



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Comparação de MDTs a partir do acoplamento de modelo hidrológico e hidrodinâmico aplicado à identificação de áreas de inundações urbanas

Fabricio Ribeiro Garcia¹, Mauro José Alixandrini Júnior²

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador- BA, rgfabricio@gmail.com;

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador- BA, mauro.alixandrini@ufba.br.

Artigo recebido em 11/06/2021 e aceito em 26/03/2022

RESUMO

O intenso crescimento urbano tem um reflexo considerável sobre o aumento da impermeabilização do solo, consequentemente alterando as condições naturais do ciclo hidrológico, assim elevando a parcela de escoamento superficial, e com isso favorecendo as ocorrências de alagamentos e inundações. Entender essa dinâmica é fundamental para uma boa gestão do espaço urbano, nesse sentido, o processo de simulação hidrológica e hidráulica torna-se uma ferramenta muito importante para se buscar respostas do comportamento de eventos de chuvas. O Sistemas de Informações Geográficas trouxe um aprimoramento considerável para a aplicação dos processos de modelagem, disponibilizando importantes informações sobre as características de terreno, a partir dos modelos digitais de terreno. A qualidade e a usabilidade dos resultados dos modelos de simulações hidrológicas e hidráulicas estão intimamente associadas à precisão e disponibilidade dos dados topográficos. Desta forma, este trabalho buscou avaliar o uso da modelagem hidrodinâmica subsidiada por duas fontes de modelos digitais de terreno- sendo estes o LiDAR e SRTM - aplicados à identificação de área de inundações na bacia hidrográfica do Cobre em Salvador/Ba. Para cumprimento do proposto, foi utilizado o acoplamento dos modelos de transformação de chuva-vazão, através da modelagem hidrológica com o HEC-HMS, enquanto para a modelagem hidrodinâmica utilizando-se o modelo HEC-RAS. Para a validação da metodologia proposta foi realizado a análise de correlação dos resultados de modelagem com dados de registros de ocorrências da defesa civil de Salvador. Os resultados mostraram poucas evidências da validade da metodologia para o objetivo proposto.

Palavras-chave: inundação urbana, macrodrenagem, HEC-HMS, HEC-RAS.

Comparison of MDTs from the coupling of a hydrological and hydrodynamic model applied to the identification of urban flooding areas

ABSTRACT

The urban growth intensity is a considerable reflection on the increase of the immobilization of the sole, consequently alternating with natural conditions of the hydrological cycle, as well as elevating the surface of the surface escarpment, and thus being favorable as alignments and alignments. Intending this dynamics is fundamental to a good urban space management, not to mention, the hydrological and hydraulic simulation process will be a very important workaround for looking at chevro event handling. Geographic Information Systems finds a considerable appraisal for the application of modeling processes, providing important information on terrain characteristics, including digital terrain models. The quality and usability of the results of the hydraulic and hydraulic simulation models are intimately linked to the accuracy and availability of topographic data. In this form, this bus was used to provide the use of hydrodynamic modeling supported by two sources of digital models of terrestrial transmission from LiDAR and SRTM - applied to identify the area of alagamentos and inundations in the Baia Hydrographic / Coal Hydraulic Basin. For compression of the proposal, use the complement of chuva-vase transformation models, obtained from the hydrological modeling with the HEC-HMS, in addition to the hydrodynamic modeling using the HEC-RAS model. For the validation of the proposed methodology, a correlation analysis of the modeling results with data from the civil defense registration records of Salvador has been carried out. The results will show evidence of methodology validity for the objective proposal.

Keywords: urban flood, macro drainage HEC-HMS, HEC-RAS

Introdução

A urbanização leva à mudança do modo de uso do solo e da estrutura quantitativa, resultando na destruição do processo do ciclo hidrológico (Kai Wang, 2022). Carlos Aparicio, Brenes e Jochen (2022) além de ser a mudança antropogênica mais drástica da cobertura do solo, a urbanização geralmente resulta em uma mudança significativa da hidrologia local e regional.

As paisagens urbanas têm um impacto significativo sobre a dinâmica superficial de geração de escoamento (Kai Wang, 2022). Pandey et al. (2021) destaca que os impactos das alterações de cobertura do solo afetam o ciclo hidrológico diminuindo a parcela de infiltração e, com isso, elevando a vazão do escoamento superficial, assim reduzindo o tempo de concentração da bacia durante um evento de chuva, desta forma, favorecendo as ocorrências de alagamentos e inundações.

A rápida expansão urbana em diferentes partes do mundo levou a mudanças significativas nos tipos de uso e cobertura da terra (Opeyemi Wei, Olusola, 2019). Esse fato gera graves impactos ambientais, como a erosão do solo, a poluição e o assoreamento dos corpos hídricos, e o aumento da impermeabilização do solo, que pode resultar na intensificação dos eventos de alagamentos, enchentes e inundações.

Apesar do aumento do conhecimento sobre aspectos como previsão, modelagem e mapeamento de eventos de inundações e correlatados, eventos desta natureza continuam ocorrendo com bastante frequência, tornando-os um dos riscos naturais mais frequentes e generalizados (Rana e Routray, 2018). Nas últimas décadas, as inundações aumentaram com frequência em todo o mundo devido a diversos fenômenos, como mudanças climáticas, crescimento acelerado da urbanização etc. Rana e Routray (2018) o crescimento urbano acelerou em diferentes países trazendo consigo aumento da vulnerabilidade à eventos de inundações.

A modelagem do ciclo hidrológico cumpre um papel importante no processo de identificação de áreas sujeitas a inundações, pois envolve os fluxos de água de superfície e subterrânea, assim é essencial para os recursos hídricos planejamento e gestão do uso do solo. Thakur et al. (2022) apontou que há uma crescente tendência nos últimos anos para as decisões de gestão de recursos hídricos com base em estudos de modelagem.

A modelagem é a representação simplificada da realidade, sua transformação ou sua evolução, com o objetivo de prever seu comportamento. A modelagem proporciona a oportunidade de investigar os possíveis efeitos de diferentes alterações a longo prazo, as quais são normalmente processos lentos com interações em evolução (Hohmann, Kirchengast, Birk, 2018).

Em muitos processos de modelagem é possível a implantação de um sistema de informações geográficas (SIG), que reúna um conjunto de bases digitais e de bancos de dados que podem ser manipulados com a finalidade de promover uma análise espacial de acordo com os objetivos do usuário (Kalogeropoulos et al., 2020). A integração entre modelos e sistemas de informação geográfica (SIG) tem sido amplamente usada para simular padrões de inundação, hidrodinâmica de inundação e riscos de inundação (Pathan, Agnihotri, 2019).

Os estudos hidrológicos e hidrodinâmicos têm grande relevância no entendimento dos alagamentos e das inundações. Assim, entende-se que as metodologias adotadas devem ser capazes de integrar os estudos hidrológicos e hidráulicos com a gestão do risco de alagamento e inundações. Esta integração tem sido facilitada com o crescente desenvolvimento tecnológico dos SIG. A integração entre os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos com SIG vem sendo apresentada como forma viável de descrever os processos no estudo de bacias e microbacias hidrográficas (Mihu-Pintilie et al., 2019).

Diversos trabalhos foram realizados utilizando-se da modelagem hidrodinâmica acopladas às geotecnologias como ferramenta para o mapeamento das áreas de ocorrências de desastres naturais, visando contribuir para um melhor planejamento urbano e uma diminuição dos efeitos provocados por esses desastres (Hu et al., 2019; Stoleriu e Mihu-Pintilie, 2019; Dhote et al., 2020; Hutanu et al., 2020; Dahl et al., 2022; Pathan, Agnihotri, Patel, 2022).

As ferramentas de modelagens trazem a possibilidade de contribuir para gestão do uso do solo e então minimização das perdas ou mitigação dos problemas decorrentes destes eventos. Ezz (2018) destaca o papel fundamental do ambiente SIG no processo de modelagem, pois esse tem a capacidade de extrair do ambiente natural variáveis necessárias a partir de modelos digitais de terreno (MDT), como direções de fluxo,

declives, comprimentos e delineamento das bacias.

A visualização do terreno, processamento e quantificação dos atributos topográficos realizadas em SIG é um recurso poderoso em estudos de caracterização morfométrica (Kumar, Venkatesh, Tripathi, 2018) para entender a estrutura das bacias hidrográficas e funções em escalas locais, regionais e globais (Venkatesh e Anshumali, 2019).

O modelo de elevação de terreno é o principal fonte de dados para várias aplicações na topografia, geomorfologia, estudos de cobertura vegetal, avaliação tsunami, hidrologia, morfometria e estudos urbanos (Xi et al., 2022). Os MDTs podem ser obtidos por diferentes técnicas, sendo algumas das mais frequentemente utilizadas como os oriundos por interferometria por radar de abertura sintética e os obtidos por detecção remota como o Light Detection and Ranging (LiDAR).

Os estudos direcionados ao mapeamento das áreas de risco de inundações (Ghimire, 2019; Pathan, Agnihotri, 2020; Chakravorty, Ramana, Pandey, 2022; Elkhrachy, 2022) são de grande importância, principalmente no que tange ao planejamentos urbanos, porém destaca-se que a qualidade dos resultados está intimamente ligada às resoluções dos modelos digitais de terreno e muitas vezes podem ser as fontes de incertezas que

podem comprometer a qualidade das análises e resultados. Assim, a fiel caracterização do terreno a partir dos MDTs é de grande importância, visto que a natureza de obtenção desses dados gera uma discrepância natural, o que pode resultar subdimensionamentos de estruturas, desta forma, gerando gastos de recursos públicos e podendo chegar aos danos materiais e humanos à sociedade. Nesse contexto, é importante que se desenvolvam formas de melhorias nas metodologias aplicadas ao zoneamento de áreas susceptíveis a alagamentos e inundações.

Dessa forma, a partir da modelagem hidrodinâmica, esta pesquisa se propõe a identificar potenciais áreas de alagamentos, e avaliar a influência que a resolução dos modelos digitais de terreno tem sobre tal procedimento, além disso avaliar o potencial da metodologia a partir comparação de registros de ocorrências oriundos da Defesa Civil de Salvador.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Rio do Cobre, a qual está inserida na região do Subúrbio Ferroviário da cidade de Salvador-BA, (Figura 1), e possui uma área de 20,65 km², sendo a quinta maior bacia do município.

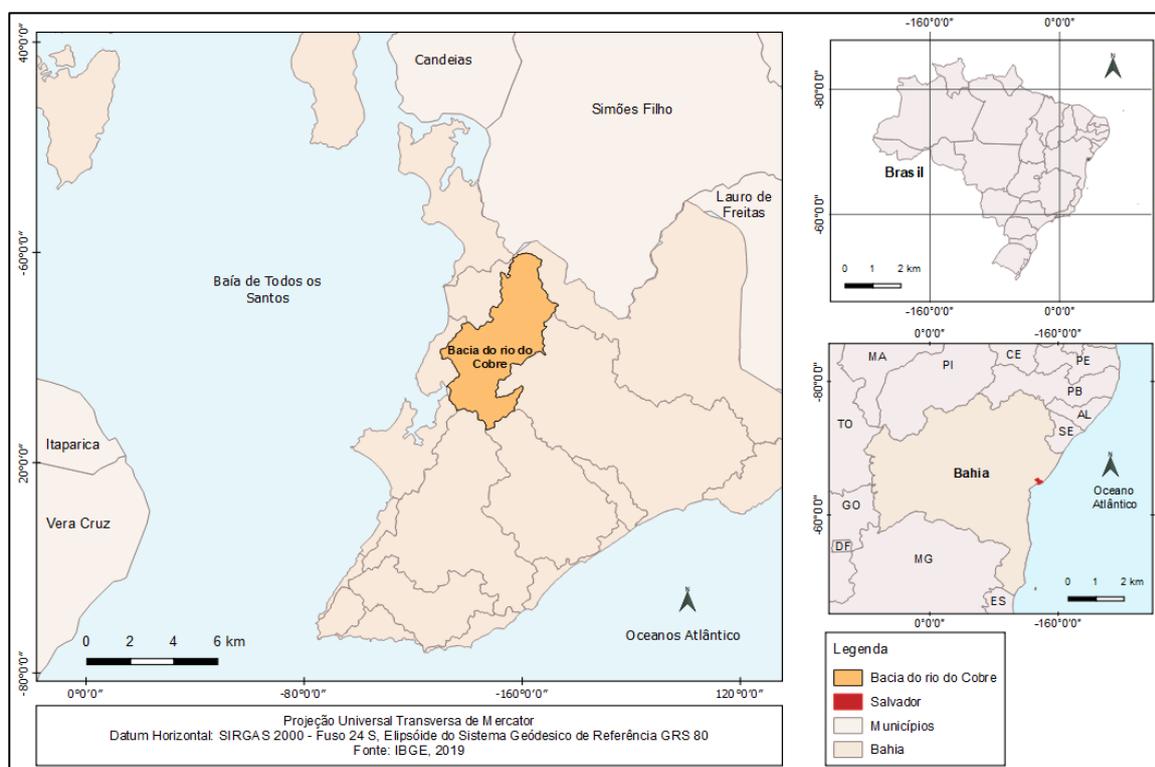


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Rio do Cobre em Salvador. Fonte: Autores (2020).

A bacia hidrográfica do Rio do Cobre compõe um dos maiores territórios de pobreza de Salvador e que frequentemente sofre com problemas de alagamentos e inundações. Assim, caracterizando-se como uma área de grande vulnerabilidade social.

As inundações ocorrem principalmente quando se têm eventos de precipitação de intensidades superiores à capacidade dos sistemas de drenagem urbana. De acordo com a classificação climática realizada por Köppen (1930), em que são levadas em consideração as variações sazonais e os valores médios mensais e anuais de temperatura e precipitação, a cidade de Salvador -BA está inserida numa zona Af^o, clima tropical chuvoso de floresta, sem estação seca; pluviosidade média mensal superior a 60,0 mm e anual inferior a 1500,0 mm; temperatura do mês mais frio acima de 18,0 °C; verões longos e quentes com temperatura média do mês mais quente superior a 22,0 °C. Algumas dessas características são corroboradas pelo climograma (Figura 2).

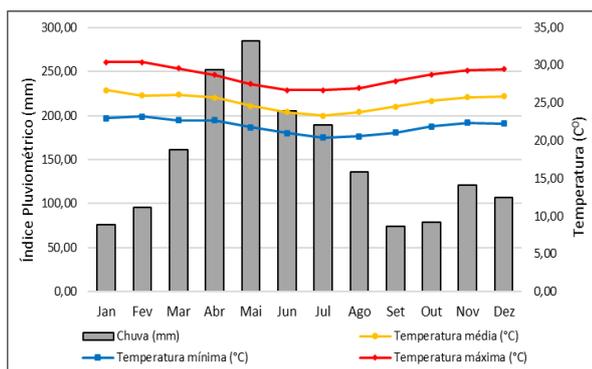


Figura 2. Valores médios de pluviometria e temperatura de Salvador-BA. Fonte: Instituto de Meteorologia (2020). Elaboração: Autor (2020).

Verifica-se que as maiores precipitações são concentradas entre os meses de março e julho, sendo que os maiores valores médios ocorrem nos meses de abril e maio, com 252,0 mm e 285,0 mm, respectivamente. No período de precipitações mais baixas, que se estende dos meses setembro a fevereiro, as médias dos totais de precipitações se mantêm próximas de 100,0 mm, sendo os meses de setembro e outubro com os menores valores médios de precipitação, com 74,0 mm e 79,0 mm, respectivamente. A precipitação média anual para a cidade de Salvador-BA é de 1.781,0 mm.

Características de grande importância nas análises de bacias hidrográficas, é possível observar que a bacia hidrográfica do Cobre

apresenta uma topografia muito acidentada, com variações de altitudes entre 0 e 120 m, e com grandes linhas de talvegue formando córregos e cursos d'água que deságuam na região do Parque São Bartolomeu. A Figura 3 apresenta a distribuição do relevo na bacia e suas sub-bacias do rio do Cobre.

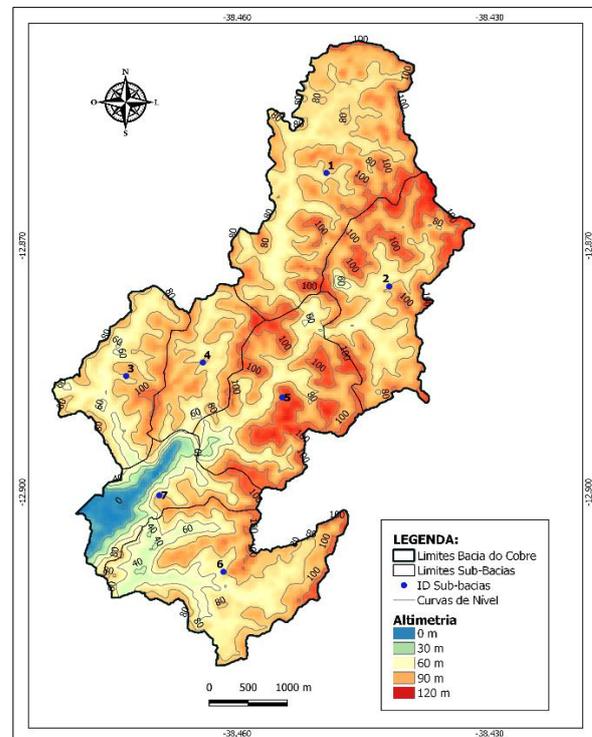


Figura 3. Hipsometria da Bacia do Rio do Cobre. Fonte: Autor (2020).

Da figura acima observa-se as sub-bacias SB1, SB2 e SB5 possuem uma predominância de altitudes variando entre 120 e 60 m, enquanto as sub-bacias SB3 e SB4 possuem uma predominância de altitudes variando entre 90 e 60 m. Já as sub-bacias SB6 e SB7 apresentam as maiores variações de altitudes, compreendendo entre 120 a 30 m, com predominância de altitudes variando entre 90 a 30 m - para a SB6- e 30m até o nível do mar - para a SB7.

Quanto à caracterização de uso e cobertura do solo, destaca-se que este visa basicamente interpretar as características de determinada região. Para tanto, é necessário identificar os tipos de coberturas presentes. Para este trabalho, foram identificadas 5 classes, sendo estas: vegetação densa, vegetação esparsa, solo exposto, urbanização e corpos hídricos (Figura 4).



Figura 4. Classes de uso e cobertura do solo identificadas na Bacia do Cobre. Fonte: Autor (2020).

A etapa foi realizada a partir de uma classificação por fotointerpretação visual- a partir de uma escala média de visualização de 1:500-utilizando como camada base as imagens do Google Earth do ano 2020, acessadas através do complemento QuickMap Service do software QGIS 3.10.7. Sendo assim realizada a vetorização das classes apresentadas (Figura 4). A tabela 1 apresenta a quantificação dos classes por sub-bacia.

Tabela 1 – Quantitativo das classes de cobertura superficiais das sub-bacias

Classes	Sub-bacia 1		Sub-bacia 2		Sub-bacia 3		Sub-bacia 4		Sub-bacia 5		Sub-bacia 6		Sub-bacia 7	
	km ²	%												
Corpos hídricos	0,1	1,7	0,0	1,3	0,0	0,0	0,1	4,4	0,3	9,2	0,0	0,9	0,0	2,6
Solo exposto	0,4	7,2	0,5	14,0	0,0	1,8	0,0	2,2	0,1	2,2	0,1	2,6	0,0	2,7
Urbanização	1,1	22,8	0,9	26,5	1,8	85,0	0,2	9,3	0,6	19,2	2,6	71,3	1,5	83,1
Vegetação densa	2,8	56,2	1,6	47,3	0,3	13,2	1,3	79,5	2,2	68,0	0,6	17,6	0,0	1,7
Vegetação esparsa	0,6	12,1	0,4	10,9	0,0	0,0	0,1	4,5	0,0	1,4	0,3	7,7	0,2	9,9

Fonte : Autor (2020)

Observa-se a predominância da classe de vegetação densa nas sub-bacias 1, 2, 4 e 5, correspondendo a 56,25%, 47,24%, 79,53 em 67,97, respectivamente. De forma inversa, ocorre a predominância da classe de urbanização nas sub-bacias 3, 6 e 7, correspondendo a 85,05% 71,28% e 83,09%. As duas classes predominantes são fundamentais para possíveis alterações de comportamentos de escoamentos superficiais.

Dados de precipitações da área

Os dados de precipitações utilizados para construção da equação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) foram coletados a partir do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto de Meteorologia (Inmet), considerando as estações mais próximas da região de estudo, além da estação do Inmet de Ondina (1338007), para composição de séries. Na tabela 2 são apresentadas as estações pluviométricas inicialmente utilizadas para o desenvolvimento. Foram utilizados dados de precipitação máxima no intervalo de 24 horas, do período de 1931 a 2019, consistindo em um conjunto com 35640 observações.

Tabela 2 – Estações pluviométricas selecionadas

Código	Operador	Latitude	Longitude	Período
1238045	ANA	12°55'12"	38°30'00"	44-63
1238001	ANA	12°53'00"	38°27'00"	49-71
1338007	INMET	3°01'12"	38°53'00"	63-19
1238117	SUDENE	12°53'00"	38°27'00"	49-71
1238118	SUDENE	12°56'00"	38°30'00"	44-63
1338003	SUDENE	12°00'00"	38°00'00"	11-85
1238018	RFFSA	12°56'00"	38°30'00"	49-71
1338005	DNOCS	13°01'12"	38°29'00"	43-64

Fonte: Autor (2020).

Neste sentido, da série histórica de 108 anos de dados, ocorreram falhas em variados períodos, assim, após a tabulação a seleção das máximas mensais a série foi reduzida a um período de 28 anos de dados contínuos, compreendido entre janeiro de 1991 a junho de 2019, obtendo-se 342 registros mensais.

Concernente ao ajuste de dados de chuvas, existem inúmeros métodos que podem ser utilizados para encontrar essa probabilidade, como distribuição Log-Normal com dois parâmetros, Log-Normal com três parâmetros, distribuição Pearson tipo III, distribuição Log-Pearson tipo III e distribuição dos Distribuição de Gumbel. Segundo Pizarro et al. (2018), dentre os métodos mais aceitos, destacam-se os ajustes de Log-Normal, distribuição de Gumbel, distribuição Normal e Log Pearson tipo III.

A aplicação da técnica da distribuição de frequência de Gumbel é a mais popular para avaliar frequências de tempestades de chuva e enchentes (Devkota et al., 2018). Também

chamada de distribuição de valores extremos, a distribuição de Gumbel é descrita pelo desvio padrão e pela média da amostra.

Existem diferentes metodologias aplicáveis para a construção das equações IDF. Estas equações podem assumir diversos formatos, dentre os mais comuns pode-se citar o tipo Log-Log, Talbot e Sherman. A expressão proposta por Sherman (1931) foi usada e validada por muitos pesquisadores (Damé, 2008; Nascimento et al. 2017; Gomes et al., 2019;).

Dos resultados de precipitação definidos pelas equações IDF, é necessário ajustar a distribuição da chuva ao longo do tempo. Assim, após a definição da duração total da chuva e dos respectivos períodos de retorno, são determinadas as intensidades médias das durações. Essas intensidades são transformadas em alturas de chuva e representam valores acumulados até o último intervalo de duração.

Nesse sentido, o hietograma é uma ferramenta que permite a representação gráfica onde se pretende apresentar a intensidade de uma chuva ao longo de sua duração. Os hietogramas podem ser estimados por vários métodos na hidrologia com a finalidade de se obter os padrão de precipitações, de maneira que possam ser utilizados para caracterizar a distribuição mais real das chuvas.

Desta forma, para este trabalho utilizou-se o método dos blocos alternados, o qual busca uma distribuição de temporal mais próxima possível da distribuição de um evento real de precipitação.

Descrição dos dados de MDTs

Principal insumo deste trabalho, é fundamental subsídio para as etapas de modelagens, foram definidas três fontes de modelos digitais de terreno para utilização que são obtidos por Light Detection and Ranging (LiDAR) e dados da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Na tabela 3 são apresentados os tipos, métodos de aquisição e resolução espacial dos MDTs a serem utilizados.

Tabela 3 – Características dos MDTs utilizados

MDTs:	Fonte	Método de aquisição	Resolução espacial
LiDAR	Cartografia Salvador	Mapeamento com laser aerotransportado	0,5 m (4 pontos /m ²)
SRTM	USGS	Interferometria por radar de abertura sintética	30 m

Fonte: Autor (2020).

Para pré-processamento, as imagens foram tratadas pelo software QGIS versão 3.10.7, inicialmente passando por recorte da área, para diminuição do esforço computacional, e remoção dos pixels negativos e vazios.

Dados de Shuttle Radar Topography Mission

O modelo digital de elevação resultante da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com células de resolução espacial de 1 arco-segundo (30 metros), com sistema de referência de coordenadas WGS 84, disponibilizado em formato GeoTIFF (.tif) e adquirido gratuitamente através do site da United States Geological Survey (USGS), sendo adotada a imagem com data de publicação em 23 de setembro de 2014.

Dados de Light Detection and Ranging

O modelo digital de terreno resultante da Light Detection and Ranging (LiDAR) utilizado neste trabalho foi resultante de levantamento realizado em 2017 a partir da coleta de dados de aerolevanteamento por sistema de perfilamento a laser, com densidade mínima de 4 pontos/m², e disponibilizado gratuitamente através do site da Cartografia Salvador.

Modelagem hidrológica

No Hydrological Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) foram gerados os hidrogramas de escoamento superficial de cada sub-bacia, usando-os, posteriormente, como dados de entrada no Hydrological Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS). A Figura 5 mostra o layout da montagem do modelo hidrológico HEC-HMS.

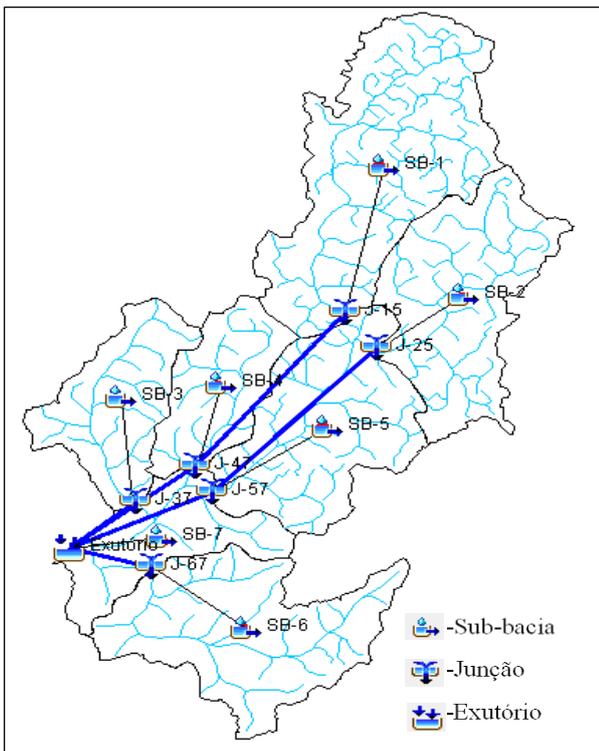


Figura 5. Layout do modelo HEC-HMS.

A transformação da chuva em vazão foi feita pelo método do Hidrograma Unitário do SCS (Soil Conservation Service). O método das perdas adotado foi o Curva Número (CN) do SCS, com tempo de concentração das sub-bacias sendo obtido pela fórmula de Kirpich.

Modelagem hidrodinâmica

O HEC-RAS é um software capaz de realizar modelagem hidráulica de fluxos, sendo esse desenvolvido pelo centro de engenharia hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE). O HEC-RAS possibilita a modelagem unidimensional (1D), modelagem bidimensional (2D) e modelagem 1D e 2D combinada para situações de escoamento permanente e não permanente. O modelo pode ser aplicado em trechos ou sistemas dendríticos de canais naturais ou artificiais. Além das análises hidráulicas, ele ainda possibilita a adição de elementos de engenharia hidráulica aos canais, tais como bueiros, pontes, barragens, bacias de retenção etc. (USACE, 2021).

Os escoamentos podem ser classificados em regime permanente e não permanente. A componente de análise em escoamento permanente calcula os perfis d'água nas seções considerando o escoamento permanente gradualmente variado. Esta componente é indicada para aplicação em gerenciamento de

planícies de alagamento e inundação (USACE, 2021). A equação para os cálculos possui como origem o princípio de conservação de massa, reduzido, neste caso, à conservação de volume:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(uA)}{\partial x} = 0 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

A – área molhada;
u – velocidade média.

Já a equação de momento para um volume de controle afirma que a taxa líquida que entra no volume mais a soma de todas as forças externas que atuam no volume são iguais à taxa de acumulação de momento, é dada pela equação 2:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + I_f \right) = 0 \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

Q – vazão normal a seção transversal;
A – área molhada da seção transversal;
x – uma distância;
g – a aceleração da gravidade;
I0 – -dz/dx (z=cota do fundo);
If – declividade da linha de energia, dado pela equação 3.

$$I_f = n^2 \frac{u|u|}{Rh^{3/4}} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

n – coeficiente de rugosidade de Manning;
u – velocidade de escoamento.

A modelagem hidrodinâmica consistiu na simulação de hidrogramas gerados a partir da modelagem hidrológica com o HEC-HMS (Costabile et al., 2020). Para tanto, foi utilizada uma abordagem bidimensional (2D) e escoamento não permanente para propagação de fluxo. Para condição de contorno utilizou-se a declividade da linha de energia, a qual coincide com a declividade do terreno.

Em simulações 2D o HEC-RAS considera uma abordagem de modelo de terreno em grade para representar o fluxo em duas direções, sendo longitudinalmente ao longo de um curso principal, e transversalmente, considerando uma propagação lateral.

A definição do coeficiente de Manning foram obtidos a partir da relação de classificação espacial do terreno, apresentada anteriormente na figura 4, seguindo as recomendações apresentadas em Porto (2006).

Das configurações iniciais tem-se ainda os campos adicionais no editor de área de fluxo 2D, os que são utilizados durante o pré-processamento, que os filtros de tolerâncias da geração da malha computacional (Figura 6).

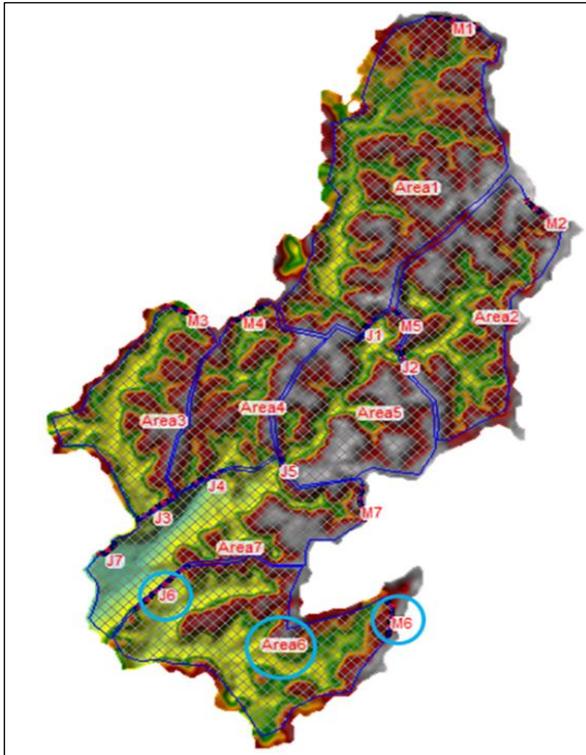


Figura 6 Esquema de modelagem hidrodinâmica da bacia no HEC-RAS

Dados de registros de ocorrências

Os registros dos alagamentos do município de Salvador foram cedidos pela Defesa Civil municipal e possui informações de data, tipo de ocorrência, localização geográfica (latitude e longitude) e logradouro de onde os alagamentos ocorreram. Esse banco de dados contém informações desde agosto/2014 a março/2019, totalizando 216 registros de alagamentos compreendidos dentro do perímetro da bacia hidrográfica do rio do Cobre (Figura 7).

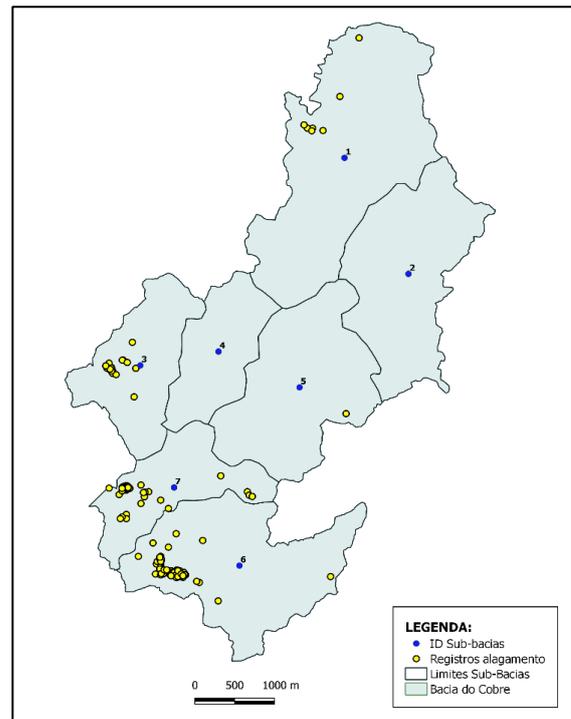


Figura 7 – Ocorrências de alagamentos na bacia hidrográfica do Cobre.

Resultados e discussão

Resultados das análises de precipitações os maiores volumes pluviométricos precipitados no período de 24 horas, em cada ano ao longo da série histórica, estão sintetizados na tabela 4.

Tabela 4 – Mês de ocorrência e a máxima altura pluviométrica (mm) da série entre os anos de 1991 a 2019

Ano	Mês	Intensidade (mm)	Ano	Mês	Intensidade (mm)	Ano	Mês	Intensidade (mm)
1991	JAN	124,00	2001	OUT	73,90	2011	ABR	97,60
1992	NOV	87,30	2002	JUL	108,60	2012	MAI	186,40
1993	MAI	68,70	2003	MAI	112,20	2013	NOV	117,70
1994	JUN	114,00	2004	JAN	89,30	2014	MAI	104,90
1995	MAI	95,30	2005	MAR	144,80	2015	MAI	105,40
1996	ABR	232,50	2006	ABR	110,60	2016	AGO	97,50
1997	OUT	84,00	2007	FEV	67,80	2017	NOV	61,90
1998	JUN	141,00	2008	FEV	130,80	2018	DEZ	81,80
1999	MAR	180,20	2009	ABR	123,00	2019	MAR	121,00
2000	JUN	75,80	2010	ABR	118,00	-	-	-

Fonte: Autor (2020).

Com base nos dados apresentado, percebe-se uma considerável variação interanual entre as precipitações máximas. As maiores concentrações em 24 horas foram de 232,50 e 186,40 mm, ocorridas respectivamente nos meses de abril de 1996 e maio de 2012, sendo os meses de abril e maio os mais recorrente.

Após a identificação das ocorrências de precipitações máximas em 24 horas para todos os

anos da série histórica, foi aplicada a distribuição de Gumbel para encontrar as probabilidades de ocorrência da precipitação máxima para distintos períodos de retorno (anos). Na tabela 5 estão apresentados os valores das variáveis reduzidas, as probabilidades de ocorrência e a precipitação corrigida em 14 %, que corresponderá a magnitudes próximas às reais, como recomendado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB (1986).

Tabela 5 – Correção de precipitação máxima pela variável reduzida para cada período de retorno.

Período de retorno (anos)	Intensidade (mm)	Probabilidade de ocorrência	Intensidade corrigida (mm)
2	111,15	0,50	125,60
5	145,65	0,80	164,58
10	168,51	0,90	190,42
25	197,38	0,96	223,04
50	218,79	0,98	247,23
100	240,05	0,99	271,26

Fonte: Autor (2020).

Utilizando os coeficientes da desagregação de chuvas propostos por Campos-Aranda (1978), é estimada a precipitação máxima (mm) para os distintos períodos de retorno (anos) em função da duração (h). É notória a relação proporcional entre o aumento dos máximos de

precipitação prevista com o avanço dos períodos de retorno.

Após a desagregação das precipitações para os tempos de duração e tempo de retorno, foi aplicado os ajustamentos e análises de tendências dos dados, e então estabelecida a equação (4) IDF.

$$I = \frac{447,4432 \cdot TR^{0,1960}}{t^{0,61926}} \quad \text{Equação (4)}$$

Posteriormente ao desenvolvimento da equação de intensidade – duração – frequência, apresentada anteriormente na equação 4, foram construídos os hietogramas de projeto, com base no método dos blocos alternados, sendo gerados para o intervalo de tempo de 5 minutos, para uma chuva de duração total de 60 minutos, e períodos de retornos de 10, 25 e 50 anos.

Pode-se observar que há uma variação pequena entre os picos de precipitação, sendo observado um pico de 17,18 mm para o tempo de recorrência de 10 anos, 20,12 mm para o tempo de recorrência de 25, e 22,66 mm para o tempo de recorrência de 50 anos.

Considerando o período de recorrência de 50 anos e comparando com os as situações de TR 10 anos e 25 anos, pode-se notar um acréscimo mais significativo, o que pode indicar que se pode esperar, analogamente, valores de vazões maiores para tal cenário.

Modelo Hidrológico HEC-HMS

Uma vez calculados os hietogramas, estes foram inseridos no modelo hidrológico HEC-HMS, juntamente com os demais parâmetros de modelo da bacia, apresentados na tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Características das sub-bacias e tempo de concentração

Sub-bacia	CN Ponderado	Área (km ²)	Axial (km)	Declividade Média (m/m)	Tempo de Concentração (min)	Tempo de Retardo (min)
1	82,82	4,92	4,63	0,025	44,47	26,68
2	84,40	3,35	3,44	0,031	34,87	20,92
3	94,41	2,06	2,76	0,023	33,42	20,05
4	79,60	1,64	2,70	0,033	29,63	17,78
5	82,78	3,30	2,86	0,055	26,30	15,78
6	92,53	3,59	4,10	0,027	40,40	24,24
7	95,64	1,79	2,75	0,054	25,82	15,49

Fonte: Autor (2020).

Os resultados da modelagem hidrológica são apresentados graficamente nas figuras de 8 a 14, abaixo, onde são analisados os hidrogramas de cada sub-bacia, para os períodos de retorno de 10, 25 e 50 anos.

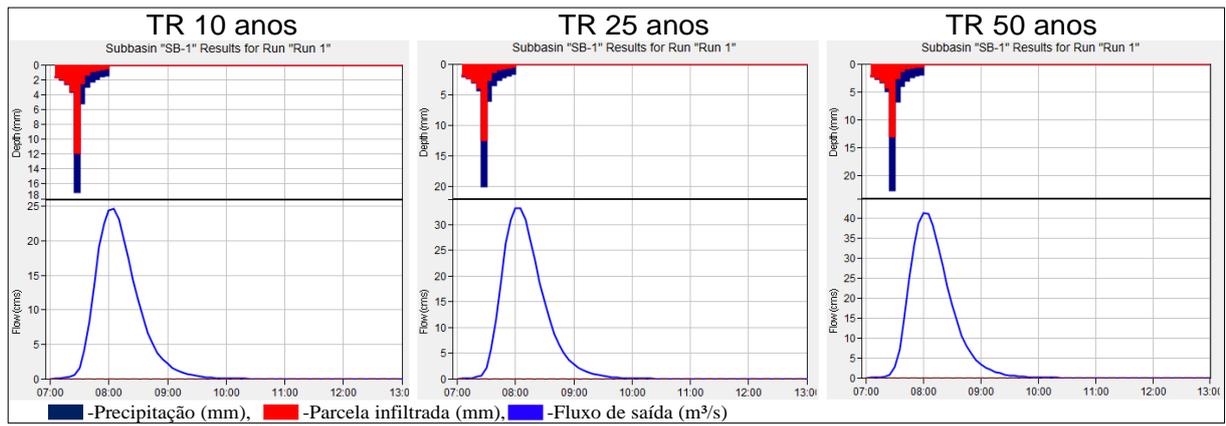


Figura 8- Hietogramas e respectivos hidrograma para sub-bacia 1

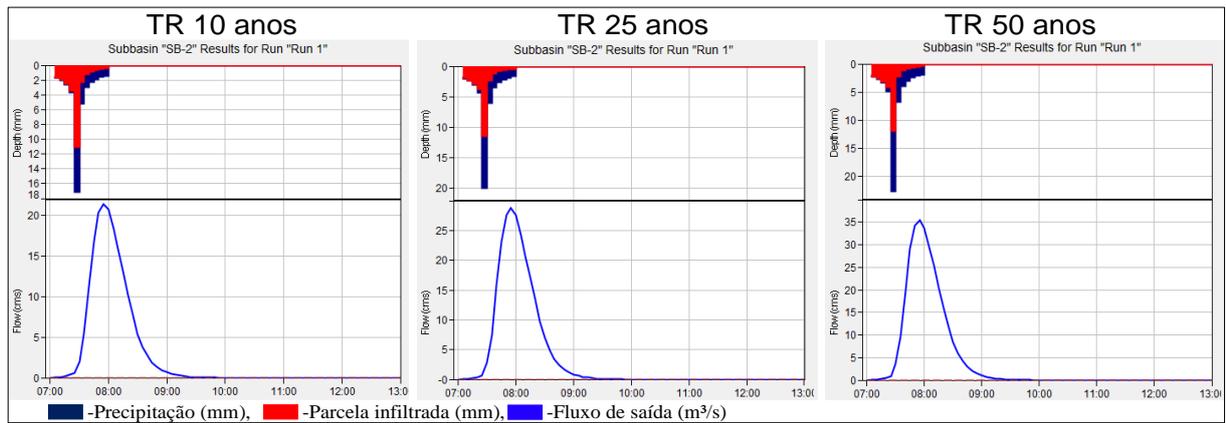


Figura 9- Hietogramas e respectivos hidrograma para sub-bacia 2

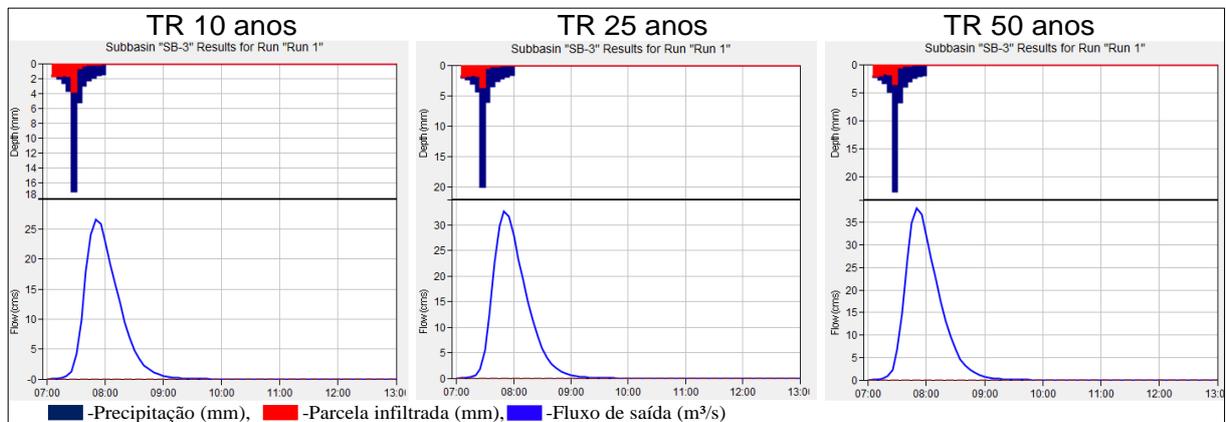


Figura 10- Hietogramas e respectivos hidrograma para sub-bacia 3

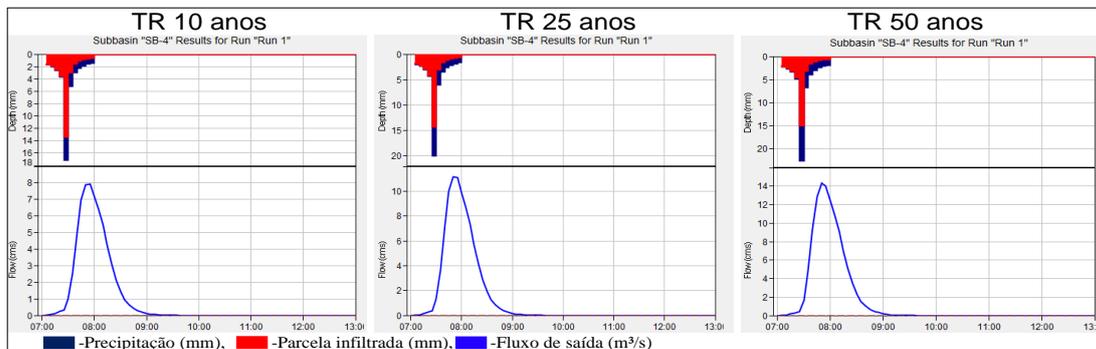


Figura 11- Hietogramas e respectivos hidrograma para sub-bacia 4

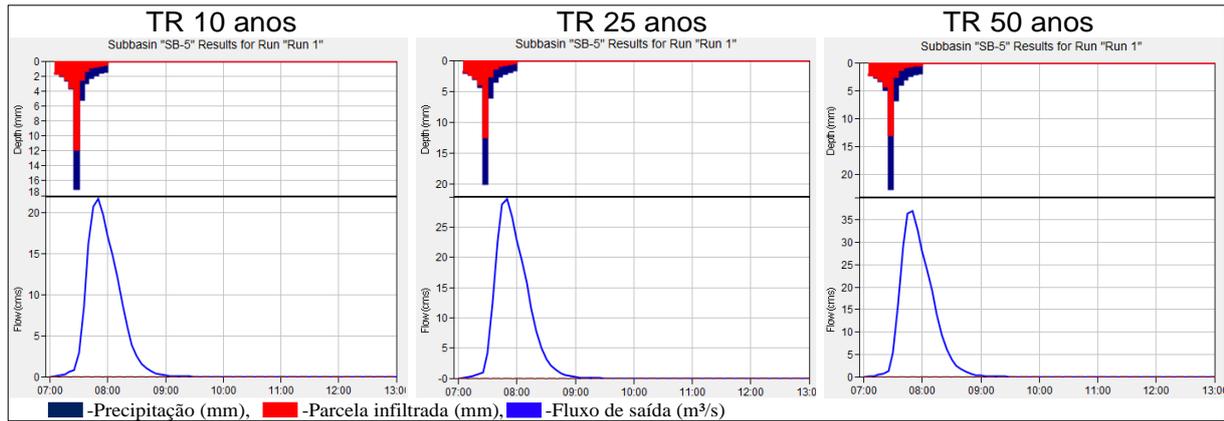


Figura 12- Hietogramas e respectivos hidrograma para sub-bacia 5

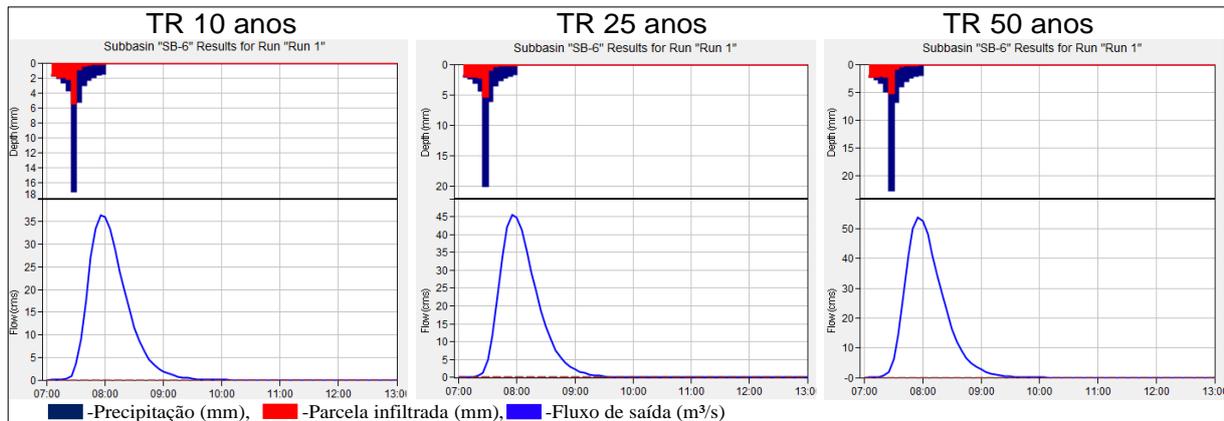


Figura 13 - Hietogramas e respectivos hidrograma para sub-bacia 6

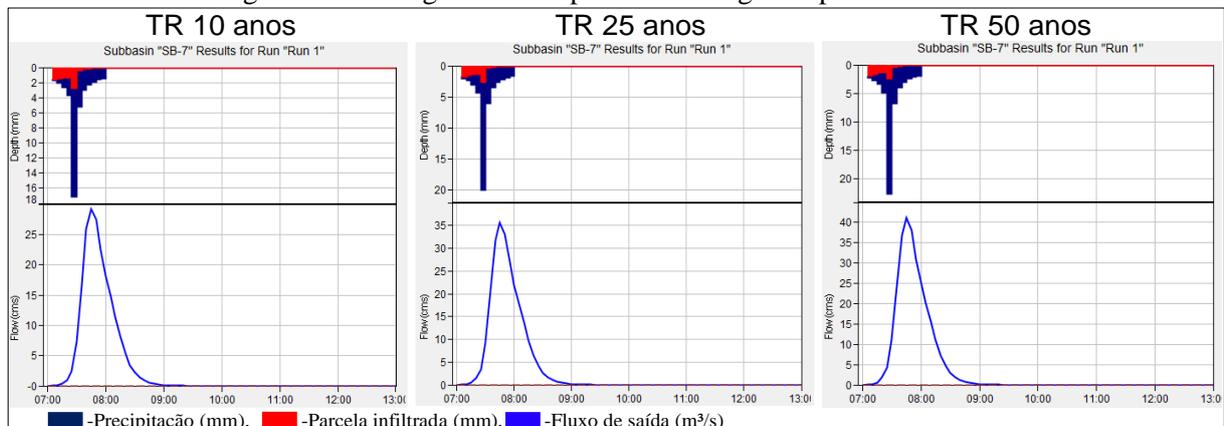


Figura 14 - Hietogramas e respectivos hidrograma para sub-bacia 7.

Dos resultados dos hidrogramas é possível notar o crescimento das vazões para o aumento do tempo de recorrência para todas as sub-bacias, o que de fato já era esperado, visto que este tem relação direta com as vazões, sendo maiores vazões para maiores tempos de recorrências.

Modelo HEC-RAS

Esta seção apresenta os resultados do primeiro dos objetivos específicos propostos na

pesquisa, sendo este de identificar as áreas com potencial de ocorrência de inundações, através da modelagem hidrodinâmica áreas para precipitações com períodos de retorno de 10, 25 50 anos. A partir dos dados dos hidrogramas, constantes nas figuras 9 a 15 da seção anterior, pôde-se modelar o comportamento das vazões sobre a área de estudo. A modelagem foi resultado dos períodos de retorno de 10, 25 e 50 anos, para um fluxo não permanente, e uma configuração de propagação em duas dimensões. Os resultados

mostraram que a área de estudo está sujeita a sofrer alagamentos em alguns pontos, bem como inundações, uma vez que a área afetada se estende para além dos leitos de escoamento.

Na figura 15 são apresentados os resultados das áreas atingidas para os dois

modelos digitais de terreno para o período de retorno de 10 anos, porém foi observado um mesmo padrão de distribuição das áreas de inundações quando a modelagem foi realizada para os tempos de recorrência de 25 e 50 anos.

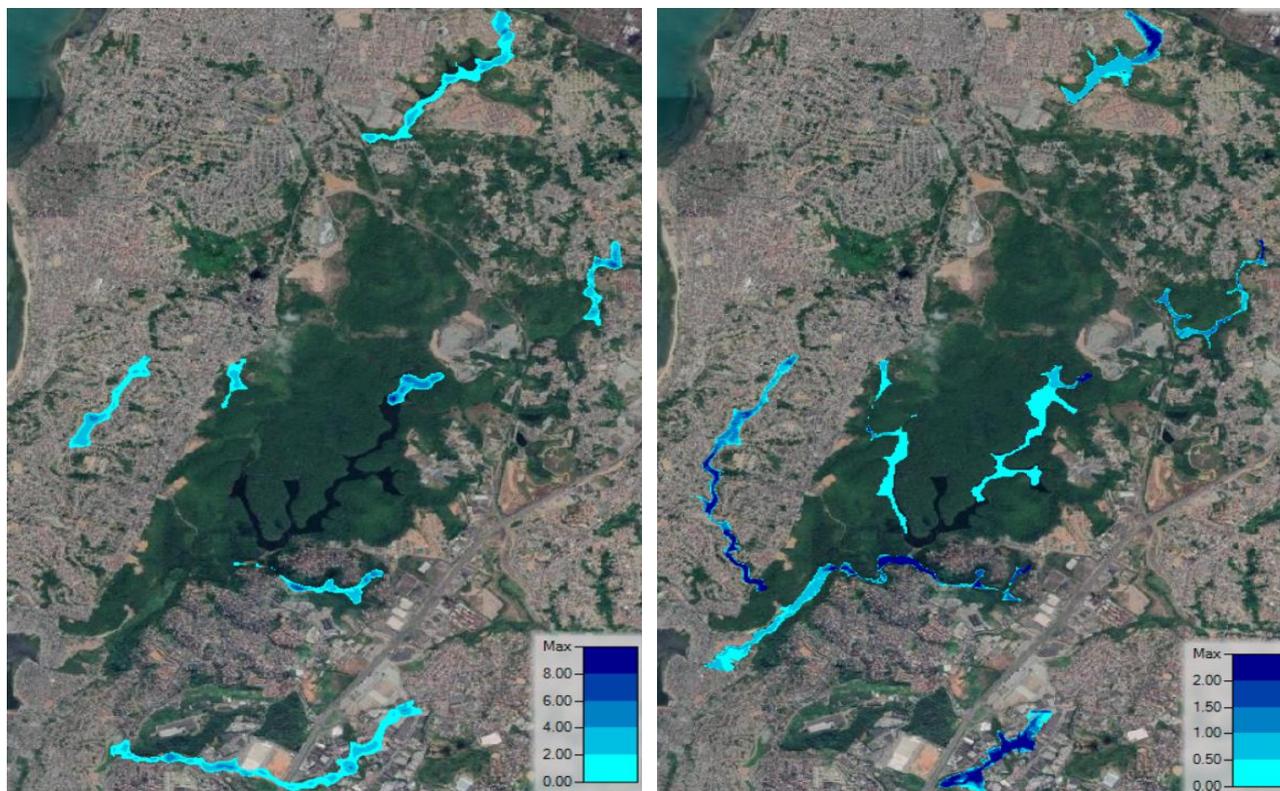


Figura 15- (a) Modelo digital de terreno SRTM (b) Modelo digital de terreno LiDAR.

Os resultados das manchas resultantes dos tempos de concentração de 25 anos e 50 anos comportaram-se de forma bem aproximada quanto à questão de espacialização, diferindo um pouco da mancha de tempo de recorrência de 10 anos pela área mais a norte, onde é possível notar o início da abrangência de áreas de urbanização.

Comparação entre os resultados dos modelos

Como segundo objetivo específico- sendo este comparar as áreas resultantes das respostas dos modelos digitais de terreno obtidos por interferometria SAR (InSAR) e light detection and ranging (LiDAR)- os resultados da modelagem utilizando o MDT derivado do LiDAR apresentaram melhor resultando que o MDT derivado da imagem SRTM no que tange ao ajuste aos contornos originais do terreno. O que pode ser explicado pela maior resolução horizontal e a precisão vertical associadas aos dados LiDAR em comparação com os MDT

derivado dos dados do SRTM como observado por outros autores (Molinari, et al., 2020; Garrote, 2022).

Objetivando a comparação entre as áreas resultantes dos dois MDTs, foram construídos mapas para observar as variações para os diferentes valores de área em função do tempo de recorrência, como apresentado nas tabelas 7 a 9. Devido à maior resolução para essa análise foi definido o MDT LiDAR com padrão de comparação.

Observando-se a sequência de tabelas abaixo é possível notar uma significativa variação nas extensões das áreas variando o tipo de MDT utilizado, sendo que a modelagem utilizando o LiDAR resultou em áreas maiores e com menores alturas máximas do perfil d'água. De forma inversa, os resultados oriundos do MDT SRTM apresentaram maiores alturas, porém menores áreas.

Tabela 7 – Áreas para o tempo de recorrência de 10 anos

Sub-Bacia	Sub-Bacia 1	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 3	Sub-Bacia 4	Sub-Bacia 5	Sub-Bacia 6	Sub-Bacia 7
Área SRTM (km ²)	0,092	0,036	0,068	0,019	0,040	0,128	0,037
Área LIDAR (km ²)	0,169	0,099	0,200	0,139	0,209	0,162	0,263
Variação (%)	45,535	63,271	66,190	86,433	80,999	21,250	85,821

Fonte: Autor (2020).

Da tabela 7 observa-se variações de área com diferenças compreendidas entre 21,25% entre as áreas da sub-bacia 6, e 86,43% entre as áreas da sub-bacias 4.

Tabela 8 – Áreas para o tempo de recorrência de 10 anos.

Sub-Bacia	Sub-Bacia 1	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 3	Sub-Bacia 4	Sub-Bacia 5	Sub-Bacia 6	Sub-Bacia 7
Área SRTM (km ²)	0,116	0,045	0,073	0,019	0,041	0,160	0,041
Área LIDAR (km ²)	0,179	0,103	0,210	0,145	0,220	0,170	0,276
Variação (%)	34,874	56,133	65,116	87,026	81,403	5,718	85,316

Fonte: Autor (2020).

Da tabela 8 observa-se variações de área com diferenças compreendidas entre 5,72% entre as áreas da sub-bacia 6, e 87,03% entre as áreas da sub-bacias 4.

Tabela 9 – Áreas para o tempo de recorrência de 10 anos.

Sub-Bacia	Sub-Bacia 1	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 3	Sub-Bacia 4	Sub-Bacia 5	Sub-Bacia 6	Sub-Bacia 7
Área SRTM (km ²)	0,134	0,052	0,076	0,024	0,045	0,196	0,046
Área LIDAR (km ²)	0,199	0,107	0,216	0,150	0,226	0,175	0,284
Variação (%)	32,591	50,973	64,622	84,131	79,981	-12,036	83,929

Fonte: Autor (2020).

Da tabela 9 observa-se variações de área com diferenças compreendidas entre 12,04% entre as áreas da sub-bacia 6, e 83,93% entre as áreas da sub-bacias 7.

Cabe ressaltar os resultados obtidos para a sub-bacia 6, onde através das análises das tabelas 7 a 9 passam uma ideia de proximidade entre os resultados comparados entre os MDTs, já que se observou as menores variações de áreas para esta sub-bacia. Porém, apesar disso, as áreas resultantes se comportam de forma bem distintas, onde para o resultado oriundo do MDT SRTM nota-se uma extensa área longitudinal ao longo do eixo de escoamento. Já para o resultado obtido do MDT LiDAR nota-se uma concentração regional e não há continuidade na propagação longitudinal de escoamento, o que pode ser resultante da operação de filtragem no modelo de superfície

LiDAR, que pôde ser observado em alguns pontos na figura 17.

Outra observação importante é que a área de inundação se apresenta com maiores irregularidades para o MDT-SRTM em comparação com um MDT-LiDAR de maior resolução para o mesmo tempo de recorrência. Pode-se entender que a maior resolução causa uma suavização da topografia do terreno e das elevações (Figura 16), permitindo assim um melhor espraiamento da propagação do escoamento simulado, assim aumentando a área superficial, o que por sua vez leva a redução das elevações da superfície da água e extensões.

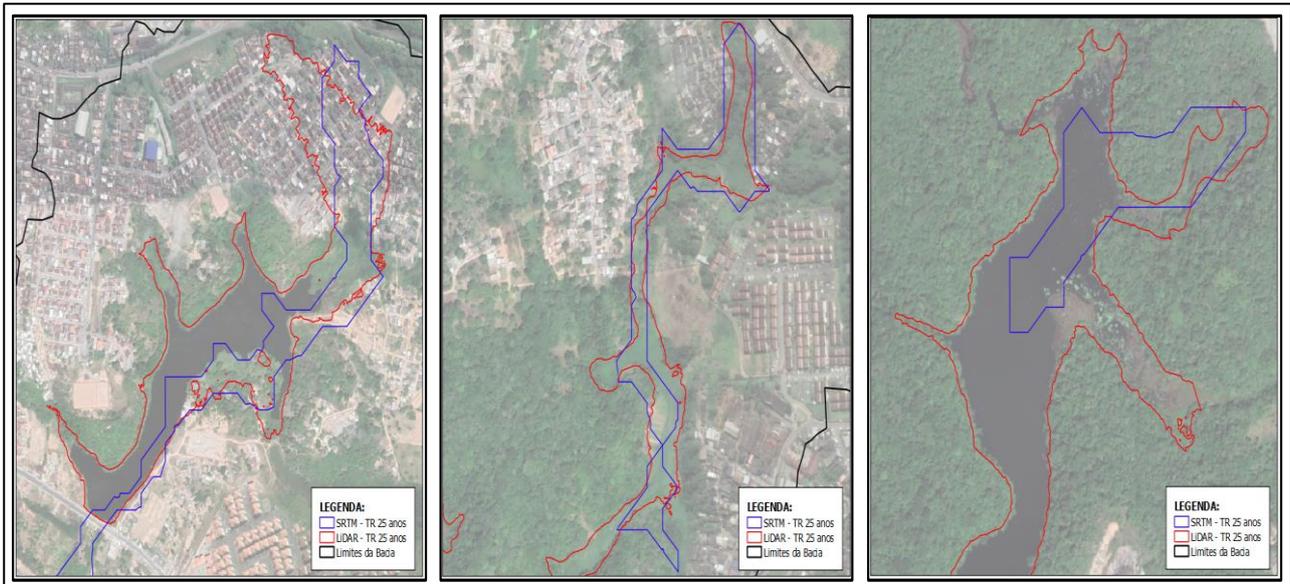


Figura 16 – Diferença entre as áreas resultantes dos MDTs SRTM e LiDAR

Quando analisados os resultados do modelo baseado na fonte LiDAR não observou diferenças significativas da área em relação à variação do tempo de recorrência. Foram calculados os acréscimos de área de acordo com

aumento dos tempos de recorrência, assim, sendo a diferença entre 10 anos e 25 anos, bem como entre 25 anos e 50 anos, como apresentado nas tabelas 10, a seguir, assim, é possível notar que as variações se oscilaram próximas à 10%.

Tabela 10 – Áreas (km²) resultantes em função para o tempo de recorrência para o MDT LiDAR

Sub-Bacia	Sub-Bacia 1	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 3	Sub-Bacia 4	Sub-Bacia 5	Sub-Bacia 6	Sub-Bacia 7
Área SRTM (km ²)	0,1688	0,0980	0,1998	0,1386	0,2091	0,1619	0,2627
Área LIDAR (km ²)	0,1787	0,1035	0,2098	0,1455	0,2196	0,1700	0,2759
Variação 10-25 (%)	0,1995	0,1066	0,2169	0,1498	0,2261	0,1751	0,2841
Variação 25-50 (%)	5,82	5,57	4,99	4,32	7,51	5,78	5,01

Fonte: Autor (2020).

Da mesma forma, quando analisados os resultados do modelo baseado no MDT SRTM observou diferenças mais significativas da área modelada quanto à variação do tempo de recorrência, como apresentado na tabela 11 abaixo. Sendo possível identificar variações de áreas próximas a 0,01% para a sub-bacia 4, quando analisado os resultados dos tempos de

recorrência entre 10 e 25 anos. De modo inverso, foi possível identificar variações máximas de 26,54%, para a sub-bacia 1, quando analisado os resultados dos tempos de recorrência entre 10 e 25 anos, assim apresentando uma maior variabilidade dos resultados para o modelo SRTM.

Tabela 11: Áreas (km²) resultantes em função para o tempo de recorrência para o MDT SRTM.

Sub-Bacia	Sub-Bacia 1	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 3	Sub-Bacia 4	Sub-Bacia 5	Sub-Bacia 6	Sub-Bacia 7
Área SRTM (km ²)	0,092	0,036	0,068	0,019	0,040	0,128	0,037
Área LIDAR (km ²)	0,169	0,099	0,200	0,139	0,209	0,162	0,263
Variação 10-25 (%)	26,539	25,405	8,335	0,406	2,766	25,709	8,740
Variação 25-50 (%)	15,553	15,116	4,459	25,991	10,876	22,396	12,727

Fonte: Autor (2020).

Os resultados mostraram uma subestimação dos resultantes do MDT SRTM. Stoleriu e Miha-Pintilie (2019) mapearam as áreas potencialmente inundáveis geradas nos modelos de elevação digital SRTM com resolução espacial de 30 m e LiDAR de 1 m, os resultados indicam SRTM superestimou a avaliação.

Amrei e Schmalz (2021) mostrou que há uma ampla dispersão de diferentes extensões de áreas, com resoluções espaciais variando entre 1 m e 30 m, além de mostrar maiores sensibilidades à efeitos de escala para regiões de alturas de água mais baixas.

Coincidência espacial áreas x ocorrências

Sathya et al.(2021) estudo dos eventos de desastres anteriores pode fornecer uma melhor compreensão das características do desastre e da fragilidade do sistema. Assim, para tal avaliação, os resultados das áreas oriundos dos dois MDTs foram consolidados em uma mesma imagem afim de verificar a espacialização e coincidências espaciais, como apresentado na figura 17.

A análise permite destacar dois cenários bem distintos, um primeiro demonstrando uma clara similaridade de distribuição espacial dos registros das ocorrências com as áreas modeladas, ou parte delas, o que pode ser notado de forma mais clara nas sub-bacias 1, 3, 6 e 7. Cabe destacar que estas áreas se encontram em regiões de maior densidade urbana, assim sendo maior a probabilidade que se tenha uma abertura de registro por parte da população (Zhou et al 2019; Gupta, 2020).

De forma inversa, para as sub-bacias 2, 4 e 5, não foi possível nenhuma correspondências espacial entre as ocorrências e as áreas resultantes da modelagem. E de forma oposta a análise anterior, estas áreas são caracterizadas por baixa densidade, ou nenhuma, populacional, sendo assim a probabilidade de existir registros de ocorrências de algum tipo de evento associado à hidrometeorologia é baixo, ou bem pouco provável de ocorrer.

Ainda avaliando as sub-bacias 1, 3, 6 e 7, nota-se que há trechos que em grande parte são compostos por classes de cobertura de vegetação densa e corpos hídricos, desta forma não sendo esperado que se tenha correspondências de destes trechos com os registros de ocorrências da Codesal. Tal comportamento descrito pode ser observado principalmente nas sub-bacias 1 e 7, assim, as avaliações foram realizadas com base apenas nos trechos onde foi possível identificar a classe de urbanização.

Para a avaliação da distribuição espacial dos pontos dos registros de ocorrências em relação às áreas resultantes das modelagens, fez uso do cálculo do Erro Médio Quadrático (EMQ)-também podendo ser denominado neste caso de Erro Médio das Discrepâncias Planimétricas- o qual busca avaliar as diferenças entre valores estimados e valores reais, como apresentado na equação 4 abaixo. As avaliações a seguir deu-se de forma a avaliar os registros de ocorrências em relação ao centro geométrico das áreas. Dos resultados nota-se um EMQ consideravelmente maior, sendo de 320,88, para a sub-bacia1 quando comparado aos demais resultados desta análise, o que pode ser explicado pela maior variação de distribuição espacial dos registros, bem como a menor quantidade, sendo limitada a oito registros, assim não apresentando um padrão claro de distribuição.

Para as demais sub-bacias analisadas, nota-se um EMQ consideravelmente menor que o resultado da sub-bacia 1, assim variando em um intervalo entre 28,66 m e 57,44 m.

Avaliação da metodologia como ferramenta preditiva

Com objetivo de avaliar a metodologia de modelagem hidrodinâmica como forma de previsão de identificação de áreas potencialmente sujeitas a inundações. Assim, para tal avaliação, foram analisadas as sub-bacias que apresentaram correspondências entre os resultados de registros de ocorrências e áreas resultantes das simulações, sendo assim analisadas apenas as sub-bacias 1, 3, 6 e 7 (Figura 17).

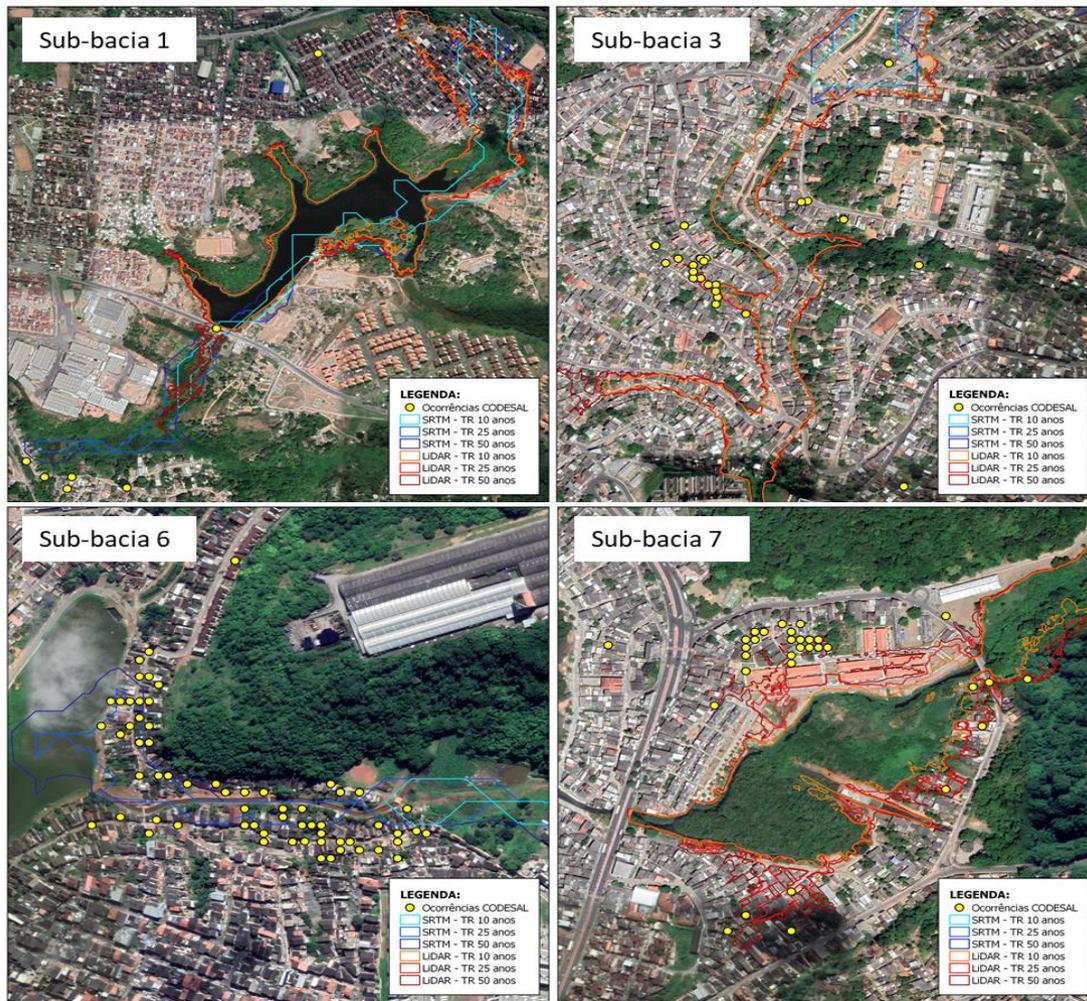


Figura 17 – Distribuição espacial das ocorrências e resultantes dos MDTs.

Da análise dos resultados da sub-bacia 1 nota-se que, apesar de existir registros de ocorrência da Codesal, estes não apresentaram nenhum padrão de distribuição espacial onde pudesse ser capaz de se fazer algum tipo de inferência relacionada às áreas resultantes de simulações. Comportamento esse que foi observado para ambas as fontes de MDTs. Destaca-se ainda que esta sub-bacia possui uma significativa parcela de urbanização na região de montante, onde, de acordo com as simulações, potencialmente poderia ser esperado a ocorrência de alagamentos, e assim a existência de registros, o que não foi de fato observado.

Para a sub-bacia 3 foi possível notar um padrão de distribuição de registros de ocorrências em uma pequena porção central da área resultante da simulação. Porém tal comportamento foi observado apenas para o resultado do MDT LiDAR, o qual apresentou uma região de maior abrangência das áreas resultantes da modelagem. Quando analisado apenas o resultado oriundo do MDT SRTM tal padrão de pontos de ocorrência

não seria observado no interior do perímetro da área modela. MDT LiDAR nota-se uma área concentrada apenas na porção a montante da sub-bacia 6, assim não englobando áreas com registros de ocorrências da Codesal.

Para a sub-bacia 7 foi considerado para esta análise apenas o trecho final onde é possível identificar áreas de urbanização, visto que o escoamento neste caso foi predominantemente em trechos de vegetação densa, assim sendo não podendo ser considerado por inexistir a possibilidade de que se tenha registros de eventos de alagamentos e inundação. Da análise dos resultados do MDT LiDAR para esta sub-bacia nota-se um padrão bem claro na região de jusante da sub-bacia, enquanto para os resultados oriundos do MDT SRTM não foi possível observar a coincidência espacial de registros de ocorrência no interno do seu perímetro.

Para a avaliação da metodologia como forma de previsão de identificação de áreas potencialmente sujeitas a alagamento e inundações, procedeu-se da aplicação do método

de análise estatística composta pelo testes de hipóteses “t” de Student. De acordo com Barbetta (2002) o teste t é apropriado para comparar dois conjuntos de dados quantitativos, em termos de seus valores médios. Sendo a sua formulação apresenta a seguir na equação:

$$t_{calc} = \frac{Md - \mu_0}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

Md-média da amostra;

μ_0 - média populacional;

S- desvio padrão amostral;

n- número de elementos da amostra.

As avaliações deram-se a partir de uma formulação de hipótese bicaudal, assim admitindo as coordenadas planimétricas dos centros

geométricos das áreas modeladas como média do populacional e os registros de ocorrências como dados populacionais.

Desta forma, as serem testadas foram:

H0: a média das ocorrências não difere da média da área;

H1: a média das ocorrências é diferente da média da área.

Assim, adotando um intervalo de confiança de 95%- consequentemente um nível de significância de 5%- foi calculado o parâmetro da estatística tcalc e então entra-se na tabela de probabilidade da distribuição t-Student. As coordenadas foram analisadas separadamente, tanto longitudinalmente como latitudinalmente, e os resultados da aplicação do teste podem ser observados na tabela 12 abaixo.

Tabela 12 – Resultados da aplicação da distribuição t- Student.

Parâmetros da Distribuição	Sub-Bacia 1		Sub-Bacia 3		Sub-Bacia 6		Sub-Bacia 7	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Md	559443,25	8578747,00	556831,06	8575393,39	557549,37	8572746,54	557132,06	8573767,73
μ_0	560012,33	8579283,37	557090,00	8575431,00	557425,00	8572758,00	557029,00	8573644,80
S	245,41	426,89	111,78	97,28	240,48	126,30	416,25	108,53
n	8	8	36	36	108	108	63	63
gl	7	7	35	35	107	107	62	62
t calc	6,559	3,554	13,899	2,320	5,375	0,943	1,965	8,990
t tab	2,365	2,365	2,030	2,030	1,982	1,982	2,000	2,000
H0	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Aceita	Aceita	Rejeita
H1	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Rejeita	Rejeita	Aceita

Fonte: Autor (2020).

Os resultados apresentados mostram que houve uma predominância de rejeição da hipótese inicial H0 em detrimento da hipótese H1, a qual afirma que as médias são diferentes das médias das coordenadas dos centros das áreas. Assim, de acordo com a distribuição t, e com intervalo de confiança adota, os resultados sugerem que a aplicação do método de modelagem hidrodinâmica como ferramenta preditiva não é adequada.

Conclusão

Neste trabalho, através de modelagem hidrodinâmica, utilizando o programa HEC-RAS através de uma formulação bidimensional, sendo analisadas premissas e critérios metodológicos utilizados no desenvolvimento de estudos de identificação de áreas de alagamentos e inundações na bacia hidrográfica do Rio do Cobre, em Salvador, Bahia, caracterizado por meio de

modelos digitais de terreno. De forma geral, o acoplamento entre modelos hidrológicos e hidrodinâmicos com sistemas de informações geográficas é uma metodologia razoável para cumprir o objetivo proposto. Sathya et al.(2021) a combinação do modelo hidrológico do HEC-HMS e do modelo hidráulico do HEC-RAS mostrou bom desempenho para o desenvolvimento da simulação hidráulica.

A modelagem hidrodinâmica possibilita realizar experimentos sobre uma representação válida do sistema hidrográfico de uma bacia, para assim tentar compreender os principais mecanismos que atuam sobre a formação de alagamentos e inundações resultantes dos eventos de precipitações (Pour et al., 2020; Mubialiwo et al., 2022). A partir da metodologia produziu-se mapas consolidados das áreas modeladas, o qual serviu para avaliar a eficácia da modelagem como ferramenta preditiva de identificação de zonas de alagamentos e inundações.

Com base nos resultados obtidos, é possível avaliar a utilização de dados oriundos do modelo digital de terreno SRTM de resolução espacial de 30 m como sendo aceitável como uma avaliação preliminar, pois os resultados não demonstraram um ajuste tão bom tanto no quesito planimétrico do perímetro das áreas, quanto no ajuste de altimetria, quando se observar as cotas do perfil dos escoamentos, podendo assim inferir que há uma minoração das áreas e uma majoração das alturas do escoamento. Já para os resultados oriundos do modelo digital de terreno LiDAR de resolução 0,5 m, observou-se um bom ajuste quanto ao perímetro a qual as áreas resultantes estavam inseridas, bem como resultou em alturas mais condizentes com a realidade da região. De modo semelhante Stoleriu e Mişu-Pintilie (2019) os resultados indicam que os dados LiDAR melhoram o processo de avaliação de risco de inundação.

Os resultados quanto à variação das dimensões planimétricas das áreas em função da variação dos tempos de recorrências de chuvas apresentaram comportamentos bem semelhantes, quando os resultados são analisados individualmente para cada modelo digital de terreno, já quando comparados, os resultados apresentam comportamentos bem distintos

Quanto às limitações gerais encontradas no desenvolvimento do trabalho destaca-se a impossibilidade de se fazer a calibração dos modelos, visto que período planejado para acompanhamento de eventos de campo foi inviabilizado em decorrência das necessidades de isolamento social, desta forma as análises basearam-se na utilização dos resultados de MDT LiDAR como padrão de comportamento, por se tratar do modelo digital de terreno de melhor resolução.

A presença de erros é inerente ao longo do processo de estimativas do mapeamento em função das incertezas dos dados de entrada, da estrutura e dos parâmetros dos modelos. Há uma série de variáveis que podem ser destacadas, as quais podem resultar nas limitações da qualidade dos resultados como dados de chuvas, tipos de solo, caracterização física da bacia, registros de ocorrências, bem como todo o equacionamento envolvido no processo.

Dos dados utilizados para a validação da metodologia, cabe ressaltar a importância que se tenha a prática do georreferenciamento de forma mais fiel ao local que de fato seja observada as ocorrências. A constante geração desse tipo de dado é importante para se gerar um banco de dados

mais robusto, assim permitindo que seja possível identificar melhores padrões de distribuição, com isso possibilitando uma melhor localização de áreas vulneráveis, podendo assim agir de uma forma preventiva mais precisa (Dash, Vijay, Gupta, 2022).

O trabalho não apontou fortes evidências da validade do uso da modelagem hidrodinâmica como ferramenta para previsão de áreas susceptíveis a alagamentos e inundações seja uma metodologia adequada para tal fim. Entretanto, a partir da análise visual das distribuições das ocorrências e as áreas modeladas, acredita-se que a metodologia possa servir como uma primeira avaliação, assim analisando de forma macro o ambiente e sugerindo áreas

Para que se tenha um resultado mais robusto, sugere-se que se faça uma análise da abordagem utilizando um modelo digital de superfície, de forma a ter uma maior aproximação da realidade. Ainda no sentido de pesquisas futuras, recomenda-se a utilização do acoplamento dos resultados deste trabalho a um modelo representativo do inventário do sistema de drenagem urbana.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelas bolsa de mestrado do primeiro autor.

Referências

- Amrei, David; Schmalz, Britta. 2021. A Systematic Analysis of the Interaction between Rain-on-Grid-Simulations and Spatial Resolution in 2D Hydrodynamic Modeling. *Water* 13, no. 17: 2346. <https://doi.org/10.3390/w13172346>
- Barbetta, P. A. Estatística Aplicada às Ciências Sociais. 5ª Ed. Florianópolis :UFSC, 2002.
- Campos-Aranda, D. F., 1978. Cálculo de las Curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno, a partir de Registros de Lluvia Máxima en 24 horas y Relaciones Duración-Lluvia Promedio. Subdirección Regional Noreste de Obras Hidráulicas e Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural., San Luis Potosí, p. 25.
- Carlos H. Aparicio Uribe, Ricardo Bonilla Brenes, Jochen Hack, Potential of retrofitted urban green infrastructure to reduce runoff - A model implementation with site-specific constraints at neighborhood scale, *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 69,

- 2022, ISSN 1618-8667, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127499>.
- CETESB - Companhia de tecnologia de saneamento ambiental, 1986 . Drenagem urbana: manual de projeto. São Paulo: 466p.
- Chakravorty, B., Ramana, R.V., Pandey, N.G., 2022. Hydrodynamic Modeling of Urban Flooding and Its Management: A Case Study of Patna, India. In: Jha R., Singh V.P., Singh V., Roy L.B., Thendiyath R. (eds) River Hydraulics. Water Science and Technology Library, vol 110. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81768-8_33
- Costabile, P., Ostanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., Petaccia, G., 2020. Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: comparison with a state-of-the art model. *Water* 12:1–19. <https://doi.org/10.3390/w12092326>
- Dahl, S. R. et al., 2022. Toward reducing uncertainty quantification costs in DEM models of particulate flow: Testing simple, sensitivity-based, forward uncertainty propagation techniques. *Powder Technology*.
- Damé, R. de C. F., Teixeira, C. F. A., Terra, V. S. S., 2008. Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-frequência para Pelotas - RS. *Engenharia Agrícola*, v.28, p.10-15.
- Devkota, S., Shakya, N.M., Sudmeier-Rieux, K., Jaboyedoff, M.; Van Westen, C.J., Mcadoo, B.G., Adhikari, A., 2018. Development of Monsoonal Rainfall Intensity-Duration-Frequency (IDF) Relationship and Empirical Model for Data-Scarce Situations: The Case of the Central-Western Hills. *Hydrology*, 5(2), 27.
- Dhote, P.R., Thakur, PK, Domeneghetti, A., Chouksey, A., Garg, V., Aggarwal, S.P., Chauhan, P., 2020. The use of SARAL/AltiKa altimeter measurements for multi-site hydrodynamic model validation and rating curves estimation: an application to Brahmaputra River, a COSPAR publication. *Adv Space Res* 68(2):691–702. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.012>
- Dash S., Vijay R., Gupta R., 2022. Steady and Unsteady Hydrodynamic Simulation of Pili River as a Potential Flood Warning System Using HEC-RAS. *Recent Advancements in Civil Engineering*, vol 172. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4396-5_79
- Elkhrachy, I., 2022. Flash Flood Water Depth Estimation Using SAR Images, Digital Elevation Models, and Machine Learning Algorithms. *Remote Sens.* 2022, 14, 440.
- Ezz, H., 2018. Integrating GIS and HEC-RAS to model Assiut plateau runoff. *Egyptian Journal Of Remote Sensing And Space Sciences.* Ed3.Volume: 21. Páginas: 219-227.
- Hohmann, C., Kirchengast, G., Birk, S., 2018. Alpine foreland running drier? Sensitivity of a drought vulnerable catchment to changes in climate, land use, and water management. *Clim Change*,147:179–193.
- Garrote, J., 2022. Free Global DEMs and Flood Modelling—A Comparison Analysis for the January 2015 Flooding Event in Mocuba City (Mozambique). *Water* 14, 176. <https://doi.org/10.3390/w14020176>
- Ghimire, E., 2019. Evaluation of one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS models for flood travel time prediction and damage assessment using HAZUS-MH: a case study of grand river. *Youngstown State University, Ohio*.
- Gomes Júnior, M. N.; Braga, P. A. ; de Macedo; Mendiondo, E. M. . Análises estatísticas, visuais e não paramétricas para a otimização do ajuste de curvas idf e construção de ábacos de projeto de obras hidráulicas: estudo de caso em São Carlos sp. *Revista DAE*, 2019.
- Gupta, K., 2020. Challenges in developing urban flood resilience in India. *Phil Trans R Soc A* 378:20190211
- Hu Q, Li Z, Wang L, Huang Y, Wang Y, Li L., 2019. Rainfall spatial estimations: a review from spatial interpolation to multi-source data merging. *Water* 11(3):579
- Huțanu, E., Mișu-Pintilie, A., Urzica, A.; Paveluc, L.E., Stoleriu, C.C., Grozavu, A., 2020. Using 1D HEC-RAS Modeling and LiDAR Data to Improve Flood Hazard Maps Accuracy: A Case Study from Jijia Floodplain (NE Romania). *Water*, 12, 1624.
- Kai Wang, Yan Wu, Qingdong Fan, Construction of rainstorm security pattern based on waterlogging prevention and control: A case study on Zhengzhou City, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 61, Issue 11, 2022, Pg 8911-8918, <http://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.031>.
- Kalogeropoulos, K, Stathopoulos, N, Psarogiannis, A, Pissias, E, Louka, P, Petropoulos, GP, Chalkias, C., 2020. An integrated GIS-hydro modeling methodology

- for surface runoff exploitation via small-scale reservoirs. *Water* 12(3182):1–18. <https://doi.org/10.3390/w12113182>
- Köppen, W., 1930. *Das Geographische System der Klimatologie. Handbuch der klimatologie Vol. 1.* Berlin: Gebrüder Borntraeger.
- Kumar, B., Venkatesh, M., Triphati, A., 2018. A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Rihand River Basin, Central India Sustentar. *Sustainable Water Resources Management Volume 4, Issue 1*, pp 45–54.
- Molinari, D. et al., 2020. Are flood damage models converging to “reality”? Lessons learnt from a blind test. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 20:2997–3017. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2997-2020>
- Mihu-Pintilie, A., Cîmpianu, C. I., Stoleriu, C. C., Pérez, M. N., Paveluc, L. E., 2019. Using high-density LiDAR data and 2D streamflow hydraulic modeling to improve urban flood hazard maps: A HEC-RAS multi-scenario approach. *Water*, 11(9).
- Mubialiwo, A. et al., 2022. Hydrodynamic Modelling of Floods and Estimating Socio-economic Impacts of Floods in Ugandan River Malaba Sub-catchment. *Earth Syst Environ* 6, 45–67. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00283-w>
- Nascimento, J. R. S. ; Farias, J. A. M. ; Pinto, E. J. A. . Definição de Equação Idf Para O Município De Teresina Obtida À Partir De Uma Série Pluviográfica. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis-SC.
- Opeyemi, A. Z., Wei, J., Olusola, F., 2019. Urban Expansion and the Loss of Prairie and Agricultural Lands: A Satellite Remote-Sensing-Based Analysis at a Sub-Watershed Scale. *Sustainability*, 11.
- Pandey P.C., Koutsias N., Petropoulos G.P., Srivastava P.K., Ben Dor E., 2021. Land use/land cover in view of earth observation: data sources, input dimensions, and classifiers—a review of the state of the art. *Geocarto Int* 36(9):957–988.
- Pathan, A.I., Agnihotri, P.G., 2019. A combined approach for 1-D hydrodynamic flood modeling by using Arc-Gis, Hec-Georas, HEC-RAS Interface-a case study on Purna River of Navsari City, Gujarat. *IJRTE*, 8(1):1410–1417.
- Pathan, A.K.I., Agnihotri, P.G., 2020. 2-D unsteady flow modelling and inundation mapping for lower region of Purna Basin using HEC-RAS. *Nat Environ Pollut Technol* 19(1):277–285.
- Pathan A.I., Agnihotri P.G., Patel D., 2022. River Geometry Extraction from Cartosat-1 DEM for 1D Hydrodynamic Flood Modeling Using HEC-RAS—A Case of Navsari City, Gujarat, India. *Advanced Modelling and Innovations in Water Resources Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4629-4_13
- Pizarro, R., Ingram, B., Gonzalez-Leiva, F., Valdés-Pineda, R., Sangüesa, C., Delgado, N., García-Chevesich, P., Valdés, J.B., 2018. Webse-Idf: A Web-Based System for the Estimation of IDF Curves in Central Chile. *Hydrology* 5, 40.
- Porto, R. M., 2006. *Hidráulica Básica* 4a. ed. São Paulo: Rettec Gráfica E Editora.
- Pour, S.H., Abd-Wahab, A.K., Shahid, S., Dewan, A., 2020. Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: current trends, issues and challenges. *Sustain Cities Soc.* <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102373>
- Rana, I.A., Routray, J.K., 2018. Integrated methodology for flood risk assessment and application in urban communities of Pakistan. *Nat Hazards* 91, 239–266.
- Sathya, K. ; Rahardjo, A. P.; Jayadi, R.. 2021. Flash Flood Disaster Reconstruction for Estimating the Available Warning Time, the Case in Sempor River on 21st of February 2020, Mt. Merapi Slope, Yogyakarta. *Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 930.
- Sherman, C.W., 1931. Frequency and Intensity of Excessive Rainfall at Boston, Boston-Massachusetts. *American Society of Civil Engineers*, v.95, p.951–960.
- Stoleriu, C., Urzica, A., Mihu-Pintilie, A., 2019. Improving flood risk map accuracy using high-density LiDAR data and the HEC-RAS river analysis system: A case study from north-eastern Romania. *Journal of Flood Risk Management*.
- Thakur, P. K. et al., 2022. Role of Geospatial Technology in Hydrological and Hydrodynamic Modeling-With Focus on Floods Studies. In: *Geospatial Technologies for Land and Water Resources Management*. Springer, Champ. 483-503.
- USACE. U.S. Army Corps Of Enginners, 2021. *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*, version 6.0. Davis, EUA: Hydrologic Engineering Center 705 p.

Venkatesh, M. , Anshumali. A., 2019. Gis-based assessment of recent changes in drainage and morphometry of Betwa River basin and sub-basins, Central India. *Applied Water Science*, 9: 157.

Zhou, Q., Leng, G., Su, J., Ren, Y.,2019. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: importance of urban planning and drainage adaptation. *Sci Total Environ* 658:24–33. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.184>.