

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS EM PAVIMENTO PERMEÁVEL: SIMULAÇÃO COM EPA SWMM**

*André Eduardo Pereira Pedroso<sup>1</sup>; Fernando Allan Oliveira dos Santos<sup>2</sup>; Cesar Augusto Medeiros*

*Destro<sup>3</sup> & Rafael Jansen Mikami<sup>4</sup>*

**Abstract:** The availability of technical literature about sensitivity analysis of parameters in the LID module of EPA SWMM remains notably limited. This study aimed to address this gap by conducting a comprehensive sensitivity analysis of permeable pavement parameters using EPA SWMM coupled with the py-swmm Python library, enabling detailed assessment of system behavior under parameter variations and supporting model calibration procedures. Precipitation data for modeling were derived from intensity-duration-frequency (IDF) curves for Pato Branco, Paraná. Six synthetic rainfall events were generated, with three following Huff's first quartile distribution and three following Huff's second quartile distribution. Results demonstrated significant influence of rainfall characteristics on parameter sensitivity, with the most sensitive parameters being the drain exponent, drain coefficient, bedding layer porosity, and bedding layer thickness. This research enhances understanding of the interaction between rainfall patterns and parameter sensitivity in sustainable drainage systems, providing valuable insights for the design and optimization of permeable pavements in urban hydrology applications.

**Resumo:** A disponibilidade de documentação sobre análise de sensibilidade dos parâmetros do módulo LID do EPA SWMM é ainda bastante limitada na literatura técnica. Este estudo buscou contribuir para o preenchimento dessa lacuna realizando uma análise abrangente da sensibilidade dos parâmetros de pavimentos permeáveis utilizando o EPA SWMM em conjunto com a biblioteca py-swmm em Python, permitindo uma compreensão detalhada do comportamento do sistema frente a variações parametrizadas e auxiliando no processo de calibração. Os dados de precipitação utilizados na modelagem foram obtidos com base na equação de intensidade-duração-frequência da cidade de Pato Branco-PR. Foram geradas seis chuvas artificiais, sendo três no primeiro quartil e três no segundo quartil de Huff. Os resultados demonstraram que as características da precipitação exercem influência significativa na sensibilidade dos parâmetros. Os parâmetros mais sensíveis foram: o expoente do dreno, o coeficiente do dreno, a porosidade da camada de assentamento e a espessura da camada de assentamento. Esta pesquisa contribui para uma melhor compreensão da interação entre características pluviométricas e sensibilidade parametrizada em sistemas de drenagem sustentável, oferecendo subsídios valiosos para o planejamento e otimização de pavimentos permeáveis em contextos urbanos.

**Palavras-Chave** – Pavimentos permeáveis, análise de sensibilidade, EPA SWMM.

1) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, via do Conhecimento, CEP 85.503-390, Pato Branco/PR, andreduardopp@gmail.com

2) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, via do Conhecimento, CEP 85.503-390, Pato Branco/PR, fernandoallan@alunos.utfpr.edu.br

3) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, via do Conhecimento, CEP 85.503-390, Pato Branco/PR, cesardestro@utfpr.edu.br

4) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, via do Conhecimento, CEP 85.503-390, Pato Branco/PR, rjmikami@utfpr.edu.br

## INTRODUÇÃO

Os pavimentos permeáveis representam uma opção sustentável em comparação aos tradicionais, pois ajudam a diminuir o escoamento da água da chuva, reduzindo o risco de inundações e a contaminação dos recursos hídricos (costa et al., 2020). Compostos por várias camadas altamente permeáveis, os pavimentos permeáveis facilitam a infiltração da água até o subleito ou para um dreno na camada inferior, melhorando a drenagem urbana. No entanto, a dificuldade em desenvolver modelos hidráulicos precisos que simulem seu comportamento real exige estudos de calibração e sensibilidade para ajustar os parâmetros e garantir resultados confiáveis (Brunetti; Simunek; Piro, 2016).

Para aprimorar a representação do desempenho hidráulico desses sistemas em modelos computacionais, diversas abordagens têm sido utilizadas, entre elas a modelagem por meio do EPA SWMM (*Storm Water Management Model*) (Rossman, 2015), amplamente empregado na simulação de sistemas de drenagem urbana. Este modelo permite a inserção de diferentes camadas e propriedades dos pavimentos permeáveis, possibilitando uma análise detalhada do comportamento da infiltração e do armazenamento da água. Contudo, devido à complexidade do sistema e à variabilidade dos materiais utilizados, é necessário um entendimento aprofundado da influência de cada parâmetro inserido no modelo.

Nesse sentido, no intuito de facilitar o processo de calibração de modelos de pavimentos permeáveis, é importante se avaliar quais parâmetros possuem maior influência no comportamento hidráulico do modelo. Randall et al. (2020) e Uribeetxebarria et al. (2021) analisaram a sensibilidade dos parâmetros de um pavimento permeável modelado no EPA SWMM. Para Randall et al. (2020), os parâmetros mais sensíveis foram o *offset* do dreno, a proporção de vazios da camada de armazenamento e a capacidade de campo. Por outro lado, para Uribeetxebarria et al. (2021), os parâmetros mais sensíveis foram a proporção de vazios da camada de pavimento, o *offset* do dreno e a proporção de vazios da camada de armazenamento.

Com base nesses resultados, os pesquisadores podem estabelecer critérios mais robustos para estimar os parâmetros e melhorar a acurácia das modelagens (Costa et al., 2020). Neste sentido, o presente trabalho objetiva utilizar o módulo LID (*Low Impact Development*) do software EPA SWMM para simular o comportamento de um pavimento permeável localizado na UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) em Pato branco e verificar a sensibilidade dos parâmetros desse sistema.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

O estudo foi conduzido na cidade de Pato Branco/PR, que está localizada no sudoeste do estado do Paraná. A cidade abriga a Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, situado na Via do Conhecimento, Km 1. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), a população de Pato Branco era de 91.836 habitantes no censo de 2022. A cidade possui uma área de 537,8 km<sup>2</sup>, a localização do modulo de pavimento permeável utilizado no estudo pode ser visualizada na Figura 1.

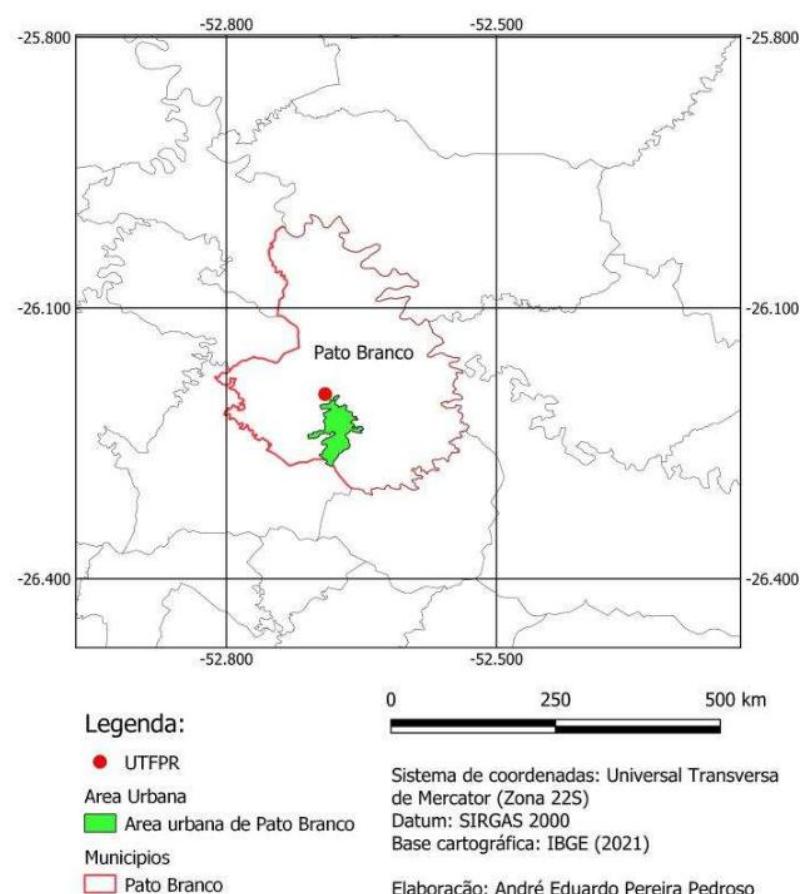
Quanto a pluviometria na região, durante o período de 1979 a 2005, no município de Pato Branco, constatou-se que a média anual de precipitação foi de 2109,79 mm, sendo outubro o mês mais chuvoso e agosto o mês com menor índice pluviométrico (Tabalipa e Fiori, 2008).

Para a análise dos parâmetros do modelo de pavimento permeável no SWMM, foi necessário realizar a simulação de dados hidrológicos de precipitações, que foram inseridos no software. Dessa forma, foi possível recriar um evento de chuva que precipitou sobre o modelo, permitindo a obtenção de dados hidráulicos que descrevem o comportamento do pavimento permeável.

No contexto da análise de precipitações em um estudo hidrológico, é comum utilizar critérios para classificar a intensidade da chuva de acordo com a taxa de precipitação. Esses critérios podem ser definidos em termos de três categorias: chuva leve, chuva moderada e chuva intensa. Essas categorias são determinadas com base na taxa de precipitação em milímetros por hora (mm/h) e são estabelecidas da seguinte forma: chuva leve quando a taxa de precipitação é de 2,5 mm/h ou menos, chuva moderada quando a taxa de precipitação está entre 2,6 e 7,5 mm/h, e chuva intensa quando a taxa de precipitação é de 7,6 mm/h ou mais. Esses critérios podem ser utilizados para classificar a intensidade da chuva em diferentes situações, como chuva comum (rain), chuva em forma de aguaceiros (rain showers) ou chuva congelante (freezing rain), facilitando assim a análise e interpretação dos dados hidrológicos obtidos (MANOBS, 2015).

Figura 1 – Mapa de Localização de Pato Branco/PR.

### Mapa de localização de Pato Branco - Paraná/Brasil



Para simular os eventos de chuvas foram utilizadas distribuições temporais padronizadas baseadas em chuvas observadas. Os hietogramas, chuva em função do tempo, foram desenvolvidos de acordo com distribuições conhecidas, como as de Huff (1967). O método desenvolvido por Huff (1967) permite classificar as precipitações em quatro grupos, com durações divididas em quatro partes iguais para cada grupo (Abreu; Sobrinha e Brandão, 2017).

Para que fosse utilizado o método de Huff foi necessário chegar a um valor de intensidade da chuva para a cidade de Pato Branco utilizou-se a Equação 1 Intensidade-Duração-Frequência (IDF), desenvolvida por Reis (2017) que fornece informações sobre a intensidade da chuva em diferentes durações e frequências.

$$i = \frac{986,7 \cdot TR^{0,1457}}{(TC + 9,791)^{0,7244}} \quad (1)$$

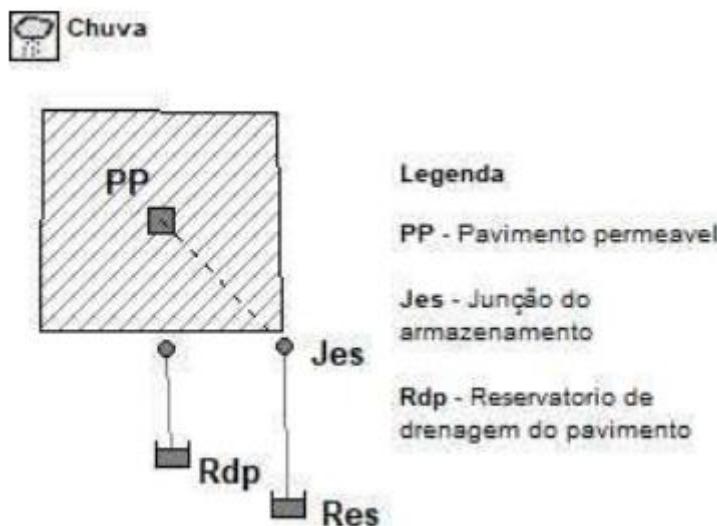
Onde  $i$  é a intensidade de precipitação ( $mm/h$ ),  $TR$  é o tempo de retorno (*anos*) e  $TC$  é o tempo de duração da chuva (*min*).

## Modelagem usando o EPA SWMM

Após selecionar a área de estudo e simular as precipitações, foi representado o módulo experimental de pavimento permeável no EPA SWMM por meio da criação de uma sub-bacia. Nessa abordagem, a área da sub-bacia correspondia exatamente à área ocupada pelo módulo experimental. Para incorporar o pavimento permeável ao modelo, foi utilizado o módulo LID disponível no software. Assim, foi possível configurar e inserir o pavimento permeável dentro da sub-bacia, permitindo a simulação e análise dos efeitos desse tipo de pavimento no contexto hidrológico do EPA SWMM.

A Figura 2 representa como o pavimento permeável foi representado no módulo LID dentro do software SWMM. Os valores iniciais lançados para cada parâmetro desse sistema se encontram na Tabela 1.

Figura 2 – Modelo de pavimento permeável em uma sub-bacia no SWMM.



O módulo LID para pavimentos permeáveis no SWMM possui 23 parâmetros que podem ser alterados. Foram escolhidos alguns desses parâmetros que afetam o sistema de um pavimento permeável no módulo LID do SWMM para analisar sua influência no escoamento superficial da área. A análise de sensibilidade foi realizada selecionando um parâmetro por vez e alterando seu valor em uma faixa de mais ou menos 90% do seu valor inicial, enquanto os outros parâmetros permaneceram fixados em seus valores iniciais. Essa abordagem permitiu avaliar a sensibilidade individual dos parâmetros e como eles afetam o resultado das simulações. Com base nesses resultados, foi possível

identificar os parâmetros mais críticos para a eficiência do sistema de pavimento permeável e fornecer resultados para que a calibração do sistema seja realizada de forma mais eficiente.

A equação 9 permitiu o cálculo de um coeficiente de sensibilidade local. Esse coeficiente possibilita a comparação de sensibilidade de parâmetros mesmo que esses possuam diferentes magnitudes.

$$S_r = \frac{\partial R}{\partial P} \quad (2)$$

onde  $S_r$  é Coeficiente de sensibilidade local;  $\partial R$  é a diferença entre o original com a nova saída do modelo,  $\partial P$  é a diferença entre o parâmetro original com o parâmetro ajustado,  $P$  é o valor original do parâmetro de interesse e  $R$  é a saída do modelo original. No presente trabalho, foi analisada a sensibilidade de todos os parâmetros não nulos presentes no modulo LID do software SWMM, esses estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixa de valores para a análise de sensibilidade.

Camada	Parâmetro	Valores iniciais	Faixa de variação
Camada superficial	Coeficiente de Manning	0,025	0,001 – 0,2
Camada superficial	Declividade	3%	0,015% – 0,6%
Camada de pavimento	Espessura	58 mm	5 – 110 mm
Camada de pavimento	Proporção de vazios	0,17	0,008 – 0,34
Camada de pavimento	Permeabilidade	8.7154 mm/h	4.000 – 160.000 mm/h
Assentamento	Porosidade	0,44	0,044 – 0,836
Assentamento	Espessura	50	5 – 95
Assentamento	Condutividade	800	80 – 1520
Assentamento	Capacidade de campo	0,2	0,15 – 0,4
Assentamento	Ponto de murcha	0,1	0,01 – 0,19
Assentamento	Cond. hidráulica saturada	38.197 mm/h	1.600 – 80.000 mm/h
Armazenamento	Proporção de vazios	0,42	0,042 – 0,798
Armazenamento	Altura	360 mm	36 – 720 mm
Dreno	Coeficiente do dreno	2,5	0,25 – 4,75
Dreno	Offset do dreno	12 mm	0,6 – 28 mm
Dreno	Expoente do dreno	0,5	0,05 – 0,95

Fonte: autoria própria

Essa análise permitiu avaliar a influência de cada parâmetro no sistema. A Tabela 1 também exibe as faixas de valores utilizada para realizar a análise de sensibilidade de cada parâmetro.

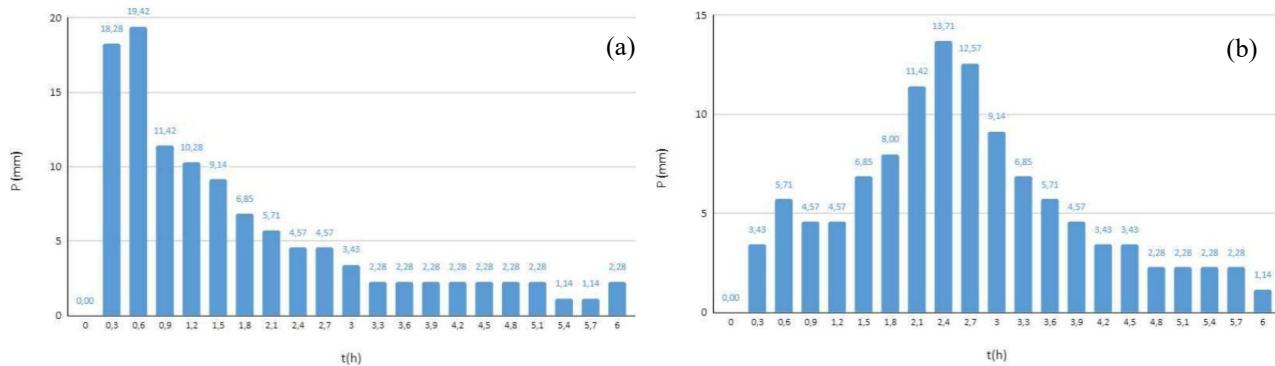
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Hietogramas de Huff

Utilizando a equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Pato Branco/PR (Equação 1), foram elaboradas seis diferentes precipitações associadas a tempos de retorno (TR) de 5, 10 e 25 anos, considerando-se tanto o primeiro quanto o segundo quartil da distribuição de Huff. Cabe destacar que houve uma variação significativa na duração da precipitação entre os dois quartis: para o primeiro quartil, adotou-se uma duração de 60 minutos, enquanto para o segundo quartil foi necessário um tempo mínimo de precipitação de 6 horas.

A Figura 3 apresenta dois hietogramas ilustrativos que foram utilizados nas simulações. O primeiro representa um evento de precipitação com tempo de retorno de 10 anos, associado ao primeiro quartil da distribuição de Huff e duração de 60 minutos. O segundo hietograma retrata o perfil correspondente ao segundo quartil da mesma distribuição, evidenciando a diferença nas características temporais da precipitação.

Figura 3 – Hietogramas de Huff. (a) Hietograma do primeiro quartil de Huff e (b) Hietograma do segundo quartil de Huff.



### Análise de sensibilidade

A Tabela 2 apresenta os cinco parâmetros mais sensíveis para cada precipitação definido com base no primeiro quartil e segundo quartis da distribuição de Huff. As siglas adotadas representam: ED (expoente do dreno), CD (coeficiente de dreno), EP (espessura da camada de pavimento), EA (espessura da camada de assentamento), PA (porosidade da camada de assentamento), AAr (altura da camada de armazenamento) e PVAr (proporção de vazios da camada de armazenamento).

Observa-se que, mesmo diante das variações na intensidade e nas características das chuvas entre os quartis, os parâmetros mais sensíveis permaneceram, em sua maioria, inalterados. As principais alterações foram verificadas nos modelos associados ao primeiro quartil, com destaque para a inclusão da altura da camada de armazenamento como o quinto parâmetro mais sensível e da porosidade da camada de assentamento como o terceiro parâmetro mais influente nas precipitações com tempos de retorno de 10 e 25 anos.

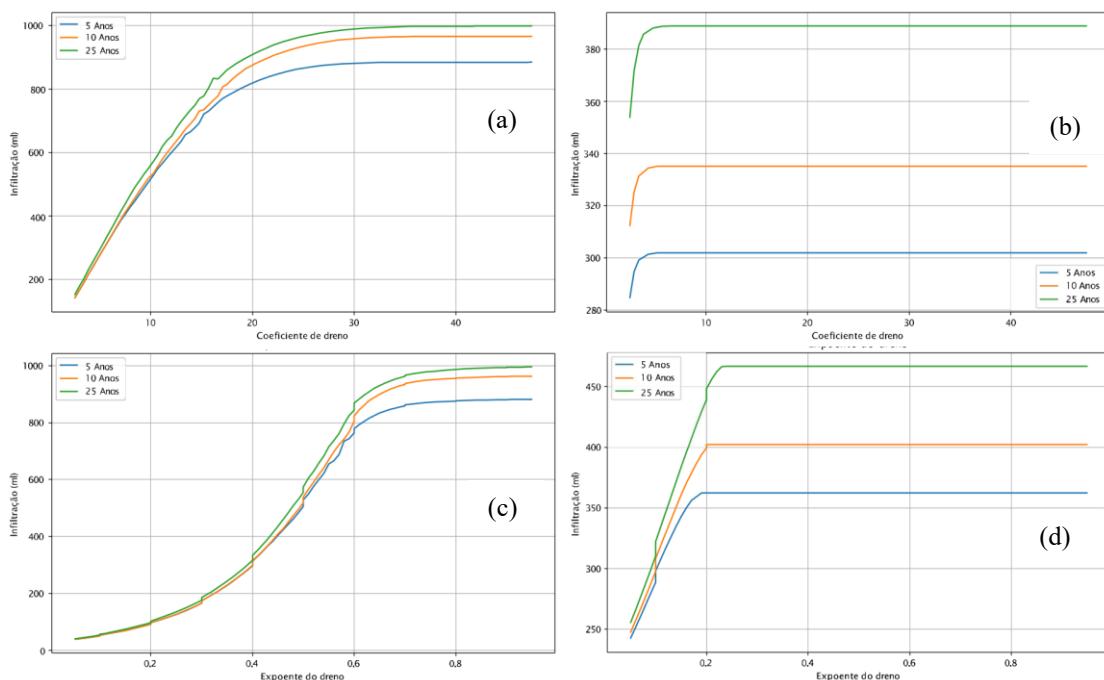
Tabela 2 – Parâmetros mais sensíveis

Quadrante de Huff	TR	1º	2º	3º	4º	5º
1º quadrante	5 anos	ED	CD	EP	EA	PA
	10 anos	ED	CD	PA	EA	AAr
	25 anos	ED	CD	PA	EA	AAr
2º quadrante	5 anos	ED	CD	PA	EA	PVar
	10 anos	ED	CD	PA	EA	PVar
	25 anos	ED	CD	PA	EA	PVar

A Figura 4 evidencia que o coeficiente de dreno influencia significativamente o processo de infiltração até determinado limiar, a partir do qual sua contribuição se torna desprezível. Para os cenários de precipitação associados ao primeiro quartil da distribuição de Huff, observa-se que a sensibilidade do modelo em relação a esse parâmetro diminui consideravelmente quando o coeficiente ultrapassa o valor de 30. Por outro lado, nos cenários do segundo quartil, essa perda de sensibilidade ocorre já a partir de valores superiores a 10.

Essa discrepância está relacionada à intensidade e à distribuição temporal das chuvas: enquanto no primeiro quartil predominam precipitações mais intensas e concentradas, exigindo maior capacidade de escoamento do sistema, no segundo quartil as chuvas são mais suaves e espaçadas, o que reduz a relevância de coeficientes de dreno elevados para o desempenho hidráulico do pavimento permeável.

Figura 4 – Infiltração em relação ao coeficiente do dreno (a) para as precipitações de 1º quartil e (b) para as precipitações de 2º quartil e Infiltração em relação ao expoente do dreno (c) para as precipitações de 1º quartil e (d) para as precipitações de 2º quartil.



Adicionalmente, observa-se que variações nos valores do expoente do dreno apresentam um comportamento proporcional à taxa de infiltração no reservatório, de forma análoga ao observado para o coeficiente de dreno. Nos cenários de precipitação do segundo quartil da distribuição de Huff, o expoente do dreno torna-se insensível ao sistema para valores significativamente inferiores aos verificados no primeiro quartil. Esse parâmetro destaca-se como o mais sensível entre os analisados, uma vez que pequenas alterações em seus valores resultam em variações expressivas na infiltração acumulada no reservatório, evidenciando sua influência crítica no desempenho hidráulico do sistema modelado.

Para os outros parâmetros, por exemplo, a espessura da camada de assentamento, para eventos de precipitação correspondentes ao primeiro quartil da distribuição de Huff, apresenta uma relação diretamente proporcional com a infiltração no reservatório, ou seja, o aumento da espessura resulta em maior volume infiltrado. No entanto, nos cenários de chuvas do segundo quartil, se observou um ponto de inflexão: a partir de determinado valor, o incremento da espessura da camada de assentamento passa a ocasionar uma redução na infiltração, caracterizando um comportamento inversamente proporcional. Tal discrepância decorre da maior intensidade das precipitações do primeiro quartil, que desloca o ponto de inflexão para valores mais elevados do parâmetro, mantendo sua influência positiva sobre o desempenho do sistema até limites superiores.

A altura da camada de armazenamento também afetou a infiltração no sistema em uma faixa de valores até 500 mm, para chuvas no primeiro quartil. Para chuvas no segundo quartil a mudança nos valores desse parâmetro não afetou a infiltração no reservatório. Para a porosidade da camada de assentamento, o comportamento encontrado foi semelhante com o coeficiente do dreno, com uma relação proporcional entre o parâmetro e a infiltração no reservatório para chuvas de primeiro e segundo quartil. Porém no segundo quartil, por conta que a precipitação é mais branda, o parâmetro se torna insensível para o sistema em valores bem menores.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou que a aplicação do módulo LID do SWMM na análise de sensibilidade dos parâmetros de um pavimento permeável resultou em dados consistentes e confiáveis. A integração com a biblioteca SWMM-PY, em Python, contribuiu para uma compreensão mais detalhada da influência individual de cada parâmetro associado ao módulo de pavimento permeável adotado. No decorrer da análise, observou-se que a maior parte dos parâmetros apresentou não apresentou sensibilidade ou teve sensibilidade reduzida.

Apenas os parâmetros diretamente relacionados à capacidade de retenção do pavimento apresentaram sensibilidade significativa na análise, resultado atribuído à expressiva discrepância entre a capacidade de infiltração do pavimento permeável considerado e os volumes de precipitação simulados. Para os eventos de chuva representativos do primeiro quartil da distribuição de Huff, os parâmetros que mais influenciaram a modelagem foram: expoente do dreno, coeficiente do dreno, porosidade da camada de assentamento, espessura da camada de assentamento e altura da camada de armazenamento. Por sua vez, nos cenários do segundo quartil, os parâmetros de maior sensibilidade foram: expoente do dreno, coeficiente do dreno, porosidade da camada de assentamento, espessura da camada de assentamento e proporção de vazios da camada de armazenamento.

Além da análise de sensibilidade dos parâmetros no contexto do módulo experimental do pavimento permeável, foi possível ajustar os valores iniciais de certos parâmetros, como a permeabilidade do pavimento e a espessura da camada de assentamento. Isso permitiu obter uma

compreensão mais aprofundada do comportamento da sensibilidade dos parâmetros em diferentes faixas de valores. Também foi possível constatar a influência do tempo de retorno e das características da precipitação na sensibilidade dos parâmetros. Embora o offset e o coeficiente do dreno ainda se mantenham como os dois parâmetros mais sensíveis, observou-se que os todos os parâmetros sensíveis sofrem alterações significativas com a variação das características das precipitações.

finalmente, a aplicação da biblioteca SWMM-PY demonstrou ser uma ferramenta versátil e eficaz que pode ser estendida para análises em diversos tipos de LID ou em outros módulos do software SWMM. Essa abordagem oferece a oportunidade de aprofundar ainda mais o entendimento do comportamento de sistemas de drenagem e pavimentos permeáveis sob diversas condições, contribuindo para o avanço da engenharia hidráulica e ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, F. G. de; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2017.
- BRUNETTI, G.; SIMUNEK, J.; PIRO, P. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. *Journal of Hydrology*, p. 2-3, 2016.
- COSTA, L. A. et al. Sensitivity of hydrodynamic parameters in the simulation of water transfer processes in a permeable pavement. *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 25, p. 2-3, 2020.
- HUFF, F. A. *Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois*. Department of energy and natural resources, 1967.
- MANOBS, Meteorological Service of Canada. *MANOBS - Manual of surface weather observations*. [S.1.: s.n.), 2015. 463 p. ISBN 9781100254456.
- RANDALL, M. et al. Comparison of SWMM evaporation and discharge to in-field observations from lined permeable pavements. *Urban Water Journal*, 2020.
- REIS, D. L. dos. *Avaliação do desempenho de equações idf a partir de dados de precipitação de sensoriamento remoto (TMPA-V7)*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- ROSSMAN, L. A. *SWMM 5.0 manual do usuário*. [S.1.], 2015.
- TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. *Estudo do clima do município de Pato Branco*, Paraná. 2008.
- URIBEETXEBARRIA, E. M.. et al. Sensitivity analysis of permeable pavement hydrological modelling in the Storm Water Management Model. *Journal of Hydrology*, 2021.