APLICAÇÕES E LIMITAÇÕES DO MÓDULO LID DO SWMM: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Autores: Gleyciane Maria da Silva Mendes[1], Fernanda Viana Paiva Arguello[2].

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, gleycianemendes08@gmail.com, fernanda.arguello@univap.br.

Resumo

O módulo LID do SWMM (Storm Water Management Model) é amplamente utilizado no estudo de técnicas de baixo impacto no manejo de águas pluviais. Esse estudo, realizado por meio de revisão bibliográfica de caráter qualitativo, teve como objetivo revisar e analisar as aplicações do módulo LID do SWMM, com ênfase nas metodologias aplicadas na melhora do desempenho do modelo, parametrização e calibração dos modelos de simulação. As principais limitações encontradas foram a simplificação de processos hidrológicos localizados e a capacidade computacional exigida para estabelecer uma relação entre parâmetros e resultados através de simulação. A principal forma de mitigação foi o acoplamento do SWMM à outras ferramentas, observando-se o início da adoção de ferramentas de inteligência artificial. Embora o módulo LID tenha restrições, a avaliação dos pesquisadores é, em geral, positiva.

Palavras-chave: SWMM. LID. Parametrização. Calibração. Otimização.

Área do Conhecimento: Engenharia Civil

Introdução

O SWMM (Storm Water Management Model), é um modelo dinâmico de chuva-vazão utilizado para simular escoamento superficial, principalmente em áreas urbanas. Foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) e opera em um conjunto de sub bacias que recebem precipitação, gerando escoamento e cargas de poluentes, permitindo monitorar a quantidade e a qualidade do escoamento em cada sub bacia em simulações com diferentes durações de chuva e tempos de retorno. (Rossman; Simon, 2022).

Visando a implementação de sistemas de drenagem sustentáveis, foram adicionadas técnicas de baixo impacto, nomeada LID (Low Impact Development), através de dispositivos LID padronizados, de forma a simular processos hidrológicos naturais, com o objetivo de reduzir o escoamento superficial. (Kim *et al*., 2024). O módulo LID é composto por três camadas (camada superficial, solo e armazenamento), que descrevem os processos físicos e hidrológicos envolvidos em cada técnica. Os parâmetros associados a cada camada permitem representar diferentes propriedades físicas e hidrológicas e ajustar a configuração de cada técnica LID às condições da área de aplicação. Ao alterar esses parâmetros, é possível representar estratégias LID de mesmas especificações a áreas de bacias com diferentes características de uso e ocupação do solo e simular seu comportamento. (Lee *et al*., 2022).

Embora o SWMM seja amplamente utilizado na avaliação de técnicas de baixo impacto, existem questionamentos em relação a calibração de parâmetros, validação de modelo e limitações na representação e análise de técnicas LID. O objetivo deste estudo é revisar e analisar as aplicações do módulo LID do SWMM, com ênfase nas metodologias aplicadas na melhora do desempenho do modelo, parametrização e calibração dos modelos de simulação.

Metodologia

O presente estudo se trata de uma revisão bibliográfica com caráter qualitativo e exploratório. Os artigos que serviram como fonte para as informações apresentadas foram selecionados da base de dados Google Acadêmico, a partir da busca pelas palavras-chave “SWMM” e “LID”, no período de publicação compreendido entre 2020 e 2026. Inicialmente foram selecionados 34 artigos, dentre os

resultados que apresentavam texto integral e acesso livre. Após leitura parcial dos artigos, foram excluídos 10 artigos que, embora apresentassem o uso do SWMM e mencionassem técnicas LID, não explicitavam em suas metodologias ou discussões aspectos referentes a parametrização do modelo ou propriedades das técnicas utilizadas e sua relação com a modelagem SWMM.

Foram incluídos 24 artigos nesse estudo. As fontes utilizadas continham texto original em inglês, que foi traduzido para o português com o auxílio da ferramenta Gemini 3.6 Flash, desenvolvida pela Google, no período compreendido entre 28 de julho de 2026 e 12 de agosto 2026.

Resultados

Neste trabalho foram observadas variadas técnicas LID, as mais frequentemente estudadas foram pavimentos permeáveis, com destaque para os trabalhos de Abdalla *et al*. (2021), que avaliaram o desempenho de pavimentos permeáveis com revestimento impermeável, e Wei *et al.* (2025), que compararam o desempenho de pavimentos permeáveis e semipermeáveis frente ao convencional; telhados verdes, com destaque para os trabalhos de Starzec *et al.* (2026) que investigaram os parâmetros mais influentes para as respostas hidráulicas e hidrológicas dos telhados verdes; e Ayog e Tan (2025), que estudaram como a declividade de telhados verdes influencia sua eficiência; e células de biorretenção, com destaque para o trabalho de Sun *et al.* (2023), na avaliação de desempenho hidrológico de células de biorretenção.

Na Tabela 1, foram descritos a quantidade de artigos pesquisados nesse estudo, que abordavam a técnica LID, a partir dos aspectos destacados no parágrafo anterior.

Tabela 1 – Frequência de Técnicas

Técnica LID	**N° Artigos**
Pavimento Permeável (Permeable Pavement)	13
Telhado Verde (Green Roof)	11
Célula de Biorretenção (Bioretention Cell)	8
Vala Vegetada (Vegetative Swale)	4
Jardim de Chuva (Rain Garden)	3
Reservatório de Retenção (Rain Barrel)	3
Técnicas Não Nativas	9

Fonte: Autoras

Nem todas as técnicas nativas do SWMM apareceram entre os artigos estudados. Em contrapartida, foram observadas técnicas não nativas, modeladas a partir de técnicas predefinidas com mudanças paramétricas e técnicas que foram modeladas utilizando mais de um módulo: trincheiras de infiltração (Qin *et al.,* 2025); valas de infiltração e caixas de filtragem com árvore (Song *et al.,*2023); biovaletas e floreiras de retenção (Kim *et al*., 2021); telhados verdes modelados no módulo próprio e no módulo de biorretenção (Jeffers *et al*., 2022). A maioria dos estudos utilizou mais de uma técnica, visando comparar determinados indicadores ou avaliar seu desempenho conjunto. Dentre as combinações observadas, a combinação biorretenção-telhado verde-pavimento permeável foi a mais frequente (Ekmekcioglu *et al.* 2021; Schmelzing e Schmalz, 2025).

Os indicadores de desempenho mais utilizados foram índice de redução de pico de vazão (Jiang *et al*., 2022; Qin *et al.*, 2025), e redução de volume total de escoamento (Jiang *et al*., 2022; Song *et al.*, 2023). Também foram avaliados redução de poluentes (Qin *et al.*, 2025), aumento de taxa infiltração e capacidade de armazenamento do solo (Kuok *et al.,* 2023), entre outros.

A tabela 2 apresenta os resultados da revisão das metodologias de parametrização, calibração e validação.

Tabela 2 – Metodologias de Parametrização, Calibração e Validação

Objetivo	**Metodologia**	**Principais Estudos**
Parametrização	Faixas de referência do manual do SWMM	Schmelzing e Schmalz (2025); Wei *et al.* (2025)

Estimativa/Ajuste de Parâmetros	KALIMOD, PEST, XGBoost, GLUE, Algoritmo de Evolução Diferencial	Hörnschemeyer *et al.*, 2023; Ekmekcioglu *et al.*, 2021; Starzec *et al.* 2026; Bosco *et al.,* 2023; Abdalla *et al.*, 2021 (Respectivamente)
Calibração	Dados experimentais	Ayog; Tan, 2025; Kuok *et al.,* 2023
Calibração	Cálculo manual	Shahi *et al.,* 2024
Calibração	Dados monitorados	Baltaci e Kalin, 2024; Song et al., 2023
Validação	NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)	Abdalla *et al.* 2021; Baltaci e Kalin (2024); Ayog; Tan, 2025; Kim *et al.*, 2024; Bosco *et al.*, 2023; Sun *et al.,* 2023; Ekmekcioglu *et al.*, 2021
Validação	Combinação de Índices	Starzec *et al.*, 2026; Kim *et al.,* 2024; Song *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2022

Fonte: Autoras

A análise de sensibilidade para determinar os parâmetros mais influentes e o uso de ferramentas de parametrização mostraram-se práticas difundidas. A métrica mais comum para avaliar a calibração e fidelidade do modelo foi o índice NSE, no qual, em geral, as simulações foram avaliadas como satisfatórias.

Estudos apontaram limitações em relação a modelagem proporcionada pelo SWMM, como apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Limitações

Limitação	Efeito Observado	Estudos
Simplificação hidráulica	Representação inadequada de movimento/armazenamento da água	Sun *et al.,* 2023; Jeffers *et al.,* 2022; Bosco *et al., 2023*
Condições hidrológicas	Sensibilidade a umidade inicial e evapotranspiração	Hörnschemeyer *et al.*, 2023; Turco *et al.,2025*
Representação de telhados verdes	Simplificação do armazenamento e atenuação do pico de vazão simulado	Ayog; Tan, 2025; Jeffers *et al.,* 2022

Fonte: Autoras

Em geral, a maior limitação foi relacionada a simplificação de processos locais. Ren, De-Ville e Stovin (2025) exploraram como as simplificações de processos hidrológicos impactam a precisão e utilidade de resultados de modelagem, com foco em dispositivos vegetados, comparando os resultados do módulo LID com os resultados de modelos em escala de dispositivo, também modelados no SWMM utilizando parâmetros genéricos. Embora as abordagens simplificadas tenham apresentado respostas razoáveis qualitativamente, nenhuma delas capturou os processos hidráulicos e hidrológicos de forma tão abrangente quanto o modelo LID completo.

Discussão

Os artigos avaliados apresentaram uma extensa gama de metodologias e propostas, levando a algumas convergências. Os artigos apontaram para a conclusão já conhecida na literatura cujas técnicas LID são efetivas como alternativa de drenagem. Alguns dos resultados mais expressivos foram: redução da carga de poluentes entre 77% e 81% e mitigação de escoamento superficial (Wei *et al.*, 2025); redução do pico de vazão entre 16% à 20% e redução do volume de escoamento entre 5% e 7% (Shahi, Pokhrel e Lamichhane, 2024); taxa de redução de escoamento entre 42,1% e 57% (Sun *et al.*, 2023). Além dos dispositivos em si, outros fatores relacionados a implementação das técnicas influenciam os resultados. No estudo de Lee *et al.* (2022), as taxas de redução de escoamento e da carga de poluentes foram mais elevadas em cenários onde as técnicas LID foram distribuídas, e nos casos em que apenas a instalação intensiva era viável, a implantação em áreas urbanas densas, com alta impermeabilização, obteve melhor performance. A taxa de redução de escoamento depende da área ocupada por LIDs. (Orsi *et al.,* 2025; Schmelzing; Schmalz, 2025; Song et al. 2023). E depende da intensidade do evento de precipitação. (Song et al. 2023; Sun *et al*. 2023).

Um dos pontos a serem discutidos é a escolha dos indicadores utilizados para a avaliação das técnicas LID. Grande parte dos autores usou índices de redução de escoamento, pico de vazão ou

outro fator referente a fenômenos extremos, porém esses índices têm comportamentos variáveis em diferentes tempos de retorno, e levando em consideração que as análises de sensibilidade mostraram que os mesmos parâmetros têm pesos diferentes na construção de modelos utilizando técnicas distintas, pesquisadores como Bosco *et al*. (2023) e Abdalla *et al*. (2021) sugeriram sua substituição por curvas de permanência de vazão (FDC) derivadas de longos períodos de simulação para a investigação do comportamento hidrológico de medidas LID em diferentes períodos de chuva.

Outra questão é em relação a parametrização do modelo. Devido a regionalização dos estudos de caso, que consideraram características particulares dos locais de aplicação, da variedade de ferramentas aplicadas, diferença entre os objetivos de cada estudo, além da forma de avaliação da fidelidade dos modelos não ser única, não ficou evidente uma metodologia que se sobressaia, apenas que é essencial que seja feita uma avaliação da sensibilidade dos parâmetros e a melhor calibração possível dentro das possibilidades viáveis, já que as faixas recomendadas pelo SWMM são muito abrangentes e as particularidades de cada local exigem uma melhor delimitação.

A avaliação geral entre a maioria dos autores sugeriu que o módulo LID é uma boa ferramenta para o uso ao qual se propõe, embora ainda não tenha a mesma precisão dos módulos tradicionais do SWMM, como apresentado nos estudos de Bosco *et al.* (2023) e Abdalla *et al*. (2021), devido à complexidade dos processos hidrológicos que integram as técnicas baseadas na natureza, os quais o SWMM tende a simplificar. Assim, foram observadas tentativas de melhorar a precisão do modelo e otimizar a necessidade computacional requerida para uma grande quantidade de simulações.

Turco *et al.* (2025), para contornar as incertezas produzidas pelas premissas adotadas para umidade inicial no SWMM LID e a generalização de resultados, utilizaram a ferramenta HYDRUS-1D na simulação de processos locais detalhados como infiltração e retenção enquanto o SWMM transfere os resultados para escala urbana. Segundo Abdalla *et al*. (2024), a necessidade de equilibrar desempenho hidrológico e custo das técnicas LID está culminando em um caminho de otimização multiobjetivo. A análise custo-benefício, limitada no projeto computacional de manejo de águas pluviais, levou ao desenvolvimento da ferramenta SWMMLIDopt, que resulta em uma frente de Pareto a partir do acoplamento do SWMM ao algoritmo NSGA-II. A baixa resolução do modelo SWMM pode limitar a diferenciação entre técnicas LID, porém ao aumentar a resolução surge um aumento da demanda computacional devido ao aumento do número de simulações requeridas para a frente de Pareto. Uma alternativa é a aplicação de um *surrogate model,* como no estudo de Li *et al*. (2025), onde uma rede neural profunda atuou como substituta do SWMM no processo de otimização, integrada ao algoritmo NSGA-II e a um algoritmo de busca de pardal. Os resultados experimentais demonstraram que o modelo atingiu alta precisão preditiva e superou os métodos tradicionais de calibração manual.

Esses estudos demonstraram a extensão de possibilidades que podem ser exploradas, tomando como base o poder de simulação que o SWMM oferece e o combinando com ferramentas que o complementam e que forneçam o sistema necessário para cobrir as suas limitações, tornando os resultados mais precisos, confiáveis e de obtenção mais rápida, visando auxílio na análise e tomada de decisão.

Conclusão

O presente estudo permitiu analisar a aplicação do módulo LID do SWMM no estudo de técnicas de baixo impacto e aspectos de sua modelagem. O estudo evidenciou os benefícios da utilização dessas técnicas que visam atenuar e mitigar fenômenos hidrológicos deletérios presentes no contexto urbano, de forma a evitar impactos futuros, e a versatilidade do SWMM no estudo de implantação dessas medidas. Também demonstrou a prática recorrente da análise de sensibilidade de parâmetros e calibração, buscando a melhora na qualidade dos dados e precisão de resultados.

Os aspectos mais discutidos foram a aplicação do módulo LID, sua eficiência em simular as técnicas LID e suas limitações, principalmente a simplificação de processos hidrológicos. Os estudos mostraram diversidade nas metodologias para contornar esse desafio, seja explorando parametrização, utilizando outros módulos dentro do próprio SWMM ou convergindo para a utilização conjunta de ferramentas integradas para substituir ou auxiliar o SWMM em determinados procedimentos dentro da simulação ou nas etapas predecessoras de parametrização. Embora essas restrições a respeito do modelo existam, a percepção geral entre os artigos é de que o SWMM LID é uma ferramenta que oferece bons resultados, mesmo quando está em seu estado nativo.

Conclui-se, portanto, que os a pesquisa a respeito do assunto chegou em um patamar de busca por otimização de processos e facilidade na obtenção de resultados, utilizando a automação e seguindo para a inteligência artificial com o intuito de produzir modelos mais fiéis a realidade, e que possam ser aplicados na mitigação de efeitos adversos decorrentes do processo de urbanização e impermeabilização do solo. Diante disso, espera-se que as futuras pesquisas ampliem o estudo das metodologias empregadas no refinamento da capacidade do módulo LID do SWMM.

Referências

ABDALLA, E. M. H. Hydrological performance of lined permeable pavements in Norway. **Blue Green Systems**, v. 3, n. 1, p. 107–118, 2021. Disponível em: https://iwaponline.com/bgs/article/3/1/107/85230/Hydrological-performance-of-lined-permeable. Acesso em: 28 de julho de 2026.

ABDALLA, E. M. H. *et al.* SWMMLIDopt: a tool fo optimization of low-impact development (LID) measures using the SWMM model. **Journal of Hydroinformatics**, v. 26, n. 11, p. 2781–2797, 2024. Disponível em: https://iwaponline.com/jh/article/26/11/2781/105364/SWMMLIDopt-a-tool-for-optimization-of-low-impact. Acesso em: 30 de julho de 2026.

AYOG, J. L. *et al.* Evaluating green roof hydrological performance on varying slopes using EPA SWMM. **Transactions on Science and Technology**, v. 12, n.4, 2025. Disponível em: https://tost.unise.org/pdfs/vol12/no4/ToST124OA4.pdf. Acesso em: 29 de julho de 2026.

BALTACI, E.; KALIN, L. A Low-Impact Development-Based Modeling Framework for Flood Mitigation in a Coastal Community. **Water**, v. 16, p.2772, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/16/19/2772. Acesso em: 29 de julho de 2026.

BOSCO, C. *et al.* Evaluating the Stormwater Management Model for hydrological simulation of infiltration swales in cold climates. **Blue-Green Systems**, v. 5, n. 2, p. 306–320, 2023. Disponível em: https://iwaponline.com/bgs/article/5/2/306/99215/Evaluating-the-Stormwater-Management-Model-for. Acesso em: 29 de julho de 2026.

EKMEKCIOGLU, Ö. *et al.* Investigation of the low impact development strategies for highly urbanized area via auto-calibrated Storm Water Management Model (SWMM). **Water Science and Technology**, v. 84, n. 9, p. 2194–2209, 2021. Disponível em: https://iwaponline.com/wst/article/84/9/2194/84443/Investigation-of-the-low-impact-development. Acesso em: 28 de julho de 2026.

HÖRNSCHEMEYER, B. *et al.* Parameterization for Modeling Blue–Green Infrastructures in Urban Settings Using SWMM-UrbanEVA. **Water**, v. 15, n. 15, art. 2840, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/372949841_Parameterization_for_Modeling_Blue-Green_Infrastructures_in_Urban_Settings_Using_SWMM-UrbanEVAAcesso em: 29 de julho de 2026.

JEFFERS, S. *et al.* Insights into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs. **Journal of Water Management Modeling**, v. 30, art. C484, 2022. Disponível em: https://www.chijournal.org/C484. Acesso em: 31 de julho de 2026.

JIANG, Y. *et al.* Systematic Application of Sponge City Facilities at Community Scale Based on SWMM. **Water**, v. 14, n. 4, art. 591, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/14/4/591. Acesso em: 02 de agosto de 2026.

KIM, H.; KIM, G. An Effectiveness Study on the Use of Different Types of LID for Water Cycle Recovery in a Small Catchment. **Land**, v. 10, n. 10, art. 1055, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-445X/10/10/1055. Acesso em: 31 de julho de 2026.

KIM, J. *et al.* Applying Low-Impact Development Techniques for Improved Water Management in Urban Areas. **Water**, v. 16, n. 19, art. 2837, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/16/19/2837#:~:text=Worldwide%2C%20the%20increase%20in%20impervious%20surfaces%20due%20to,techniques%20are%20increasingly%20being%20applied%20in%20stormwater%20management. Acesso em: 29 de julho de 2026.

KUOK, K. K. *et al.* Evaluation of total infiltration and storage capacities for diferente soil types in Sarawak using SWMM. **Discover Water**, v.3, art.18, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s43832-023-00042-0. Acesso em: 31 de julho de 2026.

LEE, J. *et al.* Evaluation of SWMM-LID Modeling Applicability Considering Regional Characteristics for Optimal Management of Non-Point Pollutant Sources. **Sustainability**, v. 14, n. 21, art. 14662, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/14662. Acesso em: 29 de julho de 2026.

LI, J.; XU, Z.; HU, Dexiu**.** LID multi-objective optimization design framework based on SWMM high-precision intelligent calibration and deep learning models. **Journal of Hydrology Engineering**, v.31, n.3, 2025. Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JHYEFF.HEENG-6784. Acesso em: 29 de julho de 2026.

ORSI, E. *et al.* Assessment of stormwater management practices using SWMM in urban watersheds. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 151, n. 1, 2025. Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JIDEDH.IRENG-10304. Acesso em: 28 de julho de 2026.

QIN, F. *et al.* Optimal LID Designs Based on SWMM Simulations Regarding the Sustainable Efficacy of Stormwater Management in Port Areas. **Sustainability**, v. 17, n. 6, art. 2544, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/17/6/2544. Acesso em: 30 de julho de 2026.

REN, S.; DE-VILLE, S.; STOVIN, V. Evaluation of SuDS Device-scale Simplified Modelling Methods in SWMM. *In*: URBAN DRAINAGE MODELLING CONFERENCE, 13., 2025, Innsbruck. **Proceedings...** Innsbruck, 2025. Disponível em:https://proceedings.uibk.ac.at/InnOP/en/article/view/35. Acesso em: 02 de agosto de 2026.

ROSSMAN, L. A.; SIMON, M. A. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2022. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-02/storm-water-management-model-users-manual-version-5.2.pdf. Acesso em: 01 de agosto de 2026.

SCHMELZING, H.; SCHMALZ, B**.** Simulating Effectiveness of Low Impact Development (LID) for Different Building Densities in the Face of Climate Change Using a Hydrologic-Hydraulic Model (SWMM5). **Hydrology**, v. 12, n. 8, art. 200, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2306-5338/12/8/200. Acesso em: 01 de agosto de 2026.

SHAHI, A. J; POKHREL, M.; LAMICHHANE, S**.** Urban Roadside Flooding Analysis Using SWMM: A Case Study of a Road Section in Pokhara Metropolitan City, Nepal. **Journal of Engineering and Sciences**, v. 3, n. 1, p. 1–12, 2024. Disponível em: https://www.nepjol.info/index.php/jes2/article/view/66233. Acesso em: 01 de agosto de 2026.

SONG, Y. *et al.* Study on Calculating Appropriate Impact Assessment for LID Facility Using A-I-R Curve. **Water**, v. 15, n. 23, art. 4198, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/15/23/4198. Acesso em: 31 de julho de 2026.

STARZEC, M. *et al.* Hydrological Performance of Green Roofs: A Combined SWMM and SHapley Additive exPlanations-Based Analysis of Runoff Reduction Mechanisms. **Sustainability**, 2026. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/18/13/6457. Acesso em: 31 de julho de 2026.

SUN, Y. *et al.* Assessing Hydrological Performances of Bioretention Cells to Meet the LID Goals. **Sustainability**, v. 15, n. 5, art. 4204, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/4204. Acesso em: 28 de julho de 2026.

TURCO, M. *et al.* Coupling Hydrus-1D and Epa Swmm to Assess the Multiscale Hydrological Benefits of a Green Infrastructure. **Water Resourses Management**, v.39, p. 8249-8265, 2025. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-025-04340-1. Acesso em: 30 de julho de 2026.

WEI, D. *et al.* Investigation of the Impact of Improving the Hydrological Quality of Permeable Asphalt Pavement Based on the SWMM. **Water**, v. 17, n. 23, art. 3347, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/17/23/3347. Acesso em: 29 de julho de 2026.