



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR  
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

ALDA VIANA DUARTE

**PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM TELHADOS VERDES E PAVIMENTOS  
PERMEÁVEIS PARA O MANEJO DE ÁGUAS URBANAS**

Recife

2025

ALDA VIANA DUARTE

**PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM TELHADOS VERDES E PAVIMENTOS  
PERMEÁVEIS PARA O MANEJO DE ÁGUAS URBANAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestra em Tecnologias Energéticas e Nucleares.

Área de concentração: Aplicações de radioisótopos na agricultura e meio ambiente.

Orientador: Dr. Artur Paiva Coutinho

Coorientador: Dr. Severino Martins dos Santos Neto

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Duarte, Alda Viana.

Processos hidrológicos em telhados verdes e pavimentos permeáveis para o manejo de águas urbanas / Alda Viana Duarte. - Recife, 2025.

88f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2025.

Orientação: Artur Paiva Coutinho.

Coorientação: Severino Martins dos Santos Neto.

Inclui referências.

1. Técnicas compensatórias; 2. Drenagem urbana; 3. Balanço hídrico; 4. Alagamento; 5. Projeto piloto. I. Coutinho, Artur Paiva. II. Santos Neto, Severino Martins dos. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**ALDA VIANA DUARTE**

**PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM TELHADOS VERDES E PAVIMENTOS  
PERMEÁVEIS PARA O MANEJO DE ÁGUAS URBANAS**

A Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociência - CTG, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de Concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio-Ambiente.

Aprovado em: 26/06/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Dr. José Miguel Reichert (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Dr. José Romualdo de Sousa Lima (Examinador Externo)  
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE)

*Dedico este trabalho ao Verbo, que se fez carne, e é Palavra a me inspirar. Sem Ele, não haveria eu.*

*Dedico também a meu querido irmão Ednaldo (In memoriam).*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde, força e sabedoria para chegar até aqui. Agradeço imensamente à minha família, em especial aos meus pais, Arnaldo e Tica, e aos meus irmãos, Claudia, Lena e Ednaldo, pelo apoio incondicional e amor em todos os momentos dessa jornada.

Agradeço aos meus amigos, em especial a Luan que contribuiu imensamente, inclusive na construção e montagem dos módulos, a Sileide e Cicera, por serem sempre uma fonte de motivação e alegria. Também agradeço pelo companheirismo dos amigos de departamento Lucas, Camila, Sheylane e Ialy, e aos colegas de iniciação científica pela colaboração ao longo desses meses.

Não poderia deixar de agradecer ao meu orientador, professor Artur Coutinho, cuja orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, e ao meu coorientador, professor Severino Martins, por toda a orientação e dedicação ao meu trabalho. Aos queridos professores Antonino, Tassia, Rômulo, Manuela e Edvaldo, agradeço pelo conhecimento compartilhado e pelo suporte acadêmico.

Agradeço aos profissionais que trabalharam na construção e instalação, Marcelo, Rinaldo e Edson, pelo empenho.

Por fim, agradeço à UFPE, ao DEN, à CAPES e à FACEPE pelo apoio institucional e financeiro que possibilitaram a realização deste trabalho, em especial pela bolsa CAPES número do processo 88887.806408/2023-00.

## RESUMO

O crescimento urbano desordenado e a consequente impermeabilização do solo nas grandes cidades têm agravado problemas de drenagem urbana, como inundações, alagamentos e redução da infiltração, exigindo a adoção de soluções sustentáveis para o manejo das águas pluviais. Esse estudo teve como objetivo avaliar o desempenho hidrológico em diferentes técnicas compensatórias de drenagem urbana, telhados verdes (com as espécies *Dianella tasmanica*, *Axonopus comprissus* e *Alternanthera dentata*) e pavimentos permeáveis (blocos vazados, intertravado e concreto poroso), em escala piloto, visando estudar a mitigação desses impactos. A metodologia incluiu a construção de 7 módulos experimentais em Recife-PE monitorados por 6 meses (maio a outubro de 2024), com coleta de dados de precipitação, umidade do solo, escoamento superficial e drenagem interna. Os dados obtidos permitiram a realização de um balanço hídrico hidrológico, considerando entradas e saídas de água em cada superfície. Os resultados demonstraram que os telhados verdes retiveram entre 57% e 73% do volume precipitado, com destaque para o telhado com *Dianella tasmanica* (99% de infiltração em eventos médios moderados). Os pavimentos permeáveis apresentaram desempenho variável: o cobograma (blocos vazados com grama) reteve 77% da água, enquanto o intertravado teve apenas 27% de infiltração, escoando 74% superficialmente. Já o concreto poroso infiltrou 73%. A evapotranspiração foi significativa nos telhados verdes, especialmente com *Alternanthera dentata* (852 mm), refletindo a influência da vegetação. A caracterização físico-hídrica do substrato (franco-arenoso, 13% de matéria orgânica) revelou alta condutividade hidráulica (até 0,085 mm/s) e porosidade total (54%), corroborando a eficácia das técnicas. Recomenda-se a combinação de técnicas conforme a disponibilidade e necessidade, e a priorização de espécies vegetais adaptadas ao clima local. A pesquisa contribuiu para o entendimento do comportamento hidrológico dessas técnicas sob clima tropical úmido e destaca seu potencial como ferramenta de adaptação às mudanças climáticas e de mitigação dos impactos da urbanização desordenada.

**Palavras-chave:** técnicas compensatórias, drenagem urbana; balanço hídrico; alagamento, projeto piloto.

## ABSTRACT

Unplanned urban growth and the resulting soil impermeabilization in large cities have intensified urban drainage issues, such as flooding, waterlogging, and reduced infiltration capacity. These challenges underscore the need for sustainable stormwater management strategies. This study aimed to evaluate the hydrological performance of different compensatory drainage techniques, green roofs (featuring *Dianella tasmanica*, *Axonopus compressus*, and *Alternanthera dentata*) and permeable pavements (grass-filled pavers, interlocking concrete pavers, and pervious concrete), at pilot scale, with a focus on mitigating these impacts. The methodology involved the construction of seven experimental modules in Recife, Brazil, monitored over a six-month period (may to october 2024), with data collection on precipitation, soil moisture, surface runoff, and subsurface drainage. The collected data enabled the development of a hydrological water balance for each surface, accounting for both water inputs and outputs. The results indicated that green roofs retained between 57% and 73% of total rainfall, with the *Dianella tasmanica* system achieving up to 99% infiltration during moderate rainfall events. Permeable pavements demonstrated variable performance: grass-filled pavers retained 77% of the rainfall, while interlocking pavers showed only 27% infiltration, with 74% of the water lost as surface runoff. Pervious concrete exhibited a more balanced response, with 73% infiltration. Evapotranspiration was notably significant on green roofs, especially those with *Alternanthera dentata*, which reached 852 mm, highlighting the influence of vegetation. The physical and hydraulic characterization of the substrate (sandy loam with 13% organic matter) revealed high hydraulic conductivity (up to 0.085 mm/s) and porosity (54%), supporting the effectiveness of these systems. The findings suggest that combining techniques according to specific goals, such as maximizing retention or enhancing infiltration, can optimize performance, and that plant species should be selected based on local climatic adaptability. This research advances the understanding of the hydrological behavior of nature-based solutions under a humid tropical climate and emphasizes their potential as effective tools for climate change adaptation and for mitigating the impacts of unregulated urbanization.

**Keywords:** low impact development; urban drainage; water balance; flooding; pilot project.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - HIDROGRAMA DE VAZÕES DE UMA BACIA RURAL ANTES E DEPOIS DA URBANIZAÇÃO. ....	15
FIGURA 2 - MAPEAMENTO DA PROJEÇÃO DAS ÁREAS SUJEITAS A INUNDAÇÕES EM RECIFE ATÉ 2040. ....	18
FIGURA 3 – CAMADAS QUE COMPÕEM UM TELHADO VERDE. ....	21
FIGURA 4 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES ENTRE 1994-2024 NO SCIENCE DIRECT SOBRE TELHADOS VERDES. ....	32
FIGURA 5 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES ENTRE 1994-2024 NO SCIENCE DIRECT SOBRE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS. ....	34
FIGURA 6 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. ....	38
FIGURA 7 – SÉRIE HISTÓRICA DE PRECIPITAÇÃO – 1994 A 2021 – ESTAÇÃO VÁRZEA. ....	39
FIGURA 8 – UNIDADE ECOTECNOLÓGICA EXPERIMENTAL. ....	39
FIGURA 9 – ESQUEMA DOS MÓDULOS. ....	40
FIGURA 10 – PROJETO PILOTO CONTENDO SETE MÓDULOS NO TOPO. ....	41
FIGURA 11 – CORREÇÃO DAS FISSURAS COM GRAUTE, A ESQUERDA, E CAMADA IMPERMEABILIZANTE, A DIREITA. ....	41
FIGURA 12 – SISTEMA DE DRENAGEM SUPERFICIAL DO PILOTO. ....	42
FIGURA 13 - SISTEMA DE DRENAGEM SUBSUPERFICIAL DO PILOTO. ....	43
FIGURA 14 – COMPOSIÇÃO DAS CAMADAS INTERNAS DOS MÓDULOS. ....	43
FIGURA 15 – EXECUÇÃO DE CAMADA DE ARGILA EXPANDIDA. ....	44
FIGURA 16 – POSICIONAMENTO DO BIDIM NOS MÓDULOS. ....	44
FIGURA 17 – PENEIRAMENTO E MONTAGEM DA CAMADA DE SUBSTRATO. ....	45
FIGURA 18 – VISTA SUPERIOR DOS MÓDULOS. ....	46
FIGURA 19 – ESPÉCIES UTILIZADAS NOS MÓDULOS: LUTIELA, GRAMA SÃO CARLOS E DIONELA. ....	46
FIGURA 20 – PAVIMENTOS UTILIZADOS NOS MÓDULOS. ....	46
FIGURA 21 – REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE DENSIDADE DE PARTÍCULA. ....	47
FIGURA 22 – REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE MATÉRIA ORGÂNICA. ....	48
FIGURA 23 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA. ....	48
FIGURA 24 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA PELA ARGILA EXPANDIDA. ....	49
FIGURA 25 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE INFILTRAÇÃO BEERKAN. ....	50
FIGURA 26 – ESQUEMA COM LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE INFILTRAÇÃO REALIZADOS. (SUB. ....	50
FIGURA 27 – UCD DA UEE. ....	51
FIGURA 28 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA UEE. ....	51
FIGURA 29 – INSTALAÇÃO DOS SENSORES DE UMIDADE DO SOLO. ....	52
FIGURA 30 – CALIBRAÇÃO DO SENSOR TDR. ....	53
FIGURA 31 – PREPARAÇÃO DO SOLO PARA REALIZAR ENSAIO DE CALIBRAÇÃO. ....	53
FIGURA 32 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE CALIBRAÇÃO. ....	54
FIGURA 33 – SENSOR DE NÍVEL DE ÁGUA. ....	55
FIGURA 34 – CURVA GRANULOMÉTRICA. ....	58
FIGURA 35 – CALIBRAÇÃO DOS SENSORES TDR. ....	59

FIGURA 36 – LÂMINA INFILTRADA ACUMULADA (MM) EM FUNÇÃO DO TEMPO (S) PARA 18 ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO.....	60
FIGURA 37 – CURVAS DE RETENÇÃO MÉDIAS PARA CADA MÓDULO OBTIDAS PELO BEST SLOPE, INTERCEPT E STEADY.....	63
FIGURA 38 – CURVAS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	64
FIGURA 39 - MONITORAMENTO: TELHADO VERDE COM DIONELA.....	67
FIGURA 40 - MONITORAMENTO: TELHADO VERDE COM GRAMA SÃO CARLOS.....	68
FIGURA 41- MONITORAMENTO: TELHADO VERDE COM LUTIELA.....	68
FIGURA 42 - MONITORAMENTO: PAVIMENTO COBOGRAMA.....	69
FIGURA 43 - MONITORAMENTO: PAVIMENTO INTERTRAVADO.....	70
FIGURA 44 - PAVIMENTO CONCRETO POROSO.....	70
FIGURA 45 - EVENTO DE PRECIPITAÇÃO.....	74

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo Geral .....	14
2.2	Objetivos Específicos .....	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1	<b>A urbanização e os impactos na drenagem urbana no Brasil.....</b>	<b>15</b>
3.2	<b>Evolução dos sistemas de drenagem .....</b>	<b>16</b>
3.3	<b>A problemática de Recife .....</b>	<b>17</b>
3.4	<b>Técnicas Compensatórias de Drenagem Urbana.....</b>	<b>19</b>
3.4.1	<i>Telhados verdes .....</i>	<i>20</i>
3.4.2	<i>Pavimentos permeáveis .....</i>	<i>23</i>
3.5	<b>Incentivos Legais ao Uso de Técnicas Compensatórias.....</b>	<b>24</b>
3.6	<b>Dinâmica da Água no Solo .....</b>	<b>25</b>
3.6.1	<i>Propriedades do Solo .....</i>	<i>25</i>
3.6.2	<i>Equações de Fluxo no Solo .....</i>	<i>27</i>
3.6.3	<i>Comportamento da Infiltração .....</i>	<i>27</i>
3.6.4	<i>Metodologia BEST.....</i>	<i>28</i>
3.7	<b>Balço Hídrico.....</b>	<b>28</b>
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	31
4.1	<b>Estudos envolvendo o uso de técnicas compensatórias .....</b>	<b>31</b>
4.2	<b>Estudos envolvendo o uso de Telhados verdes .....</b>	<b>31</b>
4.3	<b>Estudos envolvendo o uso de Pavimentos Permeáveis .....</b>	<b>34</b>
5	METODOLOGIA.....	38
5.1	<b>Localização e caracterização da área de estudo .....</b>	<b>38</b>
5.2	<b>Detalhamento da UEE.....</b>	<b>39</b>
5.2.1	<i>Projeto piloto com sete Módulos .....</i>	<i>40</i>
5.2.2	<i>Instalações hidráulicas .....</i>	<i>42</i>
5.2.3	<i>Composição interna dos módulos .....</i>	<i>43</i>
5.2.4	<i>Composição da camada superficial dos módulos .....</i>	<i>45</i>
5.2.5	<i>Caracterização dos materiais.....</i>	<i>47</i>
5.3	<b>Unidade de Coleta de Dados (UCD).....</b>	<b>50</b>
5.3.1	<i>Pluviometria .....</i>	<i>51</i>
5.3.3	<i>Umidade do solo.....</i>	<i>52</i>

5.3.4	<i>Nível de água nas caixas</i> .....	55
<b>5.4</b>	<b>Balanço hídrico</b> .....	55
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	57
<b>6.1</b>	<b>Caracterização físico-hídrica do substrato</b> .....	57
6.1.1	<i>Teor de Matéria Orgânica</i> .....	57
6.1.2	<i>Densidade do Solo, Porosidade Total e Teor de Absorção de Água</i> .....	57
6.1.3	<i>Densidade de Partículas</i> .....	57
6.1.4	<i>Textura do Solo</i> .....	58
6.1.5	<i>Calibração dos Sensores de Umidade</i> .....	58
6.1.6	<i>Curva de Infiltração, Retenção e Condutividade Hidráulica</i> .....	59
<b>6.2</b>	<b>Monitoramento</b> .....	65
6.2.2	<i>Comparativo dos volumes acumulados</i> .....	71
6.2.3	<i>Evento de precipitação</i> .....	73
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	76
<b>7.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	78
	REFERÊNCIAS .....	79

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização, aliada à falta de planejamento territorial, tem levado a uma maior impermeabilização dos centros urbanos. Isso ocorre devido à redução das áreas verdes em função das construções, bem como às ações de compactação do solo, ocupação de áreas com risco de inundação e/ou deslizamento, expansão urbana sem o devido planejamento devido ao déficit habitacional, etc. Essas ações humanas no meio urbano geram diversos impactos ambientais (alagamentos, inundações, deslizamento de terra), afetando significativamente o funcionamento natural do ciclo hidrológico no meio ambiente urbano (Kiflay *et al.*, 2025; Anduaem *et al.*, 2023; Farias; Mendonça, 2022).

Dentre os impactos negativos ao meio ambiente resultantes da ação humana, pode-se destacar alguns bastante relevantes em áreas urbanas, como a ocorrência de alagamentos e enchentes, o aumento da temperatura, a degradação das águas pluviais, a poluição do ar, a contaminação do solo e a perda da biodiversidade (Kimbi *et al.*, 2024; Baptista *et al.*, 2023).

Do ponto de vista hidrológico, o aumento de áreas impermeabilizadas provoca a redução da infiltração da água pluvial no solo, diminuição da recarga natural dos aquíferos, diminuição do escoamento de base, levando a ocorrências frequentes de inundações, o que demanda a busca por soluções estruturais que permitam maior capacidade de adaptação (Pacetti *et al.*, 2022; Parra; Teixeira, 2020). Consequentemente, ocorre um aumento significativo no volume e da velocidade escoada superficialmente, potencializando os riscos de alagamentos e inundações em função da sobrecarga nos sistemas de drenagem tradicionais, quando existem (Manes *et al.*, 2024).

A gestão de águas pluviais urbanas é parte essencial de qualquer desenvolvimento urbano sustentável, tendo significativa importância do ponto de vista ambiental, econômico e social. O aumento desordenado da urbanização em todo o mundo e os efeitos cada vez mais evidentes das mudanças climáticas são dois importantes contribuintes para o escoamento excessivo que os sistemas convencionais de gestão de água pluviais não conseguem lidar de forma adequada (Kimbi *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2022)

Nesse contexto, de acordo com relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) a cidade do Recife é a 16ª cidade mais vulnerável às mudanças climáticas do mundo. A sinergia entre as características de clima tropical em região litorânea, os frequentes eventos de precipitações pluviais de elevada intensidade, associados aos baixos gradientes hidráulicos nas partes baixas da cidade e cota nas proximidades do nível do mar, e a

elevada impermeabilização em regiões de elevada densidade demográfica reforçam a necessidade do estudo de soluções com potencial de se tornarem políticas públicas que possibilitem a adaptação também às mudanças climáticas.

Nesse sentido, o entendimento sobre a magnitude do impacto de soluções baseadas na natureza no manejo de águas pluviais urbanas em cidades litorâneas como a cidade do Recife ainda é incompleto. Na cidade do Recife, estudos com foco no desempenho de pavimentos permeáveis do tipo bloco intertravado já foram realizados por diversos autores (Costa *et al.*, 2024; Marinho *et al.*, 2020; Coutinho *et al.*, 2016), tanto em escala piloto, quanto em escala real, com avaliação da infiltração via experimentação e também com estimativas utilizando simulação numérica dos processos de transferência de água. Faltam ainda estudos que realizem um monitoramento contínuo das diferentes variáveis do balanço hídrico, e não apenas de eventos isolados considerando a análise de uma variável.

Assim, a problemática das inundações em Recife é uma questão recorrente e complexa, que afeta significativamente a qualidade de vida e a segurança da população. Várias razões contribuem para essas inundações, como o crescimento urbano desordenado, a ocupação inadequada das áreas de risco, o desmatamento de encostas e a canalização inadequada de rios e córregos, sua topografia muito plana com baixa declividade, e sua localização ao nível do mar. Nos meses entre março e agosto, em que se concentram os maiores volumes precipitados, esses problemas são ainda mais evidentes. Isso reduz a capacidade de absorção do solo e aumenta a velocidade de escoamento da água, agravando os problemas de drenagem (Silva *et al.*, 2019).

Nesta perspectiva, em 2015, no Recife, foi sancionada a Lei Municipal Nº 18.112/2015 que dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação de telhado verde para habitações multifamiliares com mais de 4 pavimentos e não-habitacionais com mais de 400 m<sup>2</sup> de área coberta, mostrando assim como a percepção dos gestores públicos em relação aos benefícios da adoção desse tipo de técnica tem se tornado cada vez maior.

Nesse cenário, devido às diversas contribuições apresentadas pelas técnicas compensatórias e sua ampla empregabilidade na drenagem, diferentes pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de aperfeiçoar sua construção, analisar sua eficiência e empregabilidade em diferentes tipos de ambientes e investigar o seu impacto sobre o retardo no escoamento superficial (Barros *et al.*, 2024; Lima Neto *et al.*, 2024; Baptista *et al.*, 2023; Menezes; Cabral, 2023; Freni; Liuzzo, 2019).

No entanto, ainda faltam trabalhos que avaliem concomitantemente os processos em técnicas diferentes como diferentes pavimentos permeáveis e diferentes telhados verdes. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma breve contribuição no tocante a comparação do desempenho dos processos hidrológicos na escala piloto de diferentes pavimentos permeáveis e telhados com diferentes coberturas vegetais na Cidade do Recife. Sendo assim, este trabalho quantificou a capacidade de geração de escoamento superficial, a retenção de água pluvial, e a magnitude de outros processos hidrológicos, nas condições de clima da Cidade do Recife.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar o desempenho hidrológico de técnicas compensatórias, telhados verdes e pavimentos permeáveis, aplicadas ao contexto urbano do Recife-PE, por meio do monitoramento de unidades experimentais em escala piloto.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar os processos hidrológicos em telhados verdes e pavimentos permeáveis em escala piloto;
- Entender o comportamento hidrodinâmico na camada de substrato de telhados verdes e pavimentos permeáveis;
- Efetuar o balanço hídrico nas unidades experimentais considerando as condições climáticas reais da cidade do Recife-PE;
- Comparar o desempenho hidrológico das técnicas analisadas para as condições de clima locais.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

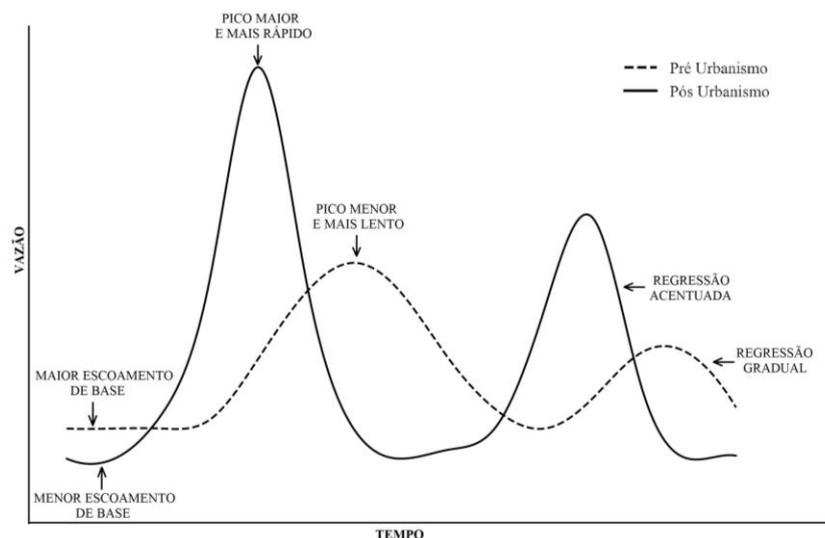
Neste capítulo é apresentado o referencial teórico que estabelece o arcabouço teórico que sustenta e contextualiza este estudo. Serão descritos os aspectos pluviométricos e físicos da cidade de Recife, seu processo de evolução da urbanização e como isso impactou na drenagem local. Também será abordado o desenvolvimento de técnicas compensatórias de drenagem urbana e suas aplicações.

#### 3.1 A urbanização e os impactos na drenagem urbana no Brasil

A intervenção do homem no meio ambiente produz diversos impactos, alterando suas características naturais. Uma dessas alterações se dá pelo processo de urbanização e crescimento demográfico que causam mudanças significativas no escoamento superficial e subsuperficial das águas de chuva (Valeo *et al.*, 2021; Souza, 2018).

O desmatamento e a impermeabilização do solo alteram o ciclo hidrológico e consequentemente o balanço hídrico, fato que pode ser observado no hidrograma de vazões (Figura 1) por meio do aumento da vazão de escoamento superficial direto e nos picos de cheia, também provocando maior velocidade em relação ao início do evento pluvial na ocorrência desses picos, além de redução da infiltração no solo, diminuição do nível freático e redução da evapotranspiração (Rossi; Gonçalves, 2016; Tucci, 2008).

Figura 1 - Hidrograma de vazões de uma bacia rural antes e depois da urbanização.



Fonte: Adaptado de Schueler (1987).

Os problemas de drenagem costumam ter consequências mais graves em áreas de periferias, pois o crescimento dessas áreas acontece de forma desordenada. As áreas periféricas surgem nas zonas das cidades que são totalmente desprovidas dos serviços de infraestrutura urbanos

básicos e essenciais, em contrapartida o planejamento urbano acontece voltado para as áreas da cidade geralmente ocupadas pela população com renda média a alta. Os municípios tem dificuldade de planejar e adotar legislações voltadas a uma urbanização antecipada com espaços seguros baseados na previsão da expansão urbana, de forma que a população de baixa renda não ocupe áreas de risco, sujeitas a inundações (Barros, 2021; Tucci, 2007).

Embora os alagamentos urbanos estejam diretamente relacionados às falhas na infraestrutura de drenagem, seja por subdimensionamento do sistema, ausência de manutenção ou aumento da impermeabilização do solo, outro fator que tem agravado esse problema é a mudança do clima (Silva Junior *et al.*, 2020). As mudanças climáticas estão relacionadas ao aumento médio global da temperatura e estão associadas ao agravamento de eventos extremos, tanto pela frequência, quanto pela intensidade, como eventos de chuvas intensas, ondas de calor, secas, tempestades e inundações, dentre outros (Rocha, 2023; Sun *et al.*, 2021).

Segundo dados do relatório especial Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas, do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016) as cidades brasileiras situadas em zonas litorâneas são mais vulneráveis às mudanças climáticas, em especial ao aumento do nível do mar, desaparecimento da linha de pós-praia, intrusão salina, erosão costeira, dentre outros, que podem causar destruição e impactos à infraestrutura desses municípios.

### **3.2 Evolução dos sistemas de drenagem**

Os sistemas de drenagem urbana começaram a ser implantados por questões de saúde pública, com o objetivo de efetuar a retirada da água dos centros urbanos da forma mais rápida possível. Inicialmente os problemas das águas pluviais e dos esgotos eram tratados por meio de um sistema único, bem diferente do que ocorre hoje, onde predomina o sistema separador total.

Com o avanço da urbanização, tanto no sentido de áreas cada vez maiores, quanto da construção de estruturas com características mais impermeáveis, os sistemas de drenagem projetados começaram a ser insuficientes, o que demandaria diâmetros das tubulações cada vez maiores, prática essa insustentável do ponto de vista financeiro, ambiental e social, mostrando a necessidade de novas soluções (Bezerra *et al.*, 2022).

A abordagem clássica dada a uma cheia urbana, por meio da rápida transferência do volume escoado das águas precipitadas para jusante, através da execução de galerias pluviais,

transferindo assim as vazões, gera muitas vezes agravamento do problema das inundações em locais diferentes, o que resulta em novas obras de drenagem (Feitosa *et al.*, 2020).

As águas coletadas por superfícies impermeabilizadas são canalizadas para o sistema de drenagem, deixando de infiltrar para os lençóis freáticos, o que dificulta a recarga natural dos aquíferos (Heywood, 2015). Nesse contexto, associado à evolução do conceito de conscientização ecológica, começaram a surgir abordagens mais complexas e com maiores investimentos iniciais, mas que apresentavam custos globais menores. Essas novas abordagens buscavam alternativas para a drenagem urbana, atuando no ciclo hidrológico, restaurando os processos naturais como a infiltração e a capacidade de armazenamento do solo (Manes *et al.*, 2024).

Um conceito novo e moderno é o de cidade esponja, que se trata de uma cidade que tem a capacidade de integrar a gestão da água urbana nas políticas e projetos de planejamento urbano. Esse tipo de cidade tem o planejamento adequado e as estruturas legais e ferramentas para implementar, manter e adaptar os sistemas de infraestrutura para coletar, armazenar e tratar o excesso da água da chuva (Motta, 2019). Essa concepção propõe uma cidade que tenha uma boa flexibilidade em termos de adaptação às mudanças ambientais e responda aos desastres naturais, similar a uma esponja. A cidade passa a ter possibilidade do auxílio pela absorção, armazenamento, infiltração e purificação da água no momento das chuvas e pode liberar água armazenada quando necessário (Peng *et al.*, 2018).

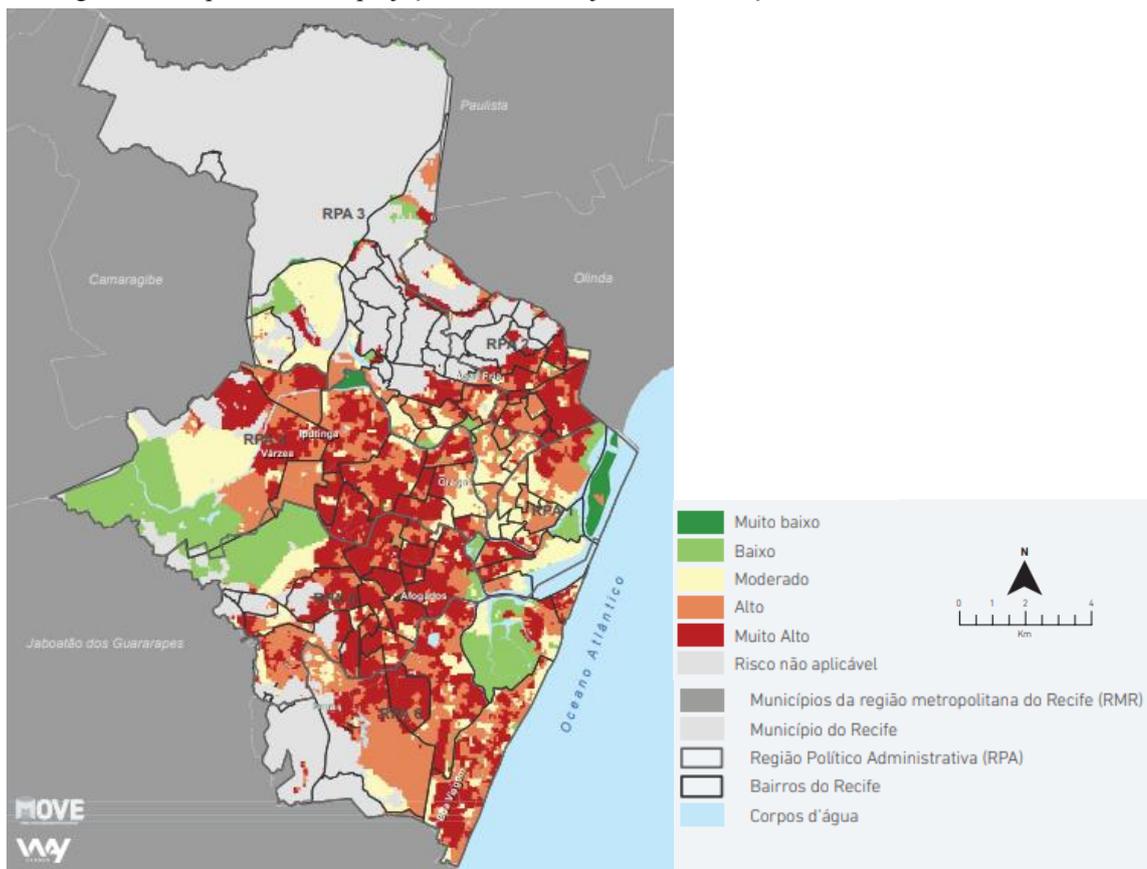
### **3.3 A problemática de Recife**

Quanto a cidade do Recife, os problemas de drenagem são agravados pela sua localização geográfica, em uma planície costeira, associado a uma urbanização desordenada, índices pluviométricos elevados e um sistema de drenagem local com influência e vulnerabilidade diária das marés, devido sua baixa altitude em relação ao nível do mar (Silva Junior *et al.*, 2020).

Preuss *et al.* (2011) afirmam que o Recife possui características naturais e condições geográficas que dificultam a drenagem na cidade, tais como: áreas planas, baixas cotas em relação ao nível do mar, lençol freático aflorante na estação chuvosa e influência das marés na rede de drenagem. Além disso, existem fatores antrópicos que atrapalham a eficiência da drenagem local, devido à: canalização de riachos urbanos e ocupações de suas margens, alta taxa de impermeabilização do solo, deposição inadequada de resíduos sólidos nos elementos de drenagem e ausência de saneamento básico (Melo *et al.*, 2022).

A cidade do Recife possui muitas áreas sujeitas a alagamentos e inundações e a perspectiva para os próximos anos, se nada for feito, é que essas áreas só aumentem. Na Figura 2 é apresentado um mapa com estudo elaborado pela Prefeitura do Recife com a projeção até 2040 das áreas sujeitas a inundações. Observa-se que essas áreas estão distribuídas ao longo de praticamente todo o município. Percebe-se que os valores de risco muito altos estão concentrados nas regiões centrais.

Figura 2 - Mapeamento da projeção das áreas sujeitas a inundações em Recife até 2040.



Fonte: Adaptado de Recife (2019).

A gravidade dos problemas com drenagem urbana no Recife pode ser percebida pelos episódios recorrentes de alagamentos. As cheias urbanas devem ser visualizadas como urgência do planejamento, pois drenagem urbana não se trata apenas de técnicas de engenharia e sim de uma problemática ambiental, pois, quando a cidade de Recife é atingida por eventos extremos ocorrem acidentes, alagamentos e escorregamentos de terra, acarretando impactos negativos ao sistema socioeconômico, ocasionando além dos prejuízos materiais algumas vezes mortes (Melo *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2012).

### 3.4 Técnicas Compensatórias de Drenagem Urbana

O conceito de técnicas compensatórias, soluções baseadas na natureza, ou ainda, infraestruturas verdes de águas pluviais, surgiu na França por volta dos anos 1980, com o objetivo de atenuar os impactos da urbanização no escoamento natural das águas pluviais em ambientes já urbanizados (Acunha *et al.*, 2019). Essas técnicas destinam-se a reduzir o efeito da expansão urbana, otimizando a utilização do solo urbano e dos custos de investimento.

As técnicas compensatórias são alternativas ao sistema convencional de drenagem urbana, são estruturas que tentam recuperar as condições existentes antes da ocupação da bacia hidrográfica (Vicente *et al.*, 2023). Essas técnicas se baseiam essencialmente no aumento do tempo de retenção/detenção e na infiltração das águas precipitadas, amortecendo, assim os picos das vazões, diminuindo os volumes escoados, reduzindo a probabilidade de inundações, melhorando a qualidade da água, diminuindo os custos com as tubulações do sistema convencional e infiltrando maiores quantidades de água, contribuindo para a recarga do aquífero (Kasprzyk *et al.*, 2022; Souza, 2018).

Existem diversos tipos de técnicas compensatórias, a eficácia de um determinado tipo, dentro de uma região específica, depende da seleção de parâmetros ótimos desta técnica, levando-se em consideração os padrões de precipitação e a adequação para o local (Pour *et al.*, 2020). Segundo Vaz *et al.* (2021) e Becker e Pinheiro (2019) as principais técnicas compensatórias ou ecotécnicas podem ser classificadas em três tipos:

1. Técnicas para controle na fonte: implantadas junto a parcelas ou pequenos conjuntos de parcelas, associadas, portanto, a pequenas superfícies de drenagem. Incluem os poços de infiltração, os microrreservatórios, os telhados verdes, etc.
2. Técnicas lineares: implantadas usualmente junto aos sistemas viários, pátios, estacionamentos, arruamentos, com uma ampla gama de porte de áreas de drenagem associadas. Incluem a biorretenção, as valas ou valetas de armazenamento e/ou infiltração, as trincheiras de infiltração, os pavimentos intertravados permeáveis, os jardins de chuva, etc.
3. Técnicas para controle centralizado: implantadas em áreas de drenagem de porte mais significativo. Incluem essencialmente as bacias de detenção.

Todos os modelos têm objetivos semelhantes, porém comportam-se de forma diferente, sua aplicabilidade pode variar com o tipo de solo, local da edificação, dimensões de lote disponível, disponibilidade de valores a investir na execução da técnica escolhida e clima local (Barros, 2021).

### 3.4.1 Telhados verdes

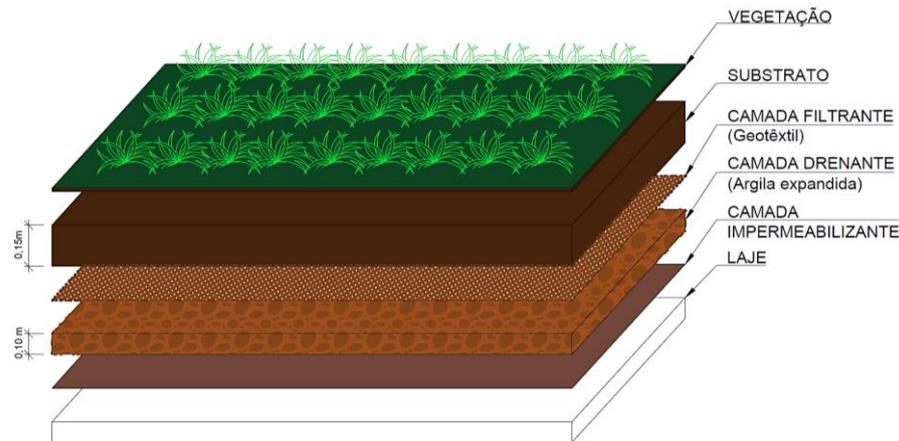
Os telhados verdes podem ser definidos como uma técnica que utiliza a vegetação e substratos para transformar coberturas de edifícios em áreas verdes. Os telhados verdes são projetados para reter, armazenar e gradualmente liberar a água pluvial de volta ao meio ambiente, ajudando a reduzir a sobrecarga do sistema de drenagem urbana e minimizando o risco de inundações (Monteiro *et al.*, 2023).

A implementação de telhados verdes tem sido reconhecida como uma estratégia importante para a retenção e melhoria da qualidade da água em áreas urbanas. Eles são capazes de reter uma quantidade significativa de água da chuva, reduzindo a carga no sistema de drenagem urbana. Ao reter a água da chuva, os telhados verdes diminuem o escoamento superficial, reduzindo o risco de inundações e a sobrecarga do sistema de drenagem. Isso é especialmente relevante em áreas urbanas densamente construídas, onde a impermeabilização do solo é alta. E por fim podem ajudar na recarga de aquíferos, permitindo a infiltração da água da chuva no solo ao invés de ser direcionada diretamente para os sistemas de drenagem (Monteiro *et al.*, 2023; Shafique *et al.* 2018).

A disposição das camadas que compõem os telhados verdes pode sofrer variações de acordo com o as necessidades de utilização e a área disponível para execução. Segundo Kozmhinsky *et al.* (2016), a composição mais comumente utilizada em um telhado verde é composta por cinco camadas:

- Camada de vegetação: compreende a vegetação propriamente dita, selecionada considerando as características climáticas do local, para melhor adaptação.
- Camada de substrato: constituída de solo ou substrato orgânico, com espessura variável em função da necessidade das espécies de vegetação utilizadas, sendo preferencialmente composto por um solo que apresente drenagem adequada e boa composição mineral de nutrientes.
- Camada filtrante: normalmente é composta por uma manta geotêxtil, que visa evitar que partículas sólidas do telhado verde sejam carregadas pela água da chuva e consequentemente obstruam o sistema de drenagem.
- Camada drenante: tem a funcionalidade de dar vazão ao excesso de água no solo, podendo ser constituída por argila expandida, brita ou seixos rolados.
- Impermeabilização: compreende a camada responsável pelo isolamento do elemento estrutural, fornecendo proteção contra infiltrações e promovendo uma maior durabilidade do sistema.

Figura 3 – Camadas que compõem um telhado verde.



Fonte: Autoria própria (2024).

Durante a instalação de um telhado verde alguns fatores precisam ser levados em consideração, como a capacidade de carga máxima, a frequência de manutenção, a seleção do tipo de vegetação, o substrato e o orçamento (Santos, 2016).

O crescimento da população urbana e a consequente impermeabilização das áreas urbanas tem provocado diversos impactos ambientais, dentre eles destacam-se as enchentes e as inundações. Na busca por uma melhor gestão no manejo das águas pluviais os telhados verdes vêm ganhando destaque, pois um dos seus benefícios é promover o controle qualitativo e quantitativo dessas águas, os mesmos conseguem absorver, reter e tratar as águas pluviais, atuando diretamente no escoamento superficial (Macedo, 2022).

Segundo Penkova *et al.* (2020) os telhados verdes podem ser classificados, conforme o nível de manutenção, espessura do sistema e tipo de vegetação, em três categorias:

- Extensivos: apresentam camadas de substrato menores de 20 cm, compostas por espécies de pequeno porte, espessura vegetal entre 5 cm e 20 cm, sendo necessária pouca ou nenhuma manutenção e irrigação, apresentando ainda baixo custo de investimento.
- Semi-intensivos: apresentam características intermediárias entre os telhados verdes extensivos e intensivos. Possui substrato que varia entre 12 a 25 cm.
- Intensivos: apresentam camadas de substrato superiores a 20 cm, podendo ser constituídas de plantas e arbustos de médio porte. Normalmente exige uma manutenção intensa, sendo necessário irrigação de maneira regular.

A tabela 1 apresenta um resumo das principais características dos tipos de telhados verdes, conforme sua categoria.

Tabela 1 - Classificação e características dos telhados verdes.

Parâmetros	Tipos de Telhado Verde		
	Extensivo	Semi-Intensivo	Intensivo
Manutenção	Pouca ou nenhuma	Constantemente	Alto
Irrigação	Nenhuma	Periódica	Regular
Redução de águas pluviais	Baixo	Médio	Alto
Diversidade de plantas	Baixo	Médio	Alto
Comunidades de plantas	Pequeno porte	Gramíneas/Arbustos	Maior porte
Altura das plantas	5 – 30 cm	30 – 60 cm	30 – 90 cm ou maior
Profundidade do substrato	4 – 20 cm	10 – 50 cm	≥ 10 – 200 cm
Peso Saturado do solo	48,8 a 170 kg/m <sup>2</sup>	170 a 244 kg/m <sup>2</sup>	244 a 1467 kg/m <sup>2</sup>
Custo	Baixo	Médio	Alto
Inclinação do telhado	Até 30°	Pequenas inclinações ou plano	
Uso	Proteção ecológica	Apenas telhado verde	Lazer/passeio

Fonte: Adaptado de Leonardo (2021).

A construção de telhados verdes gera diversos benefícios e melhorias da qualidade ambiental, dentre eles pode-se destacar a melhoria da qualidade do ar, a diminuição da temperatura ambiental, a diminuição da poluição sonora, a captação e retenção das águas da chuva, a umidificação do ar nos meses mais quentes e secos, a criação de espaços agradáveis para convivência social e a possibilidade de aproveitamento do espaço em hortas (Kozmhinsky *et al.*, 2016). Entre todas essas características uma das mais relevantes é o alto potencial de retenção hídrica, que pode resultar na redução no escoamento superficial, com possibilidade de infiltração e de evapotranspiração, não observado nos telhados convencionais (Leonardo, 2021). Segundo estudo de Santos *et al.* (2013), os telhados verdes apresentam capacidade de retenção do volume total precipitado superior ao telhado convencional, reduzindo entre 15% e 30% o escoamento superficial, que seria lançado no sistema de drenagem convencional.

Os telhados verdes podem ser construídos sobre uma variedade de superfícies, incluindo laje de concreto, chapas de compensado estruturado, placas cimentícias, tabladros de madeira, steel deck, bem como outros materiais que apresentem resistência compatível com o telhado verde saturado (Silva; Duarte, 2017). A inclinação do telhado deve ser entre 5° e 20° para permitir o escoamento não muito rápido da água (Tomaz, 2008).

Atualmente, existem no mercado empresas que vendem e montam módulos pré-fabricados, que são mais leves, mais baratos e de fácil instalação em comparação com a montagem convencional. Esses módulos geralmente consistem em uma camada vegetal disposta sobre uma bandeja modular de plástico, podendo ser utilizados sobre telhados

convencionais e lajes. Existem dois tipos principais: o sistema modular, que contém todas as camadas necessárias para o telhado verde, incluindo substrato, drenagem e vegetação; e o sistema alveolar, que além dessas camadas, utiliza uma membrana alveolar para armazenar água.

Embora apresente diversas vantagens à infraestrutura e à dinâmica ambiental urbana, o uso dos tetos verdes apresenta diversos desafios que dificultam sua implantação. Algumas dessas dificuldades são o fator econômico, no que se refere aos altos custos de construção e de manutenção, especialmente com telhados verdes intensivos, a complexidade de construção, os riscos de falha e o alto custo para instalação em edifícios existentes com a necessidade de ajustes estruturais, além de ser necessário um sistema que conduza ou retenha a água (Vilarim, 2022).

#### 3.4.2 Pavimentos permeáveis

Uma das técnicas mais utilizadas em drenagem sustentável é o pavimento permeável, definido, segundo Freni *et al.* (2010), como um dispositivo de infiltração no qual o escoamento superficial é desviado para dentro de um reservatório de pedras localizado sob a superfície do terreno. A utilização de pavimentos permeáveis em áreas urbanas visa aumentar a área drenada superficialmente, melhorar a qualidade da água e contribuir para o aumento da recarga subterrânea, pois, além de reterem a água pluvial em seus reservatórios, promovem sua infiltração (Freni *et al.*, 2010).

Segundo Tucci (2008), os pavimentos permeáveis são compostos por duas camadas de agregados, uma de agregado fino ou médio e outra de agregado graúdo; e a camada de pavimento permeável propriamente dita. A camada de agregado fino ou médio funciona como um filtro, e a camada de agregado graúdo funciona como um reservatório temporário, a partir do qual a água pode ser infiltrada ou redirecionada para um sistema de drenagem por canalização (Yu *et al.*, 2021).

Existem diferentes tipos de pavimentos drenantes, também chamados de pavimentos permeáveis, cuja configuração vai desde estruturas complexas composta por várias camadas, até blocos vazados preenchidos por grama ou ainda simples paralelepípedos, cuja função principal é promover a diminuição do escoamento superficial, gerada pela impermeabilização dos solos (Abustan *et al.*, 2012). Os tipos mais comuns desses pavimentos são o concreto permeável, asfalto permeável, blocos vazados e blocos intertravados.

De acordo com Motta (2019), o funcionamento hidráulico dos pavimentos permeáveis é baseado nos seguintes princípios: entrada imediata da água da chuva no corpo do pavimento,

podendo ser distribuída ou localizada; estocagem temporária da água no interior do pavimento, nos vazios da camada de reservatório; evacuação lenta da água, podendo ser por infiltração no solo, liberação para a rede de drenagem ou uma combinação das duas formas, ou ainda o armazenamento para reuso.

Segundo Baptista (2011), podem ser identificados três níveis diferentes de atuação dos pavimentos no controle da produção do escoamento superficial:

- 1) Pavimentos dotados de revestimentos superficiais permeáveis que possibilitam a redução da velocidade do escoamento superficial, a retenção temporária de pequenos volumes na própria superfície do pavimento e a infiltração de parte das águas pluviais.
- 2) Pavimentos dotados de estrutura porosa, onde é efetuada a detenção temporária das águas pluviais, provocando a redução da precipitação efetiva.
- 3) Pavimentos dotados de estrutura porosa e de dispositivos de facilitação da infiltração, onde ocorre tanto a detenção temporária das águas pluviais como também a infiltração de parte delas. Obtém-se assim o amortecimento de vazões, a alteração temporal nos hidrogramas e a redução dos volumes efetivamente escoados.

De acordo com Ballard *et al.* (2015), os pavimentos permeáveis também podem ser classificados quanto à forma de infiltração no solo em três tipos, que são: infiltração total, infiltração parcial e sem infiltração.

Este tipo de técnica apresenta muitas vantagens, dentre as quais a redução da precipitação efetiva, a redução do diâmetro dos condutos da rede de drenagem pluvial convencional, a redução dos custos do sistema de drenagem pluvial e da lâmina de água de estacionamentos e passeios, a melhoria da qualidade da água durante o processo de infiltração. Em relação às desvantagens, pode-se citar a manutenção do sistema para evitar que fique colmatado com o tempo, o maior custo direto da construção, e o risco de contaminação dos aquíferos (Rowe *et al.*, 2010; Coutinho, 2011).

### **3.5 Incentivos Legais ao Uso de Técnicas Compensatórias**

Algumas cidades do Brasil já incluem as técnicas compensatórias de drenagem sustentável e princípios ecológicos em seus planos diretores e legislações municipais como forma de estimular o desenvolvimento dessas práticas sustentáveis.

Um mecanismo de incentivo ao uso de telhados ecológicos, principalmente telhados verdes, é o chamado IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) Verde. Esse tipo de incentivo adotado

por algumas cidades brasileiras promove descontos fiscais que favorecem os cidadãos que investem em boas práticas ambientais. Os descontos variam de percentual entre 5% até 100%, dependendo do município (Macedo, 2022).

Na cidade do Recife temos a Lei N° 18.112 de 2015 que dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações. Essa lei prevê que todas as edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos ou as não habitacionais que possuem mais de 400 m<sup>2</sup> de área coberta deverão possuir telhados verdes. A lei também prevê a obrigatoriedade de construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem para os lotes com área superior a 500 m<sup>2</sup>, cuja área impermeabilizada supere 25%.

As principais dificuldades encontradas para a efetiva implantação desses sistemas sustentáveis, segundo Mendes e Santos (2022), são a falta de integração urbano-paisagística, de manutenção do sistema de drenagem, de consciência da população e a contaminação por esgotos e resíduos sólidos. E também o fato de as obras de drenagem brasileiras ainda seguirem o conceito tradicional de aumentar a velocidade de escoamento por meio de obras de retificação dos rios e canalizações, transferindo assim o problema para jusante, levando a contínuas intervenções pontuais após os eventos de cheias, mas que não resolvem o problema efetivamente (Ribas *et al.*, 2021).

### **3.6 Dinâmica da Água no Solo**

#### *3.6.1 Propriedades do Solo*

Os solos são formados a partir das rochas, que por ação de processos físicos, químicos e biológicos, sofrem sedimentação, desintegração, decomposição e recomposição, transformando-se ao longo do tempo em um material poroso de características peculiares (Arce *et al.*, 2019).

O solo é constituído por um sistema trifásico, no qual a parte sólida é composta de matéria orgânica e mineral, denominada matriz do solo. Esta é constituída de partículas de diferentes diâmetros, formando espaços vazios entre elas, que são denominados poros, contendo as partes líquida e gasosa do solo, onde a parte líquida é composta por uma solução aquosa de sais minerais e componentes orgânicos, e a parte gasosa é constituída de ar. Os poros do solo correspondem, portanto, ao espaço onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da água. Os diferentes tamanhos das partículas do solo determinam a chamada textura do solo ou

composição granulométrica, onde a classificação básica é argila, silte e areia (Reichert *et al.*, 2007).

Quando os poros estão completamente ocupados pela água o solo é considerado saturado, caso contrário, ele é não saturado. A quantidade de água em uma dada amostra de solo é chamada de umidade, podendo ser expressa pela Equação 1 ou pela Equação 2, onde  $u$  é a umidade à base de massa ou umidade gravimétrica,  $m_a$  a massa de água no solo,  $m_s$  a massa de solo seco,  $\Theta$  a umidade à base de volume ou umidade volumétrica,  $V_a$  o volume de água no solo e  $V_T$  o volume total do solo seco, tanto  $u$  quanto  $\Theta$  são grandezas adimensionais.

$$w = \frac{m_a}{m_s} \quad (1)$$

$$\Theta = \frac{V_a}{V_T} \quad (2)$$

O movimento da água no solo é um dos processos mais importantes da física do solo, sendo um processo essencialmente contínuo, esse movimento depende das características físico-químicas do solo, como textura, estrutura e teor de matéria orgânica, sendo assim, um fator chave do ciclo hidrológico e energético (Gavrilescu, 2021).

A partir das relações entre massa e volume pode-se definir outras relações, como a densidade de partículas ( $\rho_s$ ) (Equação 3), onde  $m_s$  é a massa do solo seco e  $v_s$  o volume das partículas de solo; a densidade do solo ( $\rho$ ) (Equação 4); e a porosidade total ( $\eta$ ) (Equação 5), onde  $v_v$  é o volume de poros (volume de ar somado ao volume de água).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{m_s}{V_T} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{V_v}{V_T} \quad (5)$$

A condutividade hidráulica é uma propriedade do meio poroso que expressa a facilidade com que a água se movimenta no seu interior, sendo um dos parâmetros fundamentais na descrição dos processos de fluxo da água subterrânea no solo (Hillel, 1998). A condutividade

hidráulica do solo pode ser expressa como função das propriedades do meio poroso, sobretudo a textura do solo, das propriedades do fluido transportado e do teor de umidade do solo (Equação 6).

$$K(\theta) = \frac{k\rho g}{\mu_{vd}} * K_r(\theta) \quad (6)$$

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

### 3.6.2 Equações de Fluxo no Solo

Richards (1931) combinou a equação de Darcy com a equação da continuidade para descrever o movimento da água no solo em condições de não saturação. Sua equação ficou conhecida como equação de Richards e pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\theta) * \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right) \right) \quad (7)$$

Sendo  $K(\theta)$  a condutividade hidráulica em função da umidade ( $\theta$ ).

### 3.6.3 Comportamento da Infiltração

As propriedades hidráulicas da zona não saturada controlam os fluxos de água no solo e influenciam fortemente a redistribuição da precipitação pluvial e muitos processos geomorfológicos, geoquímicos ou ecológicos. As propriedades hidráulicas do solo são parâmetros fundamentais para se compreender e modelar os processos de infiltração e evapotranspiração (Finnegan *et al.*, 2021).

Em termos gerais, a infiltração é um processo desacelerado. Começa com uma taxa alta que vai diminuindo gradativamente com o tempo até atingir um determinado nível relativamente constante. Essa diminuição da taxa é função do decréscimo do gradiente de potencial total da água do solo na superfície. Depois de certo tempo, quando o gradiente tende a uma estabilidade, a taxa torna-se praticamente constante. Essa taxa em tempos longos converge para o valor da condutividade hidráulica saturada do solo (Coutinho, 2011).

O modelo Beerkan é um método semifísico que estima, por meio da textura e estrutura do solo, os parâmetros da curva de retenção  $\theta(h)$  e da curva de condutividade hidráulica  $K(\theta)$  em função da umidade volumétrica (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2019). Onde as curvas  $\theta(h)$  e  $K(\theta)$  podem ser completamente descritas através de parâmetros de forma ( $n$  e  $\eta$ ) e parâmetros de normalização ( $\theta_s$ ,  $K_s$ ,  $h_g$ ). Os primeiros estão intimamente relacionados com a textura do solo e são obtidos a partir da curva de distribuição granulométrica e da porosidade, enquanto que os demais parâmetros são dependentes da estrutura da matriz do solo e determinados através dos experimentos de infiltração (Vergni *et al.* 2024; Guimarães, 2020).

#### 3.6.4 Metodologia BEST

O método BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters*) desenvolvido por Lassabatère *et al.* (2006) obtém as propriedades hidrodinâmicas do solo, como a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), a curva de retenção da água e a curva de condutividade hidráulica, a partir da modelagem dos experimentos de infiltração Beerkan.

Os métodos BEST-slope, BEST-intercept e BEST-steady representam abordagens complementares para a estimativa dos parâmetros hidráulicos do solo a partir de dados de infiltração Beerkan. O BEST-slope baseia-se na análise da inclinação da curva de infiltração acumulada em função da raiz quadrada do tempo, permitindo calcular a sorvidade ( $S$ ) e a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) por meio de relações lineares. Já o BEST-intercept utiliza o coeficiente linear da mesma curva para estimar a difusividade ( $D$ ) e outros parâmetros, sendo particularmente sensível às condições iniciais do solo. Por outro lado, o BEST-steady foca no regime de infiltração em estado estacionário, oferecendo uma avaliação robusta da  $K_s$  em condições de equilíbrio hidrodinâmico. Essas variações metodológicas permitem adaptar a análise às características específicas do solo e aos objetivos do estudo (Lassabatère *et al.*, 2006; Yilmaz *et al.*, 2010).

### 3.7 Balanço Hídrico

O balanço hídrico é uma análise do ciclo hidrológico, cujos resultados mostram a quantidade de água em cada componente em um sistema fechado. Seu estudo ajuda a compreender a disponibilidade e os impactos dos usos da água. Pode ser calculado para uma camada de solo, um trecho de rio ou uma bacia hidrográfica.

O balanço de água em determinado volume de solo pode ser determinado pela lei de conservação das massas em certo período de tempo (Equação 8):

$$\Delta A = P + I + AC - D - R - ET - IT \quad (8)$$

Onde:

$\Delta A$ : variação no armazenamento de água no perfil de solo (mm);

P: precipitação pluvial (mm);

I: irrigação (mm);

AC: ascensão capilar (mm);

D: drenagem interna (mm);

R: escoamento superficial (mm);

ET: evapotranspiração real (mm);

IT: interceptação de água pela vegetação (mm).

A variação no armazenamento de água no perfil de solo ( $\Delta A$ ) é determinada pela diferença dos valores de umidade volumétrica obtidos do perfil nos tempos inicial e final de cada período considerado (Equação 9):

$$\Delta A = [\theta_f - \theta_i]L = Af - Ai \quad (9)$$

Em que  $A_i$  e  $A_f$  representam os armazenamentos, em mm, acumulados de água inicial e final, respectivamente.

As perdas e/ou os ganhos de água através da base do perfil de solo estudado, ou seja, drenagem interna (D) ou ascensão capilar (AC) são estimadas com base na equação de Darcy-Buckingham (Equação 10):

$$q = -K(\theta)\nabla\Psi_t \quad (10)$$

Onde:

$q$ : densidade de fluxo da água no solo ( $\text{mm d}^{-1}$ ), em que um valor positivo indica AC e negativo indica D;

$K(\theta)$ : condutividade hidráulica do solo a uma dada umidade ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$\Psi_t$ : gradiente de potencial total na direção vertical (cm,  $\text{cm}^{-1}$ )

A curva de retenção pode ser obtida de maneira semidireta a partir da metodologia Beerkan. E os dados das curvas de retenção da água no solo, obtidos pelo algoritmo BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments), são utilizados para ajustar a equação proposta por Van Genuchten (1980) (Equação 11) utilizando-se o programa RETC:

$$\theta(h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ 1 + \left( \frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad (11)$$

$$\text{com } m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1 \text{ Mualen (1976)}$$

$$\text{e } m = 1 - \frac{1}{n}, n > 2 \text{ Burdine (1953)}$$

Na equação do balanço hídrico, a precipitação (P) é o termo de maior valor e varia espacial e temporalmente. A Equação (8) é baseada na hipótese de que a precipitação não depende do tipo de vegetação, mas existem outras hipóteses segundo as quais o tipo de vegetação pode afetar a precipitação. A evapotranspiração (E) é importante no balanço hídrico, sendo a segunda ou terceira em peso na equação do balanço, enquanto o escoamento (R) é afetado pela estrutura da vegetação e pela precipitação. Embora a evapotranspiração influencie as trocas de energia e água na atmosfera, hidrosfera e biosfera, a medição direta da ET é difícil como consequência da complexidade do sistema solo-planta-atmosfera, razão pela qual vários métodos para avaliar a ET em nível regional foram desenvolvidos e propostos (Gavrilescu, 2021).

O balanço hídrico no solo depende da capacidade da água proveniente da precipitação ou da irrigação de infiltrar no solo pela superfície e ser armazenada na camada do solo e, por outro lado, da capacidade de drenagem de água da zona radicular pela força gravitacional, do escoamento superficial de água que não infiltra no solo pela sua superfície, da água perdida da superfície pela evaporação e da água absorvida pelas raízes das plantas e utilizada para a transpiração (Ritchie, 1998).

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentado uma breve revisão de literatura, mostrando a evolução dos temas pesquisados sobre telhados verdes e pavimentos permeáveis, nos últimos vinte anos. São apresentados alguns estudos e seus resultados.

### 4.1 Estudos envolvendo o uso de técnicas compensatórias

Vários estudos têm mostrado a eficiência do uso de técnicas compensatórias de drenagem urbana para benefício quantitativo e qualitativo do ciclo hidrológico (Santos *et al.*, 2013; Melo *et al.*, 2014; Coutinho, 2016; Vijayaraghavan, 2016; Costa *et al.*, 2020; Rodrigues e Santini Junior 2021). Jackisch e Weiler (2015) estudaram o desempenho hidrológico de técnicas compensatórias em Freiburg, na Alemanha, por meio da utilização de pavimentos permeáveis, telhados verdes e áreas de bioretenção. Os resultados mostraram que as técnicas capturaram 73% de todos os volumes precipitados, proporcionando uma redução de até 87% no volume de escoamento e redução do pico de descarga.

Os autores Melo *et al.* (2016) estudaram o uso da trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo das águas pluviais urbanas, por meio de um projeto experimental instalado na cidade de Recife. Avaliando as funções de armazenamento de água no interior do sistema e a infiltração o estudo observou que a trincheira teve capacidade de infiltrar, no mínimo 63,57%, dos volumes de entrada.

Algumas startups associadas ao Parque Tecnológico e Científico da UFPE como a PLUVI, que atua no desenvolvimento de projetos de captação, tratamento e distribuição de água da chuva para fins potáveis; e a MOVERDES que atua na implementação e manutenção de módulos sustentáveis de telhados verdes feitos com polipropileno reciclável; são exemplos de como as pesquisas podem ser colocadas em prática.

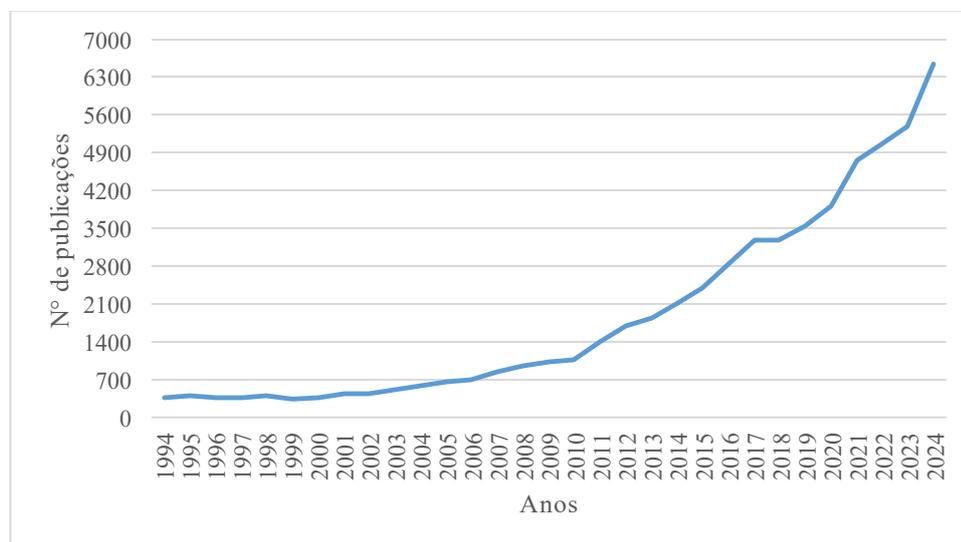
Esses resultados apoiam que as técnicas compensatórias podem ser usadas como uma alternativa aos sistemas convencionais de drenagem urbana e gestão de águas pluviais.

Nos dois tópicos seguintes veremos um panorama geral dos estudos sobre telhados verdes e pavimentos permeáveis nos últimos 20 anos (1994-2024).

### 4.2 Estudos envolvendo o uso de Telhados verdes

Na Figura 4 observa-se a tendência de crescimento das publicações sobre o tema *Green roofs* no banco de dados *Science Direct*, utilizado nas principais revistas científicas do mundo entre os anos de 1994 e 2024.

Figura 4 – Número de publicações entre 1994-2024 no Science Direct sobre telhados verdes.



Fonte: Autoria própria (2024).

A revisão realizada por Getter e Rowe (2006) destaca diversos benefícios associados ao uso dos telhados verdes, entre os quais estão a redução do volume e o retardo do escoamento superficial, o aumento da vida útil das coberturas, a promoção da biodiversidade, a mitigação da poluição do ar e a valorização estética.

No que se refere ao retardo do escoamento superficial das águas pluviais, Oliveira (2009) analisou a implantação de telhados verdes e evidenciou seu potencial promissor para o controle desse escoamento, incluindo a possibilidade de uso como parte do sistema de irrigação do próprio telhado. Simulações de chuvas realizadas pelo autor indicaram uma retenção de até 56% do volume precipitado e um retardo de até 8 minutos no pico de escoamento em comparação a telhados convencionais.

Estudos conduzidos por Tassi *et al.* (2014) avaliaram o controle quantitativo do escoamento superficial por meio do monitoramento de um modelo experimental durante 17 meses, com foco na determinação do coeficiente de escoamento, volume máximo de armazenamento e retardo no escoamento para diferentes eventos pluviométricos. A partir desses dados, foi calibrado um modelo de balanço de volumes, que possibilitou um prognóstico de longo prazo. Os resultados mostraram uma redução de aproximadamente 62% do escoamento superficial, com retardos na geração de escoamento e diminuição das vazões de pico, embora a eficiência

tenha sido fortemente influenciada pelas condições climáticas e pela umidade antecedente do solo.

A performance de telhados verdes extensivos foi investigada por Sakagami (2016), que construiu três protótipos com substratos distintos e submeteu-os a simulações de chuva com intensidades variando entre 52 e 127 mm/h. As avaliações foram realizadas com diferentes durações de chuva (5, 15, 30 e 60 min) e intervalos de 6 dias entre os eventos, revelaram bom desempenho dos módulos, especialmente diante da chuva mais rápida e intensa, onde todo o volume de água de entrada foi armazenado. Para as demais situações, obteve-se desempenho satisfatório dos módulos, uma vez que não houve escoamento superficial, apenas subsuperficial, com tempo de retardo observado.

A influência da área do telhado verde na capacidade de redução do escoamento superficial também foi investigada por Persch (2019), ao longo de um ano, com telhados extensivos de áreas variadas (1 m<sup>2</sup>, 3 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup> e 12 m<sup>2</sup>). Durante o monitoramento foi possível identificar volumes de precipitação escoados, a efetividade na retenção do escoamento, a influência das características de precipitação na resposta hidrológica e o estabelecimento vegetal. Os resultados mostraram que telhados maiores proporcionam melhor retenção e controle do escoamento, reforçando a hipótese de que a capacidade de armazenamento e o atraso na geração do escoamento superficial aumentam com a área do sistema. Fatores como o volume máximo precipitado em uma hora e a umidade antecedente do substrato também foram identificados como determinantes na efetividade do telhado verde.

No que se refere ao desempenho térmico, Leonardo (2021) analisou a implementação de três protótipos, um telhado ecológico, um telhado verde e outro convencional na cidade do Recife no período de abril a junho de 2021. Como resultados obteve que o telhado verde apresentou a maior redução de temperatura ambiente interna, já o telhado ecológico demonstrou melhor conservação da temperatura interna do ambiente, além de redução da umidade relativa do ar.

O uso de resíduos plásticos reciclados como camada de drenagem em telhados verdes como alternativa sustentável e econômica foi estudado por Cascone e Gagliano (2022). Eles avaliaram a utilização de grânulos de polietileno derivado da reciclagem de resíduos plásticos agrícolas provenientes de coberturas de estufas de cinco tipos. Foi avaliado o desempenho térmico e comparado com a perlita e a argila expandida, os resultados dos testes termofísicos mostraram que os grânulos de plástico reciclado têm características dentro da faixa solicitada para camadas drenantes, muito semelhantes às da perlita e, portanto, podem ser usados como uma alternativa

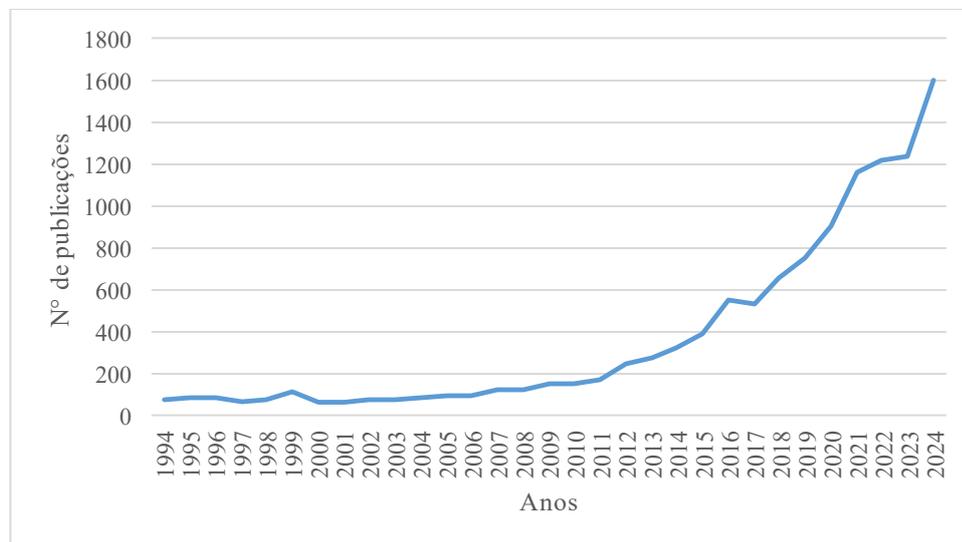
aos materiais de drenagem natural. Além disso, o polietileno reciclado teve desempenhos mecânicos e ambientais melhores do que os produtos comerciais, tendo o menor aumento de peso em condições saturadas, reduzindo assim a carga extra aplicada em telhados de edifícios existentes.

Simulações realizadas por Câmara *et al.* (2024) consideraram a hipótese de substituição de coberturas existentes por telhado verde em três cenários pré-urbanizado, atual e variando o percentual de telhados verdes de 30% a 100% por meio do PCSWMM. Como resultado, a vazão de pico foi reduzida entre 0,74 e 2,10 m<sup>3</sup>/s, além do tempo ter sido retardado de 31 a 90 minutos. A diminuição do nível do rio no pico variou entre 4 e 13 cm e o volume foi reduzido entre 67,42 e 190,81 m<sup>3</sup>.

### 4.3 Estudos envolvendo o uso de Pavimentos Permeáveis

Na Figura 5 é demonstrado um gráfico elaborado com base no banco de dados Science Direct, utilizando como palavra-chave *Permeable pavements*, onde é possível observar a tendência de crescimento das publicações sobre o tema, nas principais revistas do scopus entre os anos de 1994 e 2024.

Figura 5 - Número de publicações entre 1994-2024 no Science Direct sobre pavimentos permeáveis.



Fonte: Autoria própria (2024).

A eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial foi avaliada por Araújo *et al.* (2000), por meio de simulações de chuva em seis diferentes tipos de pavimentos, que incluíam solo compactado, pavimento impermeável de concreto convencional, blocos de paralelepípedo, concreto intertravado (semipermeáveis), blocos de concreto vazados

e concreto poroso (permeáveis), todos com área de 1 m<sup>2</sup>. Para uma chuva de projeto de 10 minutos de duração e tempo de retorno de 5 anos, a superfície impermeável apresentou coeficiente de escoamento 44% superior ao gerado na superfície de solo compactado; e os volumes de escoamento superficiais gerados pelos pavimentos semipermeáveis foram inferiores aos do concreto convencional. Nas simulações de chuva realizadas nos pavimentos permeáveis, praticamente, não ocorreu escoamento superficial, obtendo-se um coeficiente de escoamento de 0,01 para o concreto poroso, de 0,5 para os blocos vazados, e de 0,95 para a superfície impermeável.

O uso do concreto poroso permeável como pavimento alternativo para estacionamentos e áreas de pedestres, visando a manutenção de árvores existentes, foi estudado, ao longo de dois anos, por Volder *et al.* (2009). Foram avaliados três tratamentos, sem pavimento, concreto padrão impermeável e concreto poroso permeável para testar sua capacidade de modificar o crescimento e a troca gasosa foliar de árvores *Liquidamber styraciflua* de 15 a 18 anos. Com os dados obtidos os pesquisadores concluíram que o concreto poroso permeável não ofereceu benefícios adicionais para garantir o crescimento e a sobrevivência de árvores maduras pré-existentes.

A caracterização hidráulica e a simulação do comportamento de um pavimento permeável piloto com blocos de concreto vazados foram realizadas por Coutinho *et al.* (2016), em um estacionamento na Cidade do Recife. As propriedades hidráulicas não-saturadas dos solos foram obtidas pelo método BEST aplicado a 52 ensaios de infiltração realizados, cujas curvas de retenção de água e condutividade hidráulica permitiram a modelagem da infiltração, evaporação e escoamento no Hydrus 1D para o período de um ano. A simulação numérica mostrou que essa técnica é uma ferramenta essencial para o gerenciamento de escoamento superficial em áreas urbanas.

O monitoramento sistemático por quatro anos realizado por Kumar *et al.* (2016) em áreas de estacionamento com pavimentos permeáveis, submetidos a manutenção por aspersão de água seguida de varrição mecanizada, permitiu identificar as superfícies com maior capacidade drenante, listadas em ordem decrescente: asfalto poroso, concreto poroso e blocos intertravados. Apesar de uma redução significativa nas taxas de infiltração a partir do terceiro ano, os pavimentos continuaram capazes de drenar uma lâmina de água aproximadamente 380 vezes maior que a chuva de projeto da bacia, sem ocorrência de escoamento superficial durante o período.

A hidrodinâmica de um pavimento permeável de blocos de concreto implantado em estacionamento da Cidade do Recife foi avaliada por Marinho *et al.* (2020). O estudo realizou a análise em doze pontos do pavimento com solos arenoso, franco arenoso e areia franca. A capacidade de infiltração foi analisada em escala real através do método Beerkan, utilizando o algoritmo BEST Slope e Intercept e a modelagem numérica com o Hydrus-1D, a fim de prever o cenário de funcionamento do dispositivo. Com isso foi possível simular a modelagem do movimento da água pelo pavimento permeável e verificar a capacidade máxima de retenção do fluxo hidráulico. Os resultados obtidos neste estudo demonstram satisfatoriamente a eficiência hidrodinâmica desse pavimento para o amortecimento da vazão afluyente.

Quanto à influência dos parâmetros hidrodinâmicos no comportamento hidráulico de um pavimento permeável, Costa *et al.* (2020) aplicaram o modelo Hydrus 1D para simular os processos de transferência de água em um pavimento instalado em Recife. Inicialmente foi realizada uma análise de sensibilidade do grau de refinamento da malha para simular os processos de transferência no pavimento permeável. O método da superfície de resposta foi aplicado aos parâmetros hidrodinâmicos para realizar a análise de sensibilidade. Os cálculos foram realizados para escalas horárias e diárias. Como resultado, observou-se que a utilização de dados de entrada meteorológicos com diferentes resoluções temporais para a simulação dos processos de transferência de água na seção do pavimento permeável demonstrou que os parâmetros hidrodinâmicos têm maior influência do que as variáveis climáticas na resolução diária. Concluindo-se que a análise de sensibilidade da malha e dos parâmetros pode influenciar pesquisas que buscam compreender os processos de transferência de água em uma estrutura como um pavimento permeável através da equação de Richards, gerando menor custo operacional e agilizando as simulações.

Os efeitos do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia hidrográfica Ribeirão do Santa Rita, localizada no município de Fernandópolis-SP, foram avaliados por Rodrigues e Santini Junior (2021), por meio da utilização do software SWMM. Foi analisado a vazão de pico e o tempo de resposta de diversos cenários, com o intuito de verificar o potencial de atenuação das inundações. Como resultado obtiveram que a atenuação da vazão de pico chegou a 33,72% utilizando-se trincheiras de infiltração, 31,38% para pavimentos permeáveis, 31,08% empregando jardins de chuva e 12,20% com telhados verdes, no cenário com todas as técnicas compensatórias, a redução foi de até 37,29%.

A viabilidade do uso de pavimento permeável intertravado como alternativa compensatória para drenagem urbana foi analisada em Recife, entre março e maio de 2023, por Menezes e

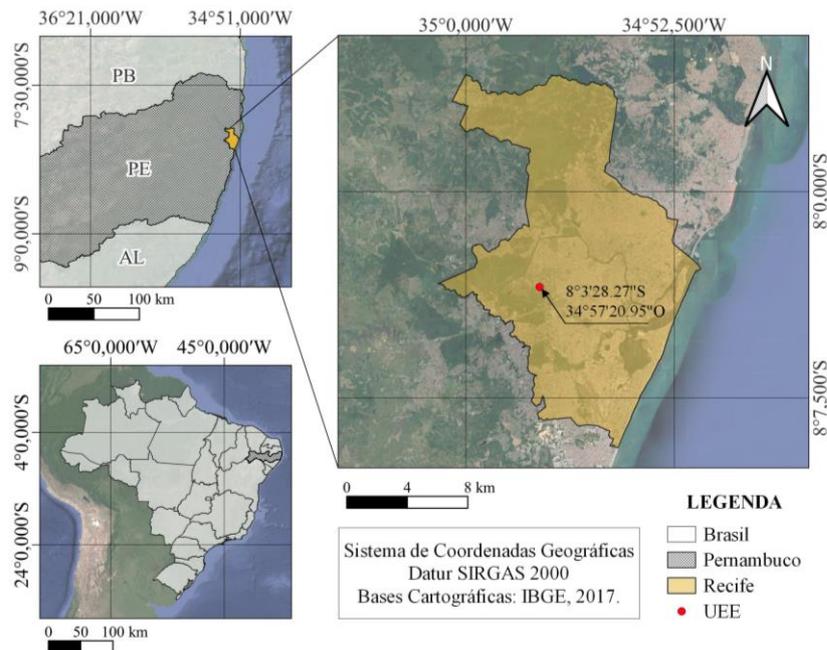
Cabral (2023). O desempenho hidráulico do pavimento apresentou alto coeficiente de permeabilidade recém construído ( $3,26 \times 10^{-3}$  m/s) e bom comportamento nas simulações de chuvas intensas e no evento chuvoso natural, permitindo a infiltração e, conseqüentemente, redução dos volumes totais escoados, caracterizando-se como potencial mitigador dos alagamentos urbanos.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Localização e caracterização da área de estudo

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi construído um projeto piloto, denominado Unidade Ecotecnológica Experimental (UEE), localizado na cidade de Recife, especificamente no Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

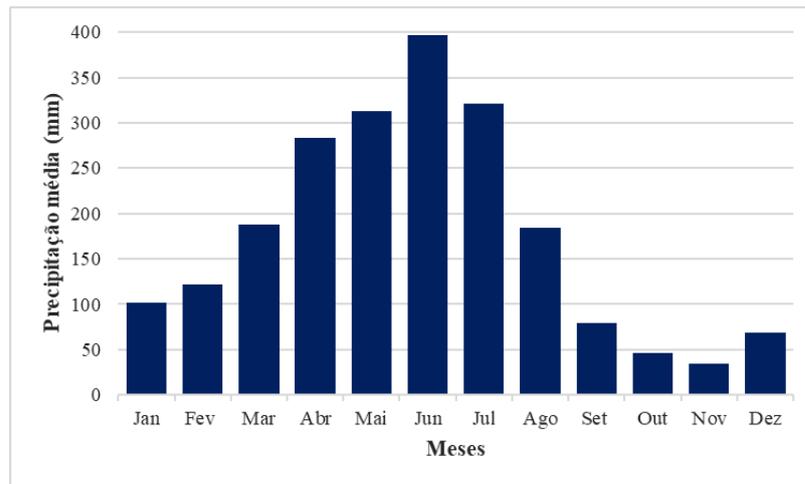
Figura 6 – Localização da área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2024).

Recife, capital do estado de Pernambuco, possui, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), uma população de 1.488.920 habitantes, sendo uma região urbanizada com densidade demográfica de 6.803 habitantes/km<sup>2</sup>. O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo As (quente e úmido), com estação chuvosa entre os meses de março a agosto, onde concentra cerca de 70% do volume total de precipitação. As temperaturas médias anuais variam entre 24°C e 30°C. A média mensal da série histórica de precipitação pluviométrica no local, referente a estação da Várzea da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2023) no período de 1994 a 2021 apresenta uma média anual de 2140 mm.

Figura 7 – Média mensal da série histórica de precipitação pluvial – 1994 a 2021 – Estação Várzea, Recife-PE.



Fonte: Autoria própria (2024).

Segundo dados da APAC (2023) a evaporação média anual chega a cerca de 1234 mm e a umidade relativa do ar possui valor médio mensal de 80%, o que reflete as características de uma área próxima da região costeira, onde o oceano libera massas de ar úmido que são trazidas da costa para o continente. O tempo médio de insolação por ano é de cerca de 2.600 horas, indicando um bom número de dias ensolarados.

## 5.2 Detalhamento da UEE

A Unidade Ecotecnológica Experimental (UEE) possui uma área total de 150 m<sup>2</sup>, é composta por um projeto piloto contendo sete módulos experimentais, uma unidade de coleta de dados e uma estação meteorológica (Figura 8). A área de alocação da UEE é delimitada por um muro com uma cerca de dimensões 10 m de largura por 15 de comprimento.

Figura 8 – Unidade Ecotecnológica Experimental.



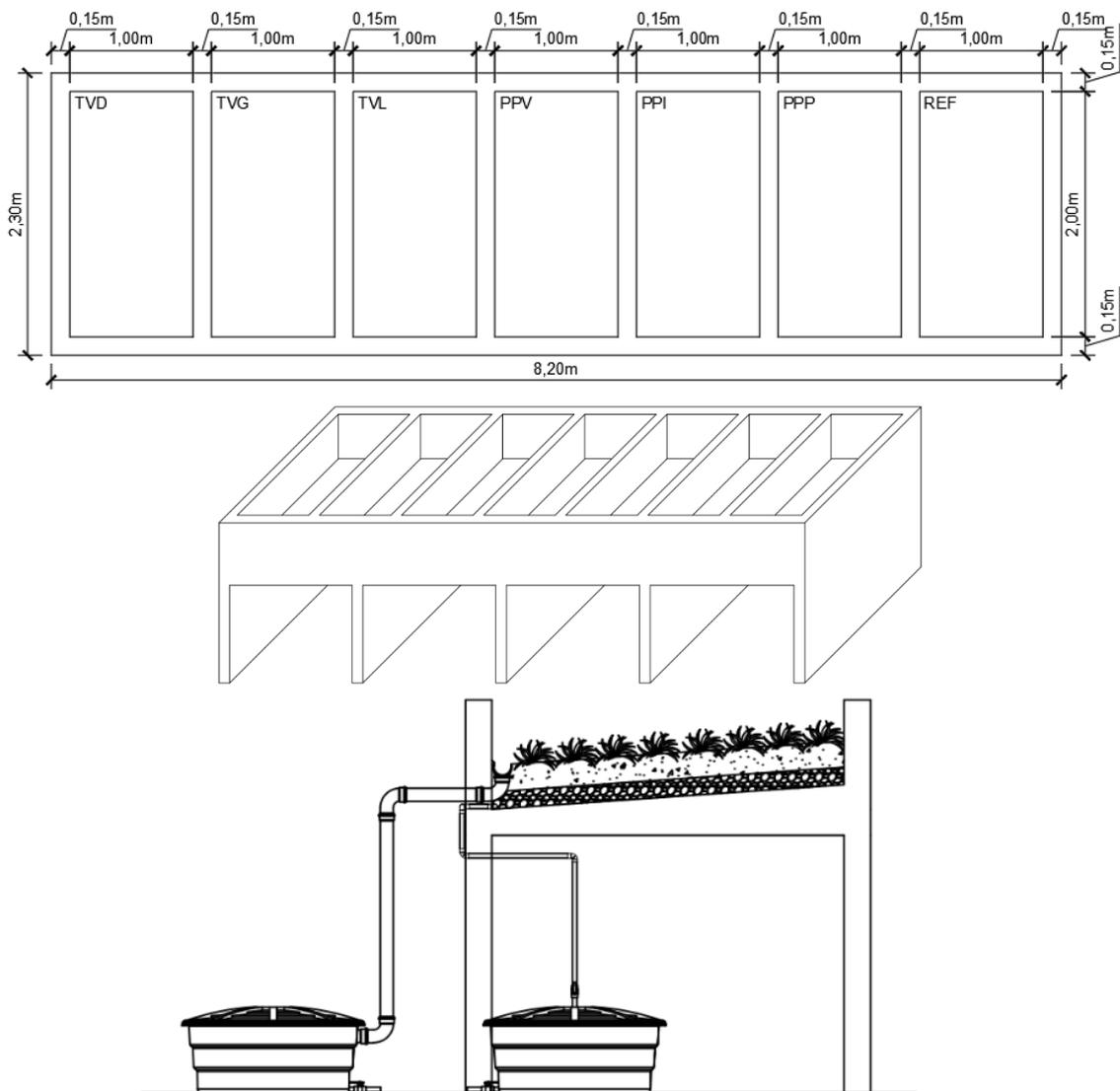
Fonte: Autoria própria (2024).

### 5.2.1 Projeto piloto com sete Módulos

O piloto é composto por 7 módulos, todos com laje impermeabilizada, sobre as quais foram montados diferentes tipos de técnicas compensatórias. A laje possui uma declividade de 7%. A estrutura do piloto é composta por alvenaria de tijolos cerâmicos e laje pré moldada com placas de poliestireno expandido (EPS).

Os 7 módulos estão dispostos um ao lado do outro (Figuras 9 e 10), onde cada um possui área individual útil de 2,15 m<sup>2</sup>, a altura interna da laje até o final da platibanda é de 0,60 m. A altura do protótipo foi de 1,50 e um pé direito de 0,86 m, 12 cm de espessura de laje e 0,15 m de espessura da parede. Na parte inferior, os ambientes permaneceram abertos, garantindo a ventilação.

Figura 9 – Esquema dos módulos.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 10 – Projeto piloto contendo sete módulos no topo.



Fonte: Aatoria própria (2023).

Durante a execução do projeto piloto, foram realizados diferentes serviços, incluindo a capinação do terreno, a construção das paredes e das lajes, a criação das platibandas, o chapisco, os acabamentos como emboço e reboco, contrapiso, impermeabilização da laje com argamassa, pintura com cal, reforço na impermeabilização da laje e a realização de testes de estanqueidade.

Para correção de pequenas fissuras que surgiram após a cura do concreto que poderiam causar posteriores vazamentos foi aplicado graute em toda a superfície, por meio de pincelagem nas paredes e fundo dos módulos. Em seguida aplicou-se uma camada de impermeabilizante. Para verificar a eficácia da impermeabilização, foi realizado teste de estanqueidade, conforme a NBR 15.575-3 (ABNT, 2013), que dispõe sobre o desempenho de edificações habitacionais e estabelece que, a face inferior da laje de cobertura e os encontros com as paredes e pisos adjacentes devem permanecer secos por 72 horas quando submetidos à lâmina d'água de no mínimo 10 mm.

Figura 11 – Correção das fissuras com graute, a esquerda, e camada impermeabilizante, a direita.



Fonte: Aatoria própria (2023).

### 5.2.2 Instalações hidráulicas

Foi elaborado um projeto de instalações hidráulicas para coleta e armazenamento do volume de chuva infiltrado (drenagem subsuperficial) e do volume escoado (drenagem superficial). Sendo assim, cada módulo possui duas caixas de água de 500 L, uma para monitoramento do escoamento superficial e outra para a infiltração, totalizando 14 caixas para todo o piloto.

Para instalação dos sistemas de drenagem, os módulos foram perfurados na parede para onde converge a declividade, sendo um furo na região central para a drenagem subsuperficial e outro na lateral para a drenagem superficial. A selagem entre a parede e o PVC foi realizado utilizando graute, e o acabamento foi feito com adesivo epóxi com o objetivo de minimizar os riscos de vazamento na área.

O sistema de drenagem superficial é composto por calhas de 100 mm (Figura 12) que fazem a condução da água individual de cada módulo, por meio de uma tubulação, para uma caixa de água de 500 L.

Figura 12 – Sistema de drenagem superficial do piloto.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a captação da drenagem subsuperficial foi utilizado um sistema de drenos longitudinais (Figura 13) construído pela perfuração de um tubo PVC de 25 mm com uma broca de 6 mm. Esse dreno fica no fundo da laje, no lado para onde converge a declividade, e conduz a água por uma tubulação de PVC de 25 mm até uma caixa de água de 500 L que faz o armazenamento da água que infiltra.

Figura 13 - Sistema de drenagem subsuperficial do piloto.

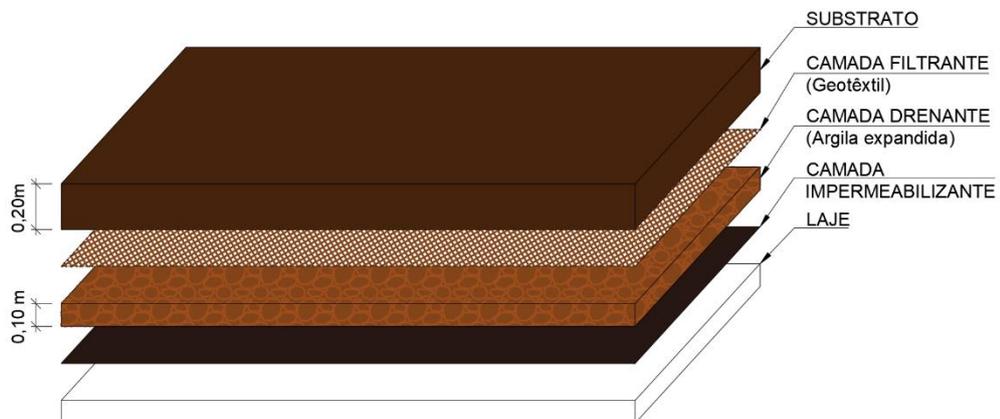


Fonte: Autoria própria (2023).

### 5.2.3 Composição interna dos módulos

A composição básica de todos os módulos segue a mesma estrutura interna (Figura 14), diferenciando-se apenas na camada superficial de cada um.

Figura 14 – Composição das camadas internas dos módulos.



Fonte: Autoria própria (2024).

A composição interna de cada módulo segue a seguinte estrutura:

- Camada impermeabilizante: a impermeabilização das coberturas tem como objetivo eliminar qualquer possibilidade de infiltração que possa danificar a laje e interferir nos resultados dos volumes acumulados.
- Camada drenante: composta por 10 cm de argila expandida do tipo 3222 (Figura 15), possuindo diâmetro médio de 27 mm e densidade aparente de 0,45 g/cm<sup>3</sup>. A argila expandida é um material cerâmico leve com um núcleo alveolar produzido pela queima

de argila natural a temperatura 1200°C, possui formato arredondado e variadas granulometrias que definem os diversos tipos de aplicação. Para Dilly (2016), a argila expandida é bem aceita como camada drenante pois possui baixa densidade, não gerando uma sobrecarga considerável para a estrutura, além de ser um material com custo relativamente baixo e de fácil aquisição.

Figura 15 – Execução de camada de argila expandida.



Fonte: Autoria própria (2023).

- Camada filtrante: composta por uma manta geotêxtil Bidim RT 14 não tecido agulhada de filamentos contínuos 100% poliéster (Figura 16). A manta foi fixada na parede utilizando caneletas e parafusos.

Figura 16 – Posicionamento do Bidim nos módulos.



Fonte: Autoria própria (2023).

- Substrato: constituído por 20 cm de substrato (Figura 17) proveniente de leiras de compostagem fornecidos pela BERSO (Biorrefinaria Experimental de Resíduos Sólidos Orgânicos), um Laboratório de pesquisa da UFPE associado ao INCT OndaCBC. O substrato foi previamente peneirado em peneira mecânica para retirada de objetos estranhos, como pedaços de vidro e latas de refrigerante, de raízes e fragmentos de plantas, e de torrões agregados. A colocação do substrato foi realizada com auxílio de uma pá, a fim de evitar a compactação mecânica do solo. Após eventos de chuva, foi verificado a altura do substrato, que sofreu compactação e acomodação natural, e adicionado material extra até completar a altura total de 20 cm.

Figura 17 – Peneiramento e montagem da camada de substrato.



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 5.2.4 Composição da camada superficial dos módulos

A composição da camada superficial de cada módulo, da direita para esquerda de acordo com a Figura 17, é a seguinte:

- Módulo 1 (TVD): Telhado verde utilizando a espécie *Dianella tasmanica* (Dionela);
- Módulo 2 (TVG): Telhado verde utilizando a espécie *Axonopus comprissus* (Grama São Carlos);
- Módulo 3 (TVD): Telhado verde utilizando a espécie *Alternanthera dentata* (Lutiela);
- Módulo 4 (PPV): Superfície permeável utilizando blocos de concreto vazados com grama São Carlos, dispostos diretamente sobre o substrato;
- Módulo 5 (PPI): Superfície permeável utilizando blocos de concreto intertravados, dispostos diretamente sobre o substrato;

- Modulo 6 (PPP): Superfície permeável utilizando concreto poroso constituída por placas quadradas de 19 cm e espessura de 3 cm, rejuntadas com argamassa;
- Modulo 7 (REF): Laje impermeável como superfície de controle.

Figura 18 – Vista superior dos módulos.



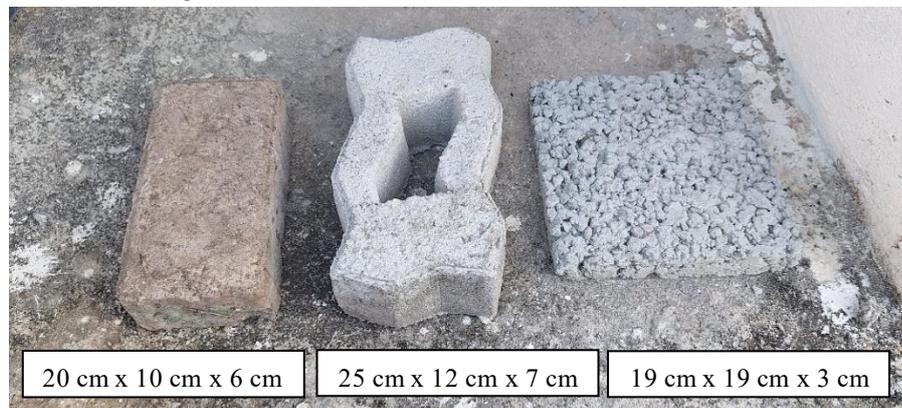
Fonte: Aatoria própria (2024).

Figura 19 – Espécies utilizadas nos módulos: Lutiela, Grama São Carlos e Dionela.



Fonte: Aatoria própria (2024).

Figura 20 – Pavimentos utilizados nos módulos.



20 cm x 10 cm x 6 cm

25 cm x 12 cm x 7 cm

19 cm x 19 cm x 3 cm

Fonte: Aatoria própria (2024).

Na escolha do tipo de vegetação optou-se por espécies de pequeno porte, indicadas para telhados verdes semi-intensivos. Onde os principais critérios considerados foram a resistência e adaptação ao clima local, que possui intervalos de períodos com altas temperaturas e outros com chuvas abundantes, capacidade de absorção de água, nível de cobertura vegetal, facilidade de manutenção e adaptação a exposição contínua a sol pleno.

As espécies vegetais escolhidas foram a Dionela (*Dianella tasmanica*) para o módulo 1 (TVD) e a Lutiela (*Alternanthera dentata*) para o módulo 3 (TVL) e Grama São Carlos (*Axonopus comprissus*) para o modulo 2 (TVG), para os dois primeiros foram utilizadas 50 mudas de cada para o plantio e para a grama tapetes de 50 x 50 cm.

- Manutenção: foram realizadas várias ações durante o desenvolvimento da pesquisa, dentre elas irrigação, poda e limpeza. A irrigação foi realizada manualmente, sempre que necessário, utilizando um regador, exceto nos finais de semana e dias de chuva. Foi utilizado um volume variável a depender da necessidade da espécie, geralmente 16L por irrigação. Também foi realizado, quinzenalmente, a limpeza das espécies invasoras e poda das folhagens.

#### 5.2.5 Caracterização dos materiais

Foram realizados alguns ensaios para caracterizar fisicamente os materiais utilizados nas camadas, foi analisado a capacidade de absorção de água da argila expandida e a densidade de partícula, o teor de matéria orgânica e a distribuição granulométrica do substrato.

- A densidade de partículas foi realizada pelo método do balão volumétrico conforme Manual de Métodos de Análise de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017).

Figura 21 – Realização de ensaio de densidade de partícula.



Fonte: Aatoria própria (2024).

- O teor de matéria orgânica foi determinado pela NBR 13600 (ABNT, 2022): Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 °C.

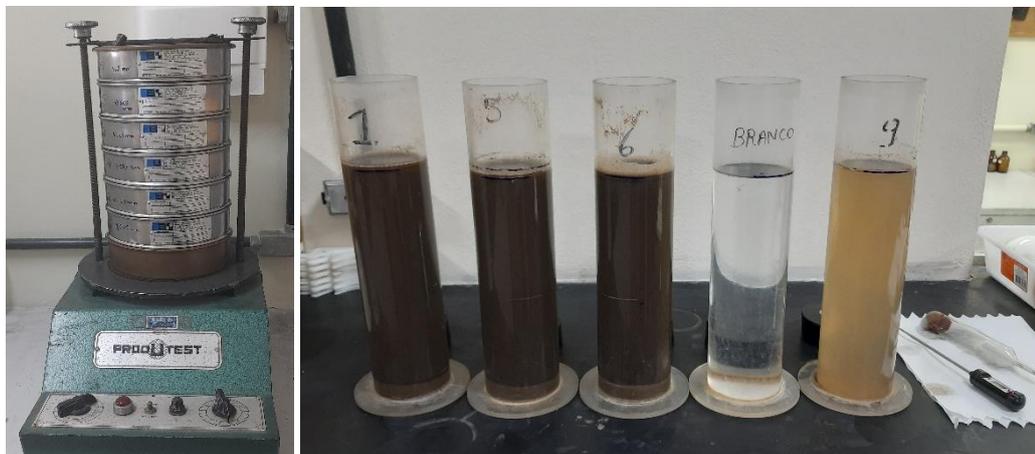
Figura 22 – Realização de ensaio de matéria orgânica.



Fonte: Aatoria própria (2024).

- Para o substrato foi realizado o ensaio de granulometria por meio da NBR 7181 (ABNT, 2016): Solo – Análise granulométrica.

Figura 23 – Realização do ensaio de granulometria.



Fonte: Aatoria própria (2024).

- Para a argila expandida foi realizado o ensaio para determinar a capacidade de absorção de água por meio da NBR 16917 (ABNT, 2021): Agregado graúdo – Determinação de densidade e da absorção de água.

Figura 24 – Realização do ensaio de absorção de água pela argila expandida.



Fonte: Autoria própria (2024).

- Ensaio de infiltração Beerkan

O método Beerkan foi originalmente desenvolvido para solos descobertos, mas tem sido adaptado para superfícies com revestimentos permeáveis (Ribas *et al.*, 2021; Marinho *et al.*, 2020; Coutinho *et al.*, 2020), apresentando valores coerentes. No entanto, na interpretação dos resultados deve-se levar em consideração algumas ressalvas, como por exemplo, o valor do  $K_s$  reflete o sistema de vazios estruturais do pavimento e não apenas a matriz porosa do solo, ou seja, refletindo o comportamento hidrodinâmico global do sistema (revestimento + substrato), e não apenas o solo. Isso porque o fluxo de água nestas estruturas é influenciado por macroporos, juntas ou poros artificiais, o que pode alterar a distribuição do fluxo em relação ao solo natural.

Foi realizado o ensaio de infiltração pelo método Beerkan utilizando um anel simples de 15 cm de diâmetro. Nos telhados verdes a camada de vegetação foi removida conservando a estrutura das raízes, em seguida o anel foi posicionado na superfície do solo e cravado aproximadamente 1 cm para evitar perdas laterais de água, no caso dos pavimentos foi utilizado uma mistura de bentonita e água para selar as laterais do encontro do anel com o pavimento. Um volume de 150 ml foi utilizado nos telhados verdes e no cobograma e de 50 ml nos demais pavimentos. Esse volume foi depositado no interior do anel no tempo 0 até que todo volume de água infiltrasse completamente e um segundo volume foi adicionado, e assim sucessivamente até um total de 10 pontos para o intertravado e 40 pontos para os demais.

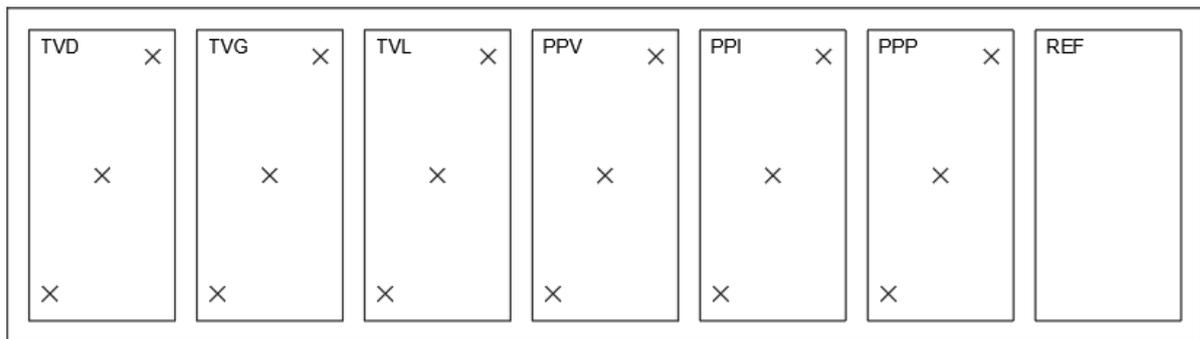
Figura 25 – Realização do ensaio de infiltração Beerkan.



Fonte: Autoria própria (2024).

O ensaio foi repetido em 3 pontos para cada módulo, de maneira distribuída ao longo da superfície, como pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Esquema com localização dos pontos de infiltração realizados.



Fonte: Autoria própria (2024).

Antes do início do ensaio foi coletada uma amostra deformada para determinação em laboratório da umidade inicial. Após finalizado o ensaio foram coletadas uma amostra deformada para determinação da umidade final e uma amostra indeformada para determinação da densidade. Neste trabalho foi utilizado o BEST com a versão do software Scilab.

### 5.3 Unidade de Coleta de Dados (UCD)

O piloto possui um sistema de sensoriamento e coleta de dados, de maneira a tornar automático a aquisição de dados pluviométricos, de umidade do solo e do volume de água armazenado nas caixas d'água. Foi construída uma edificação com área de 3,5 m<sup>2</sup> com a finalidade de acondicionar equipamentos e materiais, como os datalogger's dos sensores de nível e umidade do solo, além de realizar a coleta dos dados no local.

Figura 27 – UCD da UEE.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 5.3.1 Pluviometria

Para obtenção dos dados meteorológicos foi adquirida uma estação meteorológica profissional da empresa Plugfield modelo Plugstation WS22, com comunicação WI-FI. A mesma fornece, por meio de sensores, além dos dados de pluviometria, velocidade e direção do vento, temperatura e umidade do ar, intensidade luminosa e UV, pressão atmosférica, sensação térmica e ponto de orvalho estimados. A bateria é alimentada por um painel solar e os dados são transmitidos para uma plataforma online. O equipamento fornece registros a cada 10 minutos.

Figura 28 – Estação meteorológica da UEE.

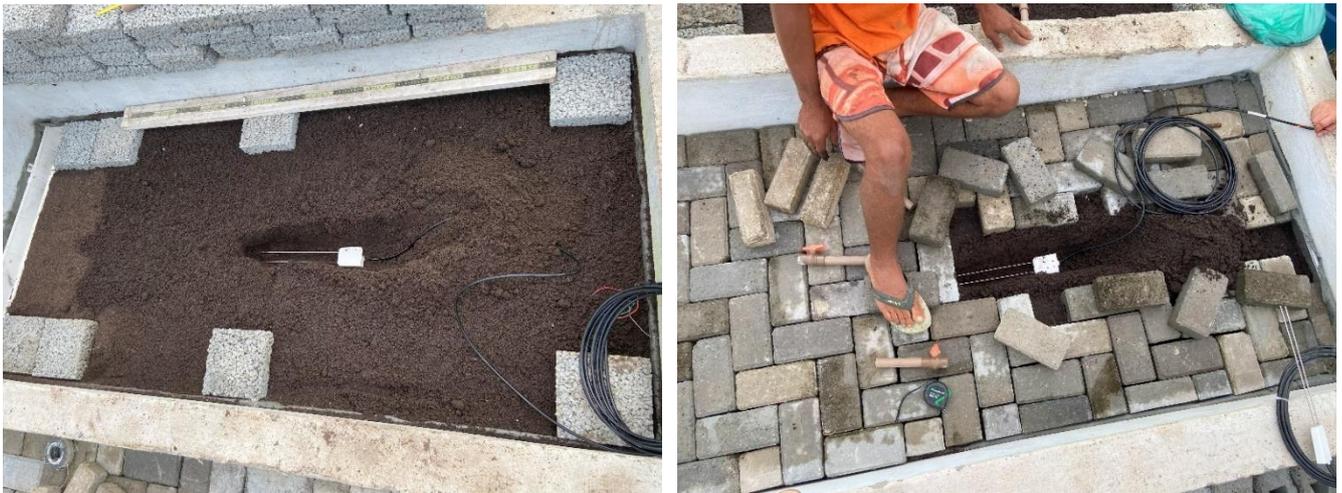


Fonte: Autoria própria (2024).

### 5.3.3 Umidade do solo

O equipamento utilizado para o monitoramento da umidade do solo é do tipo TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) modelo CS616 da Campbell *Scientific*. O mesmo foi instalado horizontalmente (Figura 29), no centro geométrico da camada de solo. Os sensores estão ligados a um sistema de coleta de dados do tipo datalogger CR1000X. O equipamento fornece registros a cada minuto.

Figura 29 – Instalação dos sensores de umidade do solo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Esse tipo de sensor é projetado para medir o conteúdo volumétrico de água (VWC) de solos e outros meios porosos. A informação do teor de água é derivada da sensibilidade da sonda à constante dielétrica do meio que envolve as hastes.

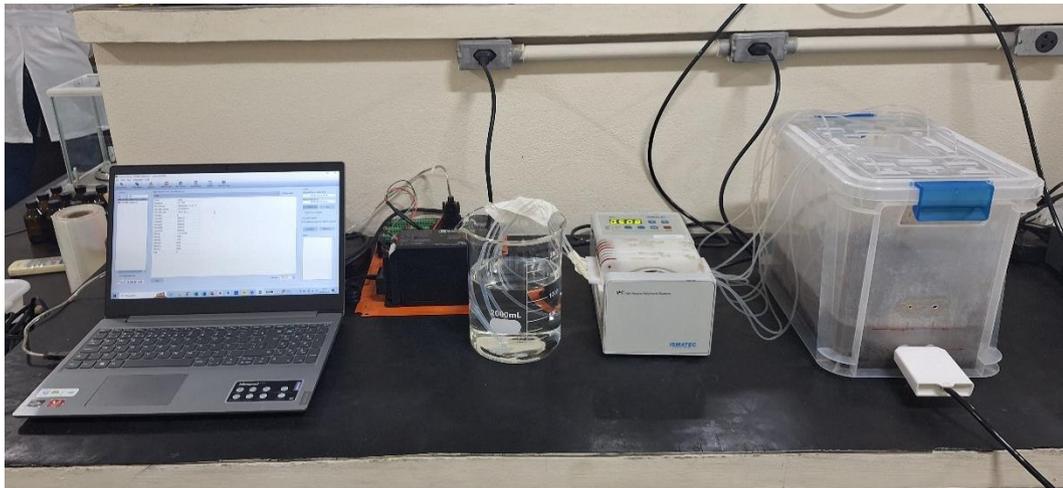
O sensor CS616 é um reflectômetro de duas hastes e sua saída é uma onda quadrada, com amplitude de 2,5 V e período de 0,7 a 1,6 ms. Ao ser conectado a um sistema de coleta de dados, um datalogger, a medida do período pode ser convertida em conteúdo volumétrico de água utilizando as equações de calibração fornecidas pelo fabricante. Sua saída sofre influência da condutividade elétrica do solo, quantidade de matéria orgânica e argila, comprimento do cabo e temperatura do ar. Duas propriedades que afetam sensivelmente a resposta do sensor são alta quantidade de argila, acima de 30%, e alta condutividade elétrica, acima de 1 dS/m-1). Se inserida verticalmente na superfície do solo a sonda irá indicar o teor de água nos 30 cm superiores do solo (Guimarães *et. al.*, 2010).

- Calibração do sensor de umidade do solo:

O manual do fabricante informa ser recomendado uma calibração específica para solos que contenham alto teor de matéria orgânica ou argila, pois esses materiais são altamente polares,

podendo afetar a resposta do sensor. Como o solo utilizado decorre de compostagem, sendo assim rico em matéria orgânica, mostrou-se necessário fazer a calibração dos sensores. A curva de calibração do equipamento foi realizada no laboratório de física do solo do DEN/UFPE (Figura 30).

Figura 30 – Calibração do sensor TDR.



Fonte: Autoria própria (2024).

Segundo o manual do fabricante dos sensores bastaria realizar a calibração para solo específico apenas para um sensor, obtendo desta maneira uma equação de ajuste que pode ser utilizada por um outro sensor de mesmo modelo, isto porque os sensores respondem com a mesma estabilidade e uniformidade à constante dielétrica.

O solo utilizado no experimento passou pela peneira com abertura de malha de 2 mm, foi seco ao ar por 48 horas e depois enviado para estufa a 105 °C por 72 horas (Figura 31), para que não houvesse perda de matéria orgânica por oxidação a temperatura da estufa foi mantida em  $105 \pm 5$  °C.

Figura 31 – Preparação do solo para realizar ensaio de calibração.



Fonte: Autoria própria (2024).

Foi montado um experimento em um recipiente retangular (Figura 32), com dimensões 33 cm de comprimento e 20 de largura, foi adicionado solo até a altura de 6 cm, pois segundo pesquisa de Santos Neto (2015) esse é o raio de alcance do sensor. Resultando em um volume útil de solo de 3960 cm<sup>3</sup>.

Foi utilizado 3780 g solo seco em estufa, o solo foi adicionado gradualmente, a cada 2 cm no interior do recipiente foi feita a homogeneização e compactação visando garantir parâmetros semelhantes ao solo natural. A densidade do solo foi aferida baseando-se na relação massa de solo por volume do recipiente, obtendo uma densidade de aproximadamente 0,95 g/cm<sup>3</sup>. A partir dos valores de densidade de partículas e densidade do solo, obtém-se a porosidade de 54% e assim o volume de água necessário para o experimento, 2138 cm<sup>3</sup>. A inserção do sensor no recipiente com solo foi realizada com o máximo de cuidado para evitar que ocasionar a criação de espaços de ar entre a amostra e as hastes.

Para realizar a saturação do solo com o volume de água pré-determinado utilizou-se uma bomba peristáltica com 8 capilares fazendo o gotejamento a uma vazão de 7 ml/min. Ao todo o experimento durou 5 horas e 5 minutos. O valor da temperatura foi mantido em 25 °C.

Figura 32 – Realização do ensaio de calibração.



Fonte: Autoria própria (2024).

A validação de equação de calibração de um sensor TDR visa à determinação de umidade volumétrica do solo com o intuito de aumentar a representatividade das avaliações dos sensores quanto a solos do tipo substrato.

### 5.3.4 Nível de água nas caixas

Para o monitoramento da capacidade de infiltração e do escoamento superficial foram utilizados sensores de nível tipo EPA-PR-WA010M06MM da empresa Ampeq nas caixas de água, juntamente com datalogger para aquisição dos dados. No total serão 14 sensores de nível, um para cada caixa de água.

O sensor é composto por mecanismos elétricos e uma capa protetora em aço inox, como demonstrado na Figura 33. O equipamento possui comprimento de 33,5 cm x 3,1 cm de diâmetro e pesa 700 gramas e seu tempo de medição é de 300 milisegundos. A faixa de temperatura segura para sua operação é de 2° C a 50° C. A faixa de medição do sensor é de 15 m com resolução de 6 mm e precisão de  $\pm 2$  cm. A alimentação do sensor é feita através da conexão via cabo com um datalogger.

Figura 33 – Sensor de nível de água.



Fonte: Autoria própria (2024).

O nível hidrostático nesses sensores é medido de forma indireta, ou seja, o nível é medido através da variação da pressão exercida pela coluna de líquido sobre o diafragma, uma membrana fina que sofre deflexão mecânica em função da variação da pressão exercida pela coluna de líquido sobre o mesmo. O equipamento fornece registros a cada minuto.

## 5.4 Balanço hídrico

O balanço de água em determinado volume de solo foi determinado pela lei de conservação das massas em certo período de tempo (Equação 8):

$$\Delta A = P + I + AC - D - R - ET - IT \quad (8)$$

A variação no armazenamento de água no perfil de solo ( $\Delta A$ ) foi determinada pela diferença dos valores de umidade volumétrica obtidos do perfil nos tempos inicial e final de cada período considerado (Equação 9):

$$\Delta A = [\theta f - \theta i]L = Af - Ai \quad (9)$$

Em que  $A_i$  e  $A_f$  representam os armazenamentos, em mm, acumulados de água inicial e final, respectivamente. Os valores de umidade foram obtidos por meio da constante dielétrica informada pelo sensor TRD. A precipitação foi obtida pelos dados da estação instalada no local. A irrigação foi contabilizada sempre que ocorreu, em uma planilha de monitoramento, sendo utilizado um regador calibrado de 8L. Os valores de ascensão capilar e interceptação de água pela vegetação foram desconsiderados para o presente estudo, no primeiro caso tendo em vista que a camada de solo está sobre uma laje impermeabilizada, e no segundo, considerando-se que esse volume será em sua maioria evaporado posteriormente. Os valores de drenagem interna e escoamento superficial foram contabilizados por meio da água armazenada nas caixas de água coletados, respectivamente, pelo sistema de drenos internos e de calhas superficiais. Já os valores de evapotranspiração real foram obtidos por meio da equação do balanço hídrico, por ser a única variável não medida em loco.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização físico-hídrica do substrato

#### 6.1.1 Teor de Matéria Orgânica

O teor de matéria orgânica obtido para o substrato foi de 13%, valor similar ao encontrado por Santos *et al.* (2013) em um estudo sobre telhados verdes. Percentual considerado alto para solos arenosos, mas não chegando a ser considerado um solo orgânico. Esse percentual melhora a fertilidade do solo, por ser um material rico em nutrientes, o que facilita o desenvolvimento das plantas dos tetos verdes. Também melhora a aeração e a permeabilidade do solo e facilita a retenção de água, reduzindo a necessidade de irrigação e aumentando a resiliência durante períodos de seca. Exatamente quanto mais de água será armazenada devido à presença matéria orgânica no solo dependerá da textura do solo e do tipo de matéria orgânica, se decomposta ou fresca (Getter, 2006).

O valor obtido é menor que os 30% informado no manual do fabricante para os quais a resposta do sensor de umidade é adequada. Nesse contexto, nota-se que o teor de matéria orgânica não compromete a confiabilidade dos resultados de umidade.

#### 6.1.2 Densidade do Solo, Porosidade Total e Teor de Absorção de Água

A densidade do solo obtida foi de 0,95 g/cm<sup>3</sup>, valor abaixo da média para solos arenosos devido à presença de matéria orgânica. A porosidade total foi de 54%, uma porosidade alta indica a predominância de vazios, ar e água, o que justifica o menor valor de densidade encontrado. Essa porosidade do solo é devida ao baixo grau de compactação do solo, o que compromete a retenção de água e facilita a drenagem interna. Di Prima *et al.* (2016), em seus estudos, observaram uma porosidade total com valor médio de 55,1% para um solo franco-arenoso.

O teor de absorção de água obtido para a argila expandida foi de 6%. Valor baixo, por isso, para efeitos de simplificação esse valor não foi considerado nos cálculos dos volumes. Tendo em vista que parte desse valor retido é liberado progressivamente para evaporação ou armazenamento nas caixas de água, já que ela não apresenta contato direto com o solo, sendo difícil mensurar em valores exatos. Sendo assim, todo volume faltante no sistema foi considerado como evapotranspiração.

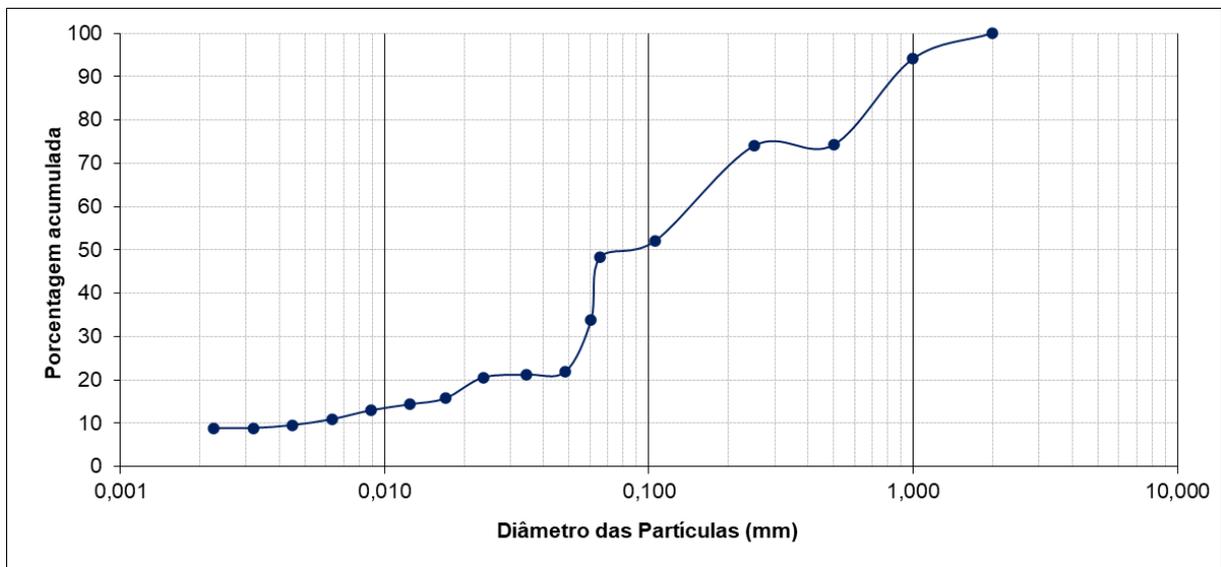
#### 6.1.3 Densidade de Partículas

O valor da densidade de partícula calculado pelo método do balão volumétrico foi de  $\rho_s = 2,06 \text{ g/cm}^3$ . A média para solos brasileiros varia entre 2,3 e 2,9  $\text{g/cm}^3$ , e quando não se tem maiores informações utiliza-se 2,65  $\text{g/cm}^3$ , isto porque os constituintes minerais predominantes nos solos são quartzo, feldspatos e silicatos de alumínio (Reichert *et al.*, 2007). Porém, para solos com altos teores de matéria orgânica o valor da densidade de partículas é menor, ficando entre 1,5  $\text{g/cm}^3$  e 2,2  $\text{g/cm}^3$ , pois a densidade da matéria orgânica varia entre 1,3  $\text{g/cm}^3$  e 1,5  $\text{g/cm}^3$ , logo quanto maior a quantidade de matéria orgânica menor a densidade do solo (Martinez, 2002). Corroborando com os resultados obtidos em outros estudos (Gomes *et al.*, 2019; Zorzeto *et al.*, 2014; Burak *et al.*, 2010).

#### 6.1.4 Textura do Solo

Na Figura 34 é apresentada a curva granulométrica obtida para o substrato utilizado no projeto. O ensaio foi repetido 3 vezes e o resultado apresentado corresponde à média dessas determinações. Observa-se uma predominância dos diâmetros das partículas na faixa de textura da areia. A classificação textural do solo é Franco Arenoso, com composição granulométrica de 9% de argila, 25% de silte e 66% de areia. Esse tipo de solo permite a rápida infiltração de água e dificulta sua retenção, como foi observado no presente trabalho.

Figura 34 – Curva granulométrica.



Fonte: Autoria própria (2024).

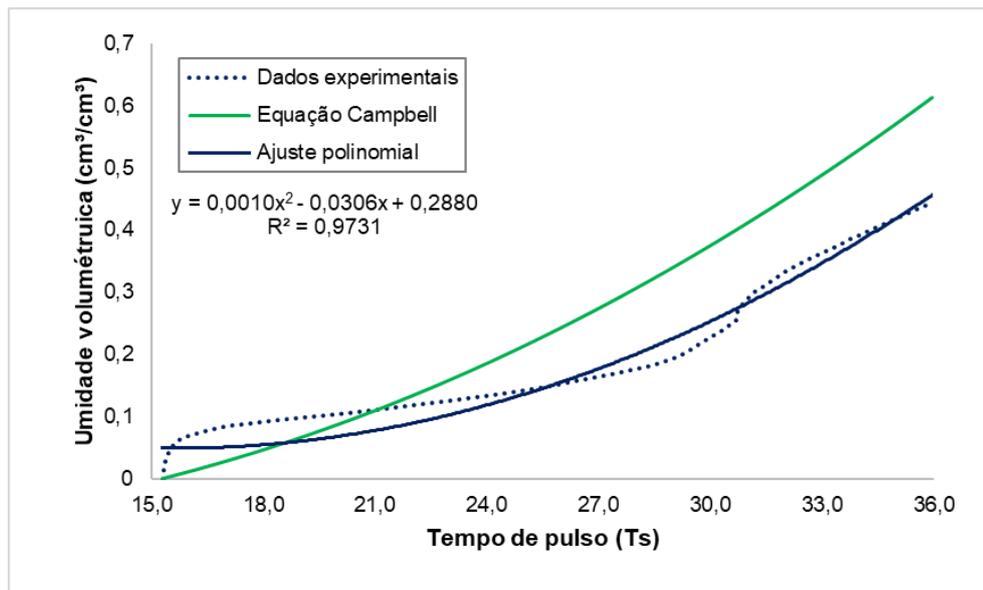
#### 6.1.5 Calibração dos Sensores de Umidade

O objetivo das calibrações é propor equações que relacionem o tempo de resposta do sensor ( $T_s$ ) com a umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) para o tipo de solo utilizado nesse estudo, de maneira mais eficiente que a equação quadrática, fornecida no manual do sensor. O

equipamento opera utilizando uma equação universal, portanto, o valor de  $\theta_v$  fornecido pelo aparelho será desconsiderado, somente levando em consideração o valor de  $T_s$ .

Na Figura 35 pode-se observar que a curva calculada, em azul, ajustada para os dados de  $T_s$  e  $\theta_v$  apresenta melhor ajuste que a equação padrão proposta pelo manual do sensor, em verde. A equação da Campbell superestima os valores de umidade e pressupõe um comportamento linear no início da saturação, não observado na prática.

Figura 35 – Calibração dos sensores TDR.



Fonte: Autoria própria (2024).

Ajustando os dados obtidos no experimento de calibração observou-se que uma equação polinomial de 2º grau (Equação 11), apresentou bom ajuste entre os valores. Pois o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,97, onde quanto maior o  $R^2$ , mais explicativo é o modelo, e melhor a equação se ajusta a resposta do sensor ao solo.

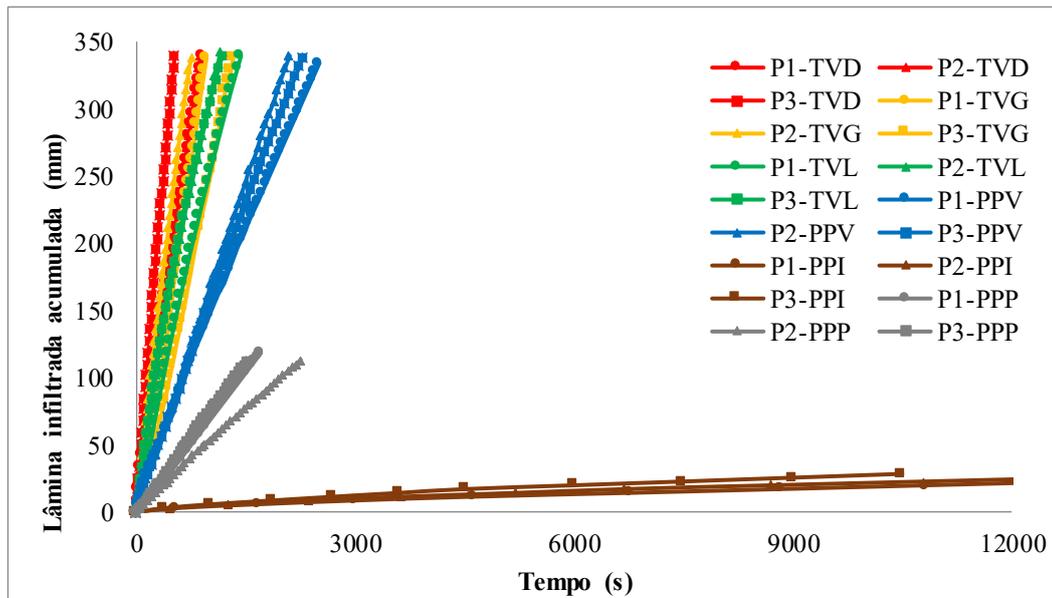
$$\theta_v = 0,001x^2 - 0,0306x + 0,288 \quad (11)$$

#### 6.1.6 Curva de Infiltração, Retenção e Condutividade Hidráulica

Na Figura 36 são apresentadas as 18 curvas de infiltração acumulada, obtidas pelo método Beerkan, para os 6 módulos, sendo 3 curvas para cada módulo, cada uma correspondendo a um ponto de infiltração ensaiado. Sendo TVD: Telhado verde-espécie Dionela, TVG: Telhado verde-espécie Grama são carlos, TVL: Telhado verde-espécie Lutiela, PPV: Pavimento-Bloco vazado com grama (cobograma), PPI: Pavimento-Intertravado, PPP: Pavimento-Concreto poroso.

Os ensaios tiveram duração variando entre 600s para os telhados verdes até 16000s para o intertravado. A curta duração, considerando o volume adotado de 150 ml, para os pontos realizados nas superfícies com vegetação, pode ser explicada pela porosidade do solo, textura do solo e densidade de raízes da vegetação que formam caminhos preferenciais que facilitam a infiltração da água.

Figura 36 – Lâmina Infiltrada acumulada (mm) em função do tempo (s) para 18 ensaios de infiltração.



Fonte: Autoria própria (2024).

É possível perceber que o TVD teve uma infiltração mais rápida que os demais, variando entre 600s a 900s, o TVG e TVL tiveram tempos bem semelhantes, entre 750s a 1400s, e o PPV um tempo um pouco mais longo, entre 2000s a 2500s. Já o PPI teve o tempo mais longo de todos, entre 11000s a 16000s, o PPP apresentou um tempo entre 1600s a 2200s para o volume adotado. Desempenho esperado dado a classe textural franco arenosa do solo e a interferência sofrida na superfície dos módulos em decorrência da cobertura.

As curvas de infiltração apresentaram comportamento semelhante ao observado por Marinho *et al.* (2020) e Bezerra *et al.* (2022), o primeiro realizado para um pavimento permeável e o segundo para uma trincheira de infiltração, ambos em Recife, nos pontos de solo franco arenoso.

O algoritmo BEST estima os parâmetros hidrodinâmicos da equação de van Genuchten com base na curva granulométrica, informações de massa específica, umidade e lâmina infiltrada acumulada. O algoritmo permite estimar a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) e mais seis parâmetros ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $h_g$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $S$ ), conforme o regime de infiltração predominante, transiente ou estacionário, observado durante o ensaio. Em alguns pontos os ensaios precisaram ser refeitos pois o BEST teve dificuldade de identificar e distinguir a fase estacionária da

transiente, devido ao comportamento da curva, em que os intervalos de tempo se mantiveram praticamente constantes desde o início.

Os parâmetros de forma e hidrodinâmicos das curvas de retenção e condutividade hidráulica estão apresentados na Tabela 2, obtidos pelos métodos BEST Slope, Intercept e Steady, com base na hipótese Burdine Van Genuchten.

A aplicação dos métodos Slope, Intercept e Steady permitiu avaliar a sensibilidade dos parâmetros hidráulicos do solo a diferentes estratégias de ajuste, fase inicial, intermediária e final do processo de infiltração. Para o conjunto de dados analisado, os três métodos apresentaram resultados coerentes com o tipo de solo (franco arenoso com presença de matéria orgânica), sem discrepâncias significativas entre si que comprometessem a interpretação, capturando nuances do comportamento hidrodinâmico do solo nas fases transiente e estacionária. Aumentando a confiabilidade das estimativas e possibilitando a identificação de possíveis limitações associadas à aplicação de cada abordagem.

Nos gráficos de retenção e condutividade hidráulica serão apresentadas apenas as curvas referentes ao BEST Intercept, objetivando uma melhor visualização, pois ele forneceu uma estimativa intermediária, apresentando valores menos extremos entre os três métodos e com menor variabilidade. A diferença entre os métodos Intercept, Slope e Steady se refletiu no deslocamento das curvas, mas o comportamento geral entre os modelos se manteve coerente com as características físicas esperadas de cada superfície.

A variabilidade entre cada ponto ensaiado para o mesmo módulo foi muito baixa, devido as condições controladas de compactação, manuseio, composição do solo e vegetação. Portanto, na Tabela 2 foram apresentados apenas o valor médio dos 3 pontos para cada módulo.

Embora a composição textural do solo seja a mesma para todos os módulos (telhados verdes e pavimentos permeáveis), observam-se variações das propriedades hidrodinâmicas, que podem ser explicadas por diferenças na distribuição espacial e disposição das raízes de cada espécie, e nos pavimentos pela influência da cobertura de concreto.

Tabela 2 – Parâmetros hidráulicos médios para cada módulo obtidos pelo BEST Slope, Intercept e Steady, mediante a hipótese Burdine van Genuchten.

LOCAL	MÉTODO	$\theta_s$	hg (mm)	Ks (mm/h)	n	$\eta$	m	Cp	S (mm/s <sup>0,5</sup> )
TVD	SLOPE	0,524	-192,572	216,124	2,229	11,727	0,103	2,265	2,580
	INTERCEPT	0,524	-131,366	305,697	2,229	11,727	0,103	2,265	2,534
	STEADY	0,524	-131,366	291,486	2,229	11,727	0,103	2,265	2,475
	$\bar{x}$	0,524	-151,768	271,102	2,229	11,727	0,103	2,265	2,530
	$\sigma$	0,000	28,853	39,306	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043
	CV	0,000	19,011	14,499	0,000	0,000	0,000	0,000	1,699
TVG	SLOPE	0,495	-107,994	129,600	2,234	11,532	0,105	2,255	3,407
	INTERCEPT	0,495	-85,208	132,021	2,234	11,532	0,105	2,255	3,314
	STEADY	0,495	-85,208	114,672	2,234	11,532	0,105	2,255	3,282
	$\bar{x}$	0,495	-92,804	125,431	2,234	11,532	0,105	2,255	3,335
	$\sigma$	0,000	10,742	7,672	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053
	CV	0,000	11,575	6,116	0,000	0,000	0,000	0,000	1,593
TVL	SLOPE	0,483	-224,955	114,527	2,237	11,454	0,106	2,250	2,281
	INTERCEPT	0,483	-136,624	180,445	2,237	11,454	0,106	2,250	2,231
	STEADY	0,483	-136,624	170,399	2,237	11,454	0,106	2,250	2,168
	$\bar{x}$	0,483	-166,067	155,123	2,237	11,454	0,106	2,250	2,227
	$\sigma$	0,000	41,640	28,998	0,000	0,000	0,000	0,000	0,046
	CV	0,000	25,074	18,693	0,000	0,000	0,000	0,000	2,071
PPV	SLOPE	0,539	-16,663	332,202	2,227	11,829	0,102	2,271	1,282
	INTERCEPT	0,539	-63,708	185,208	2,227	11,829	0,102	2,271	1,701
	STEADY	0,539	-63,708	211,957	2,227	11,829	0,102	2,271	1,820
	$\bar{x}$	0,539	-48,026	243,122	2,227	11,829	0,102	2,271	1,601
	$\sigma$	0,000	22,177	63,928	0,000	0,000	0,000	0,000	0,231
	CV	0,000	46,177	26,295	0,000	0,000	0,000	0,000	14,405
PPI	SLOPE	0,539	-5,432	17,223	2,227	11,829	0,102	2,271	0,124
	INTERCEPT	0,539	-11,516	12,999	2,227	11,829	0,102	2,271	0,214
	STEADY	0,539	-11,516	11,246	2,227	11,829	0,102	2,271	0,199
	$\bar{x}$	0,539	-9,488	13,823	2,227	11,829	0,102	2,271	0,179
	$\sigma$	0,000	2,868	2,509	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039
	CV	0,000	30,227	18,150	0,000	0,000	0,000	0,000	22,065
PPP	SLOPE	0,539	-12,290	142,201	2,227	11,829	0,102	2,271	0,293
	INTERCEPT	0,539	-23,770	85,485	2,227	11,829	0,102	2,271	0,733
	STEADY	0,539	-23,770	97,153	2,227	11,829	0,102	2,271	0,781
	$\bar{x}$	0,539	-19,944	108,279	2,227	11,829	0,102	2,271	0,602
	$\sigma$	0,000	5,412	24,454	0,000	0,000	0,000	0,000	0,219
	CV	0,000	27,136	22,584	0,000	0,000	0,000	0,000	36,430

Fonte: Autoria própria (2025).

Os parâmetros de forma dependem principalmente da textura do solo, sendo proporcionais às dimensões e à curva de distribuição das partículas (Haverkamp *et al.*, 1998), por isso temos valores bem próximos entre si para todos os pontos em todos os módulos.

Ao se analisar estudos que avaliaram os parâmetros m, n e  $\eta$  para diferentes classes texturais, como Santos e Silva (2012) que observaram um valor de n igual a 2,19 e 2,42 para um solo franco arenoso; Souza *et al.* (2008) o n variou de 2,13 a 2,16; Marinho *et al.* (2020) encontraram valores de 2,23 e 2,24 para n; todos os valores próximos aos observados por França

Neto *et al.* (2021); também corroboram com o trabalho desenvolvido por Lassabatère *et al.* (2006) e Santos *et al.* (2012); temos que os valores observados por esses autores estão bem próximos aos obtidos no presente trabalho.

O parâmetro  $h_g$ , diferente dos parâmetros  $n$  e  $\eta$ , não depende da textura do solo, mas sim da estrutura do solo e da existência de poros hidraulicamente ativos. O  $h_g$  foi o parâmetro que apresentou a maior variabilidade entre os módulos.

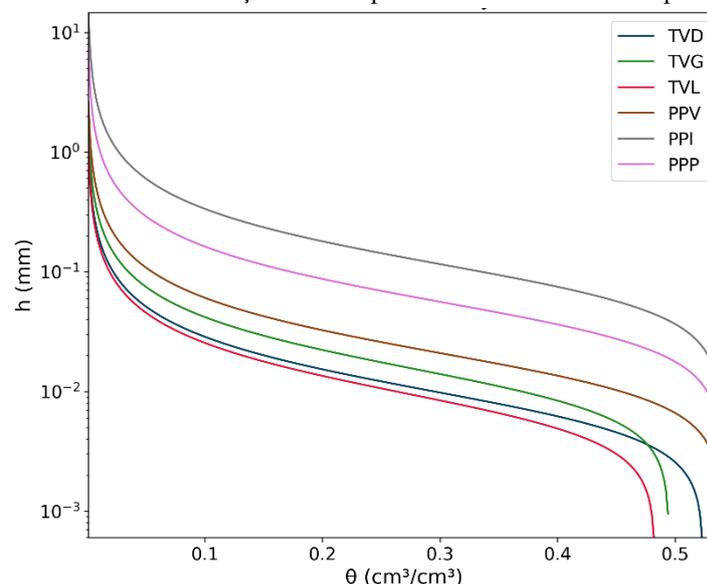
Avaliando solos franco arenosos Montenegro e Montenegro (2006) obtiveram valores médios de  $K_s$  da ordem de 0,0825 mm/s. Shwetha e Varija (2015) registraram um valor médio para  $K_s$  de 0,0193 mm/s. Aiello *et al.* (2014) obtiveram um valor médio de 0,0048 mm/s, com valor mínimo de 0,0023 mm/s e valor máximo de 0,0130 mm/s. Todos na mesma faixa de valores observados no presente trabalho.

A sorvidade ( $S$ ), que traduz a capacidade do solo de absorver água por capilaridade, dependendo essencialmente da variação do teor volumétrico de água entre o início e final da infiltração, foi maior para os telhados e menor para os pavimentos.

Após obter os valores relativos aos parâmetros de forma ( $m$ ,  $n$  e  $\eta$ ) e de normalização ( $\theta_s$ ,  $H_g$  e  $K_s$ ) das equações de retenção e condutividade hidráulica, foi possível delinear as respectivas curvas de  $h(\theta)$  e  $K(\theta)$ .

A curva característica do solo ou curva de retenção de água no solo é a relação entre o potencial matricial de água no solo e a umidade do solo. As curvas de retenção determinam a quantidade de água que cada ponto estudado consegue armazenar em determinado potencial matricial ( $h$ ). Na figura 37 temos as 6 curvas de retenção, ajustadas utilizando os parâmetros médios de cada pavimento, obtidas pelo BEST Intercept.

CFigura 37 – Curvas de retenção médias para cada módulo obtidas pelo BEST Intercept.



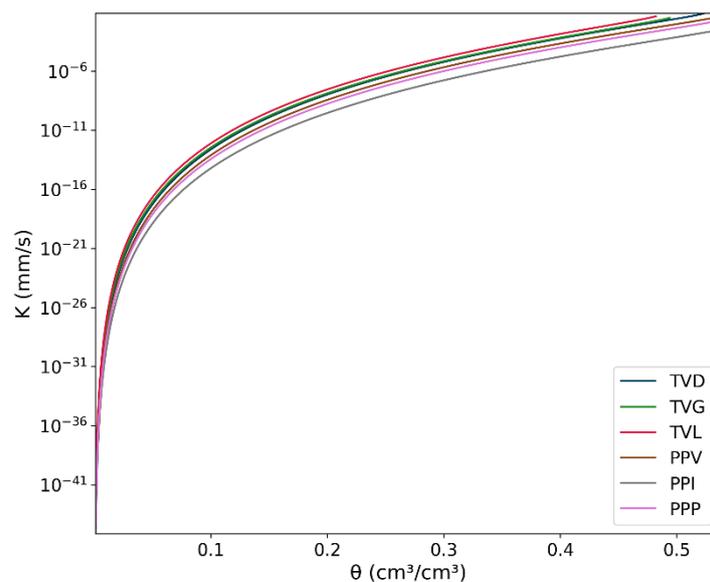
Fonte: Autoria própria (2025).

As curvas de retenção mostradas na Figura 37 indicam diferenças importantes entre os seis módulos de superfície analisados. Observa-se que os telhados verdes (TVD, TVG e TVL) apresentaram menor capacidade de retenção de água em relação aos pavimentos permeáveis, indicando baixa capacidade de armazenamento de água no perfil. Os pavimentos intertravado e poroso apresentaram as curvas mais afastadas das demais, com maior capacidade de retenção. De maneira geral a diferença entre as curvas não é tão grande e o comportamento foi bem semelhante entre si.

O solo utilizado possuía 13% de matéria orgânica no momento do ensaio, parte dela composta de MO estável, bem decomposta, com húmus, e parte por MO fresca. A presença de matéria orgânica hidrofóbica, como folhas e raízes superficiais, causa repelência à água e interferem de maneira complexa com os poros e as partículas minerais, inibindo o molhamento. A presença desses compostos hidrófobos ocasiona alterações na sortividade, interferindo diretamente na capilaridade e na curva de retenção da água no solo, diminuindo o volume de água retido (Vogelmann *et al.*, 2015).

A curva de condutividade hidráulica do solo é a relação entre a condutividade hidráulica e a umidade volumétrica, contribui para o melhor entendimento do comportamento da água no solo ensaiado. Na figura 38 temos as 6 curvas de condutividade hidráulica, ajustadas utilizando os parâmetros médios de cada pavimento, obtidas pelo BEST Intercept.

Figura 38 – Curvas de condutividade hidráulica médias para cada módulo obtidas pelo BEST Intercept.



Fonte: Autoria própria (2025).

Nas curvas de condutividade hidráulica, Figura 38, observa-se uma tendência clara de diminuição exponencial da condutividade (K) com a redução do conteúdo de água, como

previsto pelo modelo de Van Genuchten. As superfícies vegetadas (TVD a PPV) mantêm valores levemente maiores de condutividade, o que reforça sua função no escoamento e recarga hídrica. O concreto poroso (PPP) também apresentou bom desempenho, embora levemente inferior ao dos telhados verdes, enquanto o pavimento intertravado (PPI) mostrou a menor condutividade. Essa baixa condutividade de PPI indica pouca continuidade de poros ou presença de compactação, o que compromete a infiltração. De maneira geral temos um comportamento bem semelhante e uma proximidade entre todas as curvas. A coerência geral entre os resultados obtidos e o comportamento físico previsto para cada tipo de superfície reforça a confiabilidade dos parâmetros utilizados nas simulações.

Essa diferença nas propriedades hidrodinâmicas pode ser ocasionada por fatores que interferem diretamente na condutividade hidráulica, como textura e estrutura do solo, dimensão e conectividade entre os poros, grau de compactação, teor e tipo de matéria orgânica, presença de minerais, além da classe textural.

A Dionela apresenta raízes curtas e fibrosos, podendo contribuir para melhorar a drenagem sem contribuir muito para agregação estrutural. A grama São Carlos apresenta raízes rasteiras e estolhos que formam uma espécie de tapete, sendo fibrosas e superficiais, podem ter aumentado a agregação e contribuído para reter um pouco mais de água, sem comprometer o fluxo. A Lutiela tem um sistema radicular fasciculado, finas e ramificadas, podem ter melhorado a estrutura do solo, aumentando retenção sem reduzir K tanto. A grama associada aos blocos vazados permite infiltração e, ao mesmo tempo, cria estrutura radicular e aumenta a porosidade. A compactação natural provocada pelos blocos intertravados e a ausência de vegetação provavelmente reduziram a porosidade e compactaram o solo gerando menor retenção e rápida perda de condutividade. Já o concreto poroso permite alta condutividade pela estrutura porosa superficial.

## **6.2 Monitoramento**

O período de monitoramento para a pesquisa foi de 6 meses, com início em 01 de maio a 31 de outubro de 2024, abrangendo os meses que historicamente apresentam valores de pluviometria elevados para a região estudada. Foi selecionado um evento durante o mês de junho com valor elevado de precipitação para análise mais detalhada do comportamento do sistema.

Nos resultados não serão apresentados os dados do módulo 7, pois a laje apresentou problemas estruturais e na impermeabilização. Onde na mesma ocorreram volumes de infiltração em alguns eventos maiores que os valores de escoamento superficial. Nos módulos

de teto verde (TVD, TVG e TVL) a componente do escoamento superficial não será considerada, pois neles a camada de solo sofreu acomodação após o crescimento das raízes e cedeu alguns centímetros, ficando abaixo da calha de drenagem superficial, não sendo possível, portanto, determinar quanto do volume precipitado seria escoado superficialmente caso estivessem no mesmo nível.

### *6.2.1 Balanço Hídrico*

O balanço hídrico é uma ferramenta essencial para avaliar a dinâmica da água em um sistema, permitindo quantificar entradas, saídas e variações de armazenamento. Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação dessa metodologia, destacando os principais aspectos da área de estudo.

Como componentes do balanço temos: precipitação, armazenamento de água na camada de solo, drenagem interna, evapotranspiração real, irrigação manual e escoamento superficial. Para facilitar os cálculos do balanço hídrico e a interpretação dos resultados todos os volumes foram convertidos em milímetros (mm). A precipitação foi utilizada conforme fornecida pela estação, o volume da irrigação manual dividido pela área do módulo, a umidade do solo por meio da Equação 9, o valor do nível das caixas de água foi primeiro feito uma relação de equivalência aproximada entre a altura de água e o volume correspondente contido de água na caixa e depois dividido pela área do módulo, já a evapotranspiração foi o resultado da resolução da Equação 8.

Nas Figuras de 39 a 44 pode-se observar os componentes do balanço hídrico de maneira contínua durante o período de monitoramento, de maio a outubro, para cada uma das superfícies. Nos gráficos sempre que temos uma drenagem interna de valor 0 mm ocorrendo de maneira súbita, corresponde ao esvaziamento das caixas d'água. Os valores de evapotranspiração, para efeito de melhor visualização nos gráficos tendo em vista a quantidade de variáveis, foram utilizados como sendo negativos. O ajuste desses dados, em tempo real, não foi tão bom devido à simplicidade da equação do balanço hídrico não ser capaz de representar o *delay* entre o início da precipitação e o impacto sobre as demais variáveis do sistema, porém de maneira global, ao se analisar um determinado período os valores foram coerentes e compatíveis com a literatura.

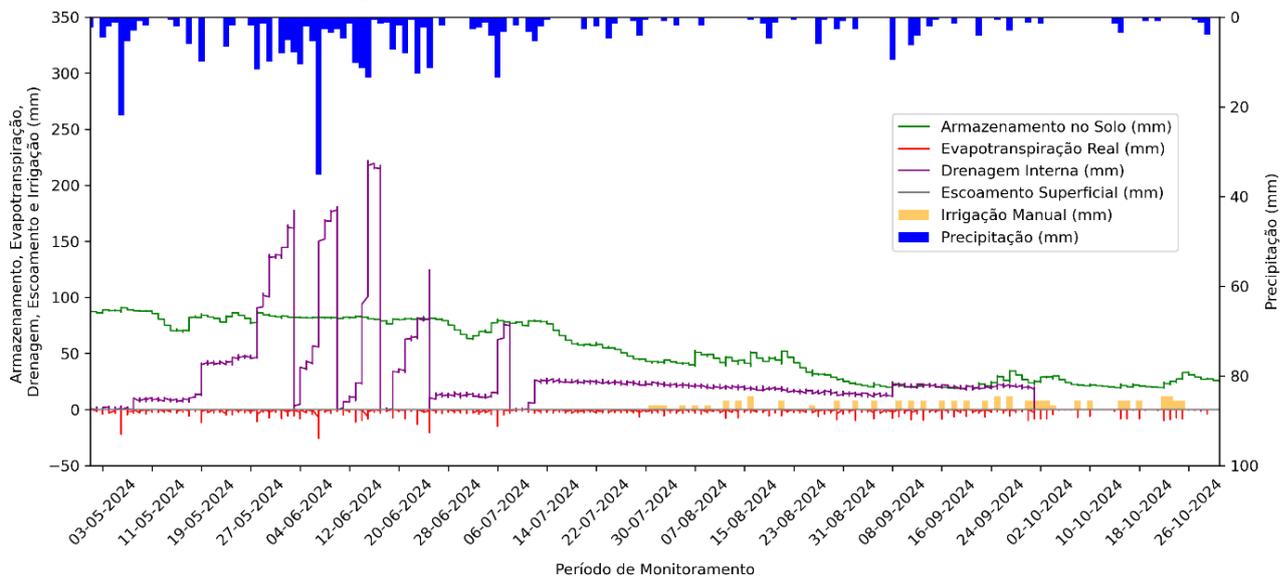
Quanto a pluviometria temos que o mês que apresentou o maior valor acumulado foi junho, com 548 mm, seguido de maio, com 238,8 mm, depois julho, com 149 mm, setembro com 73 mm, agosto com 51 mm e outubro com 22,8 mm. Nota-se que os valores de precipitação

registrados ao longo do período, com exceção de junho que superou, ficaram abaixo da média das normais climatológicas para a região.

Na Figura 39 pode-se observar que quando tem início a precipitação a primeira variável que sofre alteração é a umidade do solo e logo em seguida, após a saturação do solo, que ocorre de maneira rápida, pois a camada de solo não tem capacidade de armazenar uma grande quantidade de água, devido sua espessura e propriedades físicas, e começa a infiltração.

No módulo 1 a drenagem interna cresceu proporcionalmente ao volume de chuva, foi possível armazenar mais da metade do volume precipitado no período de monitoramento. A partir de agosto, devido à baixa precipitação, foi necessário a realização da irrigação para contribuir com a manutenção da umidade do solo e sobrevivência da espécie vegetal.

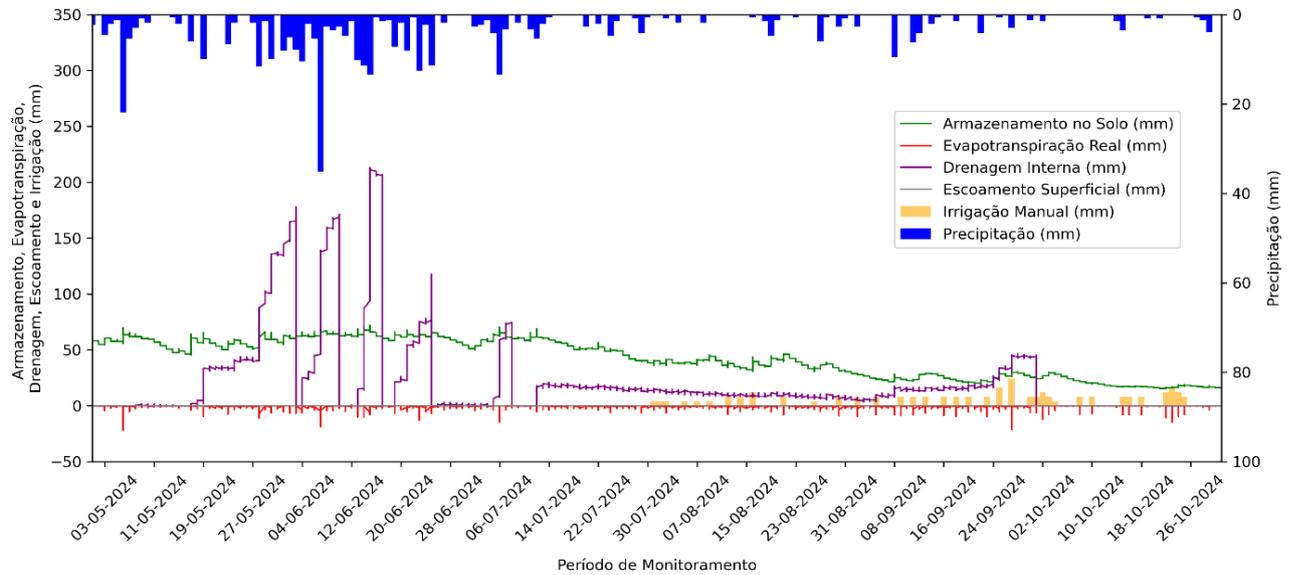
Figura 39 - Monitoramento: telhado verde com Dionela.



Fonte: Autoria própria (2025).

Pode-se observar na Figura 40 que o comportamento do módulo 2 foi bem semelhante ao módulo 1, apresentando valores bem próximos. A variação do armazenamento no solo foi bem pequena, nos meses de maio e junho praticamente não se alterou em nível mensal, ao longo do dia houve variações. Temos que o módulo 2 conseguiu coletar um volume um pouco maior de água infiltrada no mês de julho que o módulo 1. Percebe-se também que a irrigação foi feita em excesso em alguns dias do mês de setembro chegando a gerar drenagem interna.

Figura 40 - Monitoramento: telhado verde com Gramma São Carlos.

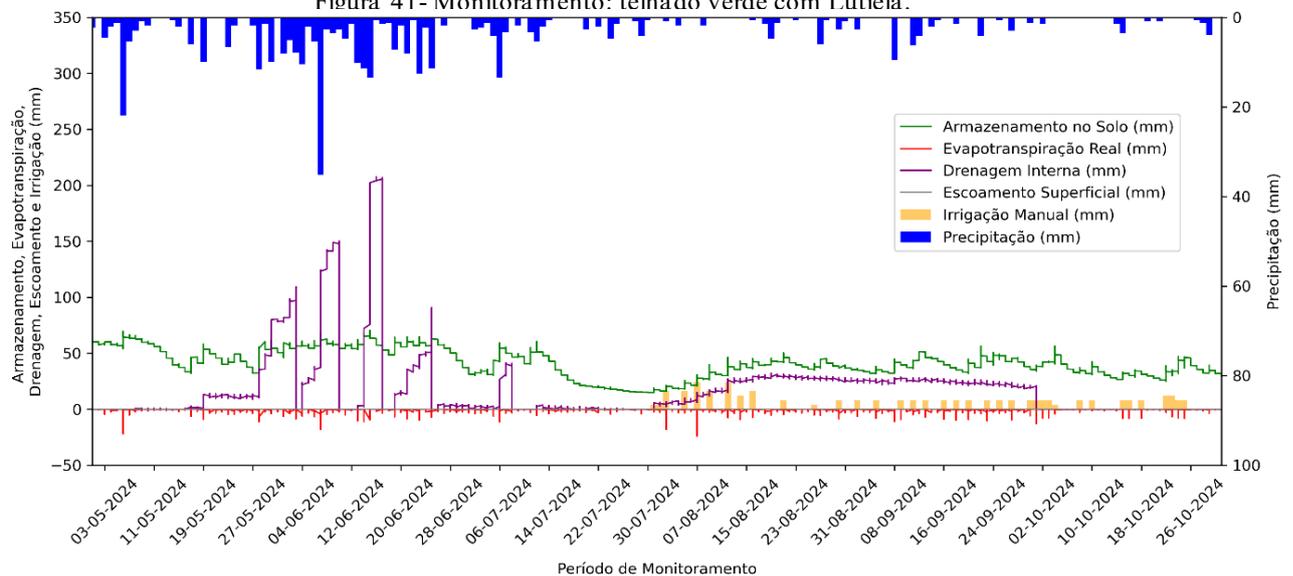


Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 41 mostra o comportamento do módulo 3 que também apresentou irrigação em excesso causando infiltração no mês de agosto. A umidade do solo sofreu uma variação maior ao longo do período de monitoramento demonstrando que a espécie utilizada transpira mais que as demais utilizadas no estudo.

Na Figura 41 pode-se perceber que em relação aos módulos 1 e 2, o teto verde 3 apresentou valores de evapotranspiração bem maiores, nos meses de maio, julho e agosto superando os valores de drenagem interna. Importante destacar que a drenagem interna registrada no mês de agosto foi em decorrência da irrigação realizada em excesso, assim como o decorrente valor positivo da variação da umidade do solo.

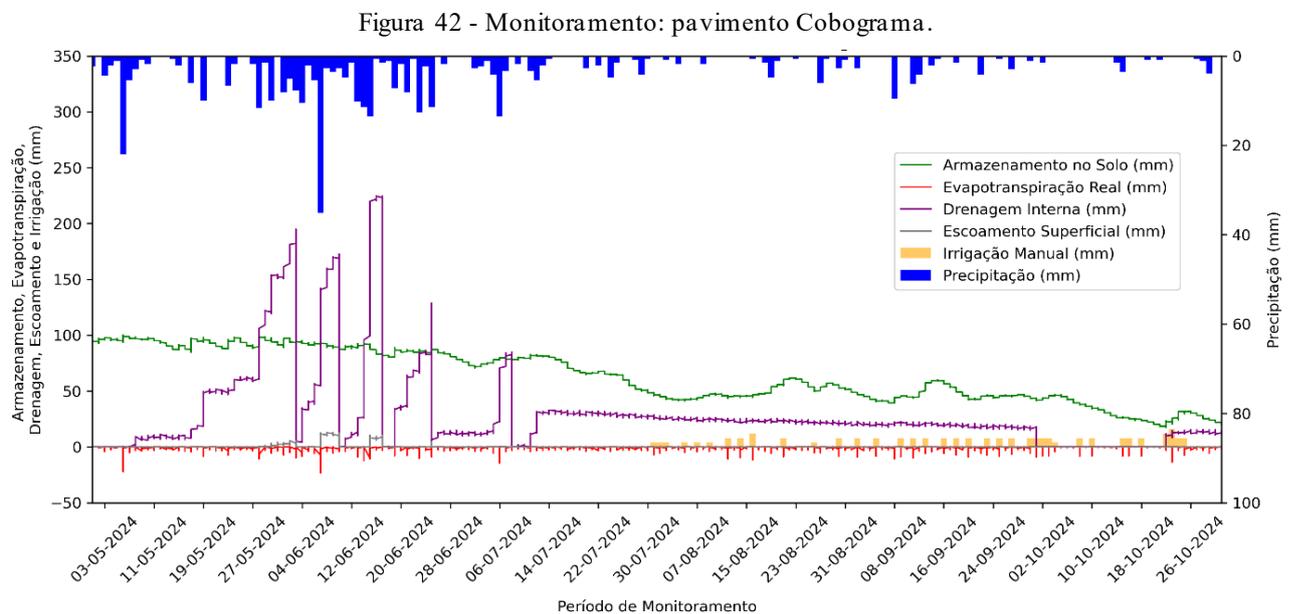
Figura 41- Monitoramento: telhado verde com Lutiela.



Fonte: Autoria própria (2025).

O comportamento da superfície permeável do módulo 4 (Figura 42) apresentou escoamento superficial apenas no mês de junho devido à alta precipitação. Nos demais meses toda chuva ou ficou armazenada no solo e posteriormente evapotranspirou, ou infiltrou subsuperficialmente.

A variação a nível mensal do conteúdo de água do solo foi negativo em todos os meses, sendo positivo apenas em agosto, possivelmente devido à irrigação. A capacidade de drenagem interna também foi alta, especialmente nos meses com maior precipitação. Nesse módulo percebemos que ocorreu escoamento superficial somente quando a precipitação foi elevada em um curto período de tempo.

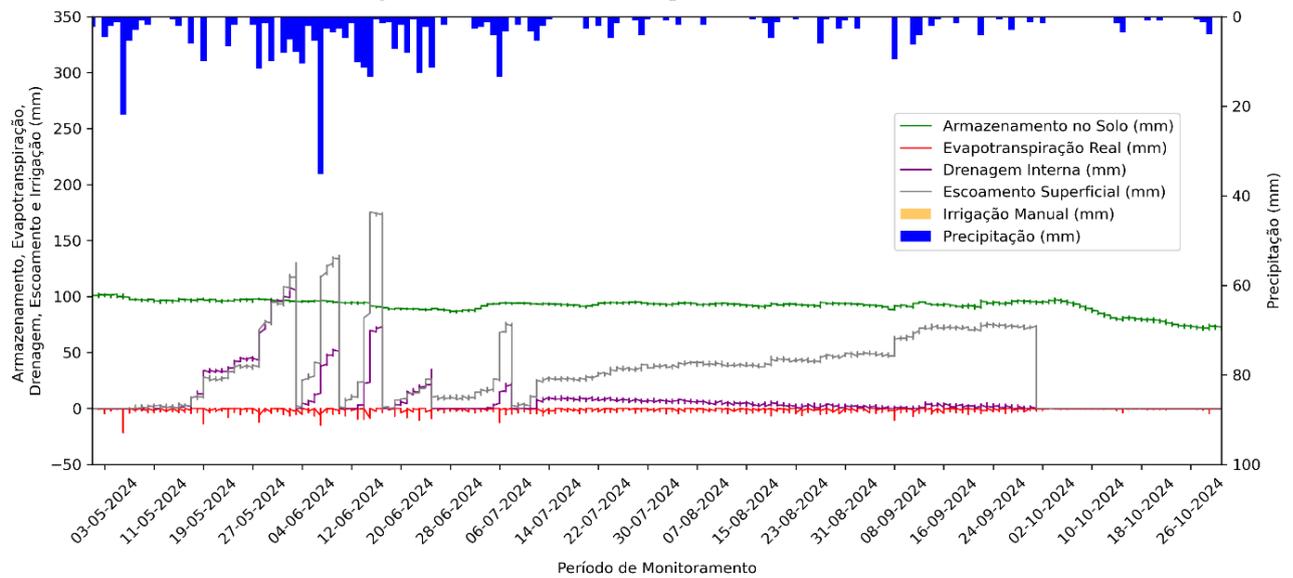


Fonte: Autoria própria (2025).

No módulo 5, Figura 43, vemos que o escoamento superficial superou a infiltração. Percebemos que a umidade do solo praticamente não variou ao longo do período de monitoramento, somente nos meses de maior temperatura e sem a ocorrência de chuvas que houve uma leve diminuição. A evaporação também foi menor nesses meses pois a cobertura de concreto dificulta esse processo.

A componente do escoamento superficial apresentou valores bem altos, nos meses de junho e julho representou mais da metade do valor precipitado. Os valores de evaporação e drenagem interna foram baixos em todos os meses.

Figura 43 - Monitoramento: pavimento intertravado.

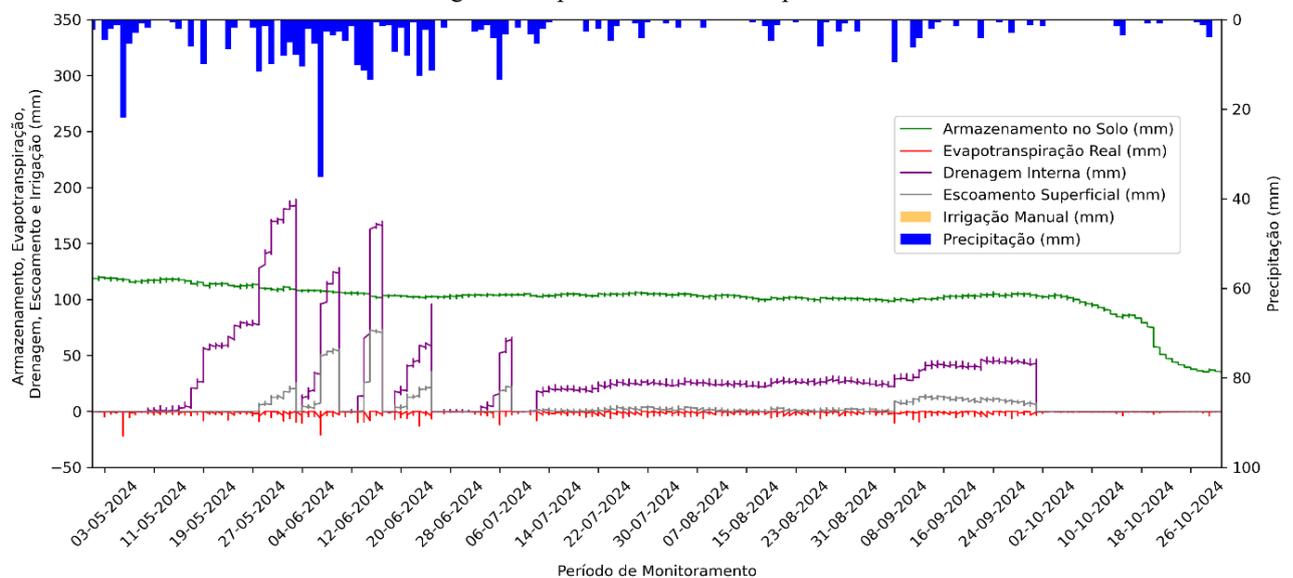


Fonte: autoria própria (2025).

Na Figura 44 vemos que houve tanto escoamento superficial quanto infiltração, porém a infiltração sempre maior que o escoamento. Também se percebe uma diminuição acentuada da umidade do solo no mês de outubro por meio da evaporação.

Observa-se na Figura 44 que os valores de drenagem interna foram altos em todos os meses de grande precipitação. No mês de agosto toda a água que precipitou foi perdida por evaporação. Praticamente não houve variação no armazenamento de água no solo em nenhum mês. E o escoamento superficial não apresentou valores muito altos.

Figura 44 - pavimento concreto poroso.



Fonte: Autoria própria (2025).

De maneira geral temos que o comportamento dos telhados verdes foi semelhante entre si, com a Lutiela apresentando maior evapotranspiração que os demais. Entre os pavimentos temos que o intertravado escoou bem mais que os demais.

O comportamento semelhante entre os tetos verdes já era esperado tendo em vista que a única diferença entre eles é a espécie vegetal utilizada, onde a Lutiela apresentou maior capacidade de evapotranspiração que as demais plantas, conseqüentemente armazenando uma quantidade menor de água infiltrada, especialmente em períodos de menor precipitação.

Diante disso os tetos verdes 1 e 2 apresentaram boa capacidade de drenagem interna, sendo as espécies Dionela e Grama São Carlos com grande potencial para utilização em telhados verdes, se um dos objetivos for a coleta de água da chuva ou a recarga de lençóis. Já a Lutiela por apresentar maior transpiração que as demais demanda um volume maior de irrigação e perde mais água para a atmosfera.

Entre as superfícies permeáveis percebemos que a de concreto intertravado escoou superficialmente muito mais que as demais. O concreto poroso responde melhor a infiltração em chuvas menores, em compensação evapora bem menos que o intertravado com grama por não possuir vegetação.

Em um estudo realizado por Shafique *et al.* (2018), em área altamente urbanizada da cidade de Seul, na Coreia do Sul, foi instalado um telhado verde modular com área 663 m<sup>2</sup>, 20 cm de altura, densidade de 1,2 g/m<sup>3</sup> e porosidade em torno de 40%. Os autores concluíram que a retenção depende principalmente da intensidade e duração dos eventos de chuva e a retenção média do escoamento no telhado verde foi de 10% a 60% em diferentes eventos de chuva, porém para chegar nesse resultado foi realizada uma análise simplista considerando que todo volume que não escoou superficialmente infiltrou, desconsiderando assim as outras variáveis. E analisando apenas eventos isolados, sem um monitoramento contínuo, o que limita a generalização dos resultados.

A presente pesquisa tem como principal diferencial o fato de realizar um monitoramento contínuo das variáveis do balanço hídrico, enquanto a maioria dos trabalhos publicados faz uma análise de eventos isolados, considerando a análise da variação de apenas uma variável.

### 6.2.2 Comparativo dos volumes acumulados

Na Tabela 3 é possível observar os valores acumulados do balanço hídrico durante todo o período de monitoramento e comparar o desempenho de cada superfície.

Os valores de precipitação ficaram dentro da média histórica para a região. A irrigação manual não foi necessária nos meses de maio a agosto, apenas em setembro e outubro. Os valores de evapotranspiração ficaram na média observada por outros trabalhos (APAC, 2023; Oliveira Filho, 2019; Moreira, 2013).

Tabela 3 - Resumo das variáveis acumuladas entre maio e outubro do balanço hídrico.

VARIÁVEL (mm)	TVD (Telhado- Dionela)	TVG (Telhado- Gramma)	TVL (Telhado- Lutiela)	PPV (Pavimento- Cobograma)	PPI (Pavimento- Intertravado)	PPP (Pavimento- Poroso)
ARMAZENAMENTO NO SOLO	-63	-43	-31	-75	-30	-84
PRECIPITAÇÃO	1082	1082	1082	1082	1082	1082
IRRIGAÇÃO MANUAL	284	312	356	280	0	0
EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL	659	648	852	579	211	262
DRENAGEM INTERNA	770	789	617	832	291	692
ESCOAMENTO SUPERFICIAL	0	0	0	26	610	212

Fonte: Autoria própria (2025).

De modo geral temos que em todos os módulos a somatória das variações do conteúdo de água no solo foi negativa, embora com oscilações durante o período, sempre ao final do período a umidade estava menor que no início. Ou seja, as perdas de água no solo foram maiores que os valores retidos no solo, ficando assim ao final do período de monitoramento com um saldo negativo. A evapotranspiração foi maior nos módulos com vegetação, como era de se esperar, assim também como a drenagem interna.

Entre os pavimentos a coleta de água nas caixas por drenagem interna foi maior no pavimento cobograma. Já o escoamento foi maior no pavimento intertravado e menor no cobograma. Nesse pavimento a grama foi sempre mantida de maneira que cobrisse toda a superfície do pavimento.

Em termos de porcentagem temos o módulo 1 com 71%; o módulo 2 com 73%; o módulo 3 com 57%; o módulo 4 com 77%; o módulo 5 com 27%; e modulo 6 com 64% de drenagem interna em relação ao volume precipitado, sendo um ótimo desempenho.

Para os meses de maio a junho os módulos 1, 2 e 4 apresentaram valores de infiltração bem próximos, em que à medida que a precipitação aumenta e ocorre a saturação do solo, o volume excedente é infiltrado. O módulo 3 apresenta comportamento semelhante, porém com valores menores, tendo em vista que a espécie utilizada demanda uma quantidade maior de água para realizar seu processo de fotossíntese. Percebe-se também que a capacidade de infiltração do módulo 5 é bem menor que os demais. Já o módulo 6 apresentou capacidade de infiltração maior que os demais em maio e julho, porém menor em junho, pois a volume de chuva foi

maior com uma duração menor, sendo assim a partir de um determinado valor de precipitação a água deixa de infiltrar e passa a escoar superficialmente.

Os meses de agosto, setembro e outubro apresentaram baixa precipitação e, portanto, foi necessária irrigação manual das espécies vegetais. Sendo assim não foram registrados valores de drenagem interna em agosto e outubro, apenas no módulo 3 em agosto e no 4 em outubro, pois neles a irrigação foi feita em excesso em alguns dias.

O dimensionamento de cada técnica vai depender da área que deve ser atendida, pois a partir de um determinado limite de precipitação a capacidade de infiltração estaciona e o volume passa a escoar superficialmente após a saturação do solo. Para chuvas intensas e de menor duração as técnicas dos telhados verdes e do intertravado com grama apresentaram resultados melhores que o concreto poroso.

A capacidade de infiltração verificada nos módulos de telhados verdes e nos pavimentos permeáveis intertravado com grama e concreto poroso indicam a efetiva redução do volume de água da chuva que seria escoado superficialmente. Nestas coberturas a chuva foi absorvida e amortecida pelas camadas internas.

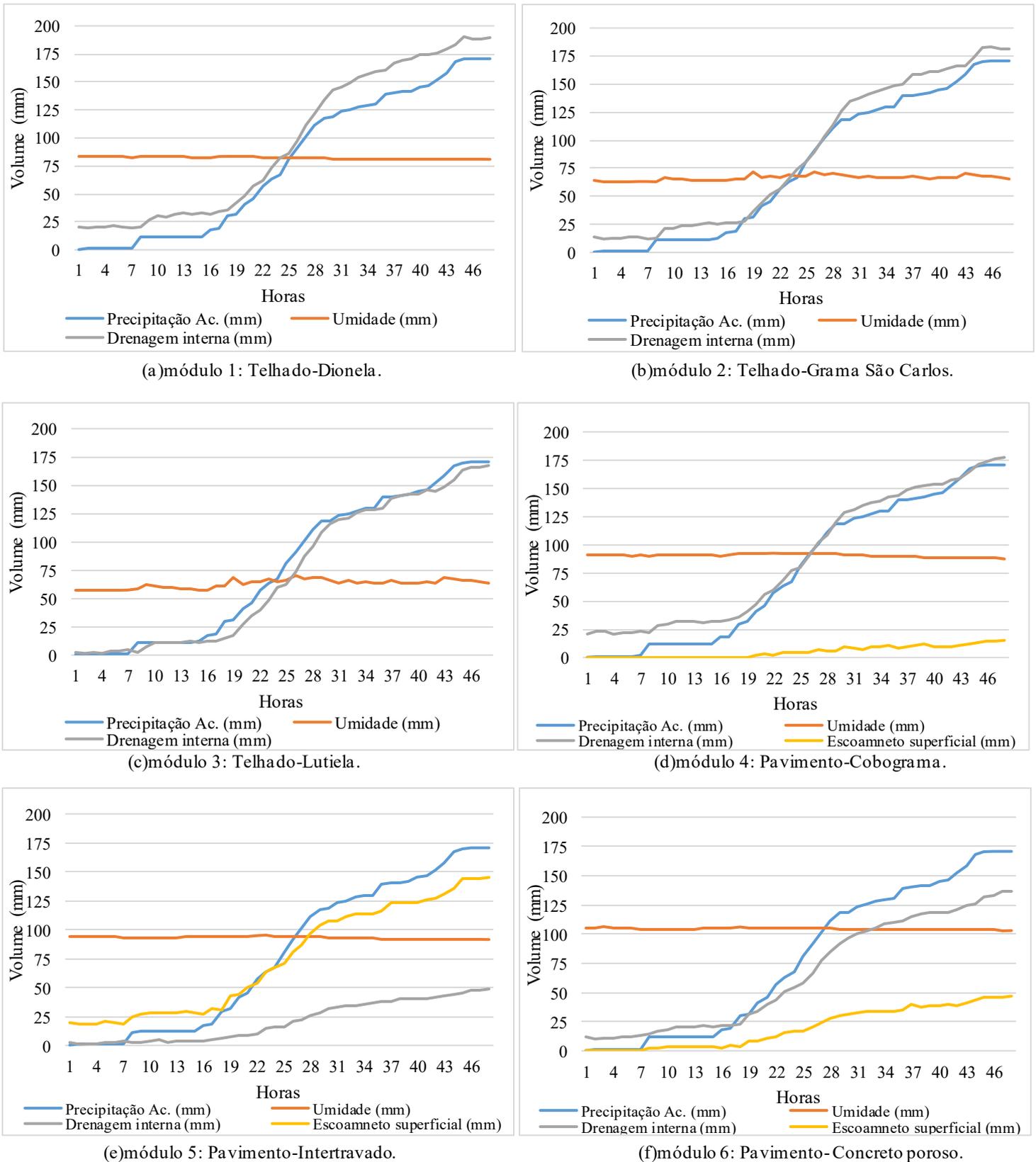
### *6.2.3 Evento de precipitação*

O evento de precipitação apresentado ocorreu entre os dias 14 e 15 de junho e acumulou 170,7 mm de precipitação, tendo 45 mm de chuva acumulada nos 5 dias anteriores, caracterizando uma condição inicial de solo úmido. Sendo um evento de chuva moderado, com intensidade média de 5,1 mm/h e no período de máxima intensidade 13,5 mm/h. Esse evento foi escolhido pelo valor da precipitação, tendo em vista que um ponto importante da pesquisa é entender o comportamento dessas técnicas para eventos de chuva que ocorrem com uma certa frequência e tem histórico de potencial geração de alagamentos na cidade do Recife.

Analisando a Figura 45 (a, b, c, d, e, f) temos que a variação de da umidade do solo praticamente não ocorreu nos módulos durante o evento de precipitação, provavelmente devido ao solo já se encontrar saturado.

Como pode-se observar na Figura 45 que dos 170,7 mm que precipitaram 99% foram coletados pela caixa de drenagem interna do módulo 1, 98% pelo módulo 2, 96% pelo módulo 3, 92% pelo módulo 4, 26% pelo módulo 5 e 73% pelo módulo 6. Já o escoamento superficial foi de 8% no pavimento 4, 74% no 5 e 27% no 6.

Figura 45 - Evento de precipitação pluvial.



Fonte: Autoria própria (2025).

Observando o comportamento dos módulos durante um evento de moderada precipitação em um período de tempo médio, pode-se perceber que para esse tipo de evento os

telhados verdes apresentam uma capacidade de infiltração maior. Já para eventos com menores intensidades e duração mais longa, ao se analisar o período de monitoramento como um todo, temos que o pavimento cobograma tem um desempenho melhor por necessitar de uma menor quantidade de água para sua manutenção e o pavimento poroso apresenta um desempenho tão bom quanto os telhados.

## 7 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu caracterizar o comportamento hidrológico de diferentes técnicas compensatórias de drenagem urbana frente às condições climáticas de Recife, com ênfase nos processos de infiltração, nos parâmetros hidrodinâmicos do substrato e na capacidade de geração de escoamento superficial. Os resultados demonstraram que a infiltração variou significativamente entre as técnicas avaliadas, sendo diretamente influenciada pelas propriedades físicas do solo e pelo tipo de cobertura superficial.

Os telhados verdes demonstraram uma capacidade significativa de infiltração, especialmente o módulo com cobertura de grama São Carlos, que apresentou maiores volumes de infiltração dentre os telhados. A presença de vegetação contribuiu para a melhoria da estrutura do substrato, aumentando a porosidade e facilitando a percolação da água. Entre os pavimentos permeáveis, o intertravado vazado (cobograma) destacou-se por sua eficiência na infiltração para chuvas moderadas de duração longa. Quanto às vegetações utilizadas, foi possível perceber que a espécie *Lutiela* demanda um volume maior de água e exige manutenção mais frequente.

A caracterização físico-hídrica do solo revelou que os telhados verdes apresentaram menor capacidade de retenção de água e maior condutividade que os pavimentos analisados. Os pavimentos permeáveis apresentaram variações nos parâmetros hidrodinâmicos, sendo que o concreto poroso mostrou uma condutividade hidráulica satisfatória, enquanto o pavimento intertravado apresentou valores inferiores, possivelmente devido à compactação natural e à ausência de vegetação, o que limitou sua capacidade de infiltração, especialmente pela cobertura de concreto que dificulta a evaporação da água.

Os resultados indicaram que os telhados verdes foram eficazes no aumento da drenagem interna, embora o escoamento não tenha sido medido nos telhados, conseqüentemente se espera uma diminuição no escoamento superficial. Dentre os pavimentos o intertravado vazado apresentou os maiores volumes de drenagem interna e menores volumes de escoamento, o pavimento intertravado, por outro lado, gerou os maiores volumes de escoamento superficial, especialmente durante os meses de maior precipitação, evidenciando sua menor eficiência como técnica compensatória. Já o concreto poroso obteve desempenho intermediário, com capacidade de infiltração adequada, mas com limitações em eventos de alta intensidade pluviométrica.

Em síntese, os telhados verdes, particularmente aqueles com cobertura vegetal densa, mostraram-se mais eficazes na promoção da infiltração e na redução do escoamento superficial. Os pavimentos permeáveis, embora apresentem muitos benefícios, requerem cuidados específicos quanto à escolha dos materiais e à manutenção para garantir sua eficiência a longo prazo.

É fundamental destacar que, embora as técnicas compensatórias desempenhem um papel relevante na mitigação dos impactos da urbanização sobre o sistema de drenagem, elas não devem ser compreendidas como soluções isoladas capazes de resolver, por si só, os desafios complexos da drenagem urbana. Sua efetividade depende de uma integração estratégica com outras medidas estruturais e não estruturais, inseridas em um planejamento urbano abrangente, que considere as especificidades hidrológicas, geográficas e socioambientais do território.

Por fim, os achados desta pesquisa reforçam a importância da integração entre soluções baseadas na natureza e o planejamento urbano, oferecendo subsídios técnicos para a elaboração de políticas públicas mais eficientes no manejo das águas pluviais no cenário atual, de mudanças climáticas e crescimento urbano acelerado.

## 7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Neste tópico, são indicadas algumas direções que podem ser exploradas em estudos futuros, tanto para aprofundar questões metodológicas quanto para ampliar a aplicação prática dos resultados. O aprofundamento da pesquisa pode servir a um embasamento técnico mais contundente que contribua para a aplicação em larga escala desses tipos de técnicas compensatórias.

Ao longo do desenvolvimento desse estudo algumas limitações foram observadas, sua correção em estudos futuros poderia levar a obtenção de resultados mais complexos. A utilização de um sistema de simulação de chuva possibilitaria um controle maior sobre os eventos e a realização de simulações para estimar o comportamento do sistema frente a eventos extremos. Também a elaboração de estratégias para a execução dos telhados verdes de maneira a evitar que o solo utilizado sofra compactação e fique em nível inferior a calha, para que seja possível medir a variável do escoamento superficial nesses módulos.

Ao longo do desenvolvimento, surgiram caminhos que, embora relevantes, extrapolaram o escopo proposto, como a realização de modelagens hidrológicas para estimativa de diferentes cenários a partir dos parâmetros obtidos no monitoramento real. Mas que possibilitariam uma compreensão mais completa do comportamento hidrológico do sistema.

Por fim, é recomendada a replicação dos experimentos em cidades com clima semiárido para comparação regional de resultados para condições climáticas distintas.

## REFERÊNCIAS

ABUSTAN, I.; HAMZAH, M. O.; RASHID, M. A. Review of Permeable Pavement Systems in Malaysia Conditions. **International Journal of Sustainable Development**, v.4, n.2, 2012. ISSN 1923-6662.

ACUNHA, B. V.; RUBIN, G. R.; SILVEIRA, A. L. L. DA. Técnicas sustentáveis para manejo das águas pluviais: aplicação na infraestrutura verde. In: Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, 5., 2019, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre - RS: Editora GFM, 2019.

AIELLO, R.; BAGARELLO, V.; BARBAGALLO, S.; CONSOLI, S.; PRIMA, S. Di; GIORDANO, G.; IOVINO, M. An assessment of the Beerkan method for determining the hydraulic properties of a sandy loam soil. **Geoderma**, [S.L.], v. 235, p. 300-307, dez. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.024>.

ANDUALEM, T. G.; PETERS, S.; HEWA, G. A.; BOLAND, J.; MYERS, B. R. Spatiotemporal trends of urban-induced land use and land cover change and implications on catchment surface imperviousness. **Applied Water Science**, [S.L.], v. 13, n. 12, p. 35-45, nov. 2023. Springer Science. <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-023-02029-7>.

ANGULO-JARAMILLO, R.; BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; GOSSET, A.; IOVINO, M.; LASSABATERE, L. Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) across soils and scales. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 576, p. 239-261, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.007>.

APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Governo do Estado do Pernambuco. **Meteorologia: monitoramento pluviométrico**. 2023. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>. Acesso em: 02 nov. 2023.

APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Governo do Estado do Pernambuco. **Boletins**. 2023. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/boletins>. Acesso em: 02 mar. 2024.

APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Governo do Estado do Pernambuco. **Atlas climatológico do Estado de Pernambuco: normais climatológicas 1991-2020**. 2023. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/images/webAtlas-Climatologico-do-Estado-de-Pernambuco-APAC.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2024.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.5, n.3, p.21-29, 2000. DOI 10.21168/rbrh.v5n3.p21-29.

ARCE, M. I.; MENDOZA, C. L.; ALMAGRO, M.; CATALÁN, N.; ROMANÍ, A. M.; MARTÍ, E.; GÓMEZ, R.; BERNAL, S.; FOULQUIER, A.; MUTZ, M. A conceptual framework for understanding the biogeochemistry of dry riverbeds through the lens of soil science. **Earth-Science Reviews**, [S.L.], v. 188, p. 441-453, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.001>.

BALLARD, W. B.; WILSON, S.; UDALE-CLARKE, H.; IIIMANL, S.; SCOTT, T.; ASHLEY, R.; KELLAGHER, R. **The SuDS Manual**. Londres, Inglaterra, Ciria, 2015.

BAPTISTA, V. S. G.; COELHO, V. H. R.; BERTRAND, G. F.; SILVA, G. B. L. da; CAICEDO, N. O. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; STEFAN, C.; GLASS, J.; HEIM, R.; CONRAD, A.; ALMEIDA, C. das N. Rooftop water harvesting for managed aquifer recharge and flood mitigation in tropical cities: towards a strategy of co-benefit evaluations in João Pessoa, northeast Brazil. **Journal of Environmental Management**, [S.l.], v. 342, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118034>.

BARROS, E. N.; CABRAL, J. J. da S. P.; PALECHOR, E. U. L.; TAVARES, P. R. L.; MENEZES, L. A. A.; SILVA JUNIOR, M. A. B. Jardins de chuva para mitigação dos alagamentos urbanos: análise de um projeto piloto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 1396-1411, mar. 2024. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1396-1411>.

BARROS, C. B. R. de. Análise da capacidade de retenção de diferentes substratos de telhado verde utilizando o Hydrus-1D. 2021. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2021.

BECKER, N.; PINHEIRO, I. G. Potencialidade dos pavimentos permeáveis na melhoria da qualidade da água do escoamento superficial: uma revisão. **Urbe - Revista Brasileira de Gestão Urbana**, [S.L.], v. 11, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.011.002.ao07>.

BEZERRA, P. H. L.; COUTINHO, A. P.; LASSABATÈRE, L.; SANTOS NETO, S. M. de; MELO, T. A. T. de; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Water dynamics in an infiltration trench in an urban centre in Brazil: monitoring and modelling. **Water**, Basel, v. 14, n. 4, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14040513>. Acesso em: 23 abr. 2024.

BURAK, D. L.; PASSOS, R. R.; SARNAGLIA, S. A. Utilização de análise multivariada na avaliação de parâmetros geomorfológicos e atributos físicos do solo. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 6, n. 9, p. 1-11, 2010. DOI 10.1590/S010006832 011000200011.

CÂMARA, C. P. dos S.; SANTOS, S. M. dos; PAIVA, A. L. R. de; BATISTA, L. F. D. R. LID Implementation in an urban basin: a brazilian case study. **Ciência e Natura**, [S.L.], v. 46, n. 1, ago. 2024. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x86491>.

CASCONE, S.; GAGLIANO, A. Recycled agricultural plastic waste as green roof drainage layer within the perspective of ecological transition for the built environment. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 380, dez. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135032>.

COSTA, I. R. de A.; SANTOS NETO, S. M. dos; ANTONINO, A. C. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P. Dynamics of the water infiltration process in permeable pavement using in situ experimentation and numerical simulation with hydrus-2D. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 29, n. 41, p. 1-13, 2024. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.292420230106>.

COSTA, I. R. de A.; COUTINHO, A. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; RABELO, A. E. C. de G. da C.; SANTOS NETO, S. M. dos; ALVES, E. M.; ANTONINO, A. C. D. Sensitivity of hydrodynamic parameters in the simulation of water transfer processes in a permeable pavement. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, n. 47, p. 37-51, ago. 2020. DOI 10.1590/2318-0331.252020190188.

COUTINHO, A. P.; MELO, T. dos A. T de; ALCÂNTARA, L. R. P. de; RABELO, A. E. C. de G. da C.; SANTOS NETO, S. M. dos; ANTONINO, A. C. D. Caracterização hidráulica das camadas de um pavimento permeável. **Águas Subterrâneas**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 191-203, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i2.2957>.

COUTINHO, A. P.; LASSABATERE, L.; MONTENEGRO, S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; CABRAL, J. J. S. P. Hydraulic characterization and hydrological behaviour of a pilot permeable pavement in an urban centre, Brazil. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 30, n. 23, p. 4242-4254, set. 2016. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10985>.

KIMBI, S. B.; ONODERA, S.; WANG, K.; KAIHOTSU, I.; SHIMIZU, Y. Assessing the Impact of Urbanization and Climate Change on Hydrological Processes in a Suburban Catchment. **Environments**, Japão, v. 11, n. 10, p. 225, out. 2024. <http://dx.doi.org/10.3390/environments11100225>.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.

FARIAS, A.; MENDONÇA, F. Riscos socioambientais de inundação urbana sob a perspectiva do Sistema Ambiental Urbano. **Sociedade & Natureza**, [S.L.], v. 34, n. 1, p. 30-48, jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.14393/sn-v34-2022-63717>.

FEITOSA, F. F. DE S.; TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. DE; COSTA, C. T. F. DA. Avaliação do uso de trincheiras de infiltração para atenuação de picos de cheia na cidade do Crato - CE, Brasil. **Revista AIDIS**, v.13, n.1, p.485-499, 2020. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.67637>.

FINNEGAN, N. J.; PERKINS, J. P.; NERESON, A. L.; HANDWERGER, A. L. Unsaturated Flow Processes and the Onset of Seasonal Deformation in Slow-Moving Landslides. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, [S.L.], v. 126, n. 5, p. 1-24, maio 2021. <http://dx.doi.org/10.1029/2020jf005758>.

FRANÇA NETO, J. M. de.; COUTINHO, A. P.; DI PRIMA, S.; BEZERRA, S. de T. M. B.; SANTOS NETO, S. M. dos; RABELO, A. E. C. de G. da C.; OLIVEIRA, A. L. de; ANTONINO, A. C. D. Variabilidade espacial das propriedades hidrodinâmicas de um solo com vegetação de Caatinga preservada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 26, n. 20, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210058>. Acesso em: 23 abr. 2024.

FRENI, G.; LIUZZO, L. Effectiveness of Rainwater Harvesting Systems for Flood Reduction in Residential Urban Areas. **Water**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 1389, 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/w11071389>.

GAVRILESCU, M. Water, Soil, and Plants Interactions in a Threatened Environment. **Water**, [S.L.], v. 13, n. 19, p. 2746, out. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13192746>.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. **Hortscience**, [S.l.], v. 41, n. 5, p.1276-1285, 2006. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1276>.

GOMES, F.; SANTOS, R.; GUARIZ, H. Levantamento de propriedades de densidade aparente, densidade de partículas e porosidade total em latossolos amarelo. **Agrarian Academy**, [S.l.], v. 5, n. 12, p. 79-93, dez. 2019. [http://dx.doi.org/10.18677/agrarian\\_academy\\_2019b8](http://dx.doi.org/10.18677/agrarian_academy_2019b8).

GUIMARÃES, S. A. de C. A. **Caracterização da dupla permeabilidade de solos com caatinga e pastagem no sertão pernambucano**. 2020. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2020.

GUIMARÃES, P. L. O.; SANTANA, M. A. A.; OLIVEIRA, I. R.; THOMAZ JÚNIOR, J. C. Proposta de procedimento para calibração de sensores e medidores de umidade do solo (soil moisture). In: Congresso da Qualidade em Metrologia, 2010, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Rede Metrológica do Estado de São Paulo - REMESP, 2010.

HAVERKAMP, R.; ROSS, P. J.; SMETTEM, K. R. J.; PARLANGE, J. Y. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, v.30, p.2931-2935, 1994.

HEYWOOD, H. **101 regras básicas para edifícios e cidades sustentáveis**. São Paulo: Gustavo Gili, 2015.

HILLEL, D. *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HUNT, F. W.; COLLINS, A. K. **Permeable pavement**: Research update and design implication. In: *Urban Waterway Series*, North Carolina State University, Carolina do Norte, Estados Unidos, 2008.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Cidades – Panorama de Recife*, 2022. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>. Acesso em: 02 nov. 2023.

IPCC - INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Fifth Assessment Report**. Genebra: IPCC, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>. Acesso em: 24 mar. 2024.

JACKISCH, N., WEILER, M., 2015. The hydrologic outcome of a low impact development (LID) site including superposition with streamflow peaks. **Urban Water Journal**, v.14, p.143-159, 2015. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2015.1080735>.

KASPRZYK, M.; SZPAKOWSKI, W.; POZNANSKA, E.; BOOGAARD, F. C.; BOBKOWSKA, K.; GAJEWSKA, M. Technical solutions and benefits of introducing rain gardens – Gdańsk case study. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 835, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155487>.

KIFLAY, E.; SCHIRMER, M.; FOPPEN, J. W.; MOECK, C. Impact of urbanization on groundwater recharge: altered recharge rates and water cycle dynamics for arusha,

tanzania. **Hydrogeology Journal**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 33-47, jan. 2025. Springer Science. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-024-02870-3>.

KIMBI, S. B.; ONODERA, S.; Wang, K.; KAIHOTSU, I.; SHIMIZU, Y. Assessing the Impact of Urbanization and Climate Change on Hydrological Processes in a Suburban Catchment. **Environments**, v. 11, n. 10, 225, out. 2024. <https://doi.org/10.3390/environments11100225>.

KOZMHINSKY, M.; PINHEIRO, S. M. G.; EL-DEIR, S. G. Telhados verdes: uma iniciativa sustentável. Recife: Editora Universitária da UFRPE, 65 p., 2016.

KUMAR, K.; KOZAK, J.; HUNDAL, L.; COX, A.; ZHANG, H.; GRANATO, T. In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot – A four-year study. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 167, p. 8-14, fev. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.019>.

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; UGALDE, J. M. S.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST. **Soil Science Society of America Journal**, [S.L.], v. 70, n. 2, p. 521-532, mar. 2006. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2005.0026>.

LEONARDO, H. R. de A. L. **Desempenho de telhados ecológicos em área urbana**. 2021. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

LIMA NETO, V. de S.; TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. de; CABRAL, J. J. da S. P. Análise da Implantação de Reservatórios de Detenção em Lotes Urbanos. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 222-237, abr. 2024. <http://dx.doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1id34911>.

MACEDO, P. M. T. de. **Telhados ecológicos: avaliação do desempenho térmico e hidrológico em clima tropical úmido**. 2022. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

MANES, S.; VALE, M. M.; PIRES, A. P. F. Nature-based solutions potential for flood risk reduction under extreme rainfall events. **Ambio**, [S.L.], v. 53, n. 8, p. 1168-1181, abr. 2024. <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-024-02005-8>.

MARINHO, M. N.; COUTINHO, A. P.; SANTOS NETO, S. M. dos; CASAGRANDE, C. A.; SANTOS, G. T. L.; CARNEIRO, A. M. P. Mathematical modeling of the infiltration in a permeable pavement on the field scale. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, n. 39, p. 35-50, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.252020200052>.

MARTINEZ, P. F. Manejo de substratos para horticultura. In: FURLANI, A.M.C. Caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas. Campinas: Instituto Agrônomo, p.53-73, 2002.

MELO, I. S.; CARVALHO, R. M. C. M. O. de; SOBRAL, M. do C. M.; LYRA, M. R. C. C.; SILVA, H. P. Adaptação aos impactos das mudanças climáticas na perspectiva do plano diretor da cidade do Recife. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, Recife, v. 23, jan. 2022. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais (RBEUR)*. <http://dx.doi.org/10.22296/2317-1529.rbeur.202140pt>.

MELO, T. dos A. T. de; COUTINHO, A. P.; SANTOS, J. B. F. dos; CABRAL, J. J. da S. P.; ANTONINO, A. C. D.; LASSABATERE, L. Trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, [S.l.], v. 16, n. 3, p. 53-72, set. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300092>.

MELO, T. D. A. T. D., COUTINHO, A. P., CABRAL, J. J. D. S. P., ANTONINO, A. C. D., CIRILO, J. A. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 147-165, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000400011>.

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. dos. Drenagem e manejo sustentável de águas pluviais urbanas: o que falta para o brasil adotar? TD 2791 - Texto Para Discussão, Brasília, p. 1-52, ago. 2022. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA**. <http://dx.doi.org/10.38116/td2791>.

MENEZES, L. A. A.; CABRAL, J. J. da S. P. Utilização de pavimento permeável como alternativa compensatória para drenagem urbana em Recife-PE. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S.L.], v. 19, n. 5, p. 327-345, dez. 2023. <http://dx.doi.org/10.17271/1980082719520233775>.

MONTENEGRO, A. A de A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 30-37, 2006.

MOREIRA, E. B. M. Balanço de energia e evapotranspiração na cidade do Recife-PE por sensoriamento remoto. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11100>. Acesso em: 18 jan. 2025.

MOTTA, L. D. **Procedimentos de projeto viário em pavimentos permeáveis com base na abnt nbr 16.416/2015 – comparação entre blocos permeáveis e convencionais**. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-Es, 2019.

OLIVEIRA, E. W. N. **Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico**. Rio de Janeiro, 2009. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

OLIVEIRA FILHO, P. R. de. Tendências de mudança em variáveis climáticas e evapotranspiração de referência em Recife – PE. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/47120>. Acesso em: 18 jan. 2025.

PACETTI, T.; CIOLI, S.; CASTELLI, G.; BRESCI, E.; PAMPALONI, M.; PILEGGI, T.; CAPORALI, E. Planning Nature Based Solutions against urban pluvial flooding in heritage cities: a spatial multi criteria approach for the city of florence (Italy). **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S.L.], v. 41, p. 101081, jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101081>.

PARRA, G. G.; TEIXEIRA, B. A. N. Análise de cenários resultantes da impermeabilização de espaços destinados à circulação e permanência de pedestres. **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 12, 2020. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190265>.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial. Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.). PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6. Disponível em:

[http://plutao.sid.inpe.br/col/urllib.net/www/2017/12.05.15.59.26/doc/marengo\\_impacto.pdf?form=MG0AV3](http://plutao.sid.inpe.br/col/urllib.net/www/2017/12.05.15.59.26/doc/marengo_impacto.pdf?form=MG0AV3). Acesso em: 24 mar. 2024.

PENG, Z.; JINYAN, K.; WENBIN, P.; XIN, Z.; YUANBIN, C. Effects of Low-Impact Development on Urban Rainfall Runoff under Different Rainfall Characteristics. **Polish Journal of Environmental Studies**, v.28, n.2, p.771–783, 2018.

<https://doi.org/10.15244/pjoes/85348>.

PENKOVA, I. F. G.; ZIMMERMAN, J. K.; GONZÁLEZ, G. Green roofs in the tropics: design considerations and vegetation dynamics. **Heliyon**, [S.L.], v. 6, n. 8, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04712>.

PERSCH, C. G. **Efeito de escala em telhados verdes extensivos**. 2019. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

POUR, S. H.; WAHAB, A. K. A.; SHAHID, S.; ASADUZZAMAN, M; DEWAN, A. Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges. **Sustainable Cities and Society**, [S.l.], v. 62, n. 6, p. 102–373, 2020.

PREUSS, S. L. C.; SILVA, A. A.; BRAGA, R. A. P.; CABRAL, J. J. S. P. Adequação estrutural e ambiental para a drenagem urbana sustentável: o caso do Recife, Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., Maceió. **Anais[...]**. Maceió: ABRH. p. 01- 19. 2011.

RECIFE. Análise de riscos e vulnerabilidades climáticas e estratégia de adaptação do município do Recife – PE: resumo para tomadores de decisão. 2019. Disponível em: [https://www2.recife.pe.gov.br/sites/default/files/sumario\\_clima\\_recife\\_portugues.pdf](https://www2.recife.pe.gov.br/sites/default/files/sumario_clima_recife_portugues.pdf). Acesso em: 05 nov. 2023.

REICHERT, J. M.; AZEVEDO, A. C.; REINERT, D. J.; SANTOS, D. N.; PEDRON, F. A.; DALMOLIN, R. S. D. Apostila: Fundamentos da ciência do solo. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2007. Disponível em:

[https://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Disciplinas/FundCiSolo/Apostila\\_FundaCiSolo.pdf](https://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Disciplinas/FundCiSolo/Apostila_FundaCiSolo.pdf). Acesso em: 20 out. 2024.

RIBAS, L. V. da S.; COUTINHO, A. P.; LASSABATÈRE, L.; REZENDE, O. da C. Effect of the choice of different methods on the permeable pavement hydraulic characterization and hydrological classification. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 193, n. 11, p. 1–18, 2021. DOI: 10.1007/s10661-021-09474-z.

RIBAS, Larissa Virgínia da Silva; COUTINHO, Artur Paiva; LASSABATERE, Laurent; SANTOS NETO, Severino Martins dos; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima; RABELO, Ana Emília Carvalho de Gusmão da Cunha; JARAMILLO, Rafael Angulo; RIBEIRO NETO, Alfredo. Effect of the choice of different methods on the permeable pavement hydraulic characterization and hydrological classification. **Journal Of Hydrology**

**And Hydromechanics**, [S.L.], v. 69, n. 3, p. 332-346, 10 ago. 2021. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/johh-2021-0018>.

ROCHA, J. D. Adaptação das cidades costeiras brasileiras receptoras de impactos do aquecimento global. PÊGO, B. (ed.). **Fronteiras do Brasil: o litoral em sua dimensão fronteiriça**. 8. ed. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2023. p. 323-345. <http://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-067-7/capitulo12>.

RODRIGUES, G. C.; SANTINI JUNIOR, M. A. Avaliação do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia urbana Ribeirão do Santa Rita do município de Fernandópolis, São Paulo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 231-237, abr. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220180251>.

ROSSI, E.; GONÇALVES, L. M.; **Ecotécnicas de drenagem urbana: urbanização de impacto ambiental reduzido**. In: Simpósio de Pós Graduação em Engenharia Urbana, 3. 2012. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/306108767\\_ECOTECNICAS\\_DE\\_DRENAGEM\\_URBANA\\_URBANIZACAO\\_DE\\_IMPACTO\\_AMBIENTAL\\_REDUZIDO](https://www.researchgate.net/publication/306108767_ECOTECNICAS_DE_DRENAGEM_URBANA_URBANIZACAO_DE_IMPACTO_AMBIENTAL_REDUZIDO). Acesso em: 02 nov. 2023.

SANTOS, G. C. **Desempenho térmico de telhados verdes no agreste pernambucano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Caruaru-PE, 2016, 95 f.

SANTOS, P. T. S.; SANTOS, S. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S. S.; ANTONINO, A. C. D. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, v.13, n.1, p.161-174, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000100011>.

SAKAGAMI, T. A. **Desempenho hidrológico de telhado verde extensivo**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro – SP, 43 p., 2016.

SILVA, A. C. R. de S.; BIMBATO, A. M.; BALESTIERI, J. A. P.; VILANOVA, M. R. N. Exploring environmental, economic and social aspects of rainwater harvesting systems: a review. **Sustainable Cities and Society**, [S.L.], v. 76, p. 103475, jan. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2021.103475>.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; CABRAL, J. J. DA S. P.; FONSECA NETO, G. C.; GUERRA, C. M. F.; SILVA, S. R. Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 03, p. 302–318, 2020. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.3025.302-318>.

SILVA, S. B.; LINS, T. M.; SALAROLI, A. B. Análise dos impactos de inundações urbanas em Recife, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 4, p. 901-915, 2019.

SILVA, M. C.; DUARTE, S. Concepção e Projeto de Métodos Construtivos Sustentáveis: Aplicação de Telhado Verde e Aproveitamento de Água Pluvial em um Ambiente Escolar. 2017. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2017.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 90, p. 757-773, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>.

SHWETHA, P.; VARIJA, Kb. Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1142-1149, 2015.

SOUZA, V. G. A. de. **Implantação, monitoramento e simulação de uma trincheira de infiltração em uma bacia urbana na cidade do Recife**. 2018. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SOUZA, W. M. DE; AZEVEDO, P. V. DE; ARAÚJO, L. E. de. Classificação da precipitação diária e impactos decorrentes dos desastres associados às chuvas na Cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 02, p. 250–268, 2012. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i2.232788>.

SUN, X.; LI, R.; SHAN, X.; XU, H.; WANG, J. Assessment of climate change impacts and urban flood management schemes in central Shanghai. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 65, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102563>.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, mar. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212014000100012>.

TOMAZ, P. **Cobertura Verde**. In: Curso de manuseio de águas pluviais. Capítulo 51. 2008.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v.22, n.63, p.97-112. 2008.

TUCCI, C. E. **Inundações urbanas**. 11. ed. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.

VALEO, C.; HE, J.; KASIVISWANATHAN, K. S. Urbanization under a Changing Climate–Impacts on Hydrology. **Water**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 393, 3 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13040393>.

VAZ, I. C. M.; ANTUNES, L. N.; GHISI, E.; THIVES, L. P. Permeable Pavements as a Means to Save Water in Buildings: state of the art in Brazil. **Sci**, [S.L.], v. 3, n. 4, out. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/sci3040036>.

VERGNI, L.; TOSI, G.; BERTUZZI, J.; ROSSI, G.; FARNESELLI, M.; TOSTI, G.; TEI, F.; AGNELLI, A.; TODISCO, F. Using Beerkan Procedure to Estimate Hydraulic Soil Properties under Long Term Agroecosystems Experiments. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 14, n. 9, p. 3817, abr. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app14093817>.

VICENTE, A. P. C.; FARIA, K. M. S.; FORMIGA, K. T. M. Sustainable Drainage Technologies Under the Sustainability Tripod Perspective. **Sociedade & Natureza**, [S.L.], v. 35, n. 1, mar. 2023. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/sn-v35-2023-66919>.

VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. **Renewable and sustainable energy reviews**, [S.l.], v. 57, p. 740-752, 2016.

VILARIM, M. B. **Desempenho térmico de telhado verde de baixo custo em região de clima tropical úmido**. 2022. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

VOGELMANN, E. S.; REICHERT, J. M.; PREVEDELLO, J.; AWE, G. O.; REINERT, D. J. Soil hydrophobicity: comparative study of usual determination methods. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 260-266, fev. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20140042>.

VOLDER, A.; WATSON, T.; VISWANATHAN, B. Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. **Urban Forestry & Urban Greening**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 249-256, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2009.08.006>.

YU, Z.; GAN, H.; XIAO, M.; HUANG, B.; ZHU, D. Z.; ZHANG, Z.; WANG, H.; LIN, Y.; HOU, Y.; PENG, S. Performance of permeable pavement systems on stormwater permeability and pollutant removal. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 28, n. 22, p. 28571-28584, fev. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-12525-5>.

ZORZETO, T. Q.; DECHEN, S. C. F.; ABREU, M. F. de; FERNANDES JÚNIOR, F. Caracterização física de substratos para plantas. **Bragantia**, [S.l.], v. 73, n. 3, p. 300-311, ago. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0086>.