



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO- CAMPUS
AÇAILÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIA HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS E LETRAS CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL BACHARELADO

EDUARDO DA CONCEIÇÃO OLIVEIRA

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE UM JARDIM DE CHUVA,
PARA O CONTROLE DE ÁGUAS PLUVIAIS EM UMA RESIDÊNCIA
UNIFAMILIAR NO MUNICÍPIO DE AÇAILÂNDIA-MA**



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

EDUARDO DA CONCEIÇÃO OLIVEIRA

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE UM JARDIM DE CHUVA,
PARA O CONTROLE DE ÁGUAS PLUVIAIS EM UMA RESIDÊNCIA
UNIFAMILIAR NO MUNICÍPIO DE AÇAILÂNDIA-MA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil Bacharelado do Centro de Ciência Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, campus Açailândia, como requisito para o grau de bacharelado em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Me. Deckson Lacerda de Sousa Costa



O48a

Oliveira, Eduardo da Conceição

Análise da capacidade de infiltração de um jardim de chuva, para o controle de águas pluviais em uma residência unifamiliar no município de Açailândia - MA / Eduardo da Conceição Oliveira. – Açailândia: UEMASUL, 2026.
92 f. ; il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Açailândia, MA, 2026.

Orientador: Prof. Me. Deckson Lacerda de Sousa Costa.

1. Jardim de chuva. 2. Drenagem sustentável. 3. Águas pluviais.

CDU 624



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

EDUARDO DA CONCEIÇÃO OLIVEIRA

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE UM JARDIM DE CHUVA,
PARA O CONTROLE DE ÁGUAS PLUVIAIS EM UMA RESIDÊNCIA
UNIFAMILIAR NO MUNICÍPIO DE AÇAILÂNDIA-MA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil Bacharelado do
Centro de Ciência Humanas, Sociais,
Tecnológicas e Letras da Universidade
Estadual da Região Tocantina do Maranhão,
campus Açailândia, como requisito para o
grau de bacharelado em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Me. Deckson Lacerda de
Sousa Costa

Aprovado em: 12/06/2026



Documento assinado digitalmente

DECKSON LACERDA DE SOUSA COSTA

Data: 15/06/2026 09:08:51-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Deckson Lacerda de Sousa Costa

Mestre em Ciência dos Materiais

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão- UEMASUL



Documento assinado digitalmente

REGIANE KESSIAS DE SOUSA LIRA

Data: 18/06/2026 12:08:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Regiane Kessias de Sousa Lira

Engenheira Química- Tecnologia em Processos Químicos e Bioquímicos

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão- UEMASUL



Documento assinado digitalmente

LEONARDO TELLES DE SOUZA PESSOA FILHO

Data: 17/06/2026 17:57:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Esp. Leonardo Telles de Souza Pessoa Filho

Especialista em Infraestrutura de Transporte e Rodovias

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão- UEMASUL



AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me concedido força, saúde, sabedoria e perseverança ao longo de toda essa caminhada acadêmica, permitindo que eu superasse os desafios encontrados durante esta trajetória.

Aos meus pais, expresso minha profunda gratidão por todo apoio, incentivo, dedicação e confiança durante minha formação. Sem o esforço, os ensinamentos e o suporte oferecido por eles, esta etapa não seria possível.

Ao meu irmão, Gustavo da Conceição Oliveira, agradeço pelo apoio prestado durante o processo de construção e desenvolvimento deste trabalho, contribuindo diretamente para a realização desta pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Me. Deckson Lacerda de Sousa Costa, deixo meu sincero agradecimento pela orientação, paciência, disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados ao longo da elaboração deste trabalho, contribuindo significativamente para seu desenvolvimento.

À empresa Franco Engenharia, agradeço pela disponibilização do laboratório e pelo apoio na realização dos ensaios de solo, fundamentais para a execução desta pesquisa.

À Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, agradeço pela oportunidade de formação acadêmica, pela estrutura oferecida e por todos os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Civil.



RESUMO

O aumento das áreas impermeabilizadas nas cidades tem contribuído para a intensificação do escoamento superficial e dos problemas relacionados à drenagem urbana. Nesse contexto, os jardins de chuva surgem como alternativas sustentáveis para o manejo das águas pluviais, promovendo retenção temporária, infiltração e redução das vazões direcionadas aos sistemas convencionais de drenagem. Este trabalho teve como objetivo analisar a eficiência de um jardim de chuva aplicado ao controle de águas pluviais em uma residência unifamiliar no município de Açailândia-MA, avaliando sua capacidade de infiltração e retenção hídrica. A pesquisa caracterizou-se como experimental, exploratória e de abordagem mista, sendo desenvolvida por meio da implantação de um jardim de chuva do tipo biorretenção, com área superficial de 3 m² e profundidade útil de 0,9 m. O sistema foi composto por camadas de areia e seixo rolado, separadas por manta geotêxtil. Foram realizados ensaios de infiltração e granulometria do solo, além de oito simulações de chuva dimensionadas com base no Método Racional e na equação intensidade-duração-frequência (IDF), utilizando dados pluviométricos locais e áreas de contribuição de 60 m², 30 m², 20 m² e 15 m². Também foram utilizados dispositivos de medição de vazão, volume e nível de água para análise do desempenho hidráulico do sistema. Os resultados demonstraram que o jardim de chuva apresentou capacidade significativa de infiltração e armazenamento temporário das águas pluviais, contribuindo para a redução do escoamento superficial e amortecimento das vazões de pico, sendo que mesmo a condição mais crítica analisada não ultrapassou 70% da altura útil do sistema. Conclui-se que os jardins de chuva representam uma alternativa eficiente e sustentável para auxiliar no controle de águas pluviais em áreas urbanizadas.

Palavras-chave: Jardim de chuva, Drenagem sustentável, Águas pluviais.



ABSTRACT

The increase in impermeable areas in urban environments has contributed to the intensification of surface runoff and problems related to urban drainage. In this context, rain gardens emerge as sustainable alternatives for stormwater management, promoting temporary storage, infiltration, and reduction of flow directed to conventional drainage systems. This study aimed to analyze the efficiency of a rain garden applied to stormwater control in a single-family residence located in the municipality of Açailândia-MA, evaluating its infiltration and water retention capacity. The research was characterized as experimental, exploratory, and based on a mixed approach, through the implementation of a bioretention-type rain garden with a surface area of 3 m² and an effective depth of 0.9 m. The system was composed of layers of sand and river gravel separated by geotextile fabric. Infiltration and soil granulometry tests were carried out, in addition to eight rainfall simulations dimensioned based on the Rational Method and the intensity-duration-frequency (IDF) equation, using local rainfall data and contribution areas of 60 m², 30 m², 20 m², and 15 m². Flow, water volume, and water level measurement devices were also used to analyze the hydraulic performance of the system. The results demonstrated that the rain garden presented significant infiltration and temporary stormwater storage capacity, contributing to the reduction of surface runoff and attenuation of peak flows, with even the most critical simulation not exceeding 70% of the system's effective height. It is concluded that rain gardens represent an efficient and sustainable alternative to assist in stormwater control in urbanized areas.

Keywords: Rain garden, Sustainable drainage, Stormwater.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: planta baixa do jardim ilustrada	30
Figura 2: corte transversal BB	30
Figura 3: corte longitudinal AA	30
Figura 4: preparo e nivelamento do solo	31
Figura 5: ferramentas utilizadas no esquadreamento do jardim	31
Figura 6: ferramentas utilizadas para escavação do jardim	32
Figura 7: estrutura em fôrma de madeira	33
Figura 8: estrutura de forma aplicada na borda superior da cava do jardim	33
Figura 9: escavação finalizada da cava do jardim	34
Figura 10: manta geotêxtil Bidim	34
Figura 11: implantação da manta geotêxtil envolta da cava do jardim	35
Figura 12: seixo rolado utilizado como material granular	35
Figura 13: areia utilizada como material granular miúdo	36
Figura 14: disposição das camadas do jardim	36
Figura 15: colocação da camada de areia	37
Figura 16: colocação da camada de seixo rolado	37
Figura 17: colocação da camada superior com seixo rolado	38
Figura 18: jardim de chuva finalizado	40
Figura 19: infiltrômetro de anel	41
Figura 20: réguas e escalímetro utilizado no ensaio de infiltrômetro de anel	42
Figura 21: amostra de solo para ensaio de granulometria	44
Figura 22: amostra de solo submetida à fonte de calor	45
Figura 23: conjunto de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria	47
Figura 24: pluviômetro manual	50
Figura 25: dispositivos medidores de vazão de água e volume	53
Figura 26: perfuração no tubo horizontal	55
Figura 27: posicionamento da tubulação de entrada da água	56
Figura 28: posicionamento da tubulação horizontal com materiais granulares	57
Figura 29: caixa de água, capacidade para 1000 litros	57
Figura 30: sensor de nível de água	59
Figura 31: faixas de sensoriamento do sensor de nível de água	59
Figura 32: interface do aplicativo Smart Life	60
Figura 33: interface de indicação das faixas do sensor de nível de água	61
Figura 34: encanação que permite a medição do nível de água	63
Figura 35: consolo de sustentação	63
Figura 36: pontas sensoras acopladas	64
Figura 37: disposição ilustrada do posicionamento do tubo PVC 20 mm	65
Figura 38: disposição da tubulação vertical	65
Figura 39: dispositivo piezométrico finalizado	65
Figura 40: dispositivo piezométrico com escala graduada	67



LISTA DE TABELAS

Tabela 1: valores limite de máximo e mínimo de índice de vazios	39
Tabela 2: valores máximos e mínimos de porosidade	40
Tabela 3: quantidade mínima de amostra de solo para ensaio de granulometria	44
Tabela 4: quantidade de amostra considerada para ensaio de granulometria	46
Tabela 5: dados pluviométricos de precipitação de Açailândia-MA	51
Tabela 6: dimensionamento do volume de água para os ensaios de chuva	52
Tabela 7: medições e níveis correspondentes do sensor de nível de água	60
Tabela 8: disposição de medidas e variação de cota	66
Tabela 9: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota	70
Tabela 10: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota	71
Tabela 11: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota	72
Tabela 12: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota	74
Tabela 13: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota	75
Tabela 14: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota	76
Tabela 15: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota	77
Tabela 16: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota	79
Tabela 17: resultado do ensaio de infiltrômetro de anel	80
Tabela 18: resultado do ensaio do peneiramento grosso	83
Tabela 19: resultado do ensaio do peneiramento fino	83
Tabela 20: volume útil considerado de cada camada do jardim pela porosidade mínima	85
Tabela 21: volume útil considerado de cada camada do jardim pela porosidade máxima	86



LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: curvas IDF dos dados pluviométricos de Açailândia-MA	52
Gráfico 2: volume de água inserido no jardim em cada simulação	67
Gráfico 3: nível máximo e disponível para cada simulação no jardim	68
Gráfico 4: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo	71
Gráfico 5: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo	72
Gráfico 6: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo	73
Gráfico 7: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo	74
Gráfico 8: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo	76
Gráfico 9: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo	77
Gráfico 10: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo	78
Gráfico 11: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo	79
Gráfico 12: velocidade de infiltração do solo no decorrer do tempo	81
Gráfico 13: média da velocidade de infiltração para cada simulação e velocidade básica (vb)	82
Gráfico 14: curva granulométrica do solo presente	84
Gráfico 15: volume útil considerando a porosidade mínima	86
Gráfico 16: volume útil considerando a porosidade máxima	87



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: índice de vazios	38
Equação 2: velocidade de infiltração básica	41
Equação 3: modelo de Horton	43
Equação 4: teor de umidade do solo	46
Equação 5: Método Racional	48
Equação 6: intensidade de precipitação	49



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

L/min – Litros por minuto

m² – Metro quadrado

m³ – Metro cúbico

mm – Milímetro

mm/h – Milímetros por hora

PVC – Policloreto de Vinila

Vib – Velocidade de infiltração básica

Via – Velocidade de infiltração aparente



SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	14
2.OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Definição de Jardim de Chuva	16
3.2 Urbanização e mudanças ao meio ambiente	18
3.3 Drenagem Sustentável.....	20
3.4 Materiais de implantação.....	21
3.5 Micro e macrodrenagem	23
3.6 Infiltração da água da chuva no solo	25
3.7 Impactos hidrológicos urbanos.....	27
4.METODOLOGIA.....	29
4.1 Tipo de Pesquisa	29
4.2 Implantação do Jardim	29
4.2.1 Preparo do terreno e escavação.....	31
4.2.2 Manta geotêxtil	34
4.2.3 Materiais porosos granulares	35
4.3 Ensaio de velocidade de infiltração do solo	41
4.4 Ensaio de granulometria do solo	43
4.5 Dimensionamento para simulações de chuvas	47
4.5.1 Método Racional.....	48
4.5.2 Dimensionamento GAM-IDF	49
4.5.3 Dados Pluviométricos	50
4.5.4 Simulações de chuva.....	51
4.6 Implementação dos Dispositivos de água e procedimentos de medição	53
4.6.1 Medidores de vazão e volume de água	53
4.6.2 Entrada de água pelo jardim	54
4.6.3 Desenvolvimento de equipamento alternativo para medição piezométrica.....	57
4.7 Leitura do nível de água e procedimentos complementares	65
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5.1 Avaliação do desempenho do jardim de chuva para cada simulação de chuva dimensionada	67
5.2 Análise do tempo de infiltração nas simulações de chuva.....	69
5.2.1 Análise da simulação S1	70
5.2.2 Análise da simulação S2	71



5.2.3 Análise da simulação S3	72
5.2.4 Análise da simulação S4	73
5.2.5 Análise da simulação S5	75
5.2.6 Análise da simulação S6	76
5.2.7 Análise da simulação S7	77
5.2.8 Análise da simulação S8	78
5.3 Relação entre o ensaio de infiltrômetro de anel e o comportamento observado nas simulações.....	79
5.4 Relação entre os materiais: solo e volume útil disponível pelo jardim	82
5.4.1 Granulometria do solo	82
5.4.2 Volume útil do jardim pela consideração de porosidade dos materiais granulares.....	85
6.CONCLUSÃO.....	88
6.1 Estudos futuros	89
REFERÊNCIAS	90

1.INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada das cidades tem provocado alterações significativas no comportamento hidrológico natural do solo, principalmente em razão do aumento das áreas impermeabilizadas. A substituição da cobertura vegetal por pavimentos, edificações e estruturas urbanas reduz a infiltração da água da chuva no solo, favorecendo o aumento do escoamento superficial e intensificando problemas relacionados à drenagem urbana. Segundo Rinchumphu *et al.* (2023), o crescimento urbano desordenado contribui diretamente para o aumento das vazões superficiais, elevando os riscos de alagamentos e sobrecarga dos sistemas convencionais de drenagem. Nesse contexto, os impactos associados às precipitações intensas passaram a representar um dos principais desafios enfrentados pelas cidades contemporâneas.

Além da impermeabilização do solo, a deficiência dos sistemas de microdrenagem urbana também contribui para o agravamento dos problemas relacionados às águas pluviais. Em diversos municípios brasileiros, a infraestrutura urbana existente não consegue atender adequadamente às demandas geradas pelas chuvas intensas, principalmente em áreas com elevado adensamento urbano. De acordo com Lopes, Marques e Silva (2021), o aumento do escoamento superficial, associado à redução das áreas naturais de infiltração, favorece a ocorrência de enxurradas e alagamentos, comprometendo tanto a infraestrutura urbana quanto a qualidade de vida da população. Dessa forma, torna-se necessária a adoção de alternativas sustentáveis que auxiliem no manejo das águas pluviais e reduzam os impactos provocados pela urbanização.

Nesse cenário, as soluções baseadas na natureza passaram a ganhar destaque dentro do planejamento urbano sustentável, principalmente por promoverem maior integração entre infraestrutura e meio ambiente. Entre essas alternativas, os jardins de chuva vêm sendo amplamente utilizados como sistemas compensatórios aplicados à drenagem urbana sustentável. Segundo Kasprzyk *et al.* (2022), os jardins de chuva atuam como estruturas de biorretenção capazes de armazenar temporariamente a água precipitada, permitindo sua infiltração gradual no solo e reduzindo os volumes direcionados aos sistemas tradicionais de drenagem. Além da função hidráulica, esses dispositivos também contribuem para melhorias ambientais e paisagísticas nas áreas urbanas.

Os jardins de chuva consistem em depressões superficiais preenchidas por camadas de materiais granulares, solo filtrante e vegetação, permitindo a retenção temporária da água da chuva e favorecendo o processo de infiltração. A eficiência desses sistemas depende

diretamente das características dos materiais utilizados e das propriedades físicas do solo, como porosidade, granulometria e permeabilidade. Conforme Chaves *et al.* (2024), a capacidade de infiltração dos sistemas de biorretenção está relacionada às propriedades hidráulicas do meio filtrante, sendo necessário avaliar experimentalmente o comportamento do sistema para compreender sua eficiência no controle das águas pluviais.

Além da infiltração, os jardins de chuva também contribuem para a redução dos picos de vazão durante eventos críticos de precipitação. Diferente dos sistemas convencionais de drenagem, que possuem como objetivo principal o rápido direcionamento da água para galerias e canais, os sistemas de biorretenção permitem o armazenamento temporário da água precipitada, retardando o escoamento superficial. Jeon *et al.* (2021) destacam que estruturas de biorretenção submetidas a chuvas intensas apresentam capacidade significativa de redução das vazões superficiais, especialmente em eventos de curta duração e elevada intensidade, favorecendo maior estabilidade hidráulica no ambiente urbano.

Outro aspecto importante relacionado aos jardins de chuva está associado à melhoria ambiental proporcionada pela presença de infraestrutura verde nas cidades. Além de contribuírem para o controle das águas pluviais, esses sistemas auxiliam na valorização paisagística, na redução de ilhas de calor e no aumento da permeabilidade urbana. Segundo Oliveira *et al.* (2020), a utilização de jardins de chuva em áreas urbanas representa uma alternativa sustentável capaz de integrar drenagem urbana e qualidade ambiental, promovendo benefícios tanto hidráulicos quanto ecológicos.

Apesar do crescimento das discussões relacionadas à infraestrutura verde e aos sistemas de biorretenção, ainda são limitados os estudos experimentais voltados à análise da capacidade de infiltração desses sistemas em condições locais específicas. Conforme Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023), existe a necessidade de pesquisas que avaliem o desempenho hidráulico dos jardins de chuva considerando fatores relacionados ao tipo de solo, aos materiais granulares e às condições de precipitação adotadas nos sistemas experimentais.

Dessa forma, este trabalho buscou analisar a capacidade de infiltração de um jardim de chuva aplicado ao controle de águas pluviais em uma residência unifamiliar no município de Açailândia-MA. O sistema experimental apresentou área superficial de 3 m², sendo avaliado quanto ao seu desempenho na retenção e infiltração da água pluvial em diferentes condições de escoamento. Além disso, o estudo procurou compreender a eficiência do jardim de chuva como alternativa sustentável para auxiliar na drenagem urbana, contribuindo para a redução do escoamento superficial e para o manejo adequado das águas pluviais.

2.OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a eficiência de um jardim de chuva no controle das águas pluviais para redução e mitigação de alagamentos e enxurradas no município de Açailândia–MA.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a capacidade de retenção de água do jardim de chuva submetido a simulações de precipitação.
- Analisar a velocidade de infiltração do solo associada ao desempenho hidráulico do sistema.
- Estudar o comportamento da infiltração considerando a consecutividade dos eventos de chuva.
- Relacionar a área de influência do jardim de chuva utilizando os critérios do método racional.
- Avaliar a influência das características granulométricas e do tipo de solo na capacidade de retenção e infiltração da água.
- Analisar a contribuição dos materiais granulares utilizados no sistema para o armazenamento temporário das águas pluviais.

3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Definição de Jardim de Chuva

O aumento da impermeabilização nas cidades provocou alterações significativas no ciclo hidrológico natural, favorecendo o crescimento dos escoamentos superficiais e, conseqüentemente, a ocorrência de alagamentos urbanos. Nesse contexto, os jardins de chuva passaram a ser utilizados como alternativas sustentáveis aos sistemas convencionais de drenagem, buscando aproximar o comportamento hidrológico urbano das condições naturais do solo. De acordo com Silva *et al.* (2018), essas estruturas atuam por meio dos processos de

infiltração, retenção e adsorção da água da chuva, auxiliando na redução dos impactos causados pela urbanização. Além disso, Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023) destacam que os jardins de chuva também possuem importante papel no controle da poluição difusa e na melhoria do microclima urbano, sendo considerados elementos relevantes da infraestrutura verde contemporânea.

Os sistemas de biorretenção presentes nos jardins de chuva são compostos, em geral, por materiais que favorecem a infiltração da água, como brita, areia, solo vegetal e vegetação adaptada às condições locais. Esses materiais atuam em conjunto no armazenamento temporário da água precipitada, permitindo sua infiltração gradual no terreno e reduzindo os picos de vazão durante eventos chuvosos intensos. Lopes, Marques e Silva (2021) afirmam que os jardins de chuva representam uma das principais técnicas compensatórias utilizadas atualmente para amortecer problemas relacionados à drenagem urbana, especialmente em áreas sujeitas à impermeabilização excessiva.

Além do controle hidráulico, os jardins de chuva apresentam benefícios associados à qualidade ambiental urbana, uma vez que auxiliam na filtragem de sedimentos, resíduos e poluentes transportados pelas águas pluviais. Sua presença também favorece a ampliação das áreas verdes urbanas, contribuindo para melhorias estéticas, conforto térmico e equilíbrio ambiental nas cidades. Para Noletto e Rodrigues (2024), as técnicas compensatórias de drenagem urbana, entre elas os jardins de chuva, têm demonstrado elevada eficiência na redução dos impactos ambientais associados às enchentes, principalmente em áreas urbanizadas com deficiência nos sistemas tradicionais de drenagem. Já Jeon *et al.* (2021) ressaltam que os jardins de chuva podem apresentar elevada capacidade de retenção e tratamento das águas pluviais, funcionando também como estruturas de melhoria da qualidade da água urbana.

Outro aspecto importante relacionado aos jardins de chuva está associado à recuperação parcial das funções naturais do solo no ambiente urbano. Enquanto os sistemas tradicionais de drenagem possuem como principal objetivo o rápido escoamento das águas pluviais, os jardins de chuva buscam desacelerar esse fluxo, promovendo infiltração, armazenamento temporário e redução da sobrecarga das redes de drenagem. Gondim *et al.* (2023) destacam que essa técnica está diretamente ligada aos princípios do desenvolvimento de baixo impacto (Low Impact Development – LID), priorizando intervenções capazes de reduzir os impactos hidrológicos da urbanização de forma distribuída e sustentável.

A utilização de jardins de chuva também vem sendo associada à adaptação das cidades frente às mudanças climáticas e ao aumento da frequência de eventos extremos de precipitação.

Em áreas urbanas com infraestrutura insuficiente, técnicas sustentáveis de drenagem tornam-se alternativas relevantes para reduzir enchentes, minimizar danos urbanos e melhorar as condições ambientais locais. Nesse sentido, Oliveira *et al.* (2020) afirmam que os jardins de chuva apresentam vantagens significativas quando comparados aos sistemas convencionais, principalmente por aliarem funcionalidade hidráulica, sustentabilidade ambiental e integração paisagística. Complementando essa discussão, Freitas e Ximenes (2012) ressaltam que estratégias preventivas relacionadas ao manejo adequado das águas pluviais são fundamentais para minimizar impactos ambientais, sanitários e sociais decorrentes das enchentes urbanas.

3.2 Urbanização e mudanças ao meio ambiente

O crescimento urbano ocorrido nas últimas décadas provocou transformações significativas nas características naturais do meio ambiente, principalmente devido à expansão desordenada das cidades e ao aumento das áreas impermeabilizadas. A substituição da cobertura vegetal por pavimentação, edificações e infraestrutura urbana alterou diretamente o comportamento hidrológico natural do solo, reduzindo a infiltração da água da chuva e intensificando o escoamento superficial. Segundo Lopes, Marques e Silva (2021), o processo de urbanização contribui para o aumento das superfícies impermeáveis, dificultando a infiltração da água no solo e favorecendo a ocorrência de alagamentos em áreas urbanas.

As alterações provocadas pela urbanização não afetam apenas a drenagem urbana, mas também o equilíbrio ambiental das cidades. A remoção da vegetação, associada à ocupação irregular do solo, provoca impactos sobre os corpos hídricos, sobre o microclima urbano e sobre a qualidade ambiental das áreas urbanizadas. Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023) afirmam que a impermeabilização dos terrenos favorece o aumento da poluição difusa transportada pelo escoamento superficial, contribuindo para a degradação das águas urbanas. Além disso, Tucci (2020) destaca que o crescimento urbano desordenado altera o ciclo hidrológico natural, aumentando os volumes de escoamento superficial e reduzindo significativamente os processos de infiltração e evapotranspiração.

O aumento da impermeabilização urbana também está diretamente relacionado à intensificação das enchentes e inundações nas cidades. Em áreas urbanizadas, grande parte da água precipitada deixa de infiltrar no solo e passa a escoar rapidamente sobre as superfícies pavimentadas, sobrecarregando os sistemas convencionais de drenagem. Silva *et al.* (2018) ressaltam que o crescimento desordenado das cidades favorece a ampliação dos riscos

hidrológicos urbanos, principalmente em regiões que apresentam deficiência na infraestrutura de drenagem.

Além dos impactos hidráulicos, as mudanças ambientais associadas à urbanização também contribuem para problemas relacionados à saúde pública e à qualidade de vida da população. As enchentes urbanas favorecem a contaminação das águas, o acúmulo de resíduos sólidos e a disseminação de doenças de veiculação hídrica, principalmente em áreas vulneráveis socialmente. Freitas e Ximenes (2012) destacam que eventos de enchentes estão entre os desastres naturais que mais afetam populações urbanas, especialmente em países em desenvolvimento, causando impactos ambientais, sociais e sanitários significativos. Complementando essa discussão, Costa *et al.* (2025) afirmam que a combinação entre infraestrutura urbana precária, drenagem insuficiente e eventos extremos de precipitação favorece a propagação de doenças como a leptospirose em áreas urbanas vulneráveis.

Outro problema associado à urbanização está relacionado à ocupação inadequada de áreas ambientalmente frágeis, como margens de rios, encostas e regiões naturalmente sujeitas à inundação. Em muitos municípios brasileiros, o crescimento populacional ocorreu sem planejamento urbano adequado, favorecendo a ocupação de áreas de risco e aumentando a vulnerabilidade da população frente aos eventos hidrológicos extremos. Noletto e Rodrigues (2024) destacam que a urbanização desordenada e a ausência de planejamento contribuem diretamente para o agravamento das enchentes urbanas, principalmente devido à remoção da cobertura vegetal e à impermeabilização excessiva das bacias hidrográficas.

As alterações ambientais provocadas pelas cidades modernas também influenciam diretamente as condições climáticas urbanas. A redução das áreas verdes, associada ao aumento de superfícies impermeáveis e materiais que absorvem calor, favorece o surgimento das ilhas de calor urbanas, elevando as temperaturas médias nos centros urbanos. Segundo Oliveira *et al.* (2020), a incorporação de soluções sustentáveis associadas à infraestrutura verde contribui para melhorias ambientais importantes, auxiliando tanto no controle das águas pluviais quanto na recuperação parcial das funções naturais do ambiente urbano.

Diante desse cenário, técnicas compensatórias e soluções baseadas na natureza passaram a ser discutidas como alternativas capazes de minimizar os impactos ambientais causados pela urbanização. Entre essas estratégias, os jardins de chuva vêm sendo aplicados como sistemas sustentáveis voltados à retenção, infiltração e desaceleração do escoamento superficial, buscando reduzir os impactos hidrológicos urbanos e melhorar a relação entre cidade e meio ambiente. Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023) ressaltam que os jardins de chuva fazem

parte das técnicas de infraestrutura verde associadas aos conceitos de desenvolvimento de baixo impacto, promovendo maior equilíbrio hidrológico nas áreas urbanizadas.

3.3 Drenagem Sustentável

O avanço da urbanização e o crescimento das áreas impermeabilizadas provocaram mudanças significativas no comportamento hidrológico das cidades, tornando os sistemas tradicionais de drenagem insuficientes para controlar os volumes de escoamento superficial gerados durante eventos de precipitação intensa. Nesse contexto, a drenagem sustentável surge como uma alternativa voltada à recuperação parcial das funções naturais do ciclo hidrológico, buscando reduzir os impactos ambientais causados pela urbanização. Segundo Noletto e Rodrigues (2024), as técnicas compensatórias de drenagem sustentável têm como principal objetivo reduzir enchentes e minimizar os impactos socioambientais provocados pelo excesso de escoamento superficial nas cidades.

Os sistemas convencionais de drenagem urbana foram desenvolvidos com foco no rápido escoamento das águas pluviais, priorizando a coleta e o afastamento da água precipitada por meio de galerias, canais e canalizações. Apesar de sua ampla utilização, esse modelo passou a apresentar limitações diante do crescimento urbano acelerado e da intensificação das chuvas extremas. Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023) destacam que a infraestrutura tradicional tem sido gradualmente complementada por técnicas de infraestrutura verde, capazes de promover maior retenção, infiltração e desaceleração do escoamento superficial. Complementando essa abordagem, Tucci (2020) afirma que os sistemas urbanos modernos de drenagem precisam incorporar mecanismos de controle distribuído das águas pluviais, buscando reduzir os impactos hidrológicos causados pela impermeabilização das bacias urbanas.

A drenagem sustentável baseia-se na utilização de técnicas compensatórias que buscam aproximar o comportamento hidrológico urbano das condições naturais do ambiente. Entre essas técnicas destacam-se os jardins de chuva, pavimentos permeáveis, telhados verdes, trincheiras de infiltração e bacias de retenção, que atuam promovendo infiltração, armazenamento temporário e evapotranspiração das águas pluviais. Silva *et al.* (2018) ressaltam que grande parte das técnicas modernas de drenagem urbana está associada aos processos de infiltração e retenção das águas da chuva, permitindo recuperar parcialmente o ciclo hidrológico natural alterado pela urbanização.

Além da redução do escoamento superficial, a drenagem sustentável apresenta benefícios ambientais importantes relacionados à melhoria da qualidade da água urbana. As estruturas de biorretenção atuam como sistemas filtrantes capazes de reter sedimentos, resíduos e poluentes transportados pelas águas pluviais antes que esses materiais atinjam os corpos hídricos urbanos. Oliveira *et al.* (2020) afirmam que os jardins de chuva, além de reduzirem os volumes escoados superficialmente, contribuem para melhorias ambientais e paisagísticas no meio urbano, tornando-se alternativas sustentáveis ao sistema convencional de drenagem. Já Jeon *et al.* (2021) destacam que sistemas de biorretenção podem apresentar elevada eficiência no tratamento das águas pluviais urbanas, contribuindo para o controle da poluição.

Outro aspecto importante relacionado à drenagem sustentável está associado à adaptação das cidades frente às mudanças climáticas e à ocorrência de eventos extremos de precipitação. Em muitos centros urbanos, os sistemas convencionais não conseguem suportar o aumento das vazões geradas pelas chuvas intensas, favorecendo enchentes, alagamentos e danos à infraestrutura urbana. Costa *et al.* (2025) ressaltam que a deficiência na infraestrutura urbana, associada às mudanças climáticas e ao aumento dos eventos extremos, amplia a vulnerabilidade das populações urbanas frente aos problemas relacionados às águas pluviais.

3.4 Materiais de implantação

A eficiência dos jardins de chuva está diretamente relacionada aos materiais utilizados em sua implantação, uma vez que esses componentes influenciam nos processos de infiltração, armazenamento temporário e filtragem das águas pluviais. Os sistemas de biorretenção são normalmente compostos por camadas de materiais granulares e solo vegetal, organizados de forma a favorecer o controle hidráulico do escoamento superficial e a melhoria da qualidade da água infiltrada. Segundo Silva *et al.* (2018), os jardins de chuva funcionam por meio do sistema solo-planta-atmosfera, utilizando processos de infiltração, retenção e adsorção para reduzir os impactos causados pelo excesso de escoamento superficial nas áreas urbanas.

Entre os principais materiais empregados nesses sistemas destacam-se os materiais granulares como, areia, brita, seixo rolado, solo vegetal e vegetação adaptada às condições locais. Os materiais granulares possuem papel importante na formação dos espaços vazios responsáveis pelo armazenamento temporário da água precipitada, permitindo maior infiltração e redução do volume escoado superficialmente. Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023) ressaltam que os jardins de chuva atuam como estruturas filtrantes associadas às técnicas de

infraestrutura verde, sendo sua eficiência influenciada pelos aspectos construtivos e operacionais relacionados aos materiais empregados.

Complementando essa abordagem, Arora (2020) afirma que materiais granulares apresentam elevada influência no comportamento hidráulico dos sistemas de infiltração, principalmente devido à relação entre índice de vazios, permeabilidade e capacidade de armazenamento de água. O solo utilizado na implantação dos jardins de chuva também exerce função fundamental no desempenho do sistema, especialmente em relação à infiltração e retenção da água. Solos com maior presença de areia tendem a apresentar maior permeabilidade, favorecendo a infiltração da água precipitada, enquanto solos mais argilosos apresentam menor capacidade de infiltração e maior tendência ao escoamento superficial.

De acordo com a EMBRAPA (2018), a composição granulométrica do solo influencia diretamente seu comportamento hidráulico, principalmente em relação à circulação da água pelos poros existentes entre as partículas sólidas. Além das camadas granulares, a vegetação aplicada nos jardins de chuva possui importante papel no funcionamento do sistema. As plantas auxiliam na absorção parcial da água infiltrada, favorecem a evapotranspiração e contribuem para a estabilidade superficial do solo, além de proporcionarem benefícios paisagísticos e ambientais ao espaço urbano. Oliveira *et al.* (2020) destacam que os jardins de chuva apresentam vantagens associadas não apenas ao controle das águas pluviais, mas também à recuperação parcial das áreas verdes urbanas, promovendo melhorias ambientais e maior integração entre infraestrutura e paisagismo urbano. Já Jeon *et al.* (2021) ressaltam que a presença de vegetação influencia diretamente a eficiência dos sistemas de biorretenção no tratamento das águas pluviais urbanas, contribuindo para retenção de poluentes e melhoria da qualidade da água infiltrada.

Outro aspecto importante está relacionado à granulometria dos materiais utilizados nas camadas drenantes do jardim de chuva. Materiais com elevada porosidade apresentam maior capacidade de armazenamento de água em seus vazios internos, favorecendo o amortecimento dos picos de vazão durante eventos de precipitação intensa. Fernandes (2025) destaca que o comportamento hidráulico de materiais granulares está diretamente associado à distribuição granulométrica e ao índice de vazios, fatores que influenciam a permeabilidade e o armazenamento temporário da água.

Os materiais empregados nesses sistemas também devem apresentar resistência física adequada para suportar as condições de umidade e fluxo hidráulico aos quais estarão submetidos. Além disso, a escolha dos materiais deve considerar as características locais do

solo, intensidade das precipitações e capacidade de infiltração da área onde o jardim de chuva será implantado. Lopes, Marques e Silva (2021) afirmam que a aplicação de técnicas compensatórias exige adaptação às condições específicas de cada localidade, principalmente devido às diferenças relacionadas ao comportamento hidrológico urbano e às características construtivas do sistema.

3.5 Micro e macrodrenagem

Os sistemas de drenagem urbana possuem a função de coletar, conduzir e destinar adequadamente as águas pluviais provenientes das precipitações, buscando reduzir problemas relacionados a alagamentos, enchentes e danos à infraestrutura urbana. De maneira geral, esses sistemas são divididos em microdrenagem e macrodrenagem, cada um atuando em diferentes escalas dentro do ambiente urbano. Segundo Tucci (2020), a drenagem urbana constitui um conjunto de medidas estruturais destinadas ao controle do escoamento superficial gerado pela urbanização, sendo essencial para o funcionamento adequado das cidades.

A microdrenagem corresponde ao sistema responsável pela coleta inicial das águas pluviais nas áreas urbanizadas, atuando principalmente em vias públicas e pequenas bacias de contribuição. Esse sistema é composto por estruturas como sarjetas, bocas de lobo, galerias pluviais e tubulações subterrâneas que conduzem a água até estruturas de maior porte pertencentes à macrodrenagem (Oliveira *et al.* 2020).

Esse sistema residencial é responsável pela coleta e condução inicial das águas pluviais geradas nos lotes urbanos, principalmente em telhados, calçadas e quintais pavimentados. Componentes como calhas, condutores verticais, canaletas e caixas coletoras realizam o direcionamento da água até a rede pública ou áreas de infiltração. Segundo Canholi (2014) e Miguez (2015), quando esses sistemas residenciais lançam rapidamente grandes volumes de água nas vias urbanas, ocorre o aumento da contribuição superficial para as galerias pluviais, favorecendo sobrecargas em escala urbana.

A impermeabilização crescente dos lotes residenciais reduz significativamente a infiltração natural da água no solo, aumentando a velocidade e o volume do escoamento superficial encaminhado para o sistema público de drenagem. Nesse contexto, dispositivos como jardins de chuva, valas de infiltração e pisos permeáveis atuam na retenção temporária e infiltração parcial da água precipitada dentro do próprio lote. Macedo *et al.* (2017) destacam que sistemas compensatórios de infiltração auxiliam na redução das vazões de pico.

Os impactos gerados individualmente em cada residência tendem a se intensificar quando considerados em conjunto dentro da malha urbana. De acordo com Boilmann (2019), o aumento contínuo das áreas impermeáveis modifica diretamente o comportamento hidrológico das cidades, elevando a ocorrência de alagamentos e enchentes urbanas. De forma semelhante, Brito, Silva e Crispim (2019) apontam que a rápida transferência da água pluvial dos lotes para as ruas e galerias reduz o tempo de concentração das bacias urbanas, aumentando a pressão sobre os sistemas de drenagem e potencializando problemas em áreas mais baixas da cidade.

Vilarinho *et al.* (2024) destacam que falhas relacionadas ao dimensionamento inadequado, ausência de manutenção e acúmulo de resíduos sólidos comprometem significativamente a eficiência dos sistemas de microdrenagem urbana, favorecendo a ocorrência de alagamentos em áreas urbanizadas. Complementando essa abordagem, Canholi (2014) afirma que a microdrenagem possui papel fundamental na coleta e condução inicial das águas pluviais, sendo diretamente influenciada pelo crescimento urbano e pelo aumento das áreas impermeáveis.

Já a macrodrenagem corresponde ao conjunto de estruturas responsáveis pelo transporte das águas pluviais em maior escala, normalmente envolvendo canais, córregos, rios urbanos, galerias de grande porte e estruturas de controle hidráulico. Sua principal função consiste em receber os volumes provenientes da microdrenagem e conduzi-los até os corpos receptores naturais, reduzindo riscos de inundação nas áreas urbanas. Segundo Noletto e Rodrigues (2024), os sistemas tradicionais de macrodrenagem foram historicamente desenvolvidos com foco no rápido afastamento das águas pluviais, utilizando obras de canalização e condução hidráulica como principais soluções para o controle das cheias urbanas.

Com o crescimento acelerado das cidades e a intensificação da impermeabilização do solo, os sistemas de micro e macrodrenagem passaram a enfrentar dificuldades relacionadas ao aumento do volume de escoamento superficial. Em muitos municípios brasileiros, a expansão urbana ocorreu sem planejamento adequado, favorecendo a ocupação de áreas vulneráveis e aumentando a sobrecarga das estruturas de drenagem existentes.

Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023) destacam que o aumento da impermeabilização urbana intensifica o escoamento superficial e contribui para a degradação dos sistemas hídricos urbanos, tornando necessária a adoção de soluções mais sustentáveis para o manejo das águas pluviais. Já Tucci (2020) ressalta que o rápido escoamento promovido pelos sistemas convencionais pode transferir os problemas hidráulicos para regiões a jusante das bacias urbanas, agravando enchentes e inundações em diferentes áreas da cidade.

Outro fator que compromete a eficiência dos sistemas de drenagem urbana está relacionado à deficiência na manutenção das estruturas existentes. O descarte inadequado de resíduos sólidos em vias públicas favorece o entupimento de galerias, bocas de lobo e canais de drenagem, reduzindo a capacidade hidráulica do sistema e aumentando os riscos de alagamentos durante períodos chuvosos. Lopes, Marques e Silva (2021) afirmam que o sistema convencional de drenagem urbana frequentemente apresenta limitações relacionadas ao acúmulo de resíduos e à impermeabilização excessiva do solo, fatores que contribuem para o aumento do escoamento superficial urbano.

Além dos impactos hidráulicos, problemas associados à micro e macrodrenagem também influenciam diretamente a saúde pública e as condições ambientais urbanas. Áreas sujeitas a enchentes e alagamentos apresentam maior vulnerabilidade à contaminação hídrica, proliferação de vetores e disseminação de doenças de veiculação hídrica. Freitas e Ximenes (2012) destacam que enchentes urbanas estão entre os desastres naturais mais recorrentes em áreas urbanizadas, afetando principalmente populações socialmente vulneráveis e regiões com infraestrutura precária. Complementando essa discussão, Costa *et al.* (2025) afirmam que a deficiência nos sistemas urbanos de drenagem favorece a ocorrência de enchentes e amplia os riscos associados à leptospirose e outras doenças relacionadas ao contato com águas contaminadas.

Diante dessas limitações, soluções sustentáveis passaram a ser incorporadas ao planejamento da drenagem urbana, buscando reduzir a dependência exclusiva dos sistemas convencionais de micro e macrodrenagem. Técnicas compensatórias, como jardins de chuva, pavimentos permeáveis e estruturas de infiltração, vêm sendo utilizadas para promover retenção e infiltração das águas pluviais diretamente nas áreas urbanas, reduzindo a sobrecarga das galerias e canais de drenagem. Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023) ressaltam que as técnicas de infraestrutura verde associadas ao desenvolvimento de baixo impacto representam alternativas importantes para o manejo sustentável das águas pluviais nas cidades modernas.

3.6 Infiltração da água da chuva no solo

A infiltração da água no solo corresponde ao processo de entrada da água precipitada através da superfície terrestre, permitindo sua movimentação pelos vazios existentes entre as partículas sólidas do solo. Esse processo exerce papel fundamental no equilíbrio hidrológico

natural, contribuindo para a recarga do lençol freático, redução do escoamento superficial e manutenção da umidade do solo. Segundo a EMBRAPA (2018), a capacidade de infiltração está diretamente associada às características físicas do solo, especialmente sua textura, estrutura e distribuição granulométrica.

As propriedades granulométricas influenciam significativamente o comportamento hidráulico dos solos. Solos arenosos apresentam maior quantidade de macroporos, favorecendo a circulação da água e proporcionando maiores taxas de infiltração. Em contrapartida, solos argilosos tendem a apresentar menor permeabilidade devido à predominância de microporos e maior coesão entre as partículas. Arora (2020) destaca que a permeabilidade do solo está relacionada ao tamanho das partículas e ao índice de vazios existente entre elas, fatores que condicionam a movimentação da água no meio poroso. Complementando essa discussão, Fernandes (2025) afirma que materiais com maior porosidade tendem a apresentar maior capacidade de armazenamento e infiltração da água, favorecendo o comportamento hidráulico dos sistemas drenantes.

Nos ambientes urbanos, o processo de infiltração sofre alterações significativas devido à impermeabilização do solo provocada pela urbanização. A substituição da cobertura natural por pavimentos, edificações e estruturas urbanas reduz a capacidade de infiltração da água da chuva, aumentando os volumes de escoamento superficial e favorecendo a ocorrência de enchentes e alagamentos. Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023) ressaltam que a impermeabilização das superfícies urbanas intensifica a degradação hidrológica das cidades, tornando necessária a adoção de técnicas capazes de recuperar parcialmente os processos naturais de infiltração.

Além da impermeabilização, fatores como compactação do solo, presença de resíduos sólidos e ausência de cobertura vegetal também influenciam negativamente a infiltração da água no ambiente urbano. Solos compactados apresentam redução dos espaços vazios responsáveis pela circulação da água, dificultando a infiltração e aumentando o escoamento superficial. Lopes, Marques e Silva (2021) afirmam que o crescimento urbano desordenado promove alterações nas condições naturais do solo, favorecendo a redução da infiltração e ampliando os problemas relacionados à drenagem urbana. Complementando essa abordagem, Tucci (2020) destaca que a diminuição da infiltração nas bacias urbanas altera significativamente o ciclo hidrológico natural, contribuindo para o aumento das vazões de pico durante eventos chuvosos intensos.

A infiltração da água no solo também apresenta importante relação com o controle das enchentes urbanas. Quanto maior a capacidade de infiltração do terreno, menor tende a ser o volume de água escoado superficialmente em direção aos sistemas de drenagem. Nesse contexto, técnicas compensatórias de drenagem urbana passaram a utilizar estruturas capazes de favorecer a infiltração e o armazenamento temporário das águas pluviais diretamente no solo. Silva *et al.* (2018) destacam que sistemas de biorretenção, como os jardins de chuva, atuam promovendo infiltração gradual da água precipitada, reduzindo os impactos provocados pela impermeabilização urbana.

Outro aspecto importante relacionado à infiltração está associado à recarga das águas subterrâneas. Em condições naturais, parte da água infiltrada percola pelas camadas do solo até atingir os aquíferos subterrâneos, contribuindo para manutenção do equilíbrio hídrico local. Entretanto, a redução das áreas permeáveis urbanas compromete esse processo, favorecendo desequilíbrios hidrológicos e aumentando a dependência de sistemas artificiais de drenagem. Segundo Noleto e Rodrigues (2024), a utilização de técnicas compensatórias de drenagem sustentável busca justamente recuperar parte das funções naturais do ciclo hidrológico, promovendo infiltração e reduzindo os impactos associados ao excesso de impermeabilização urbana.

3.7 Impactos hidrológicos urbanos

Os impactos hidrológicos urbanos estão diretamente relacionados às transformações provocadas pela urbanização sobre o ciclo hidrológico natural (Goldenfum, 2007). O crescimento das cidades promove alterações significativas nas características físicas do solo, principalmente devido à impermeabilização das superfícies e à redução das áreas vegetadas, modificando processos naturais como infiltração, evapotranspiração e armazenamento da água da chuva. Segundo Tucci (2020), a urbanização altera profundamente o comportamento hidrológico das bacias urbanas, aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial durante os eventos de precipitação.

O aumento das áreas impermeáveis faz com que grande parte da água precipitada deixe de infiltrar no solo e passe a escoar superficialmente em direção aos sistemas de drenagem urbana. Esse processo contribui para elevação das vazões de pico e redução do tempo de concentração das bacias hidrográficas urbanas, favorecendo a ocorrência de enchentes e alagamentos. Gondim, Ohnuma Júnior e Obraczka (2023) destacam que a impermeabilização

urbana intensifica o escoamento superficial e aumenta a degradação das águas urbanas devido ao transporte de poluentes difusos pelas águas pluviais. Complementando essa abordagem, Canholi (2014) afirma que o crescimento urbano acelerado favorece o aumento das vazões máximas nas bacias urbanas, ampliando a sobrecarga sobre os sistemas convencionais de drenagem.

Entre os principais impactos hidrológicos urbanos estão as enchentes, inundações e alagamentos, fenômenos que se tornaram cada vez mais frequentes em áreas urbanizadas. Esses eventos geralmente estão associados à deficiência dos sistemas de drenagem, ocupação inadequada do solo e impermeabilização excessiva das cidades. Vilarinho *et al.* (2024) destacam que problemas relacionados à microdrenagem urbana contribuem diretamente para a ocorrência de alagamentos em áreas urbanas, principalmente devido à incapacidade de as estruturas existentes suportarem os volumes gerados pelas precipitações intensas.

Os impactos hidrológicos não se limitam apenas aos danos estruturais causados pelas enchentes, mas também afetam diretamente as condições ambientais e sanitárias das cidades. O contato entre águas pluviais e resíduos sólidos urbanos favorece a contaminação hídrica e amplia os riscos de disseminação de doenças de veiculação hídrica. Freitas e Ximenes (2012) ressaltam que enchentes urbanas representam importantes problemas de saúde pública, principalmente devido à exposição da população a águas contaminadas e ambientes insalubres. Além disso, Costa *et al.* (2025) afirmam que a deficiência na infraestrutura urbana associada às mudanças climáticas intensifica a ocorrência de doenças relacionadas às enchentes, como a leptospirose, especialmente em áreas socialmente vulneráveis.

Outro impacto importante associado à urbanização está relacionado à degradação dos corpos hídricos urbanos. O aumento do escoamento superficial favorece o transporte de sedimentos, resíduos sólidos e poluentes presentes nas vias urbanas para rios, córregos e canais de drenagem, comprometendo a qualidade das águas urbanas. Lopes, Marques e Silva (2021) afirmam que a impermeabilização das cidades contribui significativamente para o agravamento dos problemas relacionados à drenagem urbana e à degradação ambiental dos sistemas hídricos.

Além da poluição hídrica, os impactos hidrológicos urbanos também influenciam o conforto térmico e o equilíbrio ambiental das cidades. A redução das áreas verdes e o aumento de superfícies impermeáveis favorecem a formação de ilhas de calor urbanas, alterando o microclima e reduzindo a qualidade ambiental dos espaços urbanos. Oliveira *et al.* (2020) destacam que soluções sustentáveis associadas à infraestrutura verde podem contribuir para melhorias ambientais importantes, reduzindo os impactos causados pela urbanização sobre o

ambiente urbano. Já Noleto e Rodrigues (2024) ressaltam que técnicas compensatórias de drenagem urbana vêm sendo utilizadas como alternativas capazes de minimizar os impactos hidrológicos e ambientais associados às cidades modernas.

4.METODOLOGIA

4.1 Tipo de Pesquisa

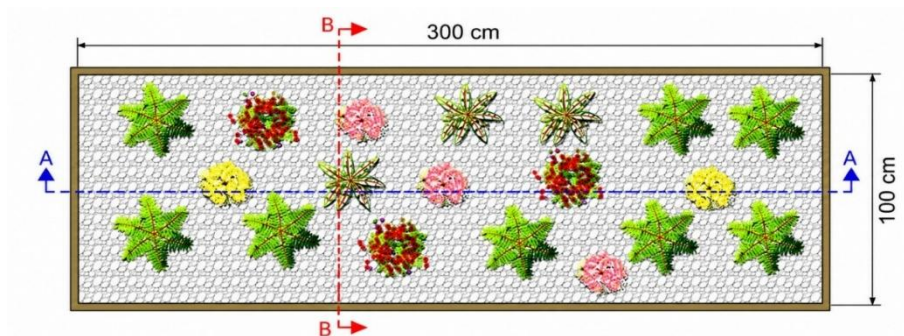
A pesquisa feita com o jardim de chuva foi experimental com objetivos exploratórios sobre essa tecnologia já existente, sendo um estudo aplicado com abordagem mista. No início da pesquisa foi realizado levantamento bibliográficos sobre essa tecnologia, formas de análises, de implementação e padrões construtivos, ademais o dimensionamento adequado para cada situação pois, o jardim de chuva é uma estrutura e assim como toda estrutura precisa ser dimensionada para resistir as solicitações, que para o caso do jardim de chuva é quantidade de água que ele pode suportar sem transbordar ou comprometer a estrutura.

4.2 Implantação do Jardim

O jardim desta pesquisa foi implantado em uma residência unifamiliar do município de Açailândia-MA, no bairro Plano da Serra. A estrutura consiste em um jardim de chuva do tipo biorretenção com revestimento superficial em seixo rolado, utilizado como camada aparente do sistema em substituição ao uso convencional de solo exposto. A cava do jardim possui formato de paralelepípedo, com 3 m de comprimento, 1 m de largura e 1 m de profundidade, apresentando área superficial de 3 m² e volume total de 3 m³.

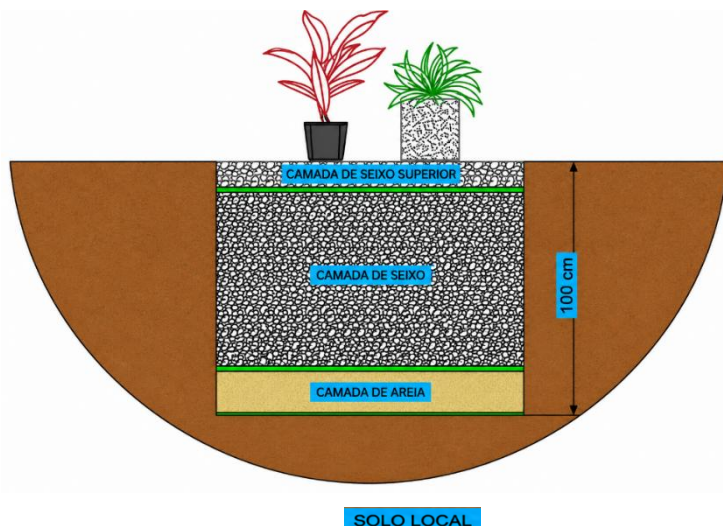
O dimensionamento hidráulico do sistema, foi considerada altura útil de 0,9 m, uma vez que os 10 cm superiores foram destinados à camada superficial de seixo rolado e à acomodação dos jarros e elementos vegetativos do jardim, mantendo o nível máximo de armazenamento abaixo da profundidade total da estrutura. A representação da planta do jardim de chuva pode ser observada na figura 1 como vista superior, enquanto os detalhes construtivos e a disposição das camadas do sistema são apresentados por meio do corte transversal na figura 2 e do corte longitudinal, figura 3.

Figura 1: planta baixa do jardim ilustrada.



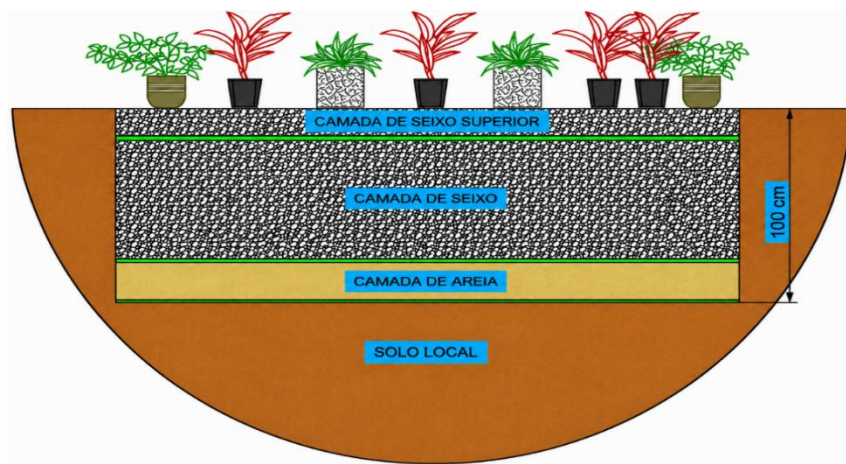
Fonte: Autor (2026). *Imagem fora de escala.*

Figura 2: corte transversal BB.



Fonte: Autor (2026). *Imagem fora de escala.*

Figura 3: corte longitudinal AA.



Fonte: Autor (2026). *Imagem fora de escala.*

4.2.1 Preparo do terreno e escavação

O jardim de chuva foi implantado na lateral da residência, sendo necessária a remoção de parte do solo superficial para que a estrutura fosse executada em conformidade com o nível horizontal do terreno predominante, conforme apresentado na figura 4. Além disso, visando maior controle experimental e melhor confiabilidade nos resultados obtidos durante a pesquisa, foi instalada uma cobertura sobre o sistema, com o objetivo de impedir a interferência direta das precipitações naturais no jardim. Dessa forma, o sistema permaneceu isolado da ação da água da chuva, sendo submetido apenas às simulações de precipitação previamente dimensionadas, as quais serão descritas posteriormente.

Figura 4: preparo e nivelamento do solo.



Fonte: Autor (2026).

Para a escavação do jardim de chuva, foi realizado inicialmente o esquadreamento da área superficial, adotando-se as dimensões de 3 m de comprimento por 1 m de largura. Para isso, foram utilizadas ferramentas como esquadro e linha de pedreiro, conforme apresentado na Figura 5, garantindo maior alinhamento e linearidade às medidas previstas em projeto. Após essa etapa, procedeu-se à escavação da estrutura, executada totalmente de forma manual.

Figura 5: ferramentas utilizadas no esquadreamento do jardim.



Fonte: Autor (2026).

A etapa de escavação representou uma fase importante para a implantação do projeto, uma vez que as dimensões da estrutura precisaram seguir, de maneira mais precisa possível, as medidas estabelecidas em projeto, garantindo maior conformidade geométrica e confiabilidade aos dados obtidos durante a pesquisa. Dessa forma, todo o processo foi executado manualmente, com atenção e cuidado durante a retirada do solo. Para essa etapa, foram utilizadas ferramentas como picareta, enxada, enxadão, cavadeiras e pás, conforme apresentado na figura 6. Além disso, o uso de carrinho de mão foi necessário para auxiliar na remoção e transporte da terra escavada.

Figura 6: ferramentas utilizadas para escavação do jardim.



Fonte: Autor (2026).

A cava foi executada realizando-se inicialmente a escavação da região central em direção às extremidades, buscando manter as dimensões previstas em projeto durante toda a etapa construtiva. Já a profundidade foi desenvolvida no sentido do início ao final do comprimento da estrutura, uma vez que, ao término da escavação, parte do material retirado foi separada para realização dos ensaios laboratoriais, os quais serão descritos posteriormente.

Além do esquadreamento inicial, também foi utilizada uma estrutura auxiliar (figura 7) na forma de fôrma, confeccionada em tábuas de madeira, com 30 cm de largura e 3 cm de espessura, posicionada ao longo de todo o perímetro superior da cava. Essa estrutura contribuiu para o controle dimensional da escavação, auxiliando na padronização das medidas internas da cava e evitando alterações nas dimensões previstas em projeto (figura 8).

Figura 7: estrutura em fôrma de madeira.



Fonte: Autor (2026).

Figura 8: estrutura de forma aplicada na borda superior da cava do jardim.



Fonte: Autor (2026).

Após a fase de escavação, foi executado um piso de argamassa com aproximadamente 3 cm de espessura ao redor da parte externa lateral da cava, conforme apresentado na figura 9. A execução dessa camada teve como finalidade reduzir a formação de lama e o acúmulo de sujeira no entorno da estrutura, proporcionando melhores condições de limpeza e acesso ao local de pesquisa. Além disso, o piso facilitou a preparação dos reservatórios, encanações e demais dispositivos utilizados nas simulações de chuva, bem como os equipamentos de medição empregados durante os ensaios, os quais serão descritos posteriormente.

Figura 9: escavação finalizada da cava do jardim



Fonte: Autor (2026)

4.2.2 Manta geotêxtil

Para evitar a mistura entre os agregados e preservar o desempenho hidráulico das camadas do sistema, a cava do jardim de chuva foi revestida com manta geotêxtil Bidim, conforme apresentado na figura 10. Esse material é constituído por fibras sintéticas de poliéster (PET) e possui a função de permitir a passagem da água em direção ao solo sem comprometer a separação entre os materiais granulares utilizados na estrutura. Além disso, a manta geotêxtil auxilia no processo de filtração da água, contribuindo para maior eficiência do sistema e favorecendo a circulação da água pelos vazios existentes entre os agregados.

Figura 10: manta geotêxtil Bidim



Fonte: Autor (2026)

O revestimento com manta geotêxtil foi aplicado em todas as paredes internas da cava do jardim de chuva, utilizando-se grampeadores para fixação do material nas laterais da estrutura. Conforme apresentado na figura 11, é possível observar o posicionamento interno da

manta geotêxtil, a qual foi instalada verticalmente desde o fundo da cava até aproximadamente 70 cm de altura em relação à base do jardim.

Figura 11: implantação da manta geotêxtil envolta da cava do jardim



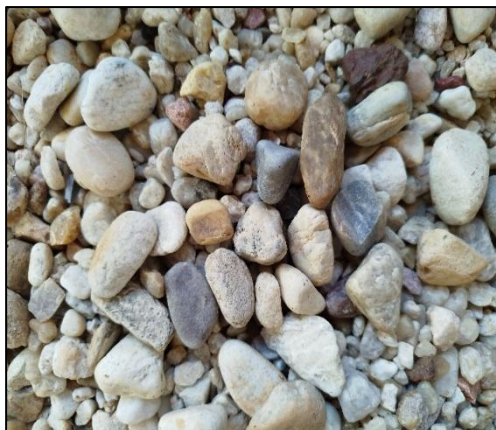
Fonte: Autor (2026)

4.2.3 Materiais porosos granulares

4.2.3.1 Procedimentos de implantação

Os materiais granulares utilizados na implantação do jardim de chuva foram o seixo rolado (figura 12), empregado como material granular graúdo, e a areia (figura 13), utilizada como material granular miúdo, ambos amplamente utilizados na construção civil da região. A configuração das camadas do sistema foi baseada na metodologia proposta por Barros *et al.* (2024), sendo composta por três camadas distintas. Na parte inferior foi aplicada uma camada de material granular miúdo com 15 cm de espessura, seguida por uma camada intermediária de material granular graúdo com 75 cm e, por fim, uma camada superior também constituída por material granular graúdo, com 10 cm de espessura. A disposição dessas camadas pode ser observada na figura 14.

Figura 12: seixo rolado utilizado como material granular.



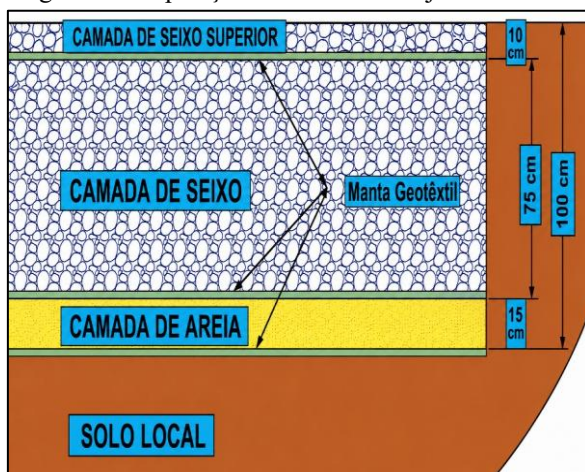
Fonte: Autor (2026).

Figura 13: areia utilizado como material granular miúdo.



Fonte: Autor (2026).

Figura 14: disposição das camadas do jardim.

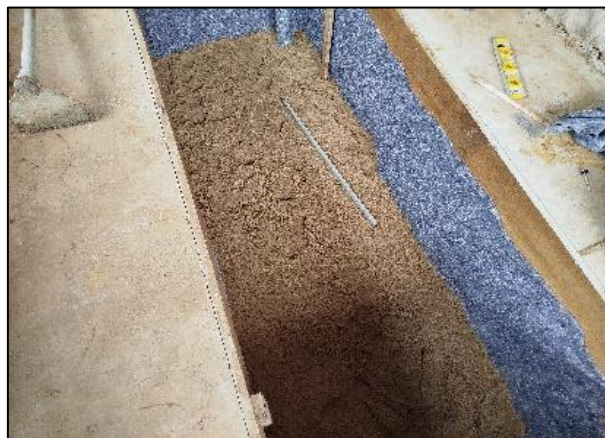


Fonte: Autor (2026). *Imagem fora de escala.*

Cada camada do sistema foi separada por manta geotêxtil, com o objetivo de evitar a mistura entre os materiais granulares e preservar o desempenho hidráulico do jardim de chuva. A camada de seixo superior não foi considerada nos cálculos de armazenamento e dimensionamento hidráulico do sistema, uma vez que o nível inferior dessa camada representa o limite máximo de lâmina de água suportada pelo jardim. Essa consideração será detalhada posteriormente.

A camada de material granular miúdo foi a primeira a ser inserida no interior da cava, conforme apresentado na figura 15. Durante essa etapa, foram utilizadas ferramentas como régua de pedreiro e nível de bolha, visando garantir o nivelamento adequado da camada ao longo de toda a base do sistema.

Figura 15: colocação da camada de areia.



Fonte: Autores (2026).

Em seguida, foi inserido o material granular graúdo até a cota de 90 cm, sobreposto a uma camada de manta geotêxtil responsável pela separação entre o material granular miúdo e o material granular graúdo, conforme apresentado na figura 16. O processo de preenchimento das camadas ocorreu de forma gradual, uma vez que, à medida que o material era colocado, ele se ajustava ao formato interno da cava. Dessa forma, o nivelamento foi realizado por etapas, camada por camada, até que fossem atingidas as cotas previstas em projeto.

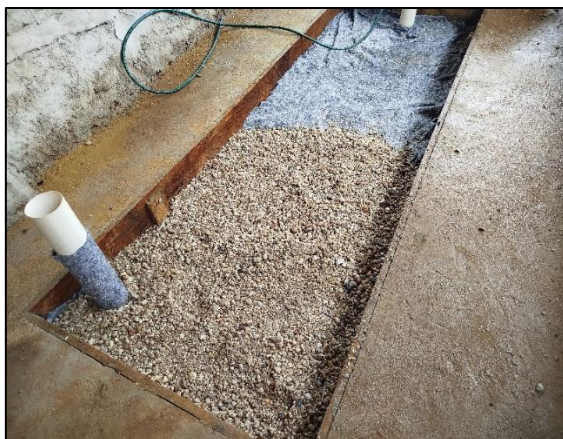
Figura 16: colocação da camada de seixo rolado.



Fonte: Autor (2026).

Com o agregado graúdo na cota 90cm foi colocado sobre ele a manta geotêxtil e em seguida adicionado mais agregado graúdo até a cota 100cm de acordo com a figura 17. Areia na base, seixo na camada intermediária e uma camada superior destinada ao suporte dos jarros foi definida de forma a garantir um funcionamento hidráulico adequado durante a simulação. A areia atua na percolação final da água, favorecendo a infiltração em profundidade, enquanto o seixo proporciona armazenamento temporário e controle do fluxo devido à sua maior porosidade.

Figura 17: colocação da camada superior com seixo rolado.



Fonte: Autor (2026).

4.2.3.2 Definição da Porosidade dos Materiais

A porosidade dos materiais empregados no jardim de chuva foi considerada como um parâmetro fundamental para a análise do comportamento hidráulico do sistema, uma vez que influencia diretamente a capacidade de armazenamento, a condução do fluxo e os processos de infiltração ao longo das camadas. Por representar a fração de vazios existente no material, a porosidade exerce papel determinante na dinâmica da água em meios porosos, estando diretamente associada à eficiência de sistemas de drenagem sustentável.

Para a definição desse parâmetro, foram adotados intervalos de porosidade com base em valores consolidados na literatura técnica, considerando as características granulométricas dos materiais utilizados, como a areia na camada inferior e o agregado graúdo (seixo) na camada intermediária. Essa abordagem permite representar de forma adequada o comportamento esperado desses materiais em condições típicas de aplicação, contemplando variações inerentes ao arranjo dos grãos e ao grau de compactação.

A porosidade do material pode ser determinada a partir do índice de vazios, sendo ambos diretamente relacionados por uma expressão matemática amplamente utilizada na mecânica dos solos. Essa relação permite quantificar a fração de vazios em relação ao volume total do material, sendo expressa conforme a equação 1 (ARORA, 2020).

$$n = \frac{e}{e+1} \quad \text{Equação 1.}$$

Onde:

e: é o índice de vazios.

n: é a porosidade do material dado em porcentagem (%).

De acordo com Fernandes (2025), solos bem graduados, caracterizados pela ampla distribuição de tamanhos de partículas, tendem a apresentar uma faixa mais extensa de índices de vazios, compreendida entre valores mínimos e máximos. Nesses materiais, o índice de vazios mínimo pode atingir valores reduzidos, em função da melhor acomodação entre partículas de diferentes dimensões, nas quais os grãos menores ocupam os espaços vazios entre os maiores.

Essa característica permite a adoção de intervalos representativos de índice de vazios como parâmetro de análise, possibilitando a avaliação do comportamento do material em diferentes condições de arranjo e compactação. A tabela 1 a seguir mostra os índices máximos (e.máx) e mínimos (e.min) de materiais granulares conforme seu tipo.

Tabela 1: valores limite de máximo e mínimo de índice de vazios.

Valores limite do índice de vazios de materiais granulares		
Materiais porosos granulares	Índice de vazios	
	e.máx	e.min
Esferas de diâmetro igual	0,91	0,35
Areia uniforme	1	0,4
Silte uniforme e inorgânico	1,1	0,4
Areia Siltosa	0,9	0,3
Areia (mistura de fina e grossa)	0,95	0,2
Areia com mica	1,2	0,4
Areia, silte e pedregulho misturados	0,85	0,14

Fonte: Adaptado (Fernandes, 2025).

Para os materiais granulares utilizados nesta pesquisa, correspondentes ao agregado graúdo (seixo rolado) e ao agregado miúdo (areia), foram adotados intervalos de porosidade com base nos valores de índice de vazios apresentados na tabela 2, os quais foram utilizados na discussão dos resultados. Para o seixo rolado, considerou-se um intervalo entre e.min = 0,35 e e.max = 0,91, enquanto para a areia foram adotados os valores de e.min = 0,20 e e.max = 0,95. A porosidade correspondente a cada um dos extremos foi determinada a partir da Equação 1, permitindo a conversão dos índices de vazios em frações de vazios no material. Esses parâmetros são fundamentais para a análise do comportamento hidráulico do sistema, uma vez que influenciam diretamente a capacidade de armazenamento e a condução da água ao longo das camadas do jardim de chuva.

Tabela 2: valores de máximos e mínimos de porosidade.

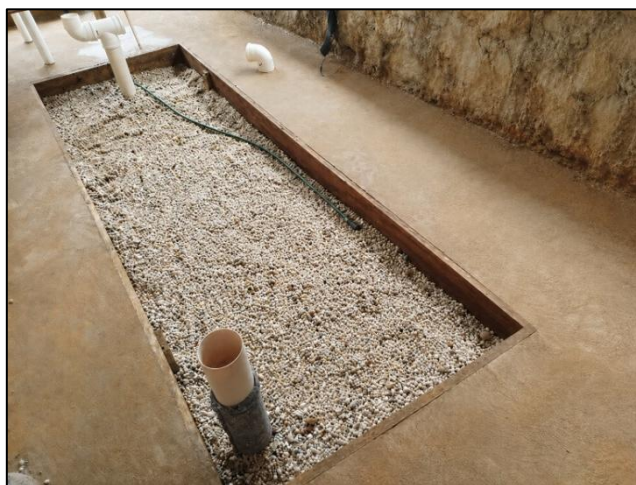
Materiais porosos granulares	índice de vazios		Porosidade (%)	
	e.max	e.min	n.max	n.mim
Seixo roliço	0,91	0,35	47,64	25,93
Areia	0,95	0,2	48,72	16,67

Fonte: Adaptado (Fernando, 2025).

4.2.4 Representação final do jardim de chuva

Após a etapa de construção, o sistema experimental foi considerado em sua configuração final, estando apto para a realização dos ensaios de infiltração, conforme ilustrado na figura 18. A camada superior foi destinada ao suporte dos jarros, não tendo sido considerada como parte ativa no processo de infiltração.

Figura 18: jardim de chuva finalizado.



Fonte: Autor (2026).

Para fins de análise, estabeleceu-se como limite máximo do nível de água a porção superior da camada intermediária de seixo. Ressalta-se que, embora o sistema apresente profundidade total de 1,0 m, foi adotada uma altura útil de 0,9 m, correspondente à região efetivamente destinada ao armazenamento e infiltração das águas pluviais. Os 10 cm superiores foram mantidos como margem de segurança operacional, visando reduzir possibilidades de extravasamento da água durante as simulações, além de serem destinados à camada de seixo superior e ao suporte dos elementos vegetativos do jardim. Essa configuração permitiu representar de forma mais controlada as condições de funcionamento do sistema, proporcionando maior padronização dos ensaios e melhor interpretação dos resultados obtidos.

4.3 Ensaio de velocidade de infiltração do solo

A determinação da velocidade de infiltração básica (V_{IB}) do solo foi realizada com base na metodologia proposta por Bernardo *et al.* (2019), utilizando-se o ensaio com infiltrômetro de anel. O ensaio foi executado na base do jardim de chuva, a aproximadamente 1,0 m de profundidade em relação à superfície do sistema, sendo realizado na região central da cava, com o objetivo de representar de maneira mais próxima as condições reais de infiltração do dispositivo implantado. A equação 2 apresentada a seguir representa as variáveis consideradas para a determinação da velocidade de infiltração básica do solo.

$$V_{IB} = \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{Equação 2.}$$

Onde:

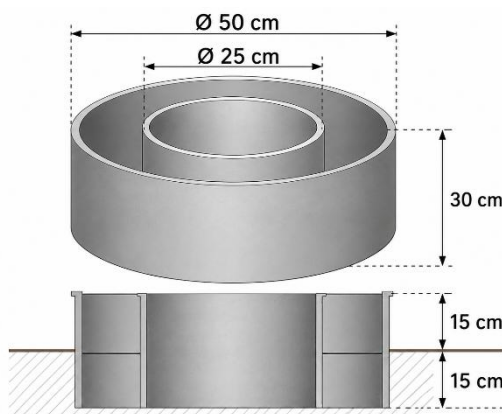
V_{IB} é a velocidade de infiltração básica dada em milímetros por hora (mm/h)

ΔI é a variação de infiltração acumulada em milímetros (mm)

Δt é o intervalo de tempo em horas (h)

Inicialmente, realizou-se o preparo da superfície do solo no local do ensaio, promovendo o nivelamento da área e a remoção de materiais soltos, com o objetivo de proporcionar condições mais uniformes e minimizar possíveis interferências no processo de infiltração. Em seguida, foram instalados dois anéis metálicos concêntricos (figura 19), posicionados verticalmente e cravados no solo até aproximadamente 15 cm de profundidade. O anel interno possui diâmetro de 25 cm, enquanto o anel externo apresenta diâmetro de 50 cm, ambos com altura de 30 cm, conforme estabelecido pela metodologia adotada.

Figura 19: infiltrômetro de anel.



Fonte: Adaptado (Bernardo, 2019).

Após a instalação dos anéis, realizou-se a aplicação simultânea de água em ambos até o nível de 100 mm, mantendo-se uma lâmina aproximadamente constante ao longo do ensaio. Durante a execução, a altura da lâmina d'água foi mantida em torno de 5 cm, admitindo-se uma variação máxima de até 2 cm.

Para o controle da lâmina de água e acompanhamento da infiltração, foram utilizadas duas réguas graduadas (figura 20), posicionadas no interior dos anéis, além de um escalímetro utilizado como instrumento auxiliar nas medições. As réguas foram posicionadas de forma invertida, facilitando a leitura das variações do nível de água durante o ensaio.

Figura 20: réguas e escalímetro utilizado no ensaio de infiltrômetro de anel.



Fonte: Autor (2026).

As leituras foram realizadas em intervalos de 5 minutos durante os primeiros 40 minutos de ensaio. Após esse período inicial, as medições passaram a ser realizadas em intervalos de 10 minutos, sendo mantidas ao longo das 3 horas totais de duração do ensaio. Durante todo o procedimento, sempre que o nível de água se aproximava de 120 mm na régua, era realizada a reposição de água no anel, restabelecendo o nível para 100 mm, de modo a garantir a conformidade do método da lâmina controlada.

Conforme recomendado por Bernardo *et al.* (2019), a estabilização da velocidade de infiltração básica (Vib) pode ser determinada quando a velocidade de infiltração aparente (Via) ser igual em três leituras consecutivas. No entanto, com o intuito de conferir maior confiabilidade aos resultados obtidos, optou-se pela continuidade do ensaio até que fossem observadas seis verificações consecutivas com comportamento constante da taxa de infiltração.

Para a representação do comportamento da infiltração ao longo do tempo, foi utilizado o modelo empírico de Horton, amplamente empregado em estudos hidrológicos para descrever a redução da taxa de infiltração em função do tempo. Segundo Tucci (2020), a infiltração

apresenta valores elevados no início do processo, reduzindo progressivamente até atingir uma condição aproximadamente constante, associada à saturação do solo. O modelo de Horton expressa essa variação por meio de uma função exponencial decrescente, conforme apresentado na equação 3.

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad \text{Equação 3.}$$

Onde:

$f(t)$ é a velocidade de infiltração correspondente ao tempo em milímetros por hora (mm/h)

f_c é a velocidade de infiltração básica em milímetros por hora (mm/h)

f_0 é a velocidade de infiltração inicial

k representa o decaimento da infiltração sendo adimensional

t é o tempo medido em cada instante em horas

e , corresponde ao número de Euler aproximadamente 2,718

A aplicação desse modelo neste estudo foi realizada de forma complementar aos ensaios de infiltrômetro de anel, permitindo a representação contínua do comportamento da infiltração ao longo do tempo. O coeficiente k foi determinado por ajuste empírico aos dados experimentais obtidos, sendo adotado o valor de $k=0,07$, por apresentar melhor concordância com a tendência de redução da infiltração observada nos dados experimentais.

4.4 Ensaio de granulometria do solo

O ensaio de granulometria foi realizado com o objetivo de determinar a distribuição das partículas do solo, permitindo a caracterização de sua composição granulométrica. A amostra de solo (figura 21) foi coletada na superfície da base do jardim, buscando representar as condições reais do material presente no local, sendo posteriormente acondicionada e encaminhada ao laboratório da empresa Franco Engenharia, localizada no município de Imperatriz-MA, onde foi conduzido o ensaio.

Os resultados da análise granulométrica foram utilizados como apoio para interpretar o comportamento do solo quanto à infiltração de água, relacionando a composição do material com o desempenho do jardim de chuva durante as simulações realizadas, considerando que solos com maior fração arenosa tendem a apresentar maior capacidade de infiltração, conforme Bernardo *et al.* (2019).

Figura 21: amostra de solo para ensaio de granulometria.



Fonte: Autor (2026).

De acordo com a ABNT NBR 6457:2024 – Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, a quantidade mínima de amostra para análise granulométrica é definida em função da dimensão dos grãos maiores presentes no material. Conforme a tabela 3 da referida norma, para solos com dimensões de grãos inferiores a 5 mm, a quantidade mínima estabelecida é de 1 kg de amostra. Considerando que, na análise visual realizada, os grãos presentes eram inferiores a esse limite, foi adotado na presente pesquisa o valor de 3 kg de solo, resultando em uma amostra com representatividade superior à exigida pela norma, garantindo maior confiabilidade na execução do ensaio.

Tabela 3: quantidade mínima de amostra de solo para ensaio de granulometria.

Dimensões dos sólidos (grãos) maiores contidos na amostra, determinadas por observação visual	Quantidade mínima a ser utilizada
< 5mm	1 kg
5mm a 25mm	4 kg
>25mm	8 kg
Nota 1 O material assim obtido constitui a amostra a ser ensaiada Nota 2 O valor da massa específica dos sólidos(grãoes) a ser utilizado no cálculo de análise granulométrica por sedimentação é determinado a partir de cerca de 500g de material que passa na peneira de 2,0mm	

Fonte: Adaptado (ABNT NBR 6457:2024).

De acordo com a ABNT NBR 7181:2025 – Solo — Análise granulométrica, o ensaio foi realizado com o objetivo de determinar a distribuição granulométrica do solo por meio dos processos de peneiramento grosso e peneiramento fino. Inicialmente, procedeu-se à preparação da amostra conforme estabelecido pela norma, realizando-se a secagem do material (figura 22) com o auxílio de uma fonte de calor, até a obtenção de massa constante.

Figura 22: amostra de solo submetida a fonte de calor



Fonte: Autor (2026).

Esse procedimento teve como finalidade eliminar a umidade presente no solo, garantindo maior precisão nos resultados do ensaio. Para a determinação do teor de umidade (equação 4), foram utilizadas cápsulas metálicas, permitindo a obtenção da umidade higroscópica do material, conforme recomendado pela norma.

$$w = \frac{(Mh - Ms)}{Ms} * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

w é o teor de umidade do solo, dado em porcentagem (%)

Mh é a massa do solo úmido mais o peso do recipiente, antes da secagem dado em gramas (g)

Ms é a massa do solo seco mais a do recipiente, após a secagem dado em gramas (g)

Após a secagem, a amostra foi submetida às operações preliminares, que consistiram na desagregação dos torrões com o auxílio de almofariz, de modo a evitar a quebra dos grãos, garantindo que apenas partículas maiores que a abertura das peneiras fossem retidas. Em

seguida, o material foi passado na peneira de abertura de 2,0 mm, separando-se a fração destinada ao peneiramento grosso da fração utilizada no peneiramento fino.

Para a execução do ensaio, do total de 3 kg de solo coletado, foi selecionada uma fração de aproximadamente 1,5 kg destinada ao peneiramento grosso e cerca de 100 g para o peneiramento fino parcial. A definição da massa de 1,5 kg foi realizada com base na tabela 4, a qual estabelece a relação entre a dimensão dos grãos presentes na amostra e a capacidade da balança a ser utilizada no ensaio. Considerando que os grãos predominantes na amostra apresentavam dimensões inferiores a 5 mm, adotou-se a massa de 1,5 kg para o ensaio. Ressalta-se que a balança utilizada possuía capacidade de 10 kg, valor superior ao requerido, garantindo maior confiabilidade e precisão nas medições realizadas.

Tabela 4: quantidade de amostra considerada para ensaio de granulometria.

Determinação da massa da amostra seca à temperatura ambiente (mm)	Balança a ser utilizada	
	Capacidade nominal (kg)	Precisão (g)
>25	10	1
5 a 25	5	0,5
<5	1,5	0,1

Fonte: Adaptado (ABNT NBR 7181:2025).

O peneiramento grosso foi realizado com o material retido na peneira de 2,0 mm, o qual foi previamente lavado para remoção de partículas finas aderidas e, posteriormente, seco até massa constante. Em seguida, o material foi submetido ao conjunto de peneiras com aberturas de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm, sendo registradas as massas retidas acumuladas em cada peneira.

Já o peneiramento fino foi realizado com o material passante na peneira de 2,0 mm, o qual foi lavado na peneira de 0,075 mm para remoção das partículas mais finas. Após esse processo, o material foi seco até massa constante e submetido ao conjunto de peneiras com aberturas de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, sendo registradas as massas retidas acumuladas em cada uma delas, a figura 23 mostra o conjunto de peneiras utilizadas e demais processos desse ensaio.

Figura 23: conjunto de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.



Fonte: Autor (2026).

Para o detalhamento da composição granulométrica do solo analisado, adotou-se a classificação estabelecida pela ABNT NBR 6502 (2022), a qual define os intervalos de tamanho das partículas constituintes dos solos, incluindo a fração areia, caracterizada por diâmetros compreendidos entre aproximadamente 0,06 mm e 2,0 mm. Adicionalmente, considerou-se a presença de partículas com dimensões entre 2,0 mm e 5,0 mm, classificadas como pedregulho fino, conforme a mesma norma.

Com base nessa padronização, procedeu-se à subdivisão da fração areia presente no solo em classes granulométricas distintas, considerando as categorias de areia fina, média e grossa. Essa classificação foi empregada em conjunto com a curva granulométrica obtida experimentalmente, permitindo uma caracterização mais detalhada da distribuição das partículas e da composição do solo analisado. Além disso, utilizou-se como material complementar de apoio interpretativo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (EMBRAPA, 2018), contribuindo para uma melhor interpretação das características granulométricas observadas no solo analisado.

4.5 Dimensionamento para simulações de chuvas

O dimensionamento hidrológico do jardim de chuva foi realizado com base no Método Racional, técnica amplamente empregada na estimativa de vazões em áreas de pequena extensão. A adoção desse método permitiu estabelecer uma relação entre as características da precipitação e da área de contribuição, fornecendo subsídios para a definição dos parâmetros de projeto do sistema. A partir dessa abordagem, foram considerados fatores como a intensidade da chuva e as condições da área estudada, os quais serão detalhados nos tópicos subsequentes.

4.5.1 Método Racional

O Método Racional foi adotado neste estudo como base para o dimensionamento das condições de chuva aplicadas nas simulações experimentais. Trata-se de um método amplamente empregado em estudos hidrológicos, especialmente em áreas de pequena extensão, por permitir a estimativa da vazão máxima a partir da relação entre a intensidade da precipitação, a área de contribuição e o coeficiente de escoamento da superfície analisada, a seguir a baixo segue a equação 5 de vazão de projeto de acordo com Almeida, Masini e Malta (2017).

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{60} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

Q é a vazão de pico dada em litros por minuto (L/min)

C é o coeficiente de escoamento

i, representa a intensidade da chuva dada em milímetros por hora (mm/h)

A é a área de contribuição dada em metros quadrados (m²)

O dimensionamento das condições de chuva adotadas nas simulações experimentais foi realizado com base na equação de intensidade-duração-frequência (IDF), amplamente utilizada em estudos hidrológicos para a definição de precipitações de projeto. Essa abordagem permite relacionar a intensidade da chuva com sua duração e com o tempo de retorno associado ao evento, sendo especialmente aplicável em análises de grande e pequena escala, a equação 6 abaixo mostra a equação IDF de acordo com Almeida, Masini e Malta (2017).

$$Im = \frac{K \cdot T^a}{(t+b)^c} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

Im é a intensidade máxima média de precipitação dada em milímetros por hora (mm/h)

T é o período de retorno dado em anos

t é a duração da precipitação dada em minutos (min)

K, a, b, c são parâmetros relativos à localidade

Por meio da aplicação conjunta dessas equações, foi possível realizar o dimensionamento do jardim de chuva inserido no contexto da microdrenagem urbana, uma vez que elas permitiram estimar as condições de precipitação e as respostas hidrológicas associadas aos eventos de chuva considerados na pesquisa. Nesse contexto, o dimensionamento consistiu na determinação do volume máximo de água gerado pelos eventos pluviométricos na área de estudo, considerando as características específicas da superfície analisada.

A partir dessas estimativas, foram definidos os volumes de água aplicados nas simulações experimentais, possibilitando a avaliação do desempenho do sistema em relação ao armazenamento temporário, à infiltração e ao controle dos volumes gerados durante os eventos simulados.

4.5.2 Dimensionamento GAM-IDF

Para a obtenção dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência (IDF), foi utilizada a plataforma GAM-IDF (Genetic Algorithm Methodology for IDF) desenvolvida no âmbito da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), com o objetivo de ajustar equações de precipitação a partir de séries históricas de dados pluviométricos. Essa ferramenta emprega técnicas de otimização baseadas em algoritmos genéticos, os quais simulam processos evolutivos naturais, como seleção, cruzamento e mutação, para determinar os parâmetros mais representativos da equação IDF para uma determinada localidade.

O funcionamento da plataforma consiste, inicialmente, na inserção de dados de precipitação, geralmente provenientes de estações pluviométricas, como aquelas disponibilizadas por bases oficiais. A partir desses dados, o modelo realiza sucessivas iterações, ajustando os parâmetros da equação IDF de forma a minimizar os erros entre os valores observados e os valores estimados. Esse processo iterativo permite a obtenção de um conjunto de parâmetros que melhor representa o comportamento das chuvas intensas na região analisada.

Como resultado, a ferramenta fornece uma equação IDF ajustada às condições locais, possibilitando a estimativa da intensidade da precipitação para diferentes durações e tempos de retorno. No presente estudo, os parâmetros obtidos por meio da plataforma GAM-IDF foram utilizados para a definição das chuvas de projeto, servindo como base para o dimensionamento dos volumes aplicados nas simulações experimentais do jardim de chuva.

4.5.3 Dados Pluviométricos

Para a obtenção dos dados pluviométricos utilizados neste estudo, recorreu-se à base de dados disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), órgão federal responsável pela gestão dos recursos hídricos no Brasil. A ANA disponibiliza, por meio do sistema Hidroweb, séries históricas de dados hidrológicos e meteorológicos provenientes de estações distribuídas em todo o território nacional, constituindo uma das principais fontes de informação para estudos técnicos e científicos na área.

O sistema Hidroweb reúne registros de precipitação coletados em estações pluviométricas (figura 24) monitoradas por diferentes instituições, permitindo o acesso a dados consistentes e de ampla cobertura espacial e temporal. No presente trabalho, esses dados foram utilizados como base para a caracterização das condições de precipitação da região de estudo, fornecendo subsídios para as etapas subsequentes de análise.

A partir das séries históricas obtidas, procedeu-se ao ajuste das equações de intensidade-duração-frequência (IDF) por meio da plataforma GAM-IDF, a qual utiliza algoritmos genéticos para a determinação dos parâmetros mais representativos das equações. Dessa forma, a integração entre os dados fornecidos pela ANA, via Hidroweb, e a ferramenta GAM-IDF possibilitou a obtenção de equações IDF ajustadas à realidade local, contribuindo diretamente para o dimensionamento das chuvas de projeto e dos volumes aplicados nas simulações do jardim de chuva.

Figura 24: pluviômetro manual.



Fonte: ANA (2025).

4.5.4 Simulações de chuva

A área responsável pela contribuição do volume de água direcionado ao jardim de chuva é denominada área de contribuição. Para este trabalho, foram consideradas diferentes áreas de contribuição relacionadas à capacidade do sistema implantado, tomando como base a área superficial do jardim de chuva de 3 m². Dessa forma, o dispositivo passou a representar respectivamente 5%, 10%, 15% e 20% das áreas de contribuição adotadas, correspondendo aos valores de 60 m², 30 m², 20 m² e 15 m².

Os dados pluviométricos utilizados para o dimensionamento das simulações de chuva foram obtidos a partir do posto pluviométrico da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), de código 447004, localizado no município de Açailândia-MA. Os registros disponíveis nesse posto abrangem o período de 1996 a 2025.

Após a análise dos dados pluviométricos consistidos, foram considerados para o estudo os registros correspondentes a 29 anos de observação. A tabela 5 apresenta os dados utilizados, sendo que a precipitação acumulada máxima registrada em cada ano foi adotada como representativa do evento de chuva máxima anual.

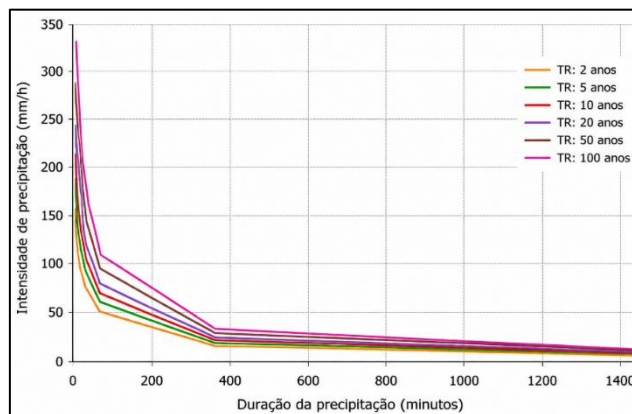
Tabela 5: dados pluviométricos de precipitação de Açailândia-MA.

Ano	Precipitação acumulada máxima no ano (mm)	Ano	Precipitação acumulada máxima no ano (mm)
2024	115,70	2009	149,00
2023	220,00	2008	89,20
2022	75,30	2007	101,00
2021	110,20	2006	144,00
2020	134,30	2005	135,10
2019	73,00	2004	76,40
2018	79,00	2003	89,90
2017	89,30	2002	73,90
2016	42,00	2001	93,30
2015	85,40	2000	93,40
2014	47,40	1999	92,20
2013	86,10	1998	89,70
2012	75,80	1997	132,00
2011	149,80	1996	164,50
2010	140,00	-	-

Fonte: ANA (2024).

Depois de inserir os dados na Plataforma GAN-IDF foi gerado as curvas IDF como mostrado no gráfico 1. Para o dimensionamento foi considerado o tempo de retorno de 5 anos e tempo de chuva de 5 e 10 minutos de acordo com a ABNT NBR 10844 – Instalações prediais de águas pluviais deve ser considerado 5 anos para áreas com Cobertura e/ou terraço.

Gráfico 1: curvas IDF dos dados pluviométricos de Açailândia-MA.



Fonte: ANA (2024).

Utilizando o tempo de chuva de 5 e 10 minutos as precipitações de projeto ficou em 188,3 e 152,3mm/h respectivamente. Esses valores são superiores aos estabelecidos pela norma NBR 10844 pois, ela estabelece um valor fixo de 150mm/h para residências com até 100m² quando não se tem dados pluviométricos locais, a tabela 6 a seguir mostra o resumo das simulações e os volumes de água utilizados em cada simulação utilizando a equação 5 tomando o uso do coeficiente C igual a 1 no método racional.

Tabela 6: dimensionamento do volume de água para os ensaios de chuva.

Área relativa do jardim (%)		Área do jardim (m2)	Área de contribuição (m2)	Tempo de concentração (min)	Tempo de retorno (anos)	precipitação (mm/h)	Volume de água (L)
S1	5	3	60	10	5	152,3	1523,00
S2		3	60	5	5	188,3	941,50
S3	10	3	30	10	5	152,3	761,50
S4		3	30	5	5	188,3	470,75
S5	15	3	20	10	5	152,3	507,66
S6		3	20	5	5	188,3	313,83

S7	20	3	15	10	5	152,3	380,75
S8		3	15	5	5	188,3	235,37

Fonte: Autor (2026).

4.6 Implementação dos Dispositivos de água e procedimentos de medição

Para a geração das chuvas aplicadas nas simulações dimensionadas, foi necessária a utilização de diferentes dispositivos e componentes hidráulicos, entre eles tubulações de água, torneiras, reservatório com capacidade de 1000 litros, conexões adaptadas para permitir o controle da passagem de água, dispositivos de sensoriamento do nível de água em faixas e equipamentos destinados à medição de vazão e volume de água.

4.6.1 Medidores de vazão e volume de água

Para a realização das simulações de chuva com volumes específicos, foram utilizados dois dispositivos medidores de vazão de água (figura 25). Com esses equipamentos, foi possível monitorar a vazão em litros por minuto (L/min) e controlar os volumes aplicados nas simulações de chuva dimensionadas, permitindo medições com precisão de uma casa decimal.

Figura 25: dispositivos medidores de vazão de água e volume.



Fonte: Autor (2026).

4.6.2 Entrada de água pelo jardim

A companhia de abastecimento Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), responsável pelo fornecimento de água da residência onde o jardim de chuva foi implantado, apresenta vazões inferiores a 20 litros por minuto, valor considerado insuficiente para a realização das simulações de chuva de maior intensidade. Dessa forma, para possibilitar a aplicação dos volumes dimensionados nas simulações mais intensas, foi necessária a utilização de uma caixa d'água com capacidade de 1000 litros, empregada como reservatório auxiliar.

Com isso, a liberação da água para as simulações passou a ocorrer a partir do volume previamente armazenado na caixa d'água, sendo conduzida por dois alimentadores conectados aos dispositivos de medição e controle de vazão utilizados no sistema experimental.

4.6.2.1 Entrada pelos medidores de vazão

A entrada da água proveniente dos medidores de vazão ocorreu por meio de uma tubulação instalada internamente ao jardim de chuva. Essa forma de alimentação foi adotada com o objetivo de permitir que a água se distribuisse de maneira mais uniforme pelos vazios existentes entre os materiais granulares, alcançando o fundo da cava de forma gradual e proporcional. Além disso, essa configuração contribuiu para minimizar interferências diretas no comportamento do nível de água monitorado pelos dispositivos de medição de nível.

A implementação dessa tubulação interna ocorreu da seguinte maneira:

a) Materiais utilizados

- Cano PVC de 100mm (2m)
- Cano PVC de 100mm (0,5m)
- T de Cano PVC de 100mm
- Dois (02) joelhos de Cano PVC de 100mm
- Furadeira com broca de 3/8"
- Manta geotêxtil

b) Processo de Construção

O tubo correspondente ao trecho horizontal, com comprimento de 2 m, recebeu três fileiras de furos distribuídas ao longo de sua extensão, com diâmetros variando entre 20 mm e

25 mm. Os furos foram executados de forma equidistante, apresentando espaçamento aproximado de 25 cm no sentido longitudinal e entre 5 cm e 7 cm lateralmente, conforme apresentado na figura 26.

Figura 26: perfuração no tubo horizontal.



Fonte: Autor (2026).

Durante o processo de montagem da tubulação interna, foi instalada uma conexão do tipo T junto ao tubo perfurado de 2 m de comprimento, possibilitando a condução da água proveniente da torneira por meio das conexões em joelho acopladas ao sistema. Essa configuração permitiu a distribuição da água ao longo da tubulação perfurada no interior do jardim de chuva. A figura 27 apresenta o posicionamento da tubulação antes da inserção dos materiais granulares na cava do sistema.

Figura 27: posicionamento da tubulação de entrada da água.



Fonte: Autor (2026).

O tubo de PVC com 0,5 m de comprimento foi instalado verticalmente entre a conexão do tipo T e a tubulação horizontal, permitindo que o sistema permanecesse alinhado à cota máxima prevista para funcionamento do jardim de chuva. A figura 28 apresenta a disposição da tubulação vertical após sua instalação no sistema.

Figura 28: posicionamento da tubulação horizontal com materiais granulares



Fonte: Autor (2026).

Como pode ser observado nas figuras 27 e 28, a tubulação horizontal foi revestida com manta geotêxtil ao longo de sua extensão. A aplicação desse material teve como principal finalidade impedir a entrada de seixos, partículas finas ou qualquer outro tipo de resíduo no interior da encanação durante o funcionamento do sistema. Além disso, a manta geotêxtil contribuiu para manter o fluxo de água mais livre no interior da tubulação perfurada, reduzindo possíveis obstruções que poderiam comprometer a distribuição da água nas simulações realizadas.

4.6.2.2 Reservatório de água

A caixa d'água, com capacidade de 1000 litros, foi posicionada próxima ao jardim de chuva, conforme apresentado na figura 29. A tubulação utilizada para a condução da água até o sistema, composta por um tubo de 50 mm de diâmetro com 1 m de comprimento, associado a um registro de 50 mm destinado ao controle da vazão aplicada nas simulações. A injeção da água proveniente do reservatório ocorreu pela região central do jardim de chuva, permitindo uma distribuição mais uniforme do fluxo no interior do sistema.

Figura 29: caixa de água, capacidade para 1000 litros.



Fonte: Autor (2026).

4.6.3 Desenvolvimento de equipamento alternativo para medição piezométrica

O dispositivo piezométrico foi desenvolvido com a finalidade de permitir o acompanhamento do nível de água no interior do jardim de chuva durante as simulações realizadas. Sua utilização possibilitou observar a variação da lâmina de água ao longo do tempo no interior do sistema, contribuindo para o monitoramento do comportamento hidráulico do jardim durante os ensaios experimentais.

O funcionamento é baseado no princípio dos vasos comunicantes, que está associado aos estudos hidrostáticos desenvolvidos por Blaise Pascal, estabelecendo que recipientes interligados contendo um mesmo fluido tendem a apresentar o mesmo nível de equilíbrio hidráulico (Fernandes, 2018). Dessa forma, como o dispositivo piezométrico encontra-se conectado hidráulicamente ao interior do jardim de chuva, o nível de água observado no interior da tubulação representa o comportamento da lâmina de água presente nos vazios do sistema durante as simulações realizadas.

4.6.3.1 Sensor de nível de água

O sensor de nível de água utilizado na pesquisa foi o da marca Konlen, conforme apresentado na figura 30. O equipamento é composto por cabos conectados a pontas sensoras, as quais podem ser observadas na imagem. A função dessas pontas é transmitir ao equipamento, por meio do fenômeno da condutividade elétrica, a informação referente ao alcance do nível de água em determinada cota do sistema.

Ao todo, o sensor possui cinco (05) pontas sensoras, com comprimentos de fiação correspondentes a 5 m, 4 m, 3 m, 2 m e 1 m, permitindo o monitoramento do nível de água em diferentes posições ao longo da profundidade do jardim de chuva.

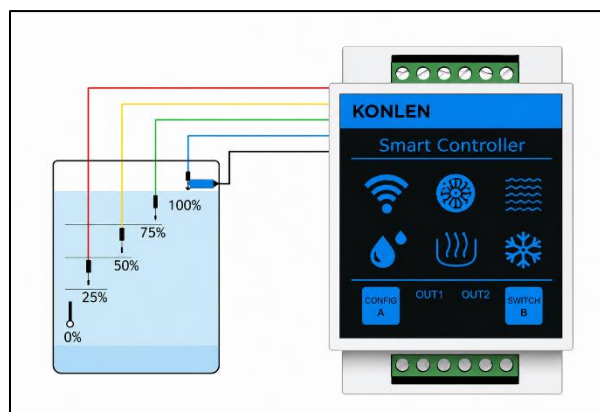
Figura 30: sensor de nível de água,



Fonte: Adaptado Mercado Livre (2026).

Por meio das pontas sensoras, o dispositivo consegue identificar de forma instantânea o nível de água presente em um reservatório, conforme ilustrado na figura 31, indicando as faixas correspondentes a 100%, 75%, 50%, 25% e 0%. Apesar de o equipamento possuir essas faixas pré-definidas pela fabricante, as pontas sensoras apresentam funcionamento semi-independente, permitindo que sejam posicionadas em níveis diferentes daqueles originalmente estabelecidos pelo dispositivo. Dessa forma, tornou-se possível adaptar os pontos de leitura às condições específicas do jardim de chuva e aos níveis de monitoramento desejados durante as simulações.

Figura 31: faixas de sensoriamento do sensor de nível de água.



Fonte: Adaptado Mercado Livre (2026).

A leitura dos níveis do reservatório por meio do dispositivo foi realizada utilizando smartphones conectados ao aplicativo Smart Life, na versão 7.7.0 (Internacional). Por meio de sua interface (figura 32), o aplicativo, que atua como gerenciador e controlador de dispositivos conectados via Wi-Fi, possibilitou a leitura e a identificação em tempo real do dispositivo medidor de nível instalado no sistema.

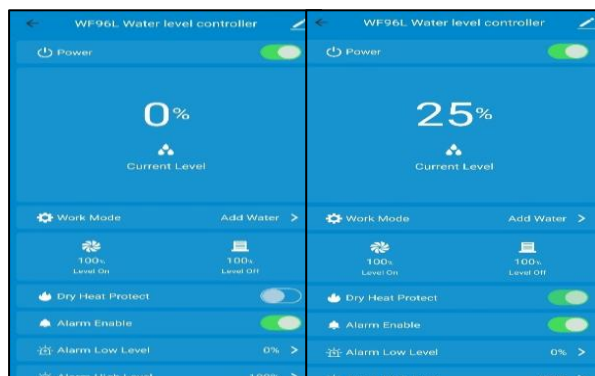
Figura 32: interface do aplicativo Smart Life.



Fonte: Autor (2026).

O dispositivo medidor de nível de água apresenta limitações relacionadas à exatidão da leitura em determinados intervalos de nível dentro do reservatório. Isso ocorre porque o sistema realiza a indicação com base apenas no alcance das pontas sensoras previamente posicionadas. Dessa forma, quando o nível de água permanece entre as faixas de 0% e 25%, o aplicativo Smart Life indica na interface de funcionamento o valor correspondente a 0%, conforme ilustrado na figura 33.

Figura 33: interface de indicação das faixas do sensor de nível de água.



Fonte: Autor (2026).

De maneira semelhante, quando o nível de água se encontra acima de 25% e abaixo de 50%, o aplicativo passa a indicar o valor de 25%, mesmo que o nível real no reservatório esteja próximo ao limite superior dessa faixa, como por exemplo em 49%. Assim, a leitura fornecida pelo sistema representa faixas de nível previamente definidas pelas pontas sensoras instaladas no reservatório. A tabela 7 a seguir apresenta de forma detalhada o funcionamento das medições de nível e as respectivas informações transmitidas ao aplicativo.

Tabela 7: medições e níveis correspondentes do sensor de nível de água.

Níveis do reservatório	Indicação na Interface do sistema
Superior a 100%	100%
Entre 100% a 75%	75%
Entre 75% a 50%	50%
Entre 50% a 25%	25%
Entre 25% a 0%	0%

Fonte: Autor (2026).

4.6.3.2 Estrutura complementar

Para a construção do equipamento de medição piezométrica, foram utilizados materiais e componentes auxiliares. Essas estruturas complementares tiveram a finalidade de auxiliar no monitoramento do nível de água no interior do jardim de chuva, contribuindo para reduzir as limitações de leitura apresentadas pelo sensor eletrônico de nível utilizado na pesquisa e

permitindo um acompanhamento mais representativo das variações do nível de água durante as simulações.

A produção da dessa estrutura ocorreu da seguinte maneira:

a) Materiais utilizados

- Cano PVC de 100mm (1,50m)
- Cano PVC de 100mm (0,3m)
- Argamassa (0,003m³)
- Dispositivo de nível de água
- Cano PVC de 20mm (2m)
- Cap PVC de 20mm
- Furadeira com broca de 3/8"
- Manta geotêxtil
- Fita adesiva

b) Processo de Construção

O processo de construção do dispositivo piezométrico iniciou-se após a preparação da base do jardim de chuva. Para o funcionamento adequado do sistema, foi necessário garantir que o dispositivo permanecesse posicionado verticalmente e perpendicularmente à base do jardim, sendo utilizadas ferramentas de medição de nível durante sua instalação. O tubo de PVC de 100 mm, com 1,50 m de comprimento, corresponde à encanação posicionada verticalmente (figura 34), responsável por permitir a entrada da água por meio de furos com diâmetros entre 10 mm e 20 mm distribuídos ao longo da tubulação. Além disso, toda a estrutura foi envolvida por manta geotêxtil, com a finalidade de impedir a entrada de agregados no interior do dispositivo de medição de nível.

Figura 34: encanação que permite a medição do nível de água.



Fonte: Autor (2026).

Como apresentado na figura 34, o tubo de PVC de 100 mm com 1,5 m de comprimento foi embutido no solo por meio de um consolo (figura 35), confeccionado utilizando um tubo de PVC de 100 mm com 0,3 m de comprimento, argamassa com volume aproximado de 0,003 m³ e um Cap de vedação. O consolo possui a função principal de fornecer sustentação ao tubo vertical de 1,5 m, o qual foi instalado em um furo dentro do solo com aproximadamente 105 mm de diâmetro e 0,3 m de profundidade. Além disso, o Cap foi utilizado como suporte para o tubo de PVC de 20 mm com 2 m de comprimento, juntamente com a fiação do dispositivo medidor de nível de água.

Figura 35: consolo de sustentação.



Fonte: Autor (2026).

As pontas sensoras foram fixadas com fita nos níveis de medição definidos para este trabalho. Essas pontas foram acopladas ao tubo de PVC de 20 mm com 2 m de comprimento, conforme apresentado na figura 36. O Cap citado anteriormente teve a função de fornecer

sustentação ao tubo de PVC, mantendo-o posicionado perpendicularmente à base do jardim de chuva. Essa configuração foi necessária para garantir maior estabilidade ao sistema de medição e melhor representação dos níveis de água observados durante as simulações.

Figura 36: pontas sensoras acopladas



Fonte: Autor (2026).

Na figura 37 é possível observar, de forma demonstrativa, a disposição do tubo de PVC de 20 mm com 2 m de comprimento sem a presença do tubo de PVC de 100 mm com 1,50 m. A partir da régua de referência de nível, foram realizadas as marcações ao longo do tubo de 20 mm, definindo os pontos onde as pontas sensoras foram fixadas para o monitoramento dos níveis de água correspondentes aos 0,90 m úteis do jardim de chuva.

Figura 37: disposição ilustrada do posicionamento do tubo PVC 20mm.



Fonte: Autor (2026).

Após todo o processo inicial de instalação, o tubo de PVC de 100 mm com 1,5 m de comprimento recebeu perfurações ao longo de toda a sua extensão, utilizando furos com diâmetros variando entre 10 mm e 15 mm, espaçados aproximadamente 5 cm entre centros. As perfurações foram executadas com o auxílio de furadeira equipada com broca de 3/8", permitindo a livre passagem da água para o interior do dispositivo piezométrico. Em seguida, toda a tubulação foi envolvida com manta geotêxtil, com a finalidade de impedir a entrada de materiais granulares no interior do sistema de acordo com a figura 38.

Figura 38: disposição da tubulação vertical.



Fonte: Autor (2026).

O processo de preenchimento com os materiais granulares foi realizado de forma gradual, evitando possíveis alterações na perpendicularidade do tubo de PVC de 100 mm com 1,5 m de comprimento. Além disso, a cada 30 cm de camada preenchida, foi realizada a verificação do alinhamento vertical da tubulação por meio da utilização de nível de bolha, garantindo maior estabilidade e posicionamento adequado do dispositivo piezométrico ao longo da instalação como pode ser visto na figura 39.

Figura 39: dispositivo piezométrico finalizado.



Fonte: Autor (2026).

4.7 Leitura do nível de água e procedimentos complementares

Para esta pesquisa, o tempo de infiltração foi considerado a partir do instante em que a lâmina de água atingia sua altura máxima em cada simulação, coincidindo diretamente com o momento de finalização da chuva simulada. Entretanto, devido às limitações do sensor de nível quanto à identificação exata do nível real da água entre as faixas de medição, ao término de cada simulação foi realizada uma medição manual com o auxílio de uma escala graduada. Essa medição permitiu identificar, por meio do próprio dispositivo piezométrico, a altura da lâmina de água presente no sistema no instante final da simulação, conforme ilustrado na figura 40.

Figura 40: dispositivo piezométrico com escala graduada.



Fonte: Autor (2026).

O dispositivo piezométrico possui altura fixa de 148 cm entre a base do jardim e seu topo, possibilitando identificar o nível máximo alcançado pela lâmina de água em cada simulação. Além disso, o sistema permitiu determinar o tempo necessário para que a água infiltrasse desde o pico máximo até o primeiro sensor correspondente à cota inferior. A tabela 8 apresenta, de forma exemplificativa, o procedimento adotado para obtenção dos intervalos de tempo, considerando os níveis fixos definidos pelo sensor e pela medição do pico da lâmina de água.

Tabela 8: disposição de medidas e variação de cota.

Cotas (%)	Variação de cota(cm)	Intervalo de tempo entre cotas (minutos)
Cota 100%-Cota 75%	22,5	-
Cota 75%-Cota 50%	22,5	-
Cota 50%- Cota 25%	22,5	-
Cota 25%-Cota 0%	22,5	-
total	90,0	-

Fonte: Autor (2026).

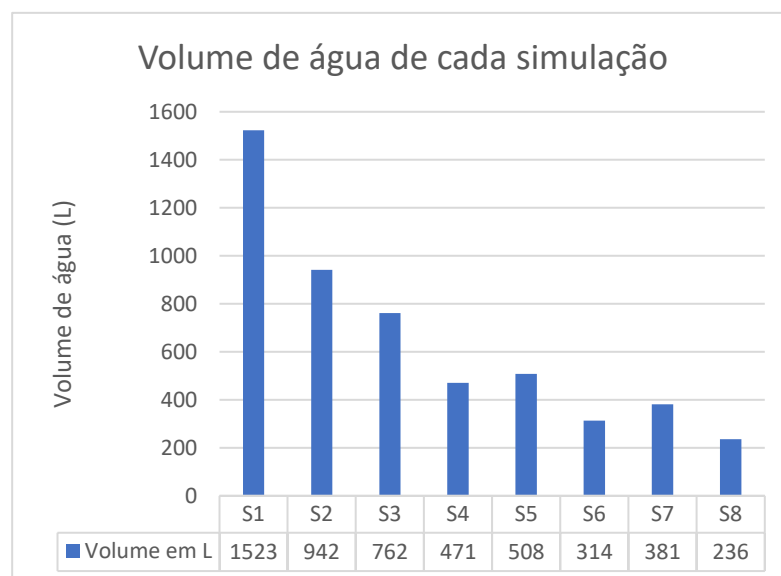
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação do desempenho do jardim de chuva para cada simulação de chuva dimensionada

O desempenho geral das simulações S1 a S8 foi avaliado quanto à capacidade de armazenamento do jardim de chuva, considerando diferentes cenários de solicitação hidráulica definidos a partir das condições pluviométricas da região, com base em tempos de retorno de 5 anos e durações de precipitação de 5 e 10 minutos. Observa-se que o sistema apresentou comportamento satisfatório em todos os casos analisados, sendo capaz de suportar integralmente os volumes gerados, sem ocorrência de extravasamento. Ainda assim, verificaram-se diferenças no nível de solicitação entre as simulações, indicando que determinados cenários promoveram maior aproximação da condição limite do sistema.

O gráfico 2 apresenta o volume de água associado a cada uma das simulações, permitindo uma visualização comparativa entre os cenários analisados. A partir dessa representação, identificam-se variações significativas na magnitude dos volumes aplicados, refletindo diretamente a intensidade das condições de chuva simuladas. Embora todos os cenários tenham sido suportados pelo sistema, essas diferenças indicam distintos níveis de esforço hidráulico, evidenciando que simulações com maiores volumes tendem a impor maior solicitação ao jardim de chuva em comparação àquelas com menores volumes.

Gráfico 2: volume de água inserido no jardim em cada simulação.

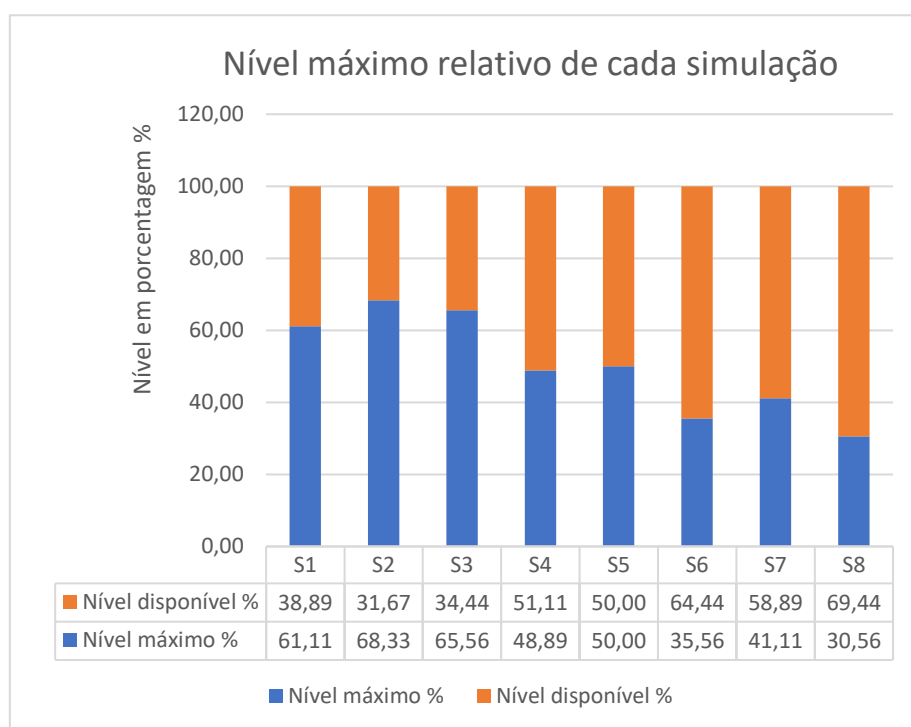


Fonte: Autor (2026).

A análise do desempenho hidráulico das simulações S1 a S8 considerou o nível máximo atingido no interior do jardim de chuva, expresso em termos percentuais em relação à altura útil total do sistema (0,90 m). Verifica-se que, em todas as simulações, o nível alcançado permaneceu abaixo da capacidade máxima, indicando que o sistema manteve uma parcela de volume disponível mesmo sob diferentes condições de solicitação. Essa variação nos níveis atingidos evidencia diferenças no comportamento hidráulico entre os cenários analisados, embora sem comprometer a capacidade de armazenamento do dispositivo.

Destaca-se que, embora a simulação S1 tenha sido associada a um maior volume de entrada, a simulação S2 atingiu um nível máximo superior. Ressalta-se que a simulação S1 correspondeu ao primeiro ensaio realizado, caracterizando o primeiro contato do solo do jardim com a água, condição na qual o meio apresentava maior capacidade de infiltração. Já na simulação S2, executada posteriormente, observa-se um aumento no nível máximo atingido, indicando que o solo ainda não havia recuperado completamente sua capacidade de infiltração após o ensaio anterior, resultando em maior acúmulo de água no sistema. Essa relação entre o nível máximo atingido e o nível ainda disponível pode ser observada no gráfico 3, que permite uma análise comparativa do comportamento hidráulico entre as simulações.

Gráfico 3: nível máximo e disponível para cada simulação no jardim.



Fonte: Autor (2026).

Situação semelhante é observada na simulação S3, que também apresentou nível máximo superior ao verificado em S1, mesmo estando associada a um volume aproximadamente 50% menor em relação à S1. Infere-se que houve uma continuidade na redução da capacidade de infiltração do solo ao longo das simulações, possivelmente associada à umidade residual ainda presente no meio. Em relação às simulações S4 a S8, observa-se uma variação nos níveis máximos atingidos, com tendência geral de redução quando comparadas aos cenários mais críticos, indicando menor solicitação hidráulica do sistema. Ainda assim, essas simulações mantiveram comportamento coerente com a capacidade de armazenamento do jardim de chuva, sem atingir a condição limite, reforçando a eficiência do sistema sob diferentes condições de entrada.

De forma complementar, o comportamento observado ao longo das simulações pode ser associado a condições análogas a eventos de chuvas consecutivas, nos quais o solo tende a apresentar redução progressiva da capacidade de infiltração devido ao aumento da umidade antecedente. Estudos recentes indicam que o aumento da umidade inicial do solo reduz significativamente a capacidade de infiltração e favorece o acúmulo superficial de água, intensificando a resposta hidráulica do sistema (Meissl *et al.*, 2023). Nesse contexto, observa-se que o desempenho do sistema não depende apenas do volume aplicado, mas também do histórico de umidade do solo, o que contribui para explicar os maiores níveis atingidos em simulações subsequentes.

5.2 Análise do tempo de infiltração nas simulações de chuva

A análise do comportamento de infiltração do sistema foi realizada a partir do nível máximo atingido em cada simulação, considerando o tempo necessário para o escoamento e infiltração da água até o completo esvaziamento do jardim de chuva. Essa abordagem permitiu avaliar o desempenho do sistema sob condições de maior solicitação hidráulica, representadas pelo pico de armazenamento. A partir dessa análise, foi possível observar a dinâmica de redução do nível de água ao longo do tempo, evidenciando variações na taxa de infiltração durante o processo de esvaziamento. Em determinados cenários, o escoamento ocorreu de forma mais rápida, enquanto em outros apresentou comportamento mais gradual, refletindo a influência das condições do solo e do volume inicialmente armazenado no desempenho hidráulico do sistema.

5.2.1 Análise da simulação S1

A tabela 9 apresenta o comportamento do escoamento a partir do nível máximo atingido na simulação S1, referente ao cenário com duração de chuva de 10 minutos, associado a um jardim de chuva correspondente a 5% da área de contribuição. O ensaio foi caracterizado por um volume aplicado de 1523 litros. Observa-se que a maior velocidade de infiltração ocorreu no trecho inicial de redução do nível, entre aproximadamente 61,6% e 50%, em um curto intervalo de tempo. À medida que o nível de água reduz, verifica-se um aumento no tempo necessário para atingir as cotas subsequentes, acompanhado da diminuição da velocidade de infiltração, indicando redução gradual da capacidade de absorção do solo ao longo do escoamento.

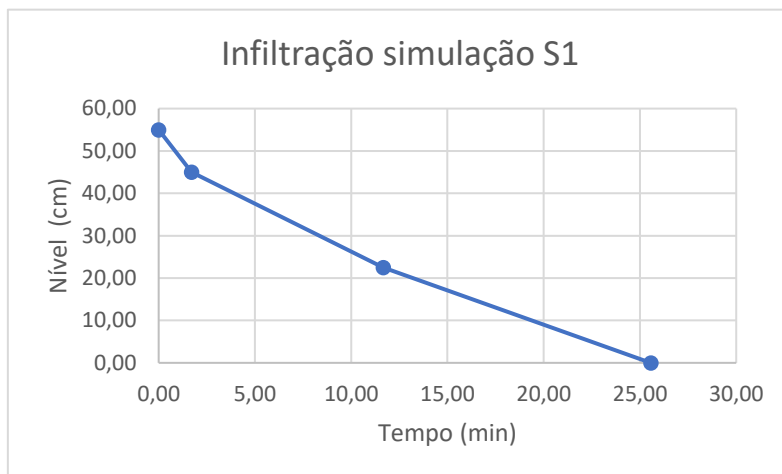
Tabela 9: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota.

Cota por intervalo	variação de tempo (min)	variação de cota (cm)	velocidade de infiltração (mm/h)
Cota 100%-Cota 75%	-	-	-
Cota 61,6%-Cota 50%	1,71	10,44	3508,77
Cota 50%- Cota 25%	9,95	22,50	1356,78
Cota 25%-Cota 0%	13,90	22,50	971,22

Fonte: Autor (2026).

A variação do nível de água ao longo do tempo para a simulação S1 evidencia a liberação progressiva de volume no interior do sistema, conforme apresentado no gráfico 4. Nota-se que, em aproximadamente 10 minutos, o nível de água já havia reduzido de forma significativa, atingindo valores próximos à metade da altura inicial. Com o avanço do tempo, o processo de infiltração continua de forma mais lenta, sendo que, por volta de 25 minutos, o sistema já apresentava nível próximo de zero, indicando o esvaziamento praticamente completo do jardim de chuva.

Gráfico 4: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo.



Fonte: Autor (2026).

5.2.2 Análise da simulação S2

O comportamento do escoamento a partir do nível máximo na simulação S2 pode ser observado na tabela 10, referente ao cenário com duração de chuva de 5 minutos e volume aplicado de 942 litros. Nota-se que os intervalos de tempo necessários para a redução das cotas são superiores aos observados no ensaio anterior, refletindo diretamente na diminuição das velocidades de infiltração entre os níveis analisados. Essa redução é evidenciada ao longo de todo o processo, indicando que, mesmo com menor volume aplicado, o sistema apresentou menor taxa de infiltração, possivelmente associada às condições do solo no momento do ensaio.

Tabela 10: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota.

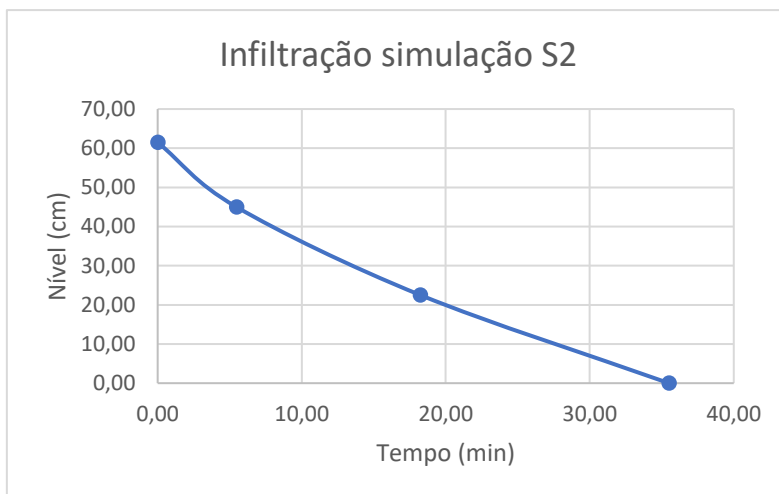
Cota por intervalo	variação de tempo (min)	variação de cota (cm)	velocidade de infiltração (mm/h)
Cota 100%-Cota 75%	-	-	-
Cota 68,3%-Cota 50%	5,47	16,50	1809,87
Cota 50%- Cota 25%	12,77	22,50	1057,17
Cota 25%-Cota 0%	17,26	22,50	782,16

Fonte: Autor (2026).

A liberação do nível de água ao longo do tempo evidencia um comportamento mais gradual na simulação S2, conforme ilustrado no gráfico 5. Observa-se que, mesmo com um volume de água inferior ao ensaio anterior, o sistema demandou aproximadamente 17 a 18 minutos para reduzir cerca de metade do nível máximo atingido, indicando uma taxa de

infiltração mais lenta. Após esse intervalo, o esvaziamento continua de forma progressiva até atingir níveis próximos de zero, porém em um tempo total mais elevado, evidenciando a redução da taxa de infiltração ao longo do processo.

Gráfico 5: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo.



Fonte: Autor (2026).

5.2.3 Análise da simulação S3

Na simulação S3, correspondente à duração de chuva de 10 minutos e a uma área de jardim equivalente a 10% da área de contribuição, foi aplicado um volume de 762 litros. Observa-se, por meio da tabela 11, o comportamento do escoamento a partir do nível máximo, evidenciando a variação do tempo e da velocidade de infiltração ao longo das cotas analisadas. Nota-se que a redução do nível ocorre de forma progressiva, com maiores velocidades nos trechos iniciais e diminuição ao longo do tempo, comportamento semelhante ao observado nos ensaios anteriores

Tabela 11: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota.

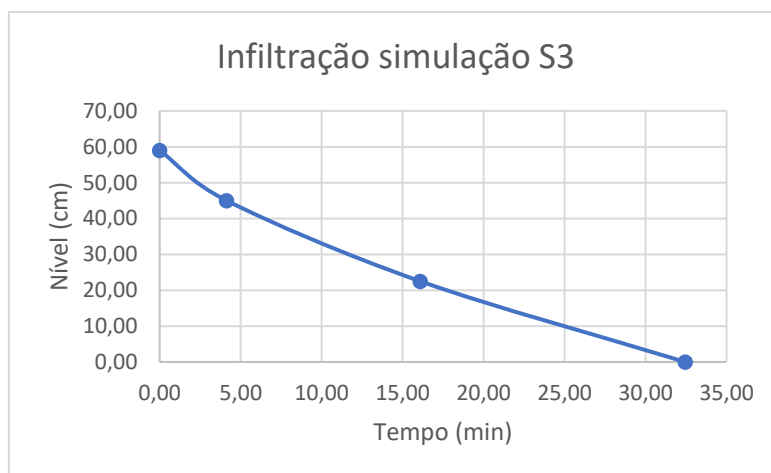
Cota por intervalo	variação de tempo (min)	variação de cota (cm)	velocidade de infiltração (mm/h)
Cota 100%-Cota 75%	-	-	-
Cota 65,55%-Cota 50%	4,13	14,00	2033,90
Cota 50%- Cota 25%	11,96	22,50	1128,76
Cota 25%-Cota 0%	16,36	22,50	825,18

Fonte: Autor (2026).

A evolução do nível de água ao longo do tempo na simulação S3 evidencia um escoamento progressivo, no qual a liberação de volume ocorre de forma contínua até o esvaziamento completo do sistema, como apresentado no gráfico 6. Nota-se que, em aproximadamente 15 a 16 minutos, o nível já havia sido reduzido para valores próximos à metade da altura inicial, indicando uma infiltração mais gradual ao longo do processo.

Em comparação ao ensaio S1, observa-se que, mesmo com um volume praticamente equivalente à metade, o tempo necessário para a redução do nível não apresenta diminuição proporcional, evidenciando a influência das condições do solo no comportamento de infiltração. Com o avanço do tempo, a redução do nível ocorre de forma menos acentuada, sendo que, por volta de 30 minutos, o sistema já se encontrava praticamente esvaziado.

Gráfico 6: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo.



Fonte: Autor (2026).

5.2.4 Análise da simulação S4

Na simulação S4, associada à duração de chuva de 5 minutos, área de jardim equivalente a 10% e volume aplicado de 471 litros, observa-se, conforme a tabela 12, que o nível máximo não atingiu a cota de 50%, permanecendo abaixo desse limite ao longo do processo. A partir da cota registrada, o escoamento ocorre em intervalos mais espaçados, com destaque para a redução da velocidade de infiltração nas cotas inferiores. Nota-se que, na faixa entre 25% e 0%, a velocidade de infiltração atinge 714,29 mm/h, valor inferior ao observado nos intervalos anteriores, indicando que, mesmo com menor volume acumulado, o escoamento final ocorre de forma mais lenta, evidenciando a redução da taxa de infiltração nesse trecho.

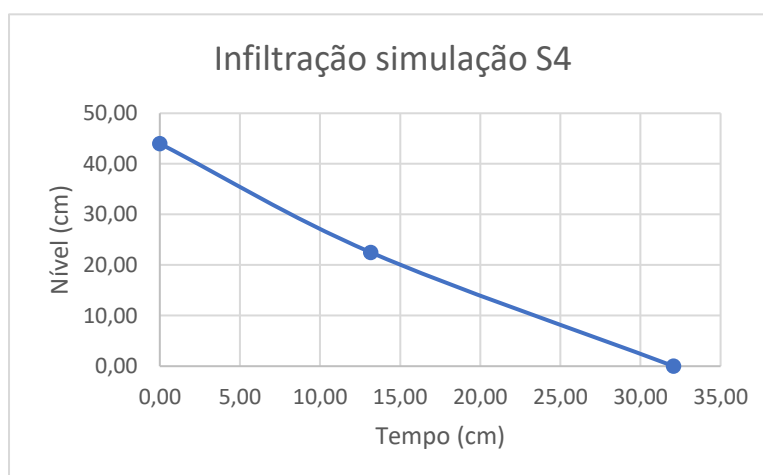
Tabela 12: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota.

Cota por intervalo	variação de tempo (min)	variação de cota (cm)	velocidade de infiltração (mm/h)
Cota 100%-Cota 75%	-	-	-
Cota 75%-Cota 50%	-	-	-
Cota 48,8%- Cota 25%	13,17	21,50	979,50
Cota 25%-Cota 0%	18,90	22,50	714,29

Fonte: Autor (2026).

A variação do nível de água ao longo do tempo na simulação S4 apresenta um comportamento mais uniforme, conforme indicado no gráfico 7. Observa-se que o sistema demandou aproximadamente 12 a 13 minutos para reduzir cerca de metade do nível máximo atingido, indicando um escoamento mais distribuído ao longo do tempo. Além disso, nota-se uma maior linearidade na curva de redução do nível, especialmente quando comparada aos ensaios anteriores, o que sugere uma taxa de infiltração mais constante nesse intervalo. Esse comportamento evidencia uma menor variação na velocidade de infiltração ao longo do processo, resultando em uma liberação mais regular do volume armazenado.

Gráfico 7: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo.



Fonte: Autor (2026).

5.2.5 Análise da simulação S5

Na simulação S5, associada à duração de chuva de 10 minutos e a uma área de jardim correspondente a 15% da área de contribuição, com volume aplicado de 508 litros, observa-se que o comportamento do escoamento ocorre a partir da faixa de 50% do nível máximo, conforme indicado na tabela 13. Nota-se que o nível não atingiu cotas superiores, concentrando a análise nos trechos entre 50% e 0%. Na faixa entre 25% e 0%, a velocidade de infiltração foi de aproximadamente 710,53 mm/h, valor muito próximo ao observado na simulação S4, que apresentou 714,29 mm/h no mesmo intervalo. Esse resultado é relevante, pois mesmo com volume aplicado superior ao da simulação anterior, a velocidade de infiltração final manteve-se praticamente equivalente.

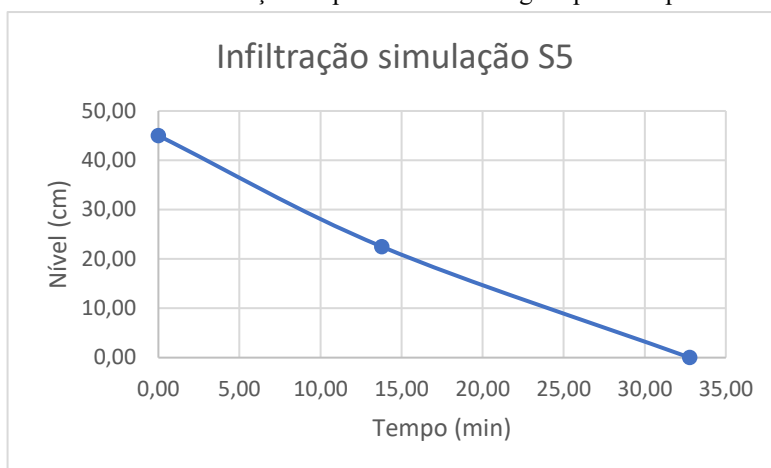
Tabela 13: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota.

Cota por intervalo	variação de tempo (min)	variação de cota (cm)	velocidade de infiltração (mm/h)
Cota 100%-Cota 75%	-	-	-
Cota 75%-Cota 50%	-	-	-
Cota 50%- Cota 25%	13,78	22,50	979,68
Cota 25%-Cota 0%	19,00	22,50	710,53

Fonte: Autor (2026).

A redução do nível de água ao longo do tempo apresenta um comportamento contínuo na simulação S5, conforme pode ser observado no Gráfico X. Nota-se que o sistema demandou aproximadamente 13 a 14 minutos para reduzir cerca de metade do nível máximo atingido, indicando um escoamento distribuído ao longo do tempo. A partir desse ponto, a infiltração ocorre de forma progressiva até o esvaziamento completo, que se aproxima dos 33 minutos. A forma da curva sugere um comportamento relativamente uniforme, com variação pouco acentuada na taxa de infiltração ao longo do processo, o que está em concordância com a proximidade das velocidades observadas nas faixas analisadas.

Gráfico 8: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo.



Fonte: Autor (2026).

5.2.6 Análise da simulação S6

Na simulação S6, associada à duração de chuva de 5 minutos, área de jardim correspondente a 15% e volume aplicado de 314 litros, observa-se que o escoamento ocorre a partir de níveis mais baixos, conforme indicado na tabela 14. As velocidades de infiltração registradas nos intervalos analisados foram de aproximadamente 734,54 mm/h e 750,00 mm/h, resultando em uma média de aproximadamente 742,27 mm/h. Nota-se que esse valor médio se mantém muito próximo das velocidades individuais observadas, indicando baixa variação entre os trechos analisados e caracterizando um comportamento mais uniforme do processo de infiltração nesse ensaio.

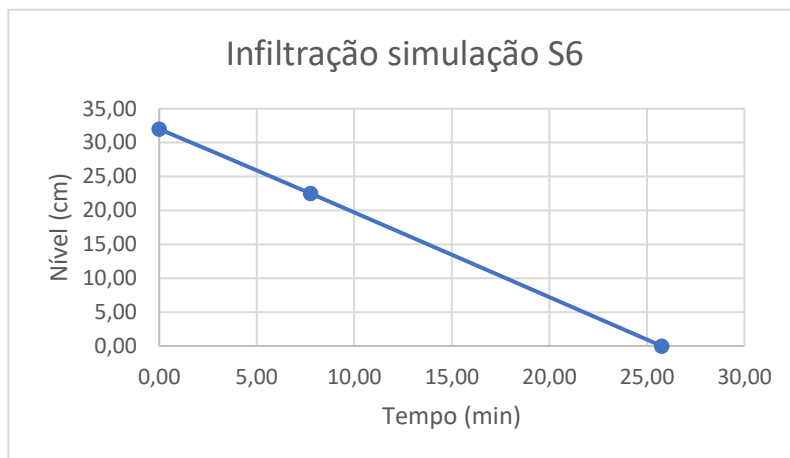
Tabela 14: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota.

Cota por intervalo	variação de tempo (min)	variação de cota (cm)	velocidade de infiltração (mm/h)
Cota 100%-Cota 75%	-	-	-
Cota 75%-Cota 50%	-	-	-
Cota 35,55%- Cota 25%	7,76	9,50	734,54
Cota 25%-Cota 0%	18,00	22,50	750,00

Fonte: Autor (2026).

Observa-se que o comportamento apresentado no gráfico 9 se assemelha ao verificado na simulação S1, com redução contínua do nível de água ao longo do tempo até o completo esvaziamento do sistema. Nota-se, nesse caso, a linearidade angular da reta, indicando uma taxa de variação praticamente constante ao longo do processo, com infiltração total ocorrendo em aproximadamente 25 minutos.

Gráfico 9: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo.



Fonte: Autor (2026).

5.2.7 Análise da simulação S7

Para a simulação S7, com duração de chuva de 10 minutos, área de jardim correspondente a 20% da área de contribuição e volume aplicado de 381 litros, verifica-se, conforme indicado na tabela 15, que o escoamento ocorre a partir de níveis intermediários, não atingindo cotas superiores. Observa-se que as velocidades de infiltração registradas foram de aproximadamente 822,31 mm/h e 713,15 mm/h nos intervalos analisados, apresentando valores próximos entre si. Em relação ao ensaio anterior, nota-se que a média das velocidades apresenta maior afastamento em relação aos valores individuais das faixas, indicando uma variação mais perceptível da taxa de infiltração ao longo da redução do nível de água.

Tabela 15: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota.

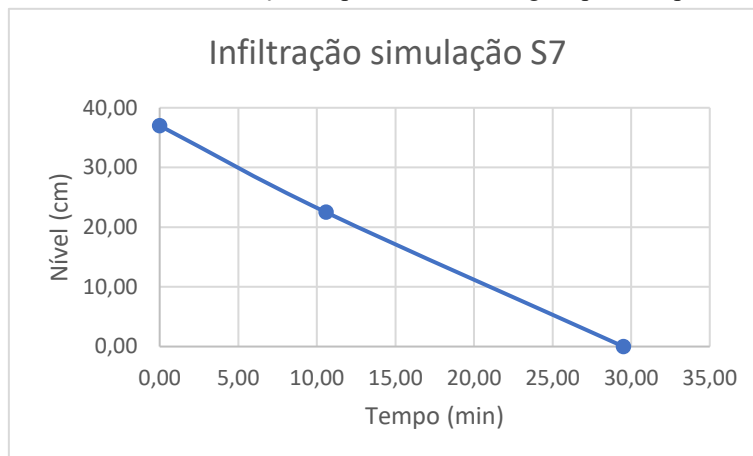
Cota por intervalo	variação de tempo (min)	variação de cota (cm)	velocidade de infiltração (mm/h)
Cota 100%-Cota 75%	-	-	-
Cota 75%-Cota 50%	-	-	-
Cota 41,11%- Cota 25%	10,58	14,50	822,31
Cota 25%-Cota 0%	18,93	22,50	713,15

Fonte: Autor (2026).

O comportamento temporal do escoamento na simulação S7, ilustrado no gráfico 10, evidencia a diminuição gradual do nível de água até o completo esvaziamento do sistema. Observa-se que, em torno de 10 a 11 minutos, já havia ocorrido uma redução significativa do nível inicial, com continuidade do processo até valores próximos de zero por volta de 30

minutos. A configuração da curva apresenta leve variação ao longo do tempo, indicando pequenas diferenças na taxa de infiltração, o que está em concordância com os valores observados nos intervalos analisados.

Gráfico 10: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo.



Fonte: Autor (2026).

5.2.8 Análise da simulação S8

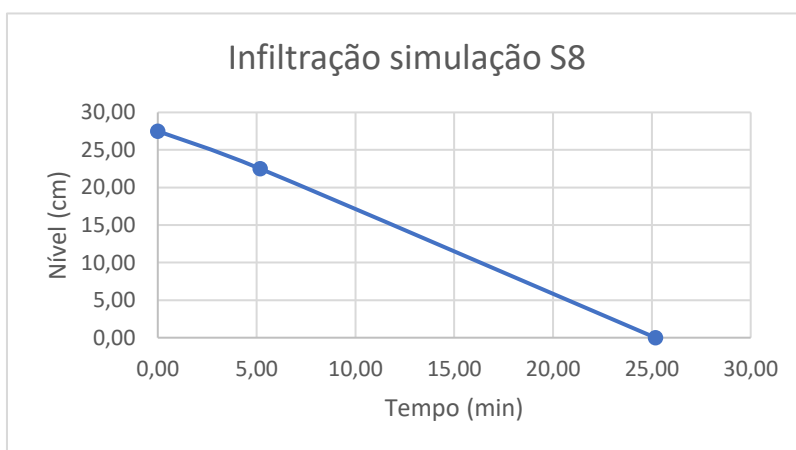
Na simulação S8, com duração de chuva de 5 minutos, área de jardim correspondente a 20% da área de contribuição e volume aplicado de 236 litros, observa-se, conforme a tabela 16, que o escoamento ocorre a partir de níveis mais baixos. As velocidades de infiltração foram de aproximadamente 579,15 mm/h e 675,00 mm/h, valores inferiores aos observados nos ensaios anteriores, indicando redução da taxa de infiltração ao longo das simulações. Conforme apresentado no gráfico 11, o esvaziamento ocorre de forma contínua até o nível zero, em aproximadamente 25 minutos. Destaca-se ainda que, até este ensaio, já haviam sido aplicados aproximadamente 4.901 litros no sistema, e, considerando o volume desta simulação, o total acumulado atinge cerca de 5.137 litros, o que contribui para o comportamento observado, em função das condições acumuladas de umidade do solo.

Tabela 16: variação da lâmina de água em decorrer do tempo para cada intervalo de cota.

Cota por intervalo	variação de tempo (min)	variação de cota (cm)	velocidade de infiltração (mm/h)
Cota 100%-Cota 75%	-	-	-
Cota 75%-Cota 50%	-	-	-
Cota 30,5%- Cota 25%	5,18	5,00	579,15
Cota 25%-Cota 0%	20,00	22,50	675,00

Fonte: Autor (2026).

Gráfico 11: infiltração do pico máximo atingido pelo tempo.



Fonte: Autor (2026).

5.3 Relação entre o ensaio de infiltrômetro de anel e o comportamento observado nas simulações

A análise da velocidade de infiltração obtida por meio do ensaio de infiltrômetro de anel evidenciou um comportamento típico de solos submetidos à infiltração contínua, com valores elevados no início do processo e posterior redução até a estabilização. Observou-se que a velocidade máxima inicial atingiu aproximadamente 216 mm/h, refletindo a elevada capacidade de infiltração do solo em condição inicial, possivelmente associada à menor umidade antecedente e maior sucção matricial. Com o avanço do ensaio, verificou-se a diminuição progressiva dessa velocidade até atingir um valor constante, sendo a velocidade de infiltração final estabilizada em torno de 120 mm/h.

Esses resultados podem ser observados na tabela 17, que apresenta a variação da velocidade de infiltração ao longo do tempo, evidenciando a redução gradual até a estabilização.

Destaca-se que, nos primeiros 80 minutos, as leituras foram realizadas em intervalos de aproximadamente 5 a 7 minutos, enquanto no período restante passaram a ser registradas a cada 10 minutos, permitindo um acompanhamento mais detalhado da fase inicial do ensaio e da estabilização posterior.

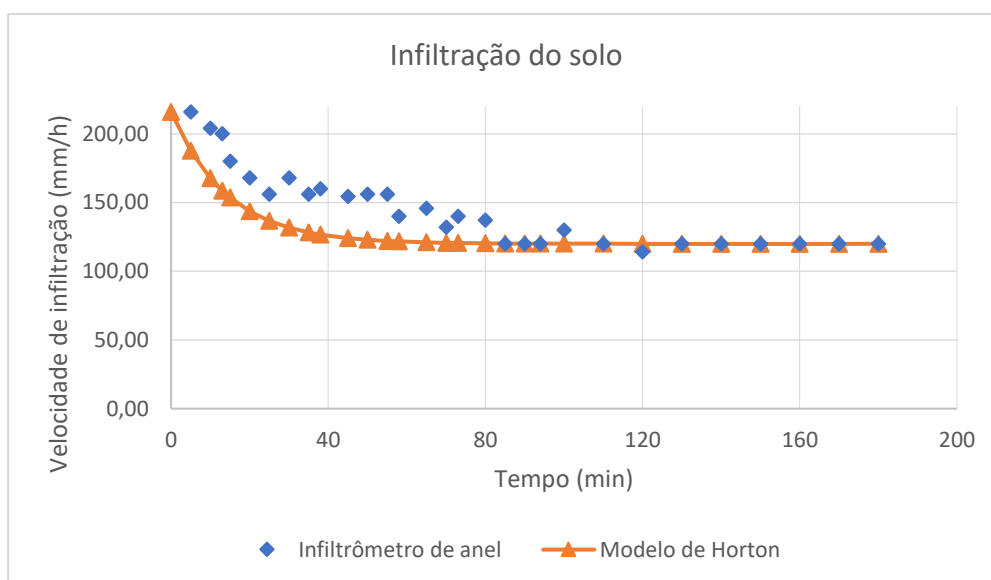
Tabela 17: resultado do ensaio de infiltrômetro de anel

Ensaio de Infiltração					
Hora	Intervalo (min)	Leitura (mm)	Diferença (mm)	Infiltração acumulada (mm)	Velocidade de Infiltração (Via) (mm/h)
10:50	0	100	0	0	0
10:55	5	118/100	18	18	216
11:00	5	117/100	17	35	204
11:03	3	110/100	10	45	200
11:05	2	106	6	51	180
11:10	5	120/100	14	65	168
11:15	5	113/100	13	78	156
11:20	5	114/100	14	92	168
11:25	5	113/100	13	105	156
11:28	3	108/100	8	113	160
11:35	7	118/100	18	131	154,3
11:40	5	113/100	13	144	156
11:45	5	113	13	157	156
11:48	3	120/100	7	164	140
11:55	7	117/100	17	181	145,7
12:00	5	111	11	192	132
12:03	3	118/100	7	199	140
12:10	7	116/100	16	215	137,1
12:15	5	110/100	10	225	120
12:20	5	110	10	235	120
12:24	4	118/100	8	243	120
12:30	6	113/100	13	256	130
12:40	10	120/100	20	276	120
12:50	10	119/100	19	295	114
13:00	10	120/100	20	315	120
13:10	10	120/100	20	335	120
13:20	10	120/100	20	355	120
13:30	10	120/100	20	375	120
13:40	10	120/100	20	395	120
13:50	10	120	20	415	120

Fonte: Autor (2026).

A variação da velocidade de infiltração ao longo do tempo, apresentada no gráfico 12, evidencia um comportamento típico descrito pelo modelo de Horton, com valores elevados no início do ensaio e redução progressiva até a estabilização. Observa-se que os dados obtidos por meio do infiltrômetro de anel acompanham de forma consistente a tendência da curva teórica, especialmente na fase de decréscimo da velocidade de infiltração. Nota-se que, após os primeiros minutos, a curva experimental tende a se aproximar da curva do modelo, convergindo para valores próximos à velocidade de infiltração final estabilizada, indicando boa representatividade do modelo de Horton na descrição do processo de infiltração do solo analisado.

Gráfico 12: velocidade de infiltração do solo no decorrer do tempo.



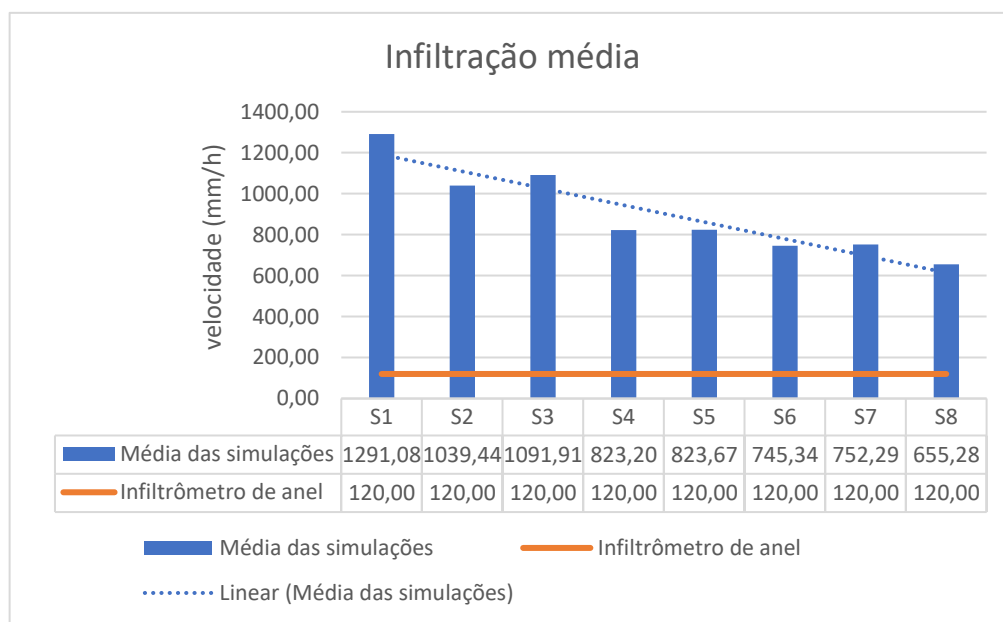
Fonte: Autor (2026).

Com base nos valores obtidos, observa-se que a velocidade de infiltração estabilizada em torno de 120 mm/h enquadra o solo analisado em uma faixa de elevada capacidade de infiltração. De acordo com Bernardo *et al.* (2019), solos com velocidade de infiltração básica superior a 30 mm/h são considerados de infiltração muito alta, o que confirma o comportamento observado no ensaio realizado. Dessa forma, os resultados indicam que o solo apresenta condições favoráveis à infiltração, sendo compatível com materiais que possuem maior proporção de macroporos e elevada capacidade de absorção de água.

A análise comparativa apresentada no gráfico 13 evidencia que as velocidades médias de infiltração obtidas nas simulações são consistentemente superiores à velocidade de infiltração estabilizada determinada pelo ensaio de infiltrômetro de anel, representada por um valor constante de aproximadamente 120 mm/h. Apesar dessa diferença, observa-se uma clara

tendência de convergência entre os resultados, com redução progressiva das velocidades médias ao longo das simulações, conforme indicado pela linha de tendência. Esse comportamento sugere que, embora o sistema apresente inicialmente uma resposta hidráulica mais intensa, há uma aproximação gradual às condições reais de infiltração do solo, refletindo a influência do aumento da umidade antecedente e da redução da capacidade de infiltração ao longo do tempo.

Gráfico 13: média da velocidade de infiltração para cada simulação e velocidade básica (vb)



Fonte: Autor (2026).

5.4 Relação entre os materiais: solo e volume útil disponível pelo jardim

A caracterização do solo por meio do ensaio de granulometria permitiu identificar a distribuição das partículas presentes na amostra, possibilitando a análise de sua textura. A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar a predominância das frações granulométricas, o que contribui para a compreensão do comportamento físico do solo, especialmente em relação à sua capacidade de infiltração e retenção de água. Esses dados constituem base importante para a interpretação dos resultados hidráulicos observados nos ensaios realizados.

5.4.1 Granulometria do solo

O resultado do ensaio de peneiramento grosso pode ser observado na tabela 18, na qual se verifica que a maior parte do material analisado não foi retida nas peneiras de maiores

aberturas, apresentando valores nulos até a peneira de 9,5 mm. Nota-se que apenas pequenas quantidades de material foram retidas nas peneiras de 4,8 mm e 2,0 mm, correspondendo a percentuais reduzidos do total da amostra. Esse comportamento indica baixa presença de partículas de maior dimensão, evidenciando que a fração predominante do solo é composta por materiais de granulometria mais fina.

Tabela 18: resultado do ensaio do peneiramento grosso.

Abertura da peneira (POL)	Peneiramento Grosso				
	Abertura da peneira (mm)	Massa do solo fino retido em cada peneira (g)	Percentual do solo retido em cada peneira (%)	Porcentagem Retida Acumulada (%)	Porcentagem do solo que passa na peneira (%)
n°2"	50	0	0	0	100
n°1 1/2"	38	0	0	0	100
n°1"	25	0	0	0	100
n°3/4"	19	0	0	0	100
n°3/8"	9,5	0	0	0	100
n°4	4,8	2,86	0,19	0,19	99,81
n°10	2,0	3,18	0,21	0,40	99,79
Total/fundo	-	1281,13	-	-	-

Fonte: Autor (2026).

Considerando a amostra analisada, verificou-se um teor de umidade de 14,6%, valor correspondente à média obtida a partir de duas cápsulas utilizadas no ensaio, o que influencia diretamente no comportamento das partículas finas durante a análise. O resultado do peneiramento fino pode ser observado na tabela 19, na qual se nota uma maior concentração de material nas peneiras de menores aberturas, com destaque para as frações retidas nas peneiras n°50, n°100 e n°200. Observa-se que a maior porcentagem de solo retido ocorre na peneira n°100, indicando predominância de partículas de menor granulometria. Esse comportamento evidencia que o solo apresenta significativa quantidade de frações finas, o que contribui para a compreensão de suas propriedades físicas e hidráulicas.

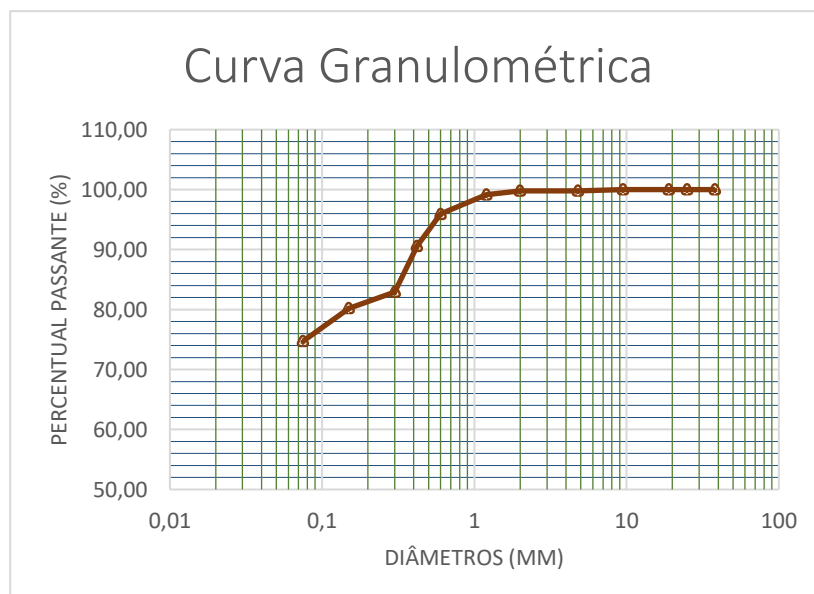
Tabela 19: resultado do ensaio do peneiramento fino.

Abertura da peneira (POL)	Peneiramento Fino				
	Abertura da peneira (mm)	Massa do solo fino retido em cada peneira (g)	Percentual do solo retido em cada peneira (%)	Porcentagem Retida Acumulada (%)	Porcentagem do solo que passa na peneira (%)
n°16	1,2	0,56	0,84	0,84	99,16
n°30	0,6	2,72	4,07	4,91	95,93
n°40	0,42	6,3	9,43	14,34	90,57
n°50	0,30	11,43	17,11	31,44	82,89
n°100	0,15	28,89	43,24	74,68	56,76
n°200	0,075	16,92	25,32	100,00	74,68
Total/fundo	-	66,82	100,00	-	-

Fonte: Autor (2026).

A distribuição granulométrica do solo pode ser observada no gráfico 14, que apresenta a curva granulométrica obtida a partir dos ensaios realizados. Nota-se que a maior variação ocorre na faixa de diâmetros compreendida entre aproximadamente 0,075 mm e 1 mm, indicando predominância de partículas de menor dimensão, com tendência de estabilização nas frações mais grossas. A análise dos resultados permite identificar um teor de areia de aproximadamente 66,47%, evidenciando a predominância dessa fração na composição do solo. Com base nesses dados e na interpretação pelo triângulo textural, o solo pode ser classificado como arenoso, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), o que está diretamente relacionado à sua elevada capacidade de infiltração observada nos ensaios hidráulicos realizados.

Gráfico 14: curva granulométrica do solo presente.



Fonte: Autor (2026).

5.4.2 Volume útil do jardim pela consideração de porosidade dos materiais granulares

A estimativa do volume útil do jardim de chuva, considerando a condição mais restritiva de armazenamento, foi realizada a partir dos valores de porosidade mínima dos materiais granulares utilizados. Conforme apresentado na tabela 20, observa-se que a redução da porosidade impacta diretamente na diminuição do volume de vazios disponível, com destaque para o seixo rolado, que, apesar de possuir maior volume total, apresenta menor contribuição relativa em função da redução da porosidade. A partir dessa condição, obteve-se um volume útil total de aproximadamente 658,44 litros, evidenciando o limite inferior da capacidade de armazenamento do sistema.

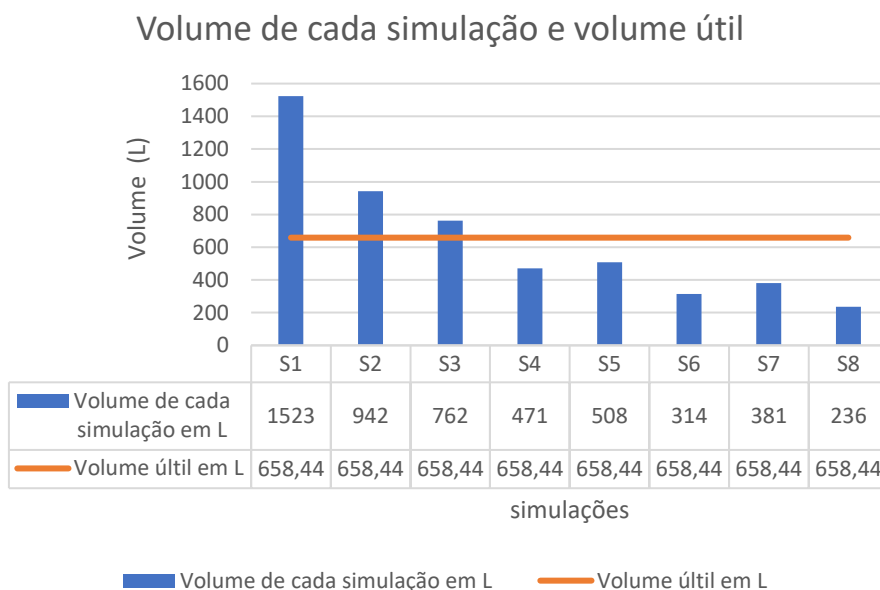
Tabela 20: volume útil considerado de cada camada do jardim pela porosidade mínima.

Considerando a porosidade mínima			
Material granular	e.min %	Volume total (L)	Volume útil (L)
Seixo roliço	25,93	2250	583,43
Areia	16,67	450	75,02
Total	-	2700	658,44

Fonte: Autor (2026).

A relação entre os volumes gerados nas simulações e o volume útil estimado a partir do índice de vazios mínimo pode ser observada no gráfico 15. Verifica-se que as simulações S1, S2 e S3 apresentaram volumes superiores à capacidade útil estimada de aproximadamente 658,44 litros, enquanto as demais simulações permaneceram abaixo desse limite. Observa-se ainda que, a partir da S4, os volumes simulados passam a apresentar valores inferiores à capacidade mínima de armazenamento do sistema, indicando maior compatibilidade entre o volume gerado e o espaço de vazios disponível no jardim de chuva sob a condição mais restritiva de porosidade.

Gráfico 15: volume útil considerando a porosidade mínima.



Fonte: Autor (2026).

A estimativa do volume útil do jardim de chuva, considerando a condição mais favorável de armazenamento, foi realizada a partir dos valores de porosidade máxima dos materiais granulares utilizados. Conforme apresentado na tabela 21, observa-se que o seixo rolado apresenta maior contribuição para o volume de vazios disponível em função do seu maior volume total no sistema, enquanto a areia contribui de forma complementar. A partir dessa combinação, obteve-se um volume útil total de aproximadamente 1291,14 litros, representando a capacidade máxima estimada de armazenamento do jardim de chuva sob condições ideais de porosidade dos materiais.

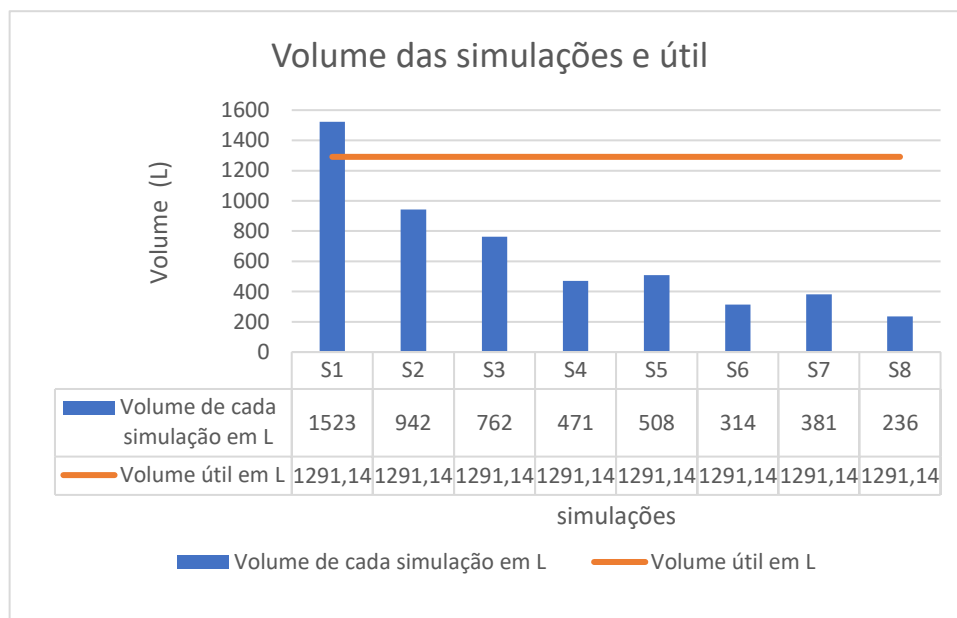
Tabela 21: volume útil considerado de cada camada do jardim pela porosidade máxima.

Considerando a porosidade máxima			
Material granular	e.máx %	Volume total	Volume útil
Seixo rolado	47,64	2250	1071,9
Areia	48,72	450	219,24
Total		2700	1291,14

Fonte: Autor (2026).

Observa-se, no gráfico 16, a relação entre os volumes aplicados nas simulações e a capacidade útil estimada do jardim de chuva sob a condição de porosidade máxima dos materiais granulares. Nota-se que o volume calculado de aproximadamente 1291,14 litros permaneceu acima dos valores obtidos em praticamente todas as simulações, com exceção da S1, que ultrapassou esse limite. As demais condições simuladas apresentaram volumes inferiores à capacidade útil estimada, indicando que, nessa condição de maior porosidade, o sistema tende a disponibilizar espaço suficiente para o armazenamento da água infiltrada.

Gráfico 16: volume útil considerando a porosidade máxima.



Fonte: Autor (2026).

A análise dos resultados evidencia a influência da infiltração no comportamento hidráulico do jardim de chuva, principalmente nos cenários de maior volume de água. Observa-se que, mesmo na condição mais favorável de porosidade dos materiais granulares, a simulação S1, associada ao tempo de retorno de 5 anos e duração de chuva de 10 minutos, apresentou volume superior à capacidade útil estimada apenas pelo índice de vazios. Ainda assim, os níveis máximos observados nas simulações permaneceram abaixo de 70% da altura útil do sistema, indicando que a infiltração contribuiu para a redução do acúmulo de água no interior do jardim ao longo do escoamento. Esse comportamento pode ser observado tanto nas condições de porosidade máxima quanto mínima dos materiais analisados.

6.CONCLUSÃO

Conclui-se que o jardim de chuva apresentou desempenho satisfatório quanto à capacidade de retenção temporária e infiltração da água durante as simulações realizadas. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema possui potencial para auxiliar na mitigação de alagamentos e enxurradas quando aplicado corretamente e devidamente dimensionado para as condições de contribuição hidráulica da área.

Observou-se que as características granulométricas dos materiais utilizados influenciaram diretamente o comportamento hidráulico do sistema, principalmente em relação à capacidade de armazenamento da água nos vazios existentes entre os agregados. A utilização das camadas de areia e seixo rolado favoreceu tanto a infiltração quanto o amortecimento das vazões simuladas, contribuindo para o funcionamento hidráulico do jardim de chuva.

Apesar de o solo local apresentar características promissoras para os resultados obtidos, por se tratar de um solo arenoso e com tendência favorável à infiltração, observou-se que a eficiência do jardim de chuva não depende exclusivamente dessa condição. Mesmo em solos argilosos ou com menor velocidade de infiltração, o sistema pode apresentar bom desempenho, desde que seja devidamente dimensionado, pois os vazios existentes entre os agregados granulares garantem um volume de reservatório capaz de armazenar temporariamente a água precipitada e retardar sua liberação no solo.

Os ensaios realizados também permitiram compreender a influência das propriedades do solo na velocidade de infiltração e no comportamento da água ao longo das camadas do jardim de chuva. Verificou-se ainda que, em eventos consecutivos de precipitação, o sistema tende a perder parte de sua eficiência devido à redução gradual da capacidade de infiltração e armazenamento imediato. Entretanto, mesmo sob essas condições, o jardim de chuva apresentou comportamento satisfatório e funcionamento compatível com as condições previstas em dimensionamento.

Outro aspecto relevante está relacionado à viabilidade construtiva da técnica, considerando a utilização de materiais acessíveis, execução relativamente simples e possibilidade de aplicação em qualquer tipo de área de contribuição. Dessa forma, os jardins de chuva demonstram potencial como alternativa complementar aos sistemas convencionais de drenagem urbana, principalmente quando corretamente dimensionados para atender às condições hidráulicas da área de contribuição.

6.1 Estudos futuros

Nesse contexto, tendo o jardim de chuva como uma solução para o desenvolvimento da drenagem sustentável, propõe-se para estudos futuros as linhas temáticas pontuadas a seguir:

- Avaliar a influência da implantação de jardins de chuva sobre os efeitos de capilaridade em edificações próximas, analisando possíveis alterações na umidade do solo, deslocamento da água infiltrada e impactos nas fundações e elementos construtivos das residências.
- Desenvolver estudos voltados à análise econômica da implantação de jardins de chuva, considerando custos de execução, manutenção, durabilidade dos materiais e comparação financeira com sistemas convencionais de drenagem urbana.
- Analisar, em escala urbana, a contribuição dos jardins de chuva na mitigação de alagamentos, considerando redução do volume de escoamento superficial, amortecimento de vazões de pico e impacto hidráulico em sistemas de micro e macrodrenagem.
- Investigar o comportamento hidráulico de jardins de chuva submetidos a diferentes tipos de solo e condições climáticas, avaliando a influência da permeabilidade, granulometria e intensidade das precipitações no desempenho do sistema.
- Estudar a eficiência dos jardins de chuva na melhoria da qualidade das águas pluviais urbanas, analisando a retenção de sedimentos, resíduos sólidos e poluentes transportados pelo escoamento superficial.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos — Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo — Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ALMEIDA, Gustavo Henrique Tonelli Dutra de; MASINI, Letícia Santos; MALTA, Luiz Ricardo Santos. **Hidrologia e drenagem**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. 200 p.

ARORA, K. R. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 8. ed. Delhi: Standard Publishers Distributors, 2020.

BAPTISTA, Márcio; NASCIMENTO, Nilo; BARRAUD, Sylvie. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2015.

BARROS, Edenia Nascimento et al. Jardim de chuva para mitigação dos alagamentos urbanos: análise de um projeto piloto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 2, 2024.

BERNARDO, Salassier; SOARES, Antônio Alves; MANTOVANI, Everardo Chartuni. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2019.

BOLLMANN, H. A. Impactos da urbanização sobre cheias urbanas. In: BRITO, E. G.; SILVA, M. V. C. da; CRISPIM, A. B. **Geografia: climatologia**. [S.l.]: [s.n.], 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Brasília, DF: ANA, [2025]. Disponível em: ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Acesso em: 16 maio 2026.

BRITO, E. G.; SILVA, M. V. C. da; CRISPIM, A. B. **Geografia: climatologia**. [S.l.]: [s.n.], 2019.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CHAVES, Maria Thereza Rocha et al. Aprendizados, desafios e soluções na construção, monitoramento e manutenção de sistemas de biorretenção: um estudo experimental. In: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 15., 2024, Ceará. **Anais [...]**. Ceará: ENAU, 2024.

COSTA, Wanderson Suzart da et al. Mudanças climáticas, carências na infraestrutura urbana e doenças de veiculação hídrica: uma análise de escopo da leptospirose. **Revista PPC – Políticas Públicas e Cidades**, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 1-37, 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FERNANDES, Manuel de M. **Mecânica dos Fluidos**. Porto Alegre: Oficina de Textos, 2018.

FERNANDES, Manuel de M. **Mecânica dos Solos: conceitos e princípios fundamentais**. v. 1. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. E-book. ISBN 9788579752391. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579752391/>. Acesso em: 23 abr. 2026.

FREITAS, Carlos Machado de; XIMENES, Elisa Francioli. Enchentes e saúde pública – uma questão na literatura científica recente das causas, consequências e respostas para prevenção e mitigação. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1601-1615, 2012.

GOLDENFUM, Joel A. **Gerenciamento da drenagem urbana**. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

GONDIM, Fabio Ribeiro; OHNUMA JÚNIOR, Alfredo Akira; OBRACZKA, Marcelo. Jardins de chuva: atualizações sobre a técnica a partir de uma revisão sistemática. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 9, n. 5, p. 201-215, 2023.

JEON, Minsu et al. Stormwater runoff treatment using rain gardens: performance monitoring and development of water quality prediction models based on deep learning. **Water**, v. 13, n. 17, 2021.

KASPRZYK, Magda et al. Technical solutions and benefits of introducing rain gardens: a Gdansk case study. **Science of the Total Environment**, 2022.

LOPES, Lincoln de Souza; MARQUES, Rosângela Francisca de Paula Vitor; SILVA, Felipe Bernardes. Jardins de chuva: uma revisão de literatura. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 18., 2021, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Poços de Caldas: CNMA, 2021.

MACEDO et al. Técnicas de melhoramento de infiltração em sistemas de biorretenção. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS E V SIMPÓSIO DE REVITALIZAÇÃO DE RIOS URBANOS, 2017.

MEISSL, Gerhard et al. Influence of antecedent soil moisture content on runoff response. **Heliyon**, v. 9, n. 6, 2023.

MIGUEZ, Marcelo Gomes. **Drenagem urbana**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

NOLETO, Railana Gomes; RODRIGUES, Camila Ribeiro. Análise crítica das técnicas compensatórias de drenagem urbana: uma revisão bibliográfica. **Revista Científica Semana Acadêmica**, Fortaleza, v. 12, n. 242, 2024.

OLIVEIRA, Ítalo José Lira dos Santos et al. Benefícios da implantação dos jardins de chuva no meio urbano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 11., 2020, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: IBEAS, 2020.

RINCHUMPHU, D. et al. Economia e custo-efetividade de jardins de chuva para projetos urbanos resistentes a inundações. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v. 9, n. 4, p. 1-12, 2024.

SILVA, Marianne Rillary Vieira da; LIMA, Auryane Barros Pontes; SANTOS, Erika Ribeiro dos; GONZAGA, Giordano Bruno Medeiros. Jardins de chuva: técnicas compensatórias para sistemas de drenagem. **Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas**, Alagoas, v. 5, n. 1, p. 13-20, nov. 2018.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 5. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2020.

VILARINHO, Briane de Souza et al. Análise técnica da ineficiência da microdrenagem na rua São Luís, delimitada em suas extremidades nas ruas Rio Grande do Norte e Bonaire, centro da cidade de Açailândia – Maranhão. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 2, e13113242445, 2024.