

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Milena Rosa de Sousa

**Avaliação dos Impactos das Mudanças Climáticas em Eventos Extremos na Bacia  
Urbana de São Carlos (SP) via Modelagem Hidrológica-Hidrodinâmica com o  
HydroPol2D**

São Carlos - SP

2024

MILENA ROSA DE SOUSA

**Avaliação dos Impactos das Mudanças Climáticas em Eventos Extremos na Bacia  
Urbana de São Carlos (SP) via Modelagem Hidrológica-Hidrodinâmica com o  
HydroPol2D**

**Versão Original**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. Marcus Nóbrega Gomes  
Júnior

São Carlos - SP

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA  
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Sousa, Milena Rosa de  
S725a Avaliação dos Impactos das Mudanças Climáticas  
em Eventos Extremos na Bacia Urbana de São Carlos (SP)  
via Modelagem Hidrológica-Hidrodinâmica com o  
HydroPol2D / Milena Rosa de Sousa; orientador Dr.  
Marcus Nóbrega Gomes Júnior. São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2024.

1. HydroPol2D. 2. Inundações. 3. Mudanças  
climáticas. 4. Não-Estacionariedade. 5. Modelo  
Hidrológico. 6. Modelo Hidrodinâmico. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

# FOLHA DE JULGAMENTO

---

Candidato(a): **Milena Rosa de Sousa**

Data da Defesa: 13/11/2024

Comissão Julgadora:

Resultado:

**Dr. Marcus Nóbrega Gomes Júnior (Orientador(a))**

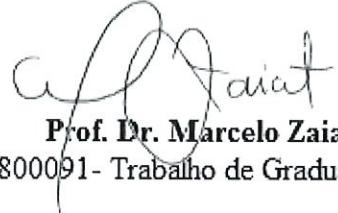
Aprovado

**Prof. Dra. Maria Clara Fava**

APROVADA

**Prof. Dra. Maria Mercedes Gamboa Medina**

Aprovado



**Prof. Dr. Marcelo Zaiat**

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

## AGRADECIMENTOS

Gostaria, primeiramente, de agradecer à minha família – meus pais, Marislena e Valdemir e minha irmã Natália – que sempre estiveram ao meu lado, dispostos a dirigir quase 300 km para garantir que eu estivesse bem. Foi graças a esse apoio incondicional que eu consegui trilhar essa jornada com segurança e tranquilidade.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos do ensino médio, principalmente minhas amigas Karoline e Beatriz, por causa de vocês e da minha família que Uberaba nunca perdeu a cara de lar (e eu nunca fiquei sem rolê).

Agradeço aos meus amigos de São Carlos, agradeço por tornarem essa cidade minha segunda casa. A convivência com vocês nos surtos, nas disciplinas mais cabeludas, nas festas, nas sushizadas e amigos secretos foram o que tornaram os desafios mais leves. Esse agradecimento vai para Acerola, Drei, Pepper, Crea, Heinz, Batata, Juliana, Jeri, Késsia, Euro, Cabra, Nelson, Paty e especialmente para Alan, Lucas, Gisele e Danilo, para vocês eu sempre abri espaço no meu cronograma.

Um abraço e muito obrigada as meninas da “a Casa Lar”, as velhas (Mavi, Vitória, Manu) e as novas (Carol, Maria e Alice) pelos incentivos e por me permitir deixar a louça suja por mais um dia quando tudo estava caótico.

Aos professores do curso de Engenharia Ambiental da EESC-USP, sou grata pela dedicação, ensinamentos e por me ajudarem no caminho de desenvolver minha própria visão de mundo. Agradeço também aos integrantes do TheWadiLab pela colaboração e conhecimentos compartilhados ao longo desse processo de pesquisa.

Em especial, agradeço ao meu orientador, Marcus Nóbrega, que esteve presente em cada etapa deste trabalho com paciência e dedicação. Obrigada por me incentivar a fazer meu melhor trabalho possível e por acreditar em mim e, além de tudo, obrigada por incentivar o meu aprendizado, possibilitando que eu me desenvolvesse com esse trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este percurso, meu sincero e profundo agradecimento.

"We're all living together, even if most folks don't act like it. We all have the same roots, and we are all branches of the same tree." (O PÂNTANO, 2006)

## RESUMO

**SOUSA, M. R. Avaliação dos Impactos das Mudanças Climáticas em Eventos Extremos na Bacia Urbana de São Carlos (SP) via Modelagem Hidrológica-Hidrodinâmica com o HydroPol2D.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Eventos extremos são definidos como fenômenos naturais ou condições meteorológicas, como tempestades, ondas de calor, secas e enchentes severas, que se encontram nas extremidades das distribuições estatísticas de variáveis climáticas. Com o avanço das mudanças climáticas, a tendência é que eventos extremos se tornem mais recorrentes, assim como os impactos causados por eles, em especial no caso de enchentes resultando em maiores áreas inundadas. No contexto de São Carlos, uma cidade vista como polo tecnológico no Brasil, chuvas intensas e inundações ainda geram crises periódicas, causando perdas materiais e imateriais. Portanto, este estudo tem como objetivo analisar como eventos extremos de chuva influenciam nas inundações da bacia urbana de São Carlos, tanto em cenarizações levando em conta as condições de precipitação da climatologia atual, quanto para cenários futuros considerando diferentes projeções de mudanças climáticas (ETA - MIROC5, para RCP 4.5 W/m<sup>2</sup> e 8.5 W/m<sup>2</sup>). Para avaliar o efeito das chuvas na propagação das cheias e consequente mapeamento das áreas de inundaçāo, este trabalho utiliza o modelo hidrológico-hidrodinâmico HydroPol2D, que resolve equações de conservação de quantidade de movimento, massa e de transporte de poluentes no plano cartesiano em malha regular de pixel de dimensões iguais. Os resultados demonstraram que as áreas inundadas acima de 0,3 m e acima de 0,1 m aumentaram, em média, 65% e 52% quando comparadas aos eventos atuais. Além disso, as profundidades máximas de inundaçāo para eventos de 100 anos de recorrência aumentaram em até 2,5 m em alguns pontos da bacia hidrográfica. Após as análises realizadas no estudo, outros possíveis caminhos a serem seguidos são correlacionar as áreas mais afetadas pelas inundações (atuais e futuras) de acordo com os bairros mais afetados e seu IDH.

Palavras-Chave: HydroPol2D, Inundações, Mudanças climáticas, Não-Estacionariedade, Modelo Hidrológico, Modelo Hidrodinâmico.

## ABSTRACT

**SOUSA, M. R. Assessment of the Impacts of Climate Change on Extreme Events in the Urban Basin of São Carlos (SP) via Hydrological-Hydrodynamic Modeling with HydroPol2D.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Extreme events are defined as natural phenomena or meteorological conditions, such as storms, heat waves, droughts, and severe floods, that are found at the extremes of the statistical distributions of climate variables. As climate change advances, extreme events tend to become more recurrent, as do the impacts caused by them, especially in the case of floods resulting in larger flooded areas. In the context of São Carlos, a city seen as a technological hub in Brazil, heavy rainfall and flooding still generate periodic crises, causing material and immaterial losses. Therefore, this study aims to analyze how extreme rainfall events influence flooding in the urban basin of São Carlos, both in scenarios taking into account the precipitation conditions of the current climatology, and for future scenarios considering different climate change projections (ETA - MIROC5, for RCP 4.5 4.5 W/m<sup>2</sup> and 8.5 4.5 W/m<sup>2</sup>). To assess the effect of rainfall on the propagation of floods and the subsequent mapping of flooded areas, this study uses the hydrological-hydrodynamic model HydroPol2D, which solves equations for conservation of momentum, mass and pollutant transport on the cartesian plane. The results showed that the flooded areas above 0,3 m and above 0,1 m increased, on average, by 65% and 52% when compared to current events. In addition, the maximum flood depths for events with a 100-year return period increased by up to 2,5 m in some points of the watershed. After the analyses carried out in the study, other possible paths to be followed are to correlate the areas most affected by floods (current and future) according to the most affected neighborhoods and their HDI.

Keywords: HydroPol2D, Floods, Climate change, Non-stationarity, Hydrological model, Hydrodynamic model.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Elementos básicos do hietograma do método de Chicago .....	22
Figura 2 - Demonstração da distribuição de Blocos Alternados .....	23
Figura 3 - Distribuição das precipitações pelo método de Huff por quartil .....	24
Figura 4 - Etapas da metodologia, principais dados utilizados e resultados intermediários ....	44
Figura 5 - Mapas de caracterização da bacia do Mineirinho (tipo de solo, modelo digital de terreno e uso e ocupação do solo).....	46
Figura 6 - Bacia urbana de São Carlos com seus corpos hídricos e pontos de interesse .....	48
Figura 7 - Mapas de caracterização da bacia urbana de São Carlos (tipo de solo, modelo digital de terreno e uso e ocupação do solo) .....	49
Figura 8 - Mapa de localização das estações pluviométricas e fluviométrica na bacia do Mineirinho .....	51
Figura 9 - Hietograma da precipitação média e Hidrograma do Evento de 25/02/2015 .....	52
Figura 10 - Intensidade da chuva por pluviômetro do evento de 25/02/2015 .....	53
Figura 11 - Chuva acumulada distribuída espacialmente no evento de 25/02/2015 .....	53
Figura 12 - Hietograma da precipitação média e Hidrograma do Evento de 23/11/2015 .....	54
Figura 13 - Intensidade da chuva por pluviômetro do evento de 23/11/2015 .....	54
Figura 14 - Chuva acumulada distribuída espacialmente no evento de 23/11/2015 .....	55
Figura 15 - Mapa de umidade inicial do solo para o evento 22/05/2015 .....	57
Figura 16 - Mapa de umidade inicial do solo para o evento de 23/11/2015 .....	57
Figura 17 - Hietograma e Hidrograma Observado e Modelado de 25/02/2015 .....	59
Figura 18 - Hietograma e Hidrograma Observado e Modelado de 23/11/2015 .....	61
Figura 19 - Comparação das IDFs para o período atual e para o período de 2051 a 2099 com mudanças climáticas PT para TR 5 anos.....	64
Figura 20 - Comparação das IDFs para o período atual e para o período de 2051 a 2099 com mudanças climáticas PT para TR 50 anos.....	64
Figura 21 – Intensidades das chuvas geradas pelas IDFs para cada tempo de retorno e sua distribuição por blocos alternados. ....	66
Figura 22 - Mapas de profundidades máximas geradas para cada cenário. Os mapas de a) a d) são dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são do cenário futuro MIROC5 RCP 4.5 PT e os mapas de i) a l) são do cenário futuro MIROC5 RCP 8.5 PT, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente .....	68
Figura 23 - Mapas de profundidades máximas geradas para cada cenário na região do Mercado municipal. Os mapas de a) a d) são dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são do cenário futuro MIROC5 RCP 4.5 PT e os mapas de i) a l) são do cenário futuro MIROC5 RCP 8.5 PT, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente .....	71
Figura 24 - Eventos reais de inundação no Mercado municipal sendo a) e d) Evento em 07/02/2024; b) Evento em 28/12/2022; c) Após o evento de 28/12/2022 .....	72
Figura 25 - Mapas de profundidades máximas geradas para cada cenário na região da Rotatória do Cristo. Os mapas de a) a d) são dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são do cenário futuro	

MIROC5 RCP 4.5 PT e os mapas de i) a l) são do cenário futuro MIROC5 RCP 8.5 PT, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente .....	73
Figura 26 - Eventos reais de inundação na Rotatória do cristo sendo a) Evento em 28/12/2022; b) e d) Evento em 13/11/2020; c) Após o evento de 28/12/2022 .....	74
Figura 27 - Mapas de profundidades máximas geradas para cada cenário na região da praça do Kartódromo. Os mapas de a) a d) são dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são do cenário futuro MIROC5 RCP 4.5 PT e os mapas de i) a l) são do cenário futuro MIROC5 RCP 8.5 PT, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente.....	75
Figura 28 - Eventos reais de inundação na região do Kartódromo a) Evento em 23/11/2015; b) Evento em 10/11/2018; c) Evento de 28/12/2022 .....	76
Figura 29 - Diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os eventos atuais. Os mapas de a) a d) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 4.5 PT e dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 8.5 PT e dos eventos atuais, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente .....	77
Figura 30 - Diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os eventos atuais para a baixada do Mercado municipal. Os mapas de a) a d) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 4.5 PT e dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 8.5 PT e dos eventos atuais, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente ..	79
Figura 31 - Diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os eventos atuais para a Rotatória do cristo. Os mapas de a) a d) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 4.5 PT e dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 8.5 PT e dos eventos atuais, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente ...	80
Figura 32 - Diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os eventos atuais para a praça do Kartódromo. Os mapas de a) a d) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 4.5 PT e dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 8.5 PT e dos eventos atuais, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente ...	81
Figura 33 - Áreas totais inundadas para todos os cenários para profundidades maiores que 0,3 ou 0,1 m.....	82
Figura 34 - Percentual de diferença entre os cenários atuais e os futuros para a classe de uso árvores .....	84
Figura 35 - Percentual de diferença entre os cenários atuais e os futuros para a classe de uso construção.....	85
Figura 36 - Percentual de diferença entre os cenários atuais e os futuros para a classe de uso plantações .....	85

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Características dos eventos selecionados.....	55
Tabela 2 - Valores de CN para diferentes classes de uso e ocupação do solo, tipos de solo e AMC II e AMC I .....	56
Tabela 3 - Valores calibrados para os parâmetros de Green-Ampt .....	60
Tabela 4 - Valores escolhidos para os parâmetros de <i>n</i> de manning associados ao uso do solo .....	61
Tabela 5 - IDFs propostas para os modelos MIROC5 RCP 4.5 e RCP 8.5 (PT) para o período de 2051 a 2099.....	65
Tabela 6 - Tabela de porcentagem de aumento de área inundada em comparação com o cenário atual.....	83

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO AMBIENTAL .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
3.1	HIDROLOGIA URBANA.....	18
3.1.1	<b>Chuvas.....</b>	<b>18</b>
3.1.1.1	Chuva de projeto.....	20
3.1.2	<b>Interceptação e Abstração Inicial.....</b>	<b>25</b>
3.1.3	<b>Infiltração.....</b>	<b>25</b>
3.1.3.1	Modelo de capacidade de infiltração de Horton .....	27
3.1.3.2	Modelo de capacidade de infiltração de Green e Ampt .....	27
3.1.3.3	Método Curve Number .....	28
3.1.3.4	Índice phi .....	29
3.1.4	<b>Evapotranspiração.....</b>	<b>30</b>
3.2	HIDRÁULICA DE CONDUTOS LIVRES.....	32
3.2.1	<b>Regime Permanente .....</b>	<b>33</b>
3.2.1.1	Equação de Manning.....	34
3.2.2	<b>Regime transitório .....</b>	<b>35</b>
3.2.2.1	Equações de Saint-Venant.....	37
3.3	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	38
3.4	MODELOS HIDRODINÂMICOS .....	39
3.5	HYDROPOL2D .....	40
3.5.1	<b>Modelo hidrodinâmico.....</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>44</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA .....	45
4.1.1	<b>Bacia do Mineirinho .....</b>	<b>46</b>
4.1.2	<b>Bacia urbana de São Carlos.....</b>	<b>47</b>
4.2	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO .....	50
4.3	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	51
4.3.1	<b>Evento de calibração .....</b>	<b>59</b>
4.3.2	<b>Evento de validação .....</b>	<b>61</b>
4.4	SIMULAÇÕES DE EVENTOS CRÍTICOS/EVENTOS DE PROJETO .....	62
4.4.1	<b>IDF Atual .....</b>	<b>62</b>
4.4.2	<b>IDFs de mudanças climáticas .....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>66</b>

5.1	PROFUNDIDADES MÁXIMAS .....	66
5.2	DIFERENÇAS DE PROFUNDIDADES MÁXIMAS.....	76
5.3	ÁREAS INUNDADAS TOTAIS .....	82
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>90</b>

## 1 CONTEXTUALIZAÇÃO AMBIENTAL

Eventos extremos referem-se a fenômenos raros ou intensos, como chuvas torrenciais, secas prolongadas, ou ondas de calor, que excedem os limites históricos ou climatológicos de variabilidade natural. Isto é, são eventos fora do comum devido à sua intensidade; entretanto, apesar da sua raridade, não implicam necessariamente em uma catástrofe. Por serem eventos raros, a magnitude de um evento extremo é inversamente relacionada à sua frequência de ocorrência (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Já os eventos críticos são eventos que representam um risco significativo para a sociedade, meio ambiente ou economia devido ao seu impacto, mas podem ou não ser extremos do ponto de vista estatístico (SIRHESC, 2018). Portanto, uma inundação pode ser um evento extremo se for muito intensa e rara, mas pode ser considerada crítica se causar danos graves a uma comunidade. Por outro lado, um evento não extremo, como uma chuva moderada, pode se tornar crítico se ocorrer em uma área vulnerável ou sob condições que maximizem seu impacto.

As inundações urbanas fazem parte da história da humanidade desde que as pessoas começaram a se concentrar em cidades. Historicamente, a proximidade dos rios era atraente para os seres humanos, devido à variedade de benefícios que eles oferecem, como água para consumo, limpeza, descarte de resíduos, transporte e o relevo, normalmente plano, nas regiões adjacentes. Esses eventos ocorrem quando o volume de água de rios, córregos ou sistemas de drenagem ultrapassa a capacidade de escoamento, resultando em transbordamento e alagamento de áreas habitadas independentemente do tipo de uso. É importante, também, diferenciar as inundações das enchentes e alagamentos. As enchentes são o transbordamento da água de um corpo hídrico para sua calha maior ou área de várzea e os alagamentos são decorrentes de eventos pluviais relacionados à falha da drenagem urbana em escoar/infiltrar a chuva, gerando regiões com acúmulo de água (TUCCI & BERTONI, 2003). Alagamentos também podem decorrer do excesso de precipitação em comparação com a capacidade de infiltração do solo, gerando um mecanismo de geração de escoamento denominado escoamento hortoniano.

A vulnerabilidade de uma população a torna mais exposta aos riscos de desastres, como inundações e alagamentos, especialmente devido à ausência de um planejamento adequado nos loteamentos e no desenvolvimento urbano, um desafio comum nas cidades da América do Sul (SIQUEIRA et al., 2020). Essa falta de organização eleva a suscetibilidade da população aos riscos associados às inundações (SIQUEIRA et al., 2020). No Brasil, o relatório “A P&DC e os 30 anos de desastres no Brasil” traz que no período de 1991 a 2020 o Brasil registrou 5462 ocorrências de inundações, das quais a maioria (35%) ocorreu na região Sudeste. Os danos

materiais registrados foram na casa de R\$ 20,1 bilhões, além disso, foram registradas 3.776.171 pessoas afetadas diretamente, sendo 604 óbitos, 3.454.410 desabrigados e desalojados e 320.508 feridos e enfermos. No setor privado o dano estimado foi de R\$ 15,4 bilhões, sendo os setores mais afetados a agricultura (R\$ 9,6 bilhões) e a pecuária (R\$ 2,2 bilhões), já no setor público o prejuízo registrado de R\$ 5,5 bilhões é dividido entre as áreas de transportes (R\$ 2,3 bilhões), ensino (R\$ 736,5 milhões) e esgoto (R\$ 732,2 milhões) (BRASIL, 2022).

Em relação à cidade de São Carlos, antes conhecida como vila, possuía um perfil predominantemente rural no século XIX. Na década de 1930, a cidade passou por um processo de urbanização acelerado, motivado pela crise do café e pelo êxodo rural. O crescimento descontrolado da área urbana alterou profundamente o uso e cobertura da cidade, o que, em conjunto com as mudanças climáticas, podem ser fatores fundamentais para compreender os impactos atuais e possíveis impactos futuros das inundações em São Carlos (TRUZZI, 2007). Hoje em dia, São Carlos, situada no estado de São Paulo, é vista como um importante centro tecnológico no Brasil, abrigando duas das universidades mais proeminentes do país: a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e um dos campus da Universidade de São Paulo (USP). Embora tenha uma força de trabalho altamente qualificada e uma considerável produção de pesquisas na área ambiental, a cidade enfrenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito a inundações (DOZENA, 2008; PIRES, 2021).

Nos últimos anos, eventos climáticos extremos em São Carlos, como chuvas intensas e inundações, têm causado diversos danos, tanto materiais quanto imateriais, aos moradores da região. Isso resultou em prejuízos a residências, comércios, infraestruturas públicas e até em acidentes fatais (LIMA; AMORIM, 2014). As inundações mais frequentes afetaram mais de 300 estabelecimentos comerciais da região, com perdas estimadas em até R\$ 550.000,00 por inundaçāo, em 2003, e atingiram uma área potencial inundável de 5 hectares aproximadamente (FINEP / FIPAI / EESC-USP / DAEE-SP, 2003). Em 2020, por exemplo, houve uma precipitação de 138 mm em aproximadamente uma hora, resultando no arrasto de 26 veículos e 150 pessoas precisaram ser resgatadas (CNN BRASIL, 2020). Posteriormente, no final de 2022, a cidade enfrentou uma chuva de 241,2 mm em 24 horas, que culminou na morte de uma mulher que fora arrastada pelo escoamento torrencial nas ruas (CASTRO, 2022; RODRIGUES, 2022).

Em vista do cenário atual já problemático da cidade, as mudanças climáticas representam uma provável piora dos eventos de chuvas intensas e inundações, já que elas têm aumentado a frequência e intensidade de eventos extremos de chuvas e cheias em várias regiões do planeta, especialmente em função do aumento dos gases de efeito estufa, como CO<sub>2</sub> e metano

(SCHARDONG, SRIVASTAV & SIMONOVIC, 2014). Esse impacto é evidente em áreas tropicais e de alta latitude, onde os padrões de precipitação sofrem variações significativas: regiões próximas aos polos, por exemplo, podem enfrentar aumentos substanciais nas chuvas, enquanto áreas tropicais podem experienciar reduções. Na América do Sul, a Bacia do Prata pode ter aumento de precipitação, enquanto o Nordeste brasileiro e a Amazônia podem sofrer reduções de até 30% (IPCC, 2013). Por exemplo, como foi observado no estado do Rio Grande do Sul no ano de 2024, o aumento da intensidade das chuvas, junto com a redução do tempo de retorno dos eventos extremos, torna inundações severas mais frequentes, elevando o risco de danos às populações locais (PAIVA *et al.*, 2024).

Para adaptar-se a esses impactos, é essencial implementar medidas como o uso de séries históricas longas para capturar tendências, inclusão de eventos recentes nas análises e projetar infraestruturas mais robustas e flexíveis, capazes de suportar cheias históricas e se adaptar a novas projeções climáticas. Também é necessário atualizar continuamente os critérios de planejamento conforme novas projeções de mudanças climáticas se tornam disponíveis, garantindo que tanto a infraestrutura quanto o planejamento urbano sejam resilientes e preparados para os riscos futuros (PAIVA *et al.*, 2024).

Diante disso, torna-se evidente a necessidade de uma abordagem metodológica que possibilite a avaliação das chuvas, visando antecipar os possíveis impactos desses fenômenos, especialmente em relação ao volume, profundidade da água, direção e áreas afetadas, em tempo real. Ademais, é relevante considerar a análise dos riscos de inundações em regiões com dados de observação limitados, uma realidade que se estende por grande parte do Brasil, em grande medida devido à falta de investimentos em monitoramento, previsões e ações de mitigação de inundações (MOTA *et al.*, 2016).

## 2     OBJETIVOS

Calibrar e aplicar o modelo HydroPol2D para simular eventos extremos na bacia urbana de São Carlos, com o objetivo de gerar mapas de inundação que identifiquem os níveis d'água, principais áreas afetadas e analisar o impacto das mudanças climáticas sobre esses eventos.

### 2.1    OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calibrar o modelo HydroPol2D utilizando dados observados de chuva e vazão;
- Aplicar curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência) atuais para simular eventos extremos e gerar mapas de nível d'água e áreas inundadas para o cenário presente;
- Validar os mapas de mancha de inundação gerados pelo modelo com dados históricos de eventos de inundação ocorridos na área de estudo;
- Utilizar curvas IDF projetadas para cenários futuros, a fim de simular eventos extremos sob condições de mudanças climáticas e avaliar possíveis alterações nos níveis d'água e nas áreas inundadas;
- Comparar os resultados das simulações atuais e futuras para identificar como as mudanças climáticas podem afetar os padrões de inundação na bacia urbana de São Carlos.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Como contexto para este trabalho, é importante lembrar que a modificação das condições naturais do meio, neste caso, a remoção da vegetação para urbanização, tem como consequência a redução da capacidade de infiltração do solo e recarga dos reservatórios de água subterrânea e aumento do escoamento superficial. Além disso, áreas construídas costumam ter mais superfícies impermeáveis e menor rugosidade hidráulica, o que acelera o processo de escoamento superficial (DE LIMA, 2010). Portanto, é fundamental revisitar conceitos básicos de hidrologia, como precipitação, infiltração, interceptação, evaporação e evapotranspiração, além da hidráulica de condutos livres e eventos críticos para se entender como ocorrem os processos de inundações e suas consequências.

#### 3.1 HIDROLOGIA URBANA

A Hidrologia Urbana é uma disciplina que surgiu da aplicação dos conceitos clássicos de Hidráulica e Hidrologia ao ambiente urbano. Ela se concentra no estudo das zonas metropolitanas, analisando o impacto do desenvolvimento das cidades no ciclo da água e as transformações que ocorrem, como a relação entre chuva e escoamento e o comportamento hidráulico dos sistemas de drenagem urbana. A Hidrologia Urbana visa entender e minimizar os efeitos negativos desses desenvolvimentos sobre o ciclo da água, buscando soluções para gerenciar o escoamento e melhorar a sustentabilidade hídrica nas áreas urbanas (DE LIMA, 2010; VALENTÍN, 2007).

##### 3.1.1 Chuvas

As chuvas são, na hidrologia, um tipo de precipitação que ocorre na forma líquida, sendo a mais frequente forma de precipitação no Brasil. As chuvas têm como características principais o seu total, duração e distribuição temporal e espacial, sendo sua ocorrência um processo aleatório cujo tratamento de dados é feito por meio de estatística. O conhecimento estatístico das precipitações apresenta interesse de ordem técnica por sua frequente aplicação nos projetos associados ao aproveitamento de recursos hídricos. Os estudos estatísticos permitem verificar com que frequência as precipitações ocorreram com uma dada magnitude, estimando as probabilidades teóricas de ocorrência das mesmas (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013; TUCCI, 2007).

As chuvas são caracterizadas por quatro variáveis principais: altura pluviométrica, intensidade, duração e a frequência de excedência. A altura pluviométrica refere-se à espessura da lâmina de água que cobriria uma área se não houvesse infiltração, evaporação e escoamento, sendo medida em milímetros (1 mm de chuva equivale a 1 litro de água por metro quadrado). A duração é o período durante o qual a chuva ocorre, mensurada em minutos ou horas e a intensidade da chuva é obtida pela razão entre a altura precipitada e o tempo de duração da chuva, expressa em  $\text{mm.h}^{-1}$ , indicando a taxa de precipitação ao longo do tempo (TUCCI, 2007).

Por último, a frequência de excedência, ou tempo de retorno (TR), refere-se à probabilidade de um evento de chuva ser igualado ou superado em determinado período, normalmente expresso em anos. Chuvas muito intensas têm baixa frequência, isto é, ocorrem raramente enquanto chuvas pouco intensas são mais comuns. O tempo de retorno também pode ser definido como o inverso da probabilidade de excedência de um determinado evento em um ano qualquer, segundo a Equação 3.1 (TUCCI, 2007):

$$TR = \frac{1}{p} , \quad (3.1)$$

onde  $TR$  é o tempo de retorno (anos) e  $p$  é a probabilidade de o evento ser igualado ou superado em um ano qualquer (adimensional).

A chuva é medida por meio de instrumentos chamados pluviômetros, que consistem em recipientes padronizados para coletar a água precipitada. Existem dois tipos principais de pluviômetros: os manuais e os automáticos. Nos pluviômetros manuais, a água armazenada no equipamento é medida (em mm) por um observador com a ajuda de uma régua ou cilindro graduado, essas medições ocorrem, normalmente, uma vez ao dia, e o observador registra os dados manualmente. Já os pluviômetros automáticos, também conhecidos como pluviógrafos, coletam e registram os dados de forma contínua. A principal vantagem dos pluviógrafos, é a possibilidade de medição da chuva em intervalos de tempo menores que um dia, permitindo analisar com maior precisão a variação das chuvas ao longo do dia (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013). Além disso, os pluviógrafos eletrônicos podem ser conectados a sistemas de transmissão de dados e utilizados para gerar previsões de nível em bacias, facilitando o desenvolvimento de sistemas de alerta (ANDRADE, 2006).

No Brasil, a principal fonte de dados sobre chuvas é a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), coordenada pela Agência Nacional de Águas (ANA), conforme estipulado pela Lei nº 9.984/2000. A RHN é formada em colaboração com diversos órgãos e entidades,

tanto públicas quanto privadas, que contribuem para a coleta de dados e também são usuárias dessas informações. As estações de monitoramento da RHN estão registradas no banco de dados Hidro, que faz parte do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), e atualmente conta com mais de 23 mil estações pluviométricas e fluviométricas cadastradas (ANA, 2023). Esses dados estão disponíveis ao público por meio do Portal HidroWeb, uma ferramenta do SNIRH que oferece acesso a informações sobre níveis fluviais, vazões, precipitação e climatologia.

Entre as estações cadastradas, a ANA é responsável pelo monitoramento de cerca de 4.700 pontos distribuídos pelo país. Esses pontos incluem mais de 1.900 estações que monitoram parâmetros relacionados aos rios, como níveis, vazões, qualidade da água e transporte de sedimentos, e mais de 2.800 estações dedicadas principalmente ao monitoramento de chuvas. Outras fontes nacionais de dados pluviométricos incluem o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e o Serviço Geológico do Brasil (SGB) (ANA, 2023).

As chuvas não se distribuem uniformemente no tempo e no espaço, ou seja, a precipitação pode variar em duração e quantidade tanto entre diferentes regiões dentro de uma mesma área afetada quanto ao longo do tempo durante uma tempestade. Para entender a variabilidade de uma tempestade real, é essencial coletar dados sobre a intensidade da precipitação, a duração do evento e o acúmulo total de chuva em intervalos curtos e regulares de tempo, o que permite captar as mudanças temporais. Além disso, é necessário o uso de pluviômetros distribuídos em diversos pontos da área afetada para analisar a variação espacial (TUCCI, 2007; COLLISCHONN & DORNELLES, 2013). Entretanto, a disponibilidade de registros históricos de precipitação com distribuição detalhada no tempo e no espaço é limitada. Diante da ausência de dados pluviométricos específicos de eventos ou tempestades observados diretamente na área de estudo, pode-se recorrer a distribuições temporais padronizadas, baseadas em um grande número de tempestades previamente observadas em regiões próximas ou com características semelhantes (CANHOLI, 2015).

### 3.1.1.1 Chuva de projeto

Chuvas de projeto são eventos chuvosos idealizados, utilizados no planejamento e dimensionamento de obras de infraestrutura, como sistemas de drenagem urbana e canais. Esses eventos são criados para representar cenários de chuvas intensas que podem ocorrer em uma determinada região, sendo utilizados principalmente para estimar vazões máximas em rios,

córregos ou sistemas de drenagem. As principais características das chuvas de projeto são a duração, a intensidade média e a distribuição temporal da precipitação. A duração, normalmente, terá duração igual ou muito semelhante ao tempo de concentração da bacia. Já a intensidade média pode ser obtida a partir de uma curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência), considerando um Tempo de Retorno, coerente com as características do projeto. Por último, uma vez definida a intensidade e a duração de uma chuva de projeto, é definida a distribuição temporal da chuva (CANHOLI, 2015).

As precipitações máximas são representadas localmente pelas curvas de intensidade, duração e frequência (IDF), que relacionam a duração, intensidade e a probabilidade de uma precipitação ser igualada ou superada. Observa-se que, ao correlacionar as intensidades e durações das chuvas, quanto maior for a intensidade de uma precipitação, menor será sua duração. Da mesma forma, quanto menor o risco de ocorrência, maior será a intensidade. Para determinar uma curva IDF em locais com dados disponíveis, a relação entre essas três variáveis é deduzida a partir de observações de chuvas intensas registradas ao longo de um período suficientemente extenso e representativo dos eventos extremos da região. Essa curva pode ser expressa por equações genéricas que seguem o padrão descrito na Equação 3.2 (TUCCI, 2007; COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

$$i = \frac{a \times TR^b}{(t + c)^d}, \quad (3.2)$$

onde,

$i$  = intensidade ( $\text{mm.h}^{-1}$ );

$TR$  = tempo de retorno (anos);

$t$  = duração da chuva (minutos);

$a, b, c, d$  = parâmetros determinados de acordo com o local.

Após obter a intensidade da chuva de projeto por meio de uma IDF, podem ser utilizados métodos de desagregação de chuvas para se obter sua distribuição temporal. Alguns dos principais métodos de composição de chuva de projeto são:

- a) Método de Chicago (KEIFER & CHU, 1957): utiliza as relações IDF para definir a intensidade de chuva de um evento em diferentes durações por meio das Equações 3.3 e 3.4 (CANHOLI, 2015).

$$i = \frac{A \left[ (1-B) \times \left( \frac{t_b}{r} \right)^B + C \right]}{\left[ \left( \frac{t_b}{r} \right)^B + C \right]^2} \quad \text{e} \quad i = \frac{A \left[ (1-B) \times \left( \frac{t_a}{r} \right)^B + C \right]}{\left[ \left( \frac{t_a}{r} \right)^B + C \right]^2}, \quad (3.3)$$

onde as variáveis são as mesmas da IDF, exceto por  
 $t_d$  = duração da chuva de intensidade média (min).

$$r = \frac{t_p}{t_d}, \quad (3.4)$$

onde:

$r$  = coeficiente de avanço da tormenta;

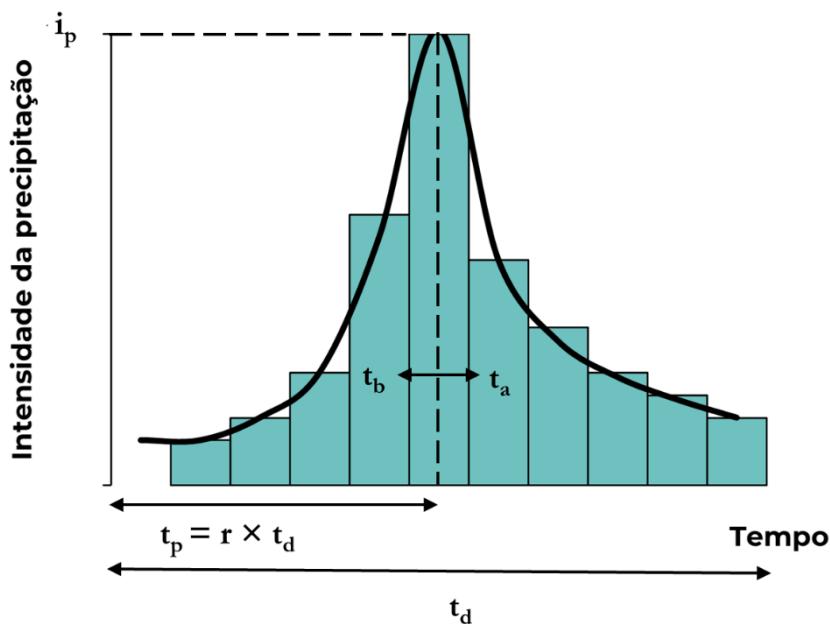
$t_p$  = instante do pico;

$t_b = t_p - t$

$t_a = t - t_p$

Nesse método assume-se que o volume de chuva será distribuído ao longo do tempo de acordo com um fator de pico ( $\gamma$ ), o pico é onde é concentrada a maior parte da precipitação enquanto o restante é distribuído antes e depois desse pico, de forma simétrica ou assimétrica (GOMES JR, 2023a). Os elementos básicos do hietograma gerado pelo Método de Chicago pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Elementos básicos do hietograma do método de Chicago

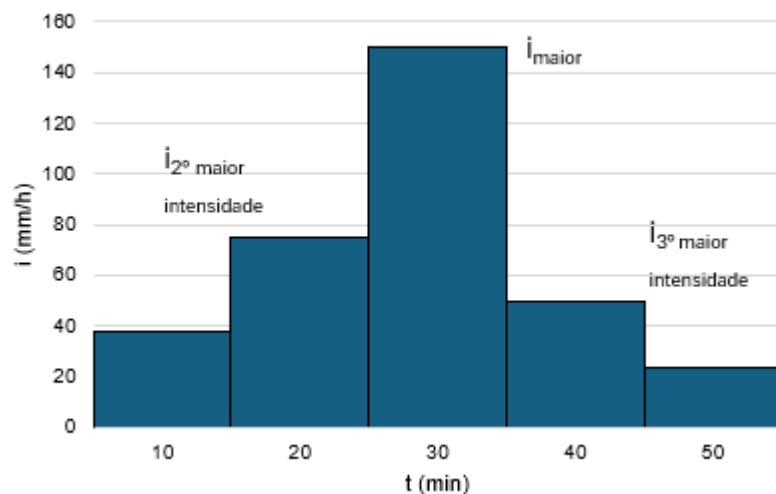


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O método Chicago permite ajustar a posição do pico da chuva ao longo do evento, geralmente posicionando-o no meio ou próximo do início do hietograma. Isso é útil em projetos nos quais o objetivo é simular condições de chuvas intensas, facilitando a estimativa de vazões máximas e ajudando a prever o comportamento da bacia durante tempestades extremas (BEMFICA, 1999).

- b) Método dos Blocos Alternados: é um método desenvolvido a partir da aproximação do método de Chicago (KEIFER & CHU, 1957), logo, também é construído com base nas curvas IDF. Nesse método assume-se que o fator de pico ( $\gamma$ ) é 0,5, logo, a maior intensidade da chuva é centralizada (GOMES JR, 2023a). É uma abordagem mais flexível pois permite que a disposição dos blocos no hietograma seja feita de forma arbitrária, desde que se siga as regras base. Por exemplo, o bloco de maior intensidade deve ser colocado no meio, entre 1/3 e 1/2 da duração da chuva, os blocos restantes são distribuídos alternadamente ao redor do bloco central (CANHOLI, 2015). Na Figura 2 é demonstrado um gráfico de valores aleatórios que segue a distribuição de blocos alternados.

Figura 2 - Demonstração da distribuição de Blocos Alternados



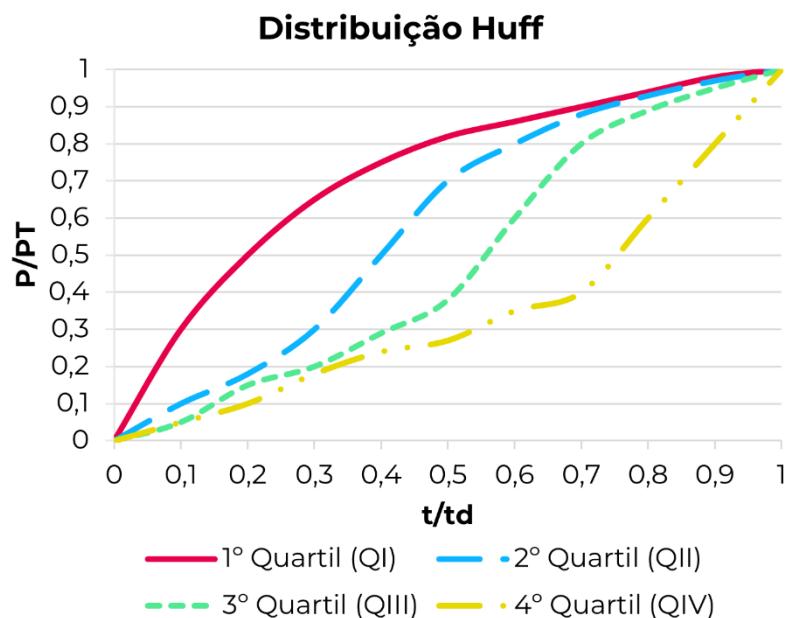
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Segundo Bemfica (1999) o método de Blocos Alternados gera vazões máximas significativamente maiores do que as precipitações históricas, isso porque a metodologia não tem como objetivo gerar padrões reais de chuva e sim gerar situações críticas de vazão escoada.

- c) Método de Huff (HUFF, 1967): L. A. Huff, por meio da análise de 11 anos de registros históricos de chuva de uma região de, aproximadamente, 1000 km<sup>2</sup> com uma rede de 49

pluviômetros dividiu as chuvas intensas com durações superiores a três horas entre 4 grupos, de acordo com a localização do pico de intensidade da chuva no evento. Esses grupos chamados de “quartis”, consideram  $\frac{1}{4}$  de duração da chuva e por meio deles foram desenvolvidos padrões de distribuição temporal médios. O método distribui a precipitação ao longo do tempo com base na análise probabilística, identificando em que parte do evento a maior parte da chuva ocorreu (primeiro quartil, segundo etc.) (HUFF, 1967; CANHOLI, 2015). Não há uma posição fixa para o pico de precipitação, como nos métodos anteriores. É útil para analisar a variabilidade temporal de eventos de chuva em uma região específica e pode gerar resultados realistas caso seja adaptado para a região de interesse (por meio de dados históricos de tempestades). É amplamente utilizado quando há necessidade de uma abordagem probabilística para chuvas extremas, principalmente em áreas com dados históricos (BEMFICA, 1999). Na Figura 3 pode ser vista a distribuição das precipitações pelo método de Huff. Nessa figura tem-se  $P/P_T$  como a fração acumulada da precipitação total, sendo  $P$  a proporção da precipitação acumulada em relação a  $P_T$  (chuva total). Já a relação  $t/t_d$  é fração do tempo em relação à duração total do evento de precipitação, na qual  $t$  representa o tempo acumulado como uma proporção do tempo total ( $t_d$ ) da chuva.

Figura 3 - Distribuição das precipitações pelo método de Huff por quartil



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 3.1.2 Interceptação e Abstração Inicial

A interceptação faz parte do balanço hídrico e ocorre quando a água da chuva é retida antes de atingir o solo, sendo armazenada em folhas, caules, ramos, material em decomposição (serrapilheira) e depressões impermeáveis. Esse processo aumenta a evaporação e reduz o escoamento em uma bacia hidrográfica. Para medir a interceptação, utiliza-se pluviômetros colocados tanto sob a vegetação quanto acima ou ao lado dela. A precipitação medida em áreas abertas é chamada de precipitação total, enquanto a que chega ao solo sob a vegetação é a precipitação interna. A água inicialmente retida pelas copas que chega ao solo escorrendo pelos troncos é denominada escoamento pelo caule (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

A interceptação corresponde à quantidade de água que não atinge o solo nem como precipitação interna, nem como escoamento pelo caule. Como tanto a precipitação interna quanto o escoamento pelo caule variam espacialmente devido à cobertura irregular das copas, é necessário utilizar diversos pluviômetros e calcular a média dos resultados. A interceptação total pode ser calculada pela Equação 3.5 (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

$$I = P - P_d - P_t , \quad (3.5)$$

onde,

$I$  = lâmina interceptada (mm);

$P$  = chuva total (mm);

$P_d$  = precipitação interna média (mm);

$P_t$  = média do escoamento pelos troncos (mm).

A abstração inicial da precipitação corresponde à parte da chuva total que ocorre antes do início do escoamento superficial, ou seja, é a quantidade de chuva que cai desde o começo do evento até o momento em que o escoamento começa na área de controle. Esse volume de água pode ser absorvido pelo solo ou retido pela vegetação e por obstáculos presentes no terreno, isto é, a interceptação faz parte do processo de abstração inicial (MELLO *et al.*, 2003).

### 3.1.3 Infiltração

A infiltração é o processo no qual a água penetra na superfície do solo, atingindo, ou não, camadas mais profundas. Esse processo é essencial na modelagem de regiões urbanas pois

influência na quantidade de escoamento superficial produzida pela bacia. Ou seja, a água que infiltra no solo não escorre pela superfície, contribuindo para a redução de cheias. Quando a água atinge o solo ela é redistribuída através dos poros do solo, impulsionada por forças como a gravidade, diferenças de pressão de água e as forças que atuam na retenção de água no solo (conhecidas como força mátrica ou potencial mátrico) (LIBARDI, 2005).

Logo, características como a textura do solo e sua umidade influenciam no processo de infiltração da água. A textura do solo refere-se à proporção de diferentes tamanhos de partículas minerais que compõem o solo, especificamente areia (maior partícula), silte e argila (menor partícula). Isto é, o diâmetro das partículas influencia no tamanho e quantidade de poros disponíveis no solo, influenciando na capacidade de infiltração da água. Já a umidade do solo é uma variável importante quando se trata de infiltração, porque a chuva, ao atingir o solo, preenche os poros vazios (preenchidos por ar), à medida que esses poros se enchem, a taxa de infiltração diminui, sendo controlada pela capacidade do solo de mover a água para camadas mais profundas. Por isso os solos mais secos têm um potencial mátrico mais elevado enquanto para os solos saturados, com todos os poros preenchidos por água, o potencial mátrico se torna insignificante (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

Por exemplo, quando um solo é compactado sua porosidade total se reduz, diminuindo a taxa de infiltração de água, condutividade hidráulica do solo saturado e consequentemente aumentando o escoamento superficial e reduzindo o crescimento das plantas (REICHERT, SUZUKI, REINERT, 2007). Esse processo de movimentação da água no solo pode ser descrito pela Equação de Richards (3.6), essa equação representa o movimento da água no solo ao combinar o fluxo por gravidade e capilaridade, modelando tanto solos saturados quanto não saturados e ajudando a prever como a água se move e se redistribui no perfil do solo (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \times \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right], \quad (3.6)$$

onde  $\theta$  é o conteúdo de água no solo (adimensional);  $K(\theta)$  é a condutividade hidráulica em solo não saturado ( $\text{m.s}^{-1}$ );  $\psi$  é o potencial mátrico (m);  $z$  é o potencial gravitacional (ou a distância vertical) (m).

Entretanto, essa equação é fortemente não-linear e precisa ser resolvida com métodos numéricos (aproximados) em vez de soluções analíticas. Por isso, ao longo do tempo, foram sugeridos modelos simplificados, que representam razoavelmente bem o processo de infiltração

de água no solo, e que podem servir para calcular, para uma dada chuva, a quantidade de água que infiltra e a quantidade de água que escoa superficialmente. Alguns dos métodos simplificados que podem ser utilizados quando se trata de capacidade de infiltração são o modelo de Horton, modelo de Green e Ampt, Método Curve-Number e Índice phi.

### 3.1.3.1 Modelo de capacidade de infiltração de Horton

A equação de Horton (3.7) é uma equação empírica que descreve o processo de infiltração como uma taxa que diminui ao longo do tempo durante um evento de chuva até atingir um valor constante, quando o solo se satura completamente (HORTON, 1939).

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \times e^{-\beta \times t}, \quad (3.7)$$

onde  $f$  é a capacidade de infiltração num instante qualquer ( $\text{mm.h}^{-1}$ );  $f_c$  é a capacidade de infiltração em condição de saturação ( $\text{mm.h}^{-1}$ );  $f_0$  é a capacidade de infiltração quando o solo está seco ( $\text{mm.h}^{-1}$ );  $t$  é o tempo (horas); e  $\beta$  é um parâmetro que deve ser determinado a partir de medições no campo ( $\text{hora}^{-1}$ ).

### 3.1.3.2 Modelo de capacidade de infiltração de Green e Ampt

O modelo de infiltração de Green-Ampt é uma outra abordagem matemática para descrever o processo de infiltração da água no solo. Essa equação está baseada numa visão simplificada do processo de infiltração de água no solo na qual descreve o processo de avanço de uma frente de molhamento ao longo do tempo em que a água se move rapidamente a partir de uma camada superior do solo seco (ou parcialmente úmido) para uma camada inferior saturada e a taxa de infiltração diminui com o tempo à medida que o solo se enche de água (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013). Analisando essa hipótese em conjunto com a aproximação por diferenças finitas da lei de Darcy tem-se a seguinte Equação (3.8) (MAYS, 2010; CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

$$F(t) - \psi \times \Delta\theta \ln \left( 1 + \frac{F(t)}{\psi \times \Delta\theta} \right) = K \times t, \quad (3.8)$$

onde  $\psi$  é o potencial mátrico (mm);  $t$  é o tempo (horas);  $K$  é a condutividade hidráulica (mm.h<sup>-1</sup>);  $F(t)$  é a lâmina total infiltrada desde o início do processo (mm);  $\Delta\theta$  é o déficit inicial de umidade do solo em relação à saturação (adimensional). Idealmente os valores  $\psi$  e  $K$  devem ser obtidos a partir de ensaios de infiltração no local em que se deseja aplicar o método, entretanto, como isso nem sempre é possível, podem ser selecionados valores tabelados.

### 3.1.3.3 Método Curve Number

O método *Curve Number* (CN) é uma técnica desenvolvida pelo *National Resources Conservation Center* (NRCS) dos EUA (antigo *Soil Conservation Service* - SCS) utilizada para estimar a chuva efetiva, escoamento superficial gerado após um evento de precipitação e capacidade de infiltração de uma área, levando em consideração as características do solo, o uso da terra e as condições da cobertura do solo. Esse método, conhecido como SCS-CN, devido ao nome da instituição e ao parâmetro que utiliza (CN), é baseado na equação de balanço hídrico aplicada na superfície do solo (Equação 3.9) e em duas hipóteses adicionais relacionadas à capacidade de armazenamento de água no solo (Equações 3.10 e 3.11), dando origem a Equação principal (3.12), utilizada para calcular o escoamento superficial  $Q$  (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

$$P = I_a + F + Q , \quad (3.9)$$

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} , \quad (3.10)$$

$$I_a = 0,2 \times S , \quad (3.11)$$

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} , \quad (3.12)$$

onde  $Q$  é o escoamento superficial (mm);  $P$  é a precipitação total do evento (mm);  $I_a$  são as perdas iniciais, como acúmulo de água na superfície, interceptação e infiltração no solo antes do início da geração de escoamento superficial (mm);  $S$  é a capacidade máxima de infiltração ou armazenamento potencial do solo (mm).

A variável  $S$  tem origem empírica e seus valores foram selecionados após a análise de diversas bacias rurais nos Estados Unidos (HAWKINS *et al.*, 2009), então, essa variável foi relacionada ao parâmetro CN (Equação 3.13). O parâmetro CN é adimensional e seu valor varia

entre 0 e 100, sendo 0 um solo de capacidade de infiltração infinita e 100 um solo completamente impermeável.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3.13)$$

Para a estimativa do valor do parâmetro *CN* deve ser levado em consideração o tipo do solo, o uso e ocupação desse solo e sua condição de umidade antecedente (AMC). O método divide os solos em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D), com base na sua capacidade de infiltração: A - Alta infiltração (areias, solos com muita drenagem); B - Infiltração moderada (solos com permeabilidade média); C - Baixa infiltração (solos com mais argila, drenagem restrita); D - Infiltração muito baixa (solos pesados, com muita argila ou áreas saturadas) (HAWKINS *et al.*, 2009).

Já para uso e cobertura do solo é analisado o uso (agricultura, urbano, floresta, etc.) e a vegetação/cobertura superficial, por exemplo, terrenos urbanos pavimentados têm menor infiltração e maior escoamento, enquanto áreas florestadas retêm mais água. Os valores de CN para diferentes usos do solo podem ser encontrados em literatura como Tucci (2007). Deve-se também ser considerada a Condição de umidade antecedente (AMC) na escolha do CN, nesse caso as condições são classificadas em: AMC I - Solo seco, alta capacidade de infiltração; AMC II - Condição média, moderada infiltração; AMC III - Solo úmido, baixa capacidade de infiltração (HAWKINS *et al.*, 2009).

### 3.1.3.4 Índice phi

O índice  $\varphi$  (phi) na hidrologia é um valor utilizado para estimar a quantidade de chuva que se infiltra no solo ou é retida pela superfície durante uma tempestade. Ele representa uma taxa de infiltração constante e é utilizado para determinar a quantidade de precipitação que contribui diretamente para o escoamento superficial. Ele é representado, pela Equação 3.14 (PAIVA; PAIVA, 2001).

$$P_{ef} = P_t - \varphi \times t, \quad (3.14)$$

onde  $P_{ef}$  é a chuva efetiva (mm);  $P_t$  é a precipitação total (mm);  $\varphi$  é o índice  $\varphi$  (taxa de infiltração constante);  $t$  é a duração da chuva. Isto é, o índice  $\varphi$  representa uma infiltração

constante durante a ocorrência do evento de chuva, este valor é subtraído de cada precipitação total, de maneira a se obter a precipitação efetiva.

Essa metodologia ajuda a simplificar a análise de eventos de chuva, principalmente quando se trabalha com tempestades de longa duração. Geralmente, o índice  $\phi$  é calculado com base em dados históricos de chuva e escoamento, ele pode ser estimado a partir de medições de infiltração de campo ou de tabelas empíricas que fornecem valores baseados no tipo de solo, cobertura vegetal e condições de umidade. Como, na realidade, a capacidade de infiltração decresce exponencialmente com o tempo, os índices de infiltração subestimam seu valor inicial e superestimam seu valor final (MAIA & VERSIANI, 2001; DURANT, 2018).

### 3.1.4 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um termo que une os processos de evaporação e transpiração, é por meio dela que a água precipitada retorna para a atmosfera, em formato de vapor, dando continuidade ao ciclo hidrológico. O processo de transpiração é realizado pelas plantas, que retiram a água do solo e a transportam até as folhas, por onde a água é transferida para a atmosfera, já a evaporação é o processo de conversão da água líquida para a forma de vapor (por meio de corpos hídricos, por exemplo, como rios e lagos). Como a evapotranspiração envolve um processo de transformação do estado físico da água ela depende de energia, nesse caso, a energia solar. Por esse motivo, a taxa de evapotranspiração da água depende de fatores atmosféricos (como radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento) e, também, do tipo de vegetação e umidade disponível no solo (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013; CALIJURI & CUNHA, 2013).

A transpiração é um processo essencial dentro do ciclo hidrológico que depende da vegetação e da umidade do solo. Solos úmidos permitem que as plantas transpirem mais livremente, controladas principalmente pelas condições atmosféricas. No entanto, à medida que o solo seca, a transpiração diminui (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013). A evapotranspiração potencial (ou de referência, ETP ou ETo) refere-se à taxa máxima de evapotranspiração quando há água disponível no solo, enquanto a evapotranspiração real (ETR) ocorre nas condições reais de umidade, sendo sempre igual ou menor que a potencial (BLAIN & PIRES, 2011). A evapotranspiração real pode ser medida por lisímetros ou estimada a partir de métodos de balanço hídrico na bacia em questão, por meio da análise de outras variáveis que compõe o balanço, como precipitação e escoamento. Ao se fazer essa análise especialmente em bacias hidrográficas ao longo de períodos prolongados, pode-se simplificar a equação do

balanço hídrico, uma vez que a variação no armazenamento de água pode ser ignorada, dando origem a Equação 3.15 (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

$$E = P - Q, \quad (3.15)$$

onde  $E$  é a evapotranspiração real média de longo prazo ( $\text{mm.ano}^{-1}$ );  $P$  é a precipitação média de longo prazo ( $\text{mm.ano}^{-1}$ ); e  $Q$  é a vazão média de longo prazo na saída da bacia ( $\text{mm.ano}^{-1}$ ). Logo, podem ser utilizadas equações para o cálculo da evapotranspiração do tipo empírico ou de base física.

Vários modelos estão disponíveis para estimar o fluxo de evapotranspiração de referência (ETo) em escala mensal (THORNTHWAITE, 1948), diária (HARGREAVES; SAMANI, 1985) ou até em escala subdiária (ALLEN *et al.*, 1989). Um dos métodos mais utilizados para cálculo de evapotranspiração de referência, devido a sua base física, é a equação de Penman-Monteith (3.16). Este método, integra diversas variáveis meteorológicas, como temperatura, umidade, radiação solar e velocidade do vento, para calcular a evapotranspiração, utilizando como base os princípios da termodinâmica e fluxo de energia (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

$$E = \left( \frac{\Delta \times (R_l - G) + \rho_a \times c_p \times \frac{(e_s - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \times \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right) \times \frac{1}{\lambda \times \rho_w}, \quad (3.16)$$

onde  $E$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) é a taxa de evaporação da água;  $\lambda$  ( $\text{MJ.kg}^{-1}$ ) é o calor latente de vaporização;  $\Delta$  ( $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor com a temperatura do ar;  $R_l$  ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) é a radiação líquida que incide na superfície (equação x);  $G$  ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) é o fluxo de energia para o solo;  $\rho_a$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) é a massa específica do ar;  $\rho_w$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) é a massa específica da água;  $c_p$  ( $\text{MJ.kg}^{-1}.^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) é o calor específico do ar úmido ( $c_p = 1,013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ.kg}^{-1}.^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $e_s$  ( $\text{kPa}$ ) é a pressão de saturação do vapor;  $e_d$  ( $\text{kPa}$ ) é a pressão real de vapor de água no ar;  $\gamma$  ( $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) é a constante psicrométrica ( $\gamma = 0,666$ , aproximadamente);  $r_s$  ( $\text{s.m}^{-1}$ ) é a resistência superficial da vegetação; e  $r_a$  ( $\text{s.m}^{-1}$ ) é a resistência aerodinâmica. Os valores das variáveis presentes na equação principal podem ser obtidos pelas seguintes Equações (3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22):

$$\lambda = (2,501 - 0,002361 \times T) \quad (3.17)$$

$$\rho_a = 3,486 \times \frac{P_a}{275 + T} \quad (3.18)$$

$$\Delta = \frac{4098 \times e_s}{(237,3 + T)^2} \quad (3.19)$$

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \times T}{237,3 + T}\right) \quad (3.20)$$

$$e_d = e_s \times \frac{U_r}{100} \quad (3.21)$$

$$\gamma = 0,0016286 \times \frac{P_a}{\lambda} \quad (3.22)$$

Para essas equações,  $U_r$  (%) é a umidade relativa do ar;  $P_a$  (kPa) é a pressão atmosférica; e  $T$  (°C) é a temperatura do ar a 2 m da superfície.

A aplicação do método Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) depende da disponibilidade de dados meteorológicos locais, no entanto, quando esses dados não estão disponíveis, é necessário recorrer a métodos alternativos que possam ser ajustados às condições locais. Por exemplo, algumas simplificações podem ser aplicadas para estimar parâmetros de entrada a partir de áreas espacialmente referenciadas, altitudes e temperaturas, ajustando os parâmetros com coeficientes baseados na localização e no dia do ano (GOMES JR, 2023a).

### 3.2 HIDRÁULICA DE CONDUTOS LIVRES

A hidráulica de condutos livres possui como característica principal o escoamento por meio da gravidade, isto é, a pressão atmosférica é a força que atua sobre a superfície do líquido, seja ele de seção aberta (como é o caso de canais de drenagem) ou fechada (como nas galerias pluviais e nas redes de esgoto). Além da classificação do escoamento pelo critério de pressão (que define se o escoamento é livre ou forçado) também se pode avaliar o escoamento no tempo, classificando-o como permanente ou não-permanente (transitório), e no espaço, podendo ser uniforme ou variado (PORTO, 2006).

O escoamento é retratado de equações de preservação de continuidade (equação da continuidade) e da quantidade de movimento do escoamento, isto é, a preservação das forças envolvidas no escoamento. Essas equações são responsáveis por retratar o processo de escoamento na dimensão do tempo e nas três dimensões do espaço, utilizando as variáveis de

profundidade e velocidade nas três direções. A equação de continuidade define que, para um escoamento em regime permanente, a quantidade de fluxo que entra em um trecho deve ser a mesma quantidade que sai, assumindo que não há acumulação. Já a equação de quantidade de movimento afirma que a variação da quantidade de movimento de um sistema é igual à soma das forças externas atuando sobre ele (NETTO & FERNÁNDEZ, 2018). Nos próximos tópicos será feita uma melhor descrição dessas duas equações principais e sua aplicação nos regimes permanente e transitório.

### 3.2.1 Regime Permanente

No regime permanente, a forma geral da Equação de continuidade é (3.23) (CHOW, 1959).

$$Q = V \times A , \quad (3.23)$$

onde,  $Q$  é a vazão volumétrica ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ), que é o volume de água que passa por uma seção do canal por unidade de tempo;  $V$  é velocidade média do fluxo ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ ), que é a velocidade com que o fluido se move na seção;  $A$  é área da seção transversal molhada ( $\text{m}^2$ ), que é a área através da qual o fluido está escoando.

Isto é, para um canal com duas seções diferentes (seção 1 e seção 2), a equação de continuidade pode ser expressa como 3.24 ou 3.25 (CHOW, 1959):

$$Q_1 = Q_2 , \quad (3.24)$$

ou

$$V_1 \times A_1 = V_2 \times A_2 , \quad (3.25)$$

onde,

$Q_1$  e  $Q_2$  são as vazões nas seções 1 e 2, respectivamente.

$V_1$  e  $V_2$  são as velocidades médias nas seções 1 e 2, respectivamente.

$A_1$  e  $A_2$  são as áreas das seções transversais 1 e 2, respectivamente.

A equação da continuidade em regime permanente pode ter diversos usos reais, ela é comumente utilizada para dimensionamento de canais e condutos, cálculo de velocidade do fluxo, análise de constricções e expansões, projetos de estruturas hidráulicas, entre outros (PORTO, 2006).

Já para a equação de quantidade de movimento, no regime permanente, as variáveis de escoamento não mudam com o tempo, apenas as forças externas e a variação espacial da velocidade influenciam a quantidade de movimento. A forma simplificada da Equação de quantidade de movimento é dada por 3.26 (CHOW, 1959).

$$\sum F = \rho \times Q \times \frac{\partial V}{\partial x}, \quad (3.26)$$

onde,

$\sum F$  = soma das forças externas (como força da gravidade, pressão e atrito);

$\rho$  = densidade do fluido ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$Q$  = vazão volumétrica ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$V$  = velocidade média do fluxo ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\frac{\partial V}{\partial x}$  = variação da velocidade ao longo do comprimento do canal.

Por meio desses conceitos se torna possível encontrar uma forma prática de resolução de problemas de escoamento em condutos livres no regime permanente, por meio da Equação de Manning.

### 3.2.1.1 Equação de Manning

A Equação de Manning é uma fórmula derivada empiricamente, a partir de dados experimentais e observações de campo, desenvolvida por Robert Manning em 1889. Ela simplifica a aplicação dos princípios fundamentais de continuidade e quantidade de movimento ao evitar cálculos complexos de forças. Esta equação é uma proposta para o cálculo do coeficiente  $C$  da fórmula de Chézy, relacionando este coeficiente com o  $n$  de Manning e dando origem a Equação 3.27 (PORTO, 2006).

$$\frac{n \times Q}{\sqrt{I_0}} = A \times R_h^{2/3} , \quad (3.27)$$

onde,

$n$  = coeficiente de Manning (s.m<sup>1/3</sup>)

$Q$  = vazão volumétrica (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)

$A$  = área da seção transversal molhada (m<sup>2</sup>)

$R_h$  = raio hidráulico da seção transversal (m)

$I_0$  = declividade de fundo do canal (m.m<sup>-1</sup>)

Entretanto, a relação entre o  $C$  de Chézy e  $n$  da fórmula de Manning só é válida para escoamentos turbulentos rugosos, com grande número de Reynolds e como sua aplicação assume que o escoamento é uniforme ela é mais adequada para regime permanente. Além disso, a fórmula carrega o coeficiente  $n$  que não é adimensional e deve ser escolhido de acordo com o tipo de revestimento do canal ou curso d'água. Outras limitações dessa fórmula são sua inadequação para fluxos bidimensionais ou tridimensionais, uma vez que foi desenvolvida para escoamentos unidimensionais a falta de consideração dos efeitos de turbulência e perdas de energia, especialmente em fluxos turbulentos ou com mudanças rápidas de velocidade; e a suposição de que o fluxo é estável, o que limita sua aplicabilidade em situações de fluxo não estacionário, como durante eventos de cheia (TOOMBES & CHANSON, 2011; TUOZZOLO *et al*, 2019; PORTO, 2006).

### 3.2.2 Regime transitório

A equação da continuidade (ou de conservação de massa) também pode ser aplicada no regime não permanente, porém sua aplicação é um pouco mais complexa do que no regime permanente. No regime não permanente, as variáveis de escoamento, como vazão ( $Q$ ), velocidade ( $V$ ) e área ( $A$ ), variam com o tempo, além de poderem variar ao longo do espaço. A forma da equação de continuidade para um regime não permanente em um canal de seção variável é dada por 3.28 (PORTO, 2006):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(Q)}{\partial x} = 0 , \quad (3.28)$$

ou em termos de velocidade e área a Equação 3.29 (PORTO, 2006):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(V \times A)}{\partial x} = 0, \quad (3.29)$$

onde,

$\frac{\partial A}{\partial t}$  = variação da área da seção molhada ao longo do tempo, indicando o acúmulo ou decréscimo de água em um ponto específico do canal;

$\frac{\partial(Q)}{\partial x}$  ou  $\frac{\partial(V \times A)}{\partial x}$  = variação da vazão ao longo do comprimento do canal.

Essa forma da equação de continuidade é amplamente utilizada em modelagens hidrodinâmicas para estudar escoamentos transitórios, como enchentes, abertura e fechamento de comportas, ou qualquer situação em que as condições de escoamento mudam ao longo do tempo.

Para a equação dinâmica (ou de quantidade de movimento), em um escoamento em condutos livres, a forma simplificada é a Equação 3.30 (PORTO, 2006):

$$\sum F = \frac{\partial(\rho \times Q \times V)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \times Q \times V)}{\partial x}, \quad (3.30)$$

onde,

$\sum F$  = soma das forças atuando sobre o volume de controle (como a força da gravidade, forças de pressão e forças de resistência ou atrito);

$\rho$  = densidade do fluido ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$Q$  = vazão volumétrica ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$V$  = velocidade média do fluxo ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$\frac{\partial(\rho \times Q \times V)}{\partial t}$  = termo de variação temporal da quantidade de movimento;

$\frac{\partial(\rho \times Q \times V)}{\partial x}$  = termo da variação espacial da quantidade de movimento ao longo do comprimento do canal.

Logo, por meio de duas das leis básicas da Mecânica citadas anteriormente (equação da continuidade e equação dinâmica) foi possível o desenvolvimento das equações de Saint-Venant que descrevem, sob hipóteses fixadas, os escoamentos não permanentes em canais.

### 3.2.2.1 Equações de Saint-Venant

As equações de Saint-Venant foram estabelecidas pela primeira vez em 1870, elas constituem em um sistema de duas equações com derivadas parciais em x e t, desenvolvidas por meio da adoção das seguintes hipóteses simplificadoras (PORTO, 2006; TUCCI, 1998):

- Fluido incompressível;
- Escoamento unidimensional (sendo a direção predominante para representação de rios a longitudinal);
- Velocidade média representativa da variação espacial na seção;
- Distribuição hidrostática de pressão na vertical (despreza-se eventuais efeitos de componentes de aceleração vertical);
- Variação gradual das seções transversais e ausência de singularidades;
- Assume-se que a declividade da linha de energia pode ser calculada por uma equação estabelecida para o regime permanente e uniforme (como Manning ou Chézy).

As equações geradas são 3.31 (continuidade) e 3.32 (dinâmica) (PORTO, 2006; TUCCI, 1998):

$$A \times \frac{\partial V}{\partial x} + V \times \frac{\partial A}{\partial x} + B \times \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (3.31)$$

$$I_f = I_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \times \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \times \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.32)$$

Mesmo com as hipóteses simplificadoras, a solução analítica das equações completas de Saint-Venant só é possível em casos nos quais há uma grande quantidade de dados hidráulicos do canal. Por esse motivo foram desenvolvidas técnicas numéricas que possibilitam a simplificação da resolução dessas equações por meio da desconsideração de termos presentes na equação dinâmica (Equação 3.32). Os termos são divididos de acordo com o que representam no escoamento, sendo:

$I_f$  = termo de declividade energética ( atrito);

$I_0 - \frac{\partial y}{\partial x}$  = termos de declividade da linha d'água (gravidade e pressão);

$\frac{V}{g} \times \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \times \frac{\partial V}{\partial t}$  = termos de declividade devido à variação da velocidade (inércia).

Se forem desprezados os termos de inércia e de pressão a equação de momentum assume sua forma mais simplificada, com a declividade da linha de energia  $I_f$  podendo ser calculada pela fórmula de Manning. Esta equação mais simplificada em conjunto com a equação de continuidade é a base do modelo denominado Modelo Onda Cinemática. Agora, se apenas o termo de inércia for desprezado, o modelo será denominado como Modelo de Difusão ou Não Inercial, estes modelos são muito aplicados em casos que não há grande variação espacial e temporal da velocidade no processo de propagação. Por último, a equação de quantidade de movimento em sua forma completa em conjunto com a equação de continuidade dá origem ao Modelo Hidrodinâmico, o modelo mais preciso, porém de maior dificuldade de resolução (PORTO, 2006; TUCCI, 1998; SIMÕES, 2011).

Também existem os Modelos Hidrodinâmicos de Aproximação Inercial Local (*Local-Inertial Hydrodynamic Models*), nos quais é desprezado o termo de aceleração convectiva (um dos termos que compõe a inércia do modelo) (DE ALMEIDA; BATES, 2013). Gerando a Equação de dinâmica 3.33, simplificada da Equação 3.32.

$$I_f = I_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{1}{g} \times \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.33)$$

$\frac{V}{g} \times \frac{\partial V}{\partial x}$  = termo de aceleração convectiva desprezado na equação 3.33.

Essa simplificação está sendo utilizada, atualmente, em modelagem hidrodinâmica - por exemplo para os modelos LISFLOOD-FP, CAESAR e JULES (DE ALMEIDA; BATES, 2013) - especialmente em cenários nos quais o escoamento analisado é lento ou gradualmente variado, como áreas de inundação ou canais com declividade leve. Isso porque, a eliminação do termo de aceleração convectiva reduz a complexidade computacional, mas ainda mantém uma boa precisão, tornando essa aproximação interessante para simulações rápidas, como é o caso de simulações com dados em tempo real (BATES; HORIZONTAL; FEWTRELL, 2010; YAMAZAKI; DE ALMEIDA; BATES, 2013; GOMES JR *et al.*, 2024a).

### 3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

O ciclo hidrológico é composto por inúmeras variáveis e processos normalmente tridimensionais e dependentes do tempo, como precipitação, infiltração, evaporação e a

transformação de chuva em escoamento superficial, buscando melhor entender e replicar o comportamento desse sistema foram desenvolvidos os modelos hidrológicos (STEWART & FINCH, 1993; TUCCI, 1998). Os modelos hidrológicos são ferramentas de gestão importantes por permitir a simulação de condições reais ou a avaliação de cenários possíveis dentro de uma faixa de incertezas. Por meio desses modelos é possível prever impactos de inundações, prováveis áreas de risco em eventos críticos, simular estruturas de drenagem em bacias, entre outras aplicações, e então desenvolver um planejamento coerente (CANHOLI, 2015).

Os modelos hidrológicos podem ser divididos em três tipos em relação à distribuição espacial: modelos concentrados (também conhecidos como modelos conceituais), semi-distribuídos e totalmente distribuídos. Os modelos concentrados não levam em consideração a variabilidade espacial da bacia, geralmente são usados para projetos ou quando não há dados o suficiente para o uso de modelos mais completos, também podem ser adaptados para simular balanços hídricos de longo prazo. Já os modelos semi-distribuídos resolvem o problema hidrológico dividindo a bacia em sub-bacias ou unidades hidrológicas, onde os parâmetros são considerados invariantes no espaço, isto é, cada elemento discreto pode ser tratado como um ponto que representa homogeneamente toda sua área. Por último, os modelos totalmente distribuídos resolvem o sistema de equações de forma espacialmente explícita, considerando também as interações de relação espacial entre unidades vizinhas (GOMES JR, 2023a; SANTOS, 2009; RENNÓ; SOARES, 2003).

### 3.4 MODELOS HIDRODINÂMICOS

Modelos hidrodinâmicos são modelos matemáticos que resolvem equações fundamentais da dinâmica de fluidos como as de Saint-Venant (para águas rasas) ou as equações de Navier-Stokes (para fluxos tridimensionais complexos) para simular o movimento da água em sistemas aquáticos com distribuição espacial e temporal podendo ser semi-distribuídos ou totalmente distribuídos. Eles podem ser classificados de acordo com a maneira como o fluxo é modelado espacialmente (unidimensional, bidimensional ou tridimensional) e pela forma como resolvem as equações de Saint-Venant ou Navier-Stokes (Modelo de Onda Cinemática, Modelo de Difusão, Modelo de Aproximação Inercial Local, Modelo Hidrodinâmico) (GOMES JR *et al.*, 2024a; SANTOS, 2009; RENNÓ; SOARES, 2003) como foi explicado no tópico 3.2.2.1.

Em relação às dimensões do sistema de escoamento que modelam, os modelos unidimensionais (1D) simulam o fluxo em apenas uma dimensão levando em consideração variações longitudinais, mas não transversais ou verticais. Esta simplificação é interessante para

rios longos e estreitos, já que sua direção predominante é a longitudinal. Os modelos bidimensionais (2D) consideram as variações longitudinais e transversais, permitindo a representação de escoamentos complexos em planícies de inundação e áreas urbanas com mudanças de direção do fluxo. Já os modelos tridimensionais (3D) simulam o escoamento nas três dimensões, sendo o tipo de modelo mais complexo e que exige maior robustez de dados, os modelos 3D são úteis para escoamentos com interações verticais importantes, como correntes em estuários, mares e reservatórios (TUCCI, 1998; DARU *et al.*, 2011).

Como visto, há uma diversidade de modelos hidrodinâmicos, com diferentes aplicações e complexidades. Por isso é necessário selecionar o modelo adequado de acordo com o objetivo do projeto e realizar sua calibração de parâmetros, para que os resultados reproduzam, da melhor forma possível, a realidade. Além disso, a complexidade do modelo influencia na quantidade de dados de entrada necessários à modelagem (CANHOLI, 2015).

### 3.5 HYDROPOL2D

O HydroPol2D (*Hydrodynamic and Pollution 2-D Model*) (GOMES JR, 2023b) é um modelo hidrodinâmico e de qualidade da água bidimensional que utiliza características hidrológicas (do balanço hídrico) e hidráulicas para simular a dinâmica de escoamento superficial e o transporte de poluentes em bacias, especialmente bacias urbanas por modelar o escoamento superficial e transporte de poluentes de forma distribuída (GOMES JR *et al.*, 2023). O modelo é composto por três componentes principais, um balanço hidrológico na superfície (modelo hidrológico) que simula chuva, infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial, um modelo hidrodinâmico que resolve as equações de quantidade de movimento pela aproximação inercial local e um modelo de qualidade de água "*build-up and wash-off*" (GOMES JR *et al.*, 2024a).

A estrutura hidrológica do modelo simula o processo de chuva-vazão, para isso devem ser inseridos dados em formato numérico das condições de contorno por meio de dados de precipitação e/ou hidrogramas de entrada ou estágio. Os dados de precipitação de entrada no modelo podem ser dados de chuva observados concentrados, espacializados, obtidos por meio de radar ou imagens de satélite (RÁPALO *et al.*, 2024). Além disso, o modelo precisa de dados raster (.TIFF), georreferenciados em sistemas de coordenadas planos, que representem a topografia (modelo digital de terreno), tipo de solo e uso e ocupação da região de interesse.

Por meio desses mapas devem ser determinados parâmetros necessários para os diferentes componentes do modelo. A infiltração na bacia é calculada por meio do Modelo de

Infiltração de Green-Ampt (3.1.3.2) e seus parâmetros devem ser escolhidos com base no tipo de solo. Já a evapotranspiração é calculada pelo método de Penman-Monteith (3.1.4). Por último, os parâmetros do modelo hidrodinâmico (como o coeficiente de Manning) devem ser determinados a partir do mapa de uso e ocupação. Os parâmetros necessários para cada estrutura do modelo e suas respectivas unidades podem ser vistos no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros necessários para o modelo e respectivos símbolos e unidades

Modelo	Variável	Símbolo (unidade)
Modelo hidrológico	Condutividade hidráulica saturada	$k_{sat}$ (mm.h <sup>-1</sup> )
	Carga de Sucção	$\psi$ (mm)
	Déficit de Umidade	$\Delta\theta$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )
	Umidade Inicial do Solo	$I_0$ (mm)
Modelo hidrodinâmico	Coeficiente de Rugosidade de Manning	$n$ (sm <sup>-1/3</sup> )
	Abstração Inicial	$h_0$ (mm)
	Profundidade Inicial do Nível d'Água	$d_0$ (mm)
Modelo de qualidade de água	Coeficiente de Acúmulo Linear	$C_1$ (kg.ha <sup>-1</sup> )
	Coeficiente de Acúmulo Exponencial	$C_2$ (dia <sup>-1</sup> )
	Coeficiente de Remoção Linear	$C_3$ (-)
	Coeficiente de Remoção Exponencial	$C_4$ (-)

Fonte: GOMES JR, 2023a.

### 3.5.1 Modelo hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico do HydroPol2D resolve as equações de Saint Venant simplificadas pelo método de Aproximação Inercial Local em duas dimensões (2D) de forma totalmente distribuída (GOMES JR et al., 2024a). Isto é, ele discretiza a bacia em células finitas, permitindo que as variáveis hidrológicas e hidráulicas sejam calculadas de forma espacialmente variada, levando em conta as características específicas de cada célula, como topografia, uso

do solo e propriedades do solo. Nessas condições, o princípio da conservação de momento pode ser descrito pela Equação 3.34 e o balanço de massas no domínio 2-D da bacia de interesse assumindo uma célula  $i, j$  pode ser descrito na Equação 3.35 (GOMES JR *et al.*, 2024a; SOUSA *et al.* 2023).

$$q^{t+\Delta t} = \frac{f(\theta^t, q^t) - g\hat{h}\Delta t S^t}{\left(1 + g\Delta t n^2 |q^t| / \hat{h}^{7/3}\right)}, \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} d^{i,j}(t + \Delta t) = d^{i,j}(t) \\ + \Delta t \left[ \sum_{N^{i,j}} I^{i,j}(t) \right. \\ \left. - \sum_{N^{i,j}} O^{i,j}(t) + i^{i,j}(t) - f^{i,j}(d^{i,j}(t), Fd^{i,j}(t)) - e_T^{i,j}(t) \right], \end{aligned} \quad (3.34)$$

onde  $q^{t+\Delta t}$  é a vazão no tempo  $t + \Delta t$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), um vetor contendo os fluxos em todos os vizinhos de superfície adjacentes de  $i+1/2$ ;  $f(\theta^t, q^t)$  é a função que controla a difusão numérica, que varia de acordo com o esquema numérico utilizado;  $\theta^t$  é um parâmetro calculado para ajustar a difusão numérica;  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $\hat{h}$  é a profundidade média da água (m);  $\Delta t$  é o intervalo de tempo para a discretização (s);  $S^t$  representa a inclinação ou a variação da superfície da água em relação ao espaço ( $\text{m}^{-1}$ );  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ );  $|q^t|$  é o valor absoluto da vazão no tempo  $t$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) para Equação 3.34. Na Equação 3.35  $d$  é a lâmina de escoamento superficial,  $I$  é a taxa de vazão de entrada,  $O$  a taxa de vazão de saída,  $i$  a intensidade de precipitação,  $f$  a taxa de infiltração e  $e_t$  a taxa de evapotranspiração.

Para simular o fluxo de água entre as células a equação é resolvida com base em variáveis de estado, como altura da água e velocidade do fluxo. Então, o método Godunov, que resolve problemas de Riemann, é utilizado para calcular o fluxo nas fronteiras entre células adjacentes. As variáveis de estado são então atualizadas em cada célula, garantindo a conservação de massa e momento. Esse processo é repetido em cada passo de tempo, permitindo a simulação da evolução do fluxo e cenários hidrológicos. Logo, para uma célula ( $i, j$ ) na grade, a equação de continuidade é Equação 3.36 (GOMES JR *et al.*, 2024a):

$$\begin{aligned}
h_{i,j}^{t+\Delta t} = h_{i,j}^t + \Delta t \left( \frac{Q_{i-1/2,j}^{t+\Delta t} - Q_{i+1/2,j}^{t+\Delta t} + Q_{i,j-1/2}^{t+\Delta t} - Q_{i,j+1/2}^{t+\Delta t}}{\Delta x^2} \right) \\
+ \Delta t (r_{i,j}^t - f_{i,j}^t + s_{i,j}^t)
\end{aligned} \tag{3.36}$$

onde  $Q = q\Delta x$ , as notações  $x$  e  $y$  indicam as direções cartesianas, os subíndices  $i - 1/2$ ,  $i + 1/2$  denotam as interfaces y da célula (i, j) já os subíndices  $j - 1/2$  e  $j + 1/2$  denotam as interfaces x de (i, j) e quando  $\Delta x = \Delta y$  tem-se a resolução do raster do domínio.

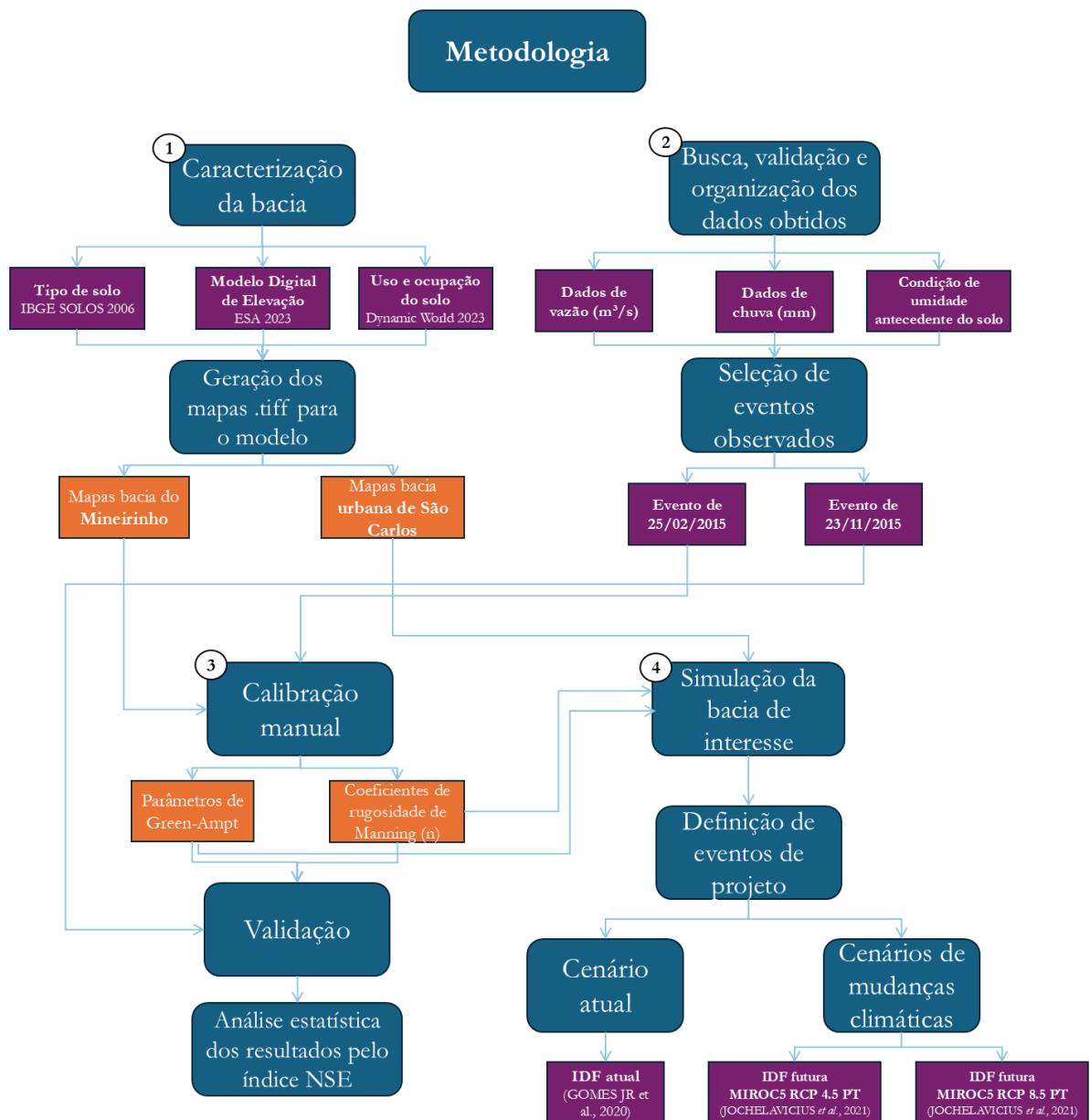
Os diferenciais do modelo HydroPol2D para simulação de inundações urbanas destacam-se pela sua simplicidade, eficiência computacional e capacidade de lidar com cenários complexos. O modelo utiliza aproximações inerciais locais, o que permite simulações mais rápidas em comparação com modelos de momento completo, como o HEC-RAS 2D. Ele é especialmente eficaz para análises que exigem múltiplas simulações, como estudos probabilísticos de inundaçao ou otimização de infraestrutura verde. Outro diferencial é sua capacidade de simular terrenos planos e complexos (pela sua alta variabilidade de declividades e depressões naturais em áreas pequenas), comuns em zonas urbanas, permitindo a análise realista de eventos críticos, como o rompimento de barragens e chuvas intensas superando a capacidade de drenagem do terreno e dos canais de macrodrenagem. O modelo também oferece flexibilidade na definição de condições de contorno, como a regulação do fluxo em estruturas urbanas, o que é essencial para a continuidade e precisão nas simulações.

Ademais, o HydroPol2D também possibilita o uso de cálculos com *Graphics Processing Unit* (GPU) e conta com versões de código aberto em Matlab e Python, o que permite que o código seja examinado, modificado e personalizado para necessidades específicas. Códigos abertos incentivam a colaboração global, são geralmente gratuitos e podem ser mais seguros, pois a comunidade contribui para identificar e corrigir vulnerabilidades. Essas características tornam o software flexível, acessível e continuamente aprimorado.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi dividida em quatro etapas principais: caracterização das bacias de interesse, obtenção de dados observados de precipitação e vazão, calibração e validação do modelo com os dados observados e por último desenvolvimento de eventos de projeto representativos para contextos atuais e futuros (com mudanças climáticas) (Figura 4).

Figura 4 - Etapas da metodologia, principais dados utilizados e resultados intermediários



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA

A região urbana da cidade de São Carlos foi escolhida como área de estudo devido ao histórico da relação da comunidade com as inundações. Além disso, o crescimento urbano desordenado da cidade nas últimas décadas e sua alocação próxima a áreas de vulnerabilidade fazem com que seja essencial o estudo da região e dos impactos de fenômenos extremos para a população. Entretanto, como não foi possível encontrar dados de chuva medidos com alta discretização temporal e em diferentes pontos para a bacia urbana de São Carlos, o modelo foi calibrado para uma sub-bacia na região e então extrapolado para a bacia de interesse. A sub-bacia escolhida foi a do córrego do Mineirinho, já que foram encontrados dados de chuva e de vazão medidos no período de 2014-2016 que puderam ser utilizados para a calibração do modelo.

Para a caracterização das duas bacias modeladas foram construídos mapas de elevação, de tipo de solo e de uso e ocupação do solo no sistema de projeção Pseudo-Mercator, esse sistema de projeção foi escolhido por ser amplamente utilizado em plataformas de mapas digitais, como Google Maps e OpenStreetMap, devido às suas características específicas que o tornam mais prático para aplicações online. Além disso, as interfaces do modelo HydroPol2D programadas no software MatLab permitem a plotagem em tempo real de mapas de inundação, lâminas infiltradas, velocidades do escoamento entre outras variáveis com a possibilidade de inserção de mapas de fundo georreferenciados, caso a projeção seja a Pseudo-Mercator. O modelo digital de terreno (MDT) foi criado com base nos dados de elevação obtidos com resolução de 30 metros, a partir de dados do “30 m Copernicus Global DEM” (<https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>). Os dados de uso e ocupação do solo foram obtidos com os dados de 10 m de resolução do projeto Dynamic World (BROWN *et al.*, 2022) e suas classificações foram mantidas e reamostradas para a resolução do MDT. Os tipos de solo foram obtidos por meio do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (IBGE, 2006), na escala de 1:5000.000, disponibilizados pelo IBGE.

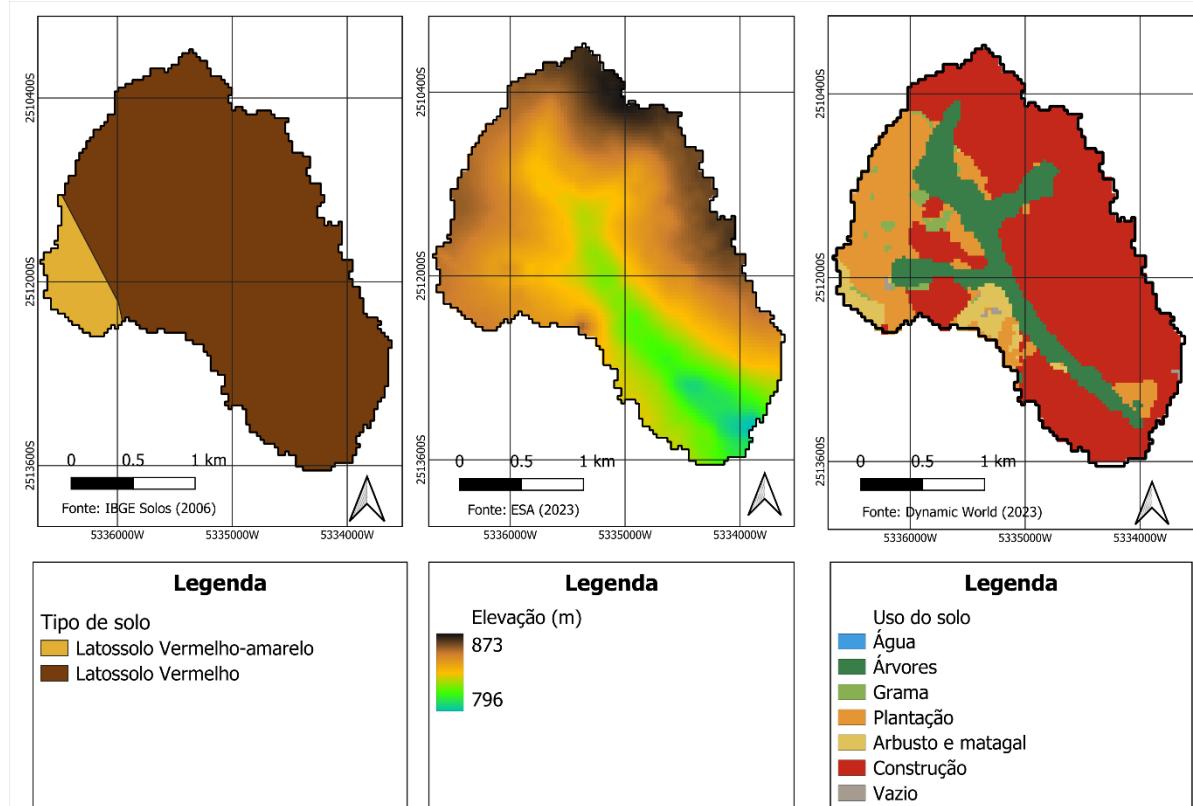
O processo de transformação de um Modelo Digital de Elevação (MDE) bruto em um Modelo Digital de Terreno (MDT) foi utilizado para refinar os dados de elevação, eliminando ruídos que não representam o relevo natural, como pontos de acúmulo, depressões artificiais e edificações. Para isso, inicialmente, é aplicado um filtro baseado em declividade (*DTM filter - SAGA*) com um limite de inclinação de 30° entre células adjacentes. Após essa etapa, as lacunas deixadas pelo filtro são preenchidas por meio de uma interpolação bilinear no software QGIS (*r.fillnulls - GRASS*), que suaviza as linhas do terreno. O produto é um raster refinado, sem

elementos artificiais e com linhas de fluxo mais suaves, que melhor representa o terreno natural (GOMES JR *et al.*, 2023).

#### 4.1.1 Bacia do Mineirinho

A microbacia do córrego do Mineirinho é localizada na região oeste de São Carlos. O Córrego do Mineirinho localiza-se no bairro residencial Santa Angelina, e à montante, existem outros dois afluentes, um formado por uma nascente localizada dentro do Campus II da Universidade de São Paulo (USP) e outra nascente localizada no bairro residencial Santa Felícia. A bacia possui, aproximadamente, 5,3 km<sup>2</sup>, com elevação variando entre 795 e 873 metros, a região mais alta se localiza ao norte da bacia, enquanto a área mais baixa se localiza a sudeste, no exutório da bacia, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Mapas de caracterização da bacia do Mineirinho (tipo de solo, modelo digital de terreno e uso e ocupação do solo)



Fonte: IBGE Solos (2006); ESA (2023); BROWN *et al.*, 2022.

A bacia do Mineirinho é predominantemente composta por Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd) (IBGE Solos, 2006;

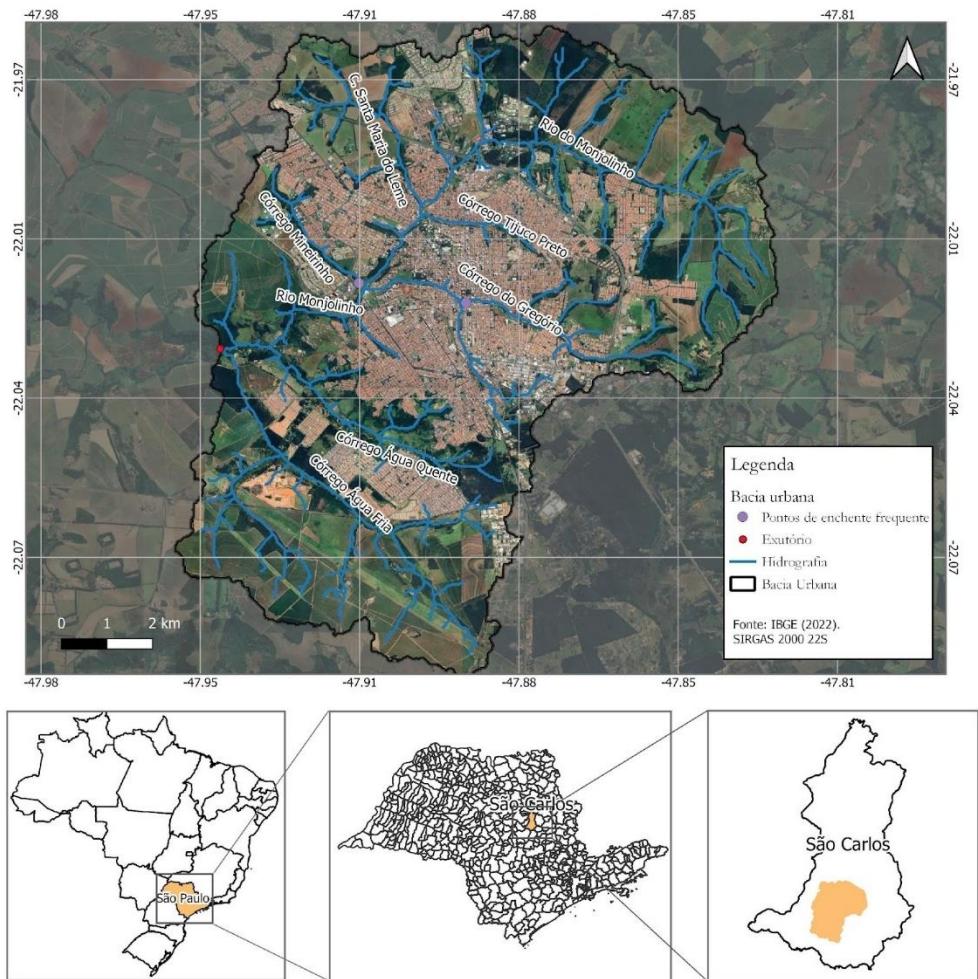
EMBRAPA, 2018). Segundo Benini (2005), os LVAd são solos de características ácidas e de baixa fertilidade natural nos divisores de águas. Ademais, uma análise granulométrica do solo em questão apurou que esse tipo é extremamente arenoso, o que lhe confere boa drenagem interna, baixa erodibilidade e baixo potencial de geração de escoamento superficial direto (ALMEIDA, 2009). Já os LVd são solos minerais com teores médios a altos de  $Fe_2O_3$ , possuem textura argilosa, muito argilosa ou média e caracterizam-se por serem profundos, muito intemperizados e pobres em nutrientes (distrófico), com baixa fertilidade natural (EMBRAPA, 2018). Além disso, são solos com boa capacidade de infiltração de água, isso ocorre devido à sua estrutura granular, que facilita o movimento da água no solo, além de sua alta porosidade. Isso porque a floculação das argilas tropicais também ajuda a aumentar a infiltração, mesmo em solos argilosos, como o LVd, aumentando a infiltração, em detrimento do escoamento superficial (AYER, 2015).

Na bacia do córrego do Mineirinho, a ocupação, iniciada entre 1960 e 1970, se intensificou na década de 1990 (TARPANI & BRANDÃO, 2009), tendo sua ocupação intensificada com a chegada da Área 2 da Universidade de São Paulo (PONTREMOLEZ, 2013). Atualmente a bacia possui a maior parte da sua área, aproximadamente 3,2 km<sup>2</sup>, composta por área construída (60,3% da bacia), seguido por cerca de 1 km<sup>2</sup> de área ocupada por plantações (18,1%) e 0,8 km<sup>2</sup> de árvores (15,9%), sendo essas, parte da Área de Proteção Permanente presente ao redor dos córregos da bacia.

#### **4.1.2 Bacia urbana de São Carlos**

A bacia urbana da cidade de São Carlos é localizada na parte sul do município, englobando quase toda sua mancha urbana e, aproximadamente, 11% do seu território. Essa bacia urbana faz parte de uma das sub-bacias hidrográficas que compõe a bacia do Tietê Jacaré, a bacia do Monjolinho, e, consequentemente, tem como principal corpo hídrico o rio Monjolinho. As microbacias que compõe essa região são a do Santa Maria do Leme, Tijuco Preto, Mineirinho, Gregório, Água Quente e Água Fria. A região de estudo, seus principais corpos hídricos, exutório e pontos de encharcamentos e/ou inundações frequentes podem ser vistos na Figura 6.

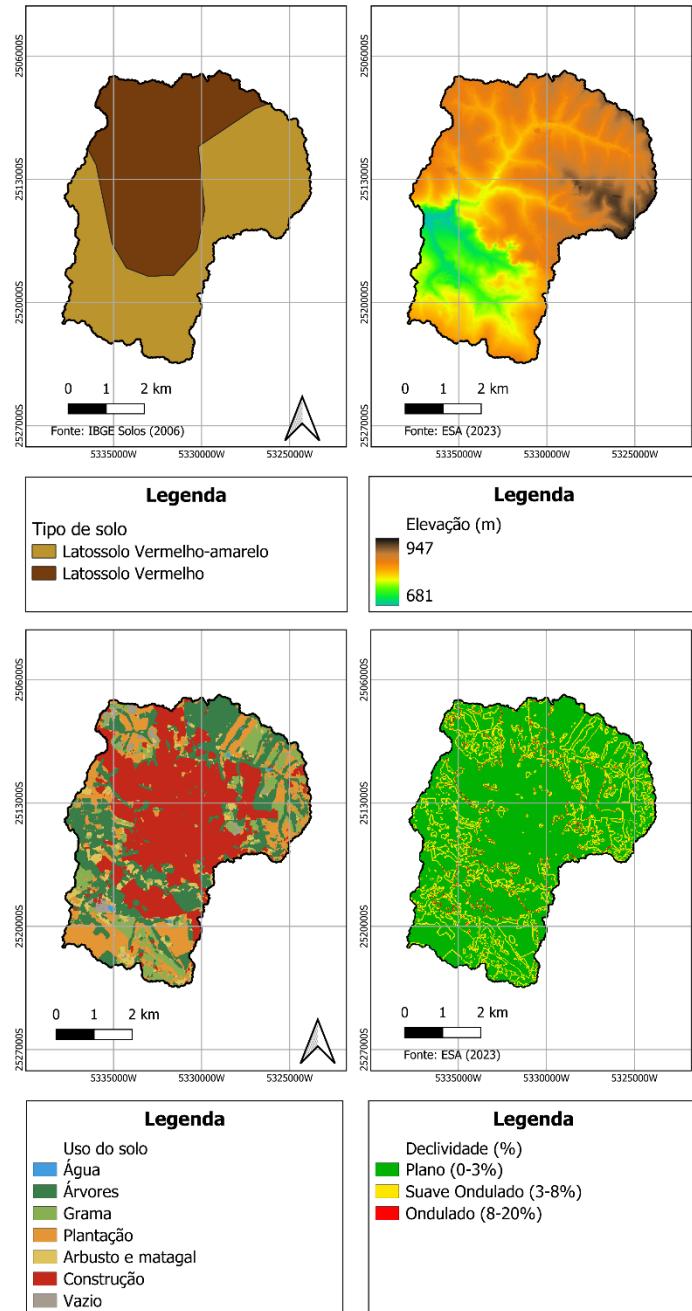
Figura 6 - Bacia urbana de São Carlos com seus corpos hídricos e pontos de interesse



Fonte: SOUSA *et al.*, 2023.

A bacia possui, aproximadamente, 129 km<sup>2</sup>, sua altitude está entre 680 e 950 metros, a região mais alta se localiza a nordeste da bacia, enquanto a área mais baixa se localiza a oeste, no exutório da bacia. Assim como a bacia do Mineirinho, a região de interesse é composta por solos do tipo LVd e LVAd (IBGE Solos, 2006; EMBRAPA, 2018), porém, para a bacia urbana de São Carlos o LVAd ocupa cerca de 55% da área, além de corresponder a maior parte da área não construída da bacia. A região, atualmente, tem como principais tipos de ocupação áreas construídas (38,12%), árvores (28,28%), plantação (18,18%) e grama (8,59%), as árvores estão presentes nas proximidades dos córregos (como Área de Proteção Permanente) e, também, em parques ecológicos e praças ao longo da mancha urbana. As características explicitadas acima estão presentes na Figura 7.

Figura 7 - Mapas de caracterização da bacia urbana de São Carlos (tipo de solo, modelo digital de terreno e uso e ocupação do solo)



Fonte: IBGE Solos (2006); ESA (2023); Dynamic World (2023).

A análise de declividade na bacia foi realizada utilizando as classificações propostas pela Embrapa (OLIVEIRA *et al.*, 1999) para declividade do terreno em porcentagem: de 0 a 3% Plano; de 3 a 8% Suave Ondulado; de 8 a 20% Ondulado; de 20 a 45% Forte Ondulado; de 45 a 75% Montanhoso; maior que 75% Escarpado. Para a bacia de interesse só foram

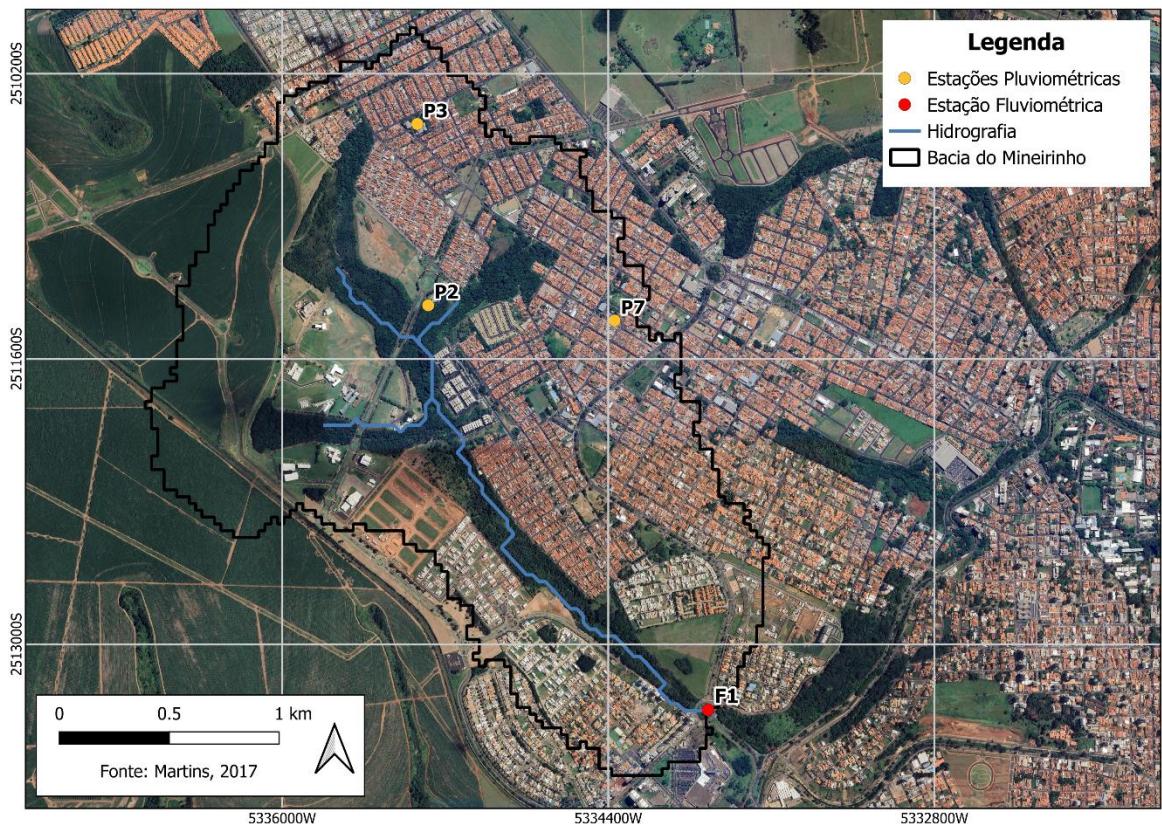
encontradas declividades do tipo Plano, Suave ondulado e Ondulado, sendo a região composta majoritariamente por áreas planas.

#### 4.2 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Os dados utilizados neste trabalho para a calibração do modelo na bacia do Mineirinho foram aqueles utilizados por Martins (2017) em sua tese de doutorado. Essas informações foram coletadas por meio de uma rede de monitoramento hidrológico implantada na área de estudo com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e dos projetos da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP): MCTProjects/FINEP/Ação Transversal - Saneamento Ambiental e Habitação - 7/2009MCT/ e FINEP/CT- HYDRO 01/2010.

A rede estruturada na bacia do Mineirinho foi composta por três estações de monitoramento pluviométrico (P1, P2 e P3) e uma estação fluviométrica (F1). Para as estações pluviométricas foram escolhidos os pluviógrafos de caçamba com datalogger da marca Hydrological Service – Modelo TB4. O Pluviógrafo 1 (P1) foi instalado na Escola Municipal Bento da Silva Alencar, o Pluviógrafo 2 (P2) foi instalado nas dependências da Área II do Campus da USP São Carlos e o Pluviôgrafo 3 (P3) foi instalado no Posto de Saúde da Família do Jardim Santa Felícia. Já a estação fluviométrica (F1), composta por três equipamentos transdutores de pressão, um medidor de pressão atmosférica e uma sonda Accoustic Doppler Current Profiler (ADCP) Intelligent Flow (IQ) meter da marca Sontek, foi instalada próxima ao exutório da bacia, em um trecho canalizado da Rotatória da Avenida Bruno Ruggiero Filho (MARTINS, 2017). A localização das estações e a delimitação da bacia utilizada para a calibração pode ser vista na Figura 8.

Figura 8 - Mapa de localização das estações pluviométricas e fluviométrica na bacia do Mineirinho



Fonte: Elaborado pela autora, 2024; Imagem extraída do Google Maps em 2024.

Os valores de precipitação foram coletados de 1 em 1 minuto, sendo calculado o valor de precipitação média registrada pelos três pluviógrafos para gerar hietogramas dos 12 (doze) principais eventos do período analisado (ano de 2015), nos quais também houve a coleta de qualidade da água. A partir dos dados de chuva coletados, foi possível quantificar diversas variáveis associadas ao evento chuvoso, como a precipitação total, duração e intensidade da chuva, também foi analisada a condição de dias antecedentes sem chuva e o volume total precipitado. Para os dados de vazão, o equipamento realizava a coleta automatizada de dados a cada 2 minutos (MARTINS, 2017).

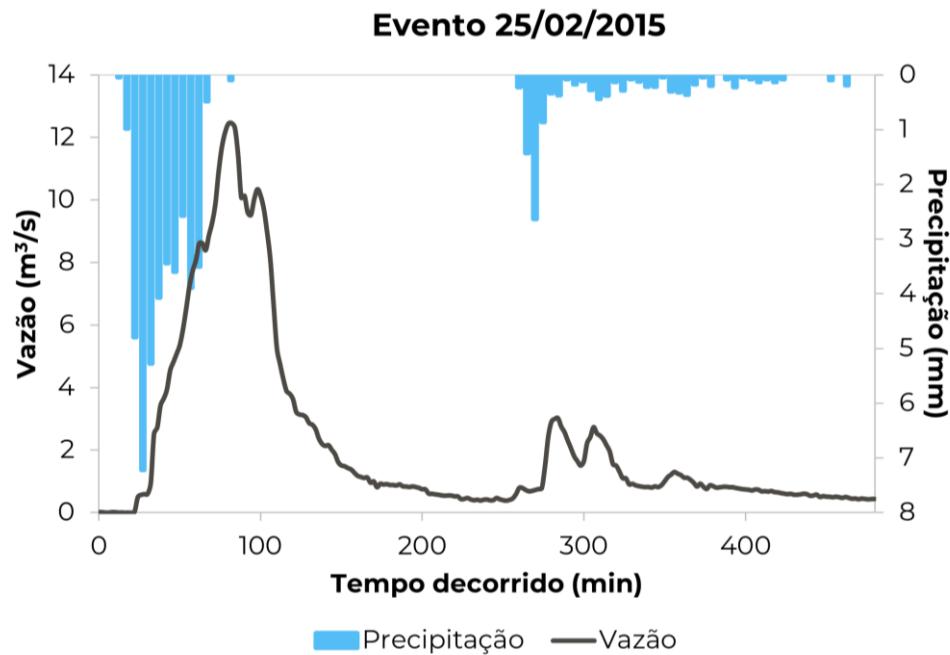
#### 4.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a calibração e validação do modelo, foram selecionados os 2 eventos de maior precipitação total dos 12 eventos propostos por Martins (2017), sendo eles os eventos de 25/02/2015 e 23/11/2015, respectivamente. Esses dois eventos foram escolhidos por serem os que mais se adequaram aos objetivos do estudo de analisar inundações. Isso porque foram os

únicos eventos com precipitação >10 mm e com dados de vazão medidos durante e depois da chuva sem falha. Além disso, foram os únicos eventos (entre os 12 avaliados) nos quais foram registradas inundações ao longo da cidade (EIRAS, 2017).

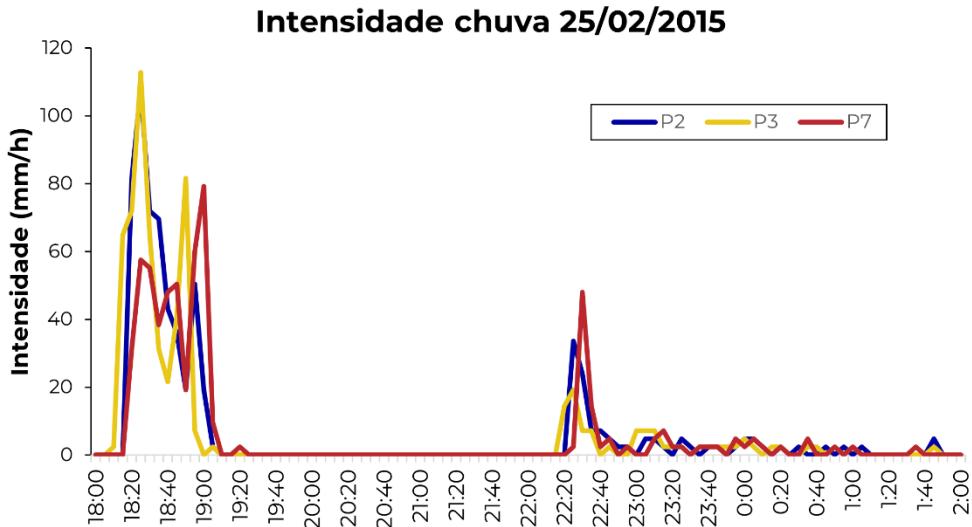
Por meio dos dados gerados pelo monitoramento, foi possível discretizar temporalmente as chuvas para um intervalo de 5 em 5 minutos e também espacializar a chuva na bacia do Mineirinho de acordo com os valores medidos por cada um dos pluviômetros por meio do método *Inverse Distance Weighting* (IDW) ou método de interpolação do inverso da distância (SHEPARD, 1968). A duração dos eventos escolhida foi do início da chuva do evento até, aproximadamente, 2h após o pico de vazão observado. Os hidrogramas e hietogramas da precipitação média calculada de evento podem ser vistos nas Figura 9 e Figura 12, a variação da intensidade das chuvas observadas para cada pluviômetro podem ser vistas nas Figura 10 e Figura 13, a chuva acumulada distribuída espacialmente para cada evento pode ser vista nas Figura 11 e Figura 14 e as características dos eventos podem ser vistas na Tabela 1.

Figura 9 - Hietograma da precipitação média e Hidrograma do Evento de 25/02/2015



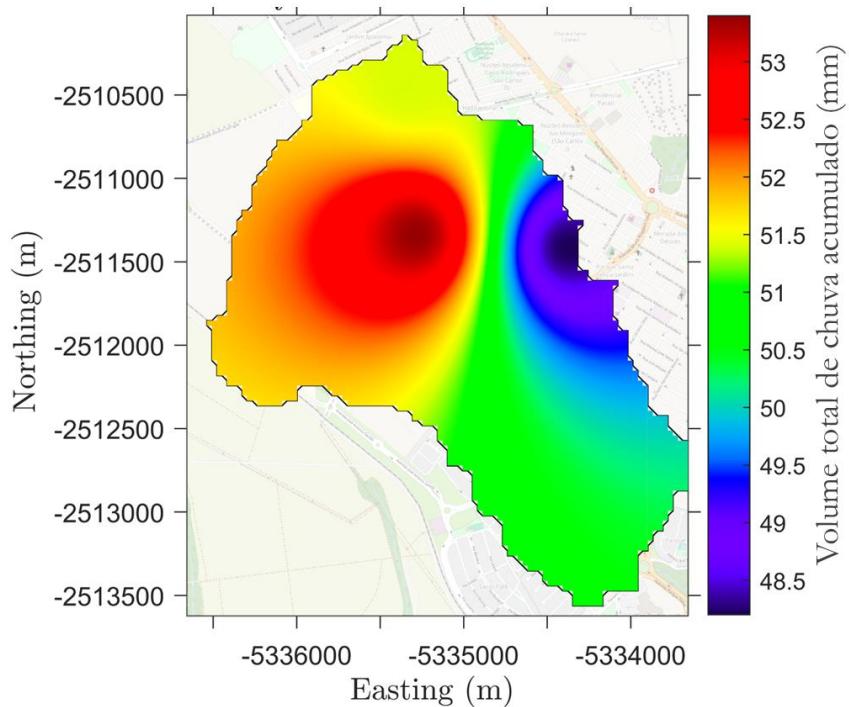
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 10 - Intensidade da chuva por pluviômetro do evento de 25/02/2015



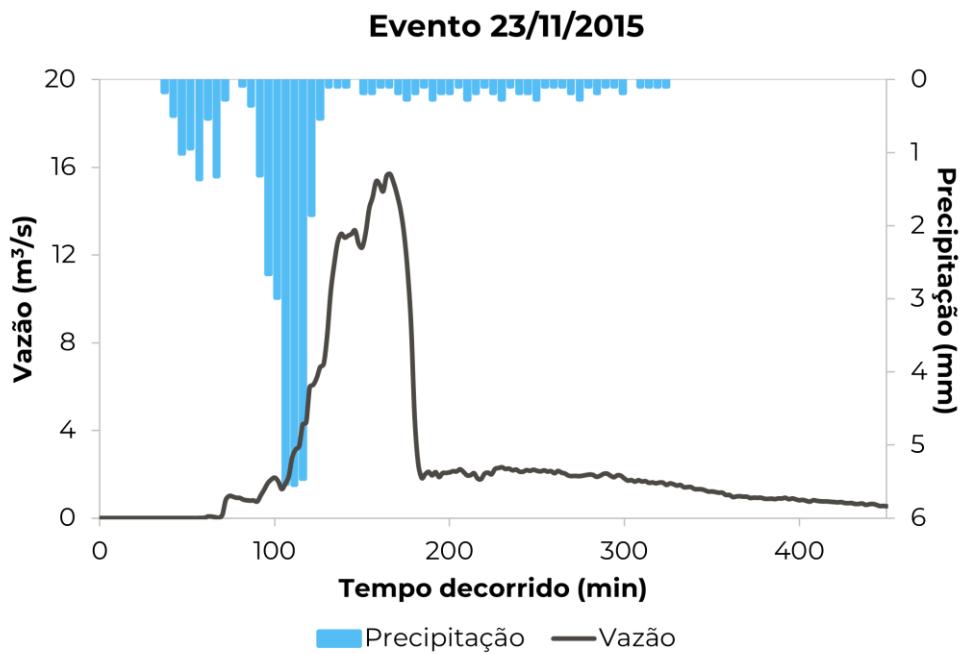
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 11 - Chuva acumulada distribuída espacialmente no evento de 25/02/2015



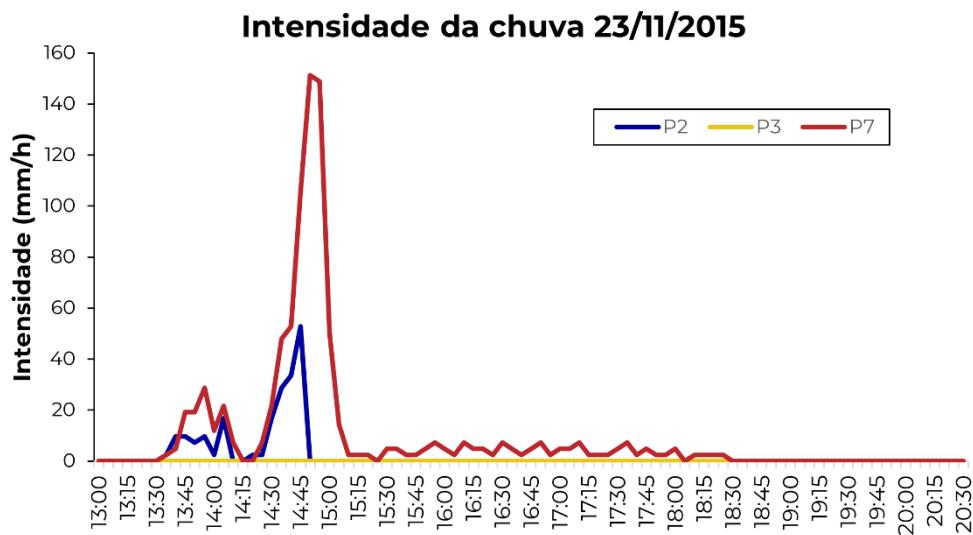
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 12 - Hietograma da precipitação média e Hidrograma do Evento de 23/11/2015



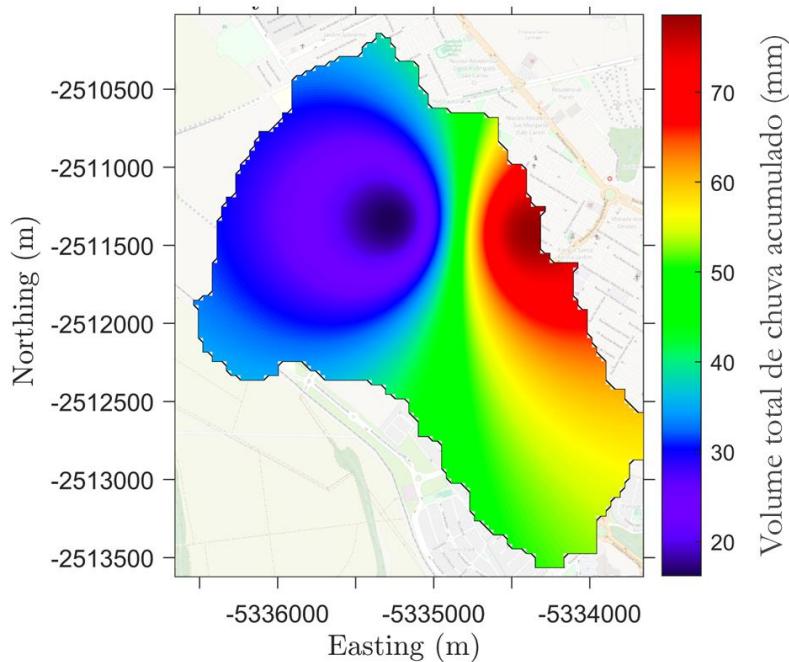
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 13 - Intensidade da chuva por pluviômetro do evento de 23/11/2015



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 14 - Chuva acumulada distribuída espacialmente no evento de 23/11/2015



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Tabela 1 - Características dos eventos selecionados

Evento analisado	Início	Fim	Precipitação média total (mm)	Condição de umidade antecedente
25/02/2015	18h	02h (26/02/2015)	50,81	AMC III
23/11/2015	13h	20h30	38,05	AMC III

Fonte: Adaptado de Martins (2017).

Após selecionar os eventos e inserir os dados de intensidade ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) a cada 5 minutos, foram também adicionados os mapas de MDT, tipo de solo e uso e ocupação da bacia do Mineirinho, como foi citado no tópico 4.1. Com intuito de tornar o modelo mais realista, dada a condição do solo nos dois eventos de AMC III - Solo úmido, baixa capacidade de infiltração, foram desenvolvidos mapas de umidade inicial do solo. Para isso, foram utilizados os valores de CN propostos por Tucci (2007) para solos do tipo B e adaptados para as classes de uso e ocupação do solo utilizadas neste estudo (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores de CN para diferentes classes de uso e ocupação do solo, tipos de solo e AMC II e AMC I

Classe	Uso e ocupação do solo	AMC II				AMC I			
		A	B	C	D	A	B	C	D
0	Água	100	100	100	100	100	100	100	100
1	Árvores	25	55	70	77	11	35	51	60
2	Grama	68	79	86	89	49	63	72	77
3	Vegetação inundada	100	100	100	100	100	100	100	100
4	Plantações	72	81	88	91	54	65	75	80
5	Vegetação rasteira	39	61	74	80	21	41	56	64
6	Áreas construídas	89	92	94	95	77	81	84	86
7	Solo exposto	72	82	87	89	54	67	74	77

Fonte: Adaptado de Tucci, 2007.

Como a condição inicial para os dois eventos é de AMC III, foram utilizados os valores de AMC II da tabela para calcular os valores de de CN na condição de solo úmido, por meio da Equação 4.1 (HAWKINS *et al.*, 2009).

$$CN_3 = \frac{CN_2}{0,427 + 0,00573 \times CN_2} , \quad (4.1)$$

onde:

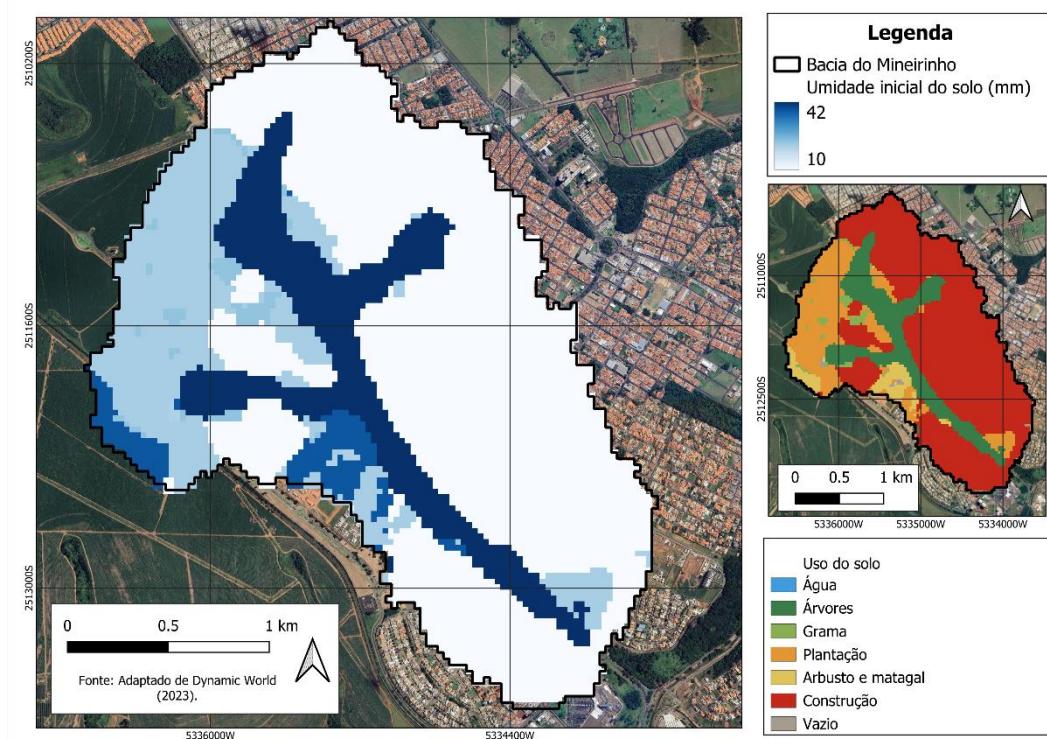
$CN_3$  = valor do CN para AMC III;

$CN_2$  = valor do CN para AMC II.

Após encontrar os valores de  $CN_3$  para cada uma das classes de uso e ocupação na bacia, foram utilizadas as equações explicadas no tópico “Método *Curve Number*” (COLLISCHONN, ano; HAWKINS *et al.*, 2009) para encontrar o valor de  $Q$  (escoamento superficial em mm) e, consequentemente, de  $F$  (infiltração acumulada em mm). Por meio dos valores de  $F$  (mm)

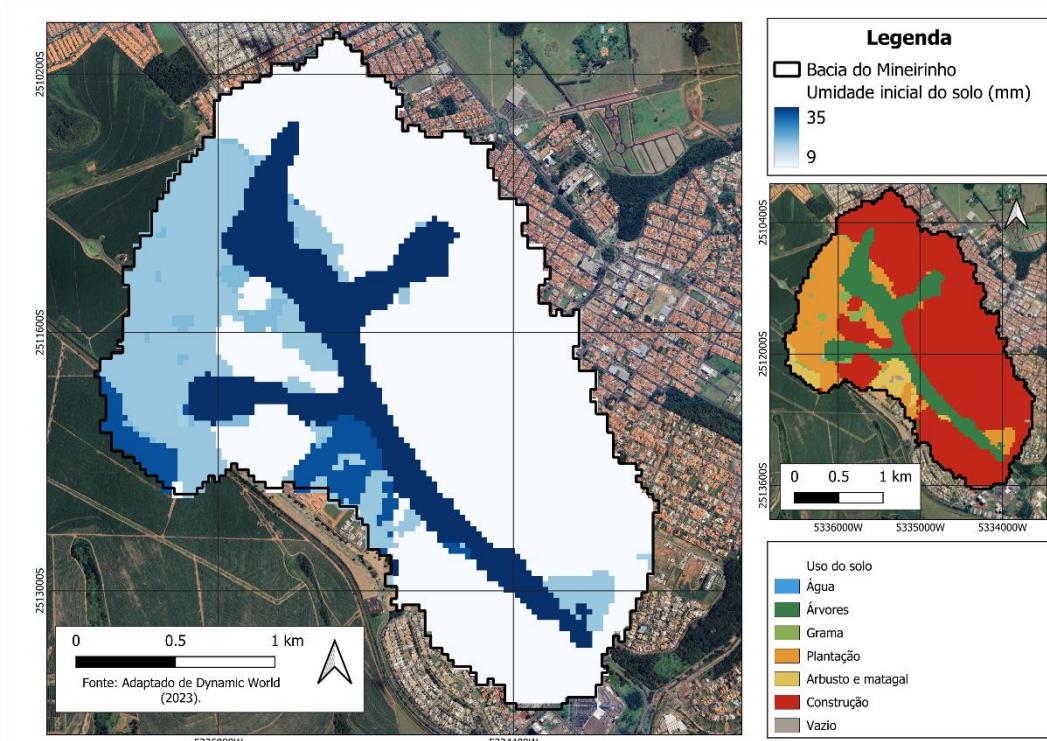
encontrados para cada classe de uso de solo foram gerados os mapas de umidade inicial do solo (Figura 15 e Figura 16).

Figura 15 - Mapa de umidade inicial do solo para o evento 22/05/2015



Fonte: Adaptado de Dynamic World (2023).

Figura 16 - Mapa de umidade inicial do solo para o evento de 23/11/2015



Fonte: Adaptado de Dynamic World (2023).

Então, para a etapa de calibração, foram inseridos os mapas gerados para a bacia do Mineirinho (MDT, tipo de solo, uso e ocupação do solo e umidade inicial, Figura 5 e Figura 15) em conjunto com os dados de intensidade ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) das chuvas medidos a cada 5 minutos para cada um dos três pluviômetros. A etapa de calibração com o evento de 25/02/2015 consistiu em modificar os parâmetros de Green-Ampt do modelo, sendo eles  $\Theta_s$  ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ),  $\Theta_i$  ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ),  $K_{\text{sat}}$  ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) e  $\Psi_f$  (mm) e os coeficientes de manning  $n$  ( $\text{s.m}^{-1/3}$ ), de forma que os valores de vazão gerados pelo Hydropol2D se aproximassesem da vazão medida em F1. Para analisar a similaridade dos valores de vazão modelados com os observados, foi utilizado o índice de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE).

O NSE é um índice que mede a eficiência de um modelo em prever valores observados em comparação com a média dos dados observados, sendo uma métrica amplamente utilizada para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos. O índice NSE é calculado pela Equação 4.2 (LIN et al., 2017).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o - Q_m)^2}{\sum_{i=1}^T (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (4.2)$$

Onde:

$Q_o$  = vazão observada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )

$Q_m$  = vazão modelada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )

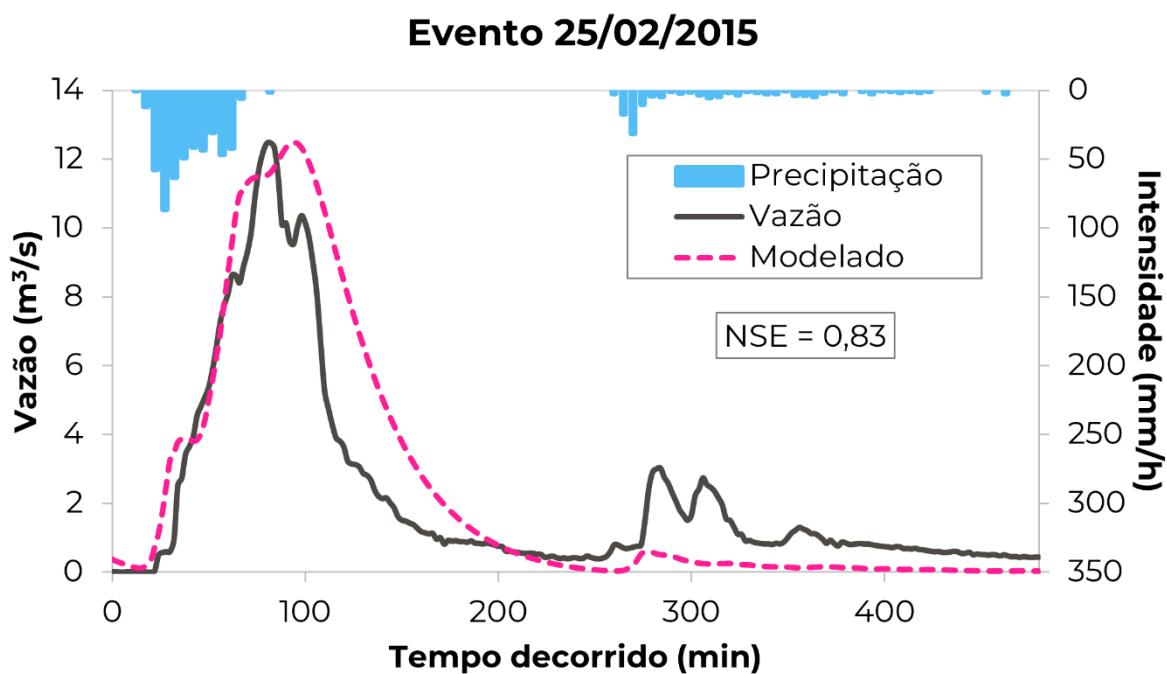
$\bar{Q}_o$  = vazão média observada ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )

O valor NSE varia de  $-\infty$  a 1. Um NSE de 1 indica que o modelo prevê perfeitamente os dados observados, enquanto um valor de 0 significa que o modelo é tão bom quanto usar a média dos dados observados. Valores negativos indicam que o modelo é pior do que a média (LIN et al., 2017). Com base em pesquisas anteriores, foram sintetizados resultados de NSE de forma a classificar os valores em quatro categorias, de acordo com o desempenho dos modelos de simulação, são eles: insatisfatório ( $NSE < 0,5$ ), satisfatório ( $0,5 < NSE < 0,65$ ), bom ( $0,65 < NSE < 0,75$ ) e muito bom ( $0,75 < NSE < 1$ ) (MORIASI et al., 2007).

#### 4.3.1 Evento de calibração

Nessa primeira etapa, os parâmetros do modelo foram calibrados manualmente seguindo como base valores utilizados na literatura de acordo com o tipo de solo presente na bacia e seu uso e ocupação. Foram realizadas 30 rodadas teste e a simulação que apresentou os melhores resultados para o evento de 25/02/2015 foi o Teste 20, com NSE igual a 0,83 (Figura 17).

Figura 17 - Hietograma e Hidrograma Observado e Modelado de 25/02/2015



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Para a estimativa dos parâmetros relacionados a tipologia do solo, primeiro os solos foram classificados segundo a sua textura predominante, segundo SiBCS (2006), os solos Latossolo Vermelho-amarelo e Latossolo Vermelho tem texturas médias e argilosas, respectivamente. Após essa caracterização, foram utilizadas referências de estudos existentes como valores base ou faixa de valores que foram alterados de acordo com as respostas obtidas pelo modelo na calibração manual. Os parâmetros  $\Theta_{sat}$  ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  $\Theta_i$  ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) e  $\Psi_f$  (mm) foram escolhidos com base nos estudos de Brakensiek e Rawls (1983), Cecílio *et al.* (2007) e Sousa *et al.* (2023) e, apesar de importantes para o modelo de Green-Ampt, não se mostraram significativamente relevantes na bacia de interesse, já que as alterações nos seus valores

resultaram em variações mínimas nas respostas do modelo, como mostra o estudo de GOMES JR *et al.* (2024b).

Os parâmetros Green-Ampt que se mostraram mais relevantes dentro do modelo foram os  $K_{sat}$  ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) (GOMES JR *et al.*, 2024b). Justino (2019) ao realizar um estudo sobre o “Comportamento hidrodinâmico do solo e da recarga potencial do aquífero a partir de poços de infiltração de águas pluviais” no setor norte da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) encontrou valores de  $K_{sat}$  para a região que variam entre 5,69 e 342,72  $\text{mm.h}^{-1}$ . Já Sobieraj *et al.* (2002) encontrou valores para solos do tipo Typic Kandiudult (ou Latossolo Vermelho) com  $K_{sat}$  variando entre 4,1 e 73  $\text{mm.h}^{-1}$  e valores entre 6,3 e 85,6  $\text{mm.h}^{-1}$  para solos do tipo Plinthic Hapludox (ou Latossolo Amarelo) dependendo da profundidade testada. Por meio desses estudos foi selecionada uma faixa de valores de 1 a 100  $\text{mm.h}^{-1}$  para os parâmetros de  $K_{sat}$  dos dois tipos de solo, então, seus valores foram ajustados manualmente ao longo dos 30 testes buscando atingir os resultados de vazão que melhor correspondessem aos dados observados (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores calibrados para os parâmetros de Green-Ampt

Tipo de solo	$\theta_{sat}$ ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ )	$\theta_i$ ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ )	$K_{sat}$ ( $\text{mm.h}^{-1}$ )	$\psi_f$ (mm)
LVd	0,475	0,09	25	316,3
LVAd	0,463	0,029	28	88,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O processo de estimativa dos parâmetros de uso de solo seguiu a mesma lógica do processo dos parâmetros de Green-Ampt, foi realizada uma revisão bibliográfica de valores possíveis que foram testados e ajustados (SITH; NADAOKA, 2017; FATHI-MOGHADAM *et al.*, 2011; LIU *et al.*, 2003; FURL *et al.*, 2018; SHARIF *et al.*, 2010). Os valores adotados para cada classe de ocupação presente na bacia podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores escolhidos para os parâmetros de  $n$  de manning associados ao uso do solo

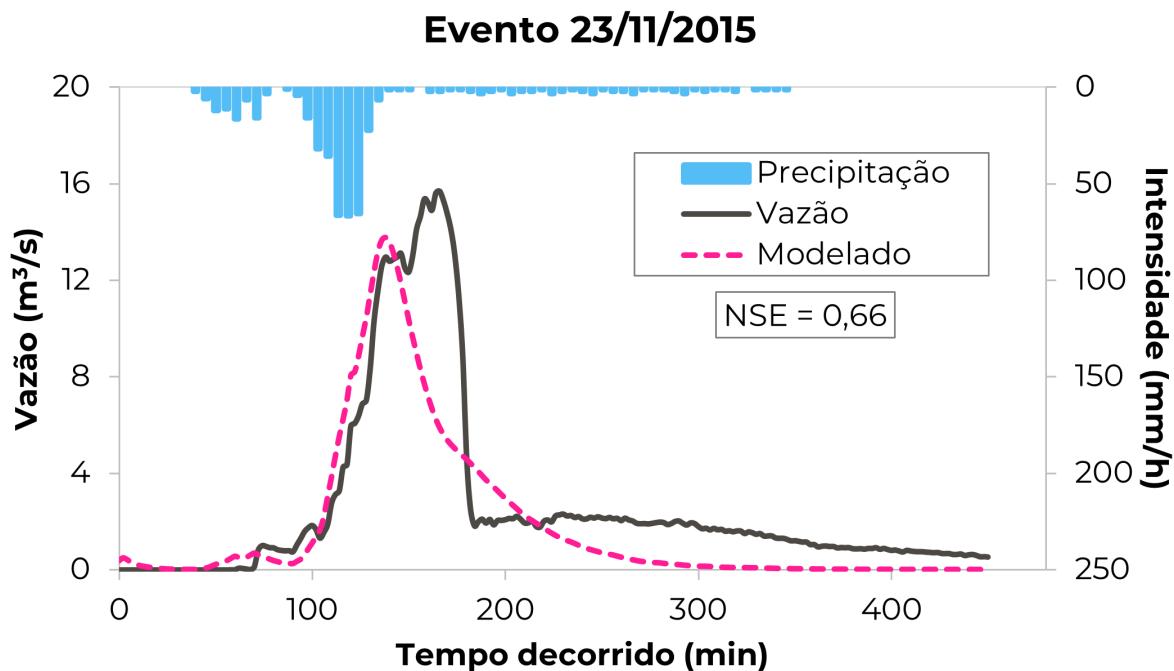
Classe de ocupação	Água	Árvores	Grama	Plantações	Vegetação rasteira	Áreas construídas	Solo exposto
“n” de manning							
	0,028	0,03	0,023	0,02	0,03	0,045	0,044 ( $s.m^{-1/3}$ )

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

#### 4.3.2 Evento de validação

Já para a validação dos parâmetros escolhidos foi simulado o evento de 23/11/2015, as vazões modeladas foram comparadas com as vazões observadas e foi calculado o índice NSE, que apresentou um valor de NSE igual a 0,66 (Figura 18).

Figura 18 - Hietograma e Hidrograma Observado e Modelado de 23/11/2015



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Como pode ser observado na Figura 13, para o evento de 23/11/2015 o pluviômetro P3 não mediu chuva, apesar dos pluviômetros se localizarem relativamente próximos. É provável que a chuva não tenha atingido a parte superior da bacia ou que o pluviômetro tenha apresentado

problemas na medição do evento. Entretanto, como o modelo espacializa a chuva na bacia por meio do método *Inverse Distance Weighting* (IDW) ou método de interpolação do inverso da distância (SHEPARD, 1968) dos valores medidos nos pontos, a inserção do pluviômetro P3 com dados de  $0 \text{ mm.h}^{-1}$  de intensidade gerou resultados de vazão bastante inferiores ao observado. Então, para esse evento, foram utilizados apenas os dados de chuva observados para P2 e P7 e após essa alteração o valor de NSE calculado se classificou como “bom” ( $0,65 < \text{NSE} < 0,75$ ), segundo MORIASI *et al.* (2007), finalizando a etapa de calibração e validação do modelo.

#### 4.4 SIMULAÇÕES DE EVENTOS CRÍTICOS/EVENTOS DE PROJETO

Após a calibração do modelo e validação dos parâmetros escolhidos, o próximo passo foi a estruturação de eventos de projeto, isto é, chuvas idealizadas utilizadas com objetivo de avaliar cenários de eventos extremos na bacia. Como foi explicado no tópico 3.1.1.1, as chuvas de projeto têm como características sua duração, intensidade e distribuição temporal, que foram definidas de acordo com as especificidades da bacia e escopo do estudo (CANHOLI, 2015).

A duração das chuvas escolhida foi de 2h, que é um valor semelhante ao tempo de concentração da bacia e aos outros eventos analisados no período de calibração. O método escolhido para a distribuição temporal da chuva foi o de Blocos Alternados (KEIFER & CHU, 1957), já que é uma metodologia coerente com o objetivo do estudo de entender cenários de maximização de impactos gerados (BEMFICA, 1999; GOMES JR, JALIHAL e MENDIONDO, 2024), além de ser um dos métodos de distribuição temporal de chuvas de projeto incluso dentro das funcionalidades do modelo HydroPol2D (GOMES JR *et al.*, 2024a; GOMES JR *et al.*, 2023). Por último, a intensidade das chuvas foi calculada por meio de uma IDF atual, com intuito de representar eventos intensos que ocorreram e ocorrem na bacia, e IDFs futuras, ajustadas para incorporar os efeitos das mudanças climáticas nas precipitações, todas para TRs de 100, 50, 25 e 10 anos.

##### 4.4.1 IDF Atual

Para a análise de eventos extremos atuais foi escolhida a IDF gerada por Gomes Jr. *et al.* (2021), cujos parâmetros têm os seguintes valores:  $a$  de 819,67;  $b$  de 0,1388;  $c$  de 10,88;  $d$  de 0,75. No estudo em questão, a IDF foi desenvolvida uma nova curva IDF atualizada com dados recentes, em comparação às IDFs já consolidadas de Barbassa (1991) e Righetto (1998),

por meio da avaliação de combinações de distribuições de frequência empíricas com distribuições teóricas.

A IDF desse estudo foi escolhida para representar os eventos extremos atuais por ser uma das IDFs mais recentes desenvolvidas para São Carlos, por ser ajustada para diferentes tempos de retorno e duração de chuvas com objetivo de trazer maior margem de segurança para projetos hidráulicos e consequentemente uma melhor gestão para riscos de enchentes, especialmente em pequenas bacias (GOMES JR. *et al.*, 2021).

#### 4.4.2 IDFs de mudanças climáticas

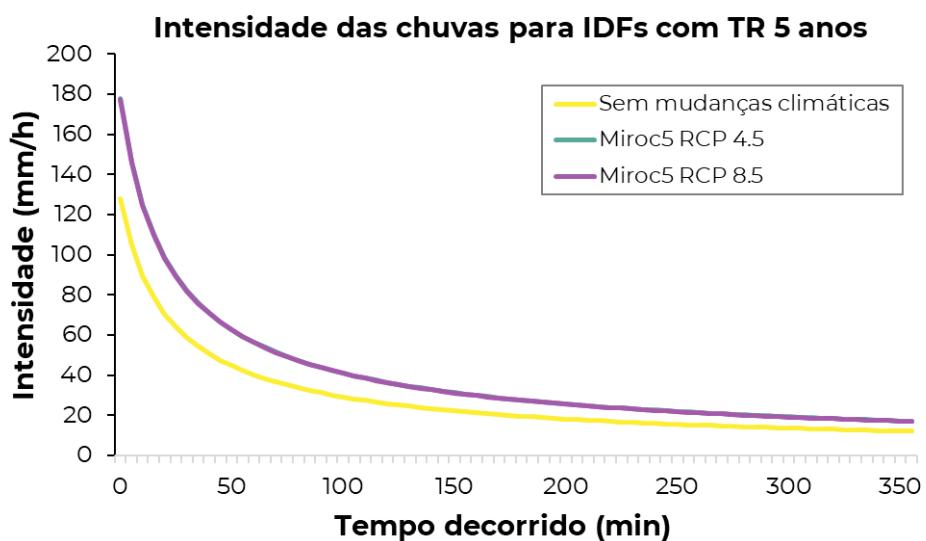
Em um cenário global de alterações da temperatura média do planeta e, consequentemente, do regime de chuvas, se torna necessário o desenvolvimento de uma metodologia de previsão de incorpore a expectativa de mudanças climáticas para cenários futuros. Para isso, são desenvolvidos modelos como os Modelos de Circulação Global (GCM) que modelam processos climáticos em cenários de aumento de concentração de gases do efeito estufa na atmosfera (IPCC, 2007) ou adaptações desse modelo para escala regional, por meio dos Modelos Regionais de Clima (RCM). São utilizados processos de downscaling para transformar modelos globais em regionais como o modelo ETA-MIROC5 desenvolvido pelo INPE-PROJETA (CHOU *et al.*, 2014; LYRA *et al.*, 2018) para os cenários RCP 4.5 (emissões moderadas de carbono) e 8.5 (altas emissões de carbono) de forçante radioativa (ALMAGRO *et al.*, 2020).

O ETA reproduz as condições climáticas do passado e do futuro para a América do Sul, enquanto o MIROC5 atua como um modelo climático global que serve como condição de contorno (SILVA *et al.*, 2021). Por último são realizados procedimentos de correção de viés, como os de PT (Percentual de Transformação) e DM (Downscaling Múltiplo). O método PT ajusta os dados de precipitação projetados por meio de uma transformação percentual e tem o objetivo de melhorar as previsões do modelo com as medições históricas observadas. Já o DM foca em incluir a combinação de diferentes métodos estatísticos e dinâmicos para melhorar a resolução espacial e temporal dos dados climáticos (JOCHELAVICIUS *et al.*, 2021).

O estudo de Jochelavicius *et al.* (2021) utiliza os modelos ETA-MIROC5 nos cenários RCP 4.5 e 8.5 e HadGEM no cenário de RCP 4.5, com procedimentos de correção de viés DM e PT, para gerar IDFs adaptadas para a cidade de São Carlos (SP) nos períodos de análise de 2015 a 2050 e 2051 a 2099. Essas IDFs foram aplicadas para tempos de retorno (TR) de 5 e 50 anos e as intensidades de precipitação obtidas foram comparadas com as intensidades obtidas

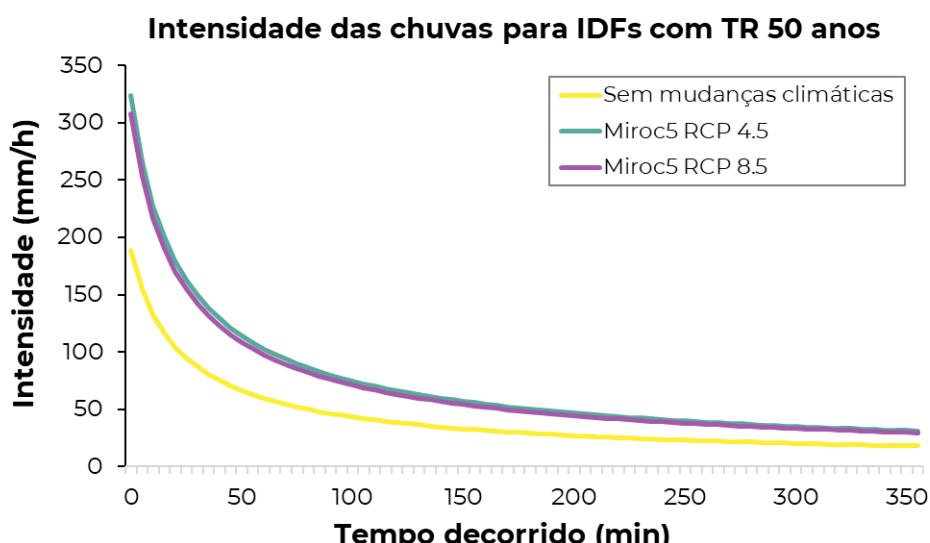
por uma IDF atual (CAVALCANTI; SILVA; REIS, 2015). Por meio dessa comparação, o estudo concluiu que o cenário de maiores incrementos de intensidade de precipitação para grandes tempos de retorno foram o MIROC5 RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2051 a 2099 com o modelo de correção de viés PT. Nas Figura 19 e Figura 20 é possível ver a comparação das IDFs feita por Jochelavicius *et al.* (2021) entre a IDF atual escolhida e as IDFs futuras dos cenários de maiores intensidades de chuva (período de 2051 a 2099 PT) para os TRs de 5 e 50 anos, respectivamente.

Figura 19 - Comparação das IDFs para o período atual e para o período de 2051 a 2099 com mudanças climáticas PT para TR 5 anos.



Fonte: Adaptado de Jochelavicius *et al.*, 2021.

Figura 20 - Comparação das IDFs para o período atual e para o período de 2051 a 2099 com mudanças climáticas PT para TR 50 anos.



Fonte: Adaptado de Jochelavicius *et al.*, 2021.

Logo, como o objetivo deste estudo é analisar o panorama de eventos extremos, foram utilizadas as IDFs propostas para esses dois cenários (Tabela 5).

Tabela 5 - IDFs propostas para os modelos MIROC5 RCP 4.5 e RCP 8.5 (PT) para o período de 2051 a 2099

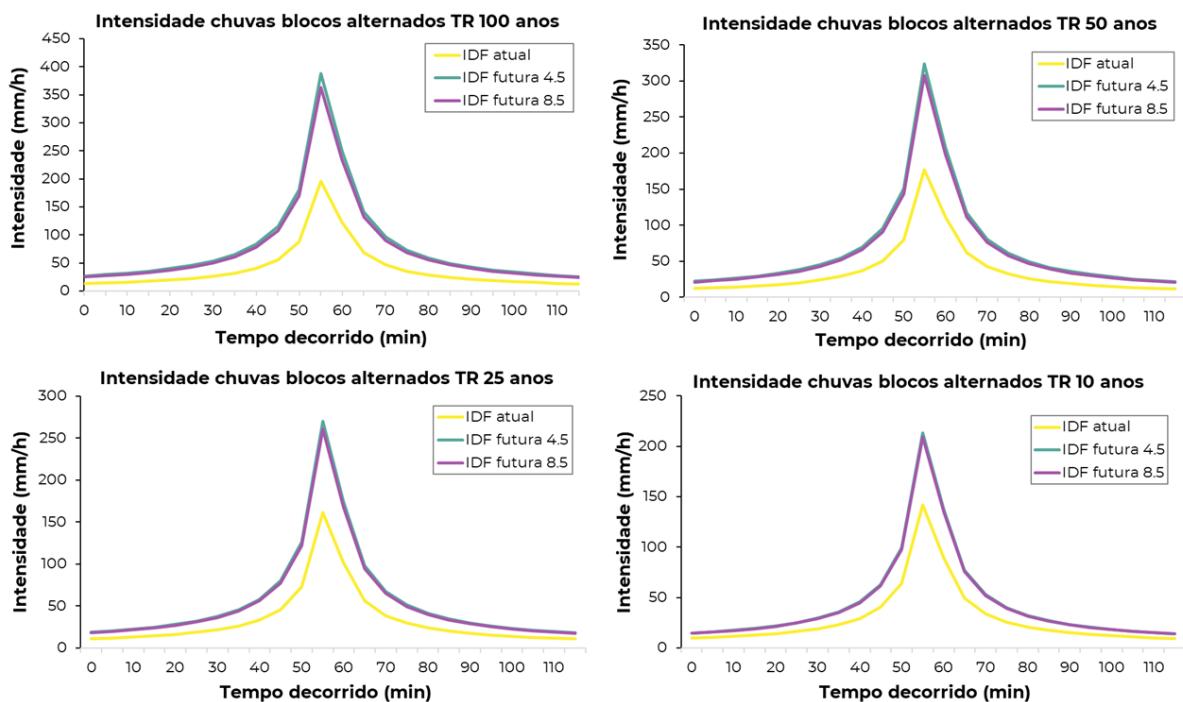
	MIROC5 RCP 4.5 PT	MIROC5 RCP 8.5 PT
a	1007,77	1036,49
b	0,26	0,24
c	12,00	12,00
d	0,76	0,76

Fonte: Adaptado de JOCHELAVICIUS *et al.*, 2021.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o desenvolvimento das etapas explicadas no tópico de metodologia, os principais resultados gerados pelo modelo foram mapas de profundidades máximas para cada cenário avaliado (atual, MIROC5 RCP 4.5 PT e MIROC5 RCP 8.5 PT). Por meio desses mapas foram realizadas outras análises, como as diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os atuais e as áreas inundadas totais para cada cenário. Esses cenários de alterações nas áreas e níveis de inundação refletem as mudanças de intensidade das chuvas geradas para cada IDF e TR, as intensidades das chuvas para cada cenário separadas por TR podem ser vistas na Figura 21.

Figura 21 – Intensidades das chuvas geradas pelas IDFs para cada tempo de retorno e sua distribuição por blocos alternados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

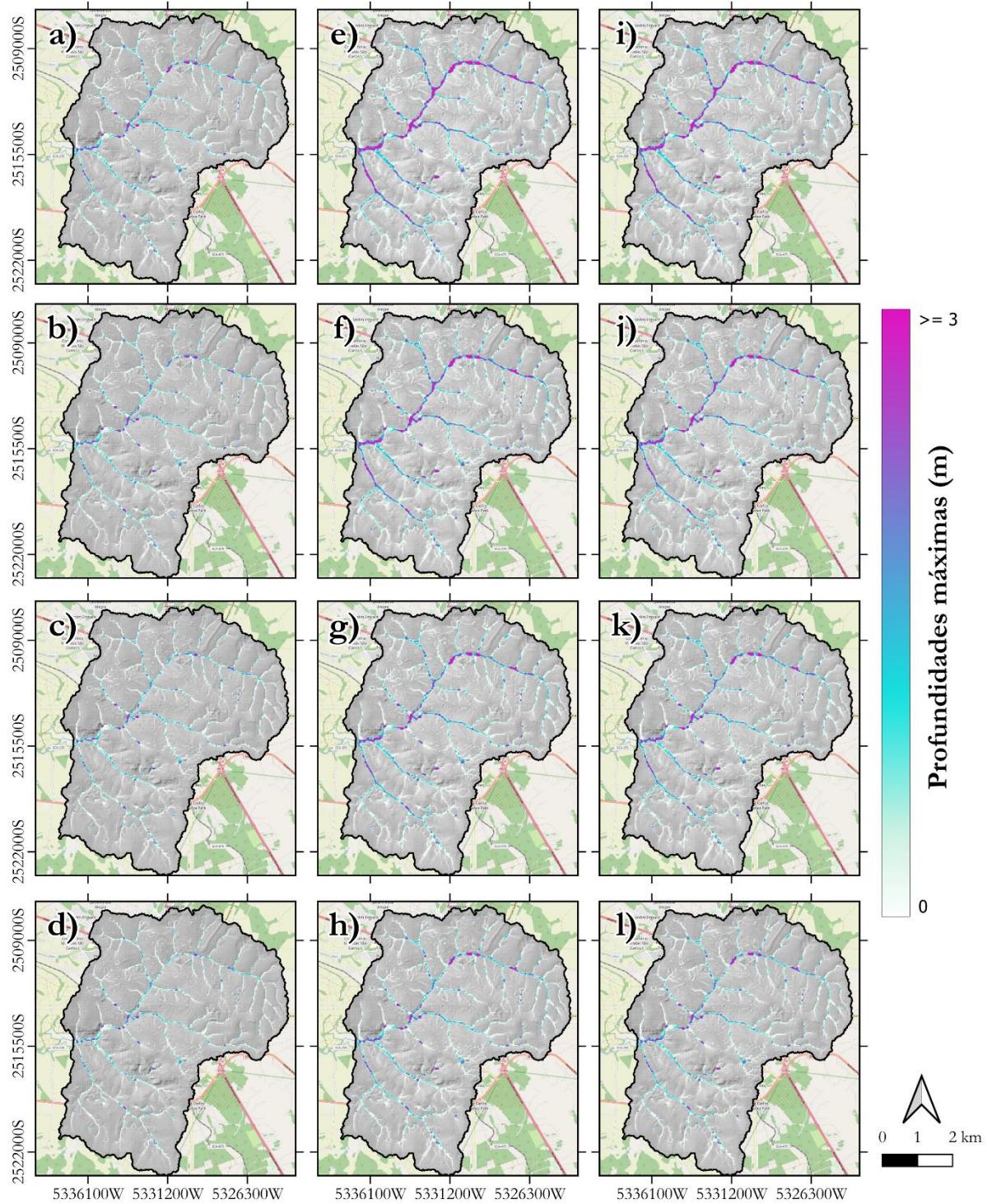
### 5.1 PROFUNDIDADES MÁXIMAS

Os valores obtidos para profundidade máxima variaram entre 0 (para áreas não inundadas) e 6,72 m, valor máximo obtido para o cenário de MIROC5 RCP 4.5. Para a IDF atual, as profundidades máximas atingidas na bacia foram de 5,64, 5,54, 5,45 e 5,33 m, para a IDF MIROC5 RCP 4.5 PT as profundidades máximas foram de 6,72, 6,40, 6,08 e 5,77 m e para

a IDF MIROC5 RCP 8.5 PT as profundidades máximas foram de 6,61, 6,31, 6,02 e 5,75 m, respectivamente para os TRs de 100, 50, 25 e 10 anos.

Para facilitar a visualização das áreas com valores críticos de profundidade e a variação dessas áreas nos diferentes cenários, foi selecionado um valor crítico de profundidade d'água igual a 3 m. Esse valor foi escolhido por ser uma altura comum para casas e também por ser, aproximadamente, metade do valor médio das maiores profundidades de cada cenário. Logo, todos os valores  $\geq 3$  m foram representados da mesma forma no mapa, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Mapas de profundidades máximas geradas para cada cenário. Os mapas de a) a d) são dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são do cenário futuro MIROC5 RCP 4.5 PT e os mapas de i) a l) são do cenário futuro MIROC5 RCP 8.5 PT, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Como esperado, as regiões que apresentaram maiores profundidades, em todos os cenários, foram as regiões dos rios e córregos da bacia, assim como os locais próximos a eles. Os locais de profundidades críticas (acima de 3 m) foram, principalmente, pontos de junção entre córregos ou entre córregos e o rio Monjolinho e áreas de maior declividade na bacia (declividade ondulada). Isso porque, com a junção de rios ocorre o aumento da quantidade de água no canal e, consequentemente, da profundidade. Locais de maior declividade tendem a escoar a água mais rapidamente para os pontos baixos, geralmente mais planos, contribuindo, também, para o aumento da profundidade nas áreas de junção dos escoamentos.

Além disso, ao se analisar as regiões de profundidades críticas de acordo com o uso e ocupação da bacia, pode-se perceber que a classe de uso mais afetada por profundidades acima de 3 m é “Árvores”, seguido pelo uso de “Construção” e “Plantação”. As áreas que apresentaram profundidades críticas variam de 0,1 km<sup>2</sup> (para o cenário de IDF atual e TR 10) e 1,31 km<sup>2</sup> (para o cenário de IDF MIROC5 RCP 4.5 TR 100) e a porcentagem do tipo de uso mais afetado varia de acordo com cada cenário. No geral, a classificação de uso “Árvores” representou de 58 a 68% da área total das profundidades máximas críticas, enquanto as Construções e Plantações representaram 22 a 40% e 2 a 6%, respectivamente.

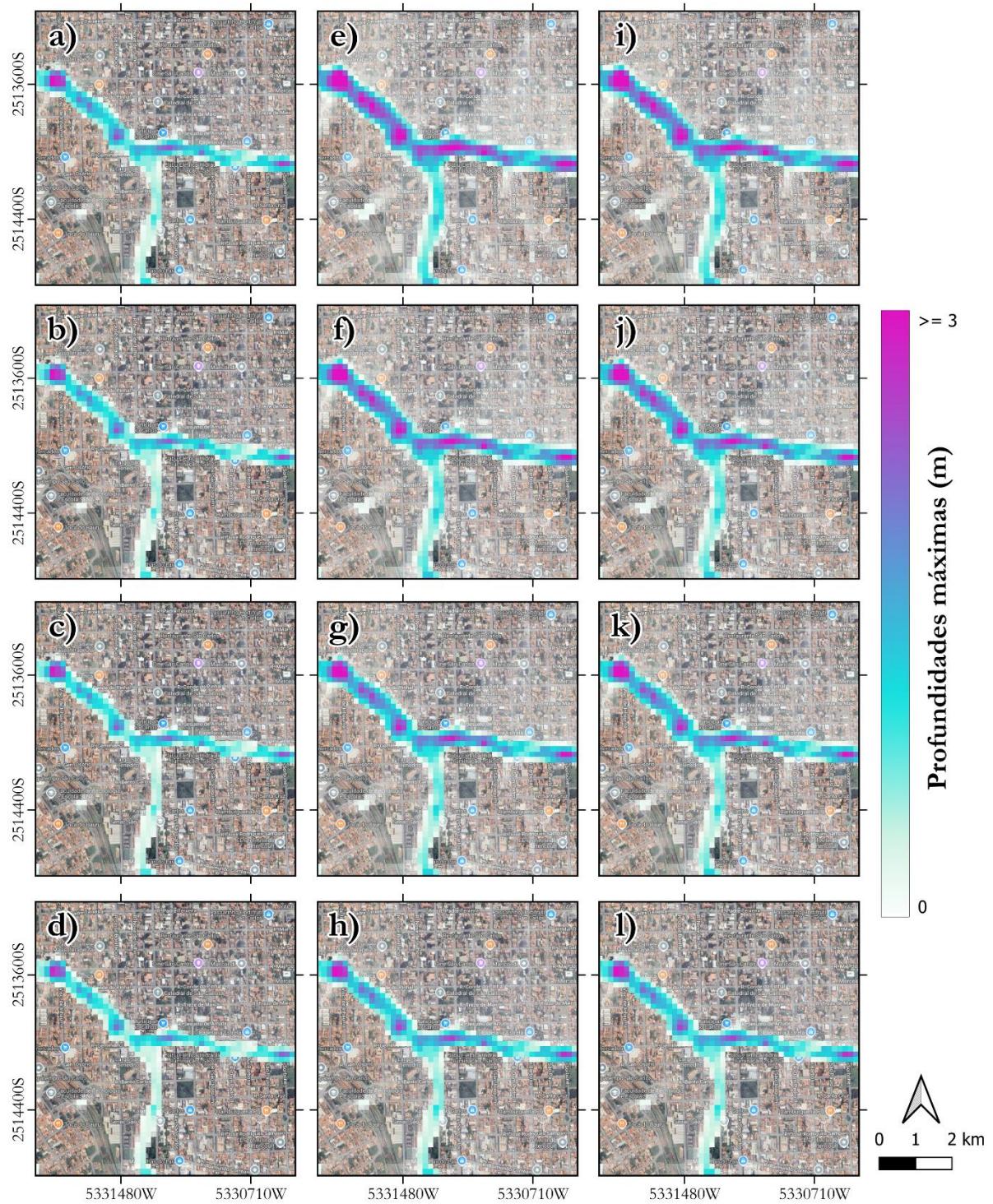
As Árvores são a classe de uso mais afetada porque, como citado no tópico 4.1.2 de caracterização da bacia, elas se localizam, principalmente, perto de corpos hídricos, que são os locais de maior profundidade, existem, também, áreas de plantação próximas aos rios, o que faz com que esse uso também seja afetado. Já a porcentagem da classe de Construção está relacionada ao fato da área de estudo ser uma região urbana impermeabilizada, contribuindo para a geração de escoamento superficial rápido que acumula a água nos canais, córregos e rios urbanos próximos. Por esse mesmo motivo, o cenário “IDF atual e TR 10” foi o que apresentou maior porcentagem de regiões de Construção afetadas em relação ao total de área crítica, já que áreas construídas tendem a sofrer com inundações até em tempos de retornos baixos, algo que é comum na cidade de São Carlos.

Ademais, é de interesse do estudo realizar a análise de pontos de inundaçõe recorrentes para entender como as profundidades se comportam de acordo em cada cenário. Eiras (2017) realizou um trabalho de mapeamento de suscetibilidade a eventos perigosos de natureza geológica e hidrológica para a cidade de São Carlos. No estudo em questão foi analisada a frequência dos eventos históricos (482 registros entre os anos de 1965 e 2016) em função da área. Como resultado, as enchentes/inundações foram os tipos de eventos perigosos mais frequentes e os principais locais de grande incidência foram a região do Mercado municipal, a Rotatória do cristo e Kartódromo (EIRAS, 2017). Logo, foram analisados os resultados de

profundidades máximas para essas três regiões nos diferentes cenários, assim como imagens de eventos reais de inundações nesses locais.

Para a região da baixada do Mercado municipal (Figura 23), os locais afetados por profundidades críticas em todos os cenários são o trecho da rua Geminiano Costa em frente ao Mercado municipal e ao Magazine Luiza e na esquina da Avenida Comendador Alfredo Maffei com a rua Visconde de Inhaúma. Os panoramas que apresentam mais locais com profundidades  $\geq 3$  m são os de mudanças climáticas, especialmente para TR altos (50 e 100 anos). Para a IDF atual as profundidades máximas só atingem valores críticos em determinados pontos ao longo dos canais. Esse resultado sugere que, mesmo com profundidades menores, os eventos atuais já causam danos consideráveis (Figura 24); assim, os eventos futuros com as mudanças climáticas provavelmente resultarão em impactos ainda mais severos.

Figura 23 - Mapas de profundidades máximas geradas para cada cenário na região do Mercado municipal. Os mapas de a) a d) são dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são do cenário futuro MIROC5 RCP 4.5 PT e os mapas de i) a l) são do cenário futuro MIROC5 RCP 8.5 PT, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

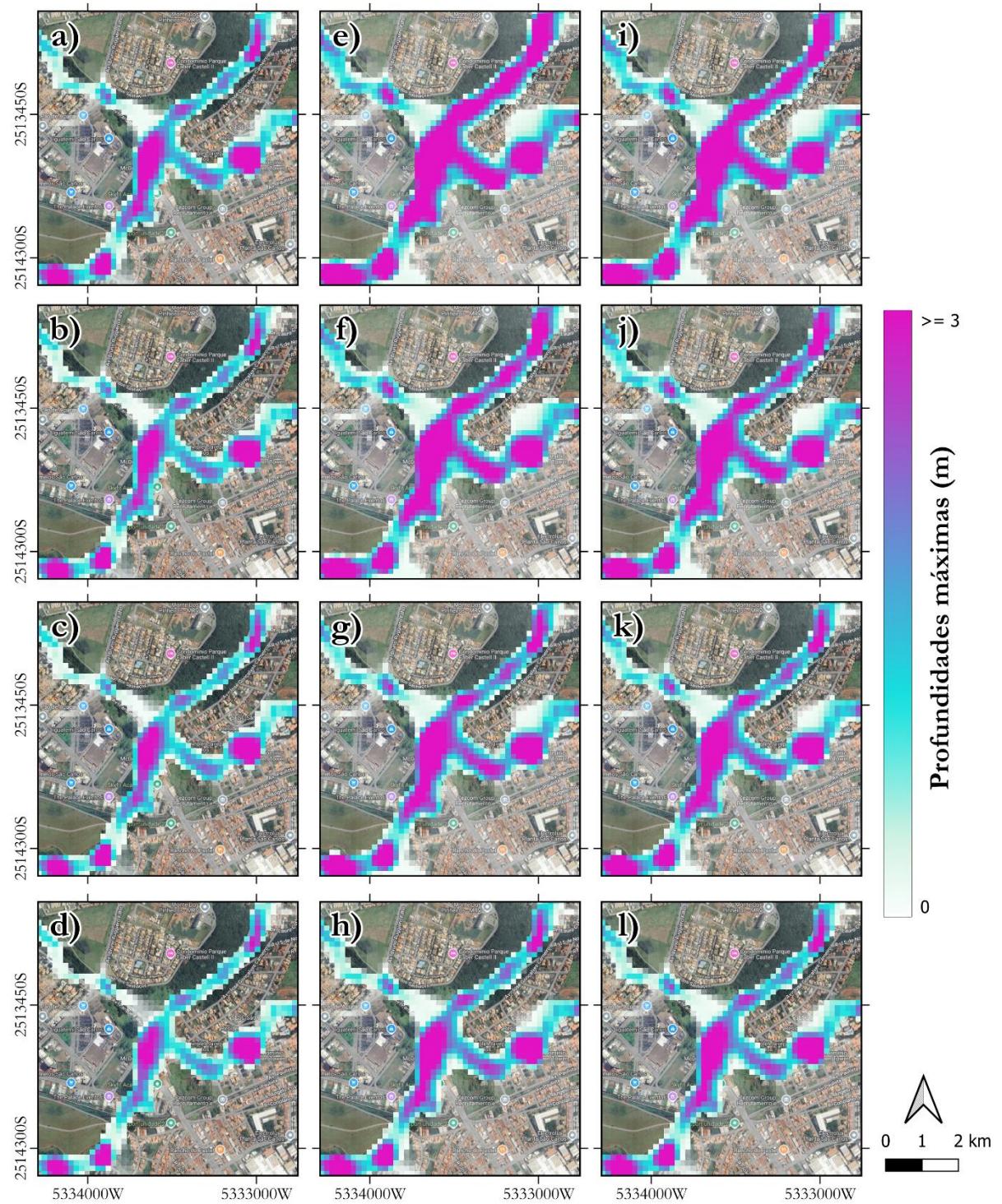
Figura 24 - Eventos reais de inundação no Mercado municipal sendo a) e d) Evento em 07/02/2024; b) Evento em 28/12/2022; c) Após o evento de 28/12/2022



Fonte: A Cidade On, 2024; G1, 2022; MAXIMINO, 2022; G1, 2024.

Na Rotatória do cristo (Figura 25) pode ser observado que para todos os cenários ocorrem profundidades críticas (acima de 3 m), nos cenários mais extremos (IDF MIROC5 RCP 4.5 TR 100 e IDF MIROC5 RCP 8.5 TR 100) quase toda a região dos corpos hídricos apresenta profundidades críticas. Esse resultado faz sentido dada a localização da Rotatória, já que essa região é o encontro do rio Monjolinho com os exutórios da bacia do Mineirinho e do Gregório, duas bacias extremamente urbanizadas. Ademais, como pode ser visto nos resultados do modelo e na Figura 26, essa zona tem se mostrado problemática para o cenário atual até mesmo em chuvas de tempo de retorno baixo.

Figura 25 - Mapas de profundidades máximas geradas para cada cenário na região da Rotatória do Cristo. Os mapas de a) a d) são dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são do cenário futuro MIROC5 RCP 4.5 PT e os mapas de i) a l) são do cenário futuro MIROC5 RCP 8.5 PT, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 26 - Eventos reais de inundações na Rotatória do Cristo sendo a) Evento em 28/12/2022; b) e d) Evento em 13/11/2020; c) Após o evento de 28/12/2022

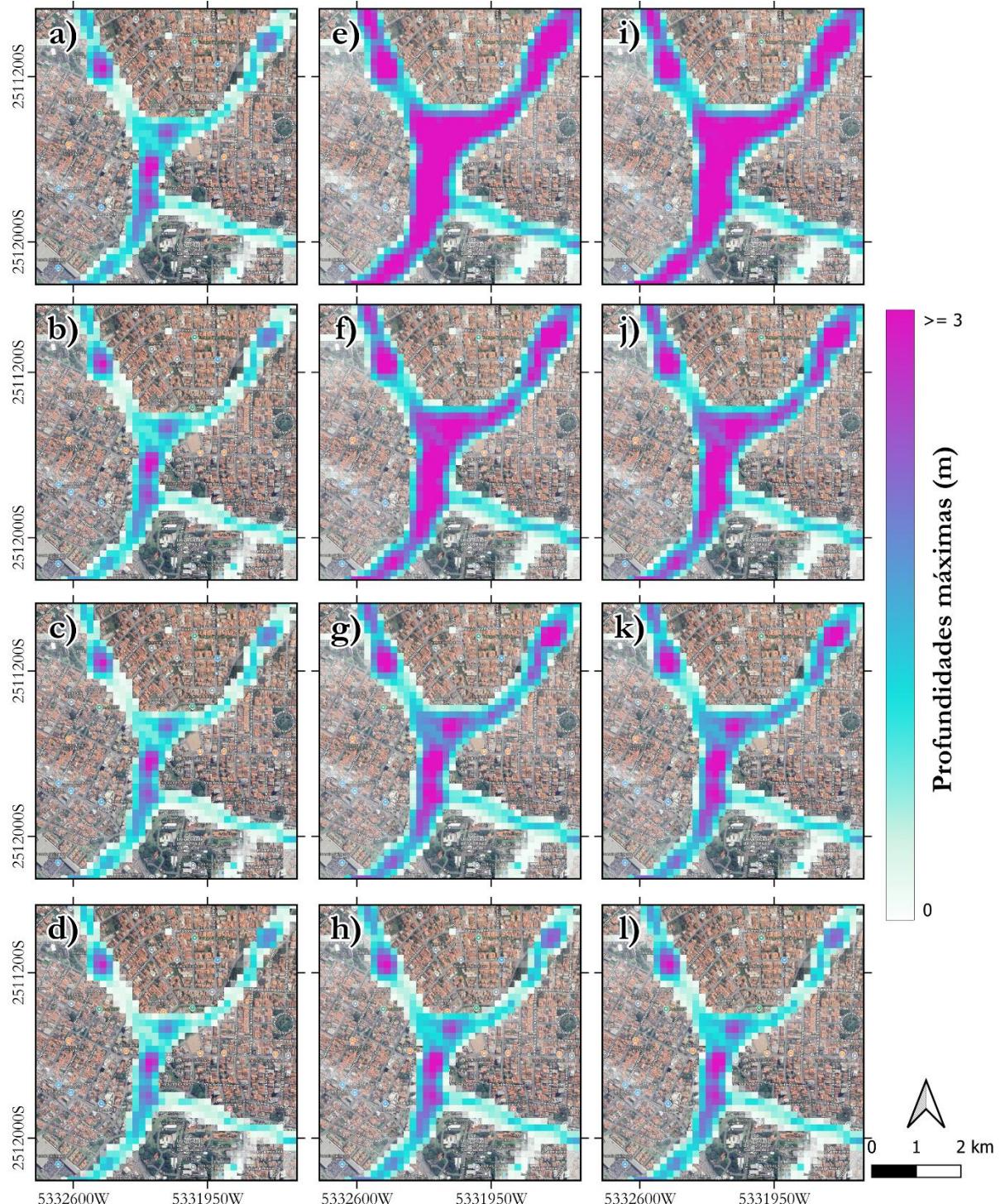


Fontes: G1, 2022; CHIMIRRI, 2020; São Carlos Agora, 2023.

Nas proximidades da praça do Kartódromo, é perceptível a diferença nas áreas com profundidade crítica entre os cenários de IDF atual e os cenários futuros, especialmente para TRs de 50 e 100 anos (Figura 27). Atualmente, essa região já enfrenta inundações (Figura 28), pois funciona como ponto de junção do exutório da bacia Santa Maria do Leme com o rio Monjolinho, além de receber, mais adiante, as águas da bacia do Tijucão Preto. No entanto, segundo o modelo, as profundidades na maior parte da área não chegam a alcançar 3 m.

Logo, a mudança prevista para os cenários futuros pode ser explicada pela saturação da capacidade de infiltração do solo na bacia. Como as bacias do Santa Maria do Leme e da APREM (Áreas de Proteção e Recuperação de Mananciais de Abastecimento Públco) do Monjolinho são pouco urbanizadas, boa parte da água das chuvas menos intensas infiltra, o que deixa de ocorrer para chuvas mais intensas como as de TRs maiores (100 e 50 anos) nas IDFs futuras, levando a um aumento do escoamento superficial da água da chuva e potencial para inundações mais severas.

Figura 27 - Mapas de profundidades máximas geradas para cada cenário na região da praça do Kartódromo. Os mapas de a) a d) são dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são do cenário futuro MIROC5 RCP 4.5 PT e os mapas de i) a l) são do cenário futuro MIROC5 RCP 8.5 PT, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 28 - Eventos reais de inundação na região do Kartódromo a) Evento em 23/11/2015; b) Evento em 10/11/2018; c) Evento de 28/12/2022

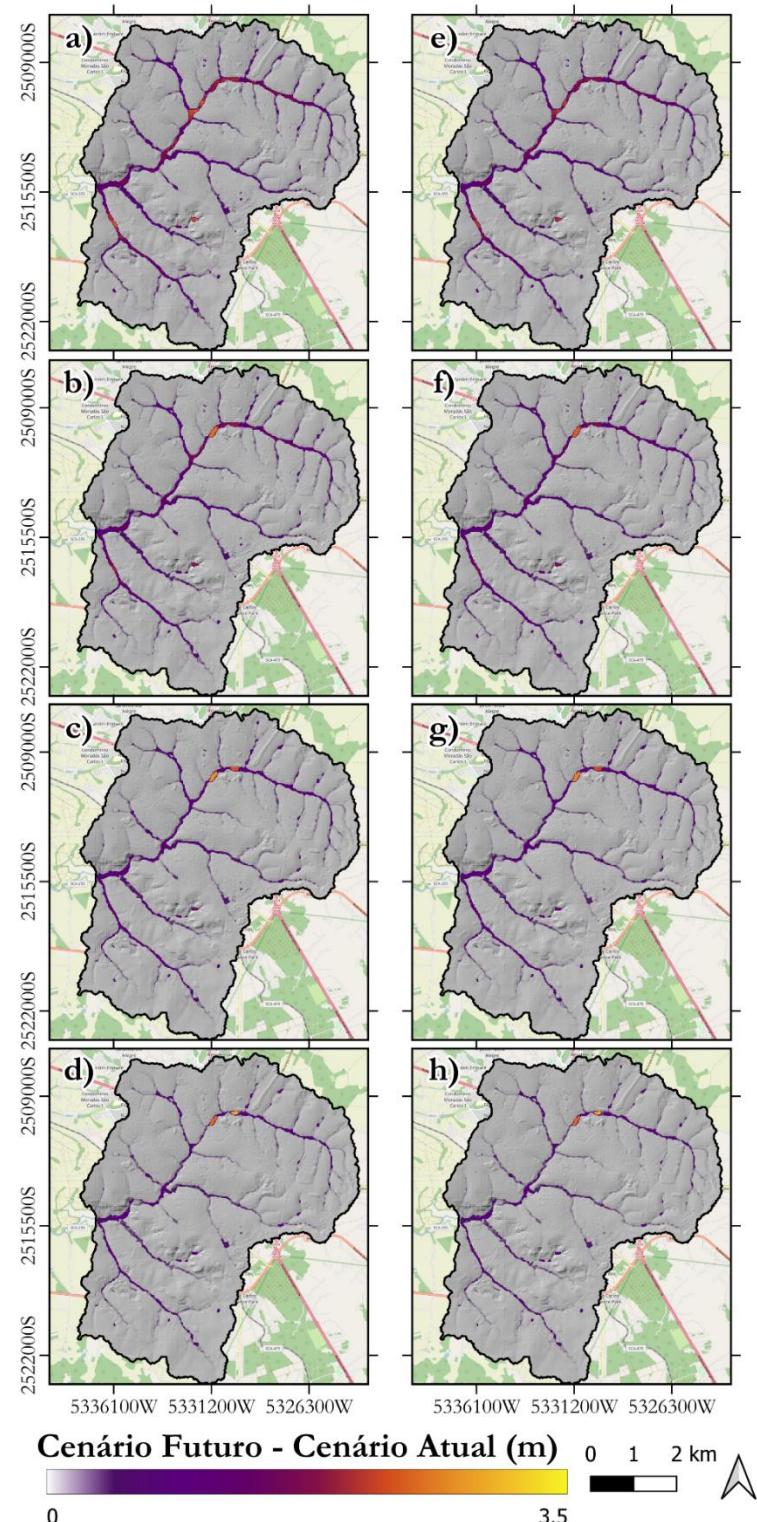


Fontes: G1, 2015; DUCH, 2018; São Carlos Agora, 2022.

## 5.2 DIFERENÇAS DE PROFUNDIDADES MÁXIMAS

A próxima análise realizada foi a de diferença de profundidade máximas entre os cenários futuros e os cenários atuais. A Figura 29 foi gerada com objetivo de entender quais locais estão propensos ao aumento de profundidade de inundação ou, em alguns casos, a apresentarem novas ocorrências de inundação. Avaliações desse tipo são importantes porque áreas que raramente enfrentam inundações ou onde elas ocorrem com menor intensidade tendem a não ter a infraestrutura adequada ou planos de ação para esses eventos (KYNE & KYNE, 2024). Com as mudanças climáticas, essas regiões podem se tornar ainda mais vulneráveis, pois a falta de preparo aumenta o risco de danos em futuros eventos extremos.

Figura 29 - Diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os eventos atuais. Os mapas de a) a d) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 4.5 PT e dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 8.5 PT e dos eventos atuais, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente

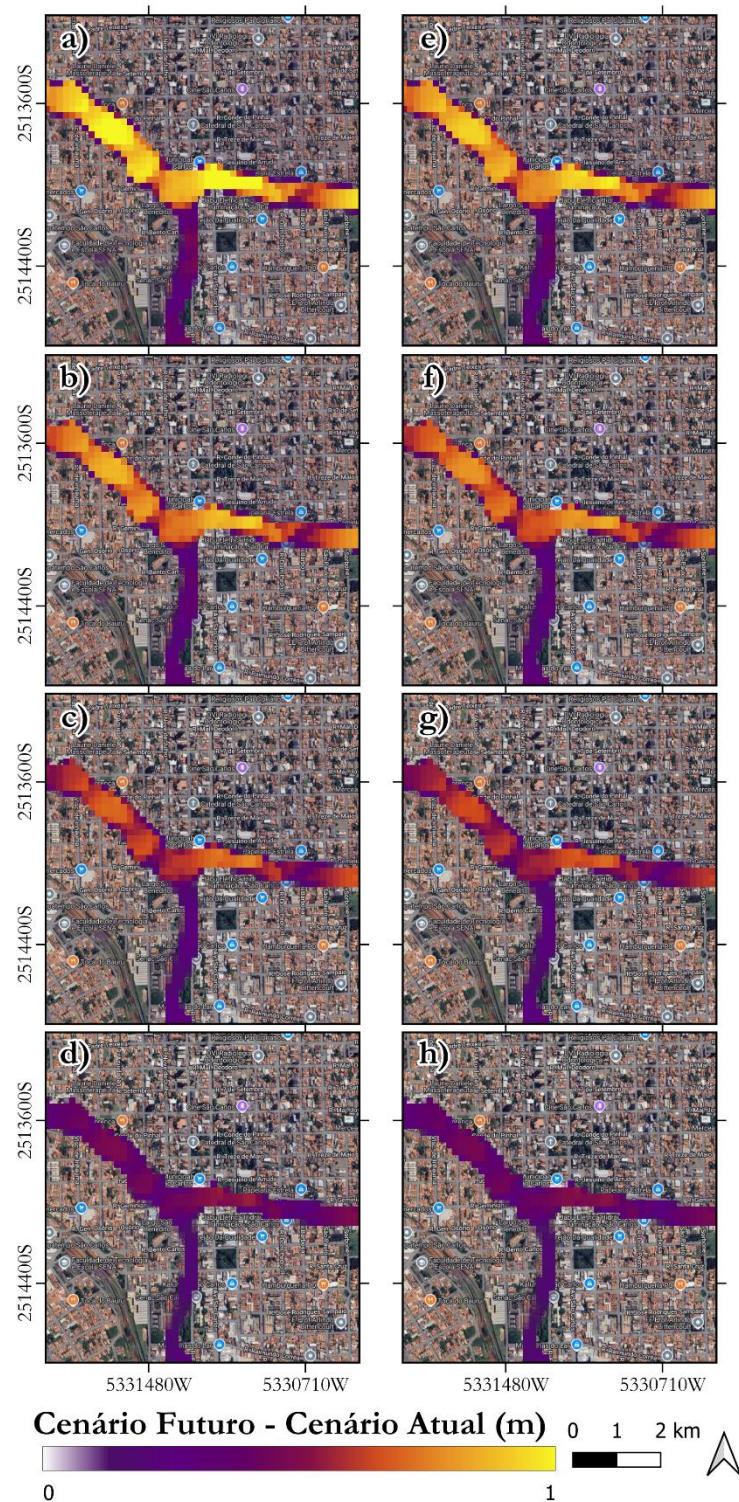


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Para o TR de 100 anos, os principais pontos com aumento significativo de profundidade ( $>2$  m) incluem o encontro do exutório da bacia Santa Maria do Leme e da bacia Tijuco Preto com o rio Monjolinho (próximo à praça do Kartódromo), o Trevo da rodovia SP-318, a UFSCar (próximo à represa do Monjolinho) e a foz da bacia do Água Fria. Para o TR de 50 anos as mesmas regiões do TR de 100 anos sofreram aumento da profundidade máxima, porém em menores proporções, o aumento de profundidade mais notável ocorre no Trevo da SP-318. Nos TRs de 25 e 10 anos, as maiores diferenças de profundidade, superiores a 2,5 m, foram registradas apenas nas proximidades do Trevo da SP-318 e na represa do Monjolinho. Essas diferenças provavelmente são devido à saturação da capacidade de infiltração do solo, como explicado no tópico anterior, especialmente em bacias pouco urbanizadas, como Santa Maria do Leme, APREM do Monjolinho e Água Fria.

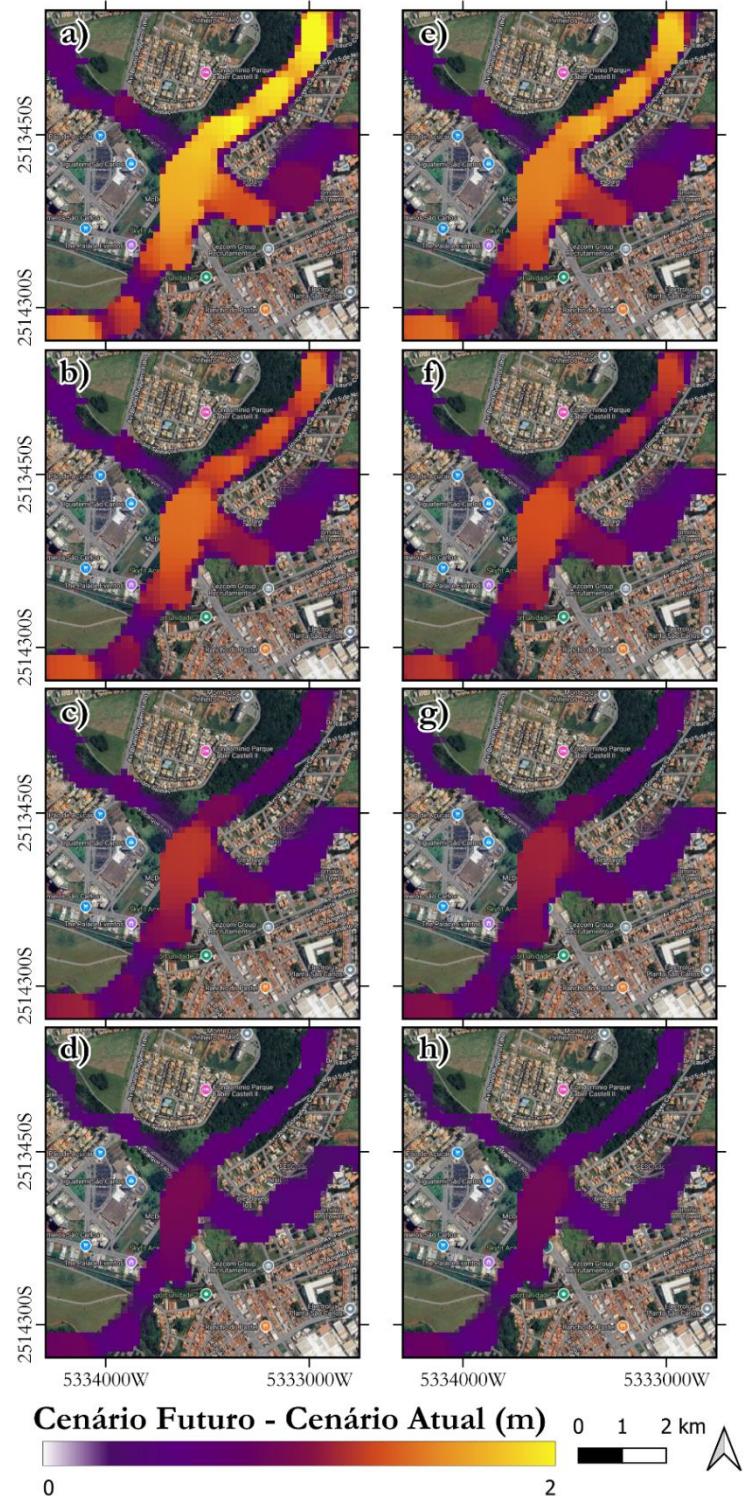
A mesma análise foi feita com foco nos pontos de inundações frequentes, Mercado municipal (Figura 30), Rotatória do cristo (Figura 31) e praça do Kartódromo (Figura 32), confirmando os resultados explicitados no parágrafo anterior. Para a região da baixada do Mercado municipal não há grandes diferenças de profundidade entre os cenários futuros e o atual para todos os TRs, com valores abaixo de 1,5 m. Para a Rotatória do cristo também não há grande mudança de profundidade para os TRs de 50, 25 e 10 anos (diferença  $< 1,5$  m), entretanto para o TR de 100 anos, os dois cenários futuros apontam diferenças de até 2 m para alguns pontos da região. Finalmente, para as proximidades da praça do Kartódromo os cenários de TRs mais baixos (25 e 10 anos) não apresentam mudanças significativas, porém, para os TRs de 50 e 100 anos as diferenças de profundidade podem variar em até 2,5 m.

Figura 30 - Diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os eventos atuais para a baixada do Mercado municipal. Os mapas de a) a d) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 4.5 PT e dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 8.5 PT e dos eventos atuais, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente



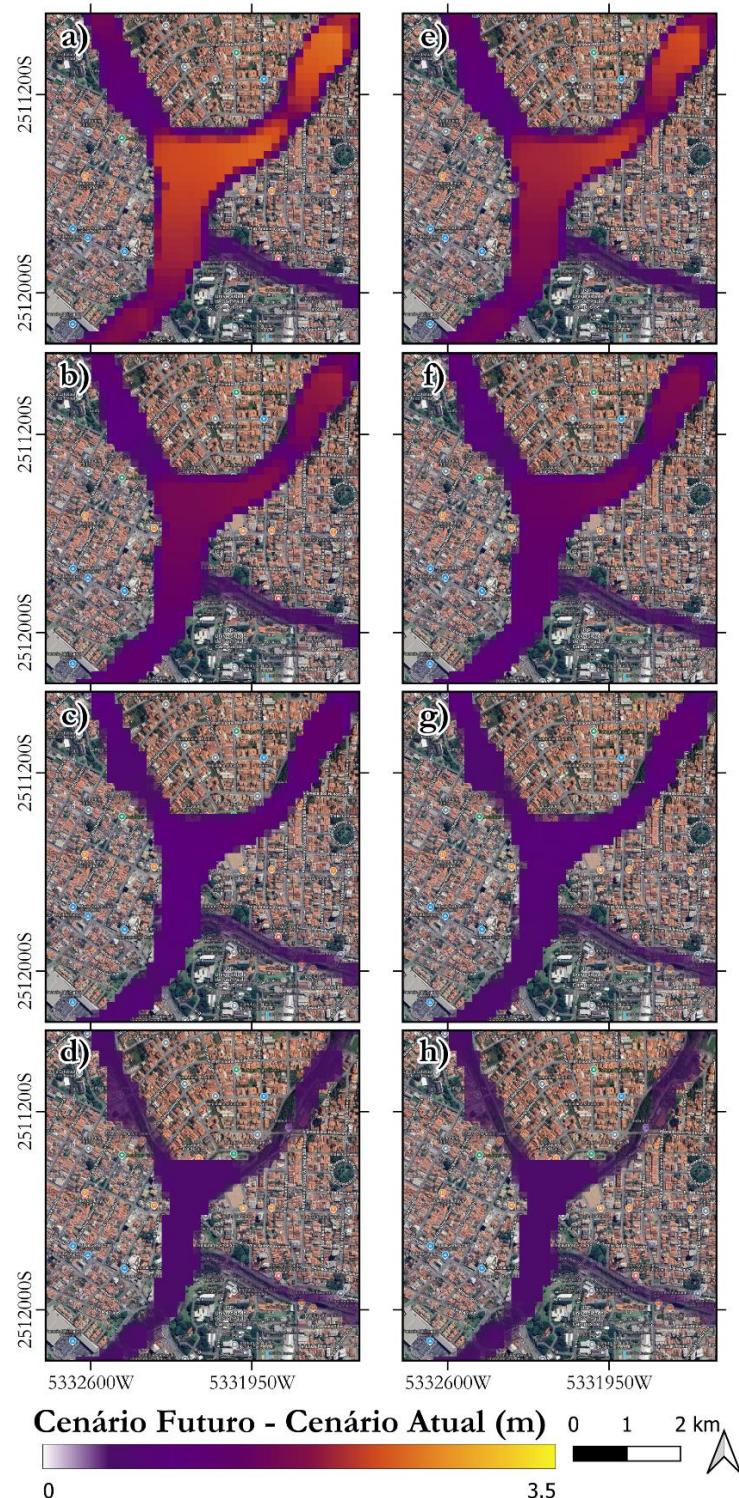
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 31 - Diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os eventos atuais para a Rotatória do cristo. Os mapas de a) a d) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 4.5 PT e dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 8.5 PT e dos eventos atuais, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 32 - Diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os eventos atuais para a praça do Kartódromo. Os mapas de a) a d) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 4.5 PT e dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são da diferença entre os cenários de MIROC5 RCP 8.5 PT e dos eventos atuais, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente

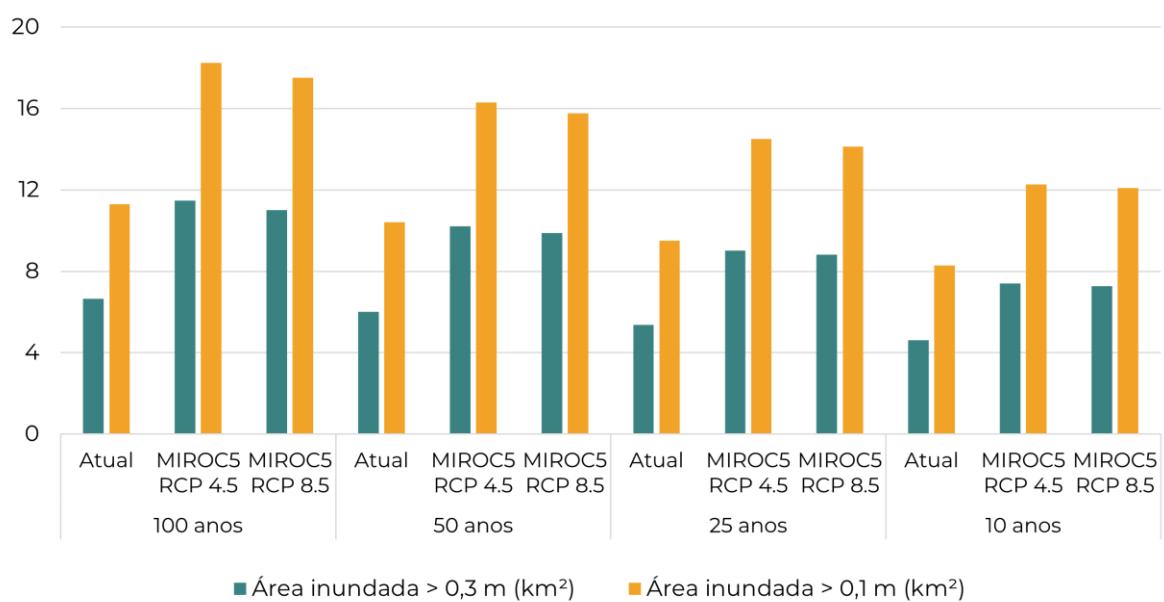


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 5.3 ÁREAS INUNDADAS TOTAIS

Com objetivo de compreender se houve aumento das áreas totais inundadas entre os cenários de IDF atual e IDFs futuras foram calculadas as áreas para quais o modelo apontou profundidades de inundação maiores que 0,3 e 0,1 m. O valor de 0,1 m foi escolhido porque é o menor valor de sensibilidade que o modelo consegue captar, logo, é o valor que capta a maior área de impacto possível. Já a profundidade de 0,3 m foi escolhida para considerar as imprecisões e incertezas do modelo, por exemplo, a baixa discretização espacial do MDE e por ser um valor comumente utilizado em estudos de inundação (GOMES JR *et al.*, 2024). As áreas totais inundadas para diferentes cenários podem ser vistas na Figura 33.

Figura 33 - Áreas totais inundadas para todos os cenários para profundidades maiores que 0,3 ou 0,1 m



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Analizando os cenários futuros, para TR de 100 anos, a área inundada acima de 0,1 m atinge aproximadamente 18 km<sup>2</sup>, enquanto a área inundada acima de 0,3 m chega a cerca de 12 km<sup>2</sup>. No TR de 50 anos o modelo aponta áreas entre 8 e 16 km<sup>2</sup> para os cenários de MIROC5 RCP 4.5 e MIROC5 RCP 8.5. Nesses mesmos cenários, para TR de 25 e 10 anos as áreas variam entre 8 km<sup>2</sup> e 14 km<sup>2</sup> e 7 km<sup>2</sup> e 12 km<sup>2</sup>, respectivamente. Para os cenários de IDF atual as áreas inundadas variam de 4 km<sup>2</sup> a 6 km<sup>2</sup> quando analisados valores > 0,3 m e de 8 km<sup>2</sup> a aproximadamente 12 km<sup>2</sup> para profundidades > 0,1 m. Para as áreas com profundidades > 0,3

m o aumento médio de área entre diferentes TRs é de 1,3 km<sup>2</sup> para cenários futuros e de 0,7 km<sup>2</sup> para o cenário atual. Já para as áreas com profundidades > 0,1 m o aumento médio de área entre diferentes TRs é de 1,9 km<sup>2</sup> para cenários futuros e de 1 km<sup>2</sup> para o cenário atual.

Visando facilitar a comparação entre as áreas inundadas totais para os cenários atuais e os cenários futuros foi feita uma tabela da porcentagem de aumento das áreas inundadas (Tabela 6).

Tabela 6 - Tabela de porcentagem de aumento de área inundada em comparação com o cenário atual

TR	IDF comparada	Porcentagem de aumento da área inundada > 0,3 m (%)	Porcentagem de aumento da área inundada > 0,1 m (%)
100	MIROC5 RCP 4.5	72,36	61,38
	MIROC5 RCP 8.5	65,38	55,05
50	MIROC5 RCP 4.5	70,10	56,38
	MIROC5 RCP 8.5	64,60	51,43
25	MIROC5 RCP 4.5	68,09	52,41
	MIROC5 RCP 8.5	64,06	48,54
10	MIROC5 RCP 4.5	60,83	48,08
	MIROC5 RCP 8.5	57,64	46,09

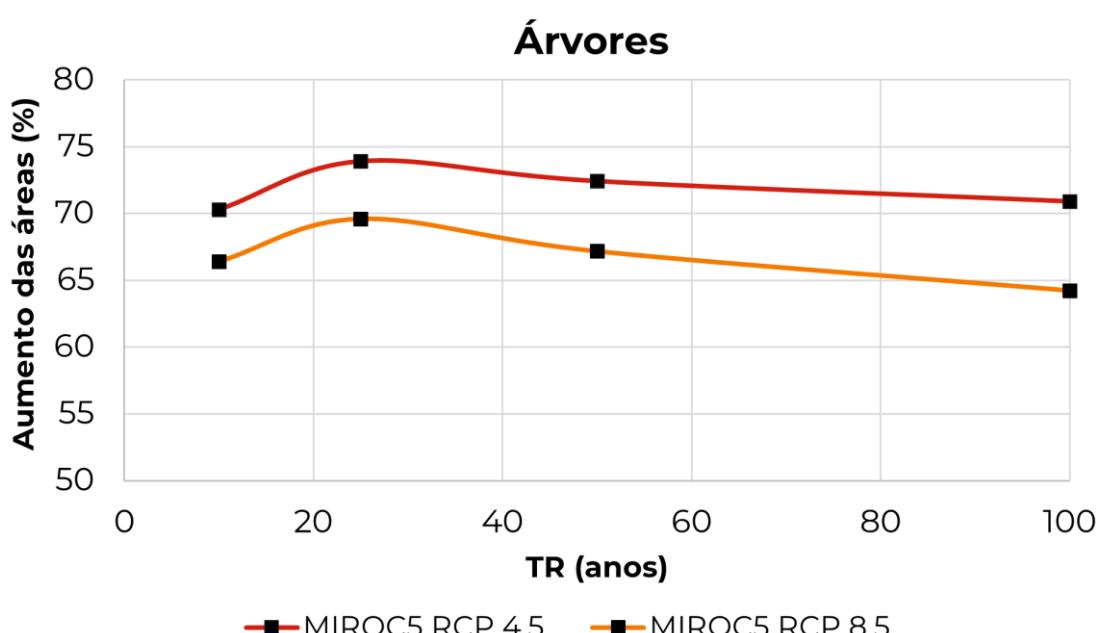
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Nota-se que, para profundidades superiores a 0,3 m, o incremento percentual é mais expressivo no período de retorno (TR) de 100 anos, alcançando até 72,36% no cenário MIROC5 RCP 4.5. Essa elevação diminui progressivamente à medida que o TR se reduz, chegando a 57,64% para o TR de 10 anos no cenário MIROC5 RCP 8.5. Esse mesmo padrão pode ser observado a análise de para profundidades acima de 0,1 m, com um aumento de 61,38% no TR de 100 anos (RCP 4.5) e 46,09% no TR de 10 anos (RCP 8.5).

Esses resultados indicam que, quanto maior o tempo de retorno, maior será a elevação percentual na área afetada por inundações em cenários futuros, especialmente em regiões com profundidade superior a 0,3 m. Os resultados também sugerem que as áreas inundadas pelo cenário de MIROC5 RCP 4.5 aumentam mais em porcentagem e, como visto na Figura 33, existem mais áreas inundadas para esse cenário.

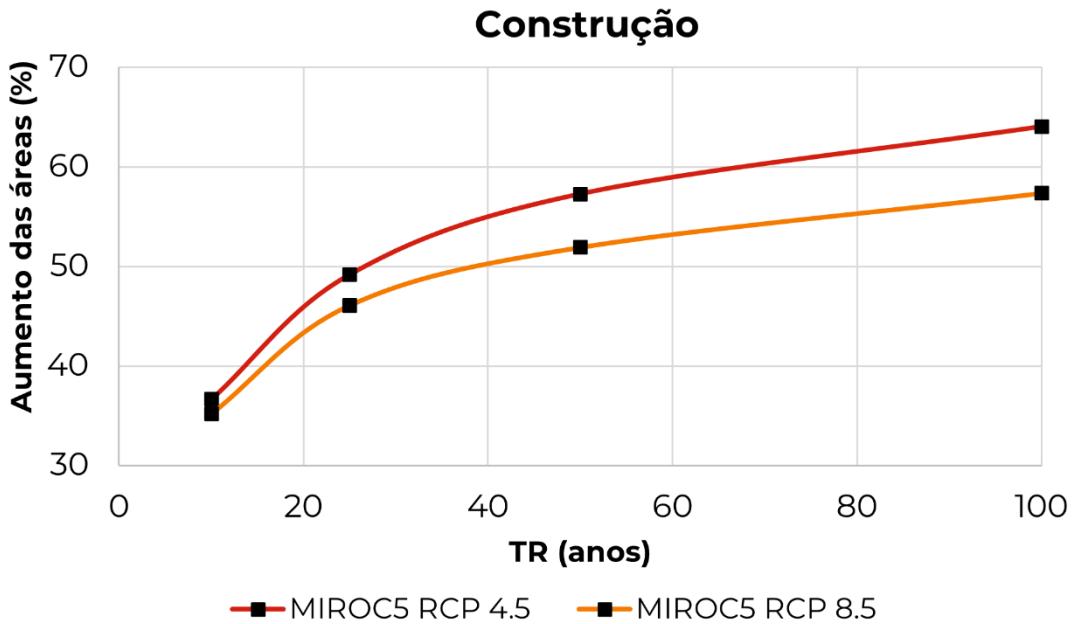
Por último foi realizado o estudo do aumento de áreas inundadas de acordo com o tipo de uso e ocupação do local. Para isso foram consideradas “áreas inundadas” apenas as áreas com profundidade máxima  $\geq 0,3$  m e as classes de uso árvores, construção e plantação, isto é, as mais presentes ao longo da bacia. Após calcular os valores das áreas inundadas totais para os três tipos de uso em diferentes cenários foram calculados os aumentos percentuais das áreas entre o cenário atual e os dois cenários futuros gerando as Figura 34, Figura 35 e Figura 36.

Figura 34 - Percentual de diferença entre os cenários atuais e os futuros para a classe de uso árvores



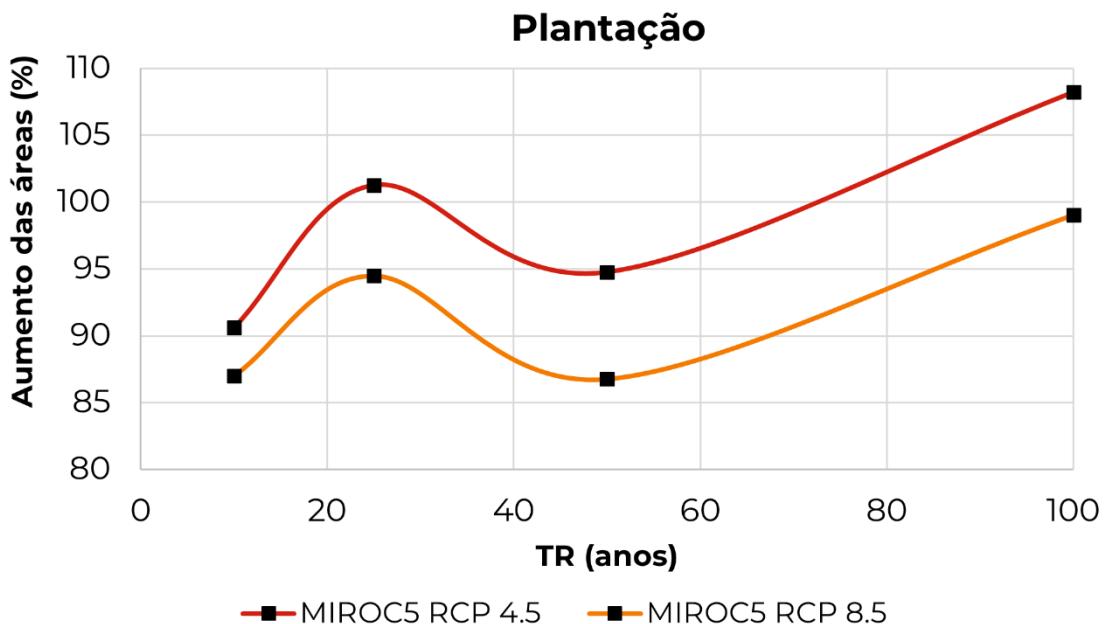
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 35 - Percentual de diferença entre os cenários atuais e os futuros para a classe de uso construção



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 36 - Percentual de diferença entre os cenários atuais e os futuros para a classe de uso plantações



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O uso no qual mais ocorreu aumento percentual de áreas em diferentes TRs foi o de plantação, as áreas inundadas para essa classe praticamente duplicaram para os tempos de retorno de 100 anos para os dois contextos futuros (MIROC5 RCP 4.5 e 8.5) e para o MIROC5 RCP 4.5 no TR de 25 anos. É importante relembrar que esse aumento é em porcentagem, relativo as áreas inundadas de plantações para a IDF atual porque os valores de áreas totais de plantações afetadas não chegam a 0,7 km<sup>2</sup> em nenhum dos cenários analisados.

Para a classe de uso de árvores o aumento percentual para os 4 TRs se mantém relativamente constante, variando de 64,23% (TR de 100 anos) a 69,63% (TR de 25 anos) para as áreas do MIROC5 RCP 8.5 e entre 70,32% (TR de 100 anos) e 73,93% (TR de 25 anos) para MIROC5 RCP 4.5. Nesse caso, como o uso e ocupação de árvores é o mais afetado pelas áreas inundadas, devido a sua localização próxima dos rios e córregos, esse aumento percentual representa um acréscimo de 1,79 (MIROC5 RCP 8.5 TR de 10 anos) a 2,9 km<sup>2</sup> (MIROC5 RCP 4.5 TR de 100 anos).

Quando essa mesma análise é realizada para o uso de construção pode-se perceber um aumento de tendência logarítmica da porcentagem de áreas inundadas para os dois cenários futuros começando em, aproximadamente, 35% (TR de 10 anos) e chegando em cerca de 60% de aumento para o TR de 100 anos. A classe de uso e ocupação de construção é a segunda mais afetada e esse aumento percentual de áreas inundadas representa aumentos de 0,5 a 1,2 km<sup>2</sup>.

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho, a metodologia desenvolvida segue uma estrutura de caracterização das bacias de interesse, coleta e validação de dados observados, calibração manual e validação do modelo, e simulação de eventos de projeto extremos utilizando como ferramenta o modelo hidrodinâmico bidimensional e totalmente distribuído HydroPol2D que resolve as equações de quantidade de movimento pela aproximação inercial local.

A caracterização foi feita por meio de dados de modelo digital de elevação (que foi, então, transformado em um MDT), tipo de solo e uso de solo para uma microbacia dentro da bacia de interesse (bacia do Mineirinho) e para a bacia de interesse (bacia urbana de São Carlos). O processo de calibração manual utilizou os dados disponíveis para a microbacia para selecionar os parâmetros necessários para o modelo, validando os resultados de vazão do modelo com os observados por meio do índice NSE. Após atingir resultados aceitáveis para o índice, indicando maior similaridade do modelo com a realidade, os parâmetros escolhidos foram extrapolados para a bacia de interesse. Esse processo de extração foi feito dadas as semelhanças entre as duas bacias, que são bacias majoritariamente urbanas, com áreas arborizadas, de plantações e mesmos tipos de solo. Entretanto, como os parâmetros não foram calibrados diretamente para a bacia urbana de São Carlos eles ainda são uma fonte de incertezas dentro do modelo.

Por último, com o modelo já calibrado foram realizadas simulações para diferentes cenários de projeto, o cenário atual e cenários futuros, adaptados para incorporar os efeitos de mudanças climáticas. As simulações no HydroPol2D têm como principais resultados as vazões e as profundidades máximas da água. Como o objetivo do estudo é entender os efeitos de chuvas intensas nas inundações, foi dado foco para o resultado de profundidades máximas e por meio desses valores foram gerados os mapas de profundidades máximas na bacia, as diferenças de profundidades máximas e as áreas inundadas totais.

Por meio dos resultados gerados pelo modelo para diferentes cenários é possível chegar a algumas conclusões. No geral, o cenário MIROC5 RCP 4.5 para TR de 100 anos é o mais crítico, apresenta mais áreas com profundidades críticas e mais áreas inundadas totais enquanto o cenário atual para TR de 10 anos é o menos crítico, apresentando menos áreas com profundidades críticas e menos áreas inundadas totais. Os locais mais vulneráveis da cidade a inundações (baixada do Mercadão, Rotatória do cristo e região da praça do Kartódromo) tem a tendência de piorar para cenários futuros, principalmente para TRs maiores, se tornando locais com profundidades acima de 3 m para a maior parte das proximidades dos corpos hídricos. Na

maioria dos casos, as regiões de maiores profundidades foram pontos de junção entre córregos da bacia e o rio Monjolinho, especialmente córregos de bacias urbanas como a do Gregório, Mineirinho e Tijuco Preto e locais de maior declividade.

Ao se analisar as diferenças de profundidades máximas foram encontrados locais com potencial de aumento na vulnerabilidade, isto é, que não eram inundados ou eram inundados com profundidades baixas para a IDF atual, mas com tendência de aumento para cenários futuros. Alguns desses lugares foram o exutório da bacia Santa Maria do Leme e da bacia Tijuco Preto com o rio Monjolinho (próximo à praça do Kartódromo), o Trevo da rodovia SP-318, proximidades da represa do Monjolinho e a foz da bacia do Água Fria.

A região do Kartódromo já apresenta muitos casos de inundações, como foi citado anteriormente, entretanto, de acordo com os resultados do modelo, a tendência é o aumento significativo das profundidades, especialmente para os cenários mais críticos. Já para os outros locais o modelo indica um possível aumento da profundidade para todos os TRs em relação ao cenário atual. Por serem pontos localizados em bacias com bastante áreas permeável, essas diferenças podem estar relacionadas à capacidade de infiltração do solo, demonstrando uma possível saturação do solo para cenários futuros e consequente aumento do escoamento superficial e de profundidade da água nesses pontos. Finalmente, os resultados de áreas inundadas por uso e profundidades por uso estão coerentes entre si, demonstrando que a classe de uso e ocupação mais afetada é a de árvores, seguido de construção e plantações. Além disso, o tipo com maior aumento percentual de áreas afetadas entre cenários atuais e futuros é o de plantações.

É importante salientar que o estudo apresenta algumas incertezas que podem impactar os resultados e limitam a precisão das análises hidrológicas e hidrodinâmicas da bacia estudada. Primeiramente, a ausência de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução compromete a detalhamento topográfico, essencial para a definição precisa dos fluxos de água. A incerteza no uso e ocupação do solo para cenários futuros também representa um desafio, visto que mudanças nessas características podem influenciar significativamente o comportamento da bacia. Além disso, a falta de representatividade da batimetria dos canais afeta a precisão do modelo hidrodinâmico, já que alterações no perfil dos canais influenciam a dinâmica de escoamento. Outro fator de incertezas é que o efeito de reservatórios de detenção não foi considerado, o que pode resultar em uma subestimação ou superestimação das vazões em diferentes pontos da bacia. A drenagem urbana por meio de galerias de águas pluviais e bocas de lobo, importante para a condução de escoamentos em áreas urbanizadas, também não

foi incluída, principalmente devido à ausência de dados detalhados da rede de drenagem e à resolução do modelo adotado, de 30 m, que limita a consideração desses elementos.

Como próximos passos, recomenda-se avançar na redução dessas incertezas, buscando dados e metodologias que permitam tornar o modelo mais próximo da realidade. Além disso, relacionar as áreas mais afetadas pelas inundações com uma análise social dos bairros impactados e seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) pode ser uma continuação interessante para o estudo, auxiliando para a compreensão das implicações sociais e econômicas das mudanças climáticas na bacia.

## REFERÊNCIAS

- A CIDADE ON. VEJA VÍDEO: Baixada do Mercadão alaga mais uma vez e chuva volta a castigar São Carlos. **A Cidade On**, São Carlos, 7 fev. 2024. Disponível em: <https://www.acidadeon.com/saocarlos/cotidiano/veja-video-baixada-do-mercadao-alaga-mais-uma-vez-e-chuva-volta-a-castigar-sao-carlos/>. Acesso em: 28 out. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Hidroweb**: Sistemas de informações hidrológicas. 2023. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: 10 Ago. 2024.
- ALLEN, R. G.; Jensen, M. E.; Wright; J. L.; Burman, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy journal**, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989. DOI: 10.2134/agronj1989.00021962008100040019x. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj1989.00021962008100040019x>. Acesso em: 8 out. 2024.
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; ROsolem, R.; HAGEMANN, S.; NOBRE, C. A. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105053, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105053. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809519316989>. Acesso em: 25 out. 2024.
- ALMEIDA, T. L. **Implicações ambientais dos processos de atenuação de lixiviado em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2009. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. DOI: 10.11606/T.18.2009.tde-25062009-123008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-25062009-123008/pt-br.php>. Acesso em: 13 out. 2024.
- ANDRADE, J. P. M. **Previsão hidrometeorológica visando sistema de alerta antecipado de cheias em bacias urbanas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. DOI: 10.11606/D.18.2006.tde-21112006-132907. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-21112006-132907/pt-br.php>. Acesso em: 8 out. 2024.
- AYER, J. E. B.; OLIVETTI, D.; MINCATO, R. L.; SILVA, M. L. N. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 180-191, 2015. DOI: 10.1590/1983-40632015v4531197. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/tbJ74RLDbbQvXPXK3Kmvh6g/#>. Acesso em: 9 set. 2024.
- BARBASSA, A. P. **Simulacao do efeito da urbanizacao sobre a drenagem pluvial na cidade de sao carlos - sp**. 1991. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000734054>. Acesso em: 28 out. 2024.

BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; FEWTRELL, T. J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. **Journal of hydrology**, v. 387, n. 1-2, p. 33-45, 2010. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.027. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169410001538?via%3Dihub>. Acesso em: 9 out. 2024.

BEMFICA, D. C. **Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/205985>. Acesso em: 9 out. 2024.

BENINI, R. M. **Cenários de ocupação urbana e seus impactos no ciclo hidrológico na bacia do córrego do Mineirinho**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. DOI: 10.11606/D.18.2005.tde-08112005-195241. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-08112005-195241/pt-br.php>. Acesso: 15 set. 2024.

BLAIN, G. C.; PIRES, R. C. M. Variabilidade temporal da evapotranspiração real e da razão entre evapotranspiração real e potencial em Campinas, Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 2, p. 460-470, 2011. DOI: 10.1590/S0006-87052011000200030. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/LRv86XNBcMbCkdQx5S3Ctgk/?lang=pt>. Acesso em: 8 out. 2024

BRAKENSIEK, D. L.; RAWLS, W. J. Agricultural management effects on soil water processes Part II: Green and Ampt parameters for crusting soils. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 26, n. 6, p. 1753-1757, 1983. DOI: 10.13031/2013.33838. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33838>. Acesso em: 18 out. 2024.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. **A P&DC e os 30 anos de desastres no Brasil (1991 – 2020)**. Florianópolis: Cepesi, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/A\\_p\\_amp\\_dc\\_e\\_os\\_30\\_anos\\_de\\_desastres\\_no\\_Brasil\\_20221\\_compressed.pdf](https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/A_p_amp_dc_e_os_30_anos_de_desastres_no_Brasil_20221_compressed.pdf). Acesso em: 20 out. 2024.

BROWN, C. F.; BRUMBY, S.P.; GUZDER-WILLIAMS, B. *et al.* Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. **Scientific Data**, v. 9, n. 251, 2022. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41597-022-01307-4>. Acesso em: 7 out. 2024.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. (coord.). **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CASTRO, R. São Carlos tem manhã de alagamentos e interdições após chuva de 96 milímetros. **G1 São Carlos e Araraquara EPTV**, São Carlos, 28 dez. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2022/12/28/sao-carlos-tem-manca-de-alagamentos-e-interdicoes-apos-chuva-de-96-milimetros.ghtml>. Acesso em 20 jul. 2024.

CAVALCANTI, D. L. O.; SILVA, D. F.; REIS, L. F. R. Análises preliminares de dados de monitoramento das bacias urbanas do município de São Carlos–SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **Anais** [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2015. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=8983>. Acesso em: 21 out. 2024.

CECÍLIO, R. A.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; ATAÍDE, W. F. Substituição dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson para estimativa da infiltração em alguns solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1141-1151, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000500029. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/vdFKGyXQgV4pjwFhHNsRY3F/?lang=pt#>. Acesso em: 16 out. 2024.

CHIMIRRI, R. De novo: chuva inunda rotatória do Cristo. **São Carlos em Rede**, São Carlos, 13 nov. 2020. Disponível em: <https://saocarlosemrede.com.br/de-novo-chuva-inunda-rotatoria-do-cristo/>. Acesso em: 28 out. 2024.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J. *et al.* Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n.5, p. 512-525, 2014. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35043. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=52887>. Acesso em: 20 out. 2024.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 572 p.

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. New York: McGraw Hill, 1959. 680p.

CNN BRASIL. Chuva arrasta carros durante alagamento em São Carlos (SP); veja imagens. **CNN Brasil**, São Paulo, 27 nov. 2020. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/chuva-arrasta-carros-durante-alagamento-em-sao-carlos-sp-veja-imagens/>. Acesso em: 26 jun. 2024.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.

DARU, R. L.; DA SILVA, É. D.; KAN, A.; GIBERTONI, R. F. C. Simulação hidrodinâmica 3D de enchimento do reservatório da usina hidrelétrica de Mauá. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais** [...]. Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011. p. 1-20. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=11581>. Acesso em: 9 out. 2024.

DE ALMEIDA, G. A. M.; BATES, P. Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling. **Water Resources Research**, v. 49, n. 8, p. 4833-4844, 21 June 2013. DOI: 10.1002/wrcr.20366. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wrcr.20366>. Acesso em: 8 out. 2024.

DE LIMA, J. P. (coord.). **Hidrologia urbana**: conceitos básicos. Lisboa: Universidade de Coimbra, jun. 2010. v. 1. (Série Cursos Técnicos).

DOZENA, A. **São Carlos e seu Desenvolvimento**: Contradições Urbanas de um Pólo Tecnológico. São Paulo: Annablume, 2008.

DUCH, M. Chuva inunda Marginal perto do Kartódromo. **São Carlos em Rede**, São Carlos, 10 nov. 2018. Disponível em: <https://saocarlosemrede.com.br/chuva-inunda-marginal-perto-do-kartodromo/>. Acesso em: 28 out. 2024.

DURANT, P. C. **Tempo de concentração em pequenas bacias hidrográficas na região de Uberlândia, Minas Gerais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. DOI: 10.14393/ufu.di.2018.868. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24926>. Acesso em: 8 out. 2024.

EIRAS, C. G. S. **Mapeamento da suscetibilidade a eventos perigosos de natureza geológica e hidrológica em São Carlos - SP**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. DOI:10.11606/D.18.2018.tde-01032018-095311. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-01032018-095311/pt-br.php>. Acesso em: 2024-10-26.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 8 out. 2024.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Copernicus Space Component Data Access PANDA Catalogue**. Disponível em: <https://panda.copernicus.eu/web/cds-catalogue/panda>. Acesso em: 10 mai. 2024.

FATHI-MOGHADAM, M.; KASHEFIPOUR, M.; EBRAHIMI, N.; EMAMGHOLIZADEH, S. Physical and numerical modeling of submerged vegetation roughness in rivers and flood plains. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 11, p. 858-864, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000381. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000381](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000381). Acesso em: 21 out. 2024.

FINEP-CT-HIDRO/FIPAI-EESC-USP/DAEE-SP. **Experimento piloto de gerenciamento integrado de bacias urbanas para o Plano Diretor de São Carlos, SP**. São Carlos: 2003. Conv. 01.02.0086.00 Disponível em: [www.busplanodiretor.hpg.com.br](http://www.busplanodiretor.hpg.com.br). Acesso em: 13 out. 2024.

FURL, C.; GHEBREYESUS, D.; SHARIF, H. O. Assessment of the performance of satellite-based precipitation products for flood events across diverse spatial scales using GSSHA modeling system". **Geosciences**, v. 8, n. 6, p. 191, 2018. DOI: 10.3390/geosciences8060191. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/8/6/191>. Acesso em: 21 out. 2024.

GOMES JR, M. N. **Advances in open source hydroinformatics for flood modeling and disaster education**. 2023a. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023a. DOI: 10.11606/T.18.2023.tde-18042024-142515. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18042024-142515/pt-br.php>. Acesso em: 8 out. 2024.

GOMES JR., M. N.; BRAGA, P. H. A.; MENDIONDO, E. M.; REIS, L. F. R. 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**, São Paulo, v. 69, n. 228, p. 171–189, 2021. DOI: 10.36659/dae.2021.013. Disponível em: [https://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_228\\_n\\_1928.pdf](https://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_228_n_1928.pdf). Acesso em: 25 out. 2024.

GOMES JR., M. N.; JALIHAL, V.; MENDIONDO, E. M. Exploring the Impact of Rainfall Temporal Distribution and Critical Durations on Flood Hazard Modeling. PREPRINT (Version 1). **Research Square**, 05 mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4000788/v1>. Acesso em: 28 out. 2024.

GOMES JR, M. N.; GIACOMONI, M. H.; NAVARRO, F.A.R.; MENDIONDO, E.M. Global optimization-based calibration algorithm for a 2D distributed hydrologic-hydrodynamic and water quality model. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, UK, v. 179, article 106128, p. 1-20, 2024b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106128>. Acesso em: 20 out. 2024.

GOMES JR, M. N.; DO LAGO, C. A. F.; RÁPALO, L. M. C.; OLIVEIRA, P. T. S.; GIACOMONI, M. H.; MENDIONDO, E. M. HydroPol2D—Distributed hydrodynamic and water quality model: Challenges and opportunities in poorly-gauged catchments. **Journal of Hydrology**, p. 129982, 2023. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129982. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169423009241>. Acesso em: 9 out. 2024.

GOMES JR, M. N. **HydroPol2D**. Versão v.0.0.1. 2023b. 1 programa de computador. Disponível em: <https://github.com/marcusnobrega-eng/HydroPol2D>. Acesso em: 8 out. 2024.

GOMES JR, M. N.; CASTRO, M. A.; CASTILLO, L. M.; SÁNCHEZ, M. H.; GIACOMONI, M. H.; DE PAIVA, R. C.; BATES, P. D., 2024a. Spatio-Temporal Performance of 2D Local Inertial Hydrodynamic Models for Urban Drainage and Dam-Break Applications. arXiv preprint arXiv:2410.09325.

G1. Chuva causa alagamento em diversos pontos de São Carlos, SP; veja fotos. **G1 São Carlos e Araraquara EPTV**, São Carlos, 23 nov. 2015. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2015/11/chuva-causa-alagamento-em-diversos-pontos-de-sao-carlos-sp-veja-fotos.html>. Acesso em: 28 out. 2024.

G1. VÍDEOS: chuva causa alagamentos no centro de São Carlos e enxurrada arrasta carros. **G1 São Carlos e Araraquara EPTV**, São Carlos, 28 dez. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2022/12/28/video-chuva-causa-alagamentos-no-centro-de-sao-carlos-e-enxurrada-arrasta-carros.ghtml>. Acesso em: 28 out. 2024.

G1. VÍDEOS: chuva forte em São Carlos alaga região da Praça do Mercado Municipal e rotatória do Cristo. **G1 São Carlos e Araraquara EPTV**, São Carlos, 7 fev. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2024/02/07/video-chuva-forte-em-sao-carlos-alaga-regiao-da-praca-do-mercado-municipal-e-rotatoria-do-cristo.ghtml>. Acesso em: 28 out. 2024.

HAWKINS, R.H.; WARD, T.J.; WOODWARD, D.E.; VAN MULLEM, J.A. **Curve Number Hydrology: State of practice**. Reston, VA: ASCE-EWRI, 2009.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied engineering in agriculture**, St. Joseph, US, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=26773>. Acesso em: 8 out. 2024.

HORTON, R. E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 20, n. 4, p. 693-711, July 1939. DOI: 10.1029/TR020i004p00693. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TR020i004p00693>. Acesso em: 7 out. 2024.

HUFF, F. A. Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. **Water Resources Research**, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967. DOI: 10.1029/WR003i004p01007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR003i004p01007>. Acesso em: 8 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Solos 1:5000000**. 2006. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/15829-solos.html>. Acesso em: 8 out. 2024.

IPCC. Summary for Policymakers. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

IPCC. **Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Geneva, Switzerland, p. 104, 2007.

JOCHELAVICIUS, V.; MENDIONDO, E. M.; GOMES JR., M. N.; MACEDO, M. B. Construção de curvas Intensidade-Duração-Freqüência com cenários futuros de mudanças climáticas para a cidade de São Carlos - SP visando ao dimensionamento de técnicas compensatórias. **Revista DAE**, São Paulo, v. 70, n. 238, p. 19-32, 2022. DOI: 10.36659/dae.2022.065. Disponível em: [https://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_238\\_n\\_2098.pdf](https://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_238_n_2098.pdf). Acesso em: 28 out. 2024.

JUSTINO, E. A. **Comportamento hidrodinâmico do solo e da recarga potencial do aquífero a partir de poços de infiltração de águas pluviais**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) - CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12036>. Acesso em: 26 out. 2024.

KEIFER, C. J.; CHU, H. H. Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 83, n. 4, p. 1332-1-1332-25, 1957. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0000104. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JYCEAJ.0000104>. Acesso em: 8 out. 2024.

KYNE, D.; KYEI, D. Understanding Associations between Disasters and Sustainability, Resilience, and Poverty: An Empirical Study of the Last Two Decades. **Sustainability**, v. 16, n. 17, p. 7416, 2024. DOI: 10.3390/su16177416. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/17/7416>. Acesso em: 25 out. 2024.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 3.ed. São Paulo: Edusp, 2018.

LIMA, A. P.; AMORIM, M. C. de C. T. Análise de episódios de alagamentos e inundações urbanas na cidade de São Carlos a partir de notícias de jornal. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, 2014. DOI: 10.5380/abclima.v15i0.33406. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/13794>. Acesso em: 29 jul. 2024.

LIN, F.; CHEN, X.; YAO, H. Evaluating the use of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient in goodness-of-fit measures for daily runoff simulation with SWAT. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 22, n. 11, p. 05017023, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001580. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/28ASCE29HE.1943-5584.0001580>. Acesso em: 15 out. 2024.

LIU, W. C.; HSU, M. H; WANG, C. F. Modeling of flow resistance in mangrove swamp at mouth of tidal Keelung River, Taiwan. **Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering**, v. 129, n. 2, p. 86-92, 2003. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:2(86). Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2003\)129:2\(86\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:2(86)). Acesso em: 18 set. 2024.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DERECHYNSKI, C.; SONDERMANN, M. *et al.* Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n. 1-2, p. 663-682, 2018. DOI: 10.1007/s00704-017-2067-z. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>. Acesso em: 20 out. 2024.

MAIA, A. L.; VERSIANI, B. R. Comparação de Modelos Geradores de Função de Produção: Um Estudo de Caso para a Bacia de Juatuba-MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS - SBRH, 14., 2001, Aracaju, SE. **Anais** [...]. Aracaju, SE: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=12573>. Acesso em: 8 out. 2024.

**MARTINS, R. G. Modelagem da carga de poluição difusa em escala de bacia com valores de concentração média por evento a partir de dados de uma rede de monitoramento local.** 2017. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. DOI: 10.11606/T.18.2017.tde-18052017-100316. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18052017-100316/pt-br.php>. Acesso em: 18 out. 2024.

**MAXIMINO, M.** Veja como ficou a Baixada do Mercado Municipal após a enchente. **São Carlos Agora**, São Carlos, 28 dez. 2022. Disponível em: <https://www.saocarlosagora.com.br/galeria/veja-como-ficou-a-baixada-do-mercado-municipal-apos-a-enchente/936/>. Acesso em: 28 out. 2024.

**MAYS, L. W. Water Resources Engineering.** 2nd ed. Danvers, US: John Wiley & Sons Inc, 2010.

**MELLO, C. R.; LIMA, J. M. de; SILVA, A. M. DA; LOPES, D.** Abstração inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 494-500, 2003. DOI: 10.1590/S1415-43662003000300015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/DSTQZ68sGzDsjSHpygFbgnC/?lang=pt>. Acesso em: 17 set. 2024.

**MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L.** Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, MI, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. DOI: 10.13031/2013.23153. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23153>. Acesso em: 15 out. 2024.

**MOTA, A. D. A.; GRISON, F.; GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M.** Instalação de uma pequena bacia experimental florestal: estudo de caso da bacia do Rio Araponga. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 73-80, 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016154610. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/pMLJQmrTQp64t8PHgbbcYGC/?lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2024.

**NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A.** **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/454>. Acesso em: 20 ago. 2024.

**NETTO, J. M. A.; Y FERNÁNDEZ, M. F.** **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

**OLIVEIRA, J. B. de; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B.** **Mapa Pedológico do Estado De São Paulo**: Legenda Expandida. Campinas: Instituto Agronômico; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/336272>. Acesso em: 20 out. 2024.

**O PÂNTANO** (temporada 2, ep. 4). **Avatar: A Lenda de Aang** [Seriado]. Direção: Giancarlo Volpe. Estados Unidos: Nickelodeon Productions, 2006. Netflix. Serviço de transmissão.

PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; MIRANDA, P.T.; PETRY, I.; DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J.; FAN, F.M.; RUHOFF, A.; FAGUNDES, H. Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: chuvas e cheias extremas na região Sul do Brasil. **Nota Técnica**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iph/nota-tecnica-criterios-hidrologicos-para-adaptacao-a-mudanca-climatica-chuvas-e-cheias-extremas-na-regiao-sul-do-brasil/#:~:text=Neste%20sentido%2C%20pesquisadores%20do%20IPH%2FUFRGS%20elaboraram%20crit%C3%A9rios%20hidrol%C3%B3gicos,2023%20e%202024%20na%20regi%C3%A3o%20Sul%20do%20Brasil>. Acesso em: 9 set. 2024.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

PIRES, A. S. As novas configurações espaciais do empreendedorismo tecnológico e as experiências de trabalho no polo de tecnologia de São Carlos-SP. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 36, n. 106, p. e3610605, 2021. DOI: 10.1590/3610605/2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbc soc/a/kVyBjrCVQcvbmwvpPTbdrTg/#>. Acesso em: 6 jul. 2024.

PONTREMOLEZ, N. S. **Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP**. 2013. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. DOI: 10.11606/D.18.2013.tde-27082014-110840. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-27082014-110840/pt-br.php>. Acesso em: 15 out. 2024.

PORTE, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP Projeto REENG, 2006.

RÁPALO, L. M. C.; GOMES JR, M. N.; MENDIONDO, E. M. Developing an open-source flood forecasting system adapted to data-scarce regions: A digital twin coupled with hydrologic-hydrodynamic simulations. **Journal of Hydrology**, v. 644, p. 131929, 2024. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131929. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169424013258>. Acesso em: 10 out. 2024.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5. p. 49-134.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica. In: CAMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (org.). **Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial**. Belo Horizonte, MG: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003. Cap. 2. Disponível em: <https://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/>. Acesso em: 9 out. 2024.

RIGHETTO, A. M. Hidrologia e recursos hídricos. São Carlos: EESC/USP, 1998.

RODRIGUES, F. VÍDEO: mulher morre em São Carlos após ser arrastada por enxurrada para debaixo de carro. **G1 São Carlos e Araraquara EPTV**, São Carlos, 28 dez. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2022/12/28/video-mulher-morre-em-sao-carlos-apos-ser-arrastada-por-enxurrada-para-debaixo-de-carro.ghtml>. Acesso em: 10 ago. 2024.

SANTOS, L. L. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, CE, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009. DOI: 10.26848/rbgf.v2i3.232624. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232624>. Acesso em: 9 out. 2024.

SÃO CARLOS AGORA. Rua ao lado do Parque do Kartódromo é interditada devido a alagamento. **São Carlos Agora**, São Carlos, 28 dez. 2022. Disponível em: [https://www.saocarlosagora.com.br/cidade/rua-ao-lado-do-parque-do-kartodromo-e-interditada-devido-a-alagamento/154318/#google\\_vignette](https://www.saocarlosagora.com.br/cidade/rua-ao-lado-do-parque-do-kartodromo-e-interditada-devido-a-alagamento/154318/#google_vignette). Acesso em: 28 out. 2024.

SÃO CARLOS AGORA. RUMO confirma construção de ponte que promete resolver problema de alagamento em São Carlos. **São Carlos Agora**, São Carlos, 3 jan. 2023. Disponível em: <https://www.saocarlosagora.com.br/cidade/rumo-confirma-construcao-de-ponte-que-promete-resolver-problema-de/154537/>. Acesso em: 28 out. 2024.

SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 176-185, 2014. DOI: 10.21168/rbrh.v19n4.p176-185. Disponível em: [https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=173&SUMARIO=4901&ST=atualizacao\\_da\\_equacao\\_intensidade\\_duracao\\_frequencia\\_para\\_a\\_cidade\\_de\\_sao\\_paulo\\_sobre\\_efeito\\_de\\_mudancas\\_climaticas](https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=173&SUMARIO=4901&ST=atualizacao_da_equacao_intensidade_duracao_frequencia_para_a_cidade_de_sao_paulo_sobre_efeito_de_mudancas_climaticas). Acesso em: 25 set. 2024.

SHARIF, H. O.; SPARKS, L.; HASSAN, A. A.; ZEITLER, J.; XIE, H. Application of a distributed hydrologic model to the November 17, 2004, flood of Bull Creek watershed, Austin, Texas. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n. 8, p. 651-657, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000228. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000228](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000228). Acesso em: 15 out. 2024.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: ACM NATIONAL CONFERENCE, 23rd, 1968, United States. **Proceedings** [...]. Estados Unidos: ACM, 1968. p. 517-524. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/800186.810616>. Acesso em: 25 set. 2024.

SILVA, D. F.; MONTE, B. E. O.; GOLDENFUM, J. A.; DORNELLES, F. Impactos das mudanças climáticas no município de São Leopoldo, RS: parte 1 - relações IDF. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 24., 2021, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2021. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=12898>. Acesso em: 20 out. 2024.

SIMÕES, A. L. A.; BRITO, R.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R.; LOBOSCO, R. Aspectos numéricos e físicos de soluções das equações de Saint-Venant. In: CONGRESSO LUSO-MOÇAMBICANO DE ENGENHARIA - CLME, 6., 2011, Porto. **Proceedings** [...]. Porto: FEUP, 2011. DOI:10.13140/2.1.3672.1440. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/259398961\\_ASPECTOS\\_NUMERICOS\\_E\\_FISICOS\\_DE\\_SOLUCOES\\_DAS\\_EQUACOES\\_DE\\_SAINT-VENANT](https://www.researchgate.net/publication/259398961_ASPECTOS_NUMERICOS_E_FISICOS_DE_SOLUCOES_DAS_EQUACOES_DE_SAINT-VENANT). Acesso em: 9 out. 2024.

SIQUEIRA, V. A.; FAN, F. M.; DE PAIVA, R. C. D.; RAMOS, M. H.; COLLISCHONN, W. Potential skill of continental-scale, medium-range ensemble streamflow forecasts for flood prediction in South America. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125430, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125430. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169420308908>. Acesso em: 6 jul. 2024.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DOBRE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SANTA CATARINA (SIRHESC) - COMITÊ DE GERENCIAMENTO BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIJUCAS. **Eventos Hidrológicos Críticos**. SIRHESC: 6 mar. 2018. Disponível em: <https://www.aguas.sc.gov.br/base-documental-tijucas/noticias-tijucas/item/5524-eventos-hidrologicos-criticos/5524-eventos-hidrologicos-criticos>. Acesso em: 15 set. 2024.

SITH, R.; NADAOKA, K. Comparison of SWAT and GSSHA for high time resolution prediction of stream flow and sediment concentration in a small agricultural watershed. **Hydrology**, v. 4, n. 2, p. 27, 2017. DOI: 10.3390/hydrology4020027. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/4/2/27>. Acesso em: 16 out. 2024.

SOBIERAJ, J. A.; ELSENBEER, H.; COELHO, R. M.; NEWTON, B. Spatial variability of soil hydraulic conductivity along a tropical rainforest catena. **Geoderma**, v. 108, n. 1-2, p. 79-90, 2002. DOI: 10.1016/S0016-7061(02)00122-2. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706102001222>. Acesso em: 20 out. 2024.

SOUSA, M. R.; GOMES JR, M. N.; OLIVEIRA, E. P.; RAPALO, L. M., C.; NAVARRO, F. A. R.; MENDIONDO, E. M. Modelagem Distribuída Fisicamente baseada em Bacias Urbanas: Modelo HydroPol2D aplicado à São Carlos (SP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS - SBRH, 25., 2023, Aracaju, SE. **Anais** [...]. Aracaju, SE: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2023. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15748>. Acesso em: 8 out. 2024.

STEWART, J. B.; FINCH, J.W. Application of remote sensing to forest hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2-4, p. 701-716, 1993. DOI: 10.1016/0022-1694(93)90132-S. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002216949390132S>. Acesso em: 9 out. 2024.

TARPANI, R. R. Z; BRANDÃO, J. L. B. Análise ambiental da bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho – São Carlos/SP. In: CONGRESSO DE MEIO AMBIENTE DA ASSOCIAÇÃO DE UNIVERSIDADES GRUPO DE MONTEVIDÉU – AUGM, 6., 2009, São Carlos. **Anais** [...]. São Carlos: UFSCar/AUGM, 2009.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948. DOI: 10.2307/210739. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/210739>. Acesso em: 8 out. 2024.

TOOMBES, L.; CHANSON, H. Numerical limitations of hydraulic models. In: IAHR WORLD CONGRESS - BALANCE AND UNCERTAINTY, 34th; HYDROLOGY & WATER RESOURCES SYMPOSIUM, 33rd; HYDRAULICS CONFERENCE, 10th, 2011, Brisbane, AUS. **Proceedings** [...]. Brisbane, AUS: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2011. p. 2322-2329. Disponível em: <https://www.iahr.org/library/infor?pid=25110>. Acesso em: 9 out. 2024.

TRUZZI, O. **Café e Indústria São Carlos**: 1850 – 1950. 3. ed. São Carlos: EDUFSCar, 2007.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (org.). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Juan-Bertoni/publication/266883894\\_INUNDACOES\\_URBANAS\\_NA\\_AMERICA\\_DO\\_SUL/links/56b352cd08ae3d06a26644e2/INUNDACOES-URBANAS-NA-AMERICA-DO-SUL.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Juan-Bertoni/publication/266883894_INUNDACOES_URBANAS_NA_AMERICA_DO_SUL/links/56b352cd08ae3d06a26644e2/INUNDACOES-URBANAS-NA-AMERICA-DO-SUL.pdf). Acesso em: 6 ago. 2024.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998.

TUOZZOLO, S.; LANGHORST, T.; FRASSON, R. P. M.; PAVELSKY, T.; DURAND, M.; SCHOBELOCK, J. J. The impact of reach averaging Manning's equation for an in-situ dataset of water surface elevation, width, and slope. **Journal of Hydrology**, v. 578, p. 123866, 2019. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.038. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419305852>. Acesso em:

VALENTÍN, M. G. **Hidrología Urbana**. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2007.

YAMAZAKI, D.; DE ALMEIDA, G. A. M.; BATES, P. D. Improving computational efficiency in global river models by implementing the local inertial flow equation and a vector-based river network map. **Water Resources Research**, v. 49, n. 11, p. 7221-7235, 2013. DOI: 10.1002/wrcr.20552. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wrcr.20552>. Acesso em: 9 out. 2024.