Ensaios de Geografia
Essays of Geography | POSGEO-UFF

SEÇÃO ARTIGOS

Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai

Automated evaluation of permeable pavement scenarios using PySWMM: application to the Madame Lynch Canal Watershed, Paraguay

Evaluación automatizada de escenarios de pavimento permeable con PySWMM: aplicación a la cuenca del Canal Madame Lynch, Paraguay

DOI: https://doi.org/10.22409/kg0yxm77

Camila Belén Caballero Cristaldo[1]
Universidade Federal de Santa María (UFSM),
Rio Grande do Sul, Brasil
e-mail: camicaba2601@gmail.com

Gabriel Sulzbach Pereira[4]
Universidade Federal de Santa María (UFSM),
Rio Grande do Sul, Brasil
e-mail: gabrielpereirars@gmail.com

Francisco Paim de Freitas Neto[7]
Universidade Federal de Santa María (UFSM),
Rio Grande do Sul, Brasil
e-mail: francisco.freitas@acad.ufsm.br

Daniel Gustavo Allasia Piccilli[2]
Universidade Federal de Santa María (UFSM),
Rio Grande do Sul, Brasil
e-mail: dallasia@gmail.com

Ana Carolina dos Santos Reis[5]
Universidade Federal de Santa María (UFSM),
Rio Grande do Sul, Brasil
e-mail: reis.ana@acad.ufsm.br

Aldo Ivan Romero Miranda[8]
Universidade Federal de Santa María (UFSM),
Rio Grande do Sul, Brasil
e-mail: alivromi@gmail.com

Leandro Conceição Pinto[3]
Universidade Federal de Santa María (UFSM),
Rio Grande do Sul, Brasil
e-mail: leandro.pinto@ufsm.br

Rodrigo Girardon Della Pace[6]
Universidade Federal de Santa María (UFSM),
Rio Grande do Sul, Brasil
e-mail: rodrigodellapace02@gmai.com

[1] Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).
[2] Professor Titular da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Professor Permanente dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Engenharia Ambiental da UFSM.
[3] Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).
[4] Mestre e Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).
[5] Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).
[6] Mestre e Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).
[7] Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).
[8] Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Ensaios de Geografia
Essays of Geography | POSGEO-UFF

Resumo

A urbanização modifica a dinâmica hidrológica das bacias e amplia a pressão sobre os sistemas de drenagem, demandando estratégias capazes de reduzir o escoamento superficial e as sobrecargas hidráulicas. Este estudo desenvolveu um procedimento automatizado, baseado na integração entre o EPA SWMM e o PySWMM, para apoiar a definição da área de pavimento permeável necessária ao atendimento de um critério hidráulico previamente estabelecido. A metodologia emprega uma busca incremental, com geração, execução e processamento automatizado de cenários caracterizados pela ampliação progressiva da área de Low Impact Development (LID). O procedimento foi inicialmente verificado em um modelo conceitual e posteriormente aplicado ao modelo da bacia do Canal Madame Lynch, em Assunção (Asunción), Paraguai. No modelo conceitual, o refinamento do incremento de busca permitiu identificar uma área factível menor de pavimento permeável, evidenciando a influência da discretização sobre o resultado. Na bacia do Canal Madame Lynch, o primeiro cenário factível da sequência avaliada atendeu ao critério de profundidade máxima inferior a 4,0 m no nó crítico. Os resultados demonstram que o procedimento permite avaliar sistematicamente cenários de intervenção e identificar uma configuração factível dentro de uma sequência predefinida. A abordagem constitui uma ferramenta de triagem e apoio ao planejamento da drenagem urbana, devendo seus resultados ser complementados por análises de viabilidade espacial, construtiva e econômica.

Palavras-chave

Drenagem urbana; PySWMM; Low Impact Development

Abstract

Urbanization alters the hydrological response of watersheds and increases pressure on urban drainage systems, requiring strategies capable of reducing surface runoff and hydraulic overloading. This study developed an automated procedure based on the integration of EPA SWMM and PySWMM to support the determination of the permeable pavement area required to satisfy a previously established hydraulic criterion. The methodology employs an incremental search approach with automated generation, execution, and processing of scenarios characterized by the progressive expansion of Low Impact Development (LID) implementation. The procedure was first verified using a conceptual model and subsequently applied to the Canal Madame Lynch watershed model in Asunción, Paraguay. In the conceptual model, refining the search increment enabled the identification of a smaller feasible permeable pavement area, highlighting the influence of search discretization on the results. In the Canal Madame Lynch watershed, the first feasible scenario in the evaluated sequence satisfied the hydraulic criterion of a maximum water depth below 4.0 m at the critical node. The results demonstrate that the proposed procedure enables the systematic evaluation of intervention scenarios and the identification of a feasible configuration within a predefined sequence. The approach constitutes a screening and decision-support tool for urban drainage planning, although its results should be complemented by spatial, constructability, and economic feasibility analyses.

Keywords

Urban drainage; PySWMM; Low Impact Development

Resumen

La urbanización modifica la dinámica hidrológica de las cuencas e incrementa la presión sobre los sistemas de drenaje, lo que exige estrategias capaces de reducir la escorrentía superficial y las sobrecargas hidráulicas. Este estudio desarrolló un procedimiento automatizado, basado en la integración entre EPA SWMM y PySWMM, para apoyar la determinación del área de pavimento permeable necesaria para cumplir un criterio hidráulico previamente establecido. La metodología emplea una búsqueda incremental con generación, ejecución y procesamiento automatizados de escenarios caracterizados por la ampliación progresiva del área de Low Impact Development (LID). El procedimiento fue verificado inicialmente en un modelo conceptual y posteriormente aplicado al modelo de la cuenca del Canal Madame Lynch, en Asunción, Paraguay. En el modelo conceptual, el refinamiento del incremento de búsqueda permitió identificar una menor área factible de pavimento permeable,

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

evidenciando la influencia de la discretización de la búsqueda sobre el resultado. En la cuenca del Canal Madame Lynch, el primer escenario factible de la secuencia evaluada cumplió el criterio hidráulico de mantener una profundidad máxima inferior a 4,0 m en el nodo crítico. Los resultados demuestran que el procedimiento permite evaluar sistemáticamente escenarios de intervención e identificar una configuración factible dentro de una secuencia predefinida. El enfoque constituye una herramienta de evaluación preliminar y apoyo para la planificación del drenaje urbano, aunque sus resultados deben complementarse con análisis de viabilidad espacial, constructiva y económica.

Palabras clave
Drenaje urbano; PySWMM; Low Impact Development

Introdução

O processo de urbanização produz transformações profundas no uso e na cobertura da terra, alterando a organização espacial dos fluxos de água nas bacias hidrográficas. A substituição de áreas vegetadas e solos expostos por edificações, vias e outras superfícies impermeáveis reduz a infiltração e o armazenamento superficial, aumenta os volumes de escoamento e acelera a transferência da água para os sistemas de drenagem. Como consequência, ocorre a intensificação das vazões de pico e o aumento da frequência de sobrecargas e extravasamentos, especialmente em redes dimensionadas para condições de ocupação anteriores (Fletcher; Andrieu; Hamel, 2013; Harbor, 1994; Leopold, 1968; Walsh *et al.*, 2005).

A resposta hidrológica de uma bacia urbana não depende apenas da proporção total de áreas impermeáveis, mas também de sua distribuição espacial e de sua conexão com a rede de drenagem. Superfícies diretamente conectadas a sarjetas, galerias e canais transferem o escoamento mais rapidamente para os pontos de jusante. Dessa forma, bacias com percentuais semelhantes de impermeabilização podem produzir respostas distintas em função da localização das áreas impermeáveis, da organização da rede, das características do relevo e da posição dos pontos críticos de drenagem.

Essa dimensão espacial aproxima a drenagem urbana das questões de planejamento territorial. A ocupação do solo, a disponibilidade de áreas para intervenção, a distribuição das infraestruturas e as relações entre montante e jusante condicionam tanto a geração do escoamento quanto a viabilidade das medidas de controle. Assim, o manejo das águas pluviais não deve ser compreendido exclusivamente como um problema de dimensionamento

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

hidráulico, mas também como uma questão relacionada à forma como o espaço urbano é produzido, ocupado e conectado.

A ampliação convencional da capacidade de condução nem sempre constitui uma alternativa técnica, econômica ou territorialmente viável, sobretudo em áreas urbanas consolidadas. Por esse motivo, abordagens descentralizadas de manejo das águas pluviais vêm sendo incorporadas ao planejamento urbano. Embora apresentem origens, escalas e escopos distintos, conceitos como *Best Management Practices* (BMP), *Low Impact Development* (LID), *Sustainable Urban Drainage Systems* (SuDS) e *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) convergem na busca por reduzir os impactos hidrológicos da urbanização e recuperar, ao menos parcialmente, processos de infiltração, retenção, armazenamento e evapotranspiração (Barbosa; Fernandes; David, 2012; Fletcher; Andrieu; Hamel, 2013).

Em uma perspectiva mais abrangente, essas abordagens podem ser articuladas ao conceito de Soluções Baseadas na Natureza (SBN), que compreende ações destinadas a proteger, manejar de forma sustentável ou restaurar ecossistemas naturais e modificados, buscando responder a desafios sociais e ambientais e, simultaneamente, produzir benefícios para o bem-estar humano e a biodiversidade (Cohen-Shacham *et al*., 2016; IUCN, 2020). No espaço urbano, as SBN podem incluir parques inundáveis, áreas úmidas construídas, jardins de chuva, valas vegetadas, telhados verdes e outras formas de infraestrutura verde voltadas à regulação do escoamento. Nesse contexto, práticas LID podem constituir instrumentos de implementação das SBN quando incorporam processos naturais e são planejadas de maneira integrada ao território, considerando não apenas o controle hidráulico, mas também seus benefícios ambientais e sociais.

Entre as práticas de infraestrutura verde representadas no *Storm Water Management Model* (SWMM) como controles LID, os pavimentos permeáveis constituem uma alternativa aplicável a áreas destinadas à circulação de veículos e pedestres. Embora apresentem maior componente construtivo do que outras SBN, esses dispositivos podem integrar estratégias mais amplas de manejo sustentável das águas pluviais, ao favorecer o armazenamento temporário, a infiltração e a liberação gradual da água para o solo ou para a rede de drenagem. Seus efeitos podem incluir a redução do volume de escoamento, a atenuação das vazões de pico e a

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

diminuição das solicitações hidráulicas sobre condutos e canais. Entretanto, seu desempenho depende das características construtivas, das condições de infiltração, da manutenção, do evento de precipitação e da localização das áreas tratadas dentro da bacia (Ahiablame; Engel; Chaubey, 2013; Scholz; Grabowiecki, 2007).

A definição da área e da localização dessas intervenções representa, portanto, um problema simultaneamente hidrológico, hidráulico e espacial. Intervenções com áreas semelhantes podem apresentar desempenhos distintos em função de sua posição na bacia, de sua conectividade com a rede e da influência das respectivas sub-bacias sobre os pontos críticos. Além disso, a implantação de pavimentos permeáveis está condicionada pela disponibilidade efetiva de superfícies passíveis de conversão, pelas características do uso do solo e pelas restrições técnicas e econômicas de cada local. Consequentemente, a seleção de alternativas não deve considerar apenas quanto implantar, mas também onde as intervenções podem produzir maior benefício.

A modelagem hidrológica e hidráulica permite representar essas relações e avaliar previamente diferentes configurações de intervenção. O SWMM simula a geração do escoamento nas sub-bacias, sua propagação pela rede de drenagem e o funcionamento de diferentes práticas LID (Rossman, 2022). Entretanto, a avaliação manual de muitas combinações de áreas e localizações pode se tornar demorada, sujeita a tarefas repetitivas e limitada a um conjunto reduzido de cenários.

Diferentes estruturas de simulação e otimização vêm sendo desenvolvidas para apoiar o planejamento espacial das práticas LID. Huang *et al*. (2022) integraram o SWMM a um algoritmo genético para avaliar localização, área e custo do ciclo de vida das intervenções. Wang *et al*., (2024) associaram SWMM, PySWMM e NSGA-II para analisar tipos, escalas, localizações e custos de LID sob diferentes precipitações de projeto. Abdalla *et al*., (2024) desenvolveram a ferramenta SWMMLIDopt para otimização multiobjetivo da seleção e localização de medidas LID, enquanto Javan *et al*., (2025) integraram PySWMM e MOEA/D para identificar soluções de compromisso entre diferentes objetivos de manejo das águas pluviais.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Esses estudos demonstram que uma otimização propriamente dita requer a definição explícita das variáveis de decisão, funções objetivo, restrições territoriais e econômicas, critérios de convergência e análise das soluções alternativas. Por outro lado, em estudos preliminares ou em aplicações orientadas por um critério hidráulico específico, procedimentos incrementais mais simples podem oferecer uma forma transparente de explorar cenários e identificar configurações factíveis, desde que os resultados sejam interpretados dentro da sequência de busca e das condições analisadas, e não como garantia de uma solução ótima global.

A integração do SWMM com a linguagem Python favorece a implementação desses procedimentos. O PySWMM fornece acesso programático ao motor de cálculo do SWMM, permitindo modificar parâmetros, executar simulações e extrair resultados hidrológicos e hidráulicos de forma automatizada (McDonnell *et al*., 2020). Essa integração também permite conectar o modelo a ferramentas de análise espacial, processamento de dados e suporte à decisão, ampliando suas possibilidades de aplicação no planejamento de sistemas urbanos de drenagem (Tryby *et al*., 2024).

A bacia do Canal Madame Lynch, localizada em Assunção, Paraguai, constitui um exemplo de território urbano no qual a impermeabilização e a concentração do escoamento na rede de drenagem contribuem para a ocorrência de sobrecargas e extravasamentos durante eventos intensos. A existência de um modelo hidrológico e hidráulico previamente desenvolvido e calibrado possibilita avaliar como a distribuição espacial de pavimentos permeáveis pode modificar a resposta do sistema em um ponto crítico (Caballero; Reinoso, 2024).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar um procedimento automatizado de busca incremental, implementado com o PySWMM, para apoiar a seleção de cenários de implantação de pavimentos permeáveis em sistemas de drenagem urbana. Inicialmente, o procedimento é verificado em um modelo conceitual, no qual se avalia a influência do incremento de busca sobre a área estimada e o número de simulações.

Posteriormente, o método é aplicado ao modelo da bacia do Canal Madame Lynch, considerando uma sequência predefinida de incorporação de sub-bacias prioritárias. Busca-se,

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

assim, identificar, para o evento e o critério hidráulico analisado, o primeiro cenário da sequência avaliada capaz de eliminar o extravasamento no ponto de controle, bem como discutir as potencialidades e limitações da automatização como ferramenta de apoio ao planejamento territorial e à gestão da drenagem urbana.

Metodologia

Ferramentas de modelagem e automatização

O *Storm Water Management Model* (SWMM) foi utilizado para representar os processos hidrológicos e hidráulicos dos sistemas de drenagem analisados. O SWMM é um modelo dinâmico de transformação chuva-escoamento que permite simular eventos isolados ou séries contínuas, representando a geração do escoamento em sub-bacias e sua propagação por uma rede composta por nós, condutos, canais, estruturas de armazenamento e dispositivos de controle (Rossman, 2022).

As simulações foram automatizadas por meio da linguagem Python e da biblioteca PySWMM, que fornece acesso programático ao motor de cálculo do SWMM e permite modificar parâmetros, executar modelos e extrair resultados hidrológicos e hidráulicos (McDonnell *et al*., 2020). Foram utilizadas as versões 3.17.6 do Python, 2.1.0 do PySWMM e 5.2 do SWMM. O modelo empregou o método de propagação hidráulica onda dinâmica, com passo de cálculo de 30 segundos e intervalo de apresentação dos resultados de 5 minutos.

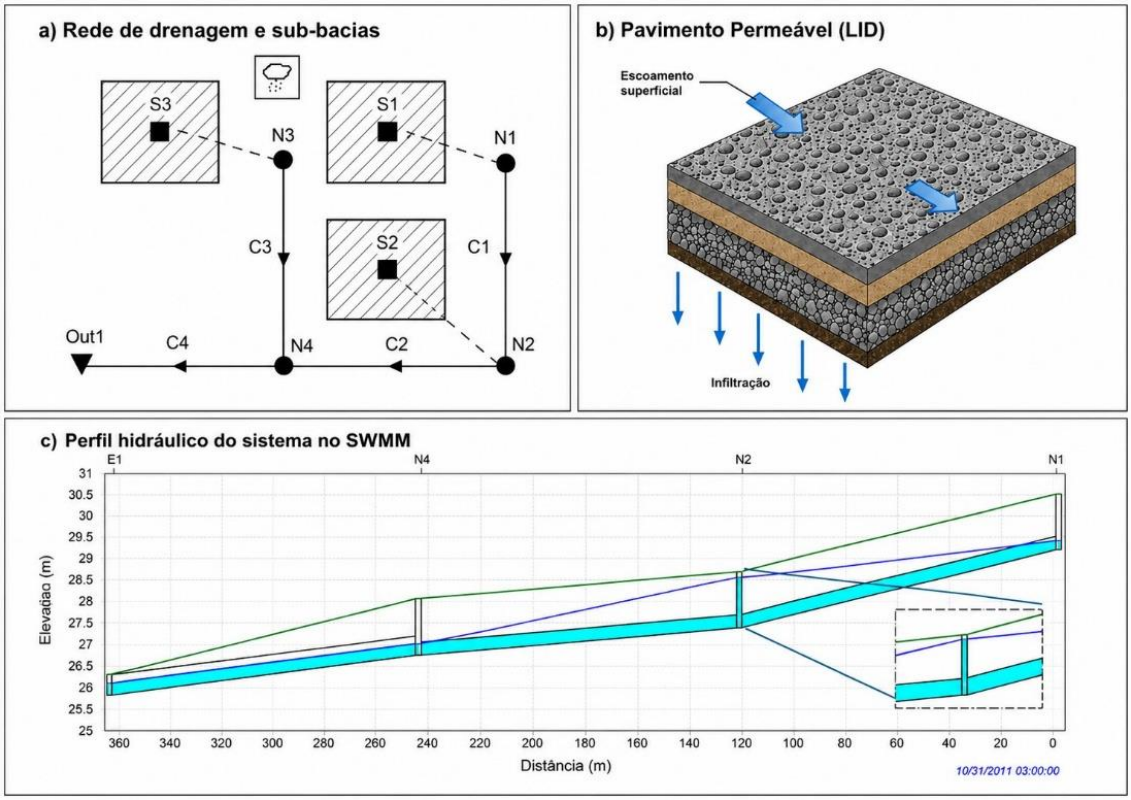
O procedimento computacional foi estruturado em quatro etapas: geração dos cenários; alteração dos parâmetros de entrada; execução das simulações; e extração dos indicadores hidráulicos. Para cada cenário foi produzido um arquivo de entrada independente no formato *.inp*, evitando interferências entre as simulações. Os cenários foram executados de forma paralela, utilizando a biblioteca Joblib (*Parallel e delayed*), em um computador com processador Intel Core i7-13650HX de 2,60 GHz, 16 GB de memória RAM e 14 núcleos de processamento. Essa estrutura reduziu a necessidade de alterações manuais sucessivas e permitiu aplicar os mesmos critérios de análise a todas as configurações avaliadas.

Verificação do procedimento no modelo conceitual

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Inicialmente, o procedimento automatizado foi verificado em um modelo conceitual baseado em um exemplo do EPA SWMM. Essa etapa teve como finalidade avaliar o funcionamento das rotinas de geração, execução e análise dos cenários em um ambiente controlado e reprodutível. O modelo é composto por sub-bacias com diferentes percentuais de impermeabilização, conectadas a uma rede simplificada de drenagem formada por nós e condutos. A configuração do modelo, incluindo as sub-bacias, o controle LID e o perfil hidráulico, é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Modelo conceitual desenvolvido no SWMM, incluindo a rede de drenagem, o controle LID e o perfil hidráulico do sistema



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de Rossman (2022).

A intervenção foi representada pela implantação de pavimento permeável, modelado no SWMM como um controle *Low Impact Development* (LID). O pavimento permeável é representado por camadas que descrevem os processos de armazenamento superficial,

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

infiltração, percolação e liberação controlada do escoamento. Os parâmetros adotados para as camadas superficial, de pavimento, armazenamento e drenagem são apresentados na Tabela 1, incluindo espessura, porosidade, permeabilidade, coeficiente de entupimento, altura de armazenamento e parâmetros do dreno, quando aplicáveis.

Tabela 1 – Principais parâmetros do pavimento permeável adotados na modelagem LID no SWMM

Camada	Parâmetro	Unidade	Valor
Superficial	Altura de armazenamento	mm	0
	Declividade da superfície	%	0,12
Pavimento	Espessura	mm	100
	Fração de vazios	–	0,20
	Permeabilidade	mm h⁻¹	300
	Coeficiente de entupimento	–	10
Armazenamento	Espessura	mm	300
	Fração de vazios	–	0,35
	Taxa de infiltração	mm h⁻¹	5

Fonte: Autores (2026).

A área ocupada pelo pavimento permeável foi ampliada progressivamente, acompanhada pela correspondente redução da área impermeável da sub-bacia. Em cada cenário, a fração impermeável foi recalculada de modo a preservar a consistência entre a área destinada ao controle LID e a área remanescente da sub-bacia, conforme a Equação 1.

$$P_{imp,novo} = \frac{P_{imp,0} - \frac{A_{LID}}{A_{sub}}}{1 - \frac{A_{LID}}{A_{sub}}} x100 \quad (1)$$

em que $P_{imp,novo}$ representa a nova porcentagem de área impermeável da sub-bacia (%); $P_{imp,0}$ corresponde à porcentagem inicial de área impermeável; A_{LID} representa a área destinada ao pavimento permeável (m²); e A_{sub} corresponde à área total remanescente da sub-bacia (m²).

Foi implementada uma busca incremental discreta para identificar a menor área de pavimento permeável, entre os valores efetivamente simulados, capaz de atender ao critério

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

hidráulico estabelecido. O incremento de área, representado por ΔA, foi definido como uma fração da área impermeável inicial. Na configuração inicial, adotou-se um incremento correspondente a 10% dessa área. A partir desse valor, foi gerado um conjunto ordenado de cenários com áreas progressivamente maiores de pavimento permeável.

A resolução da busca depende diretamente de ΔA. Incrementos maiores resultam em menor número de cenários, mas produzem uma estimativa mais discretizada da área requerida. Incrementos menores permitem uma aproximação mais refinada do limite de atendimento ao critério hidráulico, com aumento do número de simulações e do esforço computacional. Para analisar essa influência, foram avaliados incrementos correspondentes a 10%, 5%, 2,5% e 1% da área impermeável inicial.

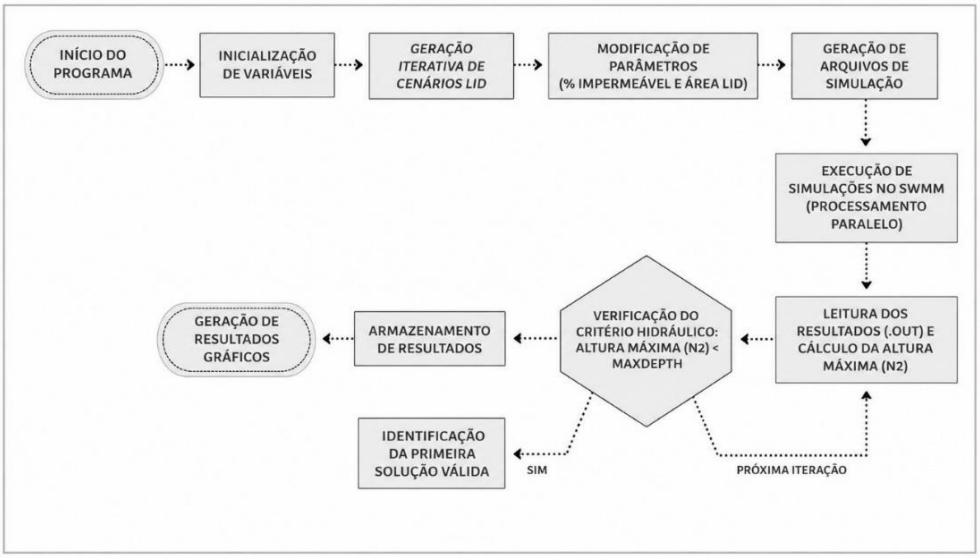
Para cada cenário, foi extraída a série temporal da profundidade da água no nó de controle e determinada a profundidade máxima durante o evento. O critério hidráulico foi estabelecido pela comparação entre a profundidade máxima simulada e a profundidade máxima admissível do nó (*MaxDepth*), igual a 1,25 m. Na configuração adotada no modelo conceitual, esse valor corresponde ao limite de início do extravasamento.

Considerou-se factível o cenário que satisfez a seguinte condição: $Hmáx,k < Hlim$, em que $Hmáx,k$ representa a profundidade máxima simulada no cenário k; e $Hlim$ corresponde à profundidade limite adotada para o nó de controle, igual a 1,25 m.

A configuração selecionada correspondeu à menor área simulada que satisfez o critério dentro do conjunto discretizado de cenários. Portanto, o resultado representa a menor área testada para o incremento adotado, e não uma área mínima contínua ou independente da discretização. O procedimento automatizado é apresentado na Figura 2.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Figura 2 – Fluxograma do procedimento automatizado de busca incremental de área de pavimento permeável utilizando PySWMM



Fonte: Autores (2026).

Aplicação à bacia do Canal Madame Lynch

Após a verificação no modelo conceitual, o procedimento foi aplicado ao modelo hidrológico da bacia do Canal Madame Lynch, localizada em Assunção, Paraguai. O modelo foi previamente desenvolvido e calibrado por Caballero e Reinoso (2024) como parte de um Trabalho da Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional de Assunção. Sua estrutura é composta por 85 sub-bacias hidrológicas, das quais 59 contribuem diretamente para o Canal Madame Lynch e 26 drenam para o Arroyo Itay, que constitui a condição de contorno a jusante.

A área total da bacia é de 33,65 km². O modelo utiliza o método do Número de Curva (*Curve Number – CN*) para a estimativa da infiltração e foi calibrado com base em dois eventos reais de precipitação, ocorridos em 10 de maio de 2019 e 16 de dezembro de 2020. Esses eventos foram selecionados por apresentarem registros históricos de extravasamento no trecho do Canal Madame Lynch analisado neste estudo. A identificação dos episódios de extravasamento foi realizada a partir da documentação apresentada de reportagens e registros audiovisuais divulgados em plataformas digitais durante os eventos, os quais permitiram confirmar os locais historicamente afetados (Jahamina Paraguay, 2019; 1000 Notícias, 2020).

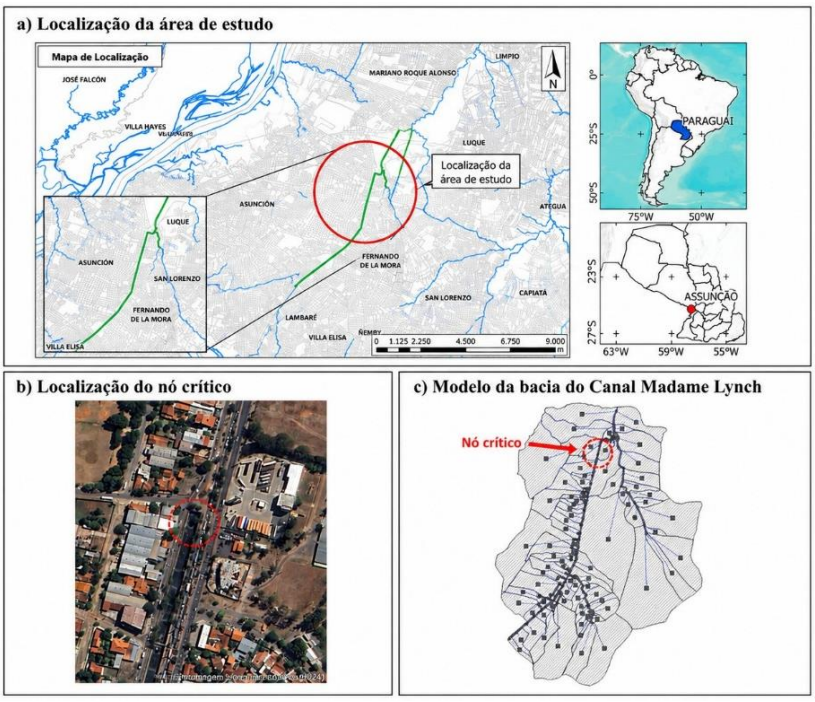
AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Os dados pluviométricos utilizados na calibração foram obtidos na estação meteorológica da Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC) (Caballero; Reinoso, 2024).

As simulações deste estudo foram realizadas com base no evento observado de precipitação ocorrido em 16 de dezembro de 2020. O evento apresentou precipitação acumulada de 79,1 mm, intensidade máxima de 12,3 mm em intervalos de 10 minutos. Os dados pluviométricos foram obtidos na estação meteorológica do Aeroporto Internacional Silvio Pettirossi, mantida pela Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC). A utilização desse evento teve como finalidade avaliar o procedimento sob uma condição representativa de precipitação associada a episódios de extravasamento registrados na área de estudo.

A localização da área de estudo, a localização do nó crítico e o modelo hidrológico da bacia do Canal Madame Lynch são apresentados na Figura 3, permitindo identificar a área de estudo em Assunção (Paraguai), o trecho analisado e a posição do nó crítico utilizado na avaliação hidráulica.

Figura 3 – Localização da área de estudo em Assunção (Paraguai), localização do nó crítico e modelo hidrológico da bacia do Canal Madame Lynch



Fonte: Autores (2026), com base em Caballero e Reinoso (2024).

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Seleção e hierarquização das sub-bacias

A aplicação à bacia real foi estruturada como uma busca incremental hierarquizada. Inicialmente, foram selecionadas como candidatas as sub-bacias com percentual de impermeabilização igual ou superior a 60%. Esse limite foi adotado como critério de triagem, concentrando a análise nas unidades com maior presença de superfícies impermeáveis e maior disponibilidade potencial de áreas passíveis de conversão para pavimento permeável.

Em seguida, as sub-bacias selecionadas foram ordenadas por meio de um índice de prioridade, denominado IP, definido pelo produto entre a área da sub-bacia e sua fração impermeável. A equação utilizada foi:

$$IP_{\mathrm{i}} = A_{\mathrm{i}} \times (Imp_{\mathrm{i}} / 100) \qquad (2)$$

em que IP_{i} representa o índice de prioridade da sub-bacia i; A_{i} corresponde à área total da sub-bacia i ; e Imp_{i} representa o percentual de impermeabilização da sub-bacia i.

O índice corresponde a uma estimativa da área impermeável existente em cada unidade. As sub-bacias foram ordenadas em sentido decrescente de IP, priorizando aquelas com maior extensão absoluta de superfície impermeável.

O IP foi utilizado neste estudo exclusivamente como critério inicial de hierarquização do potencial de geração de escoamento e da disponibilidade de área para intervenção. Essa escolha representa uma estratégia de priorização adotada para a avaliação dos cenários, mas outros critérios poderiam ser igualmente empregados, conforme os objetivos definidos pelo usuário.

O índice não representa diretamente a influência hidráulica individual de cada sub-bacia sobre o nó crítico, pois essa influência também depende da posição na rede, dos tempos de propagação e das interações entre as contribuições. Nesse contexto, o PySWMM atua como uma ferramenta de automação capaz de avaliar as diferentes sequências de intervenção definidas pelo modelador, sendo os efeitos hidráulicos da sequência adotada posteriormente quantificados por meio das simulações integradas no SWMM.

Geração dos cenários de implantação

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Antes da implantação das intervenções, foi simulado um cenário de referência, denominado cenário 0, sem aplicação de LID. Esse cenário representa a condição inicial do sistema e foi utilizado como base para avaliar as alterações produzidas pelos cenários subsequentes.

Os cenários de intervenção foram construídos de forma cumulativa e ordenada. Na primeira iteração, a intervenção foi aplicada à sub-bacia com maior IP. Em cada iteração subsequente, uma nova sub-bacia foi incorporada ao conjunto de áreas tratadas, seguindo a ordem estabelecida pelo índice.

Simultaneamente à expansão espacial, a intensidade da implantação foi ampliada em incrementos de 10%. Dessa forma, no cenário k foram incluídas as primeiras k sub-bacias da ordenação e adotado o percentual de LID correspondente a $p_k = 10 \times k$ nas sub-bacias selecionadas. O percentual foi limitado ao valor máximo de 100%.

O percentual de LID foi calculado em relação à área impermeável inicial de cada sub-bacia. A área total de pavimento permeável no cenário $k$foi determinada pela soma das áreas implantadas em todas as sub-bacias incluídas:

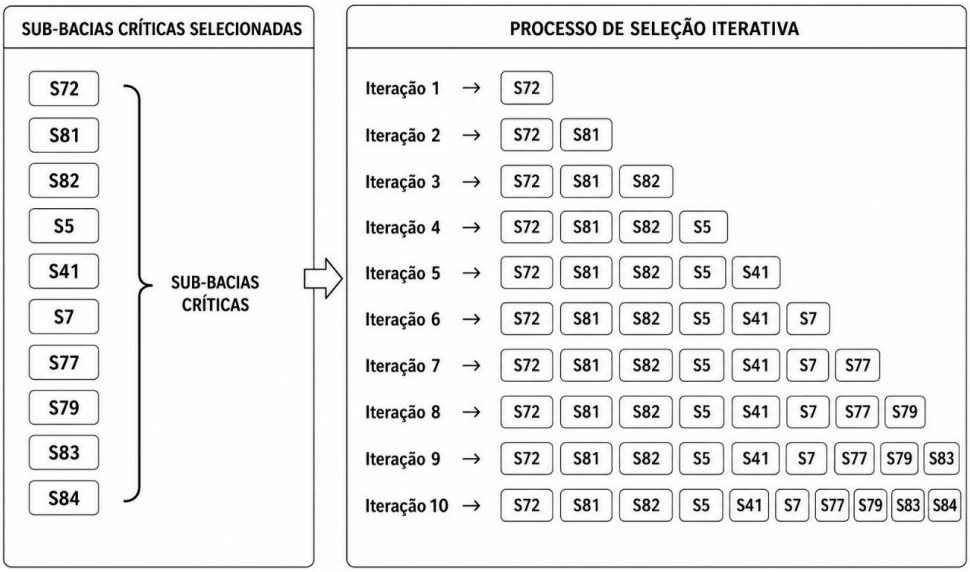
$$A_{LID}^{(k)} = \sum_{i=1}^{n_k} (p_k \, x A_{imp,i}) \qquad (3)$$

onde n_k representa o número de sub-bacias que sofreram intervenção na iteração k.

A apresentação da área total em metros quadrados permite comparar os cenários e evita que o percentual de LID seja interpretado sem considerar sua base espacial. Essa construção gera uma sequência aninhada de cenários, na qual cada configuração representa um nível progressivamente mais abrangente de intervenção. A Figura 4 apresenta a ordem de incorporação das sub-bacias.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Figura 4 – Sequência hierarquizada de incorporação das sub-bacias prioritárias no procedimento automatizado



Fonte: Autores (2026).

Para cada cenário foi gerado automaticamente um arquivo .inp, incorporando as alterações na fração impermeável e as respectivas unidades de pavimento permeável. As simulações foram executadas com o motor de cálculo do SWMM e os arquivos de saída foram processados para obtenção da profundidade máxima no nó crítico.

Após a execução paralela dos cenários, os resultados foram reorganizados segundo a sequência incremental, sendo identificada a primeira configuração capaz de atender ao critério hidráulico.

Critério hidráulico e seleção da configuração factível

O nó crítico foi definido com base em registros históricos de extravasamento, correspondendo ao ponto que apresentou recorrência de sobrecarga durante eventos reais de precipitação e cujo comportamento foi reproduzido pelo modelo calibrado (Caballero; Reinoso, 2024). A localização do nó crítico é destacada na Figura 3. No caso analisado, esse ponto corresponde a uma galeria celular tripla, com vãos de seção 4,0 × 4,0 m, localizada ao final do trecho urbano do Canal Madame Lynch, onde o sistema se conecta ao canal natural mediante uma mudança de direção de aproximadamente 90°.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Nesse contexto, adotou-se como critério de desempenho uma profundidade-limite de 4,0 m, correspondente à altura máxima da galeria existente no ponto crítico do sistema. Considerando que o foco do estudo é o desenvolvimento do procedimento automatizado, essa altura foi adotada como referência para a avaliação da capacidade hidráulica, sendo possível adotar outros limites conforme as características da aplicação.

A primeira iteração factível foi identificada pela seguinte condição: k^* = menor valor de k para o qual $Hmáx,k < Hlim$. Em que k^* representa a primeira iteração factível; $Hmáx,k$ corresponde à profundidade máxima simulada no cenário k; e $Hlim$ representa o limite hidráulico adotado, igual a 4,0 m.

Do ponto de vista da busca incremental, k* corresponde à primeira configuração capaz de atender ao critério dentro da sequência hierarquizada. Caso a área total de LID aumente continuamente entre as iterações, essa configuração também representa a menor área testada dentro desse conjunto restrito e ordenado. Não se trata, entretanto, de uma solução ótima global entre todas as combinações espacialmente possíveis de sub-bacias e áreas de intervenção.

Escopo e aplicabilidade do procedimento

O procedimento foi desenvolvido como uma ferramenta de triagem e apoio à decisão, baseada em uma sequência previamente definida de implantação. Seus resultados são condicionados pelo evento de precipitação, pelo modelo utilizado, pelo critério de seleção e ordenação das sub-bacias, pelo incremento de área e pelo limite hidráulico adotado.

Na aplicação à bacia real, a extensão espacial e a intensidade das intervenções foram ampliadas simultaneamente. Por essa razão, os efeitos associados à inclusão de novas sub-bacias e ao aumento do percentual de LID não foram avaliados isoladamente. Essa característica é compatível com o objetivo de representar níveis progressivos de implantação, mas deve ser considerada na interpretação das diferenças entre cenários consecutivos.

A abordagem permite avaliar de maneira automatizada, transparente e reprodutível a resposta do sistema diante de intervenções progressivas, reduzindo a subjetividade e o esforço operacional associados à construção manual de cenários. O procedimento constitui uma etapa inicial de planejamento, podendo ser complementado futuramente por análises de sensibilidade

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

espacial, restrições de disponibilidade territorial, múltiplos eventos de precipitação, custos de implantação e métodos de otimização multiobjetivo.

Resultados e discussão

Verificação do procedimento no modelo conceitual

A metodologia proposta foi inicialmente avaliada em um modelo conceitual desenvolvido no EPA SWMM, com o objetivo de verificar o funcionamento do procedimento automatizado de busca incremental e sua capacidade de identificar uma configuração de pavimento permeável que atendesse ao critério hidráulico estabelecido. Para cada cenário, a área de pavimento permeável foi progressivamente ampliada, sendo registrada a profundidade máxima atingida no nó de controle.

Na configuração sem pavimento permeável, a profundidade máxima atingiu 1,25 m, valor correspondente ao limite hidráulico adotado para o nó. Nas cinco primeiras ampliações da área de intervenção, a profundidade máxima permaneceu nesse valor. A primeira configuração capaz de atender ao critério estabelecido foi identificada na iteração 7, com 3.239,68 m² de pavimento permeável e profundidade máxima de aproximadamente 1,15 m. Esse resultado corresponde a uma redução de 0,10 m, ou 8%, em relação à configuração sem LID. Na maior intervenção avaliada, correspondente a 4.859,51 m², a profundidade máxima foi reduzida para 0,84 m, representando uma diminuição de aproximadamente 32,8%. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das simulações para diferentes áreas de pavimento permeável no modelo conceitual

Nº iteração	Área Bacia (m^2)	Área impermeável (%)	Área do pavimento (m^2)	*Max Depth* (m)
1	16.200	33,33	0,00	1,25
2	16.200	31,03	539,95	1,25
3	16.200	28,57	1.079,89	1,25
4	16.200	25,92	1.619,84	1,25

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Nº iteração	Área Bacia (m^2)	Área impermeável (%)	Área do pavimento (m^2)	*Max Depth* (m)
5	16.200	23,07	2.159,78	1,25
6	16.200	20,00	2.699,73	1,25
7	**16.200**	**16,66**	**3.239,68**	**1,15**
8	16.200	13,04	3.779,62	1,05
9	16.200	9,09	4.319,57	0,94
10	16.200	4,76	4.859,51	0,84

Fonte: Autores (2026).

A manutenção da profundidade em 1,25 m nas primeiras simulações não significa necessariamente que as intervenções iniciais não tenham produzido efeito hidrológico. Como o nó permaneceu atingindo sua profundidade limite, podem ter ocorrido reduções no volume, na vazão máxima ou na duração do extravasamento sem alteração da profundidade máxima registrada. Por essa razão, não se pode caracterizar esse comportamento apenas como um limiar físico de resposta do sistema. Quando disponíveis, indicadores de extravasamento e sobrecarga devem ser utilizados para complementar a interpretação da profundidade máxima.

A redução observada após a ampliação da área de intervenção é coerente com o comportamento esperado dos pavimentos permeáveis, que promovem armazenamento temporário e infiltração de parte da precipitação e do escoamento afluente. Estudos realizados com o SWMM também identificaram reduções do volume escoado e das vazões de pico após a implantação dessa técnica (Ahiablame; Engel; Chaubey, 2012; Xie *et al*., 2017). Entretanto, a magnitude desses benefícios depende das características da precipitação, das propriedades das camadas do pavimento, das condições do solo, da área tratada e da configuração da rede de drenagem (Eckart; McPhee; Bolisetti, 2017). Assim, os valores encontrados devem ser interpretados como específicos das condições simuladas, e não como índices gerais de desempenho dos pavimentos permeáveis.

Os resultados do modelo conceitual demonstram que a rotina implementada foi capaz de modificar automaticamente os arquivos de entrada, executar os cenários, recuperar os resultados hidráulicos e identificar o primeiro cenário da sequência avaliada que atendeu ao

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

critério estabelecido. Essa etapa constitui uma verificação operacional do procedimento, e não uma validação física do desempenho dos pavimentos permeáveis.

Influência do incremento adotado na busca incremental

A resolução da busca foi avaliada mediante a aplicação de diferentes incrementos de área. Como apresentado na Tabela 3, a redução do incremento de 0,10 para 0,01 ampliou o conjunto de cenários de 10 para 100 e reduziu a menor área factível identificada de 3.239,68 para 2.753,73 m². A diferença de 485,95 m² representa aproximadamente 15% da área identificada com o maior incremento.

Tabela 3 – Influência do incremento de busca na identificação da menor área factível de pavimento permeável no modelo conceitual

ΔA	Nº de simulações	Nº da iteração	Altura máxima (m)	Área impermeável (%)	Área de pavimento (m^2)
0,100	10	7	1,146	16,66	3.239,68
0,050	20	12	1,202	18,37	2.969,70
0,025	40	22	1,225	19,19	2.834,72
0,010	100	52	1,244	19,68	2.753,73

Fonte: Autores (2026).

Os resultados evidenciam o compromisso entre a resolução da busca e o esforço computacional. Incrementos maiores permitem percorrer mais rapidamente o intervalo de áreas, mas podem ultrapassar configurações factíveis intermediárias. Por outro lado, incrementos menores produzem uma estimativa mais refinada, porém exigem a avaliação de um número significativamente maior de cenários. No presente estudo, o refinamento do incremento evidenciou a capacidade do procedimento de gerar, executar e avaliar sistematicamente um conjunto mais amplo de cenários, sem a necessidade de reconfiguração manual de cada modelo. Portanto, a área obtida não deve ser interpretada como um mínimo absoluto, mas como a menor área testada que atendeu ao critério hidráulico para o incremento e a sequência de busca adotados.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Esse comportamento aproxima o procedimento de uma estratégia heurística de busca incremental, mas não de uma otimização global. Estudos recentes têm combinado o SWMM com algoritmos genéticos e métodos multiobjetivo para selecionar simultaneamente a localização, o tipo e a extensão das intervenções de LID (Abdalla *et al*., 2024; Huang *et al*., 2022). Comparativamente, o procedimento desenvolvido apresenta menor complexidade de implementação e maior transparência, embora não explore todas as combinações possíveis nem garanta a identificação de uma solução ótima global.

Sua principal contribuição consiste na automação de uma sequência objetiva e reproduzível de simulações, permitindo que o usuário avalie rapidamente um grande número de cenários definidos segundo critérios previamente estabelecidos e identifique uma configuração factível para o objetivo hidráulico adotado. O PySWMM viabiliza essa integração ao permitir o controle programático das simulações, a modificação automática dos parâmetros do modelo e o acesso aos objetos e resultados do SWMM (McDonnell *et al*., 2020).

Aplicação na bacia do Canal Madame Lynch

Após a verificação no modelo conceitual, o procedimento foi aplicado à bacia do Canal Madame Lynch, em Assunção, Paraguai. Nessa aplicação, as sub-bacias foram incorporadas progressivamente conforme a hierarquização previamente estabelecida, ao mesmo tempo que se ampliou a proporção de pavimento permeável considerada em cada cenário.

Na primeira configuração testada, correspondente à intervenção na sub-bacia S72 com 10% de LID, a profundidade máxima no nó crítico foi de 4,184 m, superior ao limite de 4,0 m adotado no estudo. A ampliação das intervenções produziu uma redução gradual dessa profundidade. A primeira configuração que atendeu ao critério foi obtida na iteração 9, com profundidade máxima de 3,964 m. Em relação à primeira configuração testada, a redução foi de 0,220 m, ou aproximadamente 5,3%. Na última iteração, a profundidade atingiu 3,826 m, correspondendo a uma redução de 0,358 m, ou aproximadamente 8,6%. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Tabela 4 – Evolução da profundidade máxima no nó crítico em função da expansão progressiva das intervenções na bacia do Canal Madame Lynch

Iteração	Sub-bacias intervencionadas	% LID	Altura (m)
1	S72	10%	4,184
2	S72, S81	20%	4,184
3	S72, S81, S82	30%	4,156
4	S72, S81, S82, S5	40%	4,141
5	S72, S81, S82, S5, S41	50%	4,120
6	S72, S81, S82, S5, S41, S7	60%	4,106
7	S72, S81, S82, S5, S41, S7, S77	70%	4,084
8	S72, S81, S82, S5, S41, S7, S77, S79	80%	4,063
9	**S72, S81, S82, S5, S41, S7, S77, S79, S83**	**90%**	**3,964**
10	S72, S81, S82, S5, S41, S7, S77, S79, S83, S84	100%	3,826

Fonte: Autores (2026).

A resposta hidráulica não foi uniforme entre as iterações. As maiores reduções ocorreram entre as iterações 8 e 9 e entre as iterações 9 e 10. Contudo, esses resultados não podem ser atribuídos isoladamente às sub-bacias S83 e S84, pois, em cada iteração, foram modificados simultaneamente o conjunto de sub-bacias contempladas e a intensidade da intervenção. Dessa forma, os resultados representam o efeito acumulado da sequência de cenários, e não a contribuição marginal individual de cada sub-bacia.

A distribuição espacial das intervenções constitui um aspecto relevante porque sub-bacias com áreas e graus de impermeabilização semelhantes podem apresentar diferentes relações de conectividade com o ponto crítico da rede. Estudos anteriores demonstram que a localização e a distribuição das práticas de LID podem modificar sua eficiência, mesmo quando a área total implantada é mantida aproximadamente constante (Lee *et al*., 2022). No presente trabalho, a hierarquização adotada fornece uma sequência objetiva e reproduzível, mas não avalia todas as alternativas espaciais possíveis.

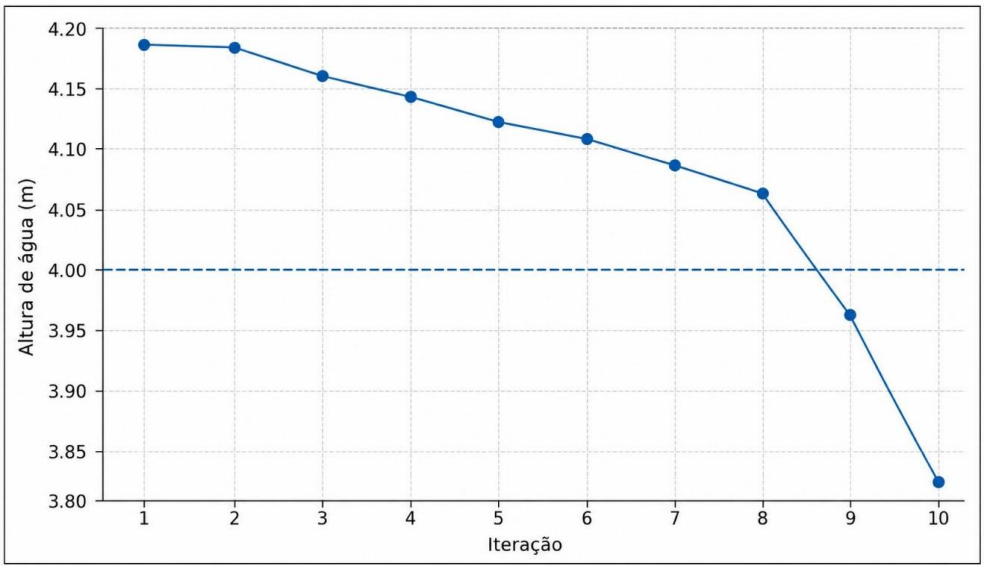
Sob uma perspectiva geográfica, a implantação de pavimentos permeáveis também está condicionada pela organização espacial do uso do solo, pela disponibilidade de ruas, calçadas, estacionamentos e áreas públicas, pela propriedade da terra e pela conectividade dessas

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

superfícies com a rede de drenagem. Assim, a configuração hidraulicamente factível identificada pelo modelo deve ser entendida como uma etapa de apoio ao planejamento, a ser posteriormente confrontada com a disponibilidade territorial e com a viabilidade construtiva e econômica das intervenções.

A Figura 5 apresenta a evolução da resposta do nó crítico ao longo dos cenários, facilitando a interpretação dos resultados.

Figura 5 – Variação da profundidade máxima no nó crítico em função da área acumulada de pavimento permeável na bacia do Canal Madame Lynch



Fonte: Autores (2026).

Os resultados demonstram que a automatização permitiu gerar, executar e organizar sistematicamente diferentes cenários de intervenção. Essa capacidade reduz a necessidade de alterações manuais repetitivas nos arquivos do SWMM e diminui o risco de inconsistências na configuração dos cenários.

Alcance e Limitações

O procedimento desenvolvido deve ser interpretado como uma ferramenta de triagem e apoio à decisão. A configuração selecionada corresponde ao primeiro cenário factível dentro

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

de uma sequência previamente estabelecida, não necessariamente à melhor solução entre todas as combinações possíveis de localização e área.

Além disso, os resultados foram obtidos para um modelo específico, um conjunto fixo de parâmetros do pavimento permeável e o evento de precipitação selecionado. Não foram avaliadas, nesta etapa, a variabilidade entre eventos, as incertezas dos parâmetros, a disponibilidade física das áreas de implantação, os custos das intervenções ou diferentes combinações de técnicas de LID. Essas delimitações não comprometem a utilidade do procedimento proposto, mas definem o seu campo de aplicação.

Desenvolvimentos futuros poderão incorporar múltiplos eventos de precipitação, diferentes indicadores hidráulicos, restrições espaciais e econômicas, análises de sensibilidade e métodos de otimização multiobjetivo. Também poderão ser avaliadas outras práticas de infraestrutura verde, permitindo ampliar o procedimento para o planejamento de combinações de soluções de drenagem urbana sustentável.

Considerações finais

O presente estudo desenvolveu e avaliou um procedimento automatizado, baseado na integração entre o EPA SWMM e o PySWMM, para apoiar a definição da área de pavimento permeável necessária ao atendimento de um critério hidráulico previamente estabelecido. O procedimento permitiu gerar, executar e organizar sistematicamente diferentes cenários de intervenção, reduzindo a necessidade de alterações manuais e repetitivas nos arquivos do modelo.

No modelo conceitual, a ampliação progressiva da área de pavimento permeável promoveu a redução da profundidade máxima no nó de controle. Para o incremento inicialmente adotado, o primeiro cenário que atendeu ao critério hidráulico apresentou 3.239,68 m² de pavimento permeável. A análise de sensibilidade ao incremento de busca mostrou, entretanto, que a menor área factível identificada foi reduzida para 2.753,73 m² quando se utilizou uma discretização mais refinada. Esse resultado evidencia que a área encontrada depende da resolução e da sequência de cenários avaliados, não devendo ser interpretada como um mínimo absoluto ou uma solução ótima global.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

A aplicação ao modelo da bacia do Canal Madame Lynch demonstrou a possibilidade de utilização do procedimento em uma rede urbana de maior complexidade. A incorporação progressiva das sub-bacias e o aumento da área de intervenção produziram reduções graduais da profundidade máxima no nó crítico. O primeiro cenário da sequência avaliada que atendeu ao limite de 4,0 m foi identificado na iteração 9, com profundidade máxima de 3,964 m.

Os resultados também mostraram que a resposta hidráulica depende não apenas da extensão das intervenções, mas de sua distribuição espacial e de sua relação com a rede de drenagem. Como a quantidade de sub-bacias contempladas e a intensidade da intervenção foram alteradas simultaneamente, não foi possível isolar a contribuição individual de cada sub-bacia. Assim, a configuração encontrada representa o primeiro cenário factível dentro da estratégia de hierarquização adotada.

A validação em um modelo conceitual e sua aplicação à bacia do Canal Madame Lynch demonstraram que o procedimento pode ser empregado tanto em ambientes controlados quanto em sistemas urbanos reais de maior complexidade. A integração entre o EPA SWMM e a biblioteca PySWMM mostrou-se eficiente para automatizar a geração dos cenários de intervenção, a execução das simulações e a organização dos resultados, reduzindo significativamente o esforço associado às abordagens convencionais baseadas em modificações manuais do modelo.

A principal contribuição do estudo consiste no desenvolvimento de uma estratégia transparente e reproduzível de busca incremental, capaz de apoiar a triagem de alternativas de intervenção e a tomada de decisão no planejamento da drenagem urbana. Diferentemente de métodos de otimização global, o procedimento não avalia todas as combinações possíveis de localização e área, mas permite identificar sistematicamente uma configuração que atenda ao critério hidráulico estabelecido, com menor intervenção manual.

Embora o estudo tenha considerado exclusivamente pavimentos permeáveis, o procedimento apresenta potencial para ser adaptado a outras práticas de LID e infraestrutura verde. Essa adaptação, entretanto, exigirá a definição de parâmetros, restrições espaciais e critérios de desempenho específicos para cada técnica. A inclusão dessas práticas em estratégias

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

de Soluções Baseadas na Natureza também dependerá de sua integração territorial, funcional e ecológica, não decorrendo apenas de sua representação como controle LID no modelo.

Os resultados devem ser interpretados considerando as condições específicas dos modelos, os parâmetros adotados para o pavimento permeável e o evento de precipitação selecionado. Aspectos como a avaliação de múltiplos eventos hidrológicos, a análise de incertezas dos parâmetros, a disponibilidade física das áreas, os custos de implantação e a investigação de todas as alternativas espaciais possíveis não foram considerados nesta etapa, uma vez que o objetivo do estudo consistiu em desenvolver e avaliar um procedimento automatizado para geração e análise de cenários utilizando o PySWMM. Como continuidade da pesquisa, recomenda-se incorporar diferentes eventos de precipitação, indicadores complementares de sobrecarga e extravasamento, análises de sensibilidade e incerteza, restrições territoriais e econômicas e métodos de otimização adaptativa ou multiobjetivo.

Declaração sobre o uso de inteligência artificial generativa no processo de redação

Durante a preparação deste trabalho, os autores utilizaram o ChatGPT (OpenAI), modelo GPT-5.5 (2026) para apoio na revisão da redação, melhoria da clareza, organização do texto e correção gramatical. Após o uso dessa ferramenta, os autores revisaram e editaram integralmente o conteúdo em conformidade com o método científico e assumem total responsabilidade pelo conteúdo desta publicação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001.

Referências

ABDALLA, E. M. H.; SIVERTSEN, E.; TAMM, O.; WERNER, A.; KOIVUSALO, H.; HELNESS, H. SWMMLIDopt: a tool for optimization of low-impact development (LID) measures using the SWMM model. **Journal of Hydroinformatics**, v. 26, n. 11, p. 2781-2797, 2024. DOI: https://doi.org/10.2166/hydro.2024.123.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 223, n. 7, p. 4253-4273, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2.

AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. **Journal of Environmental Management**, v. 119, p. 151-161, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.019.

BARBOSA, A. E.; FERNANDES, J. N.; DAVID, L. M. Key issues for sustainable urban stormwater management. **Water Research**, v. 46, n. 20, p. 6787-6798, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029.

CABALLERO CRISTALDO, C. B.; REINOSO ARELLANO, A. L. **Análisis del funcionamiento hidráulico del canal de desagüe de la Avenida Madame Lynch**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, 2024.

COHEN-SHACHAM, E.; WALTERS, G.; JANZEN, C.; MAGINNIS, S. **Nature-based solutions to address global societal challenges**. Gland: IUCN, 2016. DOI: https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en.

ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISETTI, T. Performance and implementation of low impact development: a review. **Science of the Total Environment**, v. 607-608, p. 413-432, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of the art. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 261-279, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001.

GUNN, R.; MARTIN, A.; ENGEL, B.; AHIABLAME, L. Development of two indices for determining hydrologic implications of land use changes in urban areas. **Urban Water Journal**, v. 9, n. 4, p. 239-248, 2012. DOI: https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.660957.

HARBOR, J. M. A practical method for estimating the impact of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology. **Journal of the American Planning Association**, v. 60, n. 1, p. 95-108, 1994. DOI: https://doi.org/10.1080/01944369408975555.

HUANG, J. J.; XIAO, M.; LI, Y.; YAN, R.; ZHANG, Q.; SUN, Y.; ZHAO, T. The optimization of low impact development placement considering life cycle cost using genetic algorithm. **Journal of Environmental Management**, v. 309, 114700, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114700.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN). **Global standard for nature-based solutions**: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. 1. ed. Gland: IUCN, 2020. DOI: https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.en.

JAHAMINA PARAGUAY. **Desborde del arroyo Madame Lynch**. Facebook, 10 maio 2019. Disponível em: https://www.facebook.com/watch/?v=822572778127096. Acesso em: 21 jul. 2026.

JAVAN, K.; BANIHASHEMI, S.; NAZARI, A.; ROOZBAHANI, A.; DARESTANI, M.; HOSSIENI, H. Coupled SWMM-MOEA/D for multi-objective optimization of low impact development in urban stormwater systems. **Journal of Hydrology**, v. 656, 133044, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133044.

LEE, J.; KIM, J.; LEE, J. M.; JANG, H. S.; PARK, M.; MIN, J. H.; NA, E. H. Analyzing the impacts of sewer type and spatial distribution of LID facilities on urban runoff and non-point source pollution using the Storm Water Management Model (SWMM). ***Water***, v. 14, 2776, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/w14182776.

LEOPOLD, L. B. **Hydrology for urban land planning**: a guidebook on the hydrologic effects of urban land use. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1968.

MCDONNELL, B. E.; RATLIFF, K.; TRYBY, M. E.; WU, J. J. X.; MULLAPUDI, A. PySWMM: the Python interface to Stormwater Management Model (SWMM). **Journal of Open-Source Software**, v. 5, n. 52, p. 1–3, 2020. DOI: https://doi.org/10.21105/joss.02292.

O'DRISCOLL, M.; CLINTON, S.; JEFFERSON, A.; MANDA, A.; MCMILLAN, S. Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States. ***Water***, v. 2, n. 3, p. 605–648, 2010. DOI: https://doi.org/10.3390/w2030605.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model (SWMM) User's Manual**: Version 5.2. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2022. (EPA/600/R-22/030). Disponível em: https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, v. 42, n. 11, p. 3830–3836, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016

TRYBY, M. E.; BUAHIN, C. A.; MCDONNELL, B. E.; KNIGHT, W. J.; FORTIN-FLEFIL, J.; VANDOREN, M.; ECKENWILER, S.; BOYER, H. Intelligent control of combined sewer systems using PySWMM: a Python wrapper for EPA's Stormwater Management Model.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons

Environmental Modelling & Software, v. 179, 106114, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106114.

WALSH, C. J.; ROY, A. H.; FEMINELLA, J. W.; COTTINGHAM, P. D.; GROFFMAN, P. M.; MORGAN II, R. P. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. **Journal of the North American Benthological Society**, v. 24, n. 3, p. 706–723, 2005. DOI: https://doi.org/10.1899/04-028.1.

WANG, H.; ZENG, P.; LIU, Z.; LI, W.; ZHOU, J. Optimization of LID Strategies for Urban CSO Reduction and Cost Efficiency: A Beijing Case Study. **Water**, v. 16, n. 7, 965, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/w16070965.

XIE, J.; WU, C.; LI, H.; CHEN, G. Study on Storm-Water Management of Grassed Swales and Permeable Pavement Based on SWMM. **Water**, v. 9, n. 11, 840, 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/w9110840.

1000 NOTICIAS. *Asunción inundada*: desborde del arroyo Itay tras el intenso temporal de este miércoles. Facebook, 16 dez. 2020. Disponível em: https://www.facebook.com/watch/?v=815056236010622. Acesso em: 21 jul. 2026.

AO CITAR ESTE TRABALHO, UTILIZAR A SEGUINTE REFERÊNCIA:
CRISTALDO, Camila Belen Caballero; PICCILLI, Daniel Allasia; PINTO, Leandro Conceição; PEREIRA, Gabriel Sulzbach; PACE, Rodrigo Girardon Della; REIS, Ana Carolina dos Santos; FREITAS NETO, Francisco Paim de; MIRANDA, Aldo Ivan Romero. Avaliação automatizada de cenários de pavimento permeável com PySWMM: aplicação à bacia do Canal Madame Lynch, Paraguai. **Ensaios de Geografia**, Niterói, Brasil, v. 13, n. 26, e132618, 2026.
Submissão em: 23/07/2026. Aceito em: 25/09/2026.
ISSN: 2316-8544
Este trabalho está licenciado com uma licença Creative Commons