



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IALY RAYANE DE AGUIAR COSTA

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA INFILTRAÇÃO EM UM  
PAVIMENTO PERMEÁVEL NA CIDADE DO RECIFE-PE**

Recife

2020

IALY RAYANE DE AGUIAR COSTA

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA INFILTRAÇÃO EM UM  
PAVIMENTO PERMEÁVEL NA CIDADE DO RECIFE-PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.

Recife

2020

Catálogo na fonte  
Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

C837v Costa, Ialy Rayane de Aguiar  
Variabilidade espaço-temporal da infiltração em um pavimento permeável na cidade do Recife-PE / Ialy Rayane de Aguiar Costa. – Recife, 2020.  
73 f.: figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. LID. 3. Equação de Richards. 4. Hydrus. 5. Infiltração. 6. Método Beerkan. 7. Método inverso. I. Montenegro, Suzana Maria Gico Lima (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2021 - 176

IALY RAYANE DE AGUIAR COSTA

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA INFILTRAÇÃO  
EM UM PAVIMENTO PERMEÁVEL NA CIDADE DO RECIFE-PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 14/10/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Participação por videoconferência  
Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

À minha filha, Ágatha Beatriz de Aguiar Coutinho.

Aos meus pais, Isaac e Socorro, e minha irmã Inayara, os quais sempre me incentivaram e me apoiaram para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus amados avós, Dionísio e Nazinha (*in memoriam*), que sempre foram grandes exemplos a serem seguidos e me deixaram grandes lições.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que é meu refúgio e fortaleza, por me permitir concluir essa etapa em meio a tantos desafios, trazendo alegria aos meus pais e a todos que torciam para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Socorro Aguiar e Isaac Costa, e minha irmã, Inayara, por todo o apoio, e por terem me ajudado a cuidar de Ágatha quando possível para que eu pudesse me dedicar mais à dissertação.

À professora Suzana Montenegro, por toda compreensão e pela contribuição técnica para a realização desse trabalho.

A Artur Coutinho, por ter me auxiliado em todas as etapas, desde o planejamento dos ensaios em campo aos debates em relação aos resultados encontrados.

À equipe do Laboratório de Física do Solo, Augusto Carvalho, Paulo Lopes, Severino Martins, Abraão Vila Nova, Lucas Ravellys, França Neto, pelas ajudas nos ensaios de campo.

Ao professor Antônio Antonino, por ser sempre solícito e me ajudar prontamente a conseguir solucionar o problema do alto custo computacional das simulações.

Ao professor Anderson Paiva, pela disponibilidade em participar da banca examinadora.

À FACEPE, pela concessão da bolsa de Mestrado Acadêmico.

## RESUMO

O aumento da frequência de eventos de inundação em bacias hidrográficas urbanas decorrente da expansão urbana desordenada, e conseqüente aumento de superfícies impermeáveis, destaca a inadequação dos sistemas tradicionais de drenagem urbana. As técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) têm se mostrado uma alternativa viável e eficaz na redução da precipitação efetiva e aumento da capacidade de infiltração e evapotranspiração das áreas urbanas. Nesse sentido, esse trabalho objetivou apresentar uma simulação bidimensional da dinâmica da infiltração numa estrutura real de um pavimento permeável na cidade do Recife. Uma análise de sensibilidade local foi realizada para investigar a influência dos parâmetros hidrodinâmicos das camadas constituintes da estrutura nas estimativas dos processos de transferência de água no pavimento. Investigou-se também a influência do uso de diferentes resoluções temporais na estimativa desses processos: as escalas de tempo diárias e horárias. Inicialmente, foi realizada uma análise de sensibilidade do grau de refinamento da malha para simulação dos processos de transferência no pavimento permeável. O método de superfície de resposta foi aplicado para a análise de sensibilidade aos parâmetros hidrodinâmicos, em que se variou cada um dos parâmetros em -50 a +50%. Além disso, foram realizados ensaios de infiltração na escala de campo seguindo a metodologia Beerkan. Os parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos a partir desses ensaios utilizando o método inverso. Foi construída uma geometria bidimensional para simulação do processo de infiltração no pavimento permeável usando o Hydrus 2D. O uso de uma escala de tempo diária diminuiu a influência dos eventos de maior intensidade de precipitação, subestimando a geração de escoamento superficial. Verificou-se também que na resolução diária os parâmetros hidrodinâmicos apresentaram maior influência que as variáveis climáticas. Notou-se, ainda, que, ao utilizar os dados climatológicos com resolução temporal horária, o escoamento superficial foi hipoteticamente controlado pelas variáveis meteorológicas. A análise de sensibilidade local destacou a influência da camada de revestimento no comportamento hidráulico do pavimento. Intervalos reduzidos foram então usados para a estimativa dos parâmetros hidráulicos da camada superficial do pavimento através do método inverso. Os resultados obtidos demonstraram que a utilização da metodologia Beerkan com infiltrometria de anel grande acoplada ao método inverso, devido a facilidade de execução, implementação e a eficácia, pode representar uma alternativa nova e viável para a estimativa das propriedades hidráulicas.

Palavras-chave: LID; equação de Richards; Hydrus; infiltração; método Beerkan; método inverso.

## ABSTRACT

The increase in the frequency of flood events in urban watersheds due to the disordered urban expansion, and the consequent increase in impermeable surfaces, highlights the inadequacy of traditional urban drainage systems. Low Impact Development (LID) techniques have been shown to be a viable and effective alternative in reducing effective precipitation and increasing the infiltration and evapotranspiration capacity of urban areas, favoring the recharge of groundwater. In this sense, this work aimed to present a two-dimensional simulation of the infiltration dynamics in a real structure of a permeable pavement in the city of Recife. A local sensitivity analysis was performed to investigate the influence of the hydrodynamic parameters of the constituent layers of the structure on the estimates of the water transfer processes on the pavement. The influence of the use of different temporal resolutions in the estimation of these processes was also investigated: the daily and hourly time scales. Initially, a sensitivity analysis of the degree of mesh refinement was performed to simulate the transfer processes on the permeable pavement. The response surface method was applied for the analysis of sensitivity to hydrodynamic parameters. In addition, infiltration tests were carried out on the field scale following the Beerkan methodology. The hydrodynamic parameters were obtained from these tests using the reverse method. A two-dimensional geometry was built to simulate the infiltration process in the permeable pavement using Hydrus 2D. The use of a daily time scale reduced the influence of events with higher precipitation intensity, underestimating the generation of runoff. It was also found that in the daily resolution the hydrodynamic parameters had a greater influence than the climatic variables. It was also noted that, when using climatological data with hourly temporal resolution, surface runoff was hypothetically controlled by meteorological variables. The local sensitivity analysis highlighted the influence of the coating layer on the hydraulic behavior of the pavement. Reduced intervals were then used to estimate the hydraulic parameters of the surface layer of the pavement using the reverse method. The results obtained demonstrated that the use of the Beerkan methodology with large ring infiltrometry coupled to the inverse method, due to the ease of execution, implementation and efficiency, can represent a new and viable alternative for the estimation of hydraulic properties.

Keywords: LID; Richards' equation; Hydrus; infiltration; Beerkan method; inverse method.

## LISTA DE FIGURAS

### REVISÃO DE LITERATURA

Figura 1 –	Tipos de sistemas de infiltração de pavimentos permeáveis.	20
<b>ARTIGO 1</b>		
Figura 1 –	Localização do pavimento permeável no sítio experimental da Universidade Federal de Pernambuco.	32
Figura 2 –	Esquema da estrutura do pavimento permeável piloto (dimensões em m). Fonte: Adaptado de Coutinho et al. (2016)	33
Figura 3 –	Domínio numérico e condições de contorno representativos da estrutura do pavimento permeável no Hydrus 1D	36
Figura 4 –	(a) Séries de precipitação pluviométrica e evapotranspiração potencial e (b) Fluxos impostos ao pavimento permeável utilizadas nas simulações.	36
Figura 5 –	Condição inicial de potencial matricial da água no solo.	37
Figura 6 –	Sensibilidade da malha para as variáveis: a) Lâmina escoada acumulada; b) Lâmina infiltrada acumulada; c) Evapotranspiração real acumulada; d) Recarga do lençol freático acumulada e e) Lâmina média armazenada.	40
Figura 7 –	Simulação horária versus diária para as variáveis: a) Lâmina escoada acumulada; b) Lâmina infiltrada acumulada; c) Evapotranspiração real acumulada; d) Recarga do lençol freático acumulada e e) Lâmina média armazenada.	42
Figura 8 –	Sensibilidade do escoamento superficial quando submetido a variações nos parâmetros $\theta_s$ , $\theta_r$ , $\alpha$ , $n$ e $K_s$ das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5.	43
Figura 9 –	Sensibilidade da evapotranspiração real acumulada quando sujeita a variações nos parâmetros $\theta_s$ , $\theta_r$ , $\alpha$ , $n$ e $K_s$ das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5.	44
Figura 10 –	Sensibilidade da lâmina infiltrada acumulada quando sujeita a variações nos parâmetros $\theta_s$ , $\theta_r$ , $\alpha$ , $n$ e $K_s$ das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5.	45
Figura 11 –	Sensibilidade da lâmina armazenada acumulada quando submetida a variação nos parâmetros $\theta_s$ , $\theta_r$ , $\alpha$ , $n$ e $K_s$ das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5.	46

Figura 12 –	Sensibilidade da recarga do lençol freático acumulada quando submetida a variações nos parâmetros $\theta_s$ , $\theta_r$ , $\alpha$ , $n$ e $K_s$ das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5	47
Figura 13 –	Sensibilidade relativa média das variáveis de saída aos parâmetros hidrodinâmicos nas resoluções temporais (a) horária e (b) diária. Os índices subscritos se referem a cada camada do pavimento permeável.	48

## ARTIGO 2

Figura 1 –	(a) Localização da área de estudo: em destaque o sítio experimental localizado no estacionamento da escola de Engenharia de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências. (b) Esquema da estrutura do pavimento permeável piloto (dimensões em m).	54
Figura 2 –	Etapas para simulação dos processos de transferência de água no pavimento permeável utilizadas nesse trabalho	55
Figura 3 –	Detalhamento dos experimentos de infiltração.	56
Figura 4 –	Detalhamento dos materiais da seção bidimensional do pavimento permeável e condições de contorno utilizadas.	60
Figura 5 –	(a) Lâmina infiltrada acumulada e (b) taxas de infiltração para o pavimento permeável em épocas distintas.	61
Figura 6 –	Ajustes realizados com a utilização do método inverso para os três períodos analisados.	63
Figura 7 –	Simulação do processo de infiltração e redistribuição de água no pavimento permeável para o revestimento com (a) maior condutividade hidráulica saturada (b) e menor condutividade hidráulica saturada para diversos tempos.	64

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO 1

Tabela 1 –	Parâmetros hidrodinâmicos das camadas do pavimento permeável.	34
------------	---------------------------------------------------------------	----

### ARTIGO 2

Tabela 1 –	Intervalos considerados para otimização de cada parâmetro hidrodinâmico.	58
Tabela 2 –	Resumo das propriedades hidrodinâmicas das camadas de revestimento, areia e do subleito utilizadas nas simulações.	60
Tabela 3 –	Parâmetros hidrodinâmicos estimados a partir do método inverso para diversos ensaios na camada de revestimento do PP, velocidade básica de infiltração (VIB), erro percentuais (E) e estatísticas dos ajustes realizados para o pavimento permeável: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), razão dos desvios (RD), coeficiente de massa residual (CMR), erro quadrático médio (EQM) e Erro de modelagem (EM).	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BEST	<i>Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments</i>
BMP	<i>Best Management Practices</i>
CMR	Coeficiente de Massa Residual
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
EM	Eficiência de modelagem
EUA	Estados Unidos da América
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LID	<i>Low Impact Development</i>
LIUDD	<i>Low Impact Urban Design and Development</i>
PP	Pavimento permeável
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinação
RD	Razão de desvios
SUD	<i>Sustainable Urban Drainage System</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{\text{park}}$	Área do estacionamento
$C$	Coefficiente de escoamento superficial
$h$	Potencial matricial
$i_{\text{pp}}$	Fluxo imposto ao pavimento permeável
$K_s$	Condutividade hidráulica saturada
$l$	Tortuosidade
$n$	Parâmetro de forma da curva de retenção
$P$	Intensidade de chuva
$S$	Sorvidade
$S_e$	Saturação efetiva
$\alpha$	Inverso da pressão de entrada de ar
$\theta$	Umidade volumétrica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>18</b>
3.1	DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL	18
3.2	PAVIMENTO PERMEÁVEL	19
3.2.1	Definição	19
3.2.2	Desempenho e medidas de manutenção em pavimentos permeáveis	21
3.2.3	Modelagem numérica dos processos hidrológicos	23
3.2.4	Experiência Brasileira	24
<b>3</b>	<b>ARTIGO 1 – SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS NA SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE ÁGUA EM UM PAVIMENTO PERMEÁVEL</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>ARTIGO 2 – DINÂMICA DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO DA ÁGUA EM PAVIMENTO PERMEÁVEL UTILIZANDO EXPERIMENTAÇÃO IN SITU E SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM O HYDRUS-2D</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas em seus aspectos naturais têm sofrido forte pressão devido às ações antrópicas. Particularmente, a rápida expansão da urbanização aliada à falta de planejamento ambiental nas cidades tem acarretado na retirada da vegetação natural e aumento de superfícies impermeáveis, desencadeando alterações nos processos hidrológicos.

Basicamente, a impermeabilização influencia fortemente as relações entre a precipitação pluviométrica e os mecanismos de geração de escoamento, ocasionando principalmente a diminuição do processo de infiltração da água no solo. Nesse sentido, uma série de processos decorrentes da diminuição da infiltração também sofrem interferência. Variáveis como o armazenamento da água em subsuperfície bem como a recarga natural dos aquíferos são influenciadas a médio e longo prazo pelo aumento da impermeabilização. Isso resulta na intensificação da ocorrência de inundações, degradação das águas pluviais, além de outros problemas de desconforto urbano.

A necessidade de restabelecimento dos processos hidrológicos às condições naturais das bacias levou à utilização de infraestruturas verdes que privilegiem os fenômenos naturais como a infiltração. Desse modo, essas técnicas promovem a redução do volume da precipitação efetiva e da poluição das águas pluviais, além de favorecerem a recarga quantitativa dos lençóis freáticos. De modo simplificado, as infraestruturas verdes podem ser divididas em estruturas de armazenamento e estruturas de infiltração. Essas tecnologias também são denominadas de técnicas alternativas ou técnicas compensatórias para a drenagem urbana.

Trincheiras de infiltração, poços de infiltração, valas de infiltração e pavimentos permeáveis são exemplos de infraestruturas verdes baseadas na infiltração. De maneira particular, os pavimentos permeáveis (PPs) apresentam notável eficácia em termos de redução de escoamento superficial, retenção e qualidade da água. Os pavimentos permeáveis são, em geral, estruturas de infiltração multicamadas compostas por uma camada superficial com revestimento poroso, uma camada de reservatório e uma camada de subleito.

Geralmente, a avaliação do desempenho dessas estruturas é realizada com a utilização de ensaios de infiltração *in situ* na camada superficial. Jabur *et al.* (2015) utilizaram o método ASTM C1701 e infiltrometria de duplo anel para avaliar a capacidade de infiltração em superfícies permeáveis com bons resultados. O método semifísico Beerkan também vem sendo utilizado com sucesso para avaliação da capacidade de infiltração e estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos da curva de retenção e curva de condutividade (COUTINHO *et al.*, 2016;

MARINHO *et al.*, 2020). Simuladores de chuva têm sido utilizados para avaliação experimental de capacidade de escoamento e da capacidade de infiltração (ARAÚJO *et al.*, 2000). No entanto, o elevado contraste de propriedades hidrodinâmicas das camadas subsuperficiais pode influenciar nos processos transferência de água nessas estruturas, sendo a literatura técnica científica pouco desenvolvida no sentido de avaliar a sensibilidade dos processos hidrológicos devido às incertezas dos parâmetros de entrada dos modelos.

Nesse contexto, os modelos físicos provaram ser ferramentas confiáveis e precisas para a análise numérica dos processos de transferência de água e solutos em técnicas compensatórias. O software Hydrus (ŠIMUNEK *et al.*, 2016) é um dos softwares amplamente usados para simular o fluxo de água e transporte de soluto e calor em planos verticais ou horizontais, bidimensionais, em domínios tridimensionais axissimétricos ou em domínios com saturação variável totalmente tridimensional. Recentemente, o modelo Hydrus tem sido bastante utilizado na literatura para a descrição do comportamento hidráulico de técnicas compensatórias com bons resultados (NEWCOMER *et al.*, 2014; LI; BABCOCK, 2015; BRUNETTI *et al.*, 2016; COUTINHO *et al.*, 2016). No entanto, a heterogeneidade dos materiais que compõem os PPs e seu comportamento hidráulico fortemente insaturado representam desafios de modelagem significativos. Essa complexidade ocorre devido a elevada não linearidade das curvas de retenção e da curva de condutividade nas quais os modelos físicos se baseiam. Nesse sentido, a análise de sensibilidade é uma ferramenta fundamental para a avaliação de como parâmetros de entrada influenciam na dinâmica das variáveis de saída nos modelos hidrológicos (TURCO *et al.*, 2017; BRUNETTI *et al.*, 2018; COSTA *et al.*, 2020).

No entanto, observa-se a necessidade de metodologia que possam integrar a utilização de alternativas de avaliação das propriedades hidrodinâmicas como o método Beerkan com ferramentas de simulação que possibilitem avaliar o detalhamento da composição heterogênea de técnicas como os pavimentos permeáveis.

A falta de estudos que forneçam uma descrição abrangente do comportamento hidráulico de um pavimento permeável em escala de campo e que proponham uma metodologia geral para a estimação de seus parâmetros hidráulicos sugere que a pesquisa é particularmente necessária no desenvolvimento e identificação de ferramentas de modelagem precisas na análise das práticas de LID, especialmente para pavimentos permeáveis.

## 2 OBJETIVOS

Simular numericamente os processos de transferência de água em um pavimento permeável levando-se em consideração as incertezas oriundas dos processos de estimativa das propriedades hidrodinâmicas.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os parâmetros mais influentes na estimativa dos processos de transferência de água em um pavimento permeável através de uma análise de sensibilidade local;
- Efetuar a caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento de um pavimento permeável utilizando o método Beerkan;
- Estimar as propriedades hidrodinâmicas da camada superficial de um pavimento permeável utilizando o método inverso;
- Simular numericamente o processo de infiltração e redistribuição de água na estrutura de um pavimento permeável.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL

A crescente frequência de eventos de inundação em bacias urbanas, relacionada a um aumento de superfícies impermeáveis, combinada a ocorrência de eventos extremos de precipitação cada vez mais recorrentes devido às mudanças climáticas, evidenciou a inadequação dos sistemas tradicionais de drenagem urbana.

Em busca de minimizar os impactos da urbanização, foram conceituadas práticas sustentáveis de gestão das águas pluviais, que possuem como objetivo reestabelecer as condições hidrológicas naturais existentes nas bacias pré-urbanizadas com a utilização de tecnologias que favorecem a infiltração e o armazenamento das águas pluviais, e em alguns casos a evapotranspiração. Desse modo, essas técnicas promovem a redução do volume da precipitação efetiva e da poluição das águas pluviais, além de favorecerem os processos relacionados a recarga dos lençóis freáticos.

A drenagem urbana sustentável se desenvolveu em todo o mundo, sob diferentes concepções e denominações. Na América do Norte, por exemplo, surgiram as *Best Management Practices* (BMPs), que incentivam a utilização de medidas estruturais e não-estruturais num conjunto planejado de ações visando atenuar os impactos da urbanização. No Reino Unido, os *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) abordam diversas técnicas desenvolvidas para melhorar o layout urbano e a gestão de riscos ambientais, com o objetivo de reduzir os escoamentos superficiais através de estruturas de controle da água pluvial (CIRIA, 2000). O *Low Impact Development* (LID), adotado nos EUA e no Canadá, se refere a sistemas e práticas de preservação e recriação das características de paisagem natural, reduzindo o efeito das áreas impermeáveis através de medidas de controle de microescala descentralizadas, visando a uma drenagem funcional e efetiva das águas pluviais (USEPA, 2000). O *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), desenvolvido na Austrália, tem como seu principal objetivo a gestão integrada de água potável, águas residuais e água pluvial no país (WONG, 2006). Na Nova Zelândia, surgiu o conceito de *Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD) (IGNATIEVA; STEWART; MEURK, 2008) e na China o *Sponge City*.

No Brasil, os sistemas de drenagem urbana sustentáveis são denominados por “técnicas compensatórias” e “desenvolvimento urbano de baixo impacto”, e preconizam a preservação do ciclo hidrológico natural no processo de desenvolvimento das cidades. As técnicas compensatórias consistem em células de biorretenção, trincheiras de infiltração, pavimentos

permeáveis, valas, telhados verdes, filtros vegetados, filtros de areia, entre outros. Diversos estudos comprovaram os benefícios destas.

De maneira particular, os pavimentos permeáveis apresentam notável eficácia em termos de redução de escoamento superficial, retenção e qualidade da água, e têm sido cada vez mais utilizados no ambiente urbano (KAMALI; DELKASH; TAJRISHY, 2017; BRASWELL; WINSTON; HUNT, 2018).

## 3.2 PAVIMENTO PERMEÁVEL

### 3.2.1 Definição

Pavimentos permeáveis são estruturas que suportam as demandas de esforços mecânicos gerados pelo tráfego e as condições de rolagem e simultaneamente permitem a infiltração e o armazenamento temporário de água, reduzindo o escoamento superficial sem causar danos à sua estrutura.

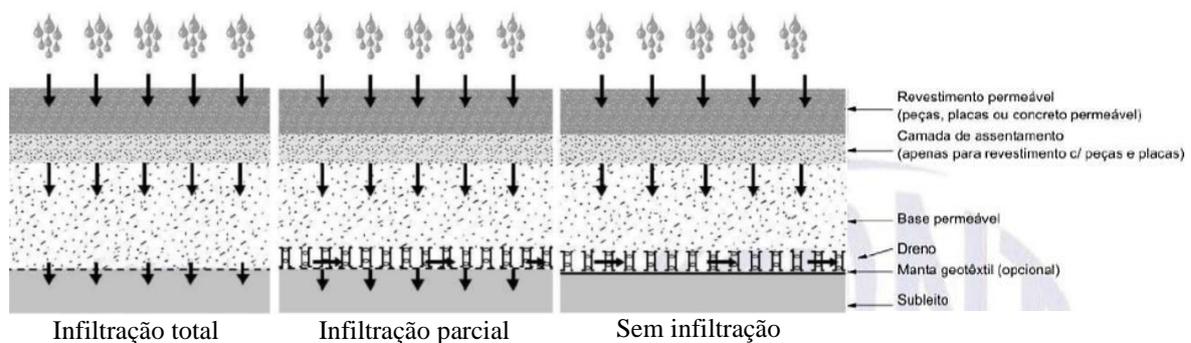
A configuração estrutural dos pavimentos permeáveis é semelhante aos pavimentos comuns, a qual consiste de uma camada de revestimento, camadas de base e/ou sub-base, normalmente compostas por material granular e que contribuem para resistir e dissipar os esforços gerados pelo tráfego além de funcionar como reservatório no caso de pavimentos permeáveis, e o subleito, que é composto pelo solo natural. Nos pavimentos tradicionais, no entanto, busca-se conferir máxima impermeabilidade possível ao revestimento, visando evitar a sua rápida degradação devido aos esforços gerados pelo tráfego. Os pavimentos ditos permeáveis, por outro lado, precisam de elevada porosidade e permeabilidade ao longo de toda a estrutura para desempenhar a função para a qual foram projetados.

Na concepção do pavimento permeável, as propriedades do solo do subleito determinam o tipo de seção transversal do pavimento, considerando as necessidades de resistência ao tráfego e os requisitos de gestão da água. De modo geral, há três tipos de sistemas de pavimento permeável, a depender das condições naturais do subleito e de condicionantes do projeto: infiltração total através do subleito, infiltração parcial e sem infiltração.

Caso o subleito possua boa permeabilidade, toda a água estocada no pavimento infiltra. Nesse sistema, além de não serem necessários dispositivos de drenagem, há o reabastecimento do lençol freático local. No sistema de infiltração parcial, parte da água armazenada alcança o subleito e se infiltra, enquanto que o excedente é drenado até o sistema público de drenagem

ou reservatório externo, de forma controlada. Os sistemas sem infiltração são utilizados quando o subleito é composto por materiais coesivos, expansivos ou rochosos, cuja permeabilidade é bastante reduzida, ou ainda para subleitos com nível d'água muito elevado ou cujo solo esteja contaminado. Nesses casos, o sistema do pavimento permeável consiste apenas em um reservatório para armazenar o volume infiltrado e todo o estoque é controladamente extravasado por drenos (CMAA, 2010; ABNT, 2015). O esquema dos tipos de sistema de infiltração de um pavimento permeável é apresentado na Figura 1. Maiores detalhes acerca da concepção, dimensionamento e execução de pavimentos permeáveis podem ser encontrados em ABNT (2015) e CMAA (2010).

Figura 1 - Tipos de sistemas de infiltração de pavimentos permeáveis.



Fonte: ABNT (2015).

Os pavimentos permeáveis podem ser revestidos com diversos tipos de superfícies permeáveis, sendo as mais comuns: o asfalto poroso, o concreto poroso e o concreto intertravado permeável.

Embora os benefícios quantitativos e qualitativos da técnica de pavimento permeável já tenham sido comprovados em diversos estudos, a estrutura porosa deste enfrenta deficiências em seu desempenho estrutural, como resistência relativamente baixa, sulcos, entupimento, entre outras, o que dificulta sua popularização e aplicação. Além desse fator, Brunetti *et al.* (2018) também apontaram como fator limitante para a adoção generalizada desse sistema a falta de conhecimento de ferramentas de modelagem confiáveis entre os profissionais, o que facilitaria na tomada de decisão sobre a utilização destes.

### 3.2.2 Desempenho e medidas de manutenção de pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis têm sua capacidade de infiltração diminuída ao longo do tempo. Geralmente, ocorre um processo de colmatção que atua obstruindo os poros dos primeiros centímetros da camada de revestimento. De maneira geral, o processo de colmatção é gerado por mecanismos físicos ou biológicos. No tocante aos mecanismos físicos, o escoamento superficial carrega consigo sedimentos que se depositam ao longo do tempo na superfície dos pavimentos permeáveis. Quanto aos mecanismos biológicos, ocorre a formação de uma micropelícula gerada por atividade biológica que atua como camada de impedimento aos processos de transferência de água na superfície (SIRIWARDENE; DELETIC; FLETCHER, 2007).

Vários fatores podem afetar potencialmente o início e a progressão do processo de colmatção de um sistema de pavimento permeável, como características da precipitação, características do solo da bacia, qualidade do ar e temperatura, contribuição da área de drenagem, tipos e volumes de tráfego, além da própria inclinação do pavimento (WISCONSIN, 2014; BRUGIN *et al.*, 2020).

Nesse sentido, a manutenção é fundamental para evitar a geração de escoamento superficial bem como garantir a promoção do tratamento das águas pluviais pelos processos de filtração no pavimento. Metodologias como jateamento de água e ar sob pressão, aspiração a vácuo e varrição são normalmente utilizadas para restabelecer a capacidade de infiltração (HU *et al.*, 2020).

Uma forma de avaliar a capacidade de infiltração e necessidade de manutenção em pavimentos permeáveis é através da realização de testes de infiltração na superfície. No entanto, as diferentes técnicas e métodos aplicados para determinar a permeabilidade podem resultar em valores diferentes para o mesmo local de teste de campo. De maneira geral, ainda não há um consenso sobre quais padrões devem ser usados para medir a permeabilidade de pavimentos permeáveis.

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) normatizou diversas metodologias para mensurar a capacidade de infiltração em pavimentos permeáveis. A ASTM C1701/2017 descreve métodos recomendados para medir a taxa de infiltração de pavimentos de concreto poroso utilizando infiltrômetro de anel duplo, e a ASTM C1781/2015 para pavimentos de concreto permeável intertravado através de infiltrômetro de anel único. Esses métodos padrão ASTM estão entre os mais utilizados para medir a capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis, no entanto, esses testes podem levar horas para serem concluídos. Sob

essa ótica, muitos testes de infiltração têm sido propostos na literatura visando torná-los mais rápidos econômicos.

Winston *et al.* (2016) propuseram um teste de infiltração simples (SIT) com infiltrômetro quadrado composto de madeira com metodologia similar ao ASTM, no entanto, no método proposto todo o volume inicial é despejado no infiltrômetro em uma única vez e uma maior área de superfície é considerada. O método proposto foi comparado ao ASTM através da realização de 873 testes por cada metodologia nos mesmos locais em 12 pavimentos permeáveis. O SIT levou em média um quarto do tempo para ser executado, e previu aproximadamente a mesma taxa de infiltração do método ASTM até 250 mm/min. Após isso, o SIT subestimou a taxa de infiltração em comparação ao método ASTM. Além disso, o uso de uma maior área de superfície, como proposta no SIT, reduziu em 40% a variabilidade nas medições.

O desempenho de um método de infiltração desenvolvido na Austrália para pavimentos de concreto permeável intertravados, SWIFT, foi avaliado por Lucke *et al.* (2015) em comparação ao ASTM C1781M-14a. Uma boa concordância foi encontrada entre esses métodos. O SWIFT provou ser um método rápido e barato para avaliação de pavimentos permeáveis.

Li, Kayhanian & Harvey (2013) compararam o desempenho dos métodos ASTM C1701 e do permeâmetro do *National Center for Asphalt Technology* (NCAT). Os valores de infiltração medidos com o método ASTM foram em média 75% menores do que aqueles medidos com o método NCAT. A concordância entre esses dois métodos melhorou quando um cilindro de diâmetro maior foi usado para o método ASTM.

Chen *et al.* (2019) compararam os métodos de pressão constante ASTM C1701 e ASTM C1781, o permeâmetro de carga decrescente do *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) e duas novas metodologias SF-4 e SF-9. Observou-se a existência de forte correlação entre as medidas de permeabilidade do método NCAT e SF-4, e entre o padrão ASTM e SF-9. Os métodos SF-4 e SF-9 mostraram-se eficazes e eficientes nas medições de permeabilidade. Os métodos de pressão constante e do permeâmetro de carga decrescente apresentaram diferenças acentuadas na permeabilidade, com relação média entre 4,08 a 6,36.

Além dessas metodologias, o método Beerkan tem sido correntemente utilizado na caracterização hidráulica da superfície de pavimentos permeáveis (COUTINHO *et al.*, 2016; BOUARAFA *et al.*, 2019; COUTINHO *et al.*, 2020; MARINHO *et al.*, 2020).

### 3.2.3 Modelagem numérica dos processos hidrológicos

A modelagem do processo de infiltração de água em pavimentos permeáveis tem sido realizada utilizando modelos que admitem que a equação de Richards é válida. Nesse contexto, o modelo Hydrus tem sido correntemente utilizado na simulação desses processos em técnicas compensatórias. Trabalhos como os de Lllgen *et al.* (2007) efetuaram simulação bidimensional utilizando o Hydrus-2D em um módulo experimental do pavimento piloto de blocos intertravados.

Carbone *et al.* (2014) verificaram o desempenho do modelo Hydrus na descrição dos fenômenos de infiltração em um pavimento permeável. Em particular, um modelo de dupla porosidade com uma equação de transferência de massa foi aplicado. Os resultados da modelagem foram comparados com dados experimentais de vazão usando vários índices estatísticos. Os resultados confirmaram a adequação do modelo Hydrus na previsão do comportamento hidrológico de pavimentos permeáveis.

Brunetti, Simunek & Piro (2016) também investigaram a adequação do modelo Hydrus em descrever corretamente o comportamento hidráulico do fluxo de drenagem num pavimento permeável. No estudo, dois cenários diferentes foram analisados: o primeiro usa um modelo de porosidade única para todas as camadas do pavimento permeável, o segundo usa um modelo de porosidade dupla para as camadas de base e sub-base. Ainda, uma análise de sensibilidade global seguida de uma filtragem de Monte Carlo foi realizada, e o modelo foi calibrado com o algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO). A análise de sensibilidade destacou a influência da camada de revestimento no comportamento hidráulico do pavimento. A abordagem de dupla porosidade foi mais adequada na descrição dos fluxos, apresentando NSE = 0,81, enquanto o cenário com porosidade única apresentou NSE = 0,43. Os parâmetros estimados foram validados usando um conjunto independente de medições de um mês, resultando em valores de NSE de 0,43 e 0,86 para o primeiro e segundo cenários, respectivamente. Os resultados confirmaram a adequação e a precisão do HYDRUS-1D em descrever corretamente o comportamento hidráulico de pavimentos permeáveis.

Turco *et al.* (2017) avaliaram a precisão do modelo HYDRUS-2D na modelagem do comportamento hidráulico de um sistema de pavimento permeável em escala de laboratório. Valores de umidade volumétrica e vazão de saída foram monitorados durante dez eventos de irrigação com diferentes durações e intensidades. Os hidrogramas medidos e modelados foram comparados usando o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (o qual variou entre 0,95 e 0,99), enquanto o coeficiente de determinação  $R^2$  foi usado para avaliar os dados de umidade

medidos e modelados ( $R^2 = 0,81$  a  $0,87$ ). Os parâmetros foram validados usando os conjuntos restantes de medições, resultando em valores de NSE maiores que 0,90 (0,91 a 0,99) e  $R^2$  entre 0,63 e 0,91. Os resultados confirmaram a aplicabilidade do HYDRUS-2D para descrever corretamente o comportamento hidráulico do sistema em escala de laboratório.

A adequação do SWMM em modelar os processos hidrológicos em pavimentos permeáveis também tem sido estudada e confirmada por diversos autores (MADRAZO-URIBEETXEBARRIA, 2019; ZHANG & GUO, 2015).

### 3.2.4 Experiência Brasileira

Araújo, Tucci & Goldenfum (2000) avaliaram a eficiência de diferentes tipos de superfícies permeáveis na redução do escoamento superficial urbano. No estudo, foram realizadas simulações de chuva com duração de 10 min, período de retorno de cinco anos e intensidade de 111,9 mm/h sobre módulos de 1m<sup>2</sup> dos seguintes tipos de cobertura do solo: solo compactado, pavimento impermeável de concreto convencional, pavimentos semipermeáveis (blocos de concreto e paralelepípedos, ambos com juntas de areia) e pavimentos permeáveis (blocos de concreto vazados preenchidos com areia e concreto poroso). Nas simulações efetuadas no módulo de pavimento impermeável, praticamente toda chuva gerou escoamento superficial, com acréscimo de 44% no coeficiente de escoamento, em comparação com a simulação no solo compactado. As superfícies semipermeáveis apresentaram escoamento superficial inferior ao do concreto, indicando que o uso dessas estruturas em áreas urbanas, em detrimento às superfícies impermeáveis, pode contribuir para o controle da geração de escoamento superficial. Na simulação de chuva no pavimento permeável o escoamento foi praticamente inexistente.

Bruno *et al.* (2013) também compararam a eficiência de diferentes tipos de revestimento utilizados em áreas urbanas na redução da precipitação efetiva. Foram analisados o solo gramado, solo exposto, blocos de concreto vazados, blocos de concreto maciço e concreto convencional. Simulações de chuvas com intensidades de precipitação de 79 mm/h e 121 mm/h foram realizadas em triplicata em cada uma das cinco superfícies. Das alternativas avaliadas, a superfície com grama foi a que apresentou os melhores resultados. Para este revestimento, não houve a geração do escoamento superficial para uma intensidade de 79 mm/h, e para a maior intensidade o coeficiente de escoamento superficial foi de apenas 0,15. Ainda, para uma intensidade de precipitação de 121 mm/h, o coeficiente de escoamento do solo exposto foi 4,1 vezes superior ao da superfície gramada. O escoamento superficial verificado na superfície de

concreto foi na ordem de 90% do volume precipitado. As superfícies de blocos de concreto vazados e blocos de concreto maciços foram eficientes na redução do escoamento superficial. Para os blocos de concreto vazados, o maior coeficiente apresentado foi de 0,23, já a superfície composta por blocos de concreto maciços apresentou coeficiente de 0,55 na ocorrência de precipitação com intensidade de 121 mm/h. Esses resultados ratificam a necessidade de manutenção de áreas verdes no ambiente urbano, e a importância da adoção das técnicas compensatórias para minimizar os impactos da ausência destas.

Castro *et al.* (2013) buscaram compreender o comportamento ao longo do tempo de uma instalação experimental, construída em 2003, que consistia em um estacionamento com área de 264 m<sup>2</sup>, composto por dois tipos de pavimento permeável: um revestido com asfalto poroso e o outro por blocos vazados com gramíneas. Para caracterizar uma condição mais próxima da realidade brasileira, não foram realizadas manutenções ou limpeza do revestimento superficial desde a construção do mesmo. No estudo, foram comparados os resultados obtidos em duas etapas de monitoramento: a primeira realizada no ano de 2004 e a segunda nos anos 2007, 2008 e 2009, em 17 eventos de chuva. Os resultados da comparação do comportamento deste dispositivo durante as duas etapas de monitoramento mostraram evolução distinta dos aspectos quantitativos para os dois tipos de revestimento. Para ambos os tipos de revestimento, os valores de coeficiente de escoamento superficial encontrados na segunda etapa do monitoramento foram maiores que na primeira etapa, no entanto, apenas o pavimento com revestimento de blocos vazados continuou fazendo o controle adequado do volume de escoamento superficial. O pavimento em asfalto poroso apresentou volumes de escoamento superficial 455% maiores que os obtidos na primeira etapa de monitoramento. Além disso, a partir do segundo semestre de 2008, não foi mais detectado armazenamento de água no reservatório de pedra sob este revestimento, o que indica a perda de capacidade de infiltração do asfalto poroso. Nesse sentido, os autores recomendaram fortemente a adoção de medidas de manutenção periódicas para conservar as características de porosidade do revestimento de blocos e a tentativa de restauração da capacidade de infiltração do pavimento asfáltico.

Jabur *et al.* (2015) avaliaram a capacidade de infiltração dos pavimentos permeáveis da mesma instalação experimental estudada por Castro *et al.* (2013), utilizando a Norma ASTM C1701 (ASTM, 2009) e a metodologia do infiltrômetro de anéis concêntricos. Os autores verificaram que o bloco de concreto intertravado vazado apresentou uma capacidade de infiltração superior ao pavimento composto por asfalto poroso (44,06%, quando medido pelo ASTM, e 98,35% ao utilizar os infiltrômetros de anéis concêntricos). Os valores de taxa de infiltração obtidos foram de  $8,9 \times 10^{-6}$  m/s a  $19 \times 10^{-6}$  m/s para o asfalto poroso e superiores a  $10^{-6}$

<sup>5</sup> m/s no bloco de concreto intertravado vazado. Além disso, eles verificaram que os pavimentos apresentaram colmatção ao longo do tempo, devido ao uso e a falta de manutenção, e constataram que o asfalto poroso foi o menos resistente em relação ao uso com o passar dos anos.

Coutinho *et al.* (2016) realizaram a caracterização hidráulica e avaliaram a eficiência hidrológica, do ponto de vista dos processos de infiltração, de um pavimento permeável revestido com blocos intertravados vazados preenchidos com grama. No estudo, foram realizados experimentos de infiltração com infiltrometro de anel simples de 17 cm de diâmetro em 52 pontos na superfície do pavimento de acordo com a metodologia Beerkan, onde foram retiradas amostras do material de preenchimento dos blocos para determinação da densidade, granulometria e umidade. As propriedades hidráulicas não-saturadas dos solos foram determinadas pelo método BEST, e foram utilizadas para simular a infiltração, evapotranspiração e escoamento ao longo de um ano no software Hydrus-1D. Como resultados, verificou-se que as características hidráulicas do solo variaram espacialmente dentro da área piloto e que as amostras de solo apresentaram comportamentos hidráulicos diferentes. As taxas médias de infiltração foram avaliadas em torno de 14,5 mm/min com um desvio padrão em torno de 70 mm/min. A simulação numérica mostrou o bom potencial do PP para gestão das águas pluviais, o que demonstra que o PP pode ser usado para reformar a infraestrutura de estacionamento existente e para promover o comportamento hidrológico próximo aos solos naturais.

Marinho *et al.* (2020) avaliaram a capacidade de infiltração de um pavimento permeável revestido por blocos intertravados, utilizando infiltrometro de anel simples de 100 cm de diâmetro através do método Beerkan. Foram realizados ensaios de infiltração em doze pontos do PP. Para a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos para as curvas de retenção e de condutividade hidráulica da superfície do pavimento permeável, foi aplicado o algoritmo BEST-Intercept e BEST-Slope. Observou-se moderada variabilidade da infiltração na superfície do PP, essa variação foi atribuída ao grau de compactação, que interfere na disposição das partículas e na conectividade dos poros devido às condições de uso do pavimento. Os valores da condutividade hidráulica saturada determinados pelo método BEST Intercept foram superiores aos obtidos pelo BEST Slope. Os valores da sorvidade estimados pelo BEST Slope e Intercept foram semelhantes, sendo os valores do BEST Slope ligeiramente superiores. O método Beerkan demonstrou ser adaptável para medir, em escala de campo, a infiltração tridimensional na camada de revestimento do pavimento permeável. Os resultados obtidos

demonstraram a eficiência hidráulica do PP de blocos vazados na diminuição da precipitação efetiva.

Coutinho *et al.* (2020) realizaram a caracterização hidrodinâmica e avaliaram a infiltração do revestimento e do subleito de um pavimento permeável a partir da metodologia Beerkan. Além disso, foram realizadas simulações do comportamento hidráulico do PP quando solicitado a um fluxo de escoamento superficial. Como resultados, verificou-se que o revestimento apresentou uma capacidade de infiltração maior que o subleito, e a metodologia utilizada permitiu um entendimento isolado das propriedades de cada componente e uma compreensão conjunta do funcionamento hidráulico do dispositivo.

### **3 ARTIGO 1 – SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS NA SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE ÁGUA EM UM PAVIMENTO PERMEÁVEL**

#### **Resumo**

O elevado processo de urbanização tem provocado profundas alterações nos componentes do ciclo hidrológico, ocasionando diversos problemas como inundações, degradação das águas pluviais, entre outros. As técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) provaram ser uma alternativa viável e eficaz na gestão das águas pluviais, reduzindo o escoamento superficial e aumentando a capacidade de infiltração e evapotranspiração das áreas urbanas. A previsão do funcionamento de uma técnica compensatória como um pavimento permeável depende das propriedades hidrodinâmicas das camadas do pavimento permeável, bem como das propriedades hidráulicas do subsolo. Os modelos baseados na solução numérica da equação de Richards têm sido os mais utilizados para a estimativa dos processos de transferência de água. O objetivo deste trabalho foi investigar a influência dos parâmetros hidrodinâmicos no comportamento hidráulico de um pavimento permeável instalado na cidade de Recife-PE. O efeito de 5 parâmetros hidrodinâmicos foi analisado para um pavimento permeável altamente heterogêneo. Foi utilizado o modelo Hydrus 1-D para simular os processos de transferência de água num pavimento permeável. Inicialmente foi realizada uma análise de sensibilidade do grau de refinamento da malha para simulação dos processos de transferência no pavimento permeável. O método de superfície de resposta foi aplicado para a análise de sensibilidade aos parâmetros hidrodinâmicos, em que se variou cada um dos parâmetros em -50 a +50%. As estimativas foram realizadas para as escalas de tempo diária e horária. Como resultados, observou-se que a discretização espacial não exerceu influência nos cenários das variáveis de fluxo. O uso de uma escala de tempo diária diminuiu a influência dos eventos de maior intensidade de precipitação, subestimando a geração de escoamento superficial. A lâmina escoada apresentou maior sensibilidade aos parâmetros da camada superficial, principalmente à condutividade hidráulica saturada. A infiltração e recarga acumuladas apresentaram baixa sensibilidade à variação dos parâmetros. A estimativa da lâmina armazenada no perfil foi mais sensível aos parâmetros “ $\theta_s$ ” e “ $n$ ” da camada de subleito. A utilização de dados de entrada climatológicos com diferentes resoluções temporais para a simulação dos processos de transferência de água na seção do pavimento permeável demonstrou que na resolução diária os parâmetros hidrodinâmicos apresentam maior influência que as variáveis climáticas. A utilização de dados climatológicos com resolução temporal horária demonstrou que o

escoamento superficial foi hipoteticamente controlado pelas variáveis meteorológicas. A análise de sensibilidade da malha e dos parâmetros pode influenciar pesquisas que busquem entender os processos de transferência de água em uma estrutura como um pavimento permeável através da equação de Richards, gerando um menor custo operacional e dando celeridade às simulações.

**Palavras-chave:** LID; Equação de Richards; Erros numéricos; Hydrus.

## INTRODUÇÃO

O elevado processo de urbanização tem levado ao desequilíbrio dos componentes do ciclo hidrológico. O aumento do escoamento superficial, a diminuição da evapotranspiração, da infiltração e da recarga natural dos aquíferos são as principais consequências do intenso processo de impermeabilização das superfícies (LIU *et al.*, 2019). Nesse contexto, há a ocorrência indesejada de problemas de desconforto urbano como inundações, aumento de temperatura, degradação das águas pluviais, dentre outros (OLESON *et al.*, 2015; ST-HILAIRE; DUCHESNE; ROUSSEAU, 2015). Diante disso, a gestão das águas pluviais com a utilização de tecnologias baseadas na natureza constitui um instrumento essencial no controle da precipitação efetiva em áreas urbanas, favorecendo fenômenos naturais como a infiltração e o armazenamento das águas pluviais urbanas.

Em busca de reestabelecer as condições naturais dos processos de transferência de água no meio urbano, surgiram práticas fundamentadas na infiltração e no armazenamento da água, que minimizam os impactos da urbanização, promovendo a redução do volume de escoamento superficial direto e da poluição das águas pluviais, além de favorecer a recarga quantitativa dos lençóis freáticos. Essas práticas constituem uma abordagem conhecida como Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development - LID*), que é uma abordagem verde para a gestão das águas pluviais, e têm sido cada vez mais utilizadas na drenagem urbana. Para atingir seus objetivos, as tecnologias LID dependem essencialmente da infiltração e evapotranspiração e buscam incorporar os processos naturais ao funcionamento. Essas técnicas, também denominadas técnicas compensatórias, consistem em células de biorretenção, trincheiras de infiltração, valas de infiltração, pavimentos permeáveis, telhados verdes, jardins de chuva, sistemas de captação de água, e outros (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017). Vários estudos confirmaram os benefícios quantitativos e qualitativos dos LIDs no ciclo hidrológico (COUTINHO *et al.*, 2015; MELO *et al.*, 2016; COUTINHO *et al.*, 2016). De maneira particular, os pavimentos permeáveis apresentam notável eficácia em termos de redução de

escoamento superficial, retenção e qualidade da água (KAMALI; DELKASH; TAJRISHY, 2017; BRASWELL; WINSTON; HUNT, 2018).

Os pavimentos permeáveis são usados para mitigar os efeitos adversos do escoamento de águas pluviais urbanas, como o aumento do volume do escoamento e a deterioração da qualidade da água recebida. A pavimentação permeável pode ser utilizada como alternativa às superfícies convencionais, como estradas, vias públicas, estacionamentos e calçadas (BRUNO *et al.*, 2013; JABUR *et al.*, 2015).

O conhecimento de como uma técnica compensatória como o pavimento permeável atua promovendo a infiltração, a recarga do lençol freático e a evapotranspiração depende das propriedades hidrodinâmicas dos componentes do próprio pavimento permeável, bem como das propriedades hidrodinâmicas do subsolo. Os modelos baseados na solução numérica da equação de Richards têm sido os mais utilizados para a estimativa dos processos de transferência de água no solo (COUTINHO *et al.*, 2015; BRUNETTI *et al.*, 2016; COUTINHO *et al.*, 2016). Eles se baseiam nas propriedades simultâneas de retenção e de condução da água no solo, expressos pelas curvas de retenção e pelas curvas de condutividade hidráulica, respectivamente.

Nesse sentido, a estimativa dos processos de transferência de água numa técnica de infiltração heterogênea como um pavimento permeável apresenta elevada complexidade. Essa complexidade ocorre devido a elevada não linearidade das curvas de retenção e da curva de condutividade, aliada a diversidade das camadas constituintes do pavimento permeável: revestimento, camadas de filtro feitas de areia, camada de reservatório e subleito, que possuem elevado contraste de propriedades hidráulicas, observadas principalmente na porosidade, na condutividade hidráulica e no contraste de funcionamento em condições não saturadas.

Desse modo, a análise de sensibilidade é uma alternativa fundamental para a compreensão da contribuição individual de cada parâmetro hidrodinâmico e de cada camada constituinte do pavimento nos processos hidrológicos (BRUNETTI *et al.*, 2018). Os resultados dessa análise possibilitam direcionar pesquisas para que determinado parâmetro seja estimado com maior precisão, ou fornecer aos pesquisadores o conhecimento de qual parâmetro deve ser colocado como variável de decisão em períodos de calibração dos modelos, ou quando da utilização do método inverso (SILVA URSULINO *et al.*, 2019), de modo que sejam utilizados critérios mais rigorosos para a estimativa deles, aumentando a precisão dos modelos.

Além disso, a simulação de processos hidrológicos como escoamento superficial, infiltração de água e recarga de lençol freático em técnicas compensatórias está relacionada à resolução temporal dos dados meteorológicos e às propriedades hidrodinâmicas do meio poroso, que podem interferir na precisão das estimativas.

Modelos que descrevem o escoamento de água em condições saturadas e não saturadas como o Hydrus têm sido bastante utilizados para a estimativa dos fluxos de água em técnicas compensatórias. Particularmente, o uso do modelo Hydrus em estruturas como o pavimento permeável resultou em aplicações bem-sucedidas em diversos trabalhos, como o de Coutinho *et al.* (2016) que avaliaram a influência do comportamento hidrológico de diferentes texturas encontradas como material de preenchimento em um pavimento permeável como blocos intertravados na cidade do Recife. Graciosa *et al.* (2008) realizaram uma simulação hidráulica de uma trincheira de infiltração de água de chuva utilizando o modelo BIDISUL, baseado na equação de Richards. Os autores observaram que o modelo subestimou os volumes infiltrados, atribuindo as incertezas da curva de retenção às diferenças observadas.

Brunetti *et al.* (2016) efetuaram uma análise de sensibilidade do fluxo de base em um pavimento permeável aos parâmetros da curva de retenção utilizando o modelo Hydrus 1D. Esses autores observaram que o parâmetro de forma da curva de retenção e o parâmetro de pressão de entrada de ar da camada de revestimento foram as propriedades que mais influenciaram no funcionamento hidráulico do pavimento permeável.

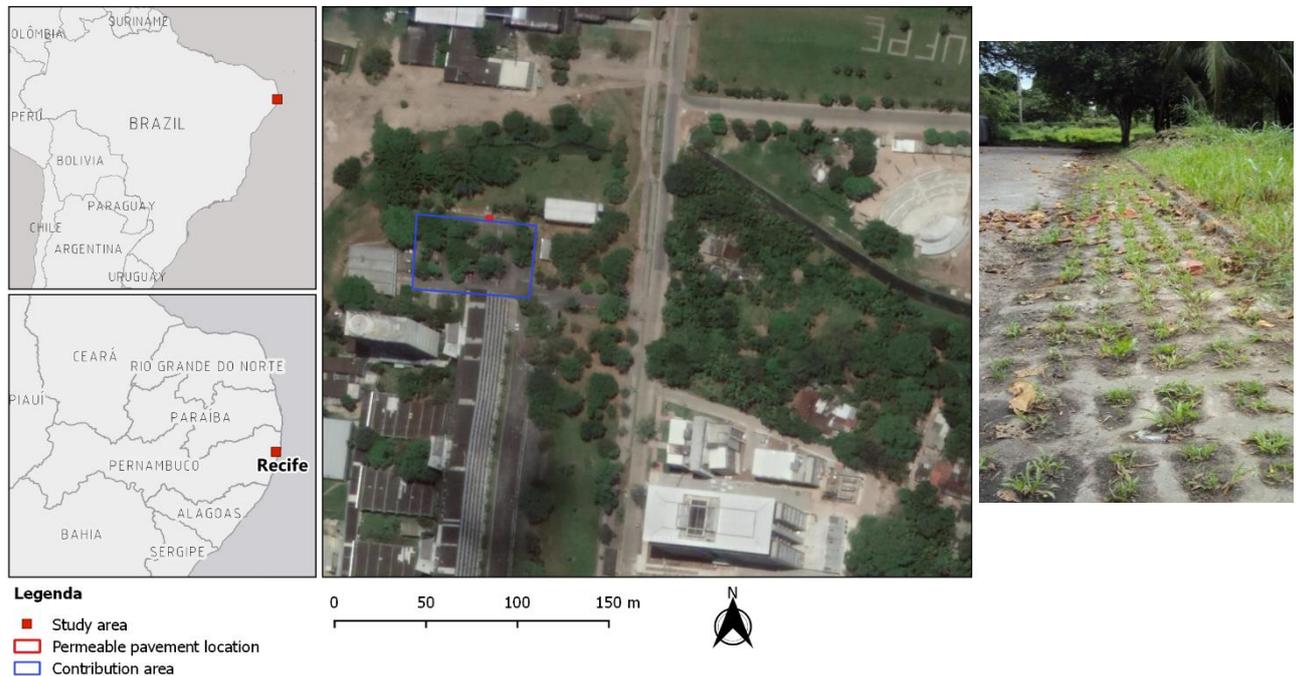
Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência das incertezas dos parâmetros hidrodinâmicos em várias camadas de um pavimento permeável nos processos de transferência de água (escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração, armazenamento de água e recarga do lençol freático) utilizando o modelo Hydrus 1D.

## METODOLOGIA

### **Descrição da área de estudo**

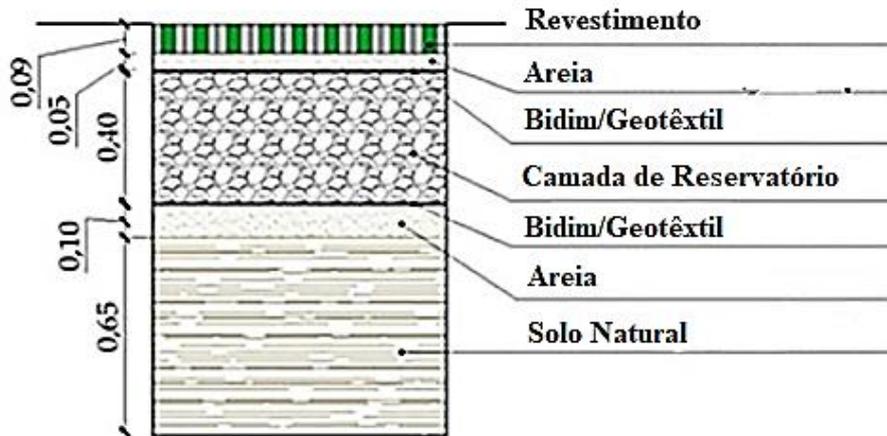
O pavimento permeável descrito neste trabalho está localizado no estacionamento do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), na cidade do Recife/PE, situado a 8°03'09.7"S e 34°57'15.7"O, com aproximadamente 4 metros acima do nível do mar (Figura 1). O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo "As" (quente e úmido), com estação chuvosa no período inverno, com maiores precipitações nos meses de março a agosto onde ocorre aproximadamente 70% do total precipitado (COUTINHO *et al.*, 2016).

Figura 1 - Localização do pavimento permeável no sítio experimental da Universidade Federal de Pernambuco.



O pavimento permeável piloto foi construído em 2009, possui uma área superficial de 4,5 m<sup>2</sup> e foi projetado para drenar uma área de estacionamento de 110 m<sup>2</sup>. O mesmo é composto por uma camada de revestimento do tipo blocos de concreto vazados preenchidos com solo e grama. Uma camada de areia que funciona como filtro. Uma camada de reservatório constituída de brita com diâmetro médio de 19 mm e porosidade 43%. A camada de brita atua armazenando temporariamente a água infiltrada. Abaixo da camada de brita foi inserida uma camada de areia, o subleito é constituído do solo urbano já existente no local e atua como o exutório natural da água armazenada. Camadas de geotêxtil de 1 cm foram dispostas entre o reservatório e as camadas de areia superior e inferior de modo a evitar o arraste de partículas finas para as demais camadas (COUTINHO, 2011). Na Figura 2 encontra-se um esquema da estrutura do pavimento permeável.

Figura 2 - Esquema da estrutura do pavimento permeável piloto (dimensões em m).



Fonte: Adaptado de Coutinho *et al.* (2016).

### Modelagem numérica unidimensional

A simulação da dinâmica da água no pavimento permeável foi realizada com o auxílio do Software HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK; VAN GENUCHTEN, 2008). O Hydrus1-D é um programa computacional que simula a dinâmica da água, o transporte de calor e de solutos em solos saturados e não saturados, cultivados ou não, por meio da solução da equação de Richards (1931) (Equação 1), utilizando elementos finitos.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (1)$$

Na qual  $h$  é o potencial matricial da água no solo [L];  $\theta$  é a umidade volumétrica da água [ $L^3 L^{-3}$ ];  $t$  é o tempo [T];  $x$  é a coordenada espacial [L];  $S$  é um termo de sumidouro [ $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ];  $\alpha$  é o ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical, ou seja,  $\alpha = 0^\circ$  para fluxo vertical,  $90^\circ$  para fluxo horizontal e  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  para fluxo inclinado.

As propriedades hidráulicas de um solo não saturado,  $\theta(h)$  e  $K(h)$ , são, de maneira geral, funções não lineares do potencial matricial ou da umidade volumétrica. Nestas simulações,  $\theta(h)$  e  $K(h)$  foram descritas pelo modelo de van Genuchten (1980) com a hipótese de distribuição dos poros de Mualem (1976). As equações são dadas em (2), (3), (4) e (5), em que  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são as umidades volumétricas residual e saturada [ $L^3 L^{-3}$ ],  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada [ $LT^{-1}$ ],  $n$  é um parâmetro de distribuição do tamanho dos poros [-],  $\alpha$  é um parâmetro relacionado ao inverso da pressão de entrada de ar [ $L^{-1}$ ],  $l$  indica a tortuosidade e geralmente é assumido como sendo 0,5 para muitos solos, e  $S_e$  é o grau de saturação efetivo.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 - (\alpha|h|)^n]^m} & \text{if } h \leq 0 \\ \theta_s & \text{if } h > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 & \text{if } h \leq 0 \\ K_s & \text{if } h > 0 \end{cases} \quad (5)$$

A caracterização hidráulica do solo que compõe a camada de revestimento do pavimento foi realizada por Coutinho *et al.* (2016) por meio do método Beerkan (BRAUD *et al.*, 2005; LASSABATÈRE *et al.*, 2006) utilizando o algoritmo BEST, em que foi constatada a presença de quatro tipos principais de solos: silte, silte arenoso, areia siltosa e areia. Nesse estudo, considerou-se a fração de areia. Uma vez que o BEST se baseia no uso da relação de van Genuchten (1980) para a curva de retenção de água com a condição de Burdine (1953), utilizou-se o RETention Curve code (RETC) (VAN GENUCHTEN *et al.*, 1991) para obtenção dos parâmetros da curva de retenção, considerando-se a hipótese de Mualem (1976). As propriedades hidrodinâmicas da camada de subleito foram estimadas no Hydrus utilizando o software Rosetta por Coutinho (2011), a partir de dados de análises granulométricas realizadas no mesmo. Para as camadas de areia, foram utilizadas as propriedades disponibilizadas no catálogo do Hydrus, o qual é baseado em valores relatados por Carsel e Parrish (1988). Com relação à camada de reservatório, o software Hydrus-1D não apresenta a possibilidade da utilização de brita, cascalho ou qualquer outro material com diâmetro das partículas superior ao de uma areia grossa. Para suprir essa deficiência, foi utilizada no programa uma camada de areia com porosidade igual à da brita utilizada no experimento. Os parâmetros hidrodinâmicos utilizados para cada camada estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros hidrodinâmicos das camadas do pavimento permeável.

Camada	$\theta_r$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	$\theta_s$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	$\alpha$ [1/cm]	$n$ [-]	$K_s$ [cm/dia]
1 – Revestimento	0,008	0,510	0,111	1,748	138,000
2 – Areia	0,045	0,430	0,145	2,680	712,800
3 – Reservatório	0,045	0,430	0,145	2,680	712,800
4 – Areia	0,045	0,430	0,145	2,680	712,800
5 – Subleito	0,054	0,531	0,030	1,424	239,200

Fonte: Coutinho (2011), Coutinho *et al.* (2016).

O domínio numérico representando a estrutura do pavimento permeável foi dividido em 5 camadas, as quais são as camadas constituintes do pavimento, considerando-se o subleito com 3 metros de profundidade (Figura 3). Como condições de contorno de fluxo de água, para o limite superior estabeleceu-se condições atmosféricas, considerando que o pavimento permeável é solicitado pela precipitação pluviométrica e evapotranspiração, e para o limite inferior do perfil considerou-se a condição de drenagem livre. As simulações foram realizadas com dados meteorológicos diários e horários para um período de um ano para investigar efeitos da escala temporal na estimativa das variáveis de saída. A discretização do tempo foi projetada para facilitar a convergência numérica e cálculo, com um passo de tempo inicial de  $10^{-5}$  horas, mínimo de  $10^{-8}$  horas, e um passo de tempo máximo não excedendo 0,01 horas, para os dados na resolução horária. Para os dados na resolução diária, o passo de tempo inicial foi de  $4,17 \times 10^{-7}$  dias, com um mínimo de  $4,17 \times 10^{-10}$  dias e um máximo não excedendo  $4,17 \times 10^{-4}$  dias. Os dados meteorológicos foram baixados do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020), considerando o período de julho/2019 a julho/2020 da estação A301. Os dados incluíram precipitação horária (mm), temperaturas máximas e mínimas ( $^{\circ}\text{C}$ ), velocidade do vento ( $\text{km h}^{-1}$ ) a 200 cm acima da superfície terrestre, umidade do ar (%) e radiação solar. A evapotranspiração de referência foi calculada utilizando a equação de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998).

Para um evento de chuva, considera-se que os fluxos contribuintes do estacionamento são direcionados para o pavimento permeável. Assim, os fluxos impostos ao pavimento podem ser derivados da consideração do balanço de massa da seguinte forma:

$$i_{pp} = P \left( 1 + \frac{A_{\text{park}} C}{A_{pp}} \right) \quad (6)$$

Em que  $i_{pp}$  é o fluxo imposto ao pavimento permeável (mm/h),  $P$  é a intensidade de chuva no intervalo de tempo (mm/h),  $A_{\text{park}}$  é a área do estacionamento ( $110 \text{ m}^2$ ),  $C$  é o coeficiente de escoamento do estacionamento, considerado 0,85,  $A_{pp}$  é a área do pavimento permeável ( $4,5 \text{ m}^2$ ). As séries de precipitação, evapotranspiração potencial e fluxos acumulados na escala horária estão apresentadas na Figura 4.

Figura 3 - Domínio numérico e condições de contorno representativos da estrutura do pavimento permeável no Hydrus 1D.

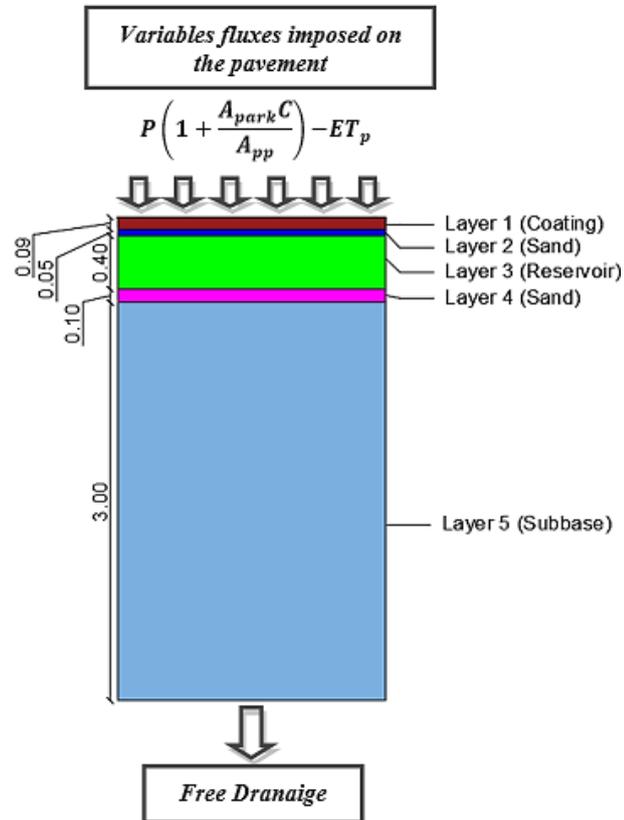
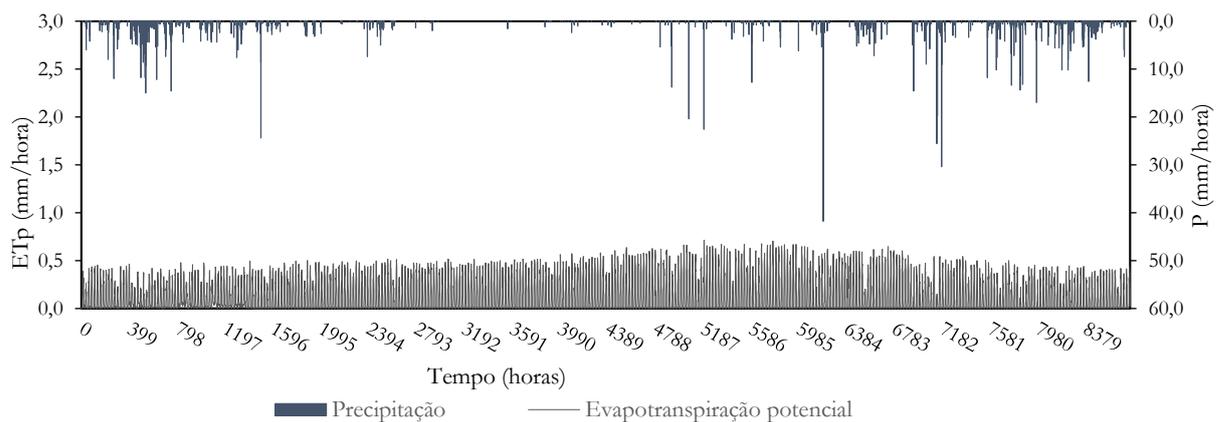
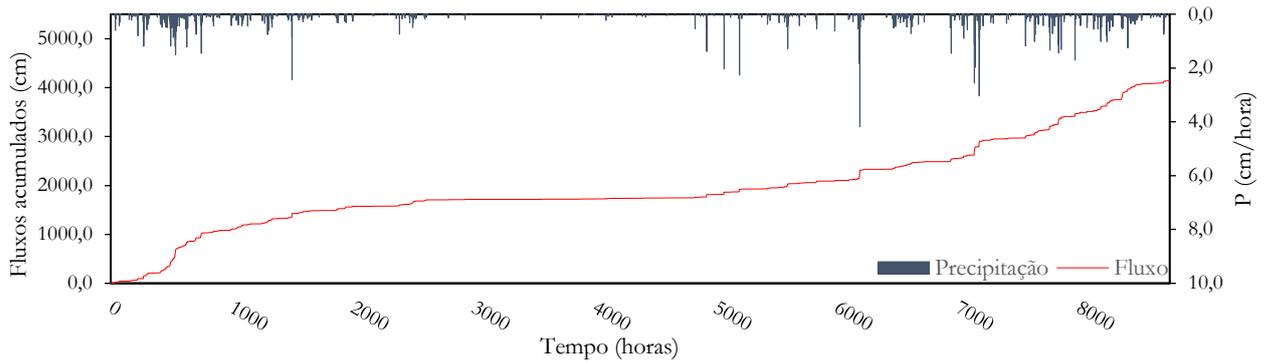


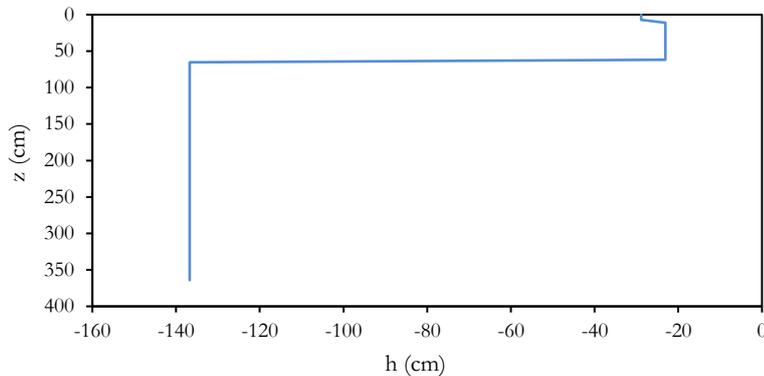
Figura 4 - (a) Séries de precipitação pluviométrica e evapotranspiração potencial e (b) Fluxos impostos ao pavimento permeável utilizadas nas simulações.





As condições iniciais foram especificadas em termos da pressão da água no solo. Para cada camada foi adotada uma condição inicial igual a sua capacidade de campo (Figura 5).

Figura 5 - Condição inicial de potencial matricial da água no solo.



### Análise de sensibilidade ao refinamento da malha

Diversos estudos demonstraram que os modelos mecanísticos podem fornecer uma descrição rigorosa dos processos de transferência de água em técnicas compensatórias. No entanto, para aumentar a confiabilidade do modelo e sua capacidade de descrever os processos do mundo real é necessário a realização de simulações de calibração do modelo, análise de sensibilidade e quantificação de incerteza, o que requer a execução do modelo centenas ou milhares de vezes, exigindo um alto custo computacional (BRUNETTI *et al.*, 2017).

Em busca de reduzir o custo computacional nestas simulações, uma análise de sensibilidade da malha do perfil foi realizada para verificar os efeitos do refinamento da mesma na estimativa dos fluxos no pavimento. Portanto, foram analisadas malhas de 101, 201, 301, 401, 501 e 601 nós uniformemente distribuídas em todo o domínio numérico, e sua influência na estimativa da recarga do lençol freático acumulada, lâmina escoada acumulada, lâmina

média armazenada, evapotranspiração real acumulada e lâmina infiltrada acumulada. Para tanto, foram realizadas simulações com as respectivas malhas, e comparadas as variáveis acumuladas estimadas por cada simulação, visando identificar se havia discrepância nas soluções numéricas para a malha mais refinada (601 nós). Na ausência de diferenças significativas, a malha menos refinada é utilizada para dar celeridade às simulações.

### **Análise de sensibilidade aos parâmetros hidrodinâmicos**

A análise de sensibilidade aos parâmetros hidrodinâmicos foi realizada utilizando-se o método de superfície de resposta, em que várias simulações são realizadas com a modificação de um único parâmetro por vez, enquanto os demais são mantidos fixos (ALVES *et al.*, 2012; GABIRI *et al.*, 2018). Investigou-se a influência do inverso do comprimento capilar ( $\alpha$ ), do parâmetro de distribuição do tamanho dos poros ( $n$ ), da condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), da umidade volumétrica à saturação ( $\theta_s$ ) e da umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ) às mesmas variáveis de fluxo avaliadas na sensibilidade da malha. Variou-se cada um dos parâmetros em -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40 e +50 em percentual a partir dos valores definidos na Tabela 1. Uma vez que o parâmetro “n” não assume valores inferiores à um, não foi possível utilizar todas as variações para este nas camadas de revestimento e do subleito, sendo as menores variações aplicadas de -40 e -20% para estas camadas, respectivamente.

A sensibilidade do modelo foi quantificada por meio da sensibilidade relativa. Segundo McCuen e Snyder (1986), a sensibilidade relativa ( $S_r$ ) é definida como a razão entre a taxa de variação da resposta do modelo ( $\Delta O$ ) a uma pequena variação na entrada ( $\Delta F$ ), normalizadas pelos valores iniciais da saída ( $O_0$ ) e da entrada ( $F_0$ ), respectivamente (Equação 7).

$$S_r = \frac{\Delta O/O_0}{\Delta F/F_0} \quad (7)$$

De acordo com Chaves (1991), o modelo apresenta alta sensibilidade ao parâmetro quando  $|S_r| > 1,5$ ; sensibilidade intermediária para  $0,5 < |S_r| < 1,5$ ; e baixa sensibilidade se  $|S_r| < 0,5$ . Valores próximos a zero indicam que o modelo é relativamente insensível ao parâmetro (MCCUEN; SNYDER, 1986). A análise de sensibilidade foi realizada para as resoluções temporais horária e diária.

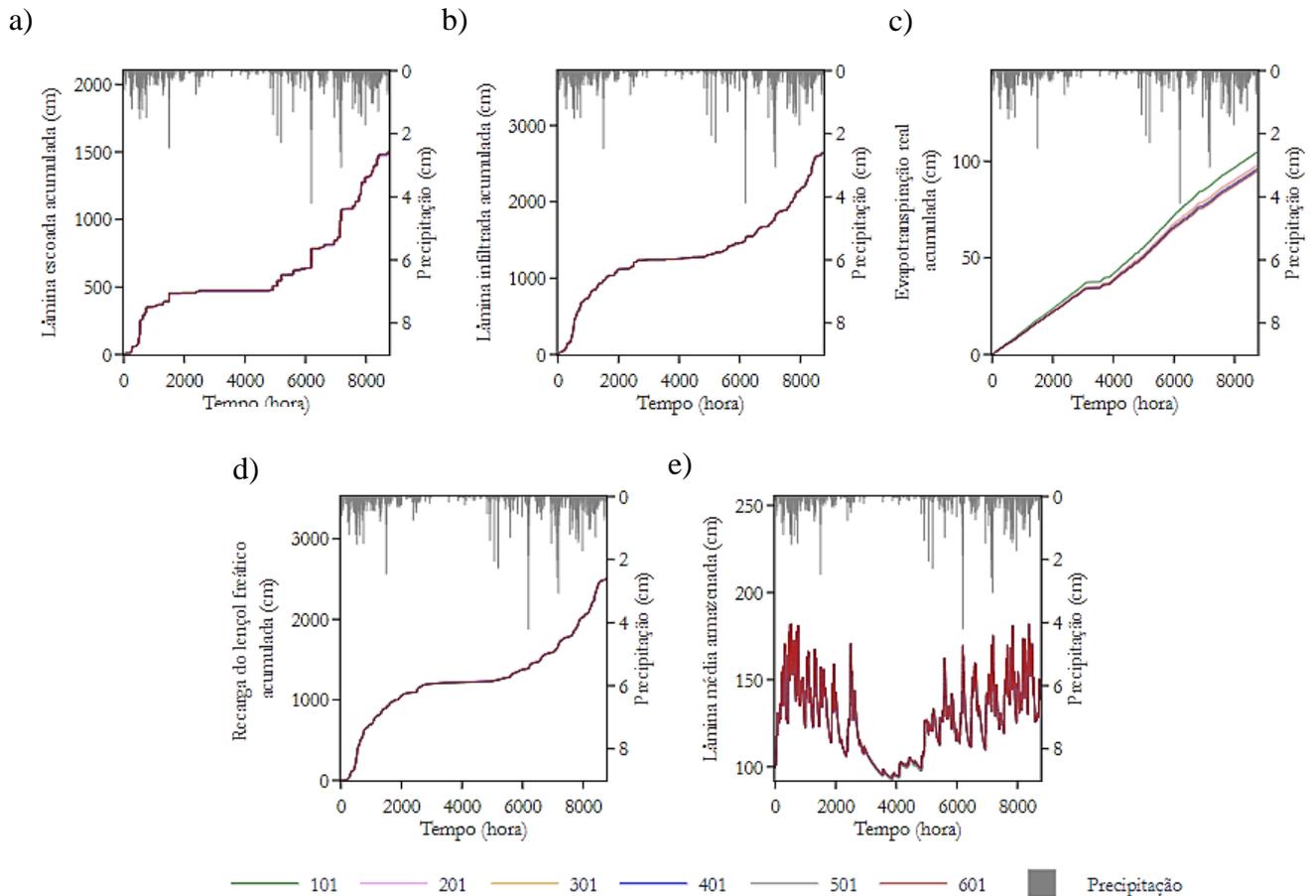
## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Sensibilidade ao refinamento da malha**

A análise de sensibilidade da malha é de fundamental importância para definir o grau de refinamento necessário a ser utilizado nas simulações, de modo que se possa fornecer cenários precisos do comportamento hidráulico-hidrológico do solo, e, desta forma, obter resultados representativos. A importância desta análise está na possibilidade de dar celeridade às simulações optando-se pela malha menos refinada, caso não seja observada influência significativa da variação da malha nas variáveis estudadas. Na Figura 6 está apresentada a sensibilidade de cada variável de saída ao número de nós (101, 201, 301, 401, 501 e 601) utilizado no perfil com dados de entrada horários. Observa-se que um refinamento da malha através do aumento da sua densidade não provocou alterações na dinâmica da lâmina escoada, da lâmina infiltrada, da recarga do lençol freático e da lâmina d'água média armazenada no solo. A evapotranspiração real apresentou alterações, no entanto, a diferença é desprezível (menos de 10% em comparação a malha mais refinada). De maneira geral, o comportamento das variáveis se mostrou independente do grau de discretização espacial. Embora não sejam apresentados os resultados da análise de sensibilidade da malha na resolução diária, nesta resolução também houve uma convergência nas variáveis estimadas.

A ausência de diferenças nas dinâmicas das variáveis de fluxo permite efetuar as simulações com a malha menos densa (101 nós), uma vez que o aumento na densidade da malha não apresentou ganhos significativos de precisão na estimativa das variáveis.

Figura 6 - Sensibilidade da malha para as variáveis: a) Lâmina escoada acumulada; b) Lâmina infiltrada acumulada; c) Evapotranspiração real acumulada; d) Recarga do lençol freático acumulada e e) Lâmina média armazenada.



### Simulação horária versus diária para as variáveis hidrológicas

Na Figura 7 estão apresentadas as curvas para escoamento superficial acumulado, infiltração acumulada, evapotranspiração real acumulada, recarga do lençol freático acumulada e armazenamento médio de água obtido com simulações em resoluções horárias e diárias. Em geral, observa-se que o uso de dados meteorológicos em resolução diária em detrimento de uma série horária promove uma subestimativa do escoamento superficial (Figura 7a), uma superestimativa da infiltração acumulada (Figura 7b) e consequentemente maior armazenamento de água na estrutura (Figura 7e) e uma maior recarga do lençol freático a longo prazo (Figura 7d).

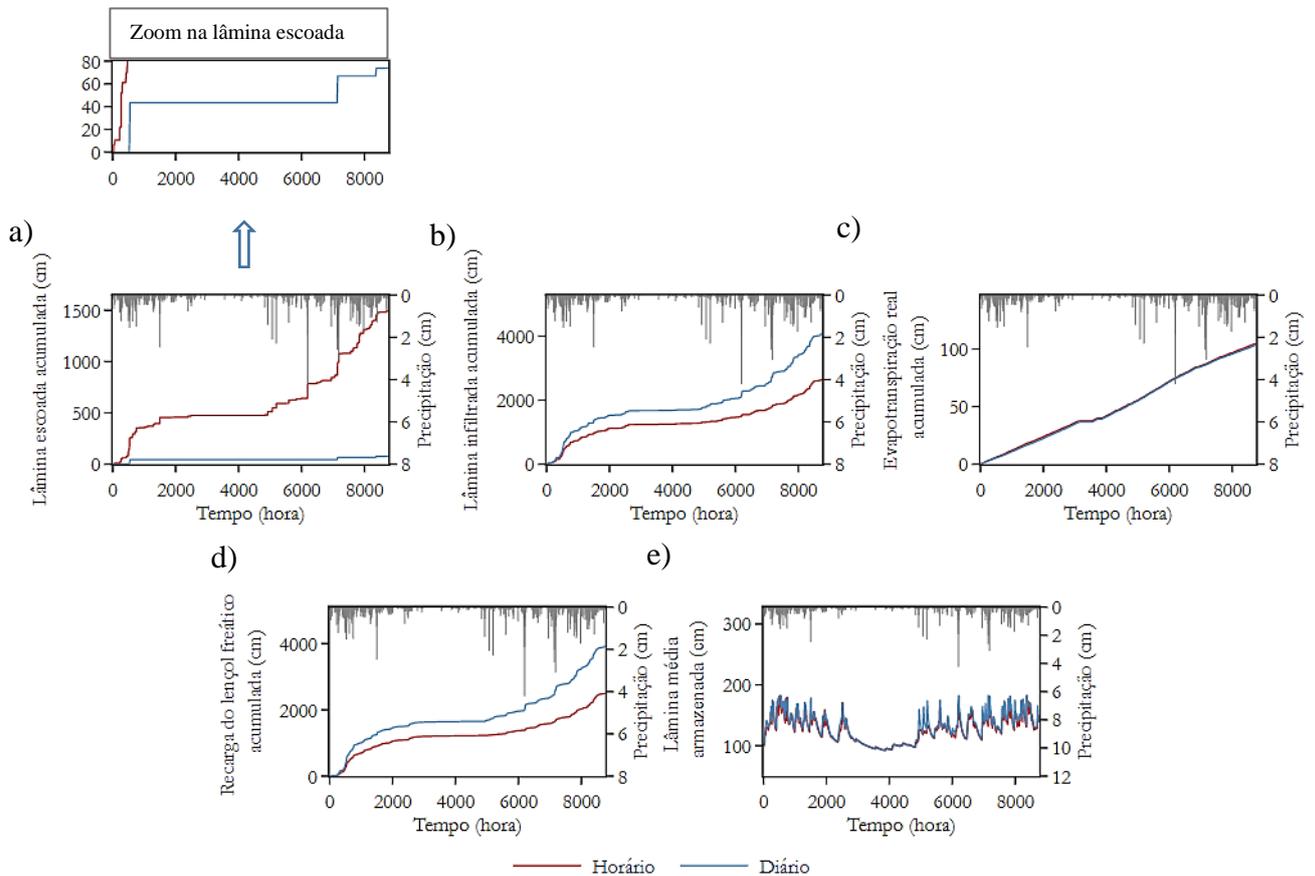
O escoamento superficial estimado na resolução diária apresentou valores inferiores aos apresentados para a resolução horária durante todo o tempo. A diferença entre o escoamento superficial acumulado final para as simulações diárias e horárias é de 1425 cm. Nesse contexto,

o coeficiente de escoamento médio no pavimento permeável resultante da simulação na escala diária é de aproximadamente zero. Porém, na escala horária, o coeficiente resultante é de 0,36, o que implica em valores mais próximos aos relatados na literatura. Bruno *et al.* (2013) obtiveram um coeficiente de escoamento superficial de 0,23 para uma intensidade de chuva de 121 mm/h em um pavimento permeável revestido com blocos intertravados. Para este trabalho, observa-se que para um evento com intensidade de 41,8 mm/h, o coeficiente de escoamento estimado é de 0,83. Esses resultados estão de acordo com os observados por Tarqui *et al.* (2019), que obtiveram coeficiente de escoamento superficial de 0,79 para uma intensidade de chuva de 21,9 mm/h em um pavimento com blocos intertravados na cidade de Salvador/Bahia. Este resultado demonstra que os mecanismos de geração do escoamento superficial podem ser melhor compreendidos a partir de maiores detalhes na escala de tempo.

O uso de uma resolução de tempo diária reduz a influência de eventos com maior intensidade de precipitação, subestimando a geração de escoamento superficial. Observa-se também que há uma antecipação dos processos de início do fluxo e uma maior duração do fluxo na escala horária quando comparada à diária. Além disso, nota-se que o processo de geração do escoamento superficial é controlado pela intensidade da precipitação quando dados horários são utilizados. Ao utilizar dados diários, a hipótese é que o processo de geração do escoamento superficial está sendo controlado pelas propriedades hidrodinâmicas, principalmente pela condutividade hidráulica em função da umidade do solo.

Para Mertens, Raes & Feyen (2002), ao usar registros diários de chuva como entrada em um modelo de fluxo de água no solo, nenhuma informação sobre a intensidade da chuva está disponível e o modelo não será capaz de simular o escoamento superficial porque distribuirá a quantidade de chuva ao longo das 24 horas do dia. Liu & Chui (2017) afirmam que a intensidade da chuva geralmente desempenhou um papel mais dominante na geração de escoamento do que o volume da chuva. Os autores observaram correlações diretas entre o pico de escoamento e o tempo até o início do escoamento. No entanto, para Hou *et al.* (2008), outros fatores como a geometria e composição da sub-base podem influenciar na geração de escoamento superficial em pavimentos permeáveis.

Figura 7 - Simulação horária versus diária para as variáveis: a) Lâmina escoada acumulada; b) Lâmina infiltrada acumulada; c) Evapotranspiração real acumulada; d) Recarga do lençol freático acumulada e e) Lâmina média armazenada.



### Sensibilidade aos parâmetros hidrodinâmicos

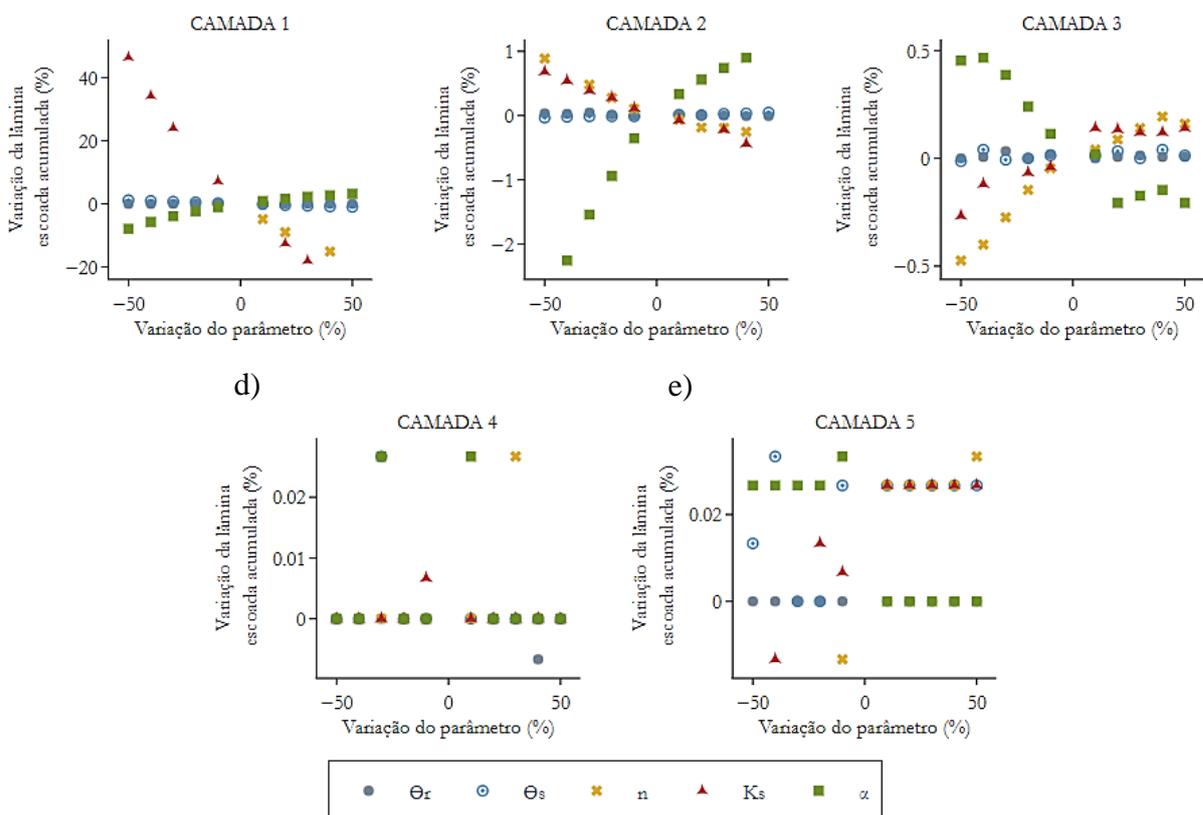
Nas Figuras 8, 9, 10, 11 e 12 são apresentadas as dinâmicas de variação das variáveis: lâmina escoada acumulada, lâmina infiltrada acumulada, evapotranspiração real acumulada, lâmina d'água média armazenada e recarga do lençol freático acumulada, respectivamente, quando submetidas às variações dos parâmetros hidrodinâmicos. Valores ausentes indicam combinações de parâmetros em que o modelo não convergiu.

A lâmina escoada apresentou maior sensibilidade aos parâmetros da camada 1, sendo a condutividade hidráulica saturada a propriedade hidrodinâmica que mais influenciou na partição da precipitação pluviométrica em lâmina escoada e lâmina infiltrada, gerando um acréscimo de até 46% na lâmina simulada ao se reduzir em 50% a  $K_s$ . De modo geral, observa-se uma relação aproximadamente linear entre  $K_s$  e a lâmina escoada (Figura 8a). O escoamento superficial é gerado quando a capacidade de infiltração do solo é excedida. Resultado semelhante foi obtido por Köhne *et al.* (2011), que também observaram grande sensibilidade de  $K_s$  na simulação do escoamento superficial e dos processos de distribuição de água no solo

usando Hydrus-2D. Além disso, observa-se que os parâmetros “n” e “ $\alpha$ ” também apresentaram influência, porém, as diferenças observadas nas lâminas escoadas estimadas foram de no máximo 15%.

Para as camadas 2, 3, 4 e 5, nota-se que a ordem de grandeza da influência das propriedades hidrodinâmicas diminui à medida que a camada se afasta da superfície. Esse resultado era esperado, uma vez que o escoamento superficial é controlado principalmente pelas propriedades hidrodinâmicas da superfície, principalmente pela condutividade hidráulica saturada.

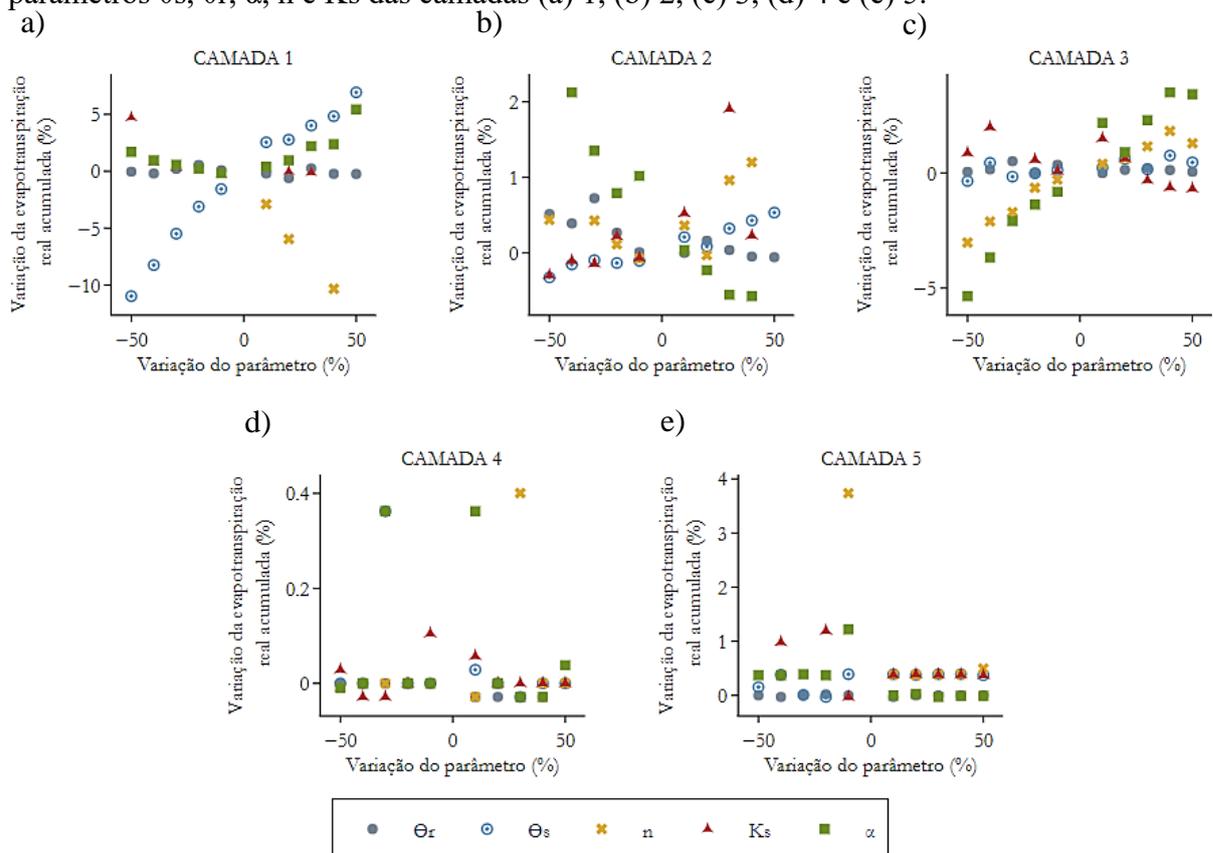
Figura 8 - Sensibilidade do escoamento superficial quando submetido a variações nos parâmetros  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , n e  $K_s$  das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5.



Em relação às demais variáveis, a evapotranspiração real apresentou baixa sensibilidade à variação dos parâmetros. Como esperado, os parâmetros hidrodinâmicos da camada de revestimento tiveram a influência mais significativa sobre esta variável. Uma redução de 50% no valor de referência da umidade à saturação do solo da camada de revestimento causou uma subestimativa de quase 11% na evapotranspiração estimada pelo modelo. Portanto, este foi o parâmetro mais influente. Este resultado se deve ao fato da umidade à saturação do solo influenciar na quantidade de água disponível para evapotranspiração na camada 1. O parâmetro

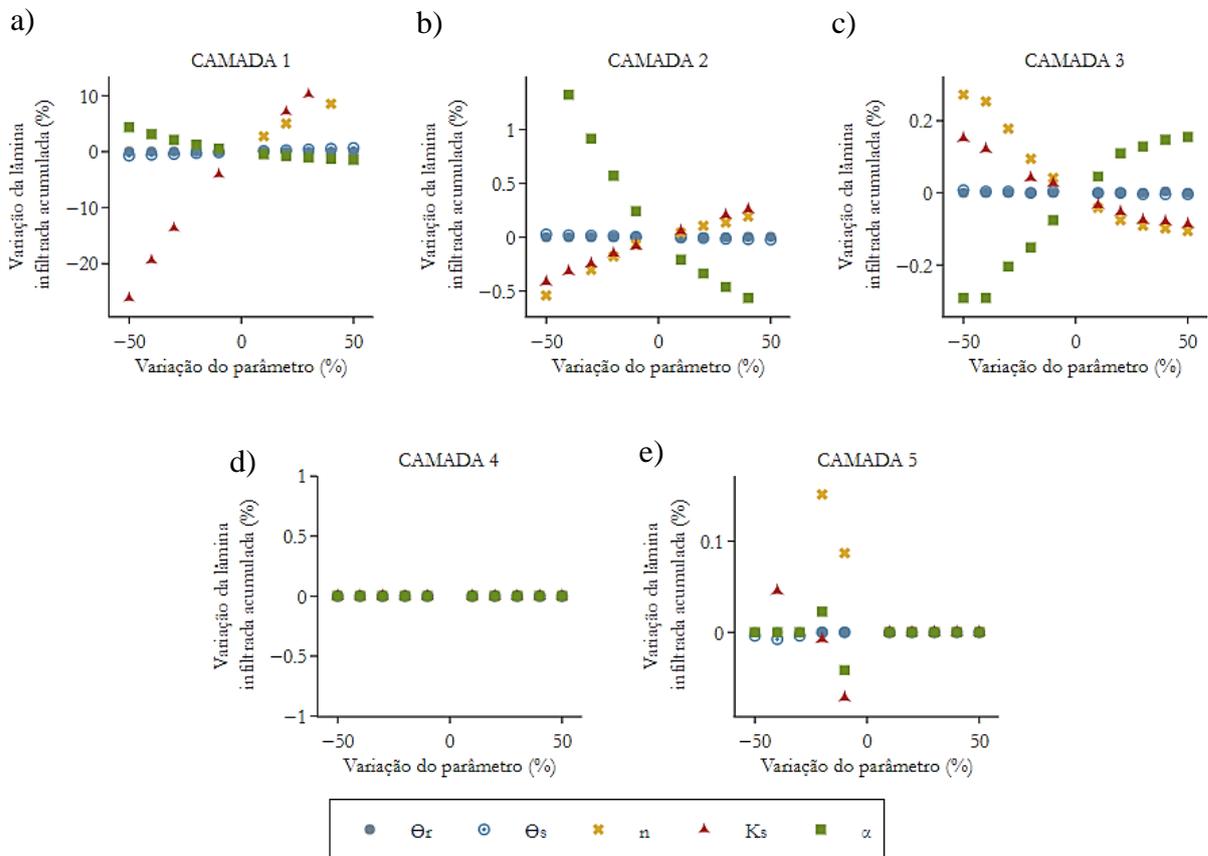
“n” foi o segundo mais sensível, causando uma subestimativa de pouco mais de 10% quando o parâmetro de referência da camada 1 foi aumentado em 40%. Além disso, o parâmetro “ $\alpha$ ” alterou a evapotranspiração estimada em até 5,4% (Figura 9a). Semelhante ao que foi observado para o escoamento superficial, existe uma baixa influência da variação nas propriedades das demais camadas no processo de evapotranspiração.

Figura 9 - Sensibilidade da evapotranspiração real acumulada quando sujeita a variações nos parâmetros  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , n e  $K_s$  das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5.



A água da chuva infiltra no pavimento permeável a uma taxa igual à intensidade da precipitação pluviométrica até que a capacidade de infiltração do solo seja atingida. Conforme mostrado na Figura 10, a infiltração acumulada é insensível à variação de quase todos os parâmetros, exceto aos parâmetros “ $K_s$ ”, “n” e “ $\alpha$ ” da camada de revestimento. De modo geral, um aumento de 30% na condutividade hidráulica saturada provoca um acréscimo de cerca de 10% na lâmina infiltrada acumulada. Além disso, um aumento de 40% no parâmetro de forma “n” também contribui para um aumento de 10% na infiltração acumulada estimada.

Figura 10 - Sensibilidade da lâmina infiltrada acumulada quando sujeita a variações nos parâmetros  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $n$  e  $K_s$  das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5.

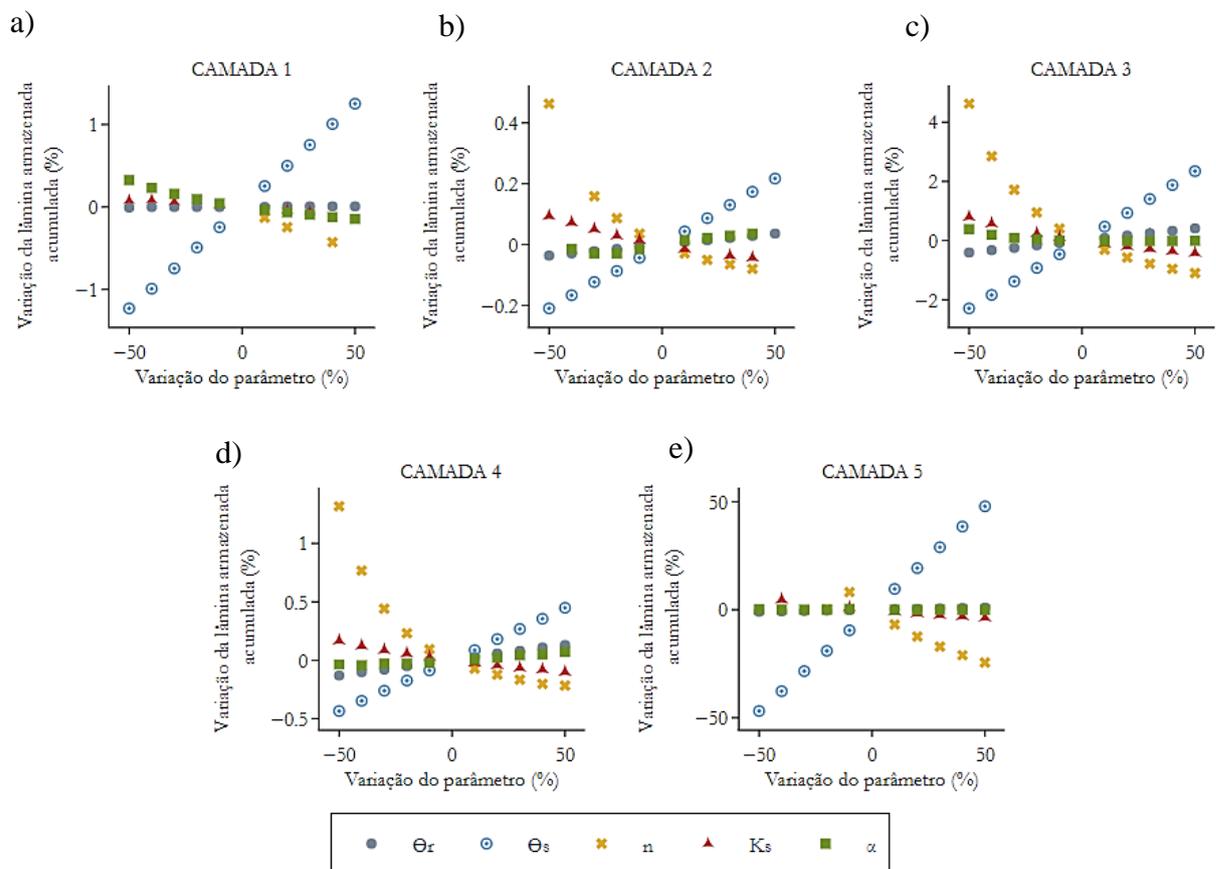


A lâmina média de água armazenada no perfil do pavimento permeável apresentou maior sensibilidade aos parâmetros da última camada do pavimento, particularmente à umidade volumétrica a saturação e ao parâmetro de forma “n”. Variações na condutividade hidráulica saturada, umidade residual do solo e no parâmetro de normalização ( $\alpha$ ) causaram pequenas alterações no resultado da simulação. Além disso, variações nos parâmetros das camadas de areia 2 e 4 tiveram pouca influência na variação da variável de saída, sendo menos de 1,5% para todos os casos (Figura 11b, d). A influência dos parâmetros hidrodinâmicos das camadas 1 e 3 no processo de armazenamento de água também é insignificante.

A umidade à saturação do solo da camada do subleito apresentou a maior influência na estimativa do armazenamento médio de água, interagindo de forma linear e diretamente proporcional. Esses resultados eram esperados, uma vez que a profundidade da água armazenada é proporcional à espessura da camada. Como a camada 5 é predominante na seção simulada, mudanças na umidade à saturação do solo acabam governando o armazenamento médio de água da seção.

Além disso, observa-se que para todas as camadas a variação de “n” está inversamente relacionada à variação do armazenamento médio de água, o que é natural, porque altos valores de “n” indicam que a dessaturação ocorre mais rápido. Conseqüentemente, quanto menor for o valor “n”, maior será a estimativa do teor de água cumulativo.

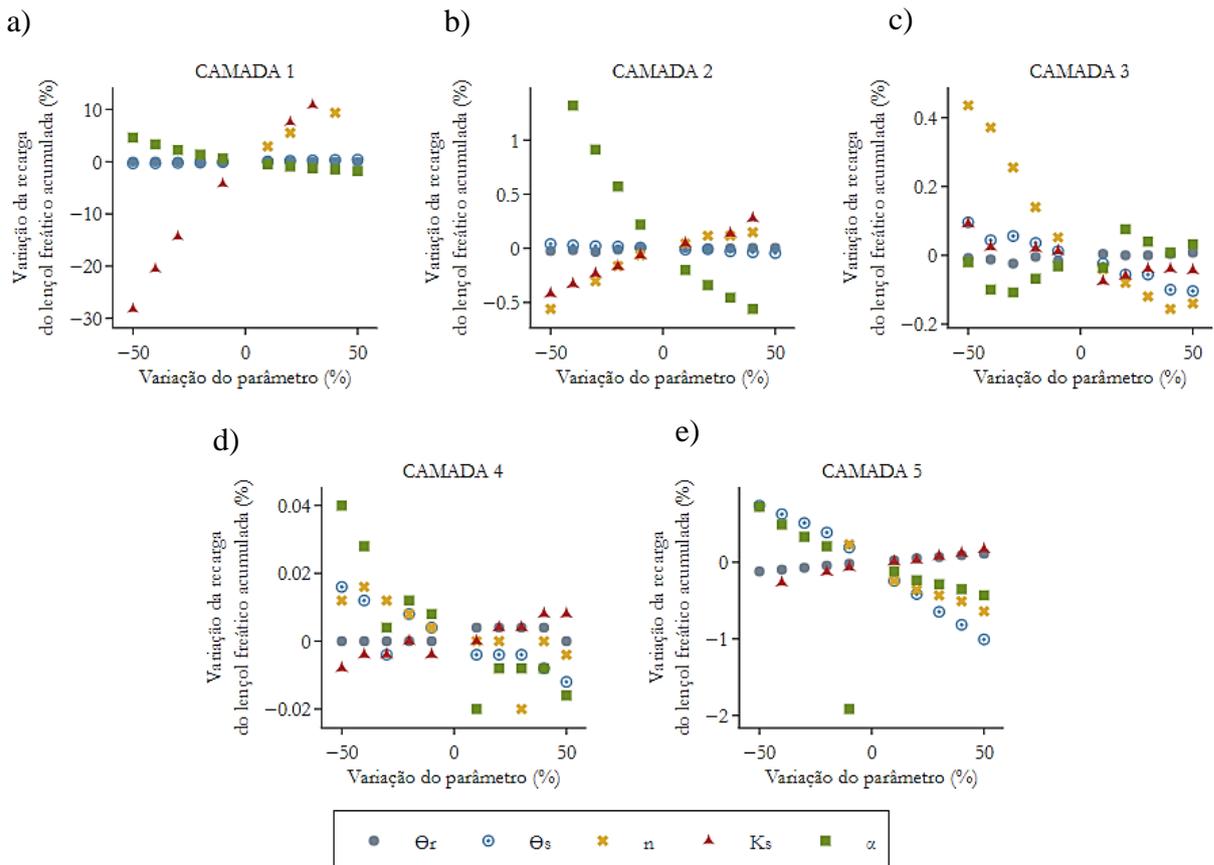
Figura 11 - Sensibilidade da lâmina armazenada acumulada quando submetida a variação nos parâmetros  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , n e  $K_s$  das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5.



A recarga do lençol freático acumulada apresenta relações diretas com a condutividade hidráulica saturada e o parâmetro de forma “n” da primeira camada, com “ $K_s$ ” sendo o parâmetro mais influente. O valor de recarga foi subestimado em quase 30%, ao se reduzir “ $K_s$ ” em 50%. Para privilegiar o processo de infiltração, é necessário que os materiais possuam alta condutividade hidráulica saturada e elevada sorvidade (BOURAFÁ *et al.*, 2019). Tal fato reforça a necessidade de ações de manutenção da camada superficial dos pavimentos permeáveis para que possam manter níveis satisfatórios de infiltração, facilitando a diminuição da lâmina escoada e redistribuição da água nas camadas mais profundas, promovendo a recarga

artificial dos aquíferos. Embora participem dos processos de redistribuição de água, variações nos parâmetros das demais camadas causam alterações quase desprezíveis, tendo um valor máximo de 1,9% (Figura 12b, c, d e e).

Figura 12 - Sensibilidade da recarga do lençol freático acumulada quando submetida a variações nos parâmetros  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $n$  e  $K_s$  das camadas (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5.



Os valores de sensibilidade relativa absolutos médios do modelo Hydrus-1D a cada um dos parâmetros nas escalas temporais horária e diária são apresentados na Figura 13. Considerando o efeito em todas as variáveis de saída, em média, o parâmetro mais influente é “ $K_{s1}$ ” para ambas as resoluções temporais. Particularmente, a sensibilidade do escoamento superficial à condutividade hidráulica saturada na escala de tempo diária foi aproximadamente oito vezes maior do que na escala de tempo horária (6,018 para a diária; 0,755 para a horária). Além disso, o escoamento superficial também apresentou alta sensibilidade aos parâmetros de forma da camada de revestimento na resolução diária (4,018 para “ $n_1$ ” e 0,734 para “ $\alpha_1$ ”). Isso nos permite lançar a hipótese que os parâmetros hidrodinâmicos têm uma influência maior do que as variáveis meteorológicas na resolução diária. Por outro lado, um aumento na resolução

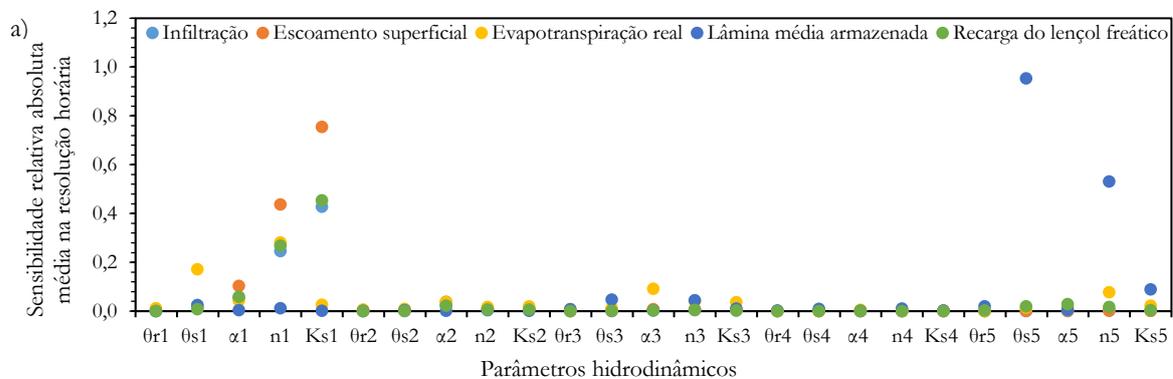
temporal faz com que o escoamento superficial seja hipoteticamente controlado pelas variáveis meteorológicas.

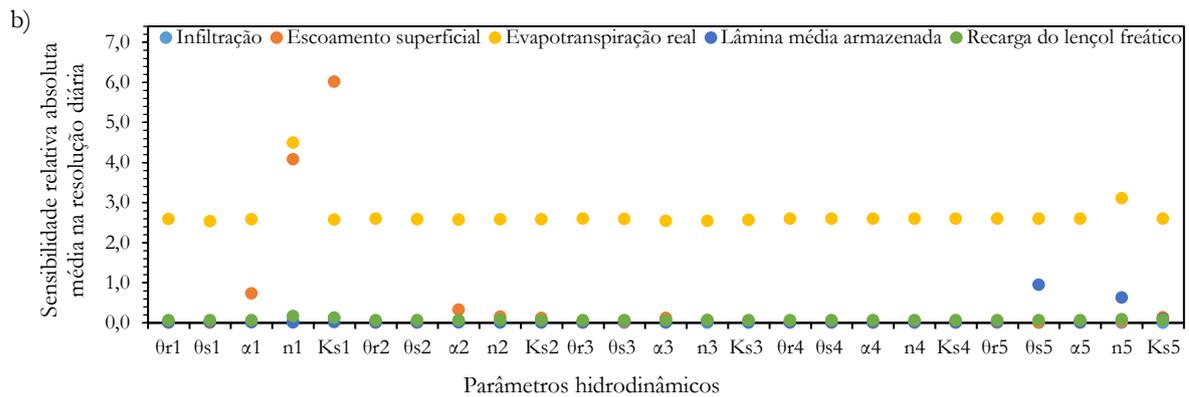
A evapotranspiração é sensível à maioria dos parâmetros analisados. Os índices de sensibilidade relativa das demais variáveis de saída aos parâmetros das camadas 2, 3 e 4 foram baixos ou nulos. Isso mostra a baixa influência dessas camadas nos processos de transferência de água no pavimento permeável.

De acordo com a classificação apresentada em Chaves (1991), o modelo apresenta baixa sensibilidade ou é insensível a todos os parâmetros analisados na estimativa da infiltração e recarga da água subterrânea. Dessa maneira, uma determinação experimental destes não aumentaria significativamente a precisão do ajuste, podendo ser fixado em qualquer valor viável no espaço de parâmetros sem afetar a qualidade dos resultados obtidos nas simulações.

Para o armazenamento médio de água, o modelo tem sensibilidade intermediária aos parâmetros “ $\theta_s$ ” e “ $n$ ” da camada de subleito e apresenta baixa sensibilidade ou é insensível aos demais parâmetros. Este comportamento é intuitivo, uma vez que o parâmetro “ $n$ ” também define a forma da função van Genuchten-Mualem e, portanto, sua influência nas propriedades de retenção do material é significativa. Na estimativa da evapotranspiração real, o modelo apresenta baixa sensibilidade a todos os parâmetros hidrodinâmicos na resolução horária e alta sensibilidade na resolução diária. De modo geral, os resultados da modelagem são mais sensíveis aos parâmetros da camada de revestimento, que influenciam fortemente a variação da saída.

Figura 13 - Sensibilidade relativa média das variáveis de saída aos parâmetros hidrodinâmicos nas resoluções temporais (a) horária e (b) diária. Os índices subscritos se referem a cada camada do pavimento permeável.





Brunetti *et al.* (2018), ao analisarem a sensibilidade do fluxo de base simulado pelo modelo Hydrus-1D em um pavimento permeável, identificaram que os parâmetros de forma “ $\alpha$ ” das camadas constituintes do pavimento apresentaram as maiores influências na saída estimada pelo modelo. Verificou-se, ainda, que as condutividades hidráulicas saturadas das camadas de revestimento e base foram os parâmetros menos sensíveis. Em outro estudo, Brunetti *et al.* (2017) realizaram uma análise de sensibilidade dos resultados do modelo Hydrus às propriedades hidráulicas do solo de um filtro de águas pluviais. Do mesmo modo, o parâmetro de forma “ $\alpha$ ” da camada de filtro teve um efeito dominante no fluxo de saída simulado.

Turco *et al.* (2017), ao realizarem uma análise de sensibilidade em um pavimento de concreto poroso, constataram que a condutividade hidráulica saturada da camada de revestimento teve uma influência desprezível no armazenamento de água simulado e um efeito bastante limitado no fluxo de base. O mesmo foi observado por Brunetti *et al.* (2016), ao analisarem a sensibilidade aos parâmetros hidrodinâmicos em um pavimento permeável. Na ocasião, a condutividade hidráulica saturada da camada de revestimento teve um efeito direto limitado sobre o fluxo de base, porém a interação com outros parâmetros foi significativa.

Stewart *et al.* (2017) realizaram uma análise de sensibilidade do modelo Hydrus aos parâmetros hidrodinâmicos em uma célula de biorretenção. Foram analisadas a condutividade hidráulica saturada e o parâmetro de forma de retenção de água “ $\alpha$ ”, para camadas de solo dentro e ao redor da célula de biorretenção. No estudo, a resposta hidrológica global foi regulada pelas propriedades hidráulicas do material de preenchimento das células, que controlou a infiltração da água no sistema, e pelos parâmetros de retenção do solo nativo, que controlaram a conectividade entre as águas superficiais e subterrâneas.

## CONCLUSÃO

A análise de sensibilidade ao refinamento da malha mostrou que a discretização espacial não exerceu influência importante nos cenários das variáveis de fluxo. O uso de dados meteorológicos de entrada com diferentes resoluções temporais para a simulação dos processos de transferência de água na seção permeável do pavimento demonstrou que os parâmetros hidrodinâmicos têm uma influência maior do que as variáveis meteorológicas na resolução diária. O uso de dados climatológicos com resolução temporal horária demonstrou que o escoamento superficial foi hipoteticamente controlado pelas variáveis meteorológicas.

A análise de sensibilidade aos parâmetros hidrodinâmicos mostrou que a camada de revestimento atuou predominantemente nos processos de escoamento superficial do pavimento permeável. A condutividade hidráulica saturada foi a propriedade hidrodinâmica mais influente nos processos de partição da precipitação pluviométrica em escoamento superficial e lâmina infiltrada. A umidade do solo à saturação “ $\theta_s$ ” e o parâmetro de forma da curva de retenção “ $n$ ” da camada do subleito influenciaram fortemente a estimativa da lâmina de água armazenada no perfil. Uma determinação experimental precisa desses parâmetros aumentaria significativamente a precisão do ajuste para essas variáveis de saída no pavimento permeável ao calibrar o modelo.

#### **4 ARTIGO 2 – DINÂMICA DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO DA ÁGUA EM PAVIMENTO PERMEÁVEL UTILIZANDO EXPERIMENTAÇÃO IN SITU E SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM O HYDRUS-2D**

##### **Resumo**

Pavimentos permeáveis são alternativas que permitem uma redução da precipitação efetiva favorecendo a infiltração e o armazenamento da água pluvial urbana no solo. O objetivo desse trabalho é apresentar uma simulação bidimensional da dinâmica da infiltração numa estrutura real de um pavimento permeável na cidade do Recife. Inicialmente, foram realizados dezesseis ensaios de infiltração na superfície do pavimento permeável utilizando infiltrometria de anel simples através do método Beerkan. Para a simulação bidimensional dos processos de transferência de água no pavimento permeável, foram determinados os parâmetros hidrodinâmicos da camada superficial a partir do uso do método inverso nos dados experimentais de infiltração na superfície usando o Hydrus-1D. Duas simulações bidimensionais usando o Hydrus-2D foram efetuadas a partir da utilização das propriedades hidrodinâmicas correspondentes a maior e a menor condutividade hidráulica saturada observada superficialmente. Os resultados dos ensaios de infiltração com a metodologia Beerkan demonstraram que a camada do revestimento apresentou características de infiltração satisfatórias. A simulação do processo de infiltração usando o Hydrus-2D demonstrou que o processo de infiltração e redistribuição da água no subleito depende das propriedades hidrodinâmicas da camada de revestimento.

**Palavras-chave:** Hydrus-2D; Infiltração; Técnica Compensatória, Método Beerkan.

## INTRODUÇÃO

A ocupação urbana tem provocado alterações nos componentes do ciclo hidrológico, privilegiando principalmente o escoamento superficial em detrimento dos fenômenos de infiltração da água no solo e recarga dos aquíferos. As técnicas compensatórias para a drenagem urbana estão sendo utilizadas com o objetivo de reestabelecer as condições hidrológicas naturais existentes nas bacias pré-urbanizadas, resgatando os processos naturais nas bacias hidrográficas, reduzindo os impactos nas áreas urbanas através da valorização dos processos de infiltração e armazenamento das águas pluviais urbanas.

Pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, jardins de chuva, poços de infiltração, são alguns exemplos de técnicas compensatórias baseadas no fenômeno de infiltração e armazenamento da água no solo. De modo particular, superfícies compostas por revestimentos como concreto poroso, asfalto poroso e blocos intertravados (vazados ou não vazados) são alternativas contidas nos conceitos das BMPs “Best Management Practices”.

Pavimento permeável é um dispositivo de infiltração no qual o escoamento superficial é desviado para uma camada de reservatório de material granular (britas, pedras) localizado sob a superfície do terreno. A sua utilização em áreas urbanas visa reduzir a precipitação efetiva, melhorar a qualidade da água durante o processo de infiltração com a retenção de poluentes, contribuir para o aumento da recarga da água subterrânea, e, conseqüentemente, reduzir o diâmetro dos condutos da drenagem pluvial e reduzir os custos desse sistema.

Os estudos de análise de eficiência em superfícies permeáveis para a redução do escoamento superficial têm sido bastante reportados na literatura técnica científica brasileira (ARAÚJO *et al.*, 2000; CASTRO *et al.*, 2013; JABUR *et al.*, 2015; MARINHO *et al.*, 2020). Particularmente, a caracterização da capacidade de infiltração e das propriedades hidrodinâmicas da camada superficial de um pavimento permeável é fundamental para a avaliação da necessidade de manutenção dessas estruturas.

Nesse sentido, diversas metodologias experimentais *in situ* têm sido aplicadas para avaliação da capacidade de infiltração e estimativa das propriedades hidrodinâmicas em pavimentos permeáveis. Coutinho *et al.* (2016) utilizaram o método semifísico Beerkan, com infiltrômetro de sete centímetros e meio, para estimativa dos parâmetros das funções que refletem a curva de retenção  $h(\theta)$  e a curva de condutividade hidráulica  $K(\theta)$  num pavimento permeável com blocos intertravados na cidade do Recife. Marinho *et al.* (2020) ampliaram a escala de estimativa da capacidade de infiltração em pavimentos permeáveis a partir da utilização de infiltrômetros com um metro de diâmetro, aplicando a metodologia Beerkan e

obtendo bom desempenho na estimativa das propriedades hidrodinâmicas. Jabur *et al.* (2015) avaliaram a capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis usando a metodologia ASTM C1701.

Além dessas metodologias, o modelo de base física Hydrus-1D tem sido amplamente utilizado na estimativa das propriedades hidrodinâmicas de solos em diversos contextos usando técnicas de otimização, onde o método inverso se destaca. No entanto, do que os autores conhecem, o uso do método inverso para estimativa das propriedades hidrodinâmicas utilizando a curva de infiltração experimental em pavimentos permeáveis ainda não foi reportado na literatura.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe o uso do método inverso na resolução da equação de Richards para o caso particular de infiltração com carga constante, com o objetivo de obter os parâmetros da curva de retenção e da curva de condutividade com o auxílio de técnicas de simulação numérica, ajustando a curva experimental de infiltração acumulada. A estimativa precisa dos parâmetros hidrodinâmicos, associados a geometria das estruturas de infiltração podem possibilitar a simulação dos processos de transferência de água, bem como avaliar o fenômeno de redistribuição interna da água infiltrada de modo mais realístico, levando-se em consideração o detalhamento dos aspectos construtivos dos pavimentos permeáveis.

## MATERIAL E MÉTODOS

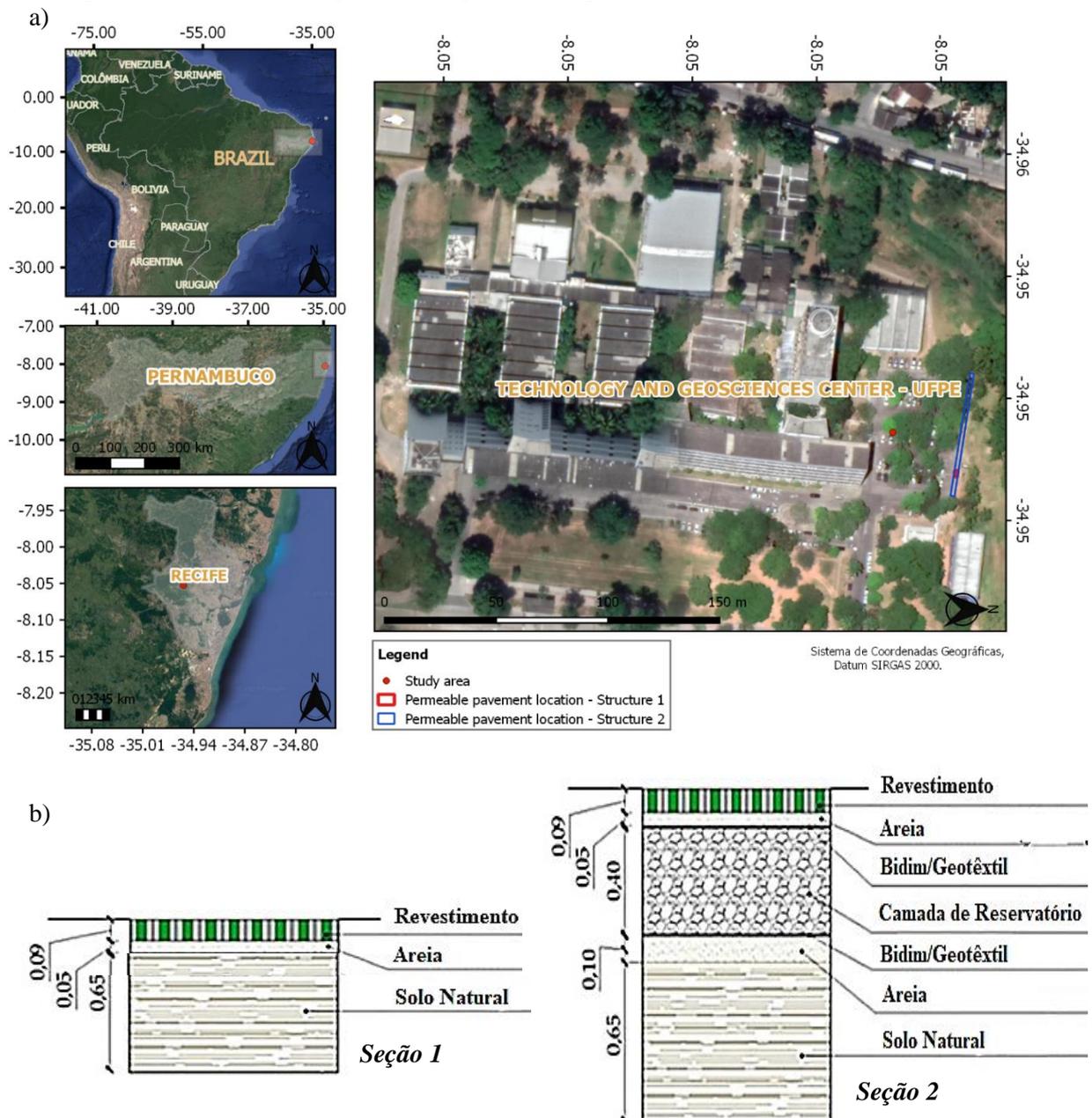
### **Localização e características da área de estudo**

O sítio experimental está localizado no estacionamento da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Pernambuco, na cidade do Recife (Figura 1a). O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo As' (quente e úmido), com estação chuvosa no período de inverno, com maiores precipitações nos meses de março a agosto, onde ocorre 70% do total precipitado anualmente.

Os dados de chuva na estação Várzea pertencente à rede de monitoramento da Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC, para o período de 1994 a 2010, apresentam média anual de 2173,8 mm, com mínima de 1255,4 mm e máxima de 3482,0 mm anuais. Segundo Coutinho *et. al.* (2013), para um tempo de retorno de 10 anos, a região possui uma intensidade de precipitação de 85 mm/h, considerando uma chuva de duração 30 minutos.

O pavimento permeável foi construído objetivando compensar parcialmente uma área impermeável do estacionamento do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG-UFPE). Foram construídos dois tipos de estrutura no local. Uma delas é composta por uma camada de revestimento de blocos vazados intertravados, uma camada de areia e o subleito, o qual é composto de solo urbano, resultante dos processos de aterramento do local. A outra estrutura é constituída por uma camada de revestimento, uma camada de areia que funciona como filtro, uma camada de reservatório constituída de brita com diâmetro médio de 19 mm e porosidade 43%, mais uma camada de areia e o subleito, e possui 3 metros de comprimento (Figura 1b).

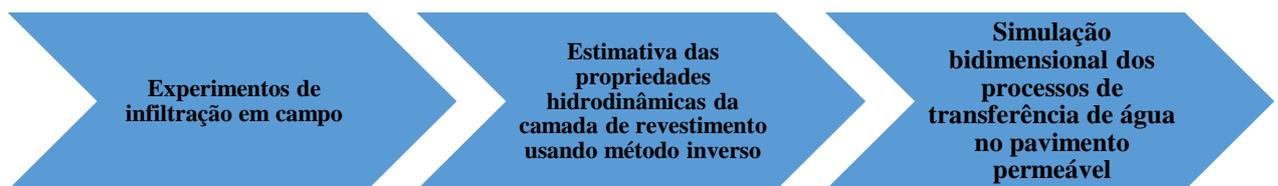
Figura 1 - (a) Localização da área de estudo: em destaque o sítio experimental localizado no estacionamento da escola de Engenharia de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências. (b) Esquema da estrutura do pavimento permeável piloto (dimensões em m).



## Metodologia para simulação dos processos de transferência de água no pavimento permeável

Na Figura 2 são apresentadas as etapas metodológicas utilizadas para a simulação dos processos de transferência de água no pavimento permeável. Inicialmente, foram realizados ensaios de infiltração na superfície do pavimento permeável utilizando infiltrometria de anel simples. Para a simulação bidimensional dos processos de transferência de água no pavimento permeável, foram determinados os parâmetros hidrodinâmicos da camada superficial a partir do método inverso usando o Hydrus-1D. Para as camadas subsuperficiais de areia e do subleito, utilizaram-se as estimativas sugeridas pelo Rosetta para a classe textural arenosa e os parâmetros hidrodinâmicos estimados para o subleito por Coutinho *et al.* (2020).

Figura 2 - Etapas para simulação dos processos de transferência de água no pavimento permeável utilizadas nesse trabalho.



### a) Ensaios de infiltração

Os ensaios de infiltração foram realizados em duplicata em oito pontos na superfície do pavimento, sendo um deles na seção mais heterogênea do pavimento. As campanhas de infiltração foram realizadas em três meses distintos. Utilizou-se a metodologia Beerkan, descrita em Lassabatere *et al.* (2006), utilizando o infiltrômetro de anel simples com um metro de diâmetro (Figura 3). O método Beerkan é um método semifísico e vem sendo correntemente aplicado em experimentos que avaliam a infiltração em pavimentos permeáveis (COUTINHO *et al.*, 2016; MARINHO *et al.*, 2020). Para a realização do ensaio, o infiltrômetro de anel simples foi inserido na superfície com o auxílio de bentonita, a fim de evitar perdas laterais de água durante o processo de infiltração. Próximo ao anel, uma amostra de solo foi coletada e colocada em recipiente de alumínio bem vedado e lacrado para análise em laboratório das condições de umidade em que o solo se encontrava no momento inicial da realização do ensaio.

Volumes definidos de água (20 litros) foram vertidos dentro do cilindro e o tempo necessário para a infiltração de toda a água foi registrado, repetindo-se o processo até que a

infiltração tornasse constante. Uma nova amostra de solo foi coletada rapidamente para determinar a umidade final do solo.

As velocidades básicas de infiltração foram calculadas afim de serem comparadas com a condutividade hidráulica saturada obtida através do método inverso.

Figura 3 - Detalhamento dos experimentos de infiltração: (a) Cronograma; (b) Croqui; (c) Registros dos ensaios.



b) *Método Inverso*

Para a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos usando o Hydrus-1D foi construída uma geometria unidimensional de 9 cm de comprimento discretizada em 181 nós. O Hydrus é um programa computacional que simula o transporte de água, calor e soluto uni, bi ou tridimensionalmente em meio poroso saturado e não saturado (ŠIMŮNEK *et al.*, 2016). O Hydrus resolve numericamente a equação de Richards, utilizando como ferramenta matemática o método dos elementos finitos. A condição de contorno superior foi de pressão constante com carga hidráulica de 25,5 mmH<sub>2</sub>O. A condição de contorno inferior de drenagem livre. Os critérios de convergência utilizados foram de 0,001 para a umidade e de 1 mm para o potencial matricial.

A função objetivo  $\Phi$  a ser minimizada durante o processo de estimativa de parâmetros é apresentada na Equação 1 (SIMUNEK *et al.*, 1998).

$$\begin{aligned} \Phi(b, q, p) = & \sum_{j=1}^{m_q} v_j \sum_{i=1}^{n_{qj}} w_{i,j} [q_j^*(x, t_i) - q_j(x, t_i, b)]^2 \\ & + \sum_{j=1}^{m_p} \bar{v}_j \sum_{i=1}^{n_{pj}} \bar{w}_{i,j} [p_j^*(x, \theta_i) - p_j(x, \theta_i, b)]^2 \\ & + \sum_{j=1}^{n_b} \hat{v}_j [b_j^*(x) - b_j(x)]^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde o primeiro termo no lado direito representa desvios entre as variáveis espaço-tempo medidas e calculadas. Neste termo,  $m_q$  é o número de diferentes conjuntos de medições,  $n_{qj}$  é o número de medições em um determinado conjunto de medições,  $q_j^*(x, t_i)$  representa medições específicas no tempo  $t_i$  para a  $j$ -ésima medição definida no local  $x$  ( $r, z$ ),  $q_j(x, t_i, b)$  são as previsões do modelo correspondente para o vetor de parâmetros otimizados  $b$  (por exemplo,  $\theta_r, \theta_s, \alpha, n$  e  $K_s$ ), e  $v_j$  e  $w_{i,j}$  são pesos associados a um determinado conjunto ou ponto de medição, respectivamente. O segundo termo da função objetivo  $F$  representa as diferenças entre as propriedades hidráulicas do solo medidas independentemente e estimadas, enquanto os termos  $m_p, n_{pj}, p_j^*(q_i), p_j(q_i, b), v_j$  e  $w_{i,j}$  têm significados semelhantes como para o primeiro termo, mas agora para as propriedades hidráulicas do solo. O último termo de  $F$  representa uma função de penalidade para desvios entre o conhecimento prévio dos parâmetros hidráulicos do solo,  $b_j^*$ , e suas estimativas finais,  $b_j$ , com  $n_b$  sendo o número de parâmetros com conhecimento prévio e  $v_j$  representando pesos pré-atribuídos. As estimativas, que fazem uso de informações

prévias (como as utilizadas no terceiro termo de F), são conhecidas como estimativas bayesianas.

A minimização da função objetivo F é realizada usando o método de minimização não linear de Levenberg-Marquardt (MARQUARDT, 1963). Este método combina o método de Newton e os métodos *steepest descend* e gera intervalos de confiança para os parâmetros otimizados. É um algoritmo de otimização local baseado em gradiente, que tem se mostrado confiável quando a dimensionalidade do problema inverso é baixa. Na Tabela 1 consta o intervalo considerado na otimização de cada parâmetro.

Tabela 1 - Intervalos considerados para otimização de cada parâmetro hidrodinâmico.

Parâmetros	$\theta_s$ (mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> )	$\alpha$ (1/mm)	n	Ks (mm/h)
<b>Mínimo</b>	0.3	0.001	1.1	10
<b>Máximo</b>	0.5	0.1	4.0	1500

### c) *Análise estatística*

A fim de validar a qualidade dos ajustes do modelo, foram utilizados cinco critérios estatísticos (LOAGUE; GREEN, 1991): o coeficiente de determinação ( $R^2$ , Equação 2), a razão de desvios (RD, Equação 3), o coeficiente de massa residual (CMR, Equação 4), o erro quadrático médio (EQM, Equação 5) e o erro de modelagem (EM, Equação 6). Para o valor do coeficiente de determinação  $R^2$ , espera-se uma tendência ao valor 1 (um). Tal coeficiente determina a proporção da variância nos valores experimentados que pode ser atribuída aos observados. O coeficiente RD descreve a razão entre a dispersão dos valores observados e os calculados teoricamente, seu valor ótimo é um, ocorrendo quando há igualdade entre os valores observados e calculados. O valor esperado do CMR tende a zero na ausência de desvios sistemáticos entre os valores observados e calculados, podendo indicar a superestimação (CMR>0) ou a subestimação (CMR<0) dos valores estimados. Os valores ótimos de CMR e RD são 0 e 1, respectivamente (WILLMOTT *et al.*, 1985).

$$R^2 \quad (2)$$

$$= \frac{[n \cdot (\sum M_i \cdot T_i) - \sum M_i \cdot \sum T_i]^2}{[n \cdot \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2][n \cdot \sum M_i^2 - (\sum M_i)^2]}$$

$$RD = \frac{\sum(M_i - \bar{M})^2}{\sum(T_i - \bar{T})^2} \quad (3)$$

$$\text{CMR} = \left( \frac{\sum M_i - \sum T_i}{\sum M_i} \right) \quad (4)$$

$$\text{EQM} = \left[ \frac{\sum (T_i - M_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{100}{\bar{M}} \quad (5)$$

$$\text{EM} = \frac{\sum (M_i - \bar{M})^2 - \sum (T_i - M_i)^2}{\sum (M_i - \bar{M})^2} \quad (6)$$

Em que  $T_i$  são os valores estimados pelo modelo,  $M_i$  os valores experimentais,  $\bar{M}$  a média dos valores experimentais e  $n$  o número de valores comparados.

*d) Simulação dos processos de transferência de água através do Hydrus-2D*

Para resolver a equação de Richards em seu formato bidimensional (Equação 7) é necessário a definição das condições de contorno superior, inferior e laterais, bem como das propriedades hidrodinâmicas relativas às funções que expressam a curva de retenção  $h(\theta)$  e de condutividade hidráulica  $K(\theta)$ . Para as funções relativas à curva de retenção e curva de condutividade hidráulica, foram utilizados os modelos propostos por van Genuchten (1980) com a hipótese de Mualem (1956) (Equações 7, 8, 9, 10 e 11).

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(h) \cdot \nabla(h+z) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x(h) \cdot \nabla(h+x) \right] - S \quad (7)$$

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 - (\alpha|h|)^n]^m} & \text{se } h \leq 0 \\ \theta_s & \text{se } h > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (9)$$

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^{-l} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 & \text{se } h \leq 0 \\ K_s & \text{se } h > 0 \end{cases} \quad (11)$$

Nas equações acima,  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são, respectivamente, as umidades volumétricas residual e à saturação,  $\alpha$  é o inverso do comprimento capilar, e  $n$  e  $m$  são parâmetros de forma.

A geometria bidimensional do pavimento permeável correspondente à estrutura em que houve o ponto que apresentou máxima e mínima condutividade hidráulica saturada estimada pelo método inverso foi construída usando o modelo Hydrus-2D/3D. A seção bidimensional apresentada na Figura 4 é heterogênea, formada por três materiais, uma camada superficial correspondente ao revestimento, e duas camadas subsuperficiais que correspondem a uma espessura de areia e de solo natural, respectivamente.

A discretização da seção resultou em 26984 nós, 1014 elementos unidimensionais e 53431 elementos bidimensionais. A condição inicial adotada no perfil próximo a saturação foi pressão constante e uniforme em todo o perfil  $h = -0,1$  m. Os critérios de convergência para a umidade volumétrica e para o potencial matricial foram de 0,001 e 1 mm, respectivamente.

As propriedades hidrodinâmicas da camada de areia e da camada de subleito são apresentadas na Tabela 2. Para a camada de revestimento, foram consideradas as propriedades obtidas pelo método inverso, considerando aquelas correspondentes aos ensaios que conduziram a máxima e a mínima condutividade hidráulica saturada, sendo simulados, portanto, dois casos.

Tabela 2 - Resumo das propriedades hidrodinâmicas das camadas de revestimento, areia e do subleito utilizadas nas simulações.

Camada	Parâmetros hidrodinâmicos				
	$\theta_r$ (mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> )	$\theta_s$ (mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> )	$\alpha$ (1/mm)	$n$	$K_s$ (mm/h)
Revestimento	Método inverso	Método inverso	Método inverso	Método inverso	Método inverso
Areia	0.05	0.37	0.00353	3.18	267.90
Subleito	0.21	0.40	0.02081	2.41	14.40

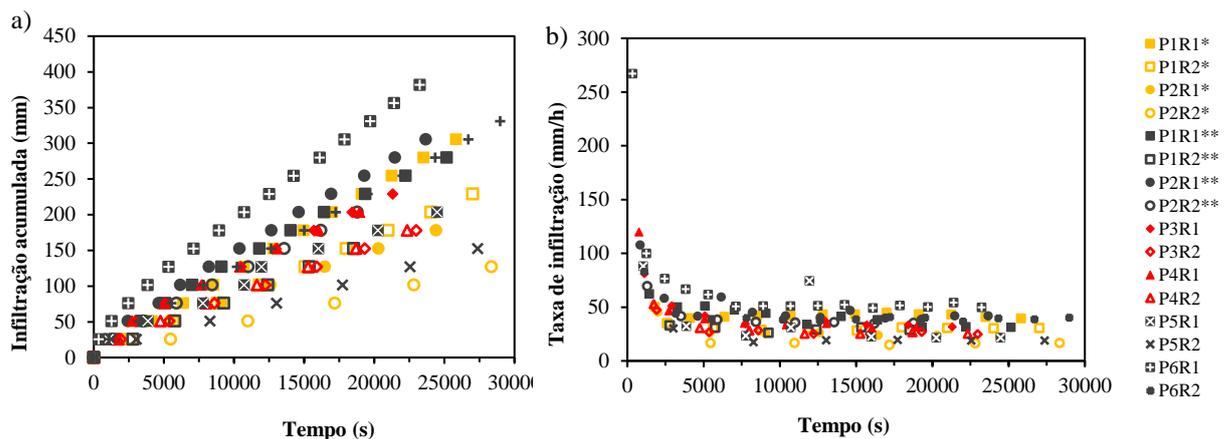
Figura 4 - Detalhamento dos materiais da seção bidimensional do pavimento permeável e condições de contorno utilizadas.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 são apresentadas as lâminas infiltradas acumuladas e as taxas de infiltração para o pavimento permeável. Observa-se que o pavimento permeável apresentou uma lâmina infiltrada acumulada máxima de 382 mm em 23231 segundos para o ponto P6R1, e mínima de 127 mm em 28355 segundos para o ponto P2R2\*. No tocante à taxa de infiltração, nota-se um grande contraste entre a taxa de infiltração inicial do ensaio P6R1 e os demais pontos. No entanto, a taxa de infiltração de todos os pontos possui um valor médio de 33,8 mm/h, apresentando média variabilidade segundo a classificação de Warrick & Nielsen (1980), com coeficiente de variação de 25,7%.

Figura 5 - (a) Lâmina infiltrada acumulada e (b) taxas de infiltração para o pavimento permeável em épocas distintas.\*ensaios realizados na primeira campanha; \*\*ensaios realizados na última campanha;R1 primeira repetição; R2 segunda repetição.



Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros hidrodinâmicos estimados a partir do método inverso para diversos ensaios na camada de revestimento do PP. Na Figura 6 estão apresentados os ajustes das curvas de infiltração acumulada experimentais e estimadas com os valores obtidos pelo método inverso. Para as medidas estatísticas obtidas a partir da análise da qualidade de ajuste do método inverso, observa-se que o coeficiente de determinação e o coeficiente de massa residual se apresentam próximo aos valores ótimos (um e zero, respectivamente) para todos os pontos. Com relação à RD, os valores mais próximos da unidade foram observados nos pontos P1R1, P1R2, P1R2\*\*. O pior desempenho no tocante a razão dos desvios, isto é, uma maior dispersão entre os valores observados e calculados foram notados para os pontos P4R1, P5R1 e P6R1. O mesmo foi indicado pelo EQM, que apresentou erros superiores a 11% para esses pontos. O erro de modelagem apresentou valores próximos aos valores ótimos esperados.

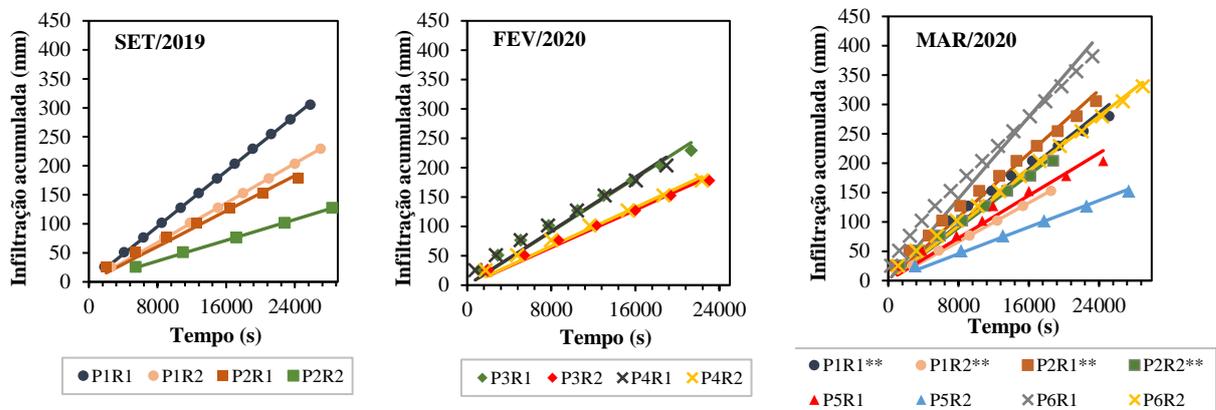
Basicamente, os valores obtidos para a condutividade hidráulica saturada e para os valores estabilizados da taxa de infiltração permitem enquadrar o pavimento permeável como possuindo grau de permeabilidade média, de acordo com a classificação proposta por Terzaghi & Peck (1967 apud LAMBE; WHITMAN, 1979). No tocante às taxas de infiltração, os resultados estão de acordo com os resultados encontrados por Jabur *et al.* (2015), que obtiveram taxas de infiltração superiores a 36 mm/h para bloco de concreto intertravado vazado.

Tabela 3 - Parâmetros hidrodinâmicos estimados a partir do método inverso para diversos ensaios na camada de revestimento do PP, velocidade básica de infiltração (VIB), erros percentuais (E) e estatísticas dos ajustes realizados para o pavimento permeável: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), razão dos desvios (RD), coeficiente de massa residual (CMR), erro quadrático médio (EQM) e Erro de modelagem (EM).

Ponto	$\theta_s$ (mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> )	$\alpha$ (1/mm)	n	Ks (mm/h)	VIB (mm/h)	E (%)	$R^2$	RD	CMR	EQM (%)	EM
P1R1*	0.3	0.001	3.67	42.94	41.60	3.22	0.9998	0.9805	0.0028	0.9093	0.9997
P1R2*	0.3	0.001	3.70	30.61	30.63	-0.07	0.9999	0.9595	0.0057	1.3144	0.9994
P1R1**	0.3	0.004	1.10	42.96	40.51	6.05	0.9926	0.8015	0.0434	8.8227	0.9720
P1R2**	0.3	0.001	4.00	40.51	35.46	14.24	0.9995	0.9455	0.0070	1.8854	0.9985
P2R1*	0.3	0.001	1.10	27.45	24.48	12.13	0.9992	0.8000	0.0337	6.8761	0.9811
P2R2*	0.3	0.001	2.69	16.15	16.02	0.81	0.9996	0.9695	0.0036	1.2464	0.9993
P2R1**	0.3	0.001	3.74	48.67	40.51	20.14	0.9981	0.8001	0.0382	7.6360	0.9793
P2R2**	0.3	0.001	1.10	40.51	35.46	14.24	0.9994	0.8067	0.0334	6.7151	0.9826
P3R1	0.31	0.003	4.00	41.00	34.02	20.52	0.9972	0.7547	0.0479	9.4598	0.9664
P3R2	0.3	0.001	3.43	28.85	25.52	13.05	0.9997	0.8163	0.0300	6.1215	0.9850
P4R1	0.3	0.002	4.00	41.40	32.13	28.85	0.9969	0.7011	0.0624	11.8329	0.9460
P4R2	0.3	0.001	3.25	29.78	32.61	-8.68	0.9992	0.7849	0.0438	7.7994	0.9757
P5R1	0.3	0.001	4.00	32.58	21.95	48.43	0.9876	0.7407	0.0518	11.3280	0.9505
P5R2	0.3	0.001	4.00	20.49	35.13	41.67	0.9997	0.8556	0.0211	4.5236	0.9914
P6R1	0.3	0.001	4.00	62.77	51.55	21.77	0.9963	0.7357	0.0585	11.0499	0.9581
P6R2	0.3	0.003	3.96	41.97	38.86	8.00	0.9985	0.8697	0.0227	4.4718	0.9930
Média	0.3	0.002	3.23	36.79	33.53	10.06	0.9977	0.8326	0.0316	6.3745	0.9799
Desvio Padrão	0.0	0.001	1.12	11.35	8.66	19.16	0.0033	0.0890	0.0196	3.6944	0.0175
CV	0.0	0.644	0.35	0.31	0.26	1.90	0.0033	0.1069	0.6200	0.5796	0.0178

\*ensaios realizados na primeira campanha; \*\*ensaios realizados na última campanha; R1 primeira repetição; R2 segunda repetição.

Figura 6 - Ajustes realizados com a utilização do método inverso para os três períodos analisados.



Na Figura 7 é apresentada a dinâmica dos processos de infiltração da água na camada de revestimento e de redistribuição da água infiltrada nas camadas subsuperficiais de areia e do subleito, respectivamente. Observa-se que para tempos curtos o processo de infiltração ocorre seguindo um efeito pistão no solo entre os blocos intertravados. Nota-se que a propagação de umidade se dá seguindo curvas de umidade horizontais até que seja atingindo a espessura total da camada de revestimento.

Para o tempo  $T$  igual a 0,086 h, o meio com menor condutividade hidráulica saturada na superfície ainda não apresenta a frente de molhamento rompendo a espessura da camada de revestimento, enquanto que para o meio com maior condutividade hidráulica, nota-se a presença de contínuas frentes de umedecimento que se tornam mais evidentes para um tempo igual a 0,172 h.

A partir do tempo 0,258 h, observa-se a formação de uma camada saturada logo após a camada de revestimento para o caso com maior condutividade hidráulica saturada. A partir desse momento, observa-se que a velocidade de redistribuição da água na estrutura é controlada pela camada de revestimento, fazendo com que o meio de maior condutividade hidráulica na superfície atinja sucessivamente profundidades de redistribuição da água maiores que o meio com menor condutividade hidráulica na superfície.

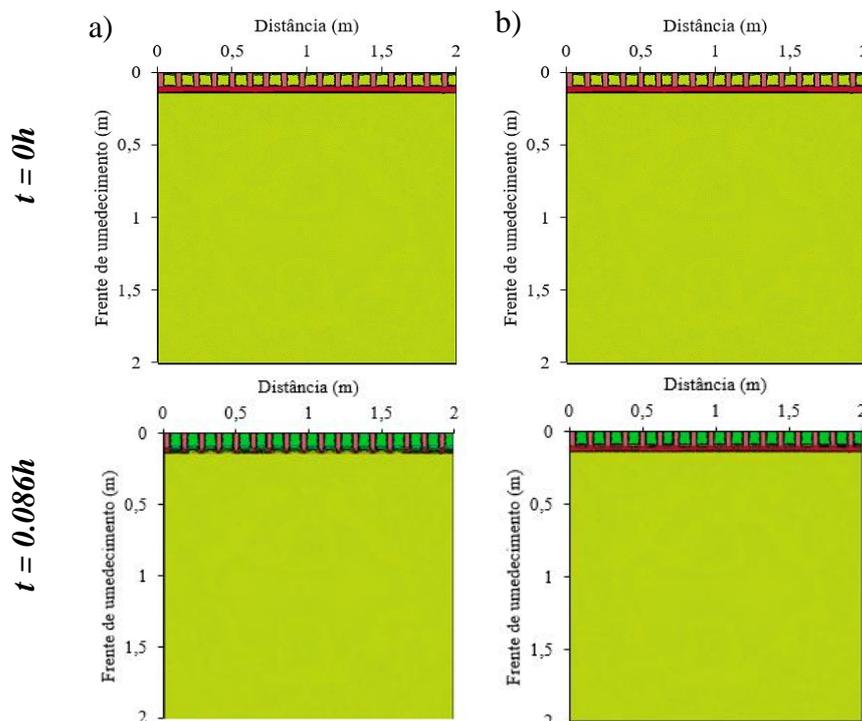
Para um mesmo tempo, uma diferença de 288% na condutividade hidráulica saturada na superfície, em referência ao menor valor, permitiu que a profundidade da frente de molhamento fosse 33.3% maior. Tal fato demonstra influência da condutividade hidráulica saturada da camada superficial do pavimento permeável nos processos de infiltração e redistribuição de água na estrutura. Isso demonstra a necessidade de programadas medidas de

manutenção para permitir uma boa capacidade de drenagem da estrutura, o que pode influenciar na velocidade de infiltração e a longo prazo na velocidade de recarga do lençol freático.

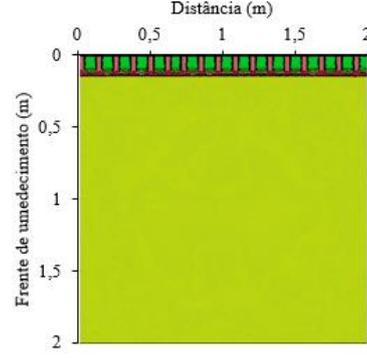
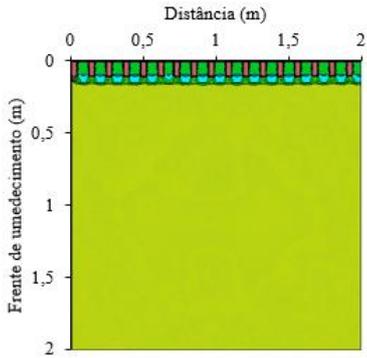
Costa *et al.* (2020) observaram que a condutividade hidráulica saturada é o parâmetro com maior influência na capacidade de infiltração do pavimento permeável objeto deste estudo através de um estudo de análise de sensibilidade utilizando o Hydrus 1D. Os autores observaram que um erro de -50% na condutividade hidráulica saturada da camada de revestimento conduz a uma subestimativa de cerca de 30% na recarga do lençol e na lâmina infiltrada acumulada.

Para Lllgen *et al.* (2007), a velocidade de infiltração e redistribuição da água são influenciadas principalmente pela camada de revestimento, bem como pela espessura da abertura do bloco intertravado.

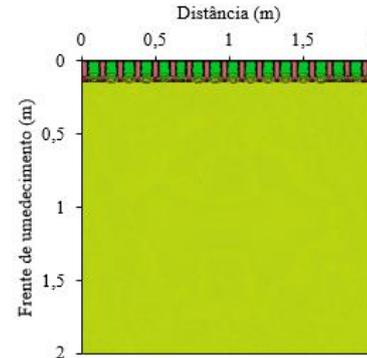
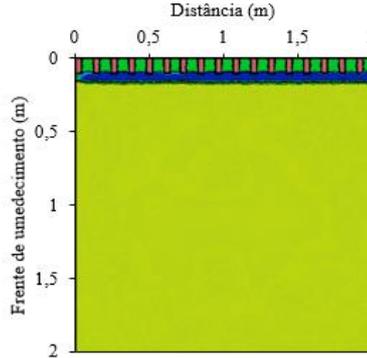
Figura 7 - Simulação do processo de infiltração e redistribuição de água no pavimento permeável para o revestimento com (a) maior condutividade hidráulica saturada (b) e menor condutividade hidráulica saturada para diversos tempos.



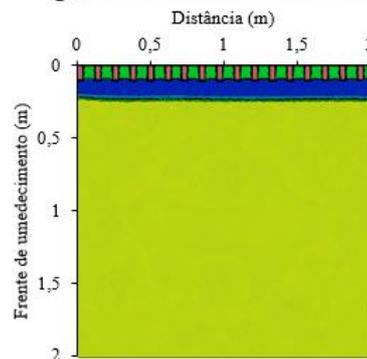
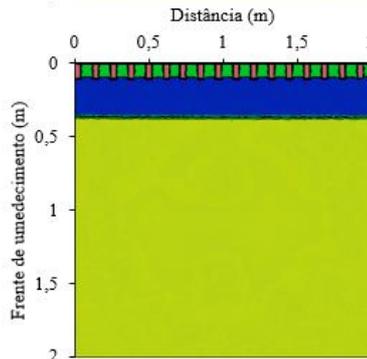
$t = 0.172h$



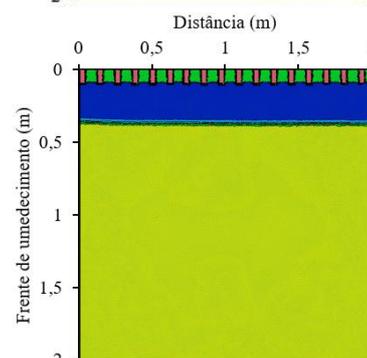
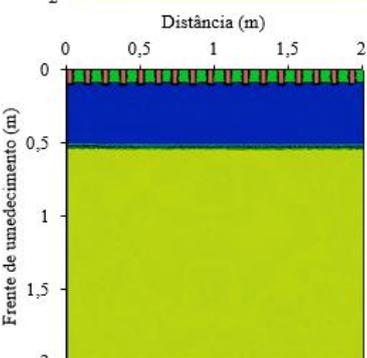
$t = 0.258h$



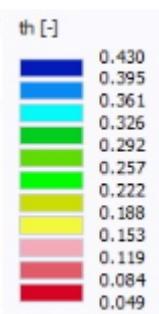
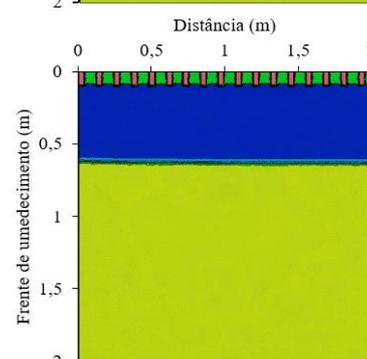
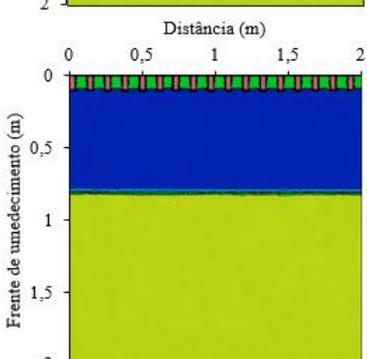
$t = 1.5h$



$t = 3h$



$t = 6h$



## CONCLUSÃO

O método inverso apresentou excelente desempenho na estimativa das propriedades hidrodinâmicas. Em geral, as medidas estatísticas apresentaram valores próximos aos seus valores ótimos, indicando uma boa precisão do método na representação da curva de infiltração acumulada, apresentando acurácia na estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos.

As simulações bidimensionais com o Hydrus-2D demonstraram que a dinâmica de infiltração e redistribuição da água infiltrada na estrutura do pavimento permeável é influenciada pela condutividade hidráulica saturada da camada de revestimento. Além disso, o Hydrus-2D demonstrou ser uma boa ferramenta computacional para representar a dinâmica de infiltração e redistribuição da água no pavimento permeável.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise de sensibilidade ao refinamento da malha permitiu identificar que a discretização espacial não exerceu influência na estimativa das variáveis de fluxo. A análise pode influenciar pesquisas que buscam compreender os processos de transferência de água em uma estrutura como um pavimento permeável através da equação de Richards. De modo geral, malhas menos refinadas exigem menor custo operacional dos computadores e, conseqüentemente, dão celeridade às simulações.

As estimativas dos processos de transferência de água na seção permeável com o Hydrus 1D sofreram alterações quando da utilização de diferentes resoluções temporais. Na resolução diária os parâmetros hidrodinâmicos têm uma influência maior que as variáveis meteorológicas. Por outro lado, o uso de dados climatológicos com resolução temporal horária demonstrou que o escoamento superficial foi hipoteticamente controlado pelas variáveis meteorológicas.

A camada de revestimento atuou de forma predominante nos processos de escoamento superficial do pavimento permeável, sua influência foi observada pelos resultados da análise de sensibilidade local e pelas simulações bidimensionais dos processos de infiltração e redistribuição de água na estrutura do pavimento. A condutividade hidráulica saturada foi a propriedade hidrodinâmica mais influente nos processos de partição da precipitação pluviométrica em escoamento superficial e lâmina infiltrada. A umidade do solo à saturação “ $\theta_s$ ” e o parâmetro de forma da curva de retenção “ $n$ ” da camada do subleito influenciaram fortemente a estimativa da lâmina de água armazenada no perfil. Desse modo, uma determinação experimental precisa desses parâmetros aumentaria significativamente a precisão do ajuste para essas variáveis de saída no pavimento permeável ao calibrar o modelo.

Os resultados dos ensaios de infiltração indicaram que o pavimento permeável apresenta boa capacidade de infiltração, confirmando o desempenho esperado para aplicação como técnica compensatória alternativa aos pavimentos clássicos impermeáveis.

O método inverso apresentou excelente desempenho na estimativa das propriedades hidrodinâmicas. O uso da metodologia Beerkan com infiltrometria de anel de um metro de diâmetro acoplada ao método inverso, devido a facilidade de execução, implementação e a eficácia, pode representar uma alternativa nova e viável para a estimativa das propriedades hidráulicas em superfícies permeáveis.

Quando o modelo inclui interações entre parâmetros, os resultados da análise de superfície de resposta podem ser imprecisos porque as interações dos parâmetros podem ser

identificadas apenas alterando vários parâmetros simultaneamente. Por esta razão, sugere-se para trabalhos futuros a realização de uma análise sensibilidade global para avaliar os efeitos de segunda ordem dos parâmetros hidrodinâmicos nos processos de transferência de água em estruturas heterogêneas como o pavimento permeável.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.
- ALVES, E.M.; MACIEL NETTO, A.; ANTONINO, A. C. D. Simulação da Dinâmica da Água em Solo Cultivado com Feijão Caupi no Brejo Paraibano (Simulation of Water Dynamics in Soil Cultivated with Cowpea in Paraibano Swamp). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n.3, p. 175-186, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C1701/C1701M Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1701: Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete. ASTM, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C1781/C1781M Standard Test Method for Surface Infiltration Rate of Permeable Unit Paving; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. **Revista Brasileira dos Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- BOUARAFA, S.; LASSABATERE, L.; LIPEME-KOUYI, G.; ANGULO-JARAMILLO, R. Hydrodynamic Characterization of Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS) by Using Beerkan Infiltration Experiments. **Water**, v. 11, n. 4, p. 660, 2019.
- BRASWELL, A. S.; WINSTON, R. J.; HUNT, W. F. Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina. **Journal of environmental management**, v. 224, p. 277-287, 2018.
- BRAUD, I.; DE CONDAPPA, D.; SORIA UGLADE, J.M.; HAVERKAMP, R.; ANGULO-JARAMILLO, R.; GALLE, S.; VAUCLIN, M. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method). **European Journal of Soil Science**, 56:361- 374, 2005.
- BRUGIN, M., MARCHIONI, M., BECCIU, G., GIUSTOZZI, F., TORALDO, E., ANDRÉS-VALERI, V. C. Clogging potential evaluation of porous mixture surfaces used in permeable pavement systems. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 24, n. 5, 620-630, 2020.
- BRUNETTI, G.; ŠIMŮNEK, J.; PIRO, P. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 1146-1161, 2016.

BRUNETTI, G.; ŠIMŮNEK, J.; TURCO, M.; PIRO, P. On the use of global sensitivity analysis for the numerical analysis of permeable pavements. **Urban Water Journal**, v. 15, n. 3, p. 269-275, 2018.

BRUNETTI, G.; SIMUNEK, J.; TURCO, M.; PIRO, P. On the use of surrogate-based modeling for the numerical analysis of Low Impact Development techniques. **Journal of Hydrology**, 548, p. 263-277, 2017.

BRUNO, L. O.; AMORIM, R. S. S.; SILVEIRA, A. Estudo da redução do escoamento superficial direto em superfícies permeáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 237-247, 2013.

BURDINE, N. Relative permeability calculations from pore size distribution data. **Journal of Petroleum Technology**, v. 5, n. 3, p. 71-78, 1953.

CARBONE, M.; BRUNETTI, G.; PIRO, P. Hydrological performance of a permeable pavement in Mediterranean climate. 14th SGEM GeoConference on Water Resources: Forest, Marine and Ocean Ecosystems, Albena, Bulgaria, p. 17-26, 2014.

CARSEL, R. F.; PARRISH, R. S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. **Water resources research**, v. 24, n. 5, p. 755-769, 1988.

CASTRO, A.S.; GOLDENFUM, J.A; DA SILVEIRA , A.L; MARQUES, D. M. Avaliação da Evolução do Comportamento Quantitativo de Pavimentos Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n.1, p. 263-273, 2013.

CHAVES, H. M. L. Análise global de sensibilidade dos parâmetros da equação universal de perda de solo modificada (muscle) (Global sensitivity analysis of the parameters of the universal modified soil loss equation (muscle)). **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 15, n. 3, p. 345-350, 1991.

CHEN, L.-M.; CHEN, J.-W.; CHEN, T.-H.; LECHER, T.; DAVIDSON, P.C. Measurement of Permeability and Comparison of Pavements. **Water**, 2019.

CMAA – CONCRETE MASONRY ASSOCIATION OF AUSTRALIA. Permeable Interlocking Concrete Pavements – Design and Construction Guide. 2010, 30p.

CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION (CIRIA). Sustainable Urban Drainage Systems: Design Manual for England and Wales; CIRIA: London, UK, 2000.

COSTA, I. R. A.; COUTINHO, A.P; MONTENEGRO, S. M. G. L.; Rabelo, A.E.C.G. C; SANTO NETO, S. M.; ALVES, E.M; ANTONINO, A. C.D. Sensitivity of hydrodynamic parameters in the simulation of water transfer processes in a permeable pavement. **Revista brasileira de recursos hídricos**, v. 25, p. 1-18, 2020.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. Dissertação de mestrado. Federal University of Pernambuco. 2011.

COUTINHO, A. P., RIBAS, L. V., LEITE, L. L. L., ANTONINO, A. C. D., CABRAL, J. J. S. P., MONTENEGRO, S. M. G. L., & MELO, T. A. T. Determinação de equações de chuvas intensas para municípios das mesorregiões do estado de Pernambuco através do método de Bell. XX Simpósio brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves/RS, 1-8, 2013.

COUTINHO, A. P.; LASSABATERE, L.; WINIARSKI, T.; CABRAL, J.; ANTONINO, A.; ANGULO-JARAMILLO, R. Vadose Zone Heterogeneity Effect on Unsaturated Water Flow Modeling at Meso-Scale. **Journal of Water Resource and Protection**, 7, 353-368. 2015. doi: 10.4236/jwarp.2015.74028.

COUTINHO, A. P; LASSABATERE, L; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; Angulo Jaramilo, R; Cabral . Hydraulic characterization and hydrological behavior of a pilot permeable pavement in an urban center, Brazil. **Hydrological processes (online)**, v. 30, p. 4242-4254, 2016.

COUTINHO, A. P; MELO T.A.T; DE ALCÂNTARA, L. R.P; RABELO, A. E. C. G..C ; DOS SANTOS NETO, S. ; ANTONINO, A. C. D . Caracterização hidráulica das camadas de um pavimento permeável. **Águas subterrâneas**, v. 34, p. 191-203, 2020.

ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISETTI, T. Performance and implementation of low impact development—A review. **Science of the Total Environment**, v. 607, p. 413-432, 2017.

GABIRI, G.; BURGHOFF, S.; DIEKKRÜGER, B.; LEEMHUIS, C.; STEINBACH, S.; NÄSCHEN, K. Modeling spatial soil water dynamics in a tropical floodplain, East Africa. **Water**, v. 10, n. 2, p. 191, 2018.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Simulação hidráulica de trincheiras de infiltração de águas pluviais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, p. 89-99, 2008.

HOU, L.; FENG, S.; HUO, Z.; DING, Y.; ZHANG, S. Experimental study on rainfall-runoff relation for porous pavements. **Hydrology Research**, v. 39, n. 3, p. 181-190, 2008.

HU, N., ZHANG, J., XIA, S., HAN, R., DAI, Z., SHE, R., MENG, B. A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement. **Journal of Cleaner Production**, 2020.

IGNATIEVA, M., STEWART, G., MEURK, C. Low impact urban design and development (LIUDD): matching urban design and urban ecology. **Landscape review**, v. 12, n. 2, p. 61-73, 2008.

ILLGEN, M; HARTING, K; SCHMITT, T.G; WELKER, A. Runoff and infiltration characteristics of pavement structures—review of na extensive monitoring program. **WaterSciTechnol**, v.56, n.10, p. 133–140, 2007. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.750>

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: março/2020.

- JABUR, A. S.; DORNELLES, F.; SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A.; OKAWA, C. M. P.; GASPARINI, R. L. Determination of the infiltration capacity of permeable pavements. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 937-945, 2015.
- KAMALI, M.; DELKASH, M.; TAJRISHY, M. Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. **Journal of environmental management**, v. 187, p. 43-53, 2017.
- KÖHNE, J. M.; WÖHLING, T.; POT, V.; BENOIT, P.; LEGUÉDOIS, S.; LE BISSONNAIS, Y.; ŠIMŮNEK, J. Coupled simulation of surface runoff and soil water flow using multi-objective parameter estimation. **Journal of Hydrology**, v. 403, n. 1-2, p. 141-156, 2011.
- LAMBE, T.; WHITMAN, R. Soil mechanics, SI version. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J.M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters through infiltration experiments - BEST. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p.521-532, 2006.
- LI, H.; KAYHANIAN, M.; HARVEY, J.T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. **J. Environ. Manag.** P. 144–152, 2013.
- LI, Y., BABCOCK, R.W. Modeling hydrologic performance of a green roof system with HYDRUS-2D. **J. Environ. Eng.** 2015. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000976](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000976).
- LIU, C. Y.; CHUI, T. F. M. Factors influencing stormwater mitigation in permeable pavement. **Water**, v. 9, n. 12, p. 988, 2017.
- LIU, J.; YAN, H.; LIAO, Z.; ZHANG, K.; SCHMIDT, A. R.; TAO, T. Laboratory analysis on the surface runoff pollution reduction performance of permeable pavements. **Science of The Total Environment**, v. 691, p. 1-8, 2019.
- LOAGUE, K. M.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for solute transport models. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, p. 51-73, 1991.
- LUCKE, T., WHITE, R., NICHOLS, P., BORGWARDT, S. A simple field test to evaluate the maintenance requirements of permeable interlocking concrete pavements. **Water**, v. 7, n. 6, p. 2542-2554, 2015.
- MARINHO, M. N.; COUTINHO, A.P; SANTO NETO, S. M.; CASAGRANDE, C. A.; SANTOS, G. T. L.; CARNEIRO, A. M. P. Mathematical modeling of the infiltration in a permeable pavement on the field scale. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, p. 1-15, 2020.
- MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431-441, 1963.

MCCUEN, R. H.; SNYDER, W. M. **Hydrologic modeling: statistical methods and applications**. 1986.

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P.; SANTOS, J. B. F.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONINO, A. C. D.; LASSABATERE, L. Trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo das águas pluviais urbanas (Infiltration trench as compensatory technique in urban stormwater management). **Ambiente Construído**, v. 16, p. 53-72, 2016.

MERTENS, J.; RAES, D.; FEYEN, J. Incorporating rainfall intensity into daily rainfall records for simulating runoff and infiltration into soil profiles. **Hydrological processes**, v. 16, n. 3, p. 731-739, 2002.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513-522. 1976.  
<http://dx.doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.

NEWCOMER, M. E., GURDAK, J. J., SKLAR, L. S., NANUS, L. Urban recharge beneath low impact development and effects of climate variability and change. **Water Resources Research**, v. 50, n.2, 1716-1734, 2014.

OLESON, K. W.; MONAGHAN, A.; WILHELMI, O.; BARLAGE, M.; BRUNSELL, N.; FEDDEMA, J.; STEINHOFF, D. F. Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. **Climatic Change**, v. 129, n. 3-4, p. 525-541, 2015.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.

SILVA URSULINO, B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; COELHO, V. H. R.; ARAÚJO, D. C. S.; GUSMÃO, A. C. V.; ANGULO-JARAMILLO, R. Modelling Soil Water Dynamics from Soil Hydraulic Parameters Estimated by an Alternative Method in a Tropical Experimental Basin. **Water**, v. 11, n. 5, p. 1007, 2019.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; GRIBB, M. M.; HOPMANS, J. W. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. **Soil and Tillage Research**, v. 47, n. 1-2, p. 27-36, 1998.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 2, p. 782-797, 2008.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. Th; ŠEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 7, 2016.

SIRIWARDENE, N. R.; DELETIC, A.; FLETCHER, T. D. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study. **Water research**, v. 41, n. 7, p. 1433-1440, 2007.

STEWART, R. D.; LEE; J. G.; SHUSTER, W. D.; DARNER, R. A. Modelling hydrological response to a fully-monitored urban bioretention cell. **Hydrological processes**, v. 31, n. 26, p. 4626-4638, 2017.

ST-HILAIRE, A.; DUCHESNE, S.; ROUSSEAU, A. N. Floods and water quality in Canada: A review of the interactions with urbanization, agriculture and forestry. **Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques**, v. 41, n. 1-2, p. 273-287, 2016.

TARQUI, J. L. Z.; CARVALHO, M. D. F.; SANTOS, C. M. L. D.; SANTOS, J. E. D. Avaliação do escoamento superficial de águas pluviais em pavimento de blocos de solo-cimento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 403-410, 2019.

TERZAGHI, K.; PECK, R.; MESRI, G. Soil mechanics in engineering practice. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1996.

TURCO, M.; KODEŠOVÁ, R.; BRUNETTI, G.; NIKODEM, A.; FÉR, M.; PIRO, P. Unsaturated hydraulic behaviour of a permeable pavement: Laboratory investigation and numerical analysis by using the HYDRUS-2D model. **Journal of hydrology**, v. 554, p. 780-791, 2017.

U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). Low Impact Development (LID): A Literature Review; EPA-841-B-00-005; U. S. **Environmental Protection Agency**: Washington, DC, USA, 2000.

VAN GENUCHTEN, M. T. H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

VAN GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. 1991. <https://doi.org/10.1002/9781118616871>.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of Soil Physics. Application of soil physics, Hil-lal D. 1980.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R., ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90(C5), p. 8995-9005, 1985.

WINSTON, R. J., AL-RUBAEI, A. M., BLECKEN, G. T., HUNT, W. F. A simple infiltration test for determination of permeable pavement maintenance needs. **Journal of Environmental Engineering**, v. 142, n. 10, 2016.

WISCONSIN DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. Permeable Pavement, Standard 1008; Wisconsin Department of Natural Resources Conservation Practice Standard: Madison, WI, USA, 2014.

WONG, T.H.F. An overview of water sensitive urban design practices in Australia. **Water Pract. Tech.** 2006.