



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PAULO HENRIQUE LOPES BEZERRA

**MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA
TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO INSTALADA EM LOTE NA CIDADE
DO RECIFE - PE**

Recife

2025

PAULO HENRIQUE LOPES BEZERRA

**MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA TRINCHEIRA DE
INFILTRAÇÃO INSTALADA EM LOTE NA CIDADE DO RECIFE - PE**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

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

Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Bezerra, Paulo Henrique Lopes.

Monitoramento e simulação hidráulica de uma trincheira de infiltração instalada em lote na Cidade do Recife - PE / Paulo Henrique Lopes Bezerra. - Recife, 2025.

83f.: il.

Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: Suzana Maria Gico Lima Montenegro.

Coorientação: Artur Paiva Coutinho.

1. Drenagem urbana; 2. Trincheira de infiltração; 3. Método de Puls; 4. Aprendizado de máquina. I. Montenegro, Suzana Maria Gico Lima. II. Coutinho, Artur Paiva. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

PAULO HENRIQUE LOPES BEZERRA

**MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA TRINCHEIRA DE
INFILTRAÇÃO INSTALADA EM LOTE NA CIDADE DO RECIFE - PE**

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

Aprovada em 26/08/2025

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Suzana Maria Gigo Lima Montenegro, UFPE

Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho, UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Victor Hugo Rabelho Coelho (examinador externo)

Universidade Federal da Paraíba

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Tássia dos Anjos Tenório de Melo (examinadora externa)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Severino Martins dos Santos Neto (examinador externo)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Edevaldo Miguel Alves (examinador externo)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus... por tudo.

A minha esposa Jéssica Maria, por acreditar em mim, me ajudar e sempre me encorajar para superar qualquer adversidade. A meu filho João Henrique, que nasceu durante este processo do doutorado e me encheu de alegria e amor.

Aos meus pais, Ana e Antônio, e minhas irmãs, Priscilla e Patrícia, por estarem sempre ao meu lado em toda minha caminhada, pelo amor, carinho e paciência nos momentos difíceis. Aos meus tios, Ilson e Eunice, pelo carinho e pela ajuda em minha educação.

A meus sogros, Ester e Marcos por fazerem parte da minha vida.

À minha orientadora, Professora Suzana Montenegro, pelos ensinamentos e conhecimento repassado desde os tempos de Iniciação Científica na graduação até este trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Artur Coutinho, que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e por ter se tornado um amigo e inspiração.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação, pelo apoio e conhecimento transmitido ao longo deste período.

Aos amigos do Grupo de Recursos Hídricos (GRH) e do grupo de pesquisa de física dos solos, pela ajuda nos trabalhos e conclusão desta pesquisa.

A todos meus amigos pelo apoio e conselhos.

A FACEPE pela concessão da bolsa de doutorado.

A todos que, direta ou indiretamente, ajudaram para a obtenção do título de doutor.

RESUMO

A intensificação da urbanização nas cidades brasileiras tem ampliado a impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração de águas pluviais e elevando o escoamento superficial e os picos de vazão. Nesse contexto, estruturas compensatórias de drenagem, como trincheiras de infiltração, têm se destacado como soluções sustentáveis capazes de restaurar processos hidrológicos naturais no meio urbano. Este trabalho avalia o desempenho hidráulico de uma trincheira de infiltração instalada em lote urbano no Recife–PE, a partir da modelagem física e computacional dos processos de infiltração e armazenamento. A modelagem hidrodinâmica foi realizada com o método de Puls, calibrado para eventos representativos, e por algoritmos de aprendizado de máquina para previsão do nível d'água no interior da trincheira de infiltração. Os resultados indicaram elevada concordância entre valores observados e simulados, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,90 para o método de Puls e desempenho equivalente nos modelos de aprendizado de máquina. Verificou-se heterogeneidade espacial da condutividade hidráulica entre base e paredes da trincheira, refletindo as características do solo local. Mesmo sob condições de solo úmido, a estrutura apresentou capacidade satisfatória de infiltração, confirmando sua aplicabilidade em ambientes urbanos de elevada pluviosidade. O estudo demonstra o potencial da modelagem hidrológica e técnicas de inteligência artificial para avaliação e predição do comportamento hidráulico de dispositivos de infiltração, oferecendo subsídios técnicos para projetos de drenagem urbana sustentável e adaptação às mudanças climáticas.

Palavras-chave: drenagem urbana. trincheira de infiltração. método de Puls. aprendizado de máquina.

ABSTRACT

The intensification of urbanization in Brazilian cities has increased soil imperviousness, reducing stormwater infiltration and amplifying surface runoff and peak discharges. In this context, compensatory drainage structures, such as infiltration trenches, have emerged as sustainable solutions capable of restoring natural hydrological processes in urban environments. This study evaluates the hydraulic performance of an infiltration trench installed in an urban lot in Recife, Brazil, based on physical and computational modeling of infiltration and storage processes. Hydrodynamic modeling was performed using the Puls method, calibrated for representative rainfall events, and by machine learning algorithms employed to predict the water level inside the infiltration trench. The results indicated a strong agreement between observed and simulated values, with coefficients of determination (R^2) exceeding 0.90 for the Puls method and comparable performance across the machine learning models. Spatial heterogeneity of hydraulic conductivity between the trench base and sidewalls was verified, reflecting the characteristics of the local soil. Even under wet antecedent soil conditions, the structure exhibited satisfactory infiltration capacity, confirming its applicability in highly rainfall-prone urban areas. Overall, the study demonstrates the potential of hydrological modeling combined with artificial intelligence techniques for evaluating and predicting the hydraulic behavior of infiltration devices, providing technical support for sustainable urban drainage design and climate-change adaptation.

Keywords: urban drainage; infiltration trench; Puls method; machine learning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Números absolutos e relativos da população total, urbana e rural, Brasil: 1970 – 2022.	18
Figura 2 - Números absolutos e relativos da população total, urbana e rural, Pernambuco: 1970 – 2022.	19
Figura 3 – Efeitos da urbanização no ciclo hidrológico local.	20
Figura 4 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas.	22
Figura 5 – Vantagens da instalação de dispositivos de infiltração e percolação.	26
Figura 6 – Estruturas compensatórias de drenagem.	27
Figura 7 – Trincheira de infiltração.	29
Figura 8 – Representação simplificada do sistema trifásico do solo.	32
Figura 9 – Curva característica representativa de diferentes solos.	36
Figura 10 – Representação da curva de condutividade hidráulica.	37
Figura 11 – Mapa de localização da trincheira de infiltração.	44
Figura 12 – Trincheira de infiltração e equipamentos de monitoramento.	47
Figura 13 – Planta baixa e corte AA' da trincheira de infiltração e perspectivas. Representação sem escala.	48
Figura 14 - Vertedouro triangular da caixa de entrada.	50
Figura 15 – Monitoramento da precipitação e do nível de água no interior da trincheira de infiltração no período de abril a setembro de 2017.	56
Figura 16 - Análise de sensibilidade do modelo em relação a condutividade hidráulica.	58
Figura 17 – Simulação para todo período monitorado.	59
Figura 18 – Simulação do evento E2.	59
Figura 19 – Simulação do evento E3.	60
Figura 20 – Simulação do evento E4.	61
Figura 21 – Treino e teste do modelo de árvore de decisão.	64
Figura 22 – Treino e teste do modelo de máquina de vetores suporte.	64
Figura 23 - Treino e teste do modelo de Floresta Aleatória.	65
Figura 24 – Treino e teste do modelo de rede neural.	66
Figura 25 – Simulação do modelo de árvore de decisão dados de 2017.	67
Figura 26 – Simulação do modelo de máquina de vetores suporte dados de 2017.	67
Figura 27 – Simulação do modelo de floresta aleatória dados de 2017.	68
Figura 28 – Simulação do modelo de rede neural dados de 2017.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Local de aplicação das técnicas compensatórias.....	25
Tabela 2 - Médias mensais da normal climatológica no período de 1991 a 2020, na Estação do Recife (Curado): precipitação, temperatura, umidade relativa, evaporação e insolação	45
Tabela 3 - Classificação textural do solo natural onde foi implantada a vala de infiltração.....	46
Tabela 4 – Parâmetros para avaliação do modelo de aprendizado de máquina.....	55
Tabela 5 - Valores da capacidade de infiltração (m/h) na base (kb) e na parede (kw) da simulação Km e da capacidade de infiltração k (m/h) da simulação Ks.	61
Tabela 6 - Coeficiente de determinação (R^2), razão de desvio (DR) e coeficiente de massa residual (CRM).....	62
Tabela 7 – Parâmetros estatísticos das simulações dos modelos dos dados de 2014 e 2017.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
CRM	Coeficiente de Massa Residual
DEN	Departamento de Energia Nuclear
DTR	<i>Decision Tree Regressor</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LID	<i>Low Impact Development</i>
MAE	Erro Absoluto Médio
ML	<i>Machine Learning</i>
MLP	<i>Multilayer Perceptron</i>
NBR	Norma Brasileira Registrada
NbS	<i>Nature-Based Solutions</i>
NSE	Nash–Sutcliffe
ONU	Organizações das Nações Unidas
RD	Razão de Desvio
RFR	<i>Random Forest Regressor</i>
RMSE	Erro Quadrático Médio
R ²	Coeficiente de Determinação
SUDS	<i>Sustainable Urban Drainage Systems</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
SWMMWW	<i>Stormwater Management Manual For Western Washington</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V_t	Volume total da amostra de solo
V_v	Volume de vazios
V_l	Volume de água
V_a	Volume de ar
V_s	Volume de sólidos
M_t	Massa total da amostra
M_a	Massa de ar
M_l	Massa de líquidos
M_s	Massa de sólidos
w	Umidade gravimétrica
θ	Umidade volumétrica
ρ_s	Massa específica dos sólidos
e	Índice de vazios
ϕ	Porosidade aparente
S_r	Grau de saturação
S_e	Saturação efetiva
$K(\theta)$	Condutividade hidráulica dependente da umidade
K_s	Condutividade hidráulica da simulação da base igual à da parede
κ	Permeabilidade intrínseca
ρ	Massa específica da água
g	Aceleração da gravidade
$\mu_v d$	Viscosidade dinâmica da água
$K_r(\theta)$	Permeabilidade relativa
ψ_m	Potencial matricial
ψ	Potencial de pressão/matricial
H	Potencial total da água no solo
z	Cota em relação ao nível de referência
q	Densidade de fluxo
$\partial\theta/\partial t$	Variação temporal da umidade
$\Delta h/L$	Gradiente de potencial total
Q	Fluxo de água

A	Área da seção de fluxo
η	Parâmetro de distribuição de poros
θ_r	Umidade residual
θ_s	Umidade saturada
α	Parâmetro de forma (1/hg)
n	Parâmetro de forma do modelo
m	Parâmetro de forma
VR	Volume do reservatório
Qe	Vazão efluente
Δt	Intervalo de tempo
k	Capacidade de infiltração
kb	Capacidade de infiltração na base
kw	Capacidade de infiltração na parede
Km	Condutividade hidráulica da simulação da base diferente da parede
Tr	Período de retorno da chuva

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 HIPÓTESE	16
3 OBJETIVOS	17
3.1 Objetivo Geral:.....	17
3.2 Objetivos Específicos:	17
4 REVISÃO DE LITERATURA	18
4.1 A urbanização e os impactos sobre a drenagem urbana	18
4.2 Evolução dos sistemas de drenagem.....	23
4.3 Técnicas Não-Estruturais	24
4.4 Técnicas Compensatórias Estruturais	25
4.5 Trincheira de Infiltração.....	28
4.6 Propriedades dos solos.....	31
4.6.1 Definição de solo	31
4.6.2 Propriedades básicas do solo	32
4.6.3 Potencial da água no solo	34
4.6.4 Retenção da água no solo.....	35
4.6.5 Fluxo da água no solo em meio poroso saturado e não saturado	38
4.7 Método Puls	39
4.8 Aprendizado de máquinas.....	41
5 MATERIAL E MÉTODOS	44
5.1 Área de estudo	44
5.2 Dimensionamento e Monitoramento da Trincheira de Infiltração	46
5.3 Análise Hidráulica da Trincheira de Infiltração.....	49
5.4 Método Puls	49
5.5 Eventos de chuva simulados e análise de sensibilidade	52
5.6 Aprendizado de Máquina	52
5.6.1 Árvore de Decisão (<i>Decision Tree Regressor</i>)	54

5.6.2 Máquina de Vetores de Suporte (<i>Support Vector Regressor</i>)	54
5.6.3 Floresta Aleatória (<i>Random Forest Regressor</i>)	54
5.6.4 Rede Neural Artificial (MLP Regressor)	54
5.6.5 Validação do potencial de desempenho e predição dos modelos	54
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
6.1 Monitoramento da Trincheira de Infiltração	56
6.2 Simulação da Trincheira de Infiltração utilizando o método Puls	57
6.3 Simulação da Trincheira de Infiltração utilizando aprendizado de máquina	62
7 CONCLUSÕES	71
8 TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais têm intensificado a frequência e a magnitude dos eventos pluviométricos extremos, impondo às áreas urbanas desafios crescentes para a gestão das águas pluviais. Os modelos convencionais de drenagem urbana, baseados na condução rápida do escoamento superficial, mostram-se insuficientes para lidar com os novos regimes de precipitação. Nesse contexto, abordagens mais resilientes e adaptativas vêm sendo adotadas, incorporando princípios de retenção, infiltração e liberação gradual da água (Yuan *et al.*, 2024).

A urbanização acelerada tem transformado extensas áreas permeáveis em superfícies impermeáveis, como edificações, vias pavimentadas e calçadas. Essa alteração resulta em aumento do escoamento superficial, elevação dos picos de vazão e redução do tempo de concentração das bacias urbanas (Monachese *et al.*, 2025). Consequentemente, ocorre a modificação do ciclo hidrológico natural, o que contribui para a recorrência de inundações, erosão e degradação da qualidade da água, devido ao carreamento de poluentes, como óleos, metais pesados, nutrientes e sedimentos (Cansian *et al.*, 2025).

Diante desses desafios, destacam-se as Soluções Baseadas na Natureza (*Nature-Based Solutions* – NbS) e as estratégias de drenagem urbana sustentável, conhecidas internacionalmente como *Low Impact Development* (LID) e *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), que visam restaurar processos hidrológicos naturais e mitigar os impactos da impermeabilização do solo. Essas abordagens descentralizadas promovem infiltração, retenção temporária e recarga hídrica (Monachese *et al.*, 2025). Entre as técnicas mais empregadas, destacam-se os jardins de chuva (Melo *et al.*, 2014), pavimentos permeáveis (Jabur *et al.*, 2015; Coutinho *et al.*, 2016), bacias de infiltração (Coutinho *et al.*, 2015) e, de forma particular, as trincheiras de infiltração (Melo *et al.*, 2016; Bezerra, 2018; Bezerra *et al.*, 2022).

A trincheira de infiltração é um dispositivo linear, geralmente preenchido com material granular de alta porosidade, projetado para armazenar temporariamente e infiltrar o volume de água pluvial proveniente de áreas impermeáveis. Essas estruturas apresentam vantagens como baixo custo, simplicidade construtiva e integração ao ambiente urbano. Entretanto, fatores como colmatção, baixa condutividade hidráulica do solo suporte, carga poluente elevada e chuvas intensas consecutivas podem reduzir sua eficiência. Estudos demonstram que trincheiras bem projetadas e

mantidas são capazes de tratar até 90 % do escoamento superficial (Jeon *et al.*, 2022). No entanto, a perda de permeabilidade ao longo do tempo e o acúmulo de sedimentos exigem atenção especial às práticas de manutenção (Blecken *et al.*, 2015).

Modelagens hidrológicas e hidráulicas têm sido amplamente utilizadas para compreender o desempenho dessas estruturas. Ebrahimian; Sokolovskaya; Wadzuk (2021), desenvolveram simulações contínuas e eventuais para avaliar a dinâmica de escoamento e armazenamento em trincheiras urbanas (modelo calibrado com dados de campo). Já Çırağ *et al.* (2024), utilizaram modelagem integrada de sistemas de drenagem urbana com trincheiras de infiltração usando *InfoWorks ICM* para analisar desempenho sob diferentes regimes pluviométricos.

No projeto dessas estruturas, a condutividade hidráulica saturada do solo suporte é um parâmetro determinante para o tempo de esvaziamento, influenciando o desempenho hidráulico e a prevenção de extravasamentos. Assim, é essencial o dimensionamento que considere características locais, como propriedades do solo, intensidade e frequência das chuvas e condições de saturação antecedente.

A cidade do Recife, localizada no Estado de Pernambuco, caracteriza-se por elevado regime pluviométrico nos meses de maio a julho, o que demanda soluções de infiltração capazes de suportar eventos consecutivos e solos frequentemente saturados. Embora diretrizes internacionais recomendem tempos de esvaziamento de 48 h a 72 h (Duchene; Mcbean; Thomson, 1994; SWMMWW, 2019), tais parâmetros nem sempre refletem as condições reais dos solos brasileiros, o que reforça a importância de estudos locais.

Neste contexto, o presente trabalho propõe a modelagem do comportamento hidráulico de uma trincheira de infiltração instalada em um lote urbano da cidade do Recife—PE. O estudo contempla a utilização de dados experimentais de campo, nível d'água, vazão de entrada, umidade do solo e variação do lençol freático, para aplicação de modelos numéricos e técnicas de aprendizado de máquina para representar os processos de infiltração e armazenamento no interior da estrutura.

A investigação busca oferecer subsídios técnicos ao dimensionamento, operação e manutenção de trincheiras de infiltração em áreas urbanas, consolidando sua aplicabilidade como solução eficiente e sustentável frente aos desafios hidrológicos impostos pela urbanização e pelas mudanças climáticas.

2 HIPÓTESE

Modelos matemáticos devidamente calibrados, incluindo o método de Puls e técnicas de aprendizado de máquina, representam com elevada acurácia o comportamento hidráulico de trincheiras de infiltração em ambiente urbano, permitindo análise preditiva do seu desempenho ao longo do tempo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral:

Demonstrar, com base em dados empíricos e modelagem computacional, que uma trincheira de infiltração instalada em ambiente urbano apresenta desempenho hidráulico eficaz no controle do escoamento superficial, por meio da análise de variáveis hidrodinâmicas monitoradas em campo e da simulação dos processos de infiltração e armazenamento da estrutura.

3.2 Objetivos Específicos:

Caracterizar a dinâmica hidráulica de uma trincheira de infiltração em área urbana, com base no monitoramento contínuo da precipitação, da vazão afluente, do nível d'água no interior da estrutura, do teor de umidade no solo adjacente e da variação do nível freático.

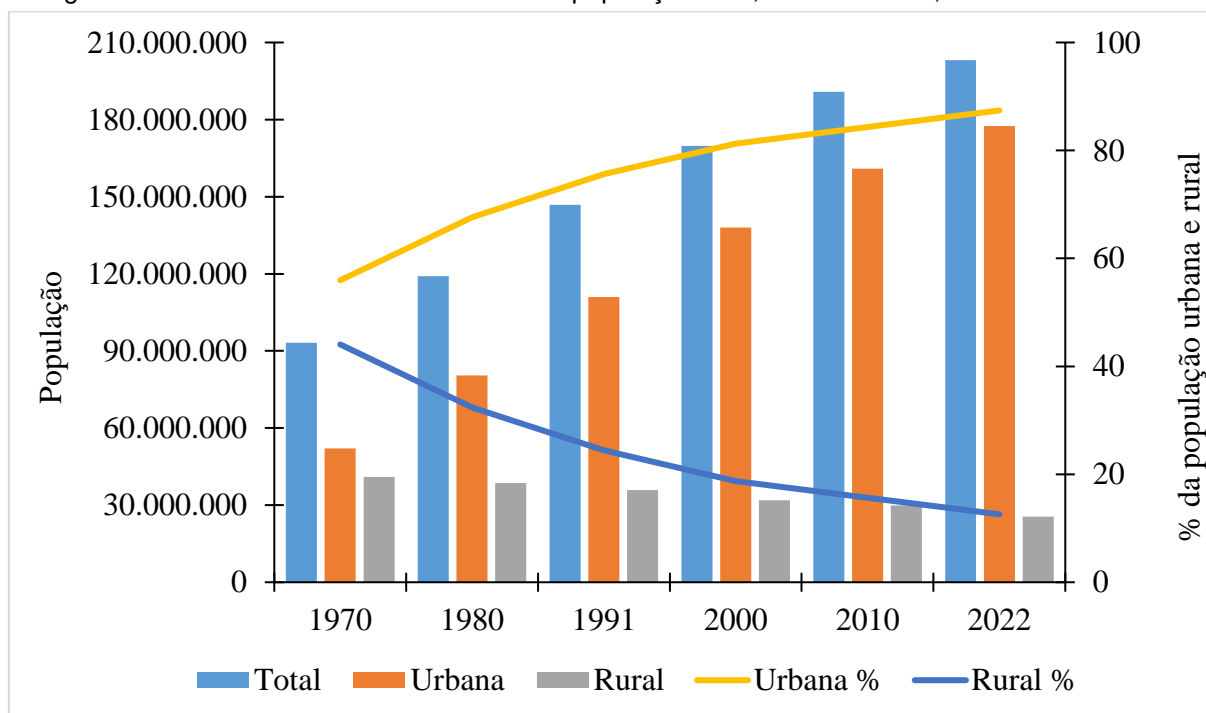
Avaliar a capacidade das simulações numéricas em representar o comportamento real da trincheira de infiltração, por meio da calibração e validação de modelos analíticos e de aprendizado de máquina, utilizando dados observacionais de campo.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 A urbanização e os impactos sobre a drenagem urbana

De acordo com os dados do IBGE, de 1970 a 2022 a população brasileira vivendo em áreas urbanas aumentou rapidamente, ocorrendo um declínio da população que reside no meio rural. Em 1970, a população brasileira era de 93.134.846 milhões de habitantes, desses 55,94% viviam em áreas urbanas e 44,06% em áreas rurais. De 1970 a 1980, a população rural diminuiu de 41 milhões para 38 milhões, já a população urbana cresceu de 52 milhões para 80 milhões; essa diminuição da população rural e crescimento da urbana ocorrem até os dias atuais. De acordo com o Censo realizado em 2022, a população total do Brasil passou a ser de 203.080.756 milhões de habitantes, sendo 177.508.417 milhões vivendo em áreas urbanas (IBGE, 2024). A Figura 1 apresenta a evolução da população brasileira por situação de domicílio, entre 1970 a 2022.

Figura 1 – Números absolutos e relativos da população total, urbana e rural, Brasil: 1970 – 2022.

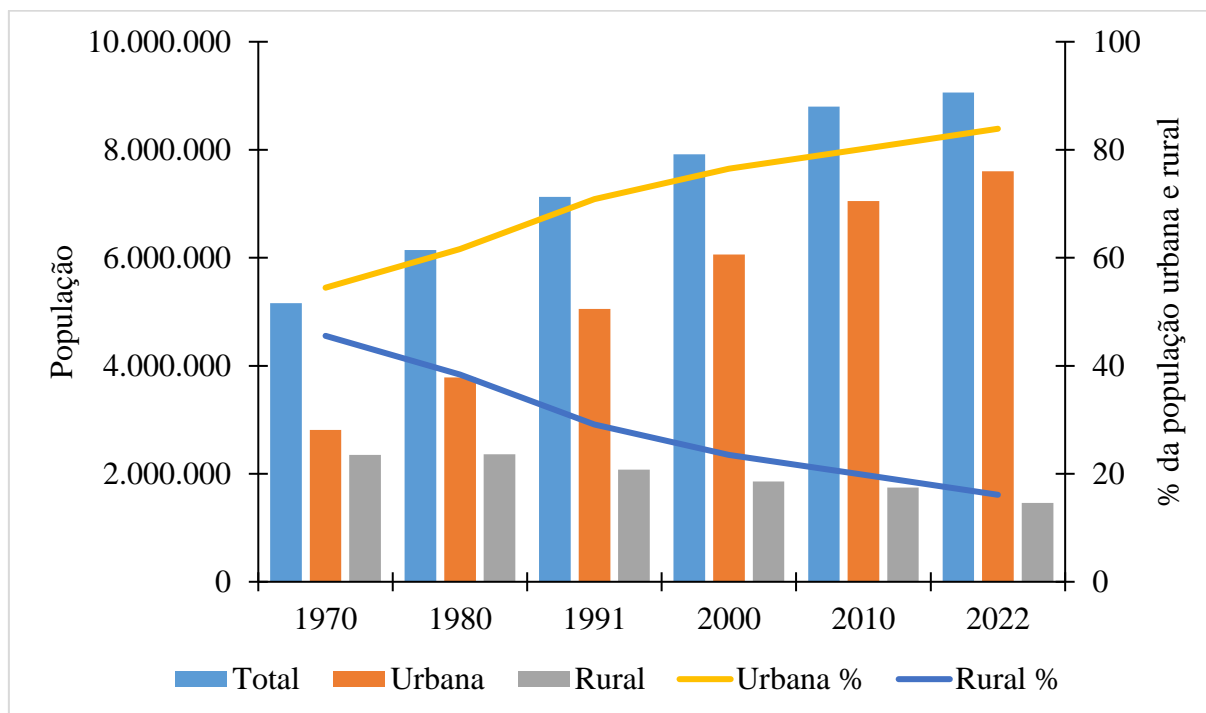


Fonte: IBGE (2024). Gráfico elaborado pelo autor.

Com relação a Pernambuco, estado onde o estudo foi realizado, observa-se mesma tendência registrada em cenário nacional. A população urbana passou de 2.810.415 milhões (54,46% da população total) em 1970 para 7.599.389 milhões

(83,89% da população total) em 2022 (IBGE, 2024). A Figura 2 apresenta a evolução da população pernambucana por situação de domicílio, entre 1970 a 2022.

Figura 2 - Números absolutos e relativos da população total, urbana e rural, Pernambuco: 1970 – 2022.

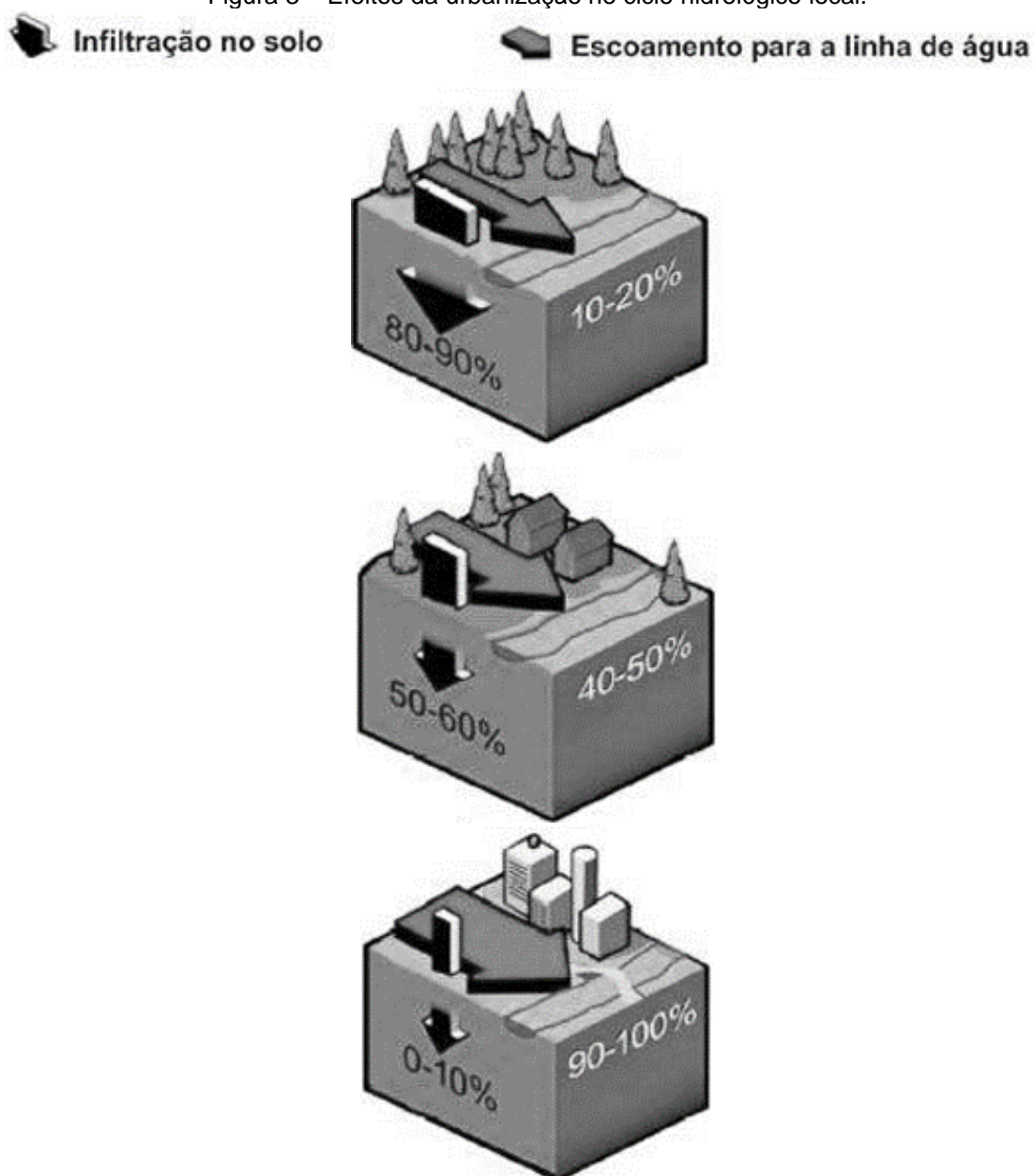


Fonte: IBGE (2024). Gráfico elaborado pelo autor.

Portanto, a população é majoritariamente urbana e com um enorme peso nas grandes cidades e regiões metropolitanas. Desta forma, deve-se ter atenção especial para essas áreas.

A urbanização provoca mudanças profundas nos ciclos hidrológicos locais das áreas metropolitanas. Superfícies anteriormente permeáveis e recobertas por vegetação natural são substituídas por pavimentos, telhados, vias e outras construções impermeáveis, reduzindo a infiltração e o armazenamento natural de água no solo. Como resultado, observam-se aumentos no volume de escoamento superficial, elevação das vazões de pico, diminuição dos tempos de concentração e redução da recarga de aquíferos e da vazão de base (Salvadore; Bronders; Batelaan 2015; Choubin *et al.*, 2019; Alamdari *et al.*, 2022; Zakizadeh *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023; McVey *et al.*, 2023). A Figura 3 apresenta os efeitos da urbanização no ciclo hidrológico local.

Figura 3 – Efeitos da urbanização no ciclo hidrológico local.



Fonte: Adaptado: Espindola; Daldegan (2016).

No meio urbano, o processo de drenagem de águas pluviais passa a ser substancialmente alterado. A inundação urbana constitui a manifestação mais visível dessas alterações, mas outros problemas como o transporte de sedimentos e de poluentes também se agravam (Alamdari; Hogue, 2022).

A produção de sedimentos em bacias hidrográficas urbanizadas tende a aumentar de forma significativa em decorrência da impermeabilização do solo, da construção de ruas, avenidas e rodovias, bem como da remoção de cobertura vegetal (Safdar *et al.*, 2024).

O crescimento desordenado da população urbana intensifica os problemas decorrentes da ausência de um planejamento adequado, especialmente no que diz respeito à implementação de sistemas de esgotamento sanitário e drenagem pluvial, bem como à falta de restrições quanto à ocupação de áreas de risco durante a elaboração dos Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano. Essas deficiências resultam, inevitavelmente, no aumento do escoamento superficial, devido a diversos fatores, e, conseqüentemente, na ocorrência de enchentes urbanas (Silva, 2007).

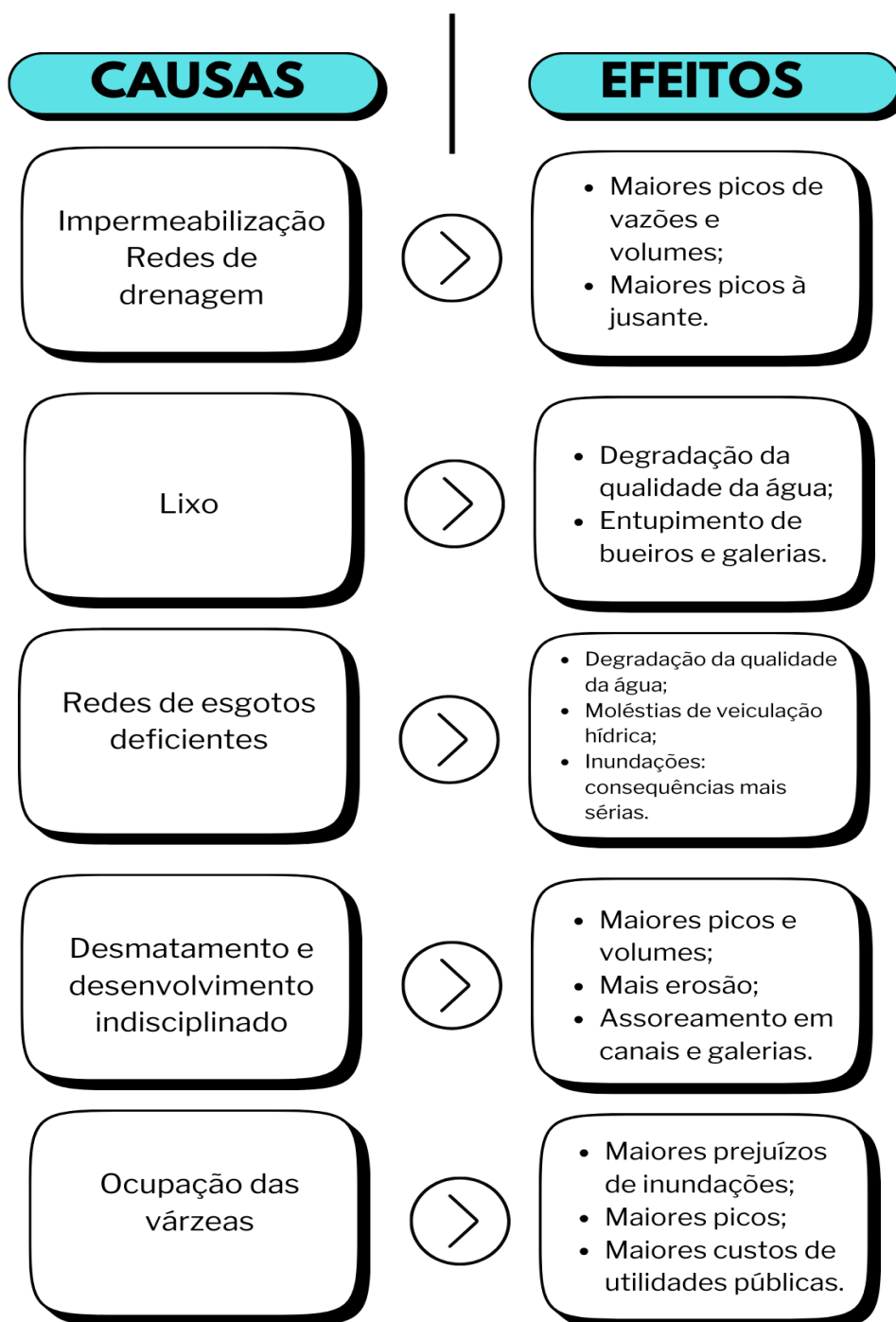
Porto *et al.* (1997) e Silva (2007), citam as causas e efeitos da urbanização sobre as inundações nos centros urbanos (Figura 4). Além disso, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (*United Nations Environment Programme - UNEP*) das Organizações das Nações Unidas (ONU), em reportagem escrita em 2020 (UNEP, 2020), aborda alguns fatores que aumentam o risco de inundações urbanas, dentre eles estão as mudanças climáticas e os padrões meteorológicos mais extremos causados por elas a longo prazo e as alterações na cobertura dos solos, como a retirada da vegetação.

As mudanças climáticas, embora mais recentemente inseridas nos debates públicos, constituem um dos principais desafios enfrentados pela sociedade contemporânea. Seus efeitos tendem a agravar problemas socioambientais já existentes (Apollaro; Alvim, 2017; Araújo; Oliveira, 2022), com repercussões que transcendem gerações e atingem múltiplas esferas de governança nacional, estadual e municipal. Trata-se de um fenômeno de elevada complexidade, cujas manifestações já são perceptíveis por meio do aumento do nível do mar, da modificação no regime de disponibilidade de água doce, da intensificação de eventos extremos como ciclones, tempestades de chuva e neve, entre outros (Souza; Barbosa; Costa, 2015).

No contexto brasileiro, os cenários projetados indicam que o semiárido nordestino está sujeito a um processo de desertificação progressiva, com sérias implicações para a segurança hídrica e a sustentabilidade das atividades agropecuárias, o que poderá acarretar impactos sociais e ambientais significativos para as populações que habitam essa região (Tavares; Arruda; Silva, 2019). Como consequência, é possível a intensificação dos fluxos migratórios para áreas urbanas, fenômeno associado à condição de "refugiados climáticos" ou "ambientais". Tal processo pressiona a infraestrutura urbana, especialmente nos setores de saneamento básico, uso e ocupação do solo — com aumento da compactação e

impermeabilização, supressão da vegetação e comprometimento dos corpos hídricos (Marques; Oliveira, 2016).

Figura 4 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas.



Fonte: Adaptado de Porto *et al.* 1997.

4.2 Evolução dos sistemas de drenagem

A evolução dos sistemas de drenagem urbano é um tema de grande importância para a gestão do ambiente urbano, principalmente em função do aumento da urbanização e das mudanças climáticas. Durante muitos anos, as cidades lidaram com problemas relacionados a inundações e alagamentos, decorrentes da falta de planejamento e da ausência de sistemas de drenagem adequados. No entanto, ao longo do tempo, houve uma evolução nos sistemas de drenagem das cidades, que passaram a considerar aspectos como a sustentabilidade e a adaptação às mudanças climáticas.

A primeira forma de sistema de drenagem urbana consistia em canais abertos que levavam a água da chuva para fora das cidades. No entanto, esses sistemas eram pouco eficientes e podiam causar poluição e problemas de saúde pública. Com o tempo, houve uma evolução no sentido de se construir redes subterrâneas de drenagem, que permitiam uma melhor gestão das águas pluviais.

Uma das principais mudanças nos sistemas de drenagem urbana ocorreram quando se passou a considerar aspectos relacionados à qualidade da água. Nesse período, surgiram as primeiras normas e regulamentos que exigiam o tratamento das águas pluviais antes de sua descarga nos corpos hídricos. Essa mudança foi importante para reduzir a poluição e melhorar a qualidade das águas.

Posteriormente, emergiu o conceito de infraestrutura sustentável para águas pluviais, com ênfase em tratamento, infiltração, retenção e redução de volume, frequentemente designado por “sistemas sustentáveis de drenagem” (SUDS) ou “infraestrutura verde” (*green infrastructure*). Por exemplo, revisões recentes mostram que as soluções baseadas na natureza (*Nature-Based Solutions*, NbS) estão se consolidando como alternativas eficazes para mitigar volume e velocidade de escoamento, bem como oferecer benefícios ambientais e sociais (Esraz-UI-Zannat; Dedekorkut-Howes; Morgan, 2024; Zhou *et al.*, 2024).

Ao mesmo tempo, a adaptação dos sistemas de drenagem urbanos às mudanças climáticas tornou-se imperativa, uma vez que eventos de chuva extrema e aumentos na frequência e intensidade de precipitações exigem redes que sejam flexíveis e resilientes. Estudos apontam para a necessidade de abordagem integrada, combinando as infraestruturas, monitoramento em tempo real, realizando modelagens avançadas e governança adaptativa (Bertrand-Krajewski, 2021; Xie *et al.*, 2025).

Finalmente, é relevante destacar que esta trajetória evolutiva não ocorre isoladamente: ela está fortemente vinculada à evolução das políticas públicas de drenagem e águas pluviais e ao crescente engajamento da sociedade civil no planejamento e operação desses sistemas. No contexto internacional, observa-se uma crescente integração entre infraestruturas hídricas, planejamento urbano de uso do solo e participação comunitária (Oliveira *et al.*, 2025).

4.3 Técnicas Não-Estruturais

As medidas não-estruturais referem-se a ações destinadas a reduzir os impactos adversos de inundações urbanas por meio de instrumentos regulatórios, educacionais e de alerta, em contraposição às intervenções físicas (Wang *et al.*, 2022).

Em muitos cenários urbanos, essas estratégias podem oferecer uma melhor relação custo-benefício e resultados mais duradouros, sobretudo quando combinadas com instrumentos de planejamento territorial, regulação de uso do solo, educação ambiental e sistemas de aviso (Zhou *et al.*, 2024).

De modo específico, as principais categorias de medidas não-estruturais incluem:

1. Regulamentação do uso e ocupação do solo – delimitação de zonas de risco, limitação de impermeabilização e índices de aproveitamento para reduzir o deflúvio superficial e a sobrecarga de sistemas de drenagem convencionais;
2. Sistemas de previsão e alerta de inundação – monitoramento hidrológico/hídrico, aviso à população e retirada de bens e pessoas antes de eventos extremos, diminuindo exposição e danos (Shih; Kuo; Lai, 2019);
3. Educação ambiental e engajamento comunitário – conscientização sobre preservação de áreas permeáveis, manutenção de drenagem natural, cooperação para ações de resposta e recuperação; além de instrumentos de seguro-enchente e incentivos econômicos para redução de vulnerabilidade (Oneto; Canepa, 2023).

Apesar de cada uma dessas medidas poder gerar benefícios significativos por si só, a literatura internacional destaca que nenhuma medida isolada é suficiente para

gerir adequadamente o risco de inundação em contextos urbanos complexos: é necessária uma abordagem integrada que combine soluções estruturais com medidas não-estruturais de caráter regulatório e participativo (Zhu *et al.*, 2024).

Finalmente, é importante reconhecer que a eficácia dessas estratégias depende fortemente de fatores institucionais, financeiros, de governança e de equidade social, lacunas que ainda persistem, em especial nos países em desenvolvimento (Zhou *et al.*, 2024).

4.4 Técnicas Compensatórias Estruturais

As técnicas compensatórias estruturais correspondem a intervenções físicas de engenharia destinadas a atenuar os impactos da urbanização sobre o escoamento superficial, atuando na retenção, detenção, infiltração ou armazenamento das águas pluviais. Essas estruturas são fundamentais na gestão da drenagem urbana sustentável, pois reduzem o volume escoado, as vazões de pico e a poluição difusa associada ao aumento da impermeabilização das superfícies urbanas.

Em linhas gerais, essas medidas têm como propósito restaurar, tanto quanto possível, o balanço hidrológico pré-urbano, permitindo que parte da água da chuva seja retida e infiltre no solo, retardando a chegada das vazões à rede de drenagem (Esraz-UI-Zannat; Dedekorkut-Howes; Morgan, 2024; Zhang; Wang; Gong, 2024).

Para Urbonas; Stahre (1993), Righetto (2009) e Baptista; Nascimento; Barraud (2015), as técnicas compensatórias podem ser classificadas de acordo com o local de aplicação em três metodologias (Tabela 1).

Tabela 1 – Local de aplicação das técnicas compensatórias.	
Técnicas	Local
Controle na fonte	Estão localizadas próximo aos locais onde são gerados os deflúvios, sendo elas: poços de infiltração; valas e valetas; micro reservatórios; e telhados de armazenamento.
Lineares	Inseridas junto aos sistemas viários, pátios, estacionamento e ruas com grandes áreas de drenagem associadas, através de pavimento poroso, valas de detenção e trincheiras de infiltração.
Controle centralizado	São bacias de detenção e retenção associadas às áreas de drenagem de maior porte.

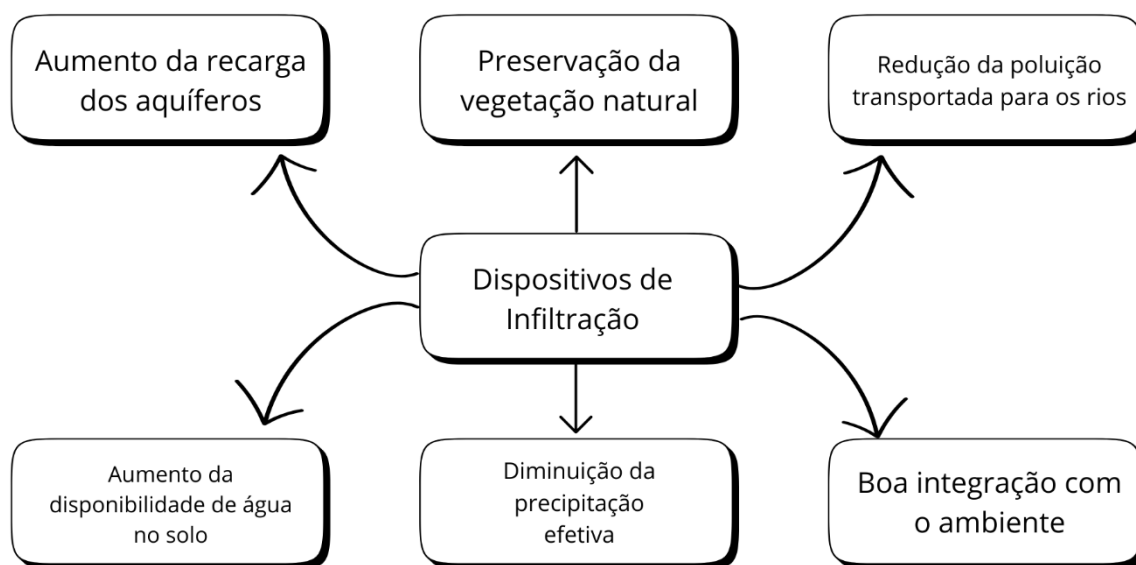
Fonte: Autor (2025).

Essa classificação reflete a lógica da drenagem descentralizada, característica dos sistemas de drenagem urbana sustentável (SUDS) e de

infraestruturas verdes (Zhou *et al.*, 2024). Tais soluções procuram distribuir o controle hidrológico em múltiplos pontos da bacia, reduzindo o impacto da urbanização e aumentando a resiliência do sistema frente a eventos extremos.

As vantagens dos dispositivos que permitem maior infiltração e percolação resumem-se na Figura 5 (Azzout *et al.*, 1994; Bettles, 1996; Nascimento; Baptista; Souza, 1997; Souza, 2002; Coutinho, 2011; Baptista; Nascimento; Barraud, 2015).

Figura 5 – Vantagens da instalação de dispositivos de infiltração e percolação.



Fonte: Autor (2025).

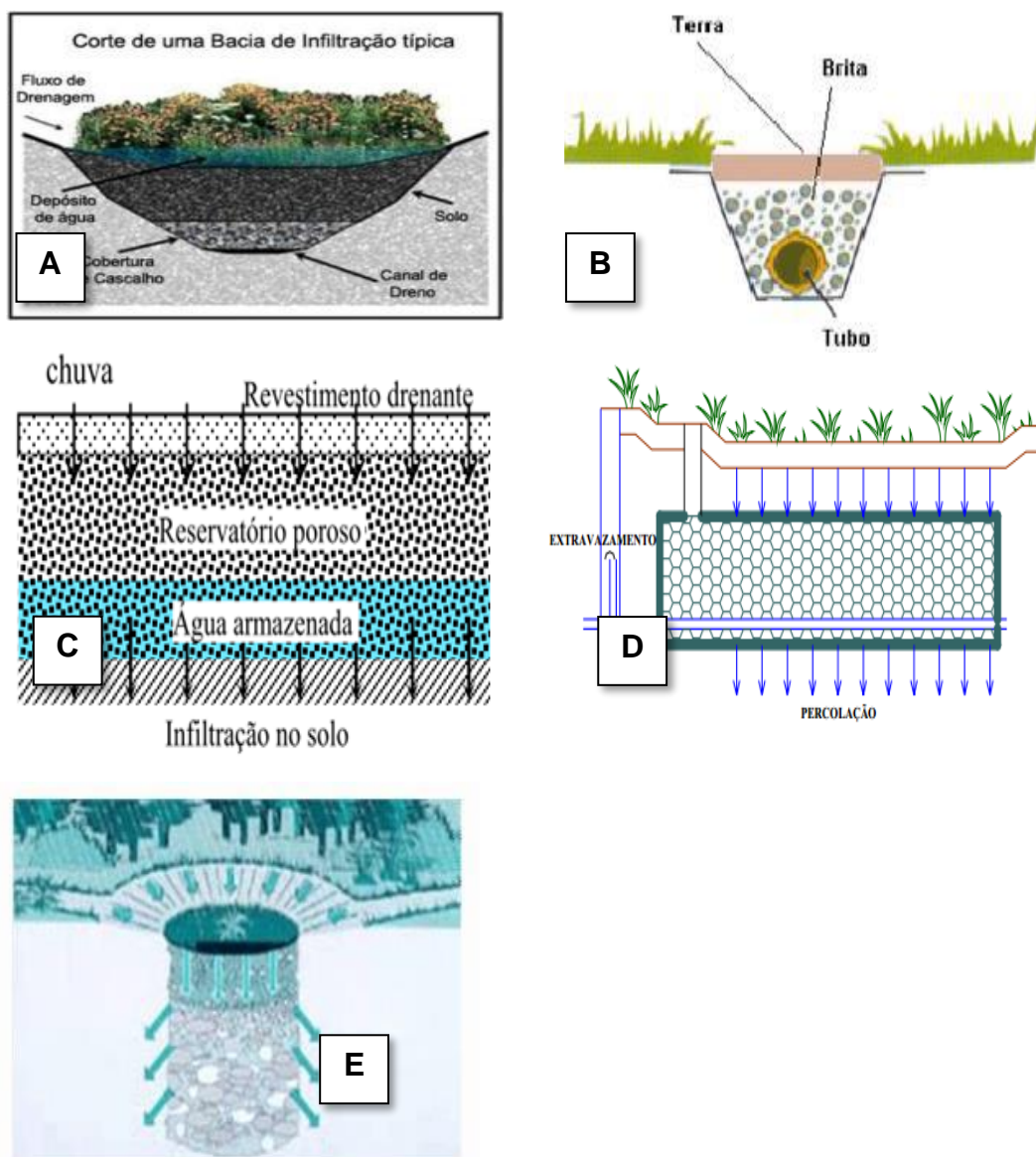
O desempenho das estruturas compensatórias está intimamente relacionado às propriedades hidráulicas e geotécnicas do solo, em especial à condutividade hidráulica saturada (K_s).

Valores elevados de K_s favorecem a infiltração, mas podem elevar o risco de contaminação do aquífero devido à menor capacidade de filtração de poluentes (Silva, 2007; Coutinho, 2011). Por outro lado, valores muito baixos limitam a eficiência do dispositivo, pois a água tende a permanecer na superfície, comprometendo o funcionamento hidráulico (Carvalho; Luiz; Gonçalves, 2012).

Estudos recentes reforçam a importância de caracterizar o solo antes da implantação dos sistemas. Zhang; Wang; Gong (2024), demonstraram que o desempenho hidráulico de pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração podem variar em função da heterogeneidade do solo.

Dentre os dispositivos de infiltração, podem-se considerar a bacia de retenção, valetas de infiltração, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis e poços de infiltração (Figura 6).

Figura 6 – Estruturas compensatórias de drenagem.



Fonte: Adaptado de Mujovo (2014).

As bacias de infiltração possuem como finalidade regularizar as vazões provenientes das precipitações, possibilitando a devolução a jusante de vazões adequadas, de acordo com um limite estabelecido previamente ou determinado pela capacidade de escoamento de uma rede ou curso d'água já existente (Bilhaça, 2006), conforme Figura 6 – A.

As valetas de infiltração são empregadas como medidas de compensação dentro do sistema viário, desempenhando a função de direcionamento ao longo do terreno. A água é introduzida de maneira direta através do escoamento superficial e, ocasionalmente, por meio de afluentes por meio de tubulações. A remoção da água pode ocorrer por meio da infiltração ou do escoamento superficial, diretamente para o corpo receptor (Baptista; Nascimento; Barraud, 2015), conforme Figura 6 – B.

Os pavimentos permeáveis são comumente utilizados em áreas urbanas, como nas vias e estacionamentos. Eles retêm a água em reservatórios localizados sob a superfície do pavimento pelo tempo necessário para que seja infiltrada no solo. Além disso, atuam como reservatórios de amortecimento, utilizando drenos auxiliares para lidar com o excesso de água (Campana; Eid, 2003), conforme Figura 6 – C.

As trincheiras de infiltração são comumente instaladas próximas à superfície do solo ou em pequena profundidade, com o objetivo de coletar águas pluviais provenientes de fluxo perpendicular ao seu comprimento, promovendo a infiltração e o armazenamento temporário. Essas trincheiras são compostas por valetas preenchidas com material granular, conforme Figura 6 – C.

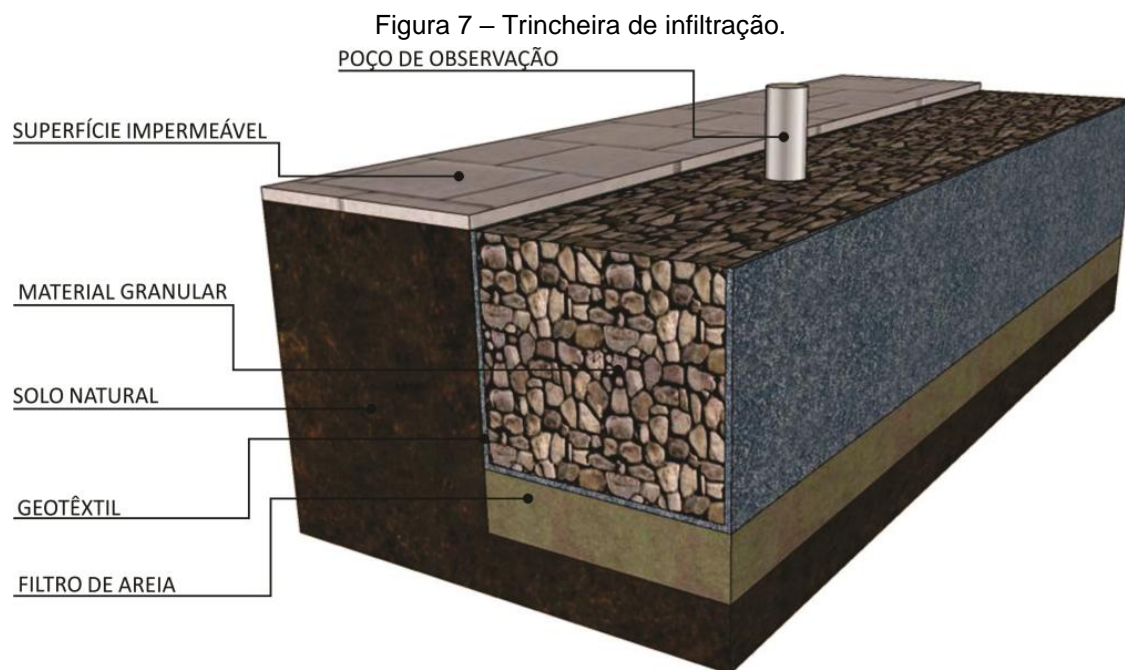
Os poços de infiltração são estruturas pontuais com ocupação mínima da área superficial, projetados para direcionar as águas pluviais diretamente para o subsolo, através da infiltração. Essa técnica apresenta a vantagem de ser aplicável tanto em áreas permeáveis quanto em áreas onde a camada superficial tem baixa permeabilidade, contanto que existam camadas mais profundas com capacidade de infiltração significativa (Baptista; Nascimento; Barraud, 2015), conforme Figura 6 – E.

4.5 Trincheira de Infiltração

Dentro do conjunto de técnicas compensatórias estruturais, as trincheiras de infiltração destacam-se como dispositivos lineares de controle próximo à fonte, projetados para armazenar temporariamente o escoamento superficial e promover sua infiltração gradual no subsolo. Tais sistemas têm sido amplamente utilizados em áreas urbanas de pequeno e médio porte, integrando os princípios de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) e Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) (Ebrahimian; Sokolovskaya; Wadzuk, 2021).

As trincheiras de infiltração consistem em áreas cavadas e preenchidas com material granular altamente poroso, visando a estabilidade dos taludes e evitando a entrada de materiais mais grosseiros no sistema. Para controle e prevenção de

partículas finas, é comum utilizar uma manta geotêxtil. Essas trincheiras são sistemas de controle implantados na própria fonte geradora e geralmente são instalados em lotes urbanos de menor porte (Chahar; Graillot; Gaur, 2012; Júnior; da Silva; Mendiando, 2015; Melo, *et al.*, 2016; Conley *et al.*, 2020), conforme Figura 7.



Fonte: Melo (2015).

As trincheiras de infiltração oferecem diversas vantagens, tais como sua integração harmoniosa com o ambiente, a possibilidade de aproveitar o espaço para outros fins e a capacidade de serem instaladas em áreas sem finalidade específica. Por outro lado, as trincheiras de infiltração também apresentam algumas desvantagens, como a dificuldade de tratar o escoamento das águas, a redução do desempenho ao longo do tempo devido ao entupimento do sistema e a complexidade do monitoramento do seu funcionamento. A instalação dessas trincheiras requer cuidados especiais, incluindo a verificação da existência de uma camada impermeável e do nível do lençol freático, a avaliação da declividade do terreno, a consideração dos tipos e usos do solo e a avaliação da cobertura vegetal existente (Souza, 2002; Chahar; Graillot; Gaur, 2012; Conley *et al.*, 2020).

A colmatagem nas trincheiras de infiltração é um processo que altera a condutividade hidráulica na interface estrutura-solo. Esta alteração é um processo natural, mas que pode ser acelerada com falta de manutenção nos dispositivos. As partículas em suspensão nas águas pluviais e que são armazenadas no sistema

depositam-se no fundo, obstruindo os poros do solo e diminuindo a condutividade hidráulica. Devido a este processo, a trincheira de infiltração perde eficiência ao longo do tempo.

Diversos estudos, nacionais e internacionais, têm avaliado o desempenho e os critérios de dimensionamento das trincheiras de infiltração, combinando métodos experimentais, numéricos e de campo.

Graciosa; Mendiando; Chaudhry (2008a) propuseram um modelo bidimensional de infiltração voltado à estimativa do volume infiltrado e do campo de umidade ao redor de trincheiras. Os autores observaram que a presença dessas estruturas promoveu redução significativa do escoamento superficial, mesmo sob condições de solo saturado, evidenciando o potencial de mitigação de cheias urbanas. Em sequência, Graciosa; Mendiando; Chaudhry (2008b) desenvolveram uma metodologia de dimensionamento baseada em balanço hídrico, na qual o volume de entrada é determinado pela curva intensidade-duração-frequência (IDF) local e o volume de saída pela taxa de infiltração do solo. Os experimentos, conduzidos em solos arenosos e argilosos, foram calibrados por ensaios de campo e apresentaram resultados consistentes entre tipos de solo, confirmando a robustez do método.

Em estudos posteriores, Lucas *et al.* (2015) analisaram os aspectos construtivos e operacionais de técnicas compensatórias, incluindo trincheiras e poços de infiltração. Constatou-se que o transporte de partículas finas reduziu a permeabilidade das mantas geotêxteis, ocasionando decréscimos de 30 % a 90 % na taxa de infiltração em trincheiras e de 40 % a 70 % em poços de infiltração, destacando a relevância da manutenção preventiva e de sistemas de pré-tratamento.

Resultados complementares foram obtidos por Júnior; da Silva; Mendiando (2015), que monitoraram uma trincheira de infiltração em área residencial de São Carlos (SP) durante cinco meses. O sistema apresentou volume médio infiltrado de 8 m³/mês, sob precipitação de 220 mm, e volume útil de armazenamento de 5,7 m³, demonstrando desempenho satisfatório em escala real.

Em Recife, Melo *et al.* (2016) analisaram eventos de 2014 e verificaram que a trincheira estudada foi capaz de infiltrar 64,6 % do volume de água recebido, mesmo com o solo úmido. Bezerra *et al.* (2022) ampliaram esse estudo, confirmando a eficiência hidráulica do sistema, mas destacaram dificuldades de monitoramento em períodos de elevada pluviosidade, quando chuvas sucessivas ocorriam antes da

completa drenagem da trincheira, de modo que a água remanescente do evento anterior reduzia a capacidade de infiltração no evento subsequente.

No contexto internacional, Ebrahimian; Sokolovskaya; Wadzik (2021), realizaram modelagem dinâmica contínua de trincheiras urbanas em Filadélfia (EUA), com base em três anos de monitoramento. O estudo demonstrou que a modelagem não estacionária captura melhor a resposta do sistema, com atraso das vazões de pico e redução expressiva de volumes escoados, evidenciando o papel das trincheiras no controle descentralizado de cheias. De forma semelhante, Çırağ *et al.* (2024), avaliaram 12 trincheiras de infiltração por meio do software InfoWorks ICM, quantificando a influência de diferentes cenários de chuva e regimes de manutenção. Os autores verificaram alta sensibilidade do desempenho hidráulico à frequência de limpeza, reforçando a necessidade de programas sistemáticos de manutenção.

Quanto aos métodos de dimensionamento, predominam duas abordagens amplamente adotadas: (i) o método do balanço hídrico, proposto por Graciosa; Mendiando; Chaudhry (2008b), e (ii) o método da curva envelope, desenvolvido por Souza (2002), Silveira; Goldenfum (2007) e Santos (2014). No método da curva envelope (*rain-envelope method*), o volume do dispositivo deve suportar a máxima diferença entre volumes acumulados de entrada e saída, considerando a porosidade efetiva do material de enchimento. A curva de entrada é derivada da IDF local e a de saída depende das características de infiltração do solo.

De forma geral, os resultados desses estudos convergem para a conclusão de que as trincheiras de infiltração são soluções eficazes para o controle descentralizado do escoamento pluvial, desde que adequadamente dimensionadas e acompanhadas de manutenção regular.

4.6 Propriedades dos solos

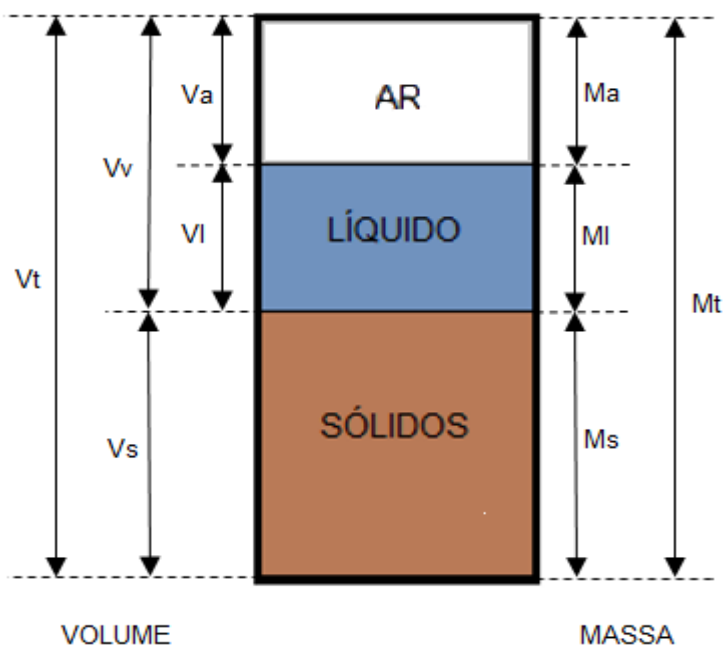
4.6.1 Definição de solo

O solo é um sistema trifásico, constituído por uma fase sólida, uma fase líquida e uma fase gasosa (Figura 8). A parte sólida é composta de matéria orgânica e mineral, a parte líquida é composta por soluções aquosas de sais minerais e componentes orgânicos, a parte gasosa é constituída por ar.

Devido à natureza heterogênea das partículas sólidas, formam-se espaços vazios (poros), que podem ser parcialmente ou totalmente preenchidos por água ou ar, dependendo do grau de umidade do solo (Alves, 2009).

Segundo Hillel (1998), é nos poros do solo que ocorrem os processos dinâmicos de trocas gasosas e de movimentação da água.

Figura 8 – Representação simplificada do sistema trifásico do solo.



Fonte: Adaptado de Hillel (1988).

Onde: V_t é o volume total da amostra de solo e V_v é o volume de vazios, que consiste no volume de poros da amostra, isto é, na soma dos volumes ocupados por água (V_l) e pelo ar (V_a); V_s representa o volume de sólidos presente no solo. M_t é a massa total da amostra de solo, M_a a massa de ar, M_l a massa de líquidos e M_s a massa dos sólidos.

A partir da determinação dessas grandezas, podem-se estabelecer as relações entre elas, definindo algumas das propriedades básicas do solo.

4.6.2 Propriedades básicas do solo

4.6.2.1 Umidade gravimétrica

A umidade gravimétrica é a relação entre a massa de água e a massa de partículas sólidas do solo:

$$w = \frac{m_l}{m_s}$$

Equação 1

4.6.2.2 Umidade volumétrica

A razão entre o volume de água e o volume total de uma amostra de solo representa a umidade volumétrica:

$$\theta = \frac{V_l}{V_t}$$

Equação 2

4.6.2.3 Massa específica do solo

A massa específica do solo é representada pela razão entre a massa das partículas sólidas e o volume total da amostra:

$$\rho = \frac{m_s}{V_t}$$

Equação 3

4.6.2.4 Massa específica das partículas do solo

A massa específica das partículas sólidas é a relação entre a massa das partículas sólidas pelo volume ocupado pelas partículas sólidas da amostra de solo analisada:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

Equação 4

4.6.2.5 Porosidade aparente

A razão entre o volume de vazios e o volume total de uma amostra de solo representa a porosidade aparente:

$$\phi = \frac{V_v}{V_t}$$

Equação 5

Onde essa expressão retrata a porcentagem de poros conectados e não conectados.

4.6.2.6 Índice de vazios

O índice de vazios é a relação entre o volume de poros do solo e o volume das partículas sólidas, representado pela seguinte expressão:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Equação 6

4.6.2.7 Grau de saturação

O grau de saturação é a razão entre o volume de água e o volume de poros existentes na amostra de solo:

$$GS = \frac{V_l}{V_v}$$

Equação 7

Observação: O grau de saturação deve ser expresso em porcentagem.

4.6.2.8 Saturação efetiva

É uma medida da quantidade real de água presente nos poros em um dado momento, expressa como uma fração ou porcentagem da porosidade total menos a umidade residual.

$$S_e = \frac{\theta_x - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{Equação 8}$$

4.6.2.9 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade do meio poroso que expressa a facilidade do solo em transportar água através dos poros. A passagem da água é afetada pela forma, tamanhos dos poros, propriedades do fluido e pelo teor de umidade presente no solo.

$$K(\theta) = \left(\frac{\kappa \rho g}{\mu_{vd}} \right) \cdot K_r(\theta) \quad \text{Equação 9}$$

Onde: $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica [$L \cdot T^{-1}$], κ a permeabilidade intrínseca [L^2], ρ a massa específica da água [$M \cdot L^{-3}$], g é a aceleração da gravidade [$M \cdot T^{-2}$], μ_{vd} a viscosidade dinâmica da água [$M \cdot T^{-1} \cdot L^{-1}$] e $K_r(\theta)$ é definida como a permeabilidade relativa, a qual varia entre 0 e 1. A permeabilidade relativa considera a dependência da condutividade hidráulica sobre a umidade (θ) ou do potencial matricial (ψ_m).

A diferença principal do escoamento em meio poroso saturado e não saturado é a condutividade hidráulica. Solos saturados apresentam condução máxima do fluido, pois os poros estão completamente preenchidos. Já no solo não saturado, a condução do fluido decresce, pois, seus poros estão preenchidos por água e ar. Desta forma, a condutividade hidráulica varia com o grau de umidade do solo e apresenta seu valor máximo na saturação (Pauletto *et al.*, 1988).

4.6.3 Potencial da água no solo

A caracterização do estado de energia da água no solo é determinada pela energia potencial. O componente da energia cinética é praticamente desprezível, pois os escoamentos de água nesses casos são de baixas velocidades.

O movimento da água no solo ocorre quando existe diferença de potencial total. Assim, o potencial total de água no solo pode ser descrito como a soma das contribuições de outros potenciais (Hillel, 1998).

$$\psi_t = \psi_p + \psi_g + \psi_o + \psi_m \quad \text{Equação 10}$$

O Potencial de pressão é considerado apenas quando a pressão sobre a água é positiva (pressão maior que a atmosférica). O potencial gravitacional representa a energia potencial devido à posição vertical do volume em consideração a um dado referencial do meio poroso. O Potencial osmótico ou de soluto está relacionado à concentração de solutos da água no solo, geralmente é desprezível, pois a concentração é pequena. O potencial matricial ou mátrico descreve a contribuição das forças de retenção da solução no solo (capilaridade e adsorção).

Logo, desprezando a parcela de potencial osmótico e somando-se os termos, podemos obter o potencial total em termos de energia por unidade de peso (Equação 11). Conhecendo os potenciais da água nos diversos pontos do solo, pode-se determinar o sentido do movimento.

$$H = \psi + z$$

Equação 11

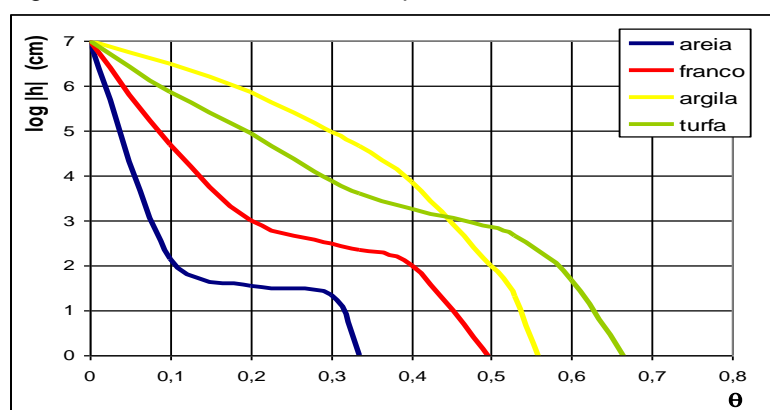
Onde: H é o potencial total; ψ é o potencial de pressão (solo saturado) ou potencial matricial (solo não saturado) e z corresponde à altura em relação a algum nível de referência.

4.6.4 Retenção da água no solo

4.6.4.1 Curva de retenção de água no solo

A curva característica do solo ou curva de retenção de água no solo é a relação entre o potencial matricial de água no solo e a umidade do solo. Também pode ser expressa como a energia imposta para retirada do volume de água do solo (Klar, 1988). Sendo essencial para modelagem de fluxo de água em meio não saturado, a curva de retenção de água no solo expressa uma importante medida da característica hidráulica do solo. As curvas são diferentes para cada tipo de solo, devido à distribuição dos poros (Figura 9).

Figura 9 – Curva característica representativa de diferentes solos.



Fonte: Adaptado de Bezerra (2018).

Existem na literatura alguns modelos matemáticos que podem descrever a curva de retenção de água, como Brooks; Corey (1964), Haverkamp; Vauclin (1979) e van Genuchten (1980). Segundo Arraes (2014), as equações mais utilizadas em modelos matemáticos são as de Brooks; Corey (1964) e van Genuchten (1980).

A equação de Brooks; Corey (1964) é definida pela Equação 12:

$$S_e = \left(\frac{\psi}{\psi_g} \right)^{-\eta} \quad \text{Equação 12}$$

Onde: $S_e \leq 1$, e η um parâmetro característico do solo, que indica a distribuição do tamanho dos poros.

A equação de van Genuchten (1980):

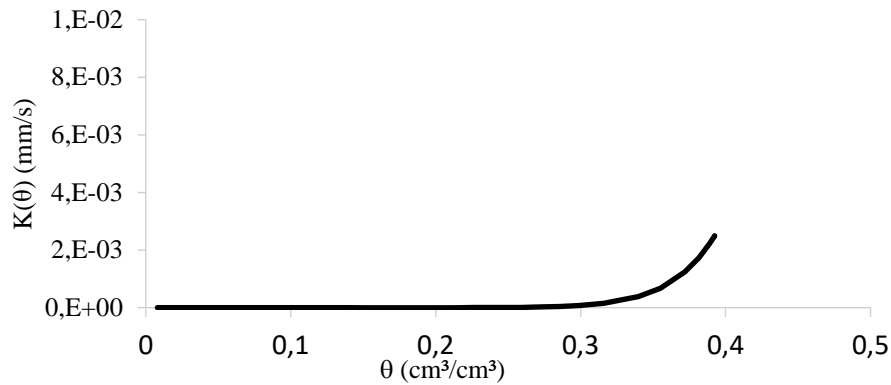
$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha\psi|^n]^{-m} \quad \text{Equação 13}$$

Onde: $m = 1 - 1/n$; $n > 1$, (Mualem, 1976) e $m = 1 - 2/n$; $n > 2$, Burdine (1953), sendo S_e a saturação efetiva; θ_r e θ_s a umidade volumétrica residual e saturada, respectivamente; $\alpha = 1/h_g$ a pressão de entrada de ar e n e m parâmetros de forma.

4.6.4.2 Curva de condutividade hidráulica

A curva de condutividade hidráulica do solo é a relação entre a condutividade hidráulica e a umidade volumétrica, conforme é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Representação da curva de condutividade hidráulica.



Fonte: Adaptado de Bezerra (2018).

Os modelos mais utilizados para determinação da condutividade hidráulica não saturada são os de Burdine (1953), Brooks; Corey (1964), Mualem (1976) e van Genuchten (1980).

O modelo de condutividade hidráulica de Burdine (1953) depende da saturação efetiva:

$$K_r = (S_e)^2 = \frac{\int_0^{S_e} \frac{1}{\psi^2} dS_e}{\int_0^1 \frac{1}{\psi^2} dS_e} \quad \text{Equação 14}$$

O modelo de condutividade hidráulica de Brooks; Corey (1964) representa a curva em função da umidade volumétrica:

$$K(\theta(\psi)) = K_s(S_e)^\eta = K_s \left(\frac{\theta(\psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad \text{Equação 15}$$

O modelo de condutividade hidráulica de van Genuchten (1980) representa a curva em função da umidade volumétrica:

$$K(\theta(\psi)) = K_s(S_e)^2 \left(1 - \left(1 - (S_e)^{1/m} \right)^m \right) \quad \text{Equação 16}$$

O modelo de condutividade hidráulica de Mualem (1976) representa a curva em função da umidade volumétrica (Equação 17). Essa equação combinada a equação de van Genuchten (1980) Equação 13), resultando na Equação 18, que também retrata a curva de condutividade hidráulica.

$$K(\theta(\psi)) = (S_e)^{0,5} \left[\frac{\int_0^{S_e} \frac{1}{\psi} dS_e}{\int_0^1 \frac{1}{\psi} dS_e} \right]^2 \quad \text{Equação 17}$$

$$K(\theta(\psi)) = K_s(S_e)^{0,5} \left(1 - \left(1 - (S_e)^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad \text{Equação 18}$$

4.6.5 Fluxo da água no solo em meio poroso saturado e não saturado

Nas condições de saturação, a umidade do solo é constante e aproximadamente igual à porosidade ($\theta = \phi$) e a condutividade hidráulica também é constante, sendo chamada de condutividade hidráulica saturada (K_s). Já em condições não saturadas, o teor de umidade está abaixo da saturação ($\theta < \eta$). Problemas com condições de solo não saturado são mais complexos, pois há uma variação da umidade, variando a condutividade hidráulica e os potenciais.

4.6.5.1 Equação de Darcy

A equação de Darcy (Equação 19) quantifica a densidade de fluxo laminar de água em meio poroso saturado, determinando que o volume de água que passa por unidade de tempo e de área em um meio poroso é diretamente proporcional ao gradiente de potencial total e a condutividade hidráulica saturada.

$$Q = -K(\theta_s)A \frac{\Delta h_t}{L} = -K_s A \quad \text{Equação 19}$$

Onde: Q é o fluxo ($L.T^{-1}$); K_s a condutividade hidráulica do solo ($L.T^{-1}$) em função de θ_s , A é a área em um meio poroso e $\Delta h_t/L$ é o gradiente de potencial total.

A equação de Darcy é aplicada em condições de escoamento laminar, onde as interações do solo e da água não ocasionam variações na fluidez e na permeabilidade mediante mudança de gradiente. A equação descreve em condições macro do fluxo de água pelo meio poroso (Coutinho, 2011). A equação é válida havendo diferença de potencial do local de maior para o de menor potencial, o que justifica o sinal negativo da equação.

4.6.5.2 Equação de Darcy-Buckingham

Buckingham, em 1907, fez o primeiro trabalho que se tem notícia sobre o movimento da água em solo com condições de não saturação. Nessa condição, quando atua o potencial mátrico e potencial gravitacional, os processos do fluxo são mais complexos, pois podem promover mudanças no estado e quantidade de água durante o fluxo. Sendo a equação de Darcy-Buckingham:

$$q = -K(\psi) \frac{\partial h_t}{\partial z} = -K(\psi) \left(\frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{Equação 20}$$

O sinal negativo desta fórmula tem a mesma interpretação física da Equação 19, que indica o fluxo de água se dá na direção ao menor potencial hidráulico.

4.6.5.3 Equação de Richards

A equação de Richards (Equação 21) descreve o fluxo de água no solo nas duas condições, em condições saturadas e não saturadas. Richards (1931) combinou a equação de Darcy-Buckingham com a equação da continuidade.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \quad \text{Equação 21}$$

Onde: q é a densidade de fluxo que entra no elemento de volume e pode ser decomposta nas três direções ortogonais x , y e z , onde θ é a umidade volumétrica.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad \text{Equação 22}$$

Onde: $\partial \theta / \partial t$ é a variação da quantidade de água com o tempo.

A resolução da equação de Richards é possível com informações relacionadas às condições de contorno e características hidrodinâmicas, como curva de retenção e curva de condutividade hidráulica, além de um estado inicial de pressão ou de conteúdo de água no solo. Lassabatère *et al.* (2006) e Bagarello *et al.* (2013), descreveram os parâmetros necessários para resolução da equação de Richards através da metodologia BEST. A partir de ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel simples, para se obter parâmetros de forma e de escalas das curvas $h(\theta)$ e $K(\theta)$.

4.7 Método Puls

O Método de Puls é uma técnica clássica de roteamento hidrológico utilizada para simular o amortecimento de cheias em reservatórios, ou seja, a redução e defasagem entre as vazões afluentes e efluentes durante eventos de cheia. Ele foi originalmente desenvolvido por Puls (1928) e Puls (1947), e posteriormente aperfeiçoado por Butler (1957) para aplicação em modelagem hidrológica e dimensionamento de reservatórios.

O princípio básico consiste em aplicar a equação da continuidade, relacionando as variações de armazenamento no reservatório com as vazões afluentes e efluentes, em discretos intervalos de tempo.

Em sistemas urbanos, a aplicação do método permite dimensionar reservatórios de retenção e avaliar o efeito de retardamento do pico de cheia, aspecto fundamental em contextos de ocupação desordenada de várzeas e impermeabilização do solo (Canholi, 2014; Araujo *et al.*, 2022).

O método utiliza um termo auxiliar (volume-vazão efluente), para resolver a equação da continuidade, esse termo é tabelado e é definido pela Equação 23.

$$TA = VR + Q_e * \frac{\Delta t}{2} \quad \text{Equação 23}$$

Onde: VR é o volume do reservatório (m³); Q_e é a vazão efluente (m³/s) e Δt (s) é o intervalo de tempo.

O método de Puls consiste em reorganizar os termos da equação da continuidade de forma que os termos conhecidos fiquem à esquerda e os termos desconhecidos fiquem à direita. Os termos desconhecidos são o volume do reservatório no final do intervalo de tempo e a vazão efluente no final do intervalo de tempo. Esses termos podem ser determinados pela função volume-vazão efluente.

O método de Puls é amplamente utilizado em projetos e estudos sobre amortecimento de ondas de cheia em reservatórios, ou seja, bacias de detenção. Ele permite estimar a atenuação ou laminação da vazão efluente em relação à vazão afluente, bem como o volume armazenado no reservatório ao longo do tempo. No entanto, o método de Puls tem algumas limitações, como a suposição de superfície plana e horizontal do reservatório e a discretização do tempo.

Canholi (2014) aplicou-o no cálculo de estruturas de controle de cheias na Avenida Pacaembu (São Paulo), demonstrando que o uso de reservatórios de detenção reduz significativamente o pico de vazão em bacias urbanizadas.

Lucas; Barbassa; Moruzzi (2013), utilizaram o método de Puls para modelagem a partir do monitoramento das precipitações, das vazões afluentes ao sistema Filtro-Vala-Trincheira de infiltração e dos níveis de armazenamento na trincheira e vala de infiltração, com resultados satisfatórios.

Tecedor (2014), utilizou o método de Puls para modelar um plano de infiltração em escala real. Os resultados indicaram que o método de Puls pode ser aplicado com restrições, tendo em vista as vazões iniciais calculadas pelo Puls foram maiores que as observadas.

Baptista; Paz (2018), utilizaram o método para o dimensionamento hidráulico de um reservatório de detenção associado a cobertura, em uma análise integrada de custo-eficiência.

Souza; Freire; Mannich (2021), empregaram o Puls no estabelecimento de diretrizes de projeto para reservatórios de detenção em lote (*on-site stormwater detention*).

4.8 Aprendizado de máquinas

Nas últimas décadas, o avanço das técnicas de aprendizado de máquina (*machine learning* - ML) tem promovido uma profunda transformação nas ciências ambientais e na engenharia de recursos hídricos. Modelos baseados em ML vêm sendo empregados para prever, classificar e otimizar processos hidrológicos complexos, superando limitações de métodos empíricos e determinísticos tradicionais (Papacharalampous; Tyrallis, 2022). Essa evolução tecnológica possibilitou, por exemplo, a previsão mais precisa de eventos extremos, o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações e a análise do desempenho de dispositivos de drenagem urbana sustentável.

No campo da drenagem urbana e das técnicas compensatórias, a incorporação do aprendizado de máquina tem se mostrado uma estratégia eficaz para lidar com o comportamento não linear e estocástico dos processos de escoamento, infiltração e armazenamento. Ferrans *et al.* (2023), destacam que a integração de métodos computacionais inteligentes a modelos hidrológicos tradicionais representa um novo paradigma para o dimensionamento e otimização de sistemas de drenagem sustentável, incluindo estruturas de infiltração, pavimentos permeáveis e trincheiras.

Al Mehedi *et al.* (2023), utilizaram redes neurais e modelos de aprendizado supervisionado para prever o desempenho hidráulico de estruturas de infiltração urbana (*green stormwater infrastructure*), observando que modelos baseados em ML apresentaram melhor capacidade de generalização e previsão do escoamento residual em comparação com métodos conceituais. O estudo reforça a aplicabilidade do aprendizado de máquina em cenários com grande variabilidade temporal e espacial de chuva, infiltração e condutividade hidráulica, condições comuns em ambientes urbanos.

Resultados semelhantes foram observados por Yang; Chui (2021), que aplicaram métodos de aprendizado de máquina para simular e interpretar o comportamento hidrológico de sistemas de drenagem urbana sustentável submetidos a diferentes condições de chuva. O estudo demonstrou que os algoritmos foram capazes de reproduzir com alta acurácia as variações de infiltração e armazenamento, além de identificar a importância relativa das variáveis de entrada, reforçando o potencial do ML na análise física e operacional de estruturas compensatórias.

Outro avanço recente foi proposto por Elrahmani *et al.* (2025), que aplicaram aprendizado de máquina para identificar e prever o entupimento (*clogging*) em sistemas de infiltração e biorretenção. O estudo mostrou que a análise de variáveis adimensionais e indicadores físico-químicos pode antecipar a perda de eficiência hidráulica antes que o sistema apresente falhas operacionais. Essa abordagem de manutenção preditiva tem grande potencial para otimizar a vida útil de dispositivos de infiltração, como trincheiras e poços drenantes, especialmente em áreas com alta carga de sólidos suspensos.

Apesar desses avanços, a literatura ainda carece de modelos preditivos capazes de representar o comportamento hidrodinâmico de trincheiras de infiltração de forma contínua e adaptativa, considerando simultaneamente fatores como características do solo, intensidade de chuva, umidade antecedente e variações sazonais. A maioria dos estudos atuais limita-se a análises pontuais de infiltração ou à aplicação de modelos empíricos ajustados a condições específicas.

O desenvolvimento de um modelo baseado em aprendizado de máquina com uso da biblioteca *scikit-learn*, voltado à simulação do comportamento hidrodinâmico de uma trincheira de infiltração monitorada em campo, inova em empregar algoritmos supervisionados, como Árvore de Decisão (*Decision Tree*), Floresta Aleatória (*Random Forest*), Máquina de Vetores Suporte (*Support Vector Machine*) e Redes Neurais (*Neural Networks*), para prever o nível de água e a taxa de infiltração dentro da estrutura com base em dados reais de precipitação, vazão e umidade do solo.

Diferentemente dos trabalhos anteriores, que se concentram na calibração de modelos teóricos ou no diagnóstico de desempenho, esta pesquisa visa compreender e reproduzir o processo físico de infiltração de forma contínua e preditiva. Além disso, o uso da biblioteca *scikit-learn* possibilita um fluxo de trabalho transparente, reproduzível e adaptável, fortalecendo o elo entre a modelagem de dados e o entendimento físico do sistema de drenagem.

Nesse contexto, o aprendizado de máquina configura-se como uma poderosa abordagem para a tomada de decisão baseada em dados, favorecendo a elaboração de estratégias mais eficazes de mitigação de impactos e adaptação às mudanças climáticas, além de oferecer suporte à formulação de políticas públicas mais sustentáveis e resilientes.

Assim, o estudo contribui para o avanço da aplicação de técnicas de inteligência artificial na engenharia de drenagem urbana, oferecendo um método

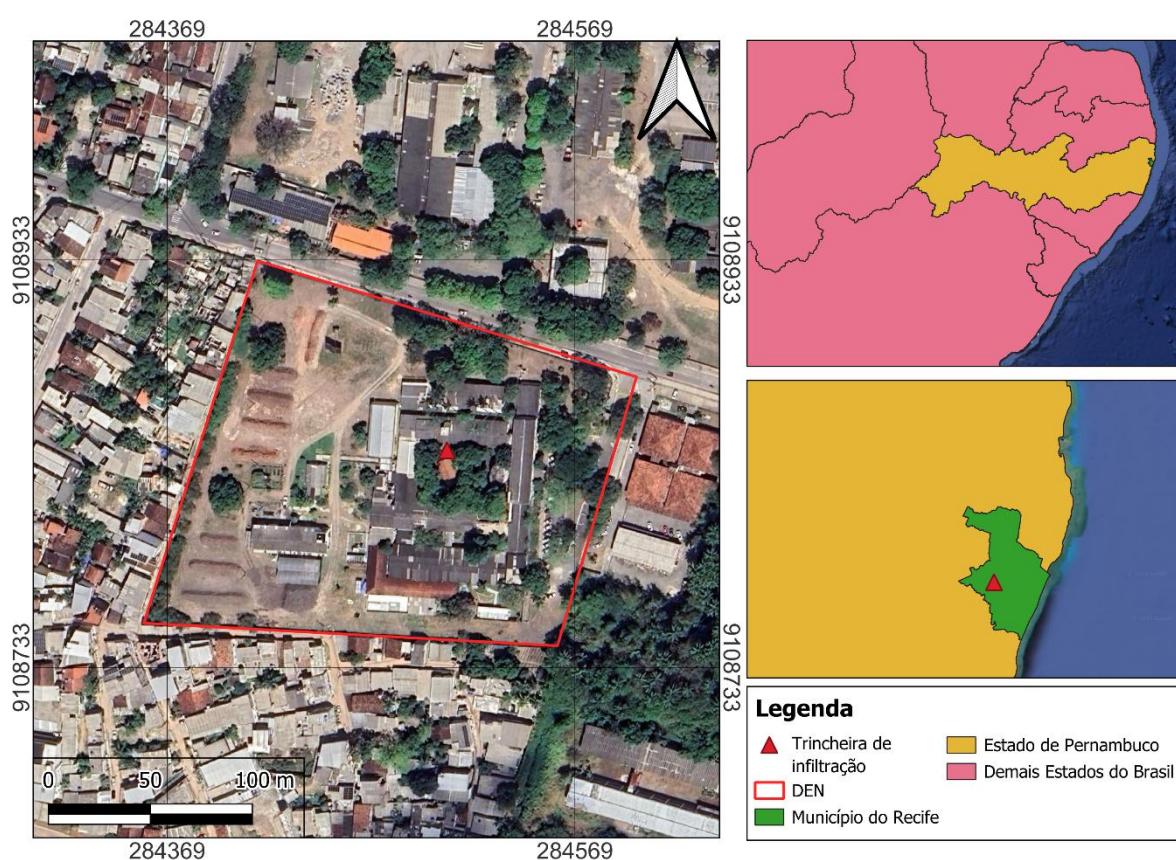
inovador, interpretável e de baixo custo computacional para o acompanhamento do desempenho de dispositivos de infiltração, uma abordagem ainda incipiente na literatura internacional.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

A trincheira de infiltração analisada neste estudo está localizada na cidade do Recife, Estado de Pernambuco (Brasil), nas dependências do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) (Figura 11). A estrutura foi implantada em ambiente urbano de clima tropical úmido, conforme a classificação de Köppen (tipo As'), característico da faixa litorânea nordestina.

Figura 11 – Mapa de localização da trincheira de infiltração.



Fonte: Autor (2025).

De acordo com Silva; Araújo (2013), a intensidade média de chuva típica para a cidade do Recife é de $164,45 \text{ mm h}^{-1}$ para um período de retorno de 10 anos e duração de 5 minutos, o que reflete a elevada energia pluviométrica local.

Os dados da normal climatológica (1991–2020), obtidos na estação meteorológica do Recife (Curado), indicam uma precipitação total anual média de 2.155,5 mm, concentrada principalmente entre os meses de maio e julho. O valor

máximo mensal ocorre em junho (390,5 mm), enquanto o mínimo é registrado em novembro (39,0 mm).

A temperatura média anual é de 26,0 °C, com amplitude térmica de 3,1 °C. Os meses mais quentes ocorrem entre dezembro e março (27,3 °C), e os mais frios entre junho e agosto (24,2 °C). A umidade relativa média anual é de 77,6 %, alcançando o máximo em junho e o mínimo em novembro.

A evaporação média anual é de 1.375,3 mm, e a precipitação total supera a evaporação em aproximadamente 780 mm, caracterizando saldo hídrico positivo durante a estação chuvosa. A insolação média anual corresponde a 2.502,3 h, com valores máximos de 244,6 h (dezembro) e mínimos de 164,5 h (junho) (Tabela 2).

Tabela 2 - Médias mensais da normal climatológica no período de 1991 a 2020, na Estação do Recife (Curado): precipitação, temperatura, umidade relativa, evaporação e insolação

Mês	Precipitação (mm)	Temperatura média (°C)	Umidade Relativa (%)	Evaporação (mm)	Insolação (Horas e Décimos)
Janeiro	106,6	27,1	73,5	142,7	222,5
Fevereiro	127,0	27,3	74,3	122,1	204,4
Março	197,2	27,2	76,3	115,1	220,2
Abril	268,9	26,6	80,1	89,0	203,6
Mai	317,1	25,8	83,1	78,7	189,3
Junho	390,5	24,8	84,6	71,3	164,5
Julho	314,8	24,2	83,9	80,2	173,6
Agosto	186,7	24,2	81,0	96,1	195,5
Setembro	93,3	25,2	77,0	120,3	207,7
Outubro	52,8	26,1	73,7	145,6	233,2
Novembro	39,0	26,7	71,8	155,4	243,2
Dezembro	61,6	27,1	71,9	158,8	244,6
Total	2155,5	-	-	1375,3	2502,3

Fonte: INMET/BDMEP (2025)

O solo local, característico da planície costeira do Recife, foi caracterizado por Santos (2014) com base em amostras coletadas até 1,5 m de profundidade, abrangendo o solo de fundação da base da trincheira. As análises seguiram os procedimentos da NBR 7181/2016 e a classificação textural da Embrapa (Silva, 2009).

Os resultados indicam predominância de solos arenosos e franco-arenosos, com transição para franco argilo-arenosos em camadas mais profundas (Tabela 3). Essa composição favorece a infiltração inicial, embora camadas intermediárias com maior teor de silte e argila possam influenciar a velocidade de percolação e a formação de zonas de saturação.

Tabela 3 - Classificação textural do solo natural onde foi implantada a vala de infiltração.

Camadas (m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação Textural
0.2–0.3	11.72	13.27	74.58	Areia franca
0.3–0.4	14.07	22.69	63.24	Franco arenoso
0.4–0.5	23.45	29.31	47.24	Franco
0.6–0.7	17.59	20.98	61.43	Franco arenoso
1.1–1.2	23.45	19.93	56.62	Franco argilo-arenoso
1.3–1.4	21.11	12.90	65.99	Franco argilo-arenoso
1.4–1.5	26.97	21.10	51.93	Franco argilo-arenoso

Fonte: Santos (2014).

Essas características texturais são compatíveis com a formação Barreiras, típica da região metropolitana do Recife, composta por sedimentos arenosos intercalados com camadas argilosas, o que confere alta heterogeneidade hidráulica. Essa heterogeneidade constitui fator determinante para a eficiência e o comportamento hidrodinâmico da trincheira.

5.2 Dimensionamento e Monitoramento da Trincheira de Infiltração

A trincheira de infiltração foi construída em 2014, projetada para captar águas pluviais provenientes de uma área de contribuição de aproximadamente 250 m², incluindo o escoamento de coberturas de edificações e de um pequeno jardim adjacente.

O dimensionamento da estrutura foi realizado pelo método da curva envelope (*rain envelope method*), que utiliza a altura máxima da lâmina d'água para estimar o volume de armazenamento necessário. Foi considerado um período de retorno (T_r) de 5 anos, inserido na equação de precipitação desenvolvida para a cidade do Recife–PE (Santos, 2014; Melo *et al.*, 2016).

A construção envolveu escavação manual da vala, revestimento com geotêxtil para retenção de materiais finos, preenchimento com brita de porosidade média de 33% e cobertura superior com lona plástica, a fim de controlar a entrada de água direta na estrutura. Uma caixa de entrada foi instalada com vertedouro triangular de 90°, destinada à medição da vazão afluente ao sistema.

A estrutura possui 1,5 m de profundidade, 3,0 m de comprimento e 1,5 m de largura, enquanto a caixa de entrada apresenta 0,3 m de profundidade, 1,3 m de comprimento e 0,5 m de largura, conforme mostrado na Figura 12 e Figura 13.

Figura 12 – Trincheira de infiltração e equipamentos de monitoramento.



Fonte: Autor (2023).

caixa de entrada, ao ultrapassar 15 cm acima da crista do vertedor, é utilizada para calcular a vazão de entrada (Melo, 2015).

5.3 Análise Hidráulica da Trincheira de Infiltração

A análise hidráulica da trincheira de infiltração foi conduzida a partir da relação entre a precipitação e o nível d'água medido no interior do sistema. Essa abordagem permitiu avaliar a função de infiltração por meio da curva de recessão, que expressa o tempo de esvaziamento da estrutura após cada evento de chuva.

O comportamento hidráulico foi analisado considerando as condições de umidade antecedente do solo, classificadas conforme McCuen (1998) em três grupos:

- i. condições de solo seco, com estação chuvosa inferior a 12,6 mm;
- ii. condições médias, com estação chuvosa entre 12,6 e 28,0 mm; e
- iii. condições de solo úmido, com estação chuvosa superior a 28,0 mm.

Essas condições iniciais do solo influenciam diretamente a direção, o volume e a velocidade do fluxo de água, afetando a capacidade de infiltração e o tempo de resposta hidráulica do sistema.

Para cada evento de precipitação analisado, foram determinadas as seguintes variáveis: tempo de resposta do sistema, precipitação antecedente, precipitação acumulada, altura máxima da lâmina d'água, tempos de ascensão e recessão, e eficiência de esvaziamento.

Adotou-se como tempo ótimo de drenagem o limite de 72 horas, correspondendo a 100% de eficiência hidráulica, conforme o critério estabelecido por Duchene; Mcbean; Thomson (1994).

5.4 Método Puls

A modelagem aplicada pelo Método Puls, utiliza a equação da continuidade (Equação 24), baseada nos dados de entrada e saída de vazão, associada à variação do volume de armazenamento da trincheira de infiltração (Tucci, 2005; Tecedor, 2014; Bezerra *et al.*, 2022).

$$Q_e - Q_s = \frac{dV}{dt}$$

Equação 24

Onde: Q_e é a vazão de entrada (m^3/s), Q_s é a vazão de saída (m^3/s), V é o volume armazenado (m^3) e t é o tempo (s).

O método Puls já foi utilizado em estudos desenvolvidos por Kuo; Zhu; Dollard (1989), para projetar uma trincheira de infiltração; por Ohnuma; da Silva; Mendiando (2015) e Bezerra *et al.* (2022), para modelar uma trincheira de infiltração; por Lucas; Barbassa; Moruzzi (2013) e Tecedor *et al.* (2015), para modelar um sistema de valas de infiltração em grande escala na Universidade de São Paulo; além de Ferreira; das Neves; de Souza (2019), que utilizaram o Método Puls para simular o comportamento de um dispositivo de biorretenção.

A variação do volume armazenado na estrutura é obtida pela integração da Equação 24. O resultado da integração é apresentado na Equação 25 (Lucas; Barbassa; Moruzzi, 2013; Tecedor, 2014; Baptista; Nascimento; Barraud, 2015; Bezerra *et al.*, 2022).

$$\int_{V_t}^{V_{t+1}} dV = \int_t^{t+1} Q_e(t) \times dt - \int_t^{t+1} Q_s(t) \times dt \quad \text{Equação 25}$$

A Equação 25 pode ser reescrita pelo método das diferenças finitas e estruturada para determinar a vazão e o volume armazenado para o intervalo de tempo proposto. A Equação 26 isola as variáveis do lado esquerdo da equação (Lucas; Barbassa; Moruzzi, 2013; Tecedor, 2014; Baptista; Nascimento; Barraud, 2015; Bezerra *et al.*, 2022).

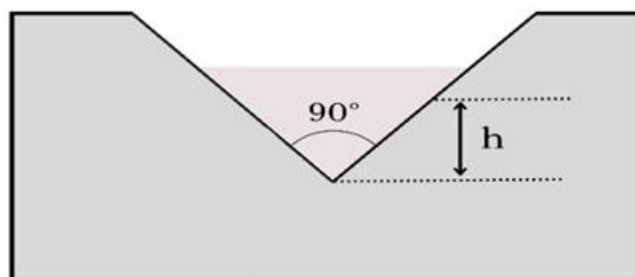
$$\frac{2 \times V_{t+1}}{\Delta t} + Q_{s_{t+1}} = Q_{e_t} + Q_{e_{t+1}} - Q_{s_t} + \frac{2 \times V_t}{\Delta t} \quad \text{Equação 26}$$

A Equação 27 calcula a entrada de água na trincheira de infiltração, cuja estrutura é um vertedouro triangular de 90°, conforme mostrado na Figura 14.

$$Q_e = 1.4 \cdot h_v^{5/2} \quad \text{Equação 27}$$

Onde h_v é a altura da camada de água na caixa de entrada do vertedouro.

Figura 14 - Vertedouro triangular da caixa de entrada.



Fonte: Autor (2025).

Para obter a vazão de infiltração da trincheira, foi utilizada a Equação 28, Equação 29 e Equação 30 para calcular as vazões de água das paredes e da base da estrutura de infiltração.

$$Q_p = 2 \times h \times k_p \times (L + C)$$

Equação 28

$$Q_b = k_b \times L \times C$$

Equação 29

$$Q_t = Q_p + Q_b$$

Equação 30

Onde Q_p é o fluxo de parede (m^3/s), Q_b é o fluxo de base (m^3/s), Q_t é o fluxo total (m^3/s), h é a lâmina de água dentro da trincheira (m), k_p é a capacidade de infiltração da parede (m/s), k_b é a capacidade de infiltração da base (m/s), L é a largura (m) e C é o comprimento (m).

A Equação 31 calcula o volume armazenado na trincheira de infiltração durante os eventos analisados.

$$V = h \cdot L \cdot C \cdot \eta$$

Equação 31

Onde V é o volume armazenado (m^3), e η é a porosidade do material de preenchimento da trincheira de infiltração.

A implementação do método foi realizada em planilha eletrônica, aplicando-se o método iterativo de cálculo para atualização dos volumes e vazões a cada intervalo de tempo. O modelo foi alimentado com os dados observados de precipitação e nível d'água obtidos em campo, e sua estrutura matemática permitiu reproduzir a variação temporal da lâmina d'água na trincheira de infiltração ao longo dos eventos monitorados.

Foram conduzidos dois conjuntos de simulações: o primeiro considerou uma condutividade hidráulica uniforme para a base e as paredes ($k_p = k_b$), representando um sistema simplificado (K_s); e o segundo adotou um sistema múltiplo (K_m), com valores distintos de condutividade hidráulica ($k_p \neq k_b$) para representar com maior realismo o comportamento do sistema, especialmente a redução da infiltração na base devido à colmatação progressiva. Essa abordagem comparativa permitiu avaliar a sensibilidade do modelo e verificar se a simplificação com parâmetro único seria suficiente para descrever adequadamente o desempenho hidráulico observado em campo

5.5 Eventos de chuva simulados e análise de sensibilidade

Foram realizadas simulações para todo o período de monitoramento da trincheira de infiltração, considerando o comportamento do nível d'água em duas escalas temporais: diária, para a avaliação do comportamento global do sistema, e horária, para análise detalhada de eventos representativos de chuva.

As simulações foram conduzidas com o objetivo de verificar a sensibilidade do parâmetro de capacidade de infiltração da trincheira, representado pelas condutividades hidráulicas da base (k_b) e das paredes (k_p). Para essa etapa, foi selecionado um intervalo de monitoramento compreendido entre 23 e 25 de abril de 2017.

Os valores de k_b e k_p adotados como referência foram aqueles obtidos na modelagem inversa desenvolvida na fase de calibração do modelo. A partir desses valores, realizou-se uma análise de sensibilidade variando os parâmetros de infiltração em -30%, -20%, -10%, +10%, +20% e +30% em relação ao valor base, com o objetivo de avaliar a resposta hidráulica do sistema frente a diferentes condições de condutividade do solo.

Os seguintes critérios estatísticos foram utilizados para analisar a eficiência do modelo, ou seja, a qualidade dos ajustes: o coeficiente de determinação (R^2), a razão de desvio (RD) e o coeficiente de massa residual (CMR). As fórmulas para R^2 , RD e CMR são apresentadas, respectivamente, na Equação 32, Equação 33 e Equação 34, e seus valores ótimos são 1, 1 e 0, respectivamente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 32}$$

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 33}$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N x_i} \quad \text{Equação 34}$$

Onde y_i são os valores calculados pelo modelo, x_i são dados observados em campo, \bar{x} é o valor médio dos dados observados e N é o número de observações.

5.6 Aprendizado de Máquina

O uso de algoritmos de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) tem se destacado como ferramenta promissora para a previsão de processos hidrológicos não lineares e de alta variabilidade temporal. Nas últimas décadas, tais técnicas têm

sido aplicadas em estudos voltados à modelagem de escoamento superficial, previsão de níveis d'água e avaliação de desempenho de sistemas de drenagem urbana (Khosravi *et al.*, 2019; Ghorbanzadeh *et al.*, 2019).

Esses modelos se baseiam em conjuntos de dados observacionais para identificar padrões e construir relações matemáticas entre variáveis de entrada e saída, dispensando a necessidade de equações físico-hidráulicas complexas. A principal vantagem do ML é a capacidade de generalizar o comportamento do sistema a partir de dados históricos, o que reduz o tempo e o custo computacional em relação às abordagens tradicionais. Contudo, a qualidade das previsões depende diretamente da consistência e representatividade dos dados utilizados no treinamento.

A modelagem foi desenvolvida em *Python* 3.11, empregando a biblioteca *Scikit-learn*, ambiente amplamente utilizado em aplicações de aprendizado supervisionado. Foram implementados quatro algoritmos, denominados estimadores, com o objetivo de prever o nível de água no interior da trincheira de infiltração com base em variáveis hidrometeorológicas e hidráulicas observadas em campo:

1. Árvore de Decisão (*Decision Tree Regressor*);
2. Máquina de Vetores de Suporte (*Support Vector Regressor*);
3. Floresta Aleatória (*Random Forest Regressor*); e
4. Rede Neural Artificial (*Multi-Layer Perceptron Regressor* – MLPRegressor).

Os dados de entrada utilizados em todos os modelos foram:

- Vazão de entrada na trincheira de infiltração (m^3/s);
- Precipitação (mm); e
- Nível do lençol freático (m).

O dado de saída (variável dependente) corresponde ao nível d'água no interior da estrutura de infiltração (m).

Os dados originais da trincheira de infiltração monitorada (período de 2014 a 2017) foram tratados no ambiente *Pandas*, com remoção de registros vazios e inconsistentes, garantindo um conjunto contínuo de observações. A base de dados foi então normalizada (escala [0,1]) utilizando o *MinMaxScaler* do *Scikit-learn*, de modo a evitar dominância de variáveis com maior magnitude numérica.

O conjunto referente ao ano de 2014 foi utilizado para o treinamento e validação cruzada dos modelos, sendo dividido em 70% para treinamento e 30% para teste. Os dados de 2017 foram utilizados de forma independente para avaliação de desempenho e predição.

5.6.1 Árvore de Decisão (*Decision Tree Regressor*)

O modelo foi configurado com divisão recursiva dos dados, utilizando o critério de mínima variância (*mean squared error*) como parâmetro de otimização. Cada nó da árvore representa uma regra de decisão que minimiza a dispersão dos valores da variável de saída. O modelo final corresponde à média dos valores contidos nas folhas terminais.

5.6.2 Máquina de Vetores de Suporte (*Support Vector Regressor*)

Foi utilizado o kernel radial (RBF - *Radial Basis Function*), adequado para relações não lineares. O modelo ajusta um hiperplano ótimo no espaço transformado, minimizando o erro estrutural e maximizando a margem entre os pontos de dados.

5.6.3 Floresta Aleatória (*Random Forest Regressor*)

O modelo foi configurado com 100 árvores e amostragem *bootstrap* aleatória. Em cada árvore, subconjuntos de variáveis são selecionados aleatoriamente para reduzir a correlação entre árvores e melhorar a robustez do modelo final, calculado pela média das previsões individuais.

5.6.4 Rede Neural Artificial (MLP Regressor)

O modelo foi estruturado com duas camadas ocultas e função de ativação ReLU, utilizando o algoritmo Adam como otimizador. Essa arquitetura permitiu capturar interações não lineares entre as variáveis de entrada e o nível d'água observado.

5.6.5 Validação do potencial de desempenho e predição dos modelos

Após o treinamento, os modelos foram avaliados com o conjunto independente de dados de 2017, utilizando os mesmos parâmetros de entrada observados em campo. As saídas simuladas (nível d'água previsto) foram comparadas aos dados observados, permitindo avaliar a capacidade preditiva e o ajuste do modelo.

Os seguintes critérios estatísticos foram utilizados para analisar a eficiência dos modelos, ou seja, a qualidade dos ajustes: Coeficiente de Determinação (R^2), Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Absoluto Médio (MAE) e o Coeficiente de Eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE). As fórmulas para cálculo de R^2 , RMSE, MAE e NSE são apresentadas respectivamente na Equação 35, Equação 36, Equação 37 e Equação 38.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 35}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad \text{Equação 36}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad \text{Equação 37}$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 38}$$

Onde: x é o valor observado em campo, y é o calculado pelo modelo, \bar{x} é o valor médio dos observados e n é quantidade de amostras.

Os valores ideais de cada método estatístico calculado para avaliação dos modelos de aprendizado de máquina são apresentados na Tabela 4. Desta forma, o critério utilizado para verificar a predição dos dados de campo.

Tabela 4 – Parâmetros para avaliação do modelo de aprendizado de máquina.

Índice	Sigla	Intervalo	Valor Ótimo
Determinação	R^2	$0 \leq R^2 \leq 1$	1
Erro Quadrático Médio	RMSE	$0 \leq \text{RMSE}$	0
Erro Absoluto Médio	MAE	$0 \leq \text{MAE}$	0
Eficiência de Nash-Sutcliffe	NSE	$\text{NSE} \leq 1$	1

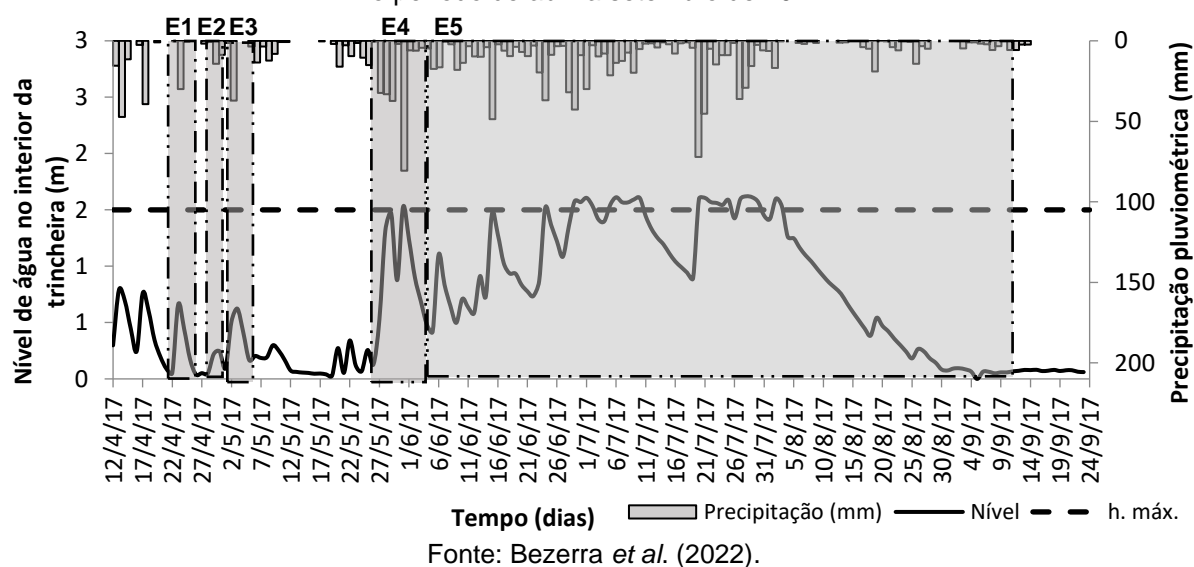
Fonte: Autor (2025).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Monitoramento da Trincheira de Infiltração

O monitoramento contínuo da trincheira de infiltração permitiu analisar o comportamento hidráulico do sistema frente aos diferentes eventos de precipitação registrados ao longo do período de estudo. A Figura 15 apresenta a variação temporal da precipitação e do nível d'água no interior da estrutura no período de abril a setembro de 2017.

Figura 15 – Monitoramento da precipitação e do nível de água no interior da trincheira de infiltração no período de abril a setembro de 2017.



A linha contínua representa o nível de água observado dentro da trincheira, enquanto a linha tracejada indica a profundidade máxima de 1,5 m, correspondente à altura total da estrutura. Valores de nível superior a esse limite caracterizam o transbordamento do sistema, evidenciando a saturação do material de preenchimento e a perda momentânea da capacidade de infiltração.

A análise conjunta das curvas de nível e das precipitações observadas possibilitou identificar cinco eventos de chuva representativos, selecionados com base na resposta hidrodinâmica da trincheira e no comportamento das curvas de recessão. Esses eventos foram empregados para avaliar o desempenho hidráulico do dispositivo sob diferentes condições de umidade antecedente do solo e intensidades de precipitação.

Para cada evento analisado, foram determinadas as seguintes variáveis:

- tempo de resposta do sistema;
- precipitação antecedente para classificação da condição inicial do solo em seca, média ou úmida, segundo McCuen (1998);
- precipitação acumulada;
- altura máxima do nível d'água;
- tempo de ascensão e recessão; e
- eficiência de esvaziamento do sistema.

Essa abordagem permitiu compreender o comportamento dinâmico da trincheira de infiltração em diferentes cenários hidrológicos.

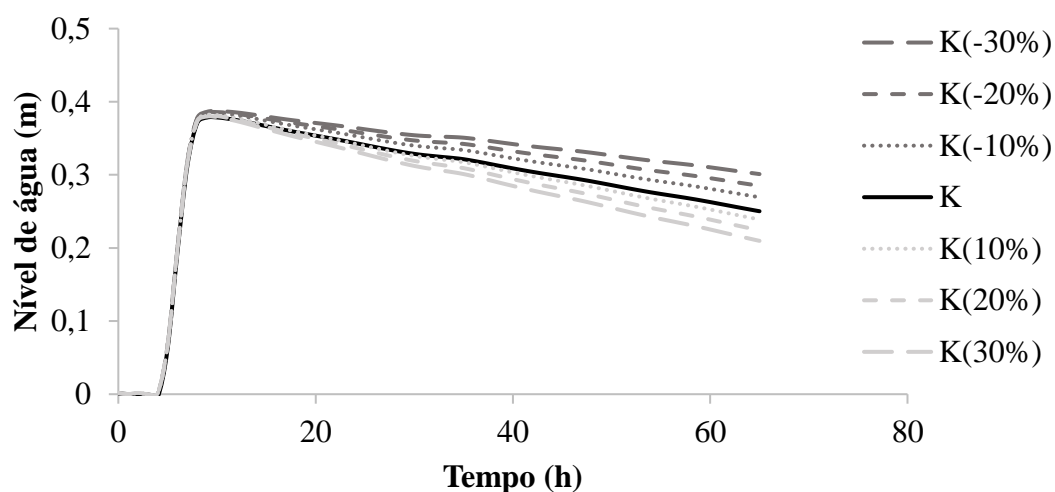
6.2 Simulação da Trincheira de Infiltração utilizando o método Puls

A simulação do comportamento hidráulico da trincheira de infiltração pelo método de Puls foi realizada com base nos dados de precipitação e nível d'água observados em campo, permitindo avaliar a coerência entre os valores medidos e os simulados, bem como a influência da condutividade hidráulica saturada na dinâmica de infiltração.

A Figura 16 apresenta a análise de sensibilidade realizada para o primeiro evento (E1), ocorrido entre 23 e 25 de abril de 2017. O nível máximo observado no campo foi de 0,66 m, enquanto o valor máximo simulado pelo modelo foi de 0,38 m, resultando em diferença de 0,28 m. A velocidade média de infiltração observada foi de 0,01 m/h, contrastando com 0,002 m/h estimados pelo modelo. Mesmo com variações da condutividade hidráulica de -30% a +30% em relação ao valor ótimo, o comportamento geral manteve-se coerente até o pico máximo do nível d'água, com variações subseqüentes na taxa de infiltração entre 8% e 30%.

Esses resultados indicam boa estabilidade do modelo, ainda que a discrepância no pico máximo aponte para uma limitação na representação da condutividade variável com a saturação do solo.

Figura 16 - Análise de sensibilidade do modelo em relação a condutividade hidráulica.



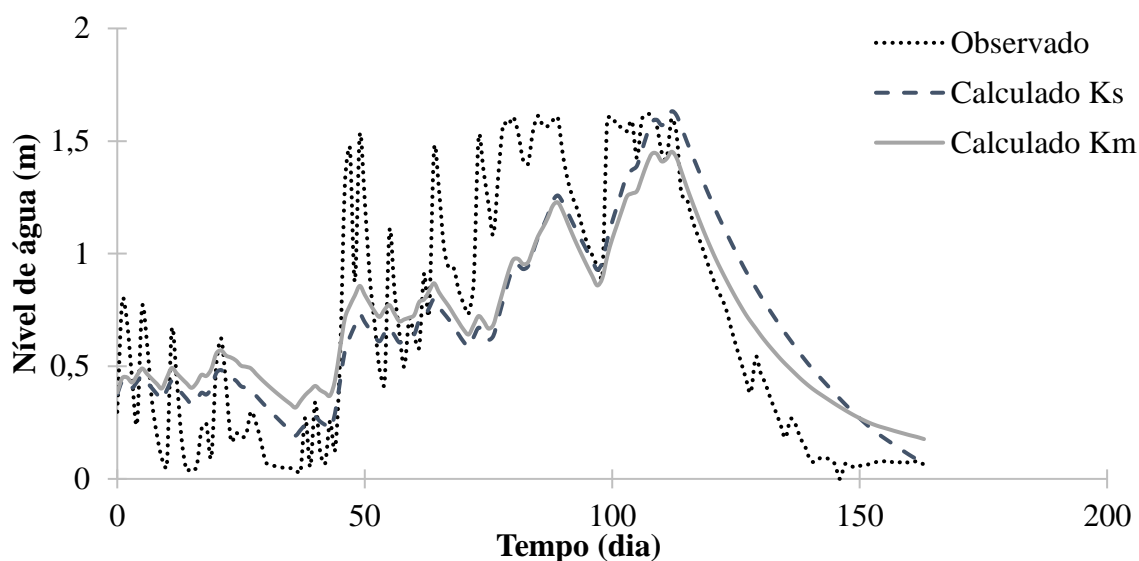
Fonte: Bezerra *et al.* (2022).

Para todo o período de monitoramento, o método de Puls foi aplicado em duas configurações:

- i. uma com valores distintos de condutividade hidráulica para a base (k_b) e para as paredes (k_p), denominada K_m ; e
- ii. outra com valor único de condutividade hidráulica representando ambas as superfícies, denominada K_s .

A Figura 17 apresenta a comparação entre os níveis de água simulados e os observados. Observa-se que ambas as simulações reproduziram adequadamente a tendência de ascensão e recessão dos níveis, ainda que as curvas simuladas apresentem comportamento mais suavizado e valores máximos inferiores aos observados. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,80 para K_m e 0,68 para K_s , confirmando que a distinção entre condutividades melhora o desempenho do modelo.

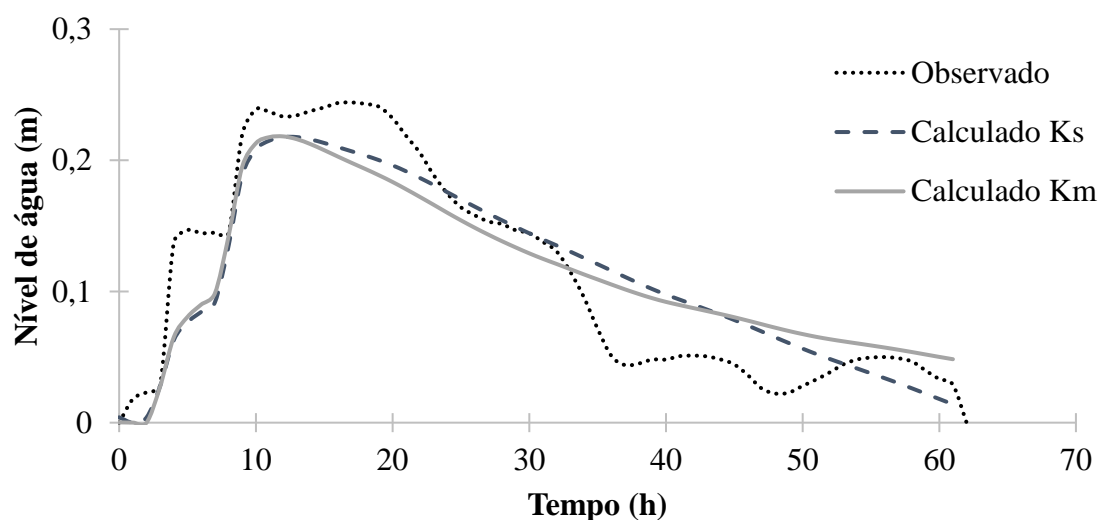
Figura 17 – Simulação para todo período monitorado.



Fonte: Bezerra *et al.* (2022).

No evento E2 (29 de abril a 02 de maio de 2017), o modelo reproduziu satisfatoriamente a resposta hidráulica observada (Figura 18). O pico de nível simulado foi de 0,22 m, com diferença de apenas 0,02 m em relação ao medido em campo. Após o pico, o nível decresceu até 0,05 m em 50 h, demonstrando baixa capacidade de infiltração. A calibração indicou condutividade ótima de 0,0060 m/h para as paredes e 0,0001 m/h para a base, enquanto o modelo simplificado (K_s) resultou em 0,0014 m/h, com R^2 de 0,86 (K_m) e 0,84 (K_s).

Figura 18 – Simulação do evento E2.

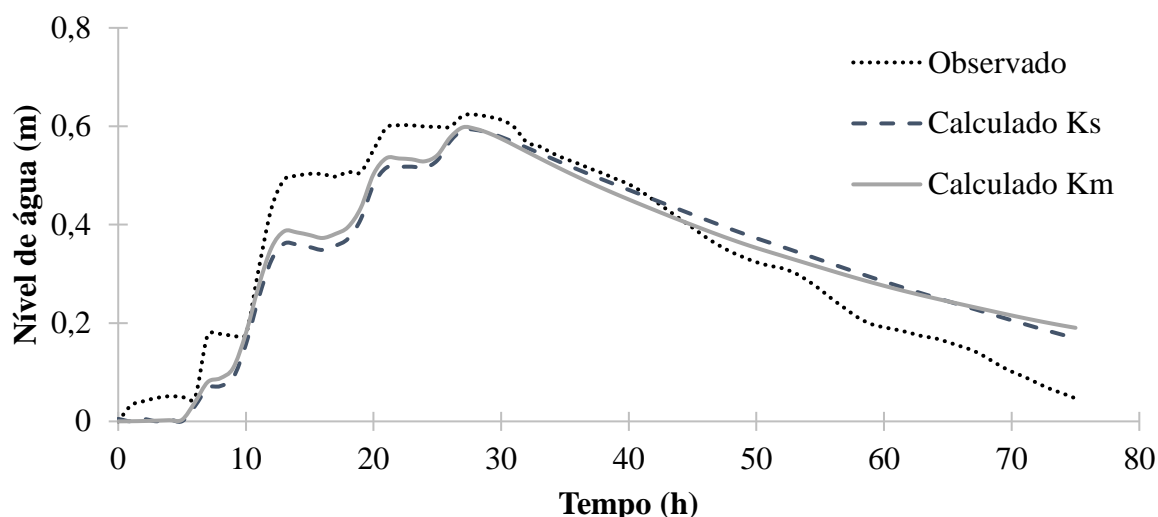


Fonte: Bezerra *et al.* (2022).

Para o evento E3 (02 a 05 de maio de 2017), o ajuste foi ainda mais satisfatório ($R^2 = 0,89$), conforme mostrado na Figura 19. A altura máxima simulada foi de 0,60 m,

muito próxima ao valor observado (0,62 m), com tempo de recessão de 50 horas. As condutividades ótimas ajustadas foram $k_p = 0,004$ m/h e $k_b = 0,0001$ m/h, evidenciando a diferença marcante entre o comportamento da base e das paredes. A variação obtida reflete o efeito da colmatação progressiva da base, que reduz significativamente a condutividade local.

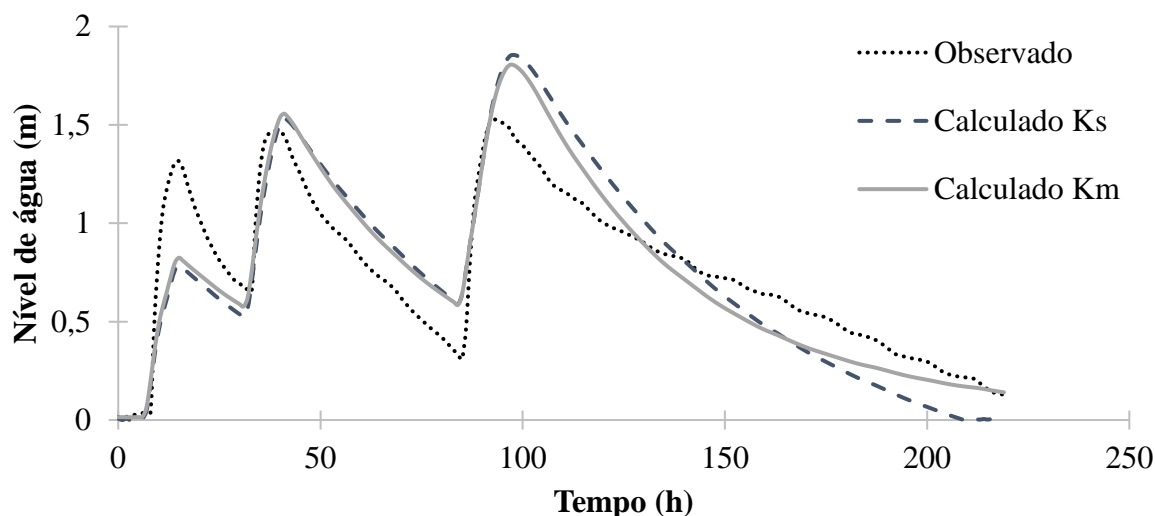
Figura 19 – Simulação do evento E3.



Fonte: Bezerra *et al.* (2022).

A Figura 20 ilustra o comportamento simulado para o evento E4 (27 de maio a 5 de junho de 2017). Embora o modelo tenha reproduzido adequadamente a tendência geral dos níveis, observou-se discrepância nos picos do primeiro e terceiro eventos parciais, atribuída à não uniformidade da chuva e à limitação do modelo em representar as variações instantâneas de saturação do solo. O R^2 foi de 0,84 (K_m) e 0,82 (K_s), mantendo bom desempenho estatístico.

Figura 20 – Simulação do evento E4.



Fonte: Bezerra *et al.* (2022).

A Tabela 5 sintetiza os valores de condutividade hidráulica obtidos. Os resultados confirmam que a base (k_b) apresenta valores significativamente menores que as paredes (k_p), reflexo direto da colmatagem por partículas finas acumuladas ao longo dos dez anos de operação da estrutura. Tal comportamento está de acordo com o observado em estudos anteriores (Lucas; Barbassa; Moruzzi, 2013; Barbassa; Sobrinha; Moruzzi, 2014), nos quais o fluxo horizontal (pelas paredes) assume papel predominante em sistemas maduros de infiltração.

Tabela 5 - Valores da capacidade de infiltração (m/h) na base (k_b) e na parede (k_p) da simulação Km e da capacidade de infiltração k (m/h) da simulação Ks.

Simulação	Km		Ks
	k_b	k_p	k
Evento 2	$1,26 \times 10^{-4}$	$5,99 \times 10^{-3}$	$1,42 \times 10^{-3}$
Evento 3	$1,25 \times 10^{-4}$	$4,09 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-3}$
Evento 4	$1,25 \times 10^{-4}$	$4,05 \times 10^{-3}$	$2,63 \times 10^{-3}$
Completo	$1,27 \times 10^{-4}$	$8,35 \times 10^{-3}$	$4,98 \times 10^{-3}$
Média	$1,25 \times 10^{-4}$	$5,62 \times 10^{-3}$	$2,72 \times 10^{-3}$
Desvio Padrão	$1,05 \times 10^{-6}$	$2,03 \times 10^{-3}$	$1,59 \times 10^{-3}$
Coeficiente de variação	$8,34 \times 10^{-3}$	$3,62 \times 10^{-1}$	$5,85 \times 10^{-1}$

Fonte: Bezerra *et al.* (2022).

A Tabela 6 apresenta os parâmetros estatísticos (R^2 , DR e CRM) para cada simulação. O evento E3 apresentou o melhor ajuste ($R^2 = 0,89$), enquanto o período completo apresentou os menores valores ($R^2 = 0,80$ para K_m e $0,68$ para K_s). Esses resultados indicam que a variabilidade temporal da condutividade hidráulica influencia o desempenho global do modelo.

Tabela 6 - Coeficiente de determinação (R^2), razão de desvio (DR) e coeficiente de massa residual (CRM).

Simulação	Km			Ks		
	R^2	DR	CRM ^c	R^2	DR	CRM
Evento 2	0,86	1,86	$3,24 \times 10^{-7}$	0,84	1,45	$1,27 \times 10^{-6}$
Evento 3	0,89	1,43	$-3,12 \times 10^{-14}$	0,86	1,38	$-2,26 \times 10^{-7}$
Evento 4	0,84	0,69	$-1,32 \times 10^{-9}$	0,82	0,56	$-4,23 \times 10^{-9}$
Completo	0,80	2,79	$5,96 \times 10^{-7}$	0,68	1,93	$4,35 \times 10^{-8}$
Média	0,85	1,69	$2,31 \times 10^{-7}$	0,80	1,33	$2,70 \times 10^{-7}$

Fonte: Bezerra *et al.* (2022).

De modo geral, o modelo mostrou-se eficiente na reprodução do comportamento hidrodinâmico da trincheira, apresentando R^2 médio de 0,85 para K_m e 0,80 para K_s , valores superiores aos relatados por Tecedor *et al.* (2015), que obtiveram R^2 médio de 0,71 em estudo semelhante.

A discrepância entre os valores simulados e observados em níveis inferiores a 0,2 m, conforme observado também por Barbassa; Sobrinha; Moruzzi (2014), pode estar associada à baixa carga hidráulica e à resistência à percolação causada pela sedimentação da base. Mesmo assim, a infiltração pelas paredes compensou essa limitação, garantindo bom ajuste geral.

Esses resultados reforçam que o método de Puls, apesar de suas simplificações (como a condutividade constante), é capaz de representar satisfatoriamente o comportamento global de sistemas de infiltração, especialmente quando devidamente calibrado. Futuras pesquisas podem explorar modelos baseados na equação de Richards, capazes de incorporar o fluxo não saturado e a variação temporal da condutividade hidráulica, conforme apontam Brunetti; Šimůnek; Piro (2016) e Farahi *et al.* (2017). Além disso, aspectos como heterogeneidade do solo (D’Aniello *et al.*, 2019), sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos (Brunetti *et al.*, 2018) e colmatção progressiva (Freni; Mannina, 2018) devem ser considerados em análises evolutivas de longo prazo.

6.3 Simulação da Trincheira de Infiltração utilizando aprendizado de máquina

O uso de algoritmos de aprendizado de máquina foi empregado com o objetivo de prever o comportamento hidrodinâmico da trincheira de infiltração, a partir de dados observados em campo. O conjunto de dados utilizado para treinamento e teste dos modelos foi obtido por Melo *et al.* (2016), referente ao ano de 2014, período em que a estrutura encontrava-se em condições hidráulicas plenamente funcionais.

Os modelos foram desenvolvidos com base nos algoritmos da biblioteca Scikit-learn (Python), contemplando quatro estimadores supervisionados:

1. Árvore de Decisão (*Decision Tree Regressor* – DTR);
2. Máquina de Vetores de Suporte (*Support Vector Machine* – SVM);
3. Floresta Aleatória (*Random Forest Regressor* – RFR); e
4. Rede Neural Multicamadas (*Multilayer Perceptron* – MLP).

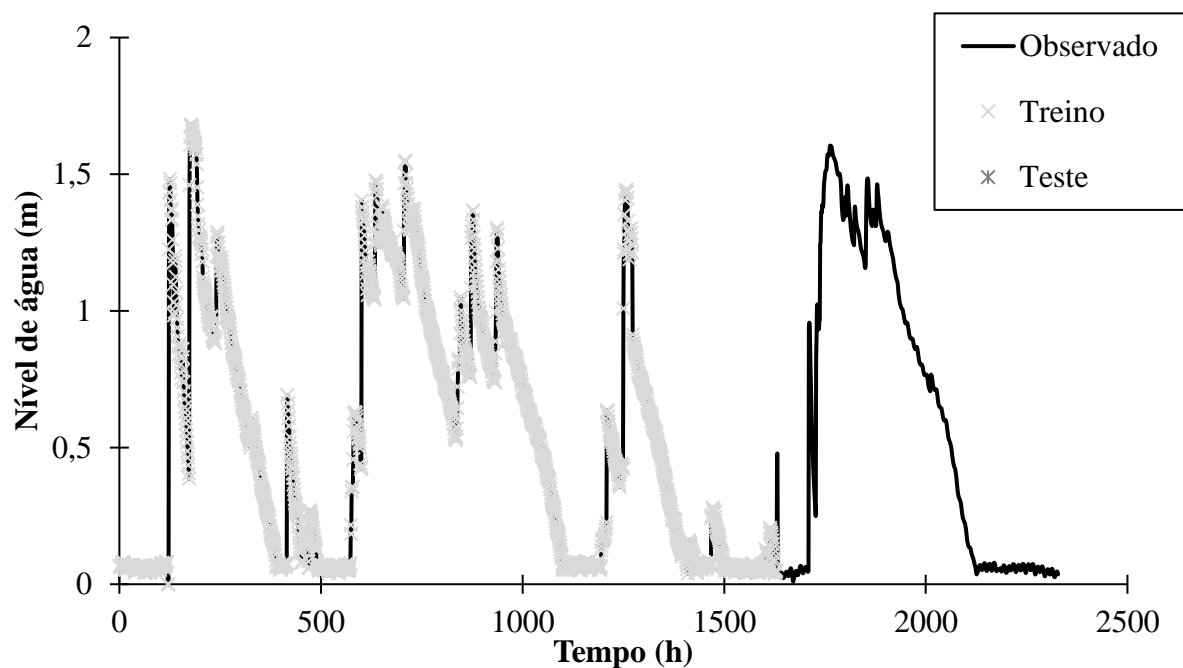
Os dados de entrada utilizados nos modelos consistiram na precipitação local, vazão de entrada na trincheira e nível do lençol freático, enquanto o dado de saída foi o nível de água no interior da estrutura de infiltração.

Para todos os modelos, os dados foram divididos em 70% para treinamento e 30% para teste, sendo os valores normalizados e filtrados para remoção de lacunas e ruídos.

A Figura 21 apresenta o resultado do modelo de Árvore de Decisão, em que os dados observados em campo são representados pela linha contínua, os de treinamento pelos marcadores em cinza claro e os de teste em cinza escuro.

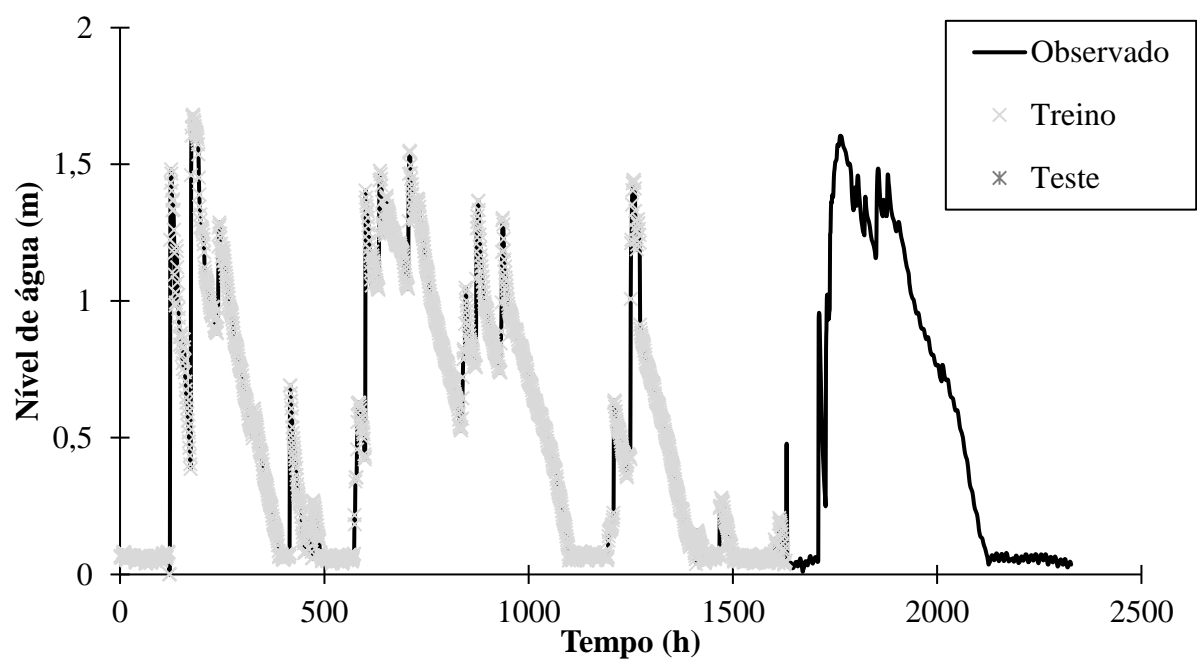
O modelo obteve erro absoluto médio (MAE) de 0,12, R^2 de 0,78 e coeficiente de Nash–Sutcliffe (NSE) de 0,64. Observou-se que o desempenho diminui em trechos com fortes oscilações no nível d'água, indicando limitação na generalização das transições rápidas de escoamento

Figura 21 – Treino e teste do modelo de árvore de decisão.



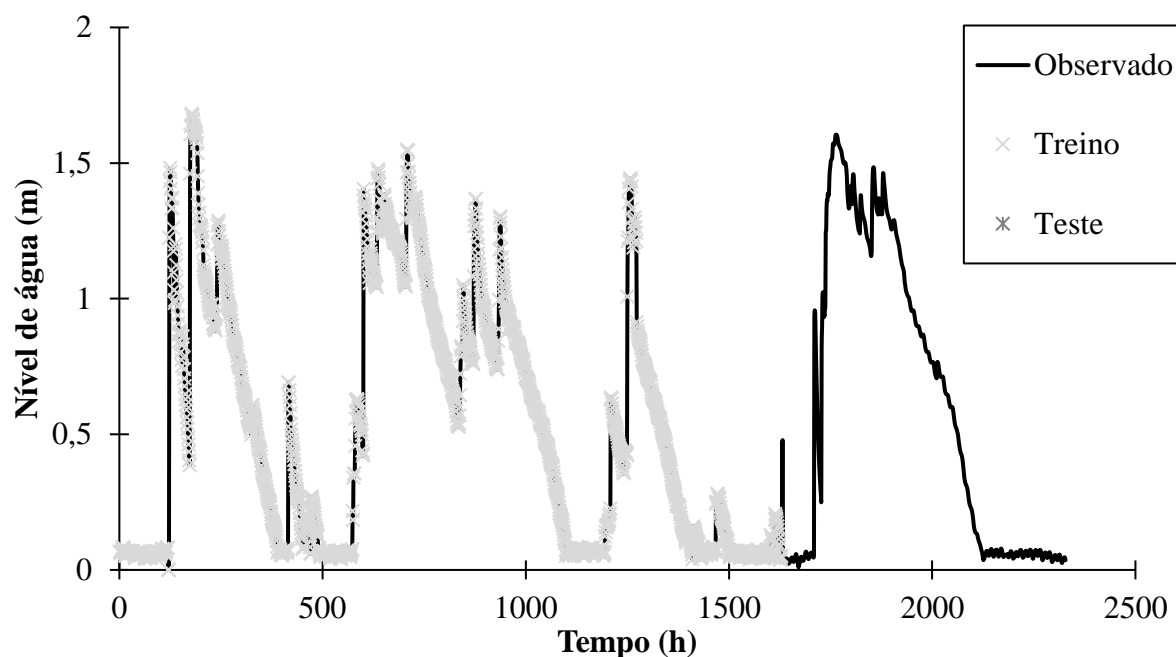
O modelo SVM apresentou resultados mais consistentes (Figura 22), com MAE de 0,10, R^2 de 0,92 e NSE de 0,85. Os valores simulados mostraram menor dispersão e poucos outliers, ainda que o modelo apresente leve superestimação quando o nível observado é baixo.

Figura 22 – Treino e teste do modelo de máquina de vetores suporte.



A Floresta Aleatória (RFR) (Figura 23) apresentou MAE de 0,11, R^2 de 0,83 e NSE de 0,71. Apesar de reproduzir bem a tendência geral, o modelo apresentou subestimação dos picos e maior número de valores atípicos, refletindo sensibilidade a variações abruptas nos dados de entrada.

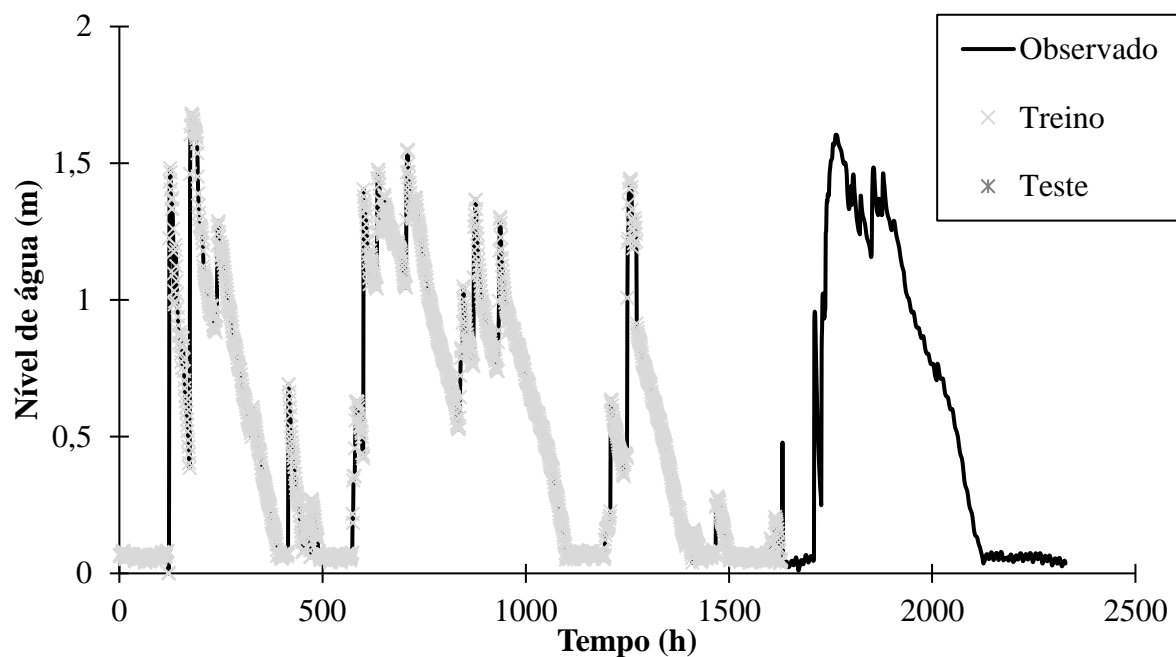
Figura 23 - Treino e teste do modelo de Floresta Aleatória.



Fonte: Autor (2025).

Por fim, o modelo de Rede Neural Multicamadas (MLP) (Figura 24) obteve MAE de 0,10, R^2 de 0,90 e NSE de 0,82, apresentando excelente correlação com os dados observados e reduzida ocorrência de valores atípicos. A rede neural mostrou maior capacidade de generalização não linear, captando bem as oscilações do nível de água.

Figura 24 – Treino e teste do modelo de rede neural.



A etapa seguinte consistiu na validação dos modelos com dados independentes, correspondentes ao ano de 2017. Este período foi escolhido por refletir condições reais de colmatção parcial da trincheira, permitindo avaliar a robustez dos modelos em cenários distintos de infiltração.

As Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28 apresentam os resultados da simulação dos quatro modelos utilizando os dados de 2017.

Figura 25 – Simulação do modelo de árvore de decisão dados de 2017.

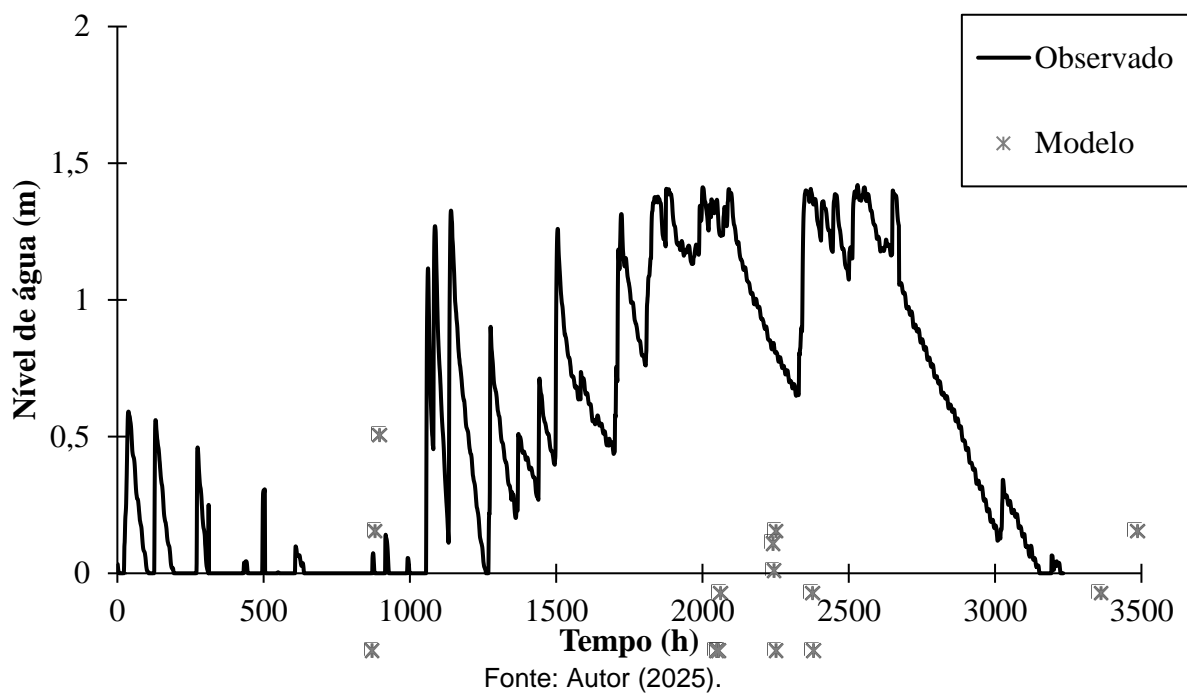


Figura 26 – Simulação do modelo de máquina de vetores suporte dados de 2017.

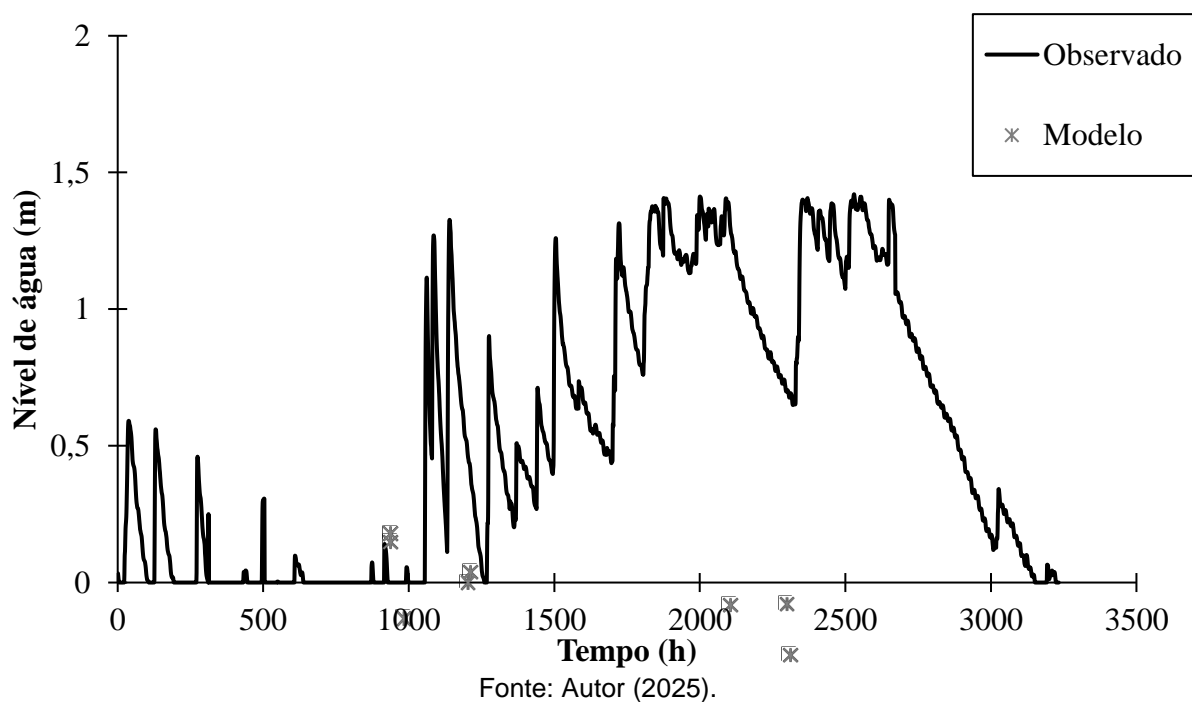
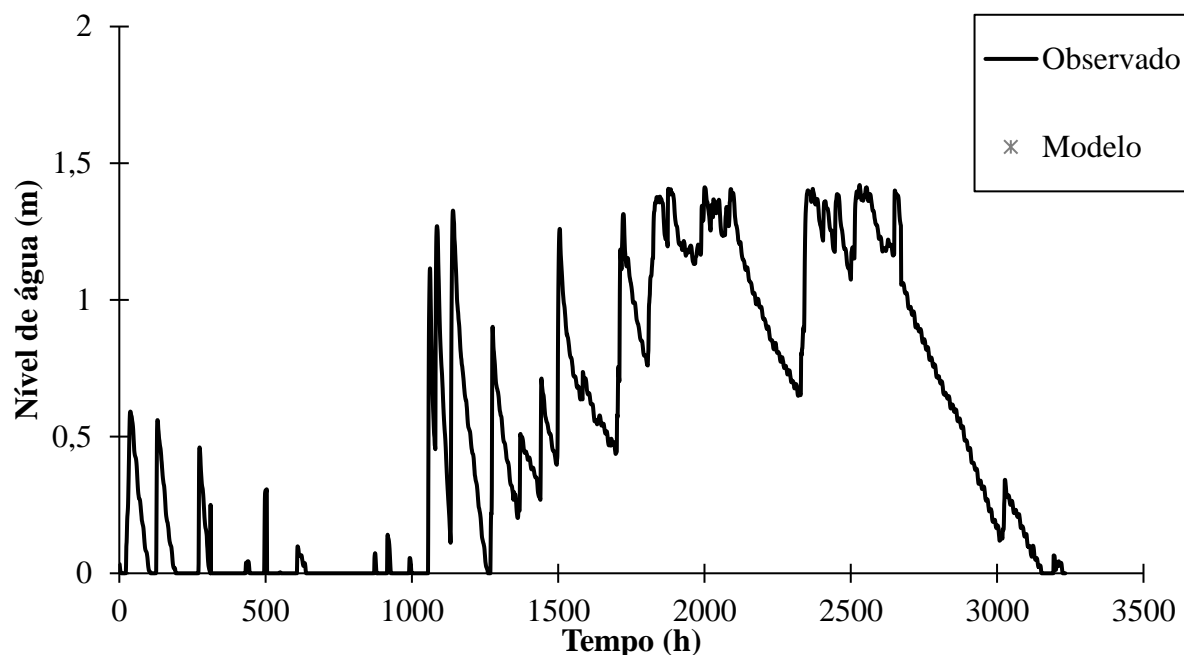
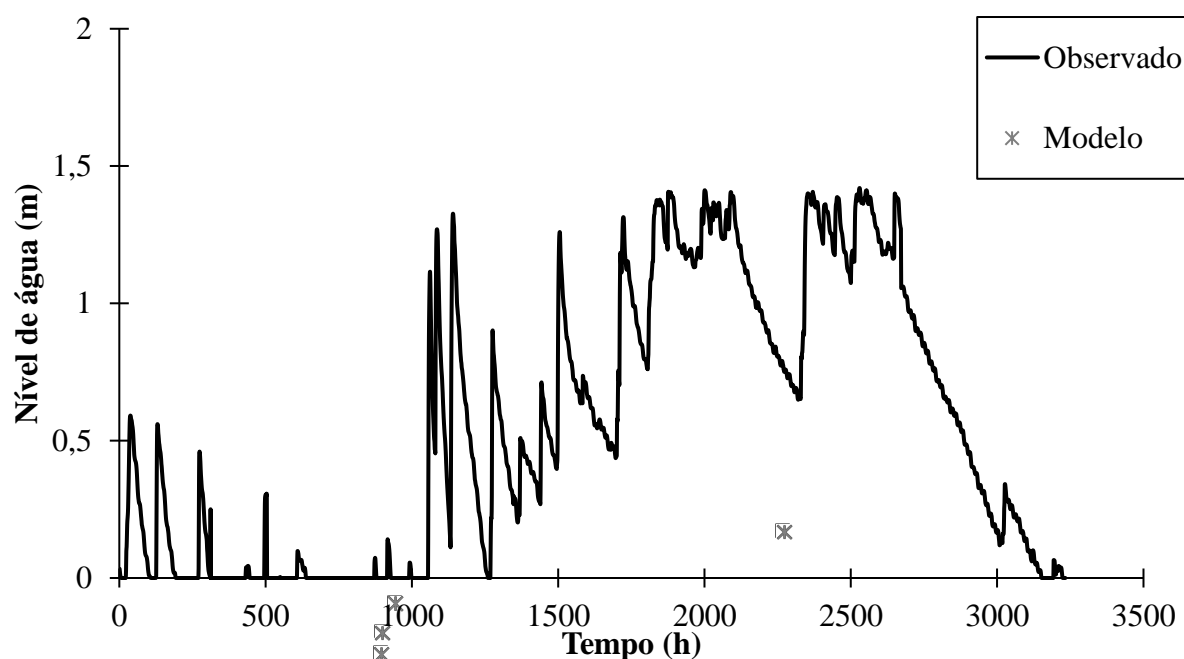


Figura 27 – Simulação do modelo de floresta aleatória dados de 2017.



Fonte: Autor (2025).

Figura 28 – Simulação do modelo de rede neural dados de 2017.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados evidenciam que, para as novas condições da trincheira, os modelos de Árvore de Decisão e Floresta Aleatória apresentaram melhor desempenho, com R^2 acima de 0,94 e NSE superior a 0,88.

Os modelos SVM e MLP, embora mantenham bom desempenho geral, apresentaram maior erro médio ($MAE > 0,10$) e redução do NSE, indicando sensibilidade às variações estruturais e hidrodinâmicas decorrentes do entupimento parcial da base.

A Tabela 7, apresenta os valores dos coeficientes estatísticos obtidos nas simulações com os dados de 2014 e 2017.

Tabela 7 – Parâmetros estatísticos das simulações dos modelos dos dados de 2014 e 2017.

Modelos	2014				2017			
	DTR	SVM	RFR	MLP	DTR	SVM	RFR	MLP
Nash e Sutcliffe (NSE):	0,64	0,85	0,71	0,82	0,88	0,80	0,91	0,78
R ² :	0,78	0,92	0,83	0,90	0,94	0,89	0,95	0,88
MAE:	0,12	0,10	0,11	0,10	0,04	0,11	0,06	0,12

Fonte: Autor (2025).

Os resultados demonstram que os modelos de aprendizado de máquina foram capazes de reproduzir satisfatoriamente o comportamento hidrodinâmico da trincheira de infiltração, com alta correlação entre dados simulados e observados (R^2 médio superior a 0,85).

O desempenho superior da Floresta Aleatória e da Árvore de Decisão indica que modelos baseados em árvores apresentam maior adaptabilidade a padrões não lineares e ruídos típicos de sistemas reais de infiltração. Essas técnicas são particularmente adequadas para dados ambientais, que frequentemente apresentam comportamento estocástico e alta variabilidade temporal.

A diferença de desempenho entre os anos de 2014 e 2017 reflete a degradação hidráulica natural do sistema, decorrente do processo de colmatção, que reduz a condutividade hidráulica e altera o tempo de resposta da estrutura. Essa limitação estrutural, não captada nos dados de treinamento, explica a redução de desempenho dos modelos mais sensíveis à variabilidade temporal, como o SVM e o MLP.

Ainda assim, os quatro modelos demonstraram capacidade de previsão adequada, o que valida o uso de aprendizado de máquina como alternativa eficiente às abordagens determinísticas clássicas, especialmente quando há disponibilidade de séries temporais observadas.

Em comparação com o método de Puls, os algoritmos de ML apresentaram melhor capacidade de adaptação a padrões não lineares e maior precisão na previsão

de picos e recessões, evidenciando o potencial dessas técnicas para previsão em tempo real e calibração de modelos hidrológicos urbanos.

Assim, este estudo inova ao aplicar e comparar modelos de aprendizado de máquina no monitoramento e previsão de comportamento de uma trincheira de infiltração real, demonstrando que, quando calibrados com dados adequados, esses modelos podem complementar métodos tradicionais e oferecer suporte à gestão adaptativa de sistemas de drenagem sustentável.

7 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo geral demonstrar, a partir de dados observacionais e modelagem computacional, que trincheiras de infiltração instaladas em ambientes urbanos apresentam desempenho hidráulico eficiente no controle do escoamento superficial. Para isso, analisaram-se séries temporais de precipitação, vazão afluente, nível d'água interno e variação do lençol freático, associadas à modelagem física e computacional do sistema.

O monitoramento contínuo da trincheira de infiltração permitiu caracterizar sua dinâmica hidráulica em diferentes condições de umidade antecedente, evidenciando a influência direta da saturação do solo sobre a velocidade de escoamento e o tempo de esvaziamento do sistema. Cinco eventos de chuva representativos foram analisados, e observou-se que, mesmo sob condições de solo úmido, a estrutura manteve capacidade satisfatória de armazenamento e infiltração.

A simulação hidrodinâmica realizada com o método de Puls apresentou boa aderência aos dados observados, com coeficientes de determinação (R^2) entre 0,80 e 0,89 e eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE) superior a 0,80 para os principais eventos. O modelo mostrou-se adequado para representar a variação temporal do nível d'água na trincheira, captando a influência da diferença entre as condutividades hidráulicas da base e das paredes. A distinção entre esses parâmetros mostrou-se fundamental, uma vez que a base, após cerca de dez anos de operação, apresentou indícios de colmatagem e perda parcial de capacidade de infiltração.

Complementarmente, foram implementados quatro modelos de aprendizado de máquina na biblioteca *Scikit-learn*: Árvore de Decisão, Floresta Aleatória, Máquina de Vetores de Suporte e Redes Neurais Artificiais. Todos apresentaram capacidade satisfatória de predição do nível d'água no interior da trincheira, com destaque para os modelos baseados em árvores, que obtiveram os melhores desempenhos (R^2 até 0,95 e NSE até 0,91). A análise comparativa entre os anos de 2014 e 2017 mostrou que os modelos se mantêm robustos mesmo com a degradação natural do sistema, embora os algoritmos SVM e MLP tenham apresentado maior sensibilidade às mudanças físicas provocadas pela colmatagem.

Os resultados obtidos evidenciam que a combinação entre modelos determinísticos (método de Puls) e aprendizado de máquina constitui uma abordagem complementar e promissora para a avaliação de dispositivos de infiltração. Enquanto

o método físico fornece compreensão dos processos hidráulicos e parâmetros de projeto, os modelos de aprendizado de máquina permitem prever o comportamento dinâmico do sistema com base em dados históricos, reduzindo a necessidade de calibrações complexas.

Assim, este trabalho contribui de forma prática e científica para o aprimoramento de projetos de drenagem urbana sustentável, propondo uma metodologia híbrida capaz de integrar observação em campo, modelagem hidrodinâmica e aprendizado de máquina para análise de desempenho de trincheiras de infiltração. As evidências obtidas reforçam o potencial desses dispositivos como soluções baseadas na natureza frente aos desafios impostos pela urbanização e pelas mudanças climáticas.

8 TRABALHOS FUTUROS

A continuidade do monitoramento hidráulico da trincheira de infiltração. A observação sistemática de seu desempenho permitirá avaliar a resposta hidráulica do sistema sob diferentes condições de precipitação, incluindo eventos críticos e sazonais.

Realizar ensaio destrutivo da trincheira de infiltração, com o objetivo de identificar a situação atual do sistema em relação ao processo de colmatção. Esse tipo de investigação possibilitará caracterizar o grau de obstrução do meio filtrante e da manta geotêxtil, além de indicar os mecanismos predominantes de perda de capacidade de infiltração, sejam eles físicos (acúmulo de partículas finas), biológicos (crescimento de biofilme) ou químicos (precipitação de sais).

Realizar manutenção no sistema, com a limpeza da camada superficial de material colmatado e a substituição da manta geotêxtil. Essa ação permitirá recuperar parte da capacidade de infiltração original da estrutura. O desempenho pós-manutenção deverá ser comparado com os resultados anteriores, a fim de verificar se houve melhoria efetiva da eficiência hidráulica da trincheira e avaliar a durabilidade das soluções empregadas;

Recomenda-se também a análise da qualidade da água infiltrada pela trincheira. A investigação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, tais como turbidez, sólidos suspensos, nutrientes (nitrogênio e fósforo), matéria orgânica, metais pesados e coliformes, permitirá compreender os efeitos do dispositivo tanto na melhoria da qualidade da água pluvial infiltrada quanto nos possíveis riscos de contaminação do aquífero raso.

REFERÊNCIAS

- ALAMDARI, N.; CLAGGETT, P.; SAMPLE, D.J.; EASTON, Z.M.; NAYEB YAZDI, M. Evaluating the joint effects of climate and land use change on runoff and pollutant loading in a rapidly developing watershed. **Journal of Cleaner Production**, 330, art. nº. 129953, 2022.
- ALAMDARI, N; HOGUE, T.S. Evaluating the effects of stormwater control measures on percolation in semi-arid watersheds using a high-resolution stormwater model. **Journal of Cleaner Production**, 375, art. nº. 134073, 2022.
- AL MEHEDI, M. A.; AMUR, A.; METCALF, J.; MCGAULEY, M.; WADZUK, V. S. B. Predicting the performance of green stormwater infrastructure using multivariate long short-term memory (LSTM) neural network. *Journal of Hydrology*, 625, 130076, 2023.
- ALVES, E. M. Aplicação do programa HYDRUS1D em solo cultivado com feijão Caupi. **Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares). Universidade Federal de Pernambuco, UFPE**, Recife, 83p., 2009.
- A POLLARO, C.; ALVIM, A. B. Planejamento urbano para a adaptação de cidades frente à mudança climática-Uma análise sobre o Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo. **Revista Thésis**, v. 2, n. 4, p. 118-137, 2017
- ARAUJO, A. C. da S.; ANDRADE, M. P.; RIBEIRO, C. B. de M.; CÂNDIDO, V. B. R.; MENDES, G. C.; MELO, T. T. R.; GANTE, L. G. A. Aplicação do Método de Puls no Amortecimento de Cheias – Carangola (MG). XIV ENAU / IV SRRU, ABRHidro, Juiz de Fora, 2022.
- ARAÚJO, Y. R. V.; OLIVEIRA, H. M. **Os impactos das mudanças climáticas em áreas urbanas**. In: NUNES, Matheus Simões (Org.). Estudos em Direito Ambiental: Desenvolvimento, desastres e regulação. Campina Grande: Editora Licuri, p. 161-173, 2022.
- ARRAES, F. D. D. Modelagem bidimensional do movimento da água em condições de solos não saturado. **Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola). Universidade de São Paulo, USP**, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 86p., 2014.
- AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F.N.; ALFAKIH, E. **Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception,realization et entretien**. Paris: Lavoisier.372p., 1994.

- BAGARELLO, V., CASTELLINI, M., DRI PRIMA, S., GIORDANO, G., IOVINO, M. Testing a simplified approach to determine field saturated soil hydraulic conductivity. **Procedia Environmental Sciences**, 19, 599-608, 2013.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. Técnicas Compensatórias Em Drenagem Urbana. **ABRH**: Porto Alegre, Brasil, 2015.
- BAPTISTA, V. S. G.; PAZ, A. R. da. *Cost-efficiency analysis of a runoff detention reservoir with integrated hydraulic and structural dimensioning*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), v. 23, e36, 2018.
- BARBASSA, A.P.; SOBRINHA, L. A.; MORUZZI, R.B. Poço de Infiltração Para Controle de Enchentes Na Fonte: Avaliação Das Condições de Operação e Manutenção. **Ambiente Construído** Porto Alegre, 14, 91–107, 2014.
- BERTRAND-KRAJEWSKI, J. L. Integrated urban stormwater management: Evolution and multidisciplinary perspective. **Journal of Hydro-environment Research**, 38, 72-83, 2021.
- BETTES, R. **Infiltration Drainage**: manual of good practice. Longon: CIRIA.107p. (Construction Industry Research and Information Association.Report 156). 1996.
- BEZERRA, P. H. L.; COUTINHO, A. P.; LASSABATERE, L.; NETO, S. M. DOS S.; DE MELO, T. DOS A. T.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Water Dynamics in an Infiltration Trench in an Urban Centre in Brazil: Monitoring and Modelling. **Water**, 14(4):513, 2022.
- BEZERRA, P. H. L. Dinâmica da água em trincheira de infiltração em lote urbano **(Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)**. Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 87p., 2018.
- BILHANÇA, M.F. Bacias de retenção em zonas urbanas como contributo para a resolução de situações extremas: cheias e secas. **Universidade de Porto, Faculdade de Engenharia**. Dez. 2006.
- BLECKEN, G. T.; HUNT III, W. F.; AL-RUBAE, A. M.; VIKLANDER, M.; LORD, W. G. Stormwater control measure (SCM) maintenance considerations to ensure designed functionality. **Urban Water Journal**, 1744-9006 (Online), 2015.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, n.3, Fort Collins: Colorado State University, 27p., 1964.
- BRUNETTI, G.; ŠIMŮNEK, J.; TURCO, M.; PIRO, P. On the use of global sensitivity analysis for the numerical analysis of permeable pavements. **Urban Water J.** 15, 269–275, 2018.

- BRUNETTI, G.; ŠIMŮNEK, J.; PIRO, P. A comprehensive analysis of the variably saturated hydraulic behavior of a green roof in a mediterranean climate. **Vadose Zone J.** 15, vzj2016.04.0032, 2016.
- BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **American Institute Mining and Metallurgy Engineering**, v.198, p.71-77, 1953.
- BUTLER, S. **Engineering Hydrology**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1957.
- CAMPANA, N.A; EID.N.J. **Avaliação do desempenho de coberturas permeáveis no controle do escoamento superficial em áreas urbanas**. In: XV Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Curitiba. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2003.
- CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. **Oficina de Textos**, 2 ed. São Paulo, 2014.
- CARVALHO, J. C.; LUIZ, G. C.; GONÇALVES, T. D. **A infiltração no contexto do plano urbanístico e dos projetos paisagístico e arquitetônico**. [s.l.]: In: CARVALHO, J. C.; LUIZ, G. C. GONÇALVES, T. D. Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Brasília: Faculdade de Tecnologia, 2012. p.25–47. (Série Geotecnia, v.4).
- CANSIAN, A.R.; GUZMÁN, D.A.; ROSA, A.; DE TOLEDO MACHADO, J. Nature-Based Solutions for Urban Drainage: A Systematic Review of Sizing and Monitoring Methods. **Water**, 17, 2524, 2025.
- CHAHAR, B. R.; GRAILLOT, D.; GAUR, S. Storm-water management through infiltration trenches. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s.l.], v.138, n.3, p.274–281, 2012.
- CHOUBIN, B.; RAHMATI, O.; SOLEIMANI, F.; ALILOU, H.; MORADI, E.; ALAMDARI, N. Regional groundwater potential analysis using classification and regression trees. **Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences**, pp. 485-498, 2019.
- ÇIRAĞ, B., KARAGÖZ, R., ÖZER, A. E., AYDIN, A. Ö., & FIRAT, M. Modelling the dynamic performance of stormwater drainage systems integrated with infiltration trenches. **Urban Water Journal**, 22(2) ,244–257, 2024.
- CONLEY, G; BECK, N.; RIIHIMAKI, C; TANNER, M. Quantifying clogging patterns of infiltration systems to improve urban stormwater pollution reduction estimates. **Water Research X**, 7, 100049, 2020.
- COUTINHO, A.P., LASSABATERE, L., WINIARSKI, T., DA SILVA PEREIRA CABRAL, J.J., ANTONINO, A.C.D. AND 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.

COUTINHO, A. P., LASSABATERE, L., MONTENEGRO, S., ANTONINO, A. C. D., ANGULO-JARAMILLO, R., & CABRAL, J. J. Hydraulic characterization and hydrological behaviour of a pilot permeable pavement in an urban centre, Brazil. **Hydrological Processes**, 30(23), 4242-4254, 2016.

COUTINHO, A. P, Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 152p., 2011.

D'ANIELLO, A.; CIMORELLI, L.; COZZOLINO, L.; PIANESE, D. The effect of geological heterogeneity and groundwater table depth on the hydraulic performance of stormwater infiltration facilities. **Water Resour. Manag.** 33, 1147–1166, 2019.

DUCHENE, M.; MCBEAN, E. A.; THOMSON, N. R. Modeling of Infiltration From Trenches for Storm Water Control. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 120, n. 3, pp. 276-293, 1994.

EBRAHIMIAN, A.; SOKOLOVSKAYA, N.; WADZUK, B. Modeling dynamic performance of urban infiltration trench systems: Methodology and a case study in Philadelphia. **Journal of Hydrology**, v. 594, 2021.

ELRAHMANI, A.; AL-RAOUSH, R.; RABBANI, H. S.; SEERS, T. D. Machine learning-driven identification and predictive mapping of clogging regimes in porous media. **Journal of Hydrology**, 662, 134106, 2025.

ESRAZ-UI-ZANNAT, Md. ; DEDEKORKUT-HOWES, A. ; MORGAN, E. A. A review of nature-based infrastructures and their effectiveness for urban flood risk mitigation. **Wires climate Change**, v. 15, 889, 2024.

ESPINDOLA, A. L. Q, DALDEGAN B. M. A. Análise quali-quantitativa do escoamento superficial urbano. Estudo de caso: Asa Norte Brasília - DF Monografia de Projeto Final, **Departamento de Engenharia Civil e Ambiental**, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71 p. 2016

FARAH, G.; KHODASHENAS, S.R.; ALIZADEH, A.; ZIAEI, A.N. New model for simulating hydraulic performance of an infiltration trench with finite-volume one-dimensional Richards' equation. **J. Irrig. Drain. Eng.** 143, 04017025, 2017.

FERRANS, P.; REYES-SILVA, J. D.; KREBS, P; TEMPRANO, J. Flood Management with SUDS: A Simulation–Optimization Framework. **Water**, 15(3), 426, 2023.

- FERREIRA, L.T.L.M.; DAS NEVES, M.G.F.P.; DE SOUZA, V.C.B. Puls Method for Events Simulation in a Lot Scale Bioretention Device. **RBRH**, 24, 2019.
- FRENI, G.; MANNINA, G. Long term efficiency analysis of infiltration trenches subjected to clogging. In **New Trends in Urban Drainage Modelling**; Springer: Cham, Switzerland, pp. 181–187, 2018.
- GHORBANZADEH, O.; BLASCHKE, T.; GHOLAMNIA, K.; MEENA, S. R.; TIEDE, D.; ARYAL, J. Evaluation of Different Machine Learning Methods and Deep - Learning Convolutional Neural Networks for Landslide Detection. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2, 196, 2019.
- GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Simulação hidráulica de trincheira de infiltração de águas pluviais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 13, n. 2, abr – jun, p.89-99, 2008.a.
- GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Metodologia para o dimensionamento de trincheira de infiltração para controle do escoamento superficial na origem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 13, n. 2, abr – jun, p.207-214, 2008.b.
- HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M. A note on estimating finite difference interblock hydraulic conductivity values for transiente unsaturated flow problems. **Water Resources Research**, Washington, v.5, n.1, p.181-187, 1979.
- HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. New York, Academic Press, 1998.
- IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística** (2024). Banco de Dados SIDRA. Disponível em <<https://sidra.ibge.gov.br/home/pimpfrg/nordeste>>. Acessado em 18 de dezembro de 2024.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2025). Normais Climatológicas. Disponível em < <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/PE/82900>>. Acessado em 15 de setembro de 2025.
- JABUR, A. S.; DORNELLES, F.; SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A.; OKAWA, C. M. P.; GASPARINI, R. R. Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. **RBRH** vol. 20 no.4 out. /dez. 2015 p. 937 – 945 Porto Alegre, 2015.
- JEON, M.; GUERRA, H.B.; CHOI, H.; KIM, L.-H. Long-Term Monitoring of an Urban Stormwater Infiltration Trench in South Korea with Assessment Using the Analytic Hierarchy Process. **Water**, 14, 3529, 2022.
- JÚNIOR, A. A. O.; DA SILVA, L. P.; MENDIONDO, E. M. Vazões afluentes em trincheira de infiltração domiciliar. **Ciência & Engenharia**, v. 24, n. 1, p. 89-98, 2015.

- KHOSRAVI, K.; SHAHABI, H.; PHAM, B. T.; ADAMAWOSKI, J. A comparative assessment of flood susceptibility modeling using Multi - Criteria Decision-Making Analysis and Machine Learning Methods. **Journal of Hydrology**, v. 573, p. 311-323, 2019.
- KUO, C.Y.; ZHU, J.L.; DOLLARD, L.A. Infiltration Trenches for Urban Runoff Control; **Hydraulic Engineering**; ASCE: Reston, VA, USA, 1989; pp. 1029–1034.
- 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 American Journal**, v.70, p.521-532, 2006.
- LI, R.; ZHU, G.; LU, S.; SANG, L.; MENG, G.; CHEN, L.; JIAO, Y.; WANG, Q. Effects of urbanization on the water cycle in the Shiyang River basin: based on a stable isotope method. **Hydrology and Earth System Sciences**, 27, 4437–4452, 2023.
- LUCAS, A. H.; SOBRINHA, L. A.; MORUZZI, R. B.; BARBASSA, A. P. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v.20 n.1, p.17-28, 2015.
- LUCAS, A.H.; BARBASSA, A.P.; MORUZZI, R.B. Modelagem de Um Sistema Filtro-Vala-Trincheira de Infiltração Pelo Método de Puls Adaptado Para Calibração de Parâmetros. **Rev. Bras. Recur. Hídricos**, 18, 135–236, 2013.
- MARQUES, E. A. T.; OLIVEIRA, L. J. Mudanças climáticas no Nordeste Brasileiro e refugiados ambientais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 04, p. 965-984, 2016.
- MCCUEN, R. H. Hydrologic Analysis and Design. **2.ed. Prentice Hall**, 1998.
- MCVEY, I.; MICHALEK, A.; MAHONEY, T.; HUSIC, A. Urbanization as a limiter and catalyst of watershed-scale sediment transport: Insights from probabilistic connectivity modeling. **Science of The Total Environment**, V. 894, 165092, 2023.
- 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. **Ambiente Construído (Online)**, v. 16, p. 53-72, 2016.

- MELO, T. A. T. M. Avaliação hidrodinâmica de trincheira de infiltração no manejo das águas pluviais urbanas. **Tese de doutorado**, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 136p., 2015.
- MELO, T. dos A. T. DE; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. da S. P.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 147-165, out./dez. 2014.
- MONACHESE, A.P.; GÓMEZ-VILLARINO, M.T.; LÓPEZ-SANTIAGO, J.; SANZ, E.; ALMEIDA-ÑAUÑAY, A.F.; ZUBELZU, S. Challenges and Innovations in Urban Drainage Systems: Sustainable Drainage Systems Focus. **Water**, 17, 76, 2025.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v.12, p.513-522, 1976.
- MUJOVO, M. J. M. Simulação de fluxo vertical em trincheira de infiltração urbana. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)**. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 115p., 2014.
- NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B.; SOUZA, V. C. B. Sistema Hidrourb para o pré-dimensionamento de soluções alternativas de drenagem urbana – parte 1: conceitos. In: **Simpósio Nacional de Recursos Hídricos**, 12. Vitória. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo: ABRH, v.3.p.669-676, 1997.
- OHNUMA, A.A.; DA SILVA, L.P.; MENDIONDO, E.M. Input Flows for the Infiltration Trench Household. **Cienc. Eng. Sci. Eng. J.**, 24, 89–98, 2015.
- OLIVEIRA, F. L.; BEZERRA, M.D.C.D.L.; NUNES, O.V.R.; DUARTE, E.D.A.; CASTALDO, A.G.; ALMEIDA, D.N.D. Nature-Based Solutions for Stormwater Management: Co-Creating a Multiscalar Proposal in the Global South. **Land**, 14, 740, 2025.
- ONETO, G.; CANEPA, M. Addressing sustainable urban flood risk: reviewing the role and scope of theoretical models and policies. **Water Policy**, v.25 (8), 797-814, 2023.
- PAPACHARALAMPOUS, G; TYRALIS, H. A review of machine learning concepts and methods for addressing challenges in probabilistic hydrological post-processing and forecasting. **Water**, 4: 961954, 2022.
- PAULETTO, E.A.; LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**. Campinas, SP. v. 12, p. 189-195, 1988.

- PORTO, R.; ZAHED FILHO, K.; TUCCI, C.; BIDONE, F. Drenagem urbana. In TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2 ed. Porto Alegre: Ed. Da Universidade/UFRGS: ABRH. Cap.21, 805-847. 1997.
- PULS, L. Bureau of Reclamation Manual. [S.l.]: **U.S. Department of the Interior**, Denver, 1947.
- PULS, L. Flood Regulation of the Tennessee River. [S.l.]: **70th Congress, 1st Session, U.S. Government Printing Office**, 1928.
- UNEP (*United Nations Environment Programme*) - *How climate change is making record-breaking floods the new normal*. Disponível em <<https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-climate-change-making-record-breaking-floods-new-normal>>. Acessado em 27 de dezembro de 2024.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous media. **Physics**, n.1, p.318-333, 1931.
- RIGHETTO A. M. Manejo de Águas Pluviais Urbanas. **Programa de Pesquisa e Saneamento Básico**, Rio de Janeiro, 2009.
- SAFDAR, S.; JEFFERSON, A. J.; COSTELLO, D. M.; BLINN, A. Urbanization and Suspended Sediment Transport Dynamics: A Comparative Study of Watersheds with Varying Degree of Urbanization Using Concentration-Discharge Hysteresis. **ACS EST Water**, Aug 2;4(9):3904-3917, 2024.
- SALVADORE, E.; BRONDERS, J.; BATELAAN, O. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. **Journal of Hydrology**, 529 (P1), pp. 62-81, 2015.
- SANTOS, J.B.F. Monitoramento e Simulação Hidráulica de Uma Trincheira de Infiltração. **Dissertação de mestrado**, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2014.
- SHIH, S. S.; KUO, P. H.; LAI, J. S. A nonstructural flood prevention measure for mitigating urban inundation impacts along with river flooding effects. **Journal of Environmental Management**, v251, 109553, 2019.
- SILVA, S. R.; ARAÚJO, G. R. de S. Algoritmo para determinação da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 5, p. 1371-1383, 2013.
- SILVA, F.C. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**; Embrapa Informação Tecnológica: Brasília, Brasil, 2009.

SILVA, J. P. Estudos Preliminares para a implantação de Trincheiras de Infiltração. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-154-07, **Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília**, Brasília, DF, 155p., 2007.

SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A. Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n.2, p. 157-168, 2007.

SWMMWW - **STORMWATER MANAGEMENT MANUAL FOR WESTERN WASHINGTON (2019)**. Washington State Department of Ecology. Manual. Disponível em: < [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://fortress.wa.gov/ecy/ezshare/wq/Permits/Flare/2019SWMMWW/Content/Resources/DocsForDownload/2019SWMMWW.pdf](https://fortress.wa.gov/ecy/ezshare/wq/Permits/Flare/2019SWMMWW/Content/Resources/DocsForDownload/2019SWMMWW.pdf) >. Acesso em 11 jun. 2023.

SOUZA, V. C. B. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS, Porto Alegre, 150p., 2002.

SOUZA, M. I. de F.; BARBOSA, J. J.; COSTA, C. T. F. Uma reflexão sobre mudanças climáticas, saúde e meio ambiente no semiárido Nordeste. **Saúde e Meio Ambiente**, v. 4, n. 2, p. 61-77, 2015.

SOUZA, R. C. C. de; FREIRE, F. B.; MANNICH, M. Design guidelines for on-site stormwater detention (Critérios de dimensionamento de reservatórios de retenção de águas pluviais). *Ciência e Natura*. V.43, e70, 2021.

TAVARES, V. C.; ARRUDA, I, R. P.; SILVA, D. G. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. *Geosul*, v. 34, n. 70, p. 385-405, 2019.

TECEDOR, N.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R. B.; GONÇALVES, L. M. Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de infiltração construído em escala real. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (Brazilian Journal of Water Resources)*. v.20, jul-set, 2015.

TECEDOR, N. Monitoramento e Modelagem Hidrológica de Plano de Infiltração Construído em Escala Real. **Dissertação de mestrado**, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brazil, 2014.

TUCCI, C.E. Modelos Hidrológicos; **Editora da UFRGS**: Porto Alegre, Brasil, 2005; ISBN 978-85-7025-823-6.

- URBONAS, B.; STAHR, P. Stormwater Best Management Practices and Detention. **Englewood Cliffs**, New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.892-898, 1980.
- WANG, L.; CUI, S.; LI, Y.; HUANG, H.; MANANDHAR, B.; NITIVATTANANON, V.; FANG, X.; HUANG, W. A review of the flood management: from flood control to flood resilience. **Heliyon**, 8, 11, e11763, 2022.
- XIE, J.; QIANG, W.; LIN, Y.; HUANG, Y.; XU, K.-Q.; ZHENG, D.; CHEN, S.; PEI, Y.; FAN, G. Enhancing Urban Drainage Resilience Through Holistic Stormwater Regulation: A Review. **Water**, 17, 1536, 2025.
- YANG, Y.; CHUI, T. F. M. Modeling and interpreting hydrological responses of sustainable urban drainage systems with explainable machine learning methods. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 25, 5839–5858, 2021.
- YUAN, Y.; ZHENG, Y.; HUANG, X.; ZHAI, J. Adaptive stormwater drainage strategies under changing climate conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 466, p. 142890, 2024.
- ZAKIZADEH, F.; MOGHADDAM NIA, A.; SALAJEGHEH, A.; SAÑUDO-FONTANEDA, L.A.; ALAMDARI, N. Efficient Urban Runoff Quantity and Quality Modelling Using SWMM Model and Field Data in an Urban Watershed of Tehran Metropolis. **Sustainability** (Switzerland), 14 (3), art. no. 1086, 2022.
- ZHANG, Y.; WANG, E.; GONG, Y. A Structural Optimization of Urban Drainage Systems: An Optimization Approach for Mitigating Urban Floods. **Water**, v. 16, n. 12, 2024.
- ZHOU, K.; KONG, F.; YIN, H.; DESTOUNI, G.; MEADOWS, M. E.; ANDRESON, E.; CHEN, L.; CHE, B.; LI, Z.; SU, J. Urban flood risk management needs nature-based solutions: a coupled social-ecological system perspective. **Urban Sustainability**, 4, 25, 2024.
- ZHU, Q.; KLAAR, M.; WILLIS, T.; HOLDEN, J. A Quantitative Review of Natural Flood Management Research. **Wires Water**, 12 (1), e1765, 2024.