno. O método de "queimar" se refere à subtração de valores em pixels específicos do raster. Para o estudo, foi utilizado um buffer de 3 metros em torno das linhas

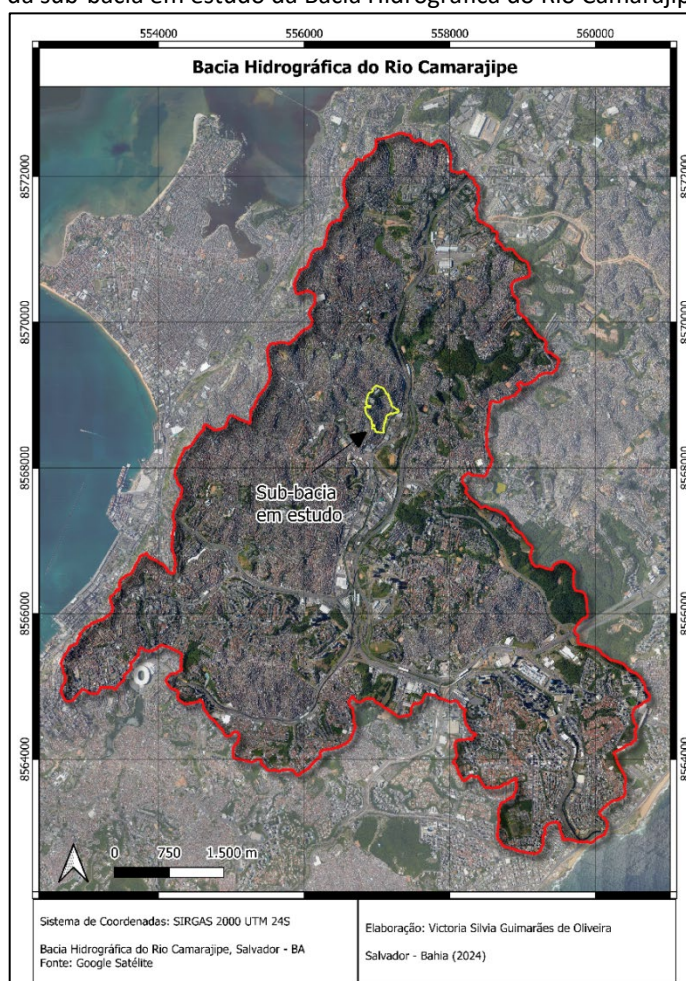
de ruas, para posteriormente subtrair em 1 metro os valores de elevação no MDS nas áreas correspondentes aos polígonos gerados pelo buffer.

3. Estudo de caso

Para o estudo de caso foi escolhida uma sub-bacia urbana da Bacia Hidrográfica do Rio Camarajipe, localizada entre os bairros Bom Juá e Fazenda Grande do Retiro, na cidade de Salvador – Bahia (Brasil) (Figura 1). A Bacia do Rio Camarajipe é a terceira maior bacia em extensão do município, com uma área de 35,877 km² (SANTOS *et al.*, 2010).

Além da inexistência de sistema cadastral das redes de drenagem, existem ruas em que não são identificados nenhum tipo de dispositivo de drenagem mínimos, principalmente em bairros com ocupação mais desordenada, além de serem registrados transtornos com a entrada de águas nas residências (SALVADOR, 2021). O rio Camarajipe é utilizado como corpo d'água receptor de esgotos sanitários de grande parcela das habitações populares situadas na área, e encontram-se também problemas de assoreamento de parte do rio, presença de resíduos sólidos, existência de construções sobre as redes e dispositivos de drenagem, e acessibilidade para manutenção em diversos locais prejudicada devido à criminalidade (SALVADOR, 2021).

Figura 1 - Área da sub-bacia em estudo da Bacia Hidrográfica do Rio Camarajipe, Salvador - BA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024). Ortoimagem do Projeto de Mapeamento Cartográfico de Salvador (2017).

Como parte do Projeto de Mapeamento Cartográfico de Salvador pelo poder público, foi realizado entre agosto de 2016 e fevereiro de 2017 o Aerolevantamento Fotogramétrico apoiado e perfilamento a laser para construir os dados geoespaciais em escala de 1:1.000 para o território municipal, gerando os seguintes produtos utilizados no presente estudo (SALVADOR, 2015):

- Ortoimagens Digitais: formadas a partir de uma imagem ou da composição, fusão etc., de várias imagens ortorretificadas, com resolução espacial de 0,10 m;
- Conjunto de Dados Geoespaciais Vetoriais – CDGV: criado por restituição estereofotogramétrica digital com Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, compatível com a escala de 1:1.000;
- Modelo Digital da Superfície (MDS): obtido a partir de um modelo matemático que representa o solo exposto e os acidentes encontrados acima do solo (edificações, pontes, vegetação, etc.), com resolução espacial para a escala 1:1.000, de 0,50 m.
- Modelo Digital de Terreno (MDT): obtido a partir de um modelo matemático que representa o solo exposto, isentos de vegetação e elementos não pertencentes ao solo (edificações, pontes etc.), com resolução espacial para escala 1:1.000, de 0,50 m.

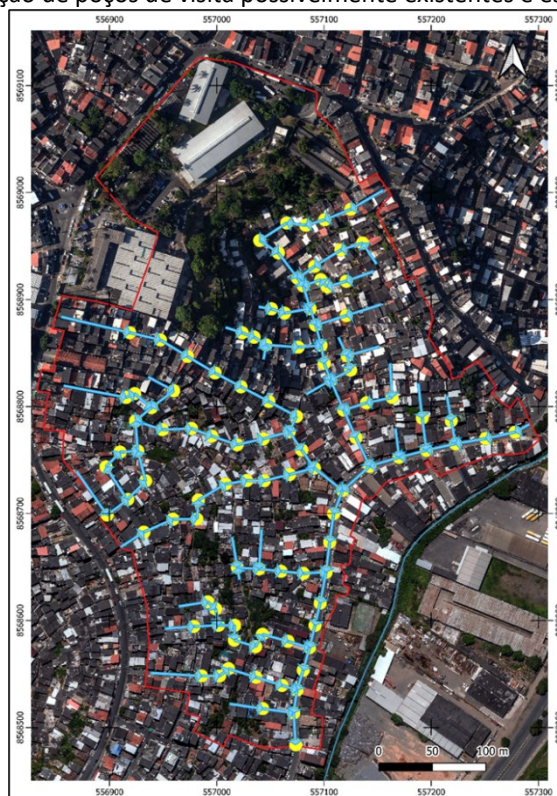
A sub-bacia em estudo foi delimitada inicialmente com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento, utilizando o Modelo Digital de Terreno (MDT), o Modelo Digital de Superfície (MDS) e os dados vetoriais de uso do solo, produtos do Projeto de Mapeamento Cartográfico de Salvador. A sub-bacia possui área total de 0,15 km² e topografia acidentada, com grande variação da elevação no terreno variando entre o mínimo de 16,48 metros e máximo de 113,54 metros, com elevação média de 55,17 metros.

4. Aplicação e Discussão dos Resultados

Para a delimitação manual das bacias de contribuição da sub-bacia do Rio Camarajipe, foram utilizados como base o MDS, as ortimagens e os arquivos vetoriais para diferentes classificações de cobertura do solo gerados pelo Projeto de Mapeamento Cartográfico de Salvador. Como citado anteriormente, não existe cadastro da rede de drenagem da área, e a cobertura pela infraestrutura não corresponde à totalidade dos logradouros pavimentados.

A primeira etapa consistiu na localização teórica de poços de visita da rede de drenagem possíveis de existirem na área, com base nos logradouros pavimentados e escadarias. Para isso, foram analisadas as ortimagens e os polígonos representantes de escadaria e ruas da base cartográfica, para identificação dos prováveis locais das infraestruturas de drenagem. A Figura 2 apresenta a localização adotada dos poços de visita e da rede de drenagem para o estudo.

Figura 2 - Pontos de localização de poços de visita possivelmente existentes e estruturas de drenagem pluvial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024). Ortoimagem do Projeto de Mapeamento Cartográfico de Salvador (2017).

Foram consideradas as escadarias, além de ruas asfaltadas, devido ao conhecimento da existência de estruturas de drenagem localizadas nessas escadarias que representam componentes importantes do escoamento pluvial da região.

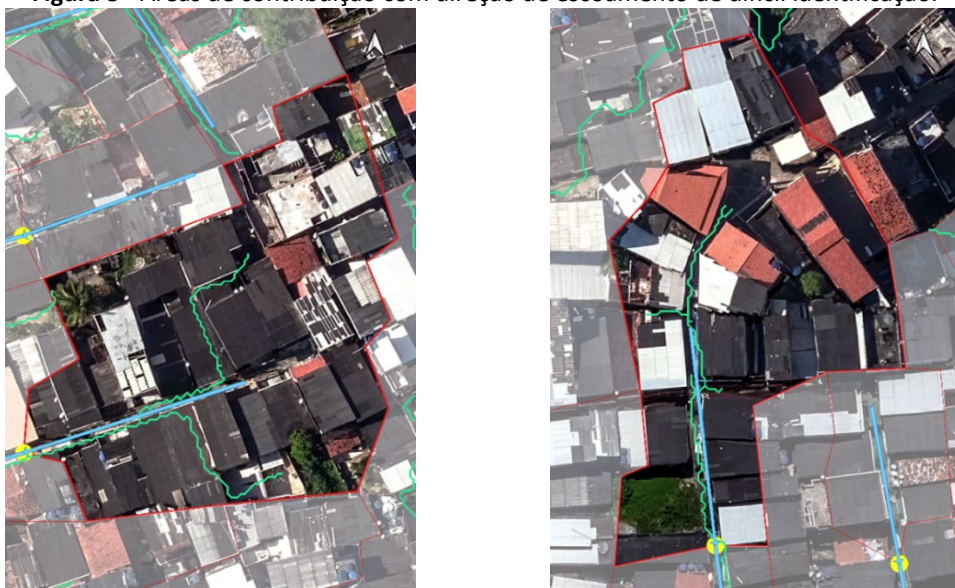
Mangieri (2012) realizou uma análise sobre o sistema de drenagem em escadarias, denominadas escadarias drenantes, em Salvador – BA, estando uma das áreas localizada no bairro de Bom Juá, na mesma sub-bacia do presente estudo, na Rua José Falcão. Mangieri (2012) observou que, apesar da existência de sistema separador absoluto, obstruções nas redes de drenagem de águas pluviais eram consequência, também, das contribuições de esgoto sanitário para o sistema, além do lançamento de resíduos sólidos.

Para a delimitação das áreas de contribuição foram utilizadas as ortoimagens de alta resolução e as linhas dos trechos de drenagens do escoamento superficial extraídas pelo algoritmo do GRASS GIS, com o MDS bruto. As ortoimagens permitiram identificar dispositivos de drenagem e outras construções, como escadas de dissipação, muros, limites das edificações dentre aglomerados altamente adensados, escadarias, ruas e acessos com larguras pequenas, dentre outros fatores que influenciam a direção do escoamento pluvial superficial no terreno, e que nem sempre são detectados pelo desenho topográfico da área.

As linhas indicando a direção dos trechos de drenagem do escoamento superficial extraídas do MDS com a ferramenta *r.watershed*, assim como os limites das bacias de contribuição extraídas pelo algoritmo, contribuíram para analisar a direção do escoamento pluvial em áreas em que o uso somente dos dados topográficos e das ortoimagens ainda gerava dúvidas quanto à delimitação das bacias. Como evidenciado na Figura 3, edificações adensadas e desordenadas e a falta de trechos viários e lotes bem delimitados e

padronizados, além das irregularidades do relevo e trechos de alta declividade, representam desafios para a definição da direção do escoamento pluvial por métodos tradicionais.

Figura 3 - Áreas de contribuição com direção de escoamento de difícil identificação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024). Ortoimagens do Projeto de Mapeamento Cartográfico de Salvador (2017).

Por meio da ortoimagem, foram identificados indícios da existência de um muro e escada de dissipação no talude, resultando na delimitação da área de contribuição que agrega partes do terreno interceptadas por trechos de drenagem diferentes, já que essas estruturas concentram o escoamento pluvial, que não irá ser influenciado apenas pela topografia do terreno, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Identificação de muretas desviando a direção do escoamento superficial com auxílio de ortoimagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024). Ortoimagens do Projeto de Mapeamento Cartográfico de Salvador (2017).

Comparação dos Métodos:

Foram comparados os resultados de delimitação das áreas de contribuição da sub-bacia do Rio Camarajipe pelos diferentes métodos utilizados, com base na quantidade de

bacias de contribuição delimitadas, a área das bacias, e a distribuição dos valores de elevação no interior da bacia. Foram analisados os seguintes métodos:

- I. Manual, com auxílio das ortoimagens de alta resolução e trechos de drenagem extraídos pela ferramenta do *r.watershed* do GRASS GIS com o MDS (Manual);
- II. Extração automática com a ferramenta *r.watershed* com *threshold* de 1000 e MDS bruto (*r.watershed* - 1000);
- III. Extração automática com a ferramenta *r.watershed* com *threshold* de 2000 e MDS bruto (*r.watershed* - 2000);
- IV. Extração automática com a ferramenta *r.watershed* com *threshold* de 1000 e MDS após a 'queima' dos valores de elevação nas áreas dos polígonos de buffer criados para as ruas e escadarias identificadas (*r.watershed* - 1000 - queima);
- V. Extração automática com a ferramenta *r.watershed* com *threshold* de 1000, MDS bruto, e *raster* criado com a transformação do arquivo vetorial de pontos representando a localização de poços de visita e elevação de -3 metros, considerado como depressões reais pelo algoritmo (*r.watershed* 1000 - depressões).

Para comparação, são apresentados a seguir os resultados obtidos com a aplicação dos diferentes métodos, considerando a quantidade de bacias de contribuição delimitadas por cada um para a mesma sub-bacia, e os valores máximo e mínimo de área das bacias. Além disso, são apresentados parâmetros das bacias de contribuição geradas que apresentaram valor de desvio padrão da elevação (*dpe*) maior que 10 metros no interior da bacia, para representar as áreas de maior variabilidade topográfica, parâmetro que influencia na modelagem hidrológica da área de contribuição. A Tabela 1 apresenta a quantidade total de bacias de contribuição delimitadas e a quantidade de bacias que não atenderam ao critério do desvio padrão (*dpe*) máximo de 10 metros, assim como somatório da área dessas bacias sobre a área total, para cada método analisado. Quanto mais bacias com *dpe*>10m, menos adequado será o modelo.

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de divisão das bacias de contribuição para a sub-bacia do Rio Camarajipe, em Salvador – BA.

Métodos	Nº de bacias total	Somatório de Área total (km ²)	Nº de bacias com <i>dp</i> >10	<i>dpe</i> máximo (m)	Somatório de Área de bacias com <i>dp</i> >10 m ² (% em relação ao somatório de área total)
Manual	151	0,155	1	10,38	1.157,29 (0,75 %)
<i>r.watershed</i> – 1000	354	0,180	6	14,31	8.178,51 (4,54 %)
<i>r.watershed</i> – 2000	197	0,184	14	18,39	30.823,51 (16,75 %)
<i>r.watershed</i> – 1000 – queima	379	0,180	2	12,21	2.141,75 (1,19 %)
<i>r.watershed</i> – 1000 – depressões	341	0,182	5	14,29	6.509,75 (3,58 %)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

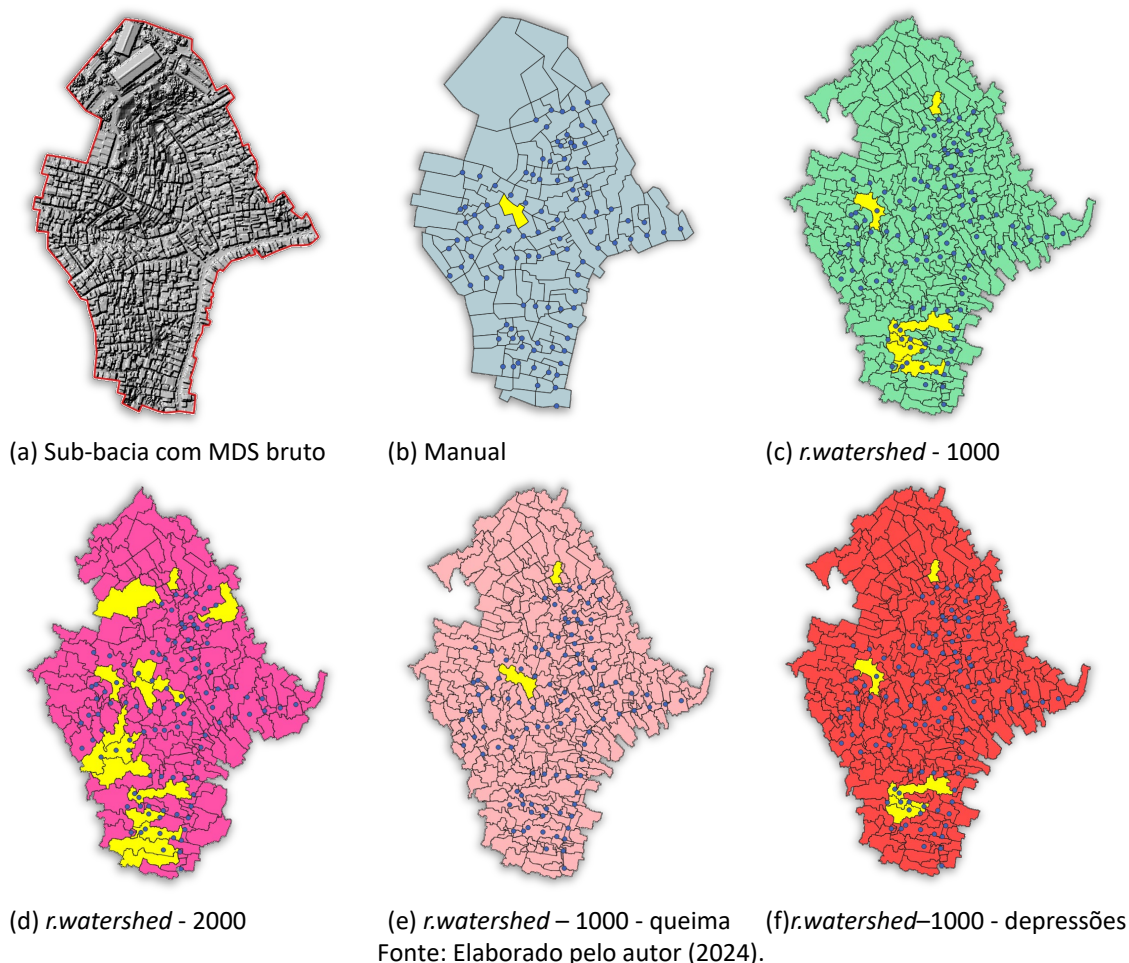
A maior quantidade de bacias com elevado desvio padrão foi observada com a divisão pela ferramenta do GRASS GIS, com o método "*r.watershed* - 2000", enquanto o método

"*r.watershed* – 1000 - queima" apresentou a menor para os métodos com as ferramentas SIG. O maior valor do desvio padrão para a elevação no interior das bacias de contribuição foi encontrado no método "*r.watershed* - 2000" (18,39 m), indicando a geração bacias com maior variabilidade na topografia por esse método.

Entretanto, considerando o número total de bacias de contribuição delimitadas por cada método, percebe-se que logo após o método manual, com 151 bacias, o método "*r.watershed* – 2000" apresentou a menor quantidade de bacias geradas. O método "*r.watershed* – 1000 - queima", por outro lado, foi o que apresentou o maior número de bacias geradas no total. A relação de uma maior quantidade de divisões de áreas de contribuição para a mesma sub-bacia com a consequente menor variação da topografia no interior de cada uma, segue uma lógica intuitiva. Entretanto, o contrário ocorre com o método manual, o que evidencia a relevância de outras variáveis no processo de divisão que condicionam esses resultados.

Os métodos "Manual" e "*r.watershed* – 1000 - queima" apresentaram valores mais homogêneos em termos das elevações no interior de cada bacia. Na Figura 5 são apresentados os resultados da divisão com as áreas de contribuição delimitadas por cada método, com as bacias que apresentaram desvio padrão da elevação maior que 10 m destacadas em amarelo, e os pontos escolhidos para a localização dos poços de visita do sistema de drenagem considerados para o presente estudo em azul.

Figura 5 - Bacias de contribuição delimitadas por cada método para a sub-bacia do Rio Camarajipe.



Pelas imagens das áreas de contribuição geradas por cada método é possível identificar que nem todas as bacias com maior área correspondem às bacias com maior variação da elevação em seu interior. Para o método manual, a bacia com maior área possui 16.579,96 m² e o valor do *dpe* em seu interior é de apenas 8,44 m. O método “*r.watershed* – 1000 – queima” também apresentou a bacia com maior área não coincidente com a de maior *dpe* da elevação, com 1.994,75 m² e 9,89 m, respectivamente. Apesar de nos demais métodos as bacias de maior *dpe* de elevação e área coincidirem, algumas bacias com *dpe* maior que 10 metros possuem área menor que outras bacias com *dpe* menor.

Ressalta-se também a discrepância do valor da maior área dentre as bacias de contribuição delimitadas, de 16.579,96 m² para o método manual, sendo a segunda maior gerada pelo método “*r.watershed* – 2000”, de 4.740,25 m². O emprego do MDS e das ortoimagens de alta resolução, juntamente com a interpretação do modelador, permitiu que fossem identificadas estruturas de drenagem e aspectos da ocupação do solo que proporcionaram um melhor entendimento do padrão de escoamento pluvial e das parcelas do terreno que podem ser agrupadas em unidades para construção dos modelos, sem aumentar muito a variação da topografia em cada unidade.

O resultado do método “*r.watershed* – 1000 – queima” indica que para melhorar a precisão da delimitação manual podem ser utilizados MDS com um processamento adicional, como o método de ‘queima’, para a extração de trechos de drenagem e bacias de contribuição com ferramentas SIG que podem auxiliar na posterior identificação manual das direções e padrões do escoamento superficial com a interpretação do modelador.

A área da sub-bacia escolhida para o presente estudo apresenta topografia altamente irregular, o que justificou o valor relativamente elevado do desvio padrão de 10 metros da elevação para comparação das bacias de contribuição delimitadas. O estudo sugere que além das ortoimagens, o uso de modelos digitais de superfície de alta resolução, com pós-tratamento para evidenciar estruturas de microdrenagem como ruas pavimentadas e escadarias drenantes pode contribuir para melhorar o tempo de análise e a precisão da delimitação das áreas de contribuição para estruturas de drenagem em conjunto com métodos tradicionais manuais.

5. Considerações Finais

A gestão de águas pluviais e a simulação de inundações em áreas urbanas com padrão de ocupação desordenado e de alta densidade de edificações pode ser um desafio com a utilização de métodos tradicionais. Diversos são os estudos necessários para contornar esses problemas e melhorar a eficiência das modelagens da drenagem pluvial.

O presente trabalho analisou a delimitação de áreas de contribuição do escoamento pluvial para um sistema de drenagem em uma sub-bacia do Rio Camarajipe, Salvador (Bahia), com padrão de ocupação urbana informal, adensada, e sem cadastro das infraestruturas de drenagem. Para além dessas dificuldades, soma-se a topografia acidentada e com trechos de alta declividade no terreno.

Foram analisadas 4 metodologias para extração parcialmente automática das áreas de contribuição na sub-bacia em estudo com a ferramenta *r.watershed* do GRASS GIS, utilizando um MDS bruto ou com diferentes tipos de processamento adicional, e o método

manual tradicional com o auxílio de ortoimagens de alta resolução e de linhas de direção de trechos de drenagem extraídos com a mesma ferramenta do GRASS GIS.

Os resultados do estudo indicam que os dados geoespaciais contribuíram para aumentar a precisão na delimitação das áreas de contribuição pelo método manual com o objetivo de reduzir a variação dos parâmetros relacionados à topografia no interior de cada bacia de contribuição, permitindo um melhor entendimento dos padrões de escoamento pluvial na região. Além disso, para o estudo de caso, o processamento do MDS com a 'queima' dos valores de elevação nas áreas onde estão presentes ruas pavimentadas e escadarias drenantes, antes de utilizar a ferramenta do GRASS GIS, contribuiu para produzir resultados de bacias de contribuição com uma topografia mais homogênea em seu interior e mais semelhante aos resultados obtidos com o método manual.

Os resultados indicam que o uso de metodologias que possibilitem a identificação de estruturas de drenagem que alterem o padrão de escoamento pluvial para auxiliar a interpretação do modelador, assim como para adaptações das ferramentas de processamento de dados geoespaciais que contabilizem a influência dessas estruturas pelos algoritmos, possui efeito significativo na delimitação das bacias de contribuição.

Referências Bibliográficas

- ALVES, P. B. R.; MELO FILHO, H.; TSUYUGUCHI, B. B.; RUFINO, I. A. A.; FEITOSA, P. H. C. **Mapping of flood susceptibility in Campina Grande County – PB: a spatial multicriteria approach.** Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 24, n. 1, p. 28-43, jan./mar. 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/58632>. Acesso em: 24 jun. 2024.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático – Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas: visão geral ano de referência 2022.** Brasília, dezembro de 2023. Disponível em: <https://www.capacidades.gov.br/capaciteca/diagnostico-tematico-drenagem-e-manejo-das-aguas-pluviais-urbanas-visao-geral-ano-de-referencia-2022/>. Acesso em: 18 abril. 2024.
- COSTA, Samuel A. B.; CÔRTEZ, Larissa S.; NETTO, Taiana; FREITAS JUNIOR, Moacyr M. **Indicadores em saneamento: avaliação da prestação dos serviços de água e de esgoto em Minas Gerais.** rev. UFMG, Belo Horizonte, v. 20, n.2, p. 334-357, jul./dez. 2013.
- GUO, K.; GUAN, M.; YU, D. **Urban surface water flood modelling – a comprehensive review of current models and future challenges.** Hydrology and Earth System Sciences, v. 25, p. 2843-2860, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-25-2843-2021>. Acesso em: 24 jun. 2024.
- LIDBERG, W.; NILSSON, M.; LUNDMARK, T.; ÅGREN, A. M. **Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling.** Hydrological Processes, v. 31, n. 25, p. 4660-4668, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/hyp.11385>. Acesso em: 23 jun. 2024.
- MIGUEZ, Marcelo Gomes; BATTEMARCO, Bruna Peres; SOUSA, Matheus Martins De; REZENDE, Osvaldo Moura; VERÓL, Aline Pires; GUSMAROLI, Giancarlo. **Urban Flood Simulation Using MODCEL—An Alternative Quasi-2D Conceptual Model.** Water, v. 9, n. 6, p. 445, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w9060445>. Acesso em: 25 ago. 2024.

MIRANDA, F.; FRANCO, A. B.; REZENDE, O., DA COSTA, B. B. F., NAJJAR, M.; HADDAD, A. N.; MIGUEZ, M. (2023). **A GIS-Based Index of Physical Susceptibility to Flooding as a Tool for Flood Risk Management**. *Land*, 12(7), 1408. <https://doi.org/10.3390/land12071408>

RADESCA, Fernanda Dias *et al.* **Multilayer modelling as a support tool for flood diagnosis and drainage system design**. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management. Emerald Publishing Limited, 2021. p. 186-199.

SALVADOR. Prefeitura Municipal. Secretaria da Fazenda. **Edital de Licitação para Contratação de Mapeamento Digital - SEFAZ nº 0016-2015**. Disponível em: <http://cartografia.salvador.ba.gov.br/images/cartografia/Biblioteca/Editais/Edital%20de%20Licitacao%20para%20Contratacao%20de%20Mapeamento%20Digital%20-%20SEFAZ%20n%200016-2015.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2024.

SALVADOR. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Infraestrutura e Obras Públicas. **Plano Municipal de Saneamento Básico Integrado de Salvador: Produto F – Diagnóstico dos Serviços de Saneamento – Produto Parcial F4 – Diagnóstico dos Serviços de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais – Tomo II – Diagnóstico Técnico e Operacional, Qualidade dos Serviços Prestados, Caracterização e Zoneamento de Áreas Sujeitas a Inundações e Diagnóstico Participativo**. Salvador, 2021. Disponível em: http://seinfra.salvador.ba.gov.br/images/formulario/R01_Produto_parcialF4_Diagnostico_Drenagem-Tomo2_versaoCP.pdf. Acesso em: 29 jun. 2024.

SANTOS, Elisabete; PINHO, José Antonio Gomes de; MORAES, Luiz Roberto Santos; FISCHER, Tânia (Orgs.). **O caminho das águas em Salvador: bacias hidrográficas, bairros e fontes**. Salvador: CIAGS; SEMA, 2010.

SOUSA, M. M. **Avaliação comparativa de metodologias de modelagem hidráulica 2D e seu impacto na interpretação e avaliação de ondas de cheia**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

SOUSA, M. M. de; OLIVEIRA, A. K. B. de; REZENDE, O. M.; MAGALHÃES, P. M. C. de; JACOB, A. C. P.; MAGALHÃES, P. C. de; MIGUEZ, M. G. **Highlighting the role of the model user and physical interpretation in urban flooding simulation**. *Journal of Hydroinformatics*, v. 24, n. 5, p. 976-991, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2022.174>. Acesso em: 29 jun. 2024.

WU, Zening; MA, Bingyan; WANG, Huiliang; HU, Caihong. **Study on the Improved Method of Urban Subcatchments Division Based on Aspect and Slope- Taking SWMM Model as Example**. *Hydrology*, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 26, 2020. DOI: 10.3390/hydrology7020026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/7/2/26>. Acesso em: 18 maio 2024.

YANG, Qiu; HUANG, Haocheng; WANG, Chao; LEI, Xiaohui; FENG, Tianyu; ZUO, Xiangyang. **Improving the Accuracy of Urban Waterlogging Simulation: A Novel Computer Vision-Based Digital Elevation Model Refinement Approach for Roads and Densely Built-Up Areas**. *Remote Sensing*, [S.l.], v. 15, n. 20, p. 4915, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15204915>. Acesso em: 24 jun. 2024.