

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM PROJETOS DE MANEJO DE ÁGUA PLUVIAL USANDO HYDROPOL2D: O CASO NA BACIA URBANA DE SÃO CARLOS (SP)

Milena Rosa de Sousa¹; Eduardo Mario Mendiondo² & Marcus Nóbrega Gomes Jr.³

Abstract: Under scenarios of climate change, the frequency and intensity of urban flood events are expected to increase, leading to more severe impacts in cities. Thus, coupling spatially distributed hydrological and hydrodynamic models is essential to simulate flood propagation and identify flood-prone areas in urban basins. This study aims to evaluate the influence of extreme rainfall events on flood dynamics in the urban basin of São Carlos (SP), under both current climatic conditions and future projections derived from climate change scenarios (ETA-MIROC5 for RCP 4.5 and 8.5, 4.5 W/m² and 8.5 W/m²). To examine how rainfall influences flood propagation and the extent of inundation, the two-dimensional, fully distributed hydrological-hydrodynamic model HydroPol2D is applied. The results revealed that, on average, flooded areas increased by 65% compared to current conditions. Moreover, for 100-year return period events, maximum flood depths increased by up to 2.5 meters in certain locations within the watershed.

Resumo: Em cenários de mudança climática, espera-se que a frequência e a intensidade dos eventos de inundação urbana aumentem, levando a impactos mais severos nas cidades. Assim, o acoplamento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos espacialmente distribuídos é essencial para simular a propagação das inundações e identificar áreas suscetíveis em bacias urbanas. Este estudo tem como objetivo avaliar a influência de eventos extremos de precipitação na dinâmica das inundações na bacia urbana de São Carlos (SP), tanto nas condições climáticas atuais quanto em projeções futuras derivadas de cenários de mudança climática (ETA-MIROC5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5, 4.5 W/m² e 8.5 W/m²). Para analisar como a precipitação influencia a propagação da inundação e a extensão das áreas alagadas, foi aplicado o modelo hidrológico-hidrodinâmico bidimensional totalmente distribuído HydroPol2D. Os resultados revelaram que, em média, as áreas inundadas aumentaram em 65% em comparação com as condições atuais. Além disso, para eventos com período de retorno de 100 anos, as profundidades máximas de inundação aumentaram em até 2,5 metros em determinados locais da bacia hidrográfica.

Palavras-Chave – Modelo Hidrológico, Modelo Hidrodinâmico, Não-Estacionariedade.

1 INTRODUÇÃO

A falta de organização e de planejamento adequado dos loteamentos durante o desenvolvimento urbano, um desafio comum nas cidades sul-americanas, aumenta a vulnerabilidade da população aos riscos associados às inundações (Siqueira *et al.*, 2020). No Brasil, 5.462 eventos de inundações foram

1) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São Carlense, 13556-590, milena.sousadr@gmail.com.

2) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São Carlense, 13556-590, e.mario.mendiondo@gmail.com.

3) Department of Hydrology and Atmospheric Sciences, University of Arizona, James E. Rogers Way, 316A, 85719, marcusnobrega.engcivil@gmail.com

registrados entre 1991 e 2020, resultando em danos materiais estimados em R\$ 20,1 bilhões e afetando diretamente 3.776.171 pessoas (Brasil, 2022). Apesar de sua forte base acadêmica e produção científica na área ambiental, São Carlos (SP), enfrenta desafios significativos, particularmente em relação às inundações. Em vista do cenário atual já problemático da cidade, as mudanças climáticas se apresentam como um agravante, pois têm aumentado a frequência e a intensidade de eventos extremos de precipitação em várias regiões do mundo, principalmente devido ao aumento de gases de efeito estufa (Chou *et al.*, 2014).

Diversos modelos matemáticos já foram aplicados na região de São Carlos com o objetivo de compreender a dinâmica das inundações, incluindo o SWMM (Fava *et al.*, 2015) e o WCA2D (Buarque *et al.*, 2021), entre outros. No entanto, as análises conduzidas ainda podem aprimoradas. Em Fava *et al.* (2015), foi utilizada uma combinação de dois modelos: o SWMM para a modelagem chuva-vazão e o HEC-RAS 2D para simular a propagação da onda de cheia nas áreas inundadas dos canais urbanos, sendo uma limitação do estudo a interoperabilidade entre os softwares, o que dificulta a previsão em tempo real. No estudo de Buarque *et al.* (2021), a avaliação temporal e espacial das inundações foi realizada por meio de um modelo que desconsiderava os processos de infiltração.

Além disso, a maioria desses estudos baseia-se em registros históricos de chuva, assumindo condições climáticas estacionárias. Devido às incertezas que as mudanças climáticas introduzem nos processos hidrológicos, é fundamental integrar projeções climáticas futuras à modelagem hidrológica-hidrodinâmica (Mishra *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019). Uma forma de incorporar essas projeções à avaliação de risco de inundações é por meio da adaptação das curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) (Schardong e Simonovic, 2013).

Diante desse contexto, torna-se necessária uma abordagem metodológica capaz de avaliar, em tempo real, os impactos desses eventos, como volume, profundidade da água, direção do escoamento e áreas afetadas. Assim, este estudo utiliza o modelo HydroPol2D (Hydrodynamic and Pollution 2-D Model) (Gomes Jr., 2023b), um modelo bidimensional que integra três componentes principais: um balanço hidrológico superficial (modelo hidrológico) que simula precipitação (com possibilidade de incorporar curvas IDF), infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial; um modelo hidrodinâmico baseado em aproximação inercial local das equações de momento; e um modelo de qualidade da água com abordagem "build-up and wash-off" (Gomes Jr. *et al.*, 2024a). Logo, o objetivo principal deste estudo é calibrar e aplicar o modelo HydroPol2D para simular eventos extremos na bacia urbana de São Carlos, com o intuito de gerar mapas de inundações que identifiquem os níveis d'água, as principais áreas afetadas e analisem o impacto das mudanças climáticas nesses eventos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do estudo foi dividida em quatro etapas principais: caracterização das bacias hidrográficas de interesse, aquisição de dados observados de precipitação e vazão, calibração e validação do modelo utilizando os dados observados e, por fim, o desenvolvimento de eventos de projeto representativos para os contextos atual e futuro (considerando as mudanças climáticas).

2.1 HydroPol2D

O modelo utilizado neste estudo é o HydroPol2D (Gomes Jr., 2023b), aplicado na calibração, validação e simulação da bacia de interesse. Para sua operação, são exigidos dados de entrada para as condições de contorno e mapas georreferenciados em formato raster (.TIFF), representando a topografia (Modelo Digital de Elevação - MDE), o tipo de solo e o uso e cobertura da terra (Gomes

Jr., 2023a), os quais são utilizados para definir os parâmetros dos componentes do modelo. A infiltração é estimada pelo Modelo de Green-Ampt (Chow *et al.*, 1988), com os seguintes parâmetros: condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) (mm.h^{-1}), carga de succão (Ψ_f) (mm), déficit de umidade ($\Delta\theta$) ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) e umidade inicial do solo (θ_0) (mm), definidos conforme o tipo de solo. Os parâmetros hidrodinâmicos, como o coeficiente de rugosidade de Manning (n) ($\text{s.m}^{-1/3}$), abstração inicial (h_0) (mm) e lâmina inicial de água (d_0) (mm), são atribuídos com base no uso do solo (Gomes Jr., 2023a).

O HydroPol2D resolve as equações simplificadas de Saint-Venant utilizando o método da Aproximação Inercial Local (Bates *et al.*, 2010), em uma estrutura 2D totalmente distribuída (Equação 1) (Gomes Jr. *et al.*, 2024a). Isso significa que a bacia é discretizada em células finitas, permitindo que as variáveis hidrológicas e hidráulicas variem espacialmente, levando em consideração as características específicas de cada célula (Equação 2) (Gomes Jr. *et al.*, 2024a; Sousa *et al.*, 2023). O escoamento entre células é calculado com base em variáveis de estado, como lâmina d'água e umidade do solo, e atualizado a cada passo de tempo, garantindo conservação de massa e momento (Gomes Jr. *et al.*, 2024a; Gomes Jr. *et al.*, 2025). A vazão entre células é calculada por:

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

onde $q^{t+\Delta t}$ é a vazão no tempo $t + \Delta t$ ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), representada como um vetor contendo os fluxos para todas as células vizinhas adjacentes na superfície em $i+1/2$; $f(\theta^t, q^t)$ controla a difusão numérica; θ^t é um parâmetro calculado para ajustar a difusão numérica; g é a aceleração da gravidade (m.s^{-2}); \hat{h} é a lâmina d'água efetiva entre células adjacentes (m) (Bates *et al.*, 2010); Δt é o passo de tempo utilizado para a discretização temporal (s); S^t representa a declividade ou gradiente da superfície da água no espaço (m.m^{-1}); n é o coeficiente de rugosidade de Manning ($\text{s.m}^{-1/3}$); e $|q^t|$ é o valor absoluto da vazão por unidade de largura no tempo t ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).

O balanço de massa para cada célula é dado por:

$$d^{i,j}(t + \Delta t) = d^{i,j}(t) + \Delta t \left[\sum_{N^{i,j}} I^{i,j}(t) - \sum_{N^{i,j}} O^{i,j}(t) + i^{i,j}(t) - f^{i,j}(d^{i,j}(t), Fd^{i,j}(t)) - e_T^{i,j}(t) \right], \quad (2)$$

onde d é a lâmina de escoamento superficial (m), I é a vazão de entrada ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), O é a vazão de saída ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), i é a intensidade da chuva (mm.h^{-1}), f é a taxa de infiltração ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) e a e_T é a taxa de evapotranspiração ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).

A capacidade de infiltração (dF/dt) é estimada por meio de uma solução implícita do modelo de Green-Ampt (Chow *et al.*, 1988), via Newton-Raphson, e é dada por:

$$F^{t+\Delta t} = K_s \Delta t + F^t + \psi_f \theta_d [\log(F^{t+\Delta t} + \psi_f \theta_d) - \log(F^t + \psi_f \theta_d)] - f_{out} \quad (3)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (m.s^{-1}), F é a profundidade infiltrada (m), θ_d é a porosidade efetiva ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$), ψ_f é a carga de succão da frente de umedecimento (m), e f_{out} é a taxa de recarga do lençol freático.

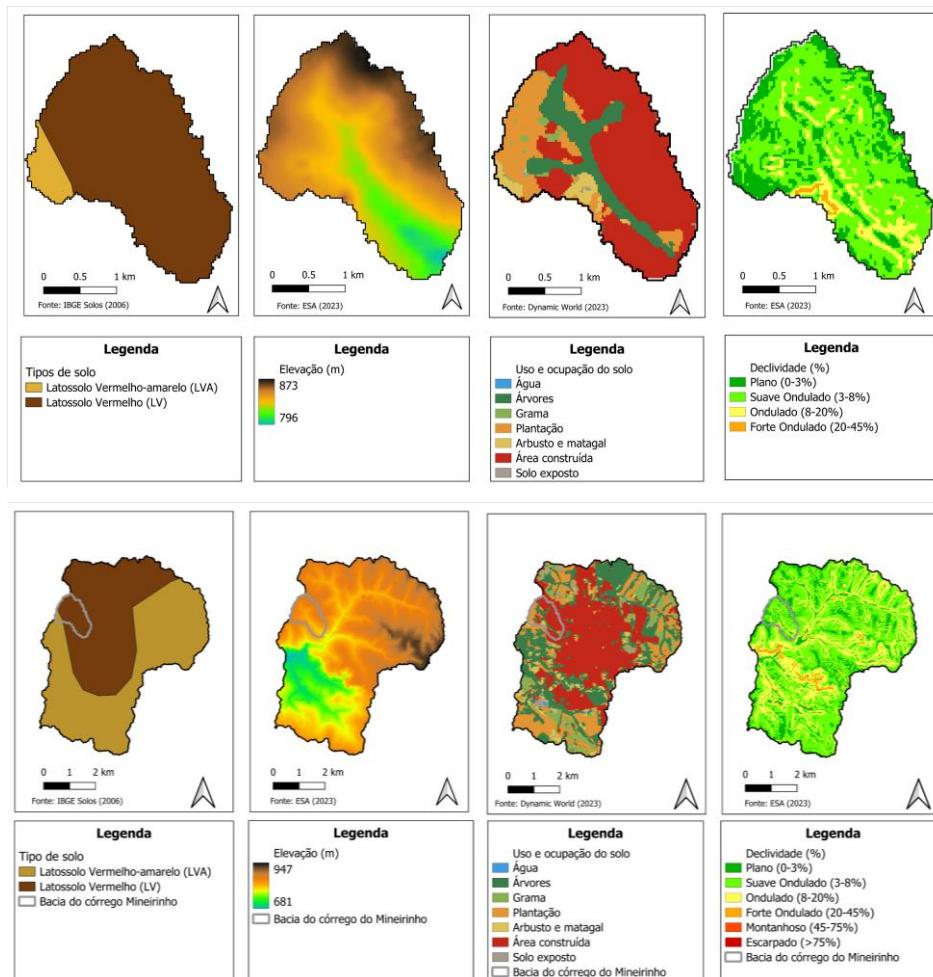
2.2 Caracterização e monitoramento das bacias de interesse

A bacia urbana de São Carlos foi selecionada como área de estudo, no entanto, a ausência de dados de chuva-escoamento com alta resolução em múltiplos pontos da bacia impediu a calibração direta do modelo. Para contornar essa limitação, o modelo foi calibrado para uma sub-bacia pertencente à bacia de interesse, com características fisiográficas e de uso do solo semelhantes (Pool

et al., 2021). A sub-bacia escolhida foi a bacia do córrego Mineirinho, que possui dados de precipitação e vazão de alta resolução medidos entre 2014 e 2016, conforme Martins (2017). A rede de monitoramento contava com três pluviômetros e uma estação fluviométrica. Por meio dos dados de precipitação e vazão coletados, foram gerados os hietogramas dos doze principais eventos de 2015 e suas variáveis associadas, como precipitação total, duração da chuva, intensidade e a condição de umidade antecedente (AMC) (Martins, 2017). Para a caracterização das duas bacias modeladas, foram elaborados mapas de elevação (MDE) por meio do conjunto “30 m Copernicus Global DEM” (<https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>), de uso e cobertura do solo (Dynamic World, 10 m) (Brown et al., 2022) e de tipo de solo (SiBCS, 1:5.000.000) (IBGE, 2006). As classificações originais foram mantidas e os dados foram convertidos para a mesma resolução do MDE.

A microbacia do córrego Mineirinho, na região oeste de São Carlos, possui, 5,3 km² e altitudes entre 795 e 873 metros. É composta por Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) (IBGE, 2006). Atualmente, os usos do solo na bacia são “áreas construídas” (60,3%), “plantações” (18,1%) e “árvores” (15,9%) (Figura 1). A bacia urbana de São Carlos localiza-se ao sul do município, abrangendo aproximadamente 11% de seu território (129 km²) com altitudes de 680 a 950 m. O rio da bacia é o Monjolinho que drena as microbacias do Santa Maria do Leme, Tijuco Preto, Mineirinho, Gregório, Água Quente e Água Fria. A região também é composta por solos do tipo LVd e LVAd (IBGE, 2006) e os principais usos do solo são “áreas construídas” (38,12%), “árvores” (28,28%), “plantações” (18,18%) e “grama” (8,59%) (Figura 1).

Figura 1 – Mapas de caracterização da sub-bacia do Mineirinho e da bacia Urbana de São Carlos (tipo de solo, MDE, uso e ocupação do solo e declividade)



2.3 Calibração e validação do modelo

Para a calibração e validação do modelo, foram selecionados dois eventos com a maior precipitação total entre os analisados por Martins (2017): 25/02/2015 e 23/11/2015 (Tabela 1). Eles foram escolhidos por serem os únicos com precipitação superior a 10 mm e dados de vazão registrados sem lacunas. Os dados pluviométricos foram espacializados sobre a bacia do córrego Mineirinho por interpolação IDW (Inverse Distance Weighting – IDW), com resolução temporal de 5 minutos. O modelo considerou também mapas de MDE, tipo de solo e uso do solo, além de mapas de umidade inicial do solo baseados em condições de AMC III para solos do tipo B (Tucci, 2007).

Tabela 1 – Características dos eventos selecionados.

Evento analisado	Início	Fim	Duração do evento (h)	Precipitação média total (mm)	AMC
25/02/2015	18h	02h (26/02/2015)	8	50.81	AMC III
23/11/2015	13h	20h30	7,5	38.05	AMC III

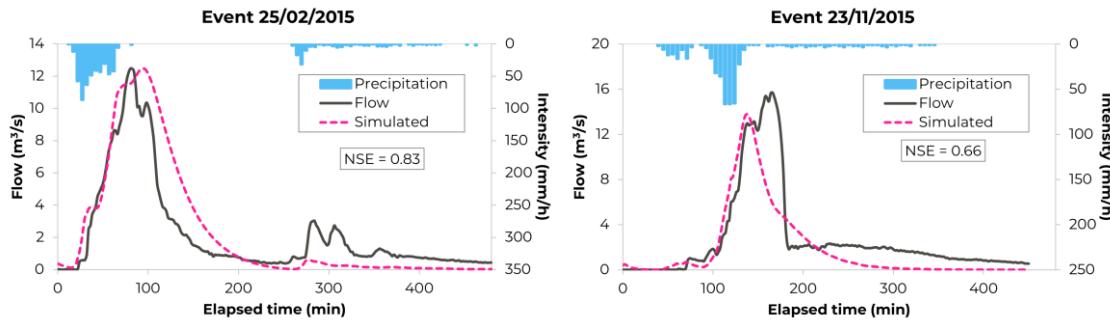
Fonte: Adaptado de Martins, 2017.

A etapa de calibração com o evento de 25/02/2015 envolveu a modificação dos parâmetros do modelo de Green-Ampt e o coeficiente de Manning n ($s \cdot m^{-1/3}$), de forma que os valores de vazão gerados pelo Hydropol2D se aproximasse dos valores de vazão medidos no ponto F1. Essa avaliação foi feita por meio do índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (Lin *et al.*, 2017) e a classificação feita por Moriasi *et al.* (2007) em quatro categorias com base no desempenho dos modelos de simulação.

Os solos presentes em ambas as bacias são o LVAd de textura média e o LVd de textura argilosa. Os parâmetros Θ_{sat} ($cm^3 \cdot cm^{-3}$), Θ_i ($cm^3 \cdot cm^{-3}$) e Ψ_f (mm) apresentaram baixa sensibilidade na bacia, com impacto mínimo nos resultados do modelo (Gomes Jr. *et al.*, 2024b). Assim, os valores selecionados para os solos LVd e LVAd foram, respectivamente, 0,475 e 0,463 para Θ_{sat} ($cm^3 \cdot cm^{-3}$), 0,09 e 0,029 para Θ_i ($cm^3 \cdot cm^{-3}$), e 316,3 e 88,9 para Ψ_f (mm) (Cecílio *et al.*, 2007; Sousa *et al.*, 2023). Para o parâmetro K_{sat} , foi escolhida uma faixa de valores entre 1 e 100 $mm \cdot h^{-1}$ com base em valores utilizados por Justino (2019) e Sobieraj *et al.* (2002), sendo então ajustados manualmente por meio de mais de 30 testes de calibração. Então, após os testes, os valores selecionados de K_{sat} foram 25 $mm \cdot h^{-1}$ para o LVd e 28 $mm \cdot h^{-1}$ para o LVAd.

O processo de estimativa dos parâmetros relacionados ao uso da terra seguiu a mesma lógica, isto é, foi realizada uma revisão bibliográfica para identificar valores possíveis, que foram testados e ajustados (Sith e Nadaoka, 2017; Fathi-Moghadam *et al.*, 2011; Furl *et al.*, 2018). Para as classes de uso da terra “Água”, “Árvores”, “Gramas”, “Plantações”, “Arbusto e matagal”, “Área construída” e “Solo exposto”, os valores escolhidos foram, respectivamente, 0,028, 0,03, 0,023, 0,02, 0,03, 0,045 e 0,044. Para esses valores, o NSE obtido foi 0,83. Para a validação foi simulado o evento de 23/11/2015, resultando em um valor de NSE igual a 0,66. O NSE obtido na fase de calibração foi classificado como “muito bom”, enquanto o índice de validação foi classificado como “bom” (Moriasi *et al.*, 2007) (Figura 2).

Figura 2 - Hietograma e hidrogramas observado e modelado de 25/02/2015 e 23/11/2015



2.4 Simulação de eventos críticos de projeto

Após a calibração do modelo e a validação dos parâmetros escolhidos, estruturaram-se os eventos de projeto, com chuvas de 2 horas de duração (semelhante ao tempo de concentração da bacia) e distribuição temporal pelo Método dos Blocos Alternados. A intensidade da chuva foi calculada utilizando uma IDF atual de São Carlos (Gomes Jr.*et al.*, 2021) e IDFs futuras (Jochelavicius *et al.*, 2022) ajustadas para incorporar os efeitos das mudanças climáticas sobre a precipitação, todas as IDFs foram aplicadas a tempos de retorno (TRs) de 100, 50, 25 e 10 anos. Como o estudo visa analisar cenários de eventos extremos, foram utilizadas as IDFs propostas para MIROC5 RCP 4.5 e RCP 8.5 (PT) para o período de 2051 a 2099, já que essas resultaram nos cenários de precipitação mais críticos entre os avaliados no estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados extraídos das saídas do modelo foram os mapas de profundidade máxima para cada cenário avaliado. Esses mapas foram utilizados para análises adicionais, como a diferença de profundidade máxima entre os cenários futuros e o atual, e as áreas totais inundadas em cada cenário.

3.1 Profundidades máximas e diferenças nas profundidades máximas

A profundidade máxima obtida variou de 0 (para áreas não alagadas) até 6,72 m, sendo esse valor registrado no trecho a jusante da bacia, próximo à Usina Hidrelétrica do Monjolinho, para o cenário MIROC5 RCP 4.5. Para a IDF atual, as profundidades máximas 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, foram de 6,61, 6,31, 6,02 e 5,75 m, correspondendo aos TRs de 100, 50, 25 e 10 anos, respectivamente. Para melhorar a visualização das áreas com profundidades críticas e suas variações entre os diferentes cenários, foi adotado um limiar de profundidade crítica de 3 m (altura comum para construções residenciais e aproximadamente metade da média das maiores profundidades). Portanto, todos os valores ≥ 3 m foram representados da mesma forma no mapa, conforme ilustrado na Figura 3.

Já a Figura 4 mostra a diferença nas profundidades máximas entre os cenários futuros e o atual, destacando áreas propensas a aumento da inundação ou sujeitas a inundações inéditas.

Figura 3 - Mapas de profundidades máximas para cada cenário. Os mapas de a) a d) são dos eventos atuais, os mapas de e) a h) são do cenário futuro com RCP 4.5 e os mapas de i) a l) são do cenário futuro com RCP 8.5, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente

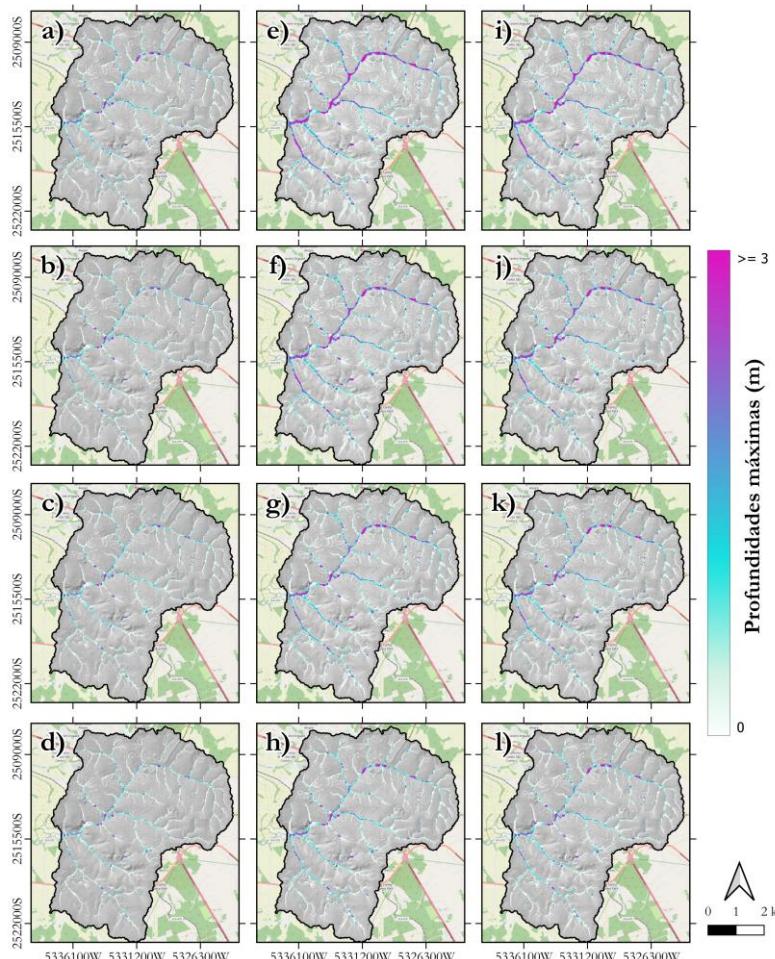
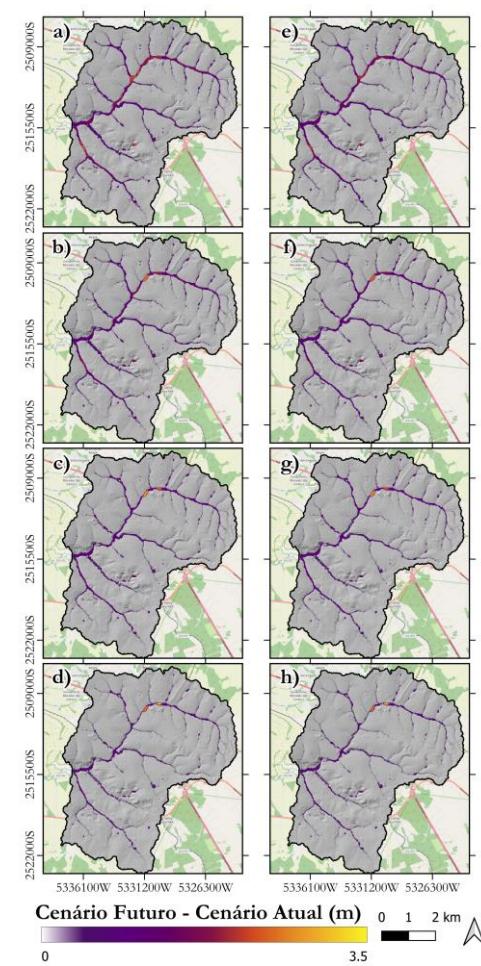


Figura 4 - Diferenças de profundidades máximas entre os eventos futuros e os eventos atuais. Os mapas de a) a d) para RCP 4.5 e, os mapas de e) a h) para RCP 8.5, com TR de 100, 50, 25 e 10, respectivamente



Como esperado, as maiores profundidades ocorreram nos rios, córregos e áreas próximas. As profundidades críticas (> 3 m) concentraram-se principalmente em confluências de cursos d'água e em áreas de maior declividade, onde o volume de água no canal se eleva. Quanto ao uso do solo, a classe mais afetada por profundidades críticas foi “árvore”, seguida por “áreas construídas” e “plantações”. As áreas com profundidade crítica variaram de $0,1 \text{ km}^2$ (IDF atual, TR de 10 anos) a $1,31 \text{ km}^2$ (MIROC5 RCP 4.5, TR de 100 anos). A maior vulnerabilidade das categorias “árvore” e “plantações” deve-se à sua proximidade com corpos hídricos. Já a presença de áreas construídas está relacionada à impermeabilização do solo que favorece o escoamento superficial rápido para os canais urbanos, córregos e rios. Por isso, o cenário “IDF atual e TR de 10 anos” apresentou o maior percentual de áreas construídas afetadas em relação à área crítica total, porque áreas urbanas tendem a sofrer com inundações mesmo com chuvas de baixos tempos de retorno.

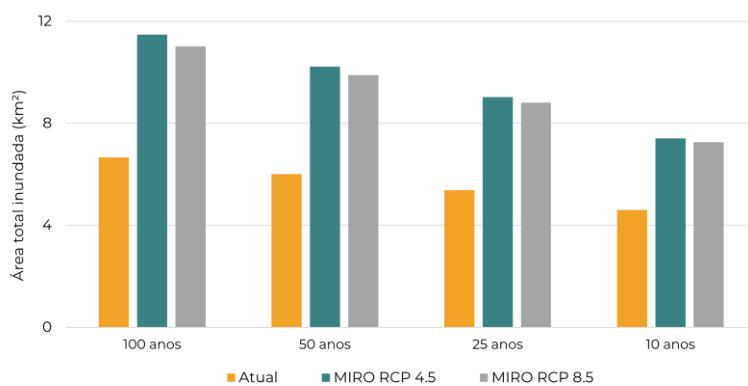
Em relação às diferenças de profundidade, para o tempo de retorno (TR) de 100 anos, os principais pontos com aumento significativo de profundidade (>2 m) são: a confluência das bacias do Santa Maria do Leme e do Tijuco Preto com o rio Monjolinho (próximo à Praça do Kartódromo), o trevo da rodovia SP-318, a UFSCar (próxima ao Reservatório do Monjolinho) e a saída da bacia do Água Fria. No TR de 50 anos, as mesmas regiões apresentaram aumento de profundidade, porém com

menor magnitude. Para os 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 do Reservatório do Monjolinho. Essas diferenças são provavelmente atribuídas à saturação da capacidade de infiltração do solo, especialmente em bacias pouco urbanizadas, como Santa Maria do Leme e Água Fria.

3.2 Áreas inundadas totais

Com o objetivo de verificar se houve um aumento nas áreas totais inundadas entre o cenário atual de IDF e os cenários futuros, foram calculadas as áreas onde o modelo indicou profundidades de inundação superiores a 0,3 m. O valor de 0,3 m foi escolhido para considerar imprecisões e incertezas do modelo, como a baixa resolução espacial do MDE, além de ser um valor comumente utilizado em estudos de inundação (Gomes Jr. *et al.*, 2024). As áreas totais inundadas para os diferentes cenários podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5 - Áreas totais inundadas para todos os cenários com profundidades maiores que 0,3



Ao analisar os cenários futuros, para um período de retorno de 100 anos, a área inundada acima de 0,3 m atinge aproximadamente 11 km². Para o período de retorno de 50 anos, o modelo indica áreas em torno de 10 km² tanto para o cenário MIROC5 RCP 4.5 quanto para o MIROC5 RCP 8.5. Nestes mesmos cenários, para os períodos de retorno de 25 e 10 anos, as áreas variam entre 7 km² e 9 km², respectivamente. Para os cenários atuais de IDF, as áreas inundadas variam de 4,6 km² a 6,7 km², conforme o período de retorno. O aumento médio na área inundada ao longo dos períodos de retorno é de 1,3 km² para os cenários futuros e de 0,7 km² para o cenário atual.

Observa-se que o aumento percentual áreas inundadas entre o cenário atual e cenários futuros é mais significativo para o período de retorno de 100 anos, chegando a até 72,36% no cenário MIROC5 RCP 4.5. Esse aumento percentual diminui progressivamente com a redução do TR, alcançando 57,64% para o TR de 10 anos no cenário MIROC5 RCP 8.5. De modo geral, os resultados indicam que, quanto maior o período de retorno, maior é o aumento percentual da área afetada por inundações nos cenários futuros. Além disso, os cenários MIROC5 RCP 4.5 tendem a apresentar percentuais e áreas absolutas inundadas superiores, conforme evidenciado na Figura 5.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este estudo desenvolveu uma metodologia para avaliar o impacto das mudanças climáticas em inundações urbanas, envolvendo a caracterização da bacia, calibração manual e simulação de cenários com o modelo hidrodinâmico HydroPol2D. A calibração foi baseada em dados de uma sub-bacia e os parâmetros foram extrapolados para a bacia urbana de São Carlos, o que representa uma fonte de incerteza. As simulações indicaram que os cenários futuros, especialmente o MIROC5 RCP 4.5 com

período de retorno de 100 anos, resultam em maiores áreas e profundidades de inundação, principalmente em locais já conhecidos por serem críticos, como o Mercado Municipal, a Rotatória do Cristo e a Praça do Kartódromo. A comparação entre cenários atuais e futuros mostrou aumento significativo de vulnerabilidade em regiões que atualmente não apresentam inundações relevantes. Já a análise por uso do solo revelou que áreas arborizadas e de plantações serão as mais afetadas no futuro. Apesar das limitações relacionadas à resolução topográfica, incertezas sobre o uso futuro do solo e a ausência de estruturas de drenagem no modelo, a metodologia proposta é simples, replicável e pode ser aplicada em bacias pouco monitoradas para apoiar o planejamento e a gestão de recursos hídricos diante das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- BATES, P. D., HORRITT, M. S., & FEWTRELL, T. J. (2010). *A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling*. Journal of Hydrology, 387(1–2), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>
- BRASIL (2022). *A P&DC e os 30 anos de desastres no Brasil: (1991 - 2020)*. Florianópolis: Fepese, 64 p.
- BROWN, C. F., BRUMBY, S. P., GUZDER-WILLIAMS, B., BIRCH, T., HYDE, S. B., MAZZARIELLO, J., CZERWINSKI, W., PASQUARELLA, V. J., HAERTEL, R., ILYUSHCHENKO, S., SCHWEHR, K., WEISSE, M., STOLLE, F., HANSON, C., GUINAN, O., MOORE, R., & TAIT, A. M. (2022). *Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping*. Scientific Data, 9(1), 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>.
- BUARQUE, A. C. S., SOUZA, C. F., SOUZA, F. A. A., & MENDIONDO, E. M. (2021). *Urban flood risk under global changes: a socio-hydrological and cellular automata approach in a Brazilian catchment*. Hydrological Sciences Journal, 66(14), 2011–2021.
- CECÍLIO, R. A., MARTINEZ, M. A., PRUSKI, F. F., SILVA, D. D. D., & ATAÍDE, W. F. (2007). *Substituição dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson para estimativa da infiltração em alguns solos do Brasil*. Revista Brasileira de Ciencia Do Solo, 31(5), 1141–1151. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832007000500029>.
- CHOU, S. C., LYRA, A., MOURÃO, C., DERECZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., BUSTAMANTE, J., TAVARES, P., SILVA, A., RODRIGUES, D., CAMPOS, D., CHAGAS, D., SUEIRO, G., SIQUEIRA, G., & MARENKO, J. (2014). *Assessment of climate change over south America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios*. American Journal of Climate Change, 03(05), 512–527. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1988). *Applied hydrology* (572 p). New York: McGraw-Hill.
- EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. (2023). *Copernicus Space Component Data Access PANDA Catalogue*.
- FATHI-MOGHADAM, M., KASHEFIPOUR, M., EBRAHIMI, N., & EMAMGHOLIZADEH, S. (2011). *Physical and numerical modeling of submerged vegetation roughness in rivers and flood plains*. Journal of Hydrologic Engineering, 16(11), 858–864. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.000038](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.000038).
- FAVA, M. C., ABE, N., RESTREPO, C. E., MENDIONDO, E. M., & SOUZA, V. C. B. (2015). *Redução de incertezas na previsão de enchentes com uso de dados colaborativos*. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1–8.
- FURL, C., GHEBREYESUS, D., & SHARIF, H. O. (2018). *Assessment of the performance of satellite-based precipitation products for flood events across diverse spatial scales using GSSHA modeling system*. Geosciences, 8(6), 191. <https://doi.org/10.3390/geosciences8060191>.
- GOMES JR., M. N., JALIHAL, V., CASTRO, M., & MENDIONDO, E. M. (2025). *Exploring the impact of rainfall temporal distribution and critical durations on flood hazard modeling*. Natural Hazards, 1–24.
- GOMES JR., M. N., GIACOMONI, M. H., NAVARRO, F. A. R., & MENDIONDO, E. M. (2024b). *Global optimization-based calibration algorithm for a 2D distributed hydrologic-hydrodynamic and water quality model*. Environmental Modelling & Software: With Environment Data News, 179(106128).

GOMES JR., M. N.; BRAGA, P. H. A.; MENDIONDO, E. M.; REIS, L. F. R. (2021). *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, 69(228), 171–189.

GOMES JR., M. N. (2023a). *Advances in open source hydroinformatics for flood modeling and disaster education* (Doctoral dissertation). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/T.18.2023.tde-18042024-142515.

GOMES JR., M. N. HydroPol2D. Versão v.0.0.1. (2023b, 08 of October).

GOMES JR., M. N., CASTRO, M. DE A. R. A., SANCHEZ, M. H., RÁPALO, L. M. C., GIACOMONI, M. H., DE PAIVA, R. C. D., & BATES, P. (2024a). *Spatio-temporal performance of 2d local inertial hydrodynamic models for urban drainage and dam-break applications*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4984679>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Solos 1:5000000. (2006).

JOCHELAVICUS, V., MENDIONDO, E. M., GOMES JR., M. N., & MACEDO, M. B., (2022). *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, 70(238), 19–32.

JUSTINO, E. A. (2019). *Comportamento hidrodinâmico do solo e da recarga potencial do aquífero a partir de poços de infiltração de águas pluviais* (Tese de doutorado). Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

LIN, F., CHEN, X., & YAO, H. (2017). *Evaluating the use of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient in goodness-of-fit measures for daily runoff simulation with SWAT*. Journal of Hydrologic Engineering, 22(11), 05017023. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001580](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001580)

MARTINS, R. G. (2017). *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* (Tese de doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/T.18.2017.tde-18052017-100316.

MISHRA, B. K., RAFIEI EMAM, A., MASAGO, Y., KUMAR, P., REGMI, R. K., & FUKUSHI, K. (2018). *Assessment of future flood inundations under climate and land use change scenarios in the Ciliwung River Basin, Jakarta*. Journal of Flood Risk Management, 11(S2), S1105–S1115. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12311>

D. N. MORIASI, J. G. ARNOLD, M. W. VAN LIEW, R. L. BINGNER, R. D. HARMEL, & T. L. VEITH. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Transactions of the ASABE, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

POOL, S., VIS, M., & SEIBERT, J. (2021). *Regionalization for ungauged catchments — lessons learned from a comparative large-sample study*. Water Resources Research, 57(10). <https://doi.org/10.1029/2021wr030437>

SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. (2013). *Possíveis impactos de mudanças climáticas em curvas intensidade duração e frequência*. Anais do Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos - SBRH, 20. Bento Gonçalves, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH.

SITH, R., & NADAOKA, K. (2017). *Comparison of SWAT and GSSHA for high time resolution prediction of stream flow and sediment concentration in a small agricultural watershed*. Hydrology, 4(2), 27. <https://doi.org/10.3390/hydrology4020027>

SIQUEIRA, V. A., FAN, F. M., PAIVA, R. C. D. DE, RAMOS, M.-H., & COLLISCHONN, W. (2020). *Potential skill of continental-scale, medium-range ensemble streamflow forecasts for flood prediction in South America*. Journal of Hydrology, 590(125430), 125430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125430>

SOBIERAJ, J. A., ELSENBEEER, H., COELHO, R. M., & NEWTON, B. (2002). *Spatial variability of soil hydraulic conductivity along a tropical rainforest catena*. Geoderma, 108(1–2), 79–90. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(02\)00122-2](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(02)00122-2)

SOUSA, M. R.; GOMES JR, M. N.; OLIVEIRA, E. P.; RAPALO, L. M., C.; NAVARRO, F. A. R.; MENDIONDO, E. M. (2023). *Modelagem Distribuída Fisicamente baseada em Bacias Urbanas: Modelo HydroPol2D aplicado à São Carlos (SP)*. Anais do SBRH, 25. Aracaju, SE: ABRH. Acesso em: 8 out. 2024.

TUCCI, C. E. M. (org). (2007). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4 ed. Editora UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 943.

ZHANG, Y., WANG, Y., CHEN, Y., LIANG, F., & LIU, H. (2019). *Assessment of future flash flood inundations in coastal regions under climate change scenarios-A case study of Hadahe River basin in northeastern China*. The Science of the Total Environment, 693(133550), 133550. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.356>