



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Amanda Quintela Lopes de Moura

**HIDROLOGIA E HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO DE UM TELHADO VERDE  
EM AMBIENTE TROPICAL SOB CHUVA NATURAL E SIMULADA**

**RECIFE, PERNAMBUCO  
2023**



Amanda Quintela Lopes de Moura

**HIDROLOGIA E HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO DE UM TELHADO VERDE  
EM AMBIENTE TROPICAL SOB CHUVA NATURAL E SIMULADA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice

Coorientador: Prof. Dr. Vicente de Paulo Silva

**RECIFE, PERNAMBUCO**

**2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M929h Moura, Amanda Quintela Lopes de  
HIDROLOGIA E HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO DE UM TELHADO VERDE EM AMBIENTE TROPICAL  
SOB CHUVA NATURAL E SIMULADA / Amanda Quintela Lopes de Moura. - 2023.  
59 f. : il.

Orientador: Jose Ramon Barros Cantalice.  
Coorientador: Vicente de Paulo Silva.  
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2023.

1. infraestruturas verdes. 2. retenção superficial. 3. controle local do escoamento. 4. resistência hidráulica. 5. ambiente tropical. I. Cantalice, Jose Ramon Barros, orient. II. Silva, Vicente de Paulo, coorient. III. Título

CDD 620.8

---

Amanda Quintela Lopes de Moura

**HIDROLOGIA, HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO E DURABILIDADE DE UM  
TELHADO VERDE EM AMBIENTE TROPICAL SOB CHUVA NATURAL E  
SIMULADA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos.

Aprovada em 20/01/2023.

---

Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice  
Orientador  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Valdemir de Paula e Silva Junior  
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

Dedico a minha mãe Adriana,  
pelo apoio incondicional em  
todas as minhas decisões.

## AGRADECIMENTOS

A Deus que me conduziu nessa caminhada, sabendo a hora certa de todas as coisas.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental pela oportunidade de cursar e ceder um espaço que foi por esses anos minha extensão de casa.

A Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco, pela concessão de uma bolsa de pesquisa que me permitiu através desse investimento a produção de conhecimento que se perpetuará.

Ao meu orientador Professor Dr. Ramon Cantalice e sua esposa Helena, por transmitir tranquilidade quando mais precisei, por acreditar em mim e me ajudar a concretizar esse trabalho.

Aos colegas de mestrado Cláudio, Luan e Gabriela pela amizade consolidada.

Meus pais Adriana e Richardson e meu irmão Henrique por sempre me incentivarem a seguir meus sonhos.

Ao Lucas que está sempre ao meu lado, por todo amparo, paciência, e confiança neste desafio, e em todos que tenho me submetido nos últimos dez anos.

Meu amigo José Alexandre, seus pais, e prima Ana Violeta, pelo suporte físico e emocional.

A minha prima Alice Quintela, inspiração desde pequena, quem me estimula na vida acadêmica e ensina que só através dos estudos há transformação.

## RESUMO

O avanço das tecnologias ambientais aliado a um tempo curto de preparo de infraestrutura das cidades, fazem com que as coberturas vegetadas surjam como uma técnica para mitigar os problemas causados pela urbanização, interferindo no controle ambiental, regulação climática, entre outros benefícios à sociedade. Esse trabalho objetivou analisar o desempenho hidrológico e hidráulico dos escoamentos obtidos em um telhado verde sob chuva natural e simulada, bem como sua durabilidade sob clima tropical chuvoso. Para tal, foram instaladas em campo estruturas de alvenaria que suportaram os telhados constituídos de chapas metálicas galvanizadas de 2m<sup>2</sup> e 16% de declividade, submetidas a chuvas natural e produzidas por um infiltrômetro aspersor, sob delineamento experimental de blocos ao acaso com 3 repetições, durante 04 meses totalizando 12 ensaios. O telhado verde chegou a retardar até 63% do escoamento superficial produzido, e abstraiu de 42 a 56% das chuvas naturais e simuladas. A resistência hidráulica gerada pela grama Esmeralda do telhado verde foi dominada pelo número de Froude, demonstrando que em escoamento aberto com baixos valores de Reynolds foram governados pelas forças gravitacionais. A grama Esmeralda mostrou perda de durabilidade no período sem chuvas. Por fim, o telhado verde apresentou bons resultados hidrológicos e hidráulicos mostrando-se eficiente na redução do escoamento, abstração, resistência hidráulica gerada pela gramínea Esmeralda demonstrando a sua importância para reduzir as demandas dos sistemas de drenagem urbana convencionais.

Palavras-chave: Infraestruturas verdes; retenção superficial; controle local do escoamento; resistência hidráulica; ambiente tropical.

## ABSTRACT

The advancement of environmental technologies, combined with a short time to prepare the infrastructure of cities, made vegetated roofs emerge as a technique to mitigate the problems caused by urbanization, interfering with environmental control, and climate regulation, among other benefits to society. This work aimed to analyze the hydrological and hydraulic performance of the flows obtained in a green roof under natural and simulated rain, as well as its durability under a rainy tropical climate. To this end, masonry structures were installed in the field to support the roofs made of galvanized metal sheets of 2m<sup>2</sup> and 16% slope, subjected to natural rainfall and produced by a sprinkler infiltrometer, under a randomized block experimental design with three replications, during 04 months totaling 12 trials. The green roof delayed up to 63% of the surface runoff produced and abstracted from 42 to 56% of natural and simulated rainfall. The hydraulic resistance generated by the emerald grass of the green roof was dominated by the Froude number, demonstrating that in open flow low Reynolds values, were governed by gravitational forces. The Esmeralda grass showed a loss of durability in the period without rain. Finally, the green roof showed good hydrological and hydraulic results, proving to be efficient in reducing runoff, abstraction, and hydraulic resistance generated by the Esmeralda grass, demonstrating its importance in reducing the demands of conventional urban drainage systems.

Keywords: green infrastructure; water surface retention; hydraulic resistance; runoff local control; tropical environment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Telhado Verde .....	20
Figura 2 - 3D Ilustração de como seria os Jardins Suspensos da Babilônia.....	21
Figura 3 - Imagem de jardins suspensos na fachada de um edifício atual .....	22
Figura 4 - Casa com telhado verde na Escandinávia .....	22
Figura 5 - Terraço jardim projetado por Burle Marx. ....	24
Figura 6 - Villa Savoye – Le Corbusier.....	24
Figura 7 - Camadas de um telhado verde .....	26
Figura 8 – Grama Esmeralda (Zoysia japonica).....	28
Figura 9 – Ensaio experimental do telhado verde sob a chuva simulada na área do Departamento de Agronomia, UFRPE.....	33
Figura 10 - Chapas galvanizadas com suas respectivas medidas horizontais e verticais, providas de drenos.....	35
Figura 11 – Chapas galvanizadas com suas respectivas medidas horizontais e verticais, providas de drenos.....	35
Figura 12 – Passo 1 – Estrutura metálica sob apoio de alvenaria.....	35
Figura 13 – Passo 2 – Posicionamento da manta bidim .....	36
Figura 14 – Passos 3 e 4 – Sob a manta, as camadas de substrato e argila expandida.....	36
Figura 15 – Passo 5 – Plantio das placas de grama esmeralda .....	36
Figura 16 – Perspectiva das unidades experimentais ou protótipos no campo, consistindo de paredes em alvenaria e telhados verdes em chapas metálicas .....	37

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Pluviometria no Período Experimental .....	39
Gráfico 2 - Desempenho temporal das abstrações hidrológicas e do retardo de escoamento superficial do telhado verde vegetado com a gramínea Esmeralda, sob condições de chuva natural e simulada no litoral de Pernambuco.....	41
Gráfico 3 - Comportamento da velocidade média do escoamento superficial laminar em resposta a resistência hidráulica gerada do telhado verde ao longo do período experimental, desde os meses com chuvas julho e agosto, até os meses de estiagem de outubro e novembro. .	
Gráfico 4 – Comportamento da altura da lâmina do escoamento superficial do telhado verde associada a resistência hidráulica ao longo do período experimental, desde os meses com chuvas julho e agosto, até os meses de estiagem de outubro e novembro.....	43
Gráfico 5 - Comportamento das taxas de mobilização de sedimentos no telhado verde durante o período experimental de julho a novembro de 2021 em função da elevação do coeficiente arraste vegetal. ....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios IGRA: Classificação telhados verdes .....	25
Tabela 2 – Comportamento hidrológico sazonal de telhado verde sob chuvas simuladas de alta intensidade e, sob chuvas naturais do ambiente tropical de estações definidas. Média de 3 repetições as quais foi aplicado o teste de comparação de média de Tukey. ....	40
Tabela 3 – Hidráulica do escoamento superficial em telhados verdes sob chuvas simuladas de alta intensidade e sob chuvas naturais do ambiente tropical de estações definidas. Média de 3 repetições as quais foi aplicado o teste de Tukey para comparação de médias.....	42
Tabela 4 - Parâmetros relacionados a mobilização e transporte de sedimento no telhado verde sob chuva natural no ambiente tropical de estações definidas, e sob chuva simulada. Média de 03 repetições as quais foi aplicado o teste de comparação de média de Tukey. ....	44

## **LISTA DE SIGLAS**

IGRA - International Green Roof Association

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Geral .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Contexto Histórico.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Levantamento Arquitetônico.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3 Tipologia e Estrutura .....</b>	<b>25</b>
<b>3.4 Vantagens e Desvantagens dos Telhados Verdes.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5 Tipos de Vegetação .....</b>	<b>27</b>
<b>3.6 Grama Esmeralda .....</b>	<b>28</b>
<b>4 MATERIAL E MÉTODO .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Área de estudo.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 Delineamento e condução experimental .....</b>	<b>33</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>5.1 Comportamento hidrológico de telhado verde sob chuvas de alta intensidade e chuvas naturais.....</b>	<b>39</b>
<b>5.2 Hidráulica do escoamento superficial sazonal do telhado verde sob chuvas natural e simulada de alta intensidade .....</b>	<b>41</b>
<b>5.3. Parâmetros de mobilização de sedimento e durabilidade do telhado verde .....</b>	<b>45</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água da chuva em uma cidade é reconhecida como um recurso e as demandas para seu uso benéfico estão se tornando cada vez mais frequentes (BERNDTSSON, 2010). Simultaneamente, o avanço das tecnologias ambientais faz com que uma quantidade enorme de opções alternativas de recuperação de cursos d'água urbanos surjam a cada dia. A barreira é que a maioria destas requerem disponibilidade de espaço e este é um fator atualmente de grande valia visto que os espaços urbanos estão sendo construídos em escala crescente, em sua grande maioria historicamente desenfreados e em um tempo curto e insuficiente de forma que as cidades não tivessem tempo de preparo para infraestrutura.

Neste contexto, a utilização de coberturas vegetadas surge como uma técnica para mitigar os problemas causados pela urbanização, interferindo de forma significativa no controle ambiental e regulação climática, além de promover uma ampla gama de benefícios às cidades e à sociedade (MARTELLI; SANTOS JÚNIOR, 2015).

Existem novas tendências no manejo da água de drenagem pluvial nas cidades, sendo o controle do escoamento superficial na sua origem uma dessas tendências, ao invés de coletar e convergir essa água por um sistema de drenagem para bacias de retenção ou de detenção de água. Dentre essas técnicas de redução do escoamento superficial na fonte, as infraestruturas verdes são muito utilizadas, podendo-se citar pavimentos permeáveis, jardins de chuva, bacias de bioretenção, vales de retenção na lateral de estradas, telhados azuis (estruturas de retenção parcial dos volumes de chuva), captação da água de chuva para aproveitamento, cultivo de árvores ao longo de calçadas e em jardins, e os telhados verdes. Todas essas técnicas visam a desconexão parcial das águas pluviais com o sistema de drenagem, por meio da interceptação vegetal, detenção superficial, redução dos volumes e das taxas de pico do escoamento superficial, e ainda infiltração de maiores volumes de água (PAZWASH, 2016).

Telhados verdes são uma forma sustentável de desenvolvimento de baixo impacto que podem reduzir os picos de escoamento dos escoamentos pluviais e melhorar a qualidade da água do escoamento pluvial de prédios e de diversas construções, podendo essa água ser aproveitada para irrigação e uso doméstico como água cinza (XIE; LIU, 2020).

Telhados convencionais podem constituir até 40-50% do material impermeável em um centro urbano densamente construído onde nenhum espaço está disponível para uma nova infraestrutura a ser implantada (DUNNETT; KINGSBURY, 2004). Isto faz com que estes, sejam uma alternativa muito atraente para investimento em uma tecnologia sustentável.

Os estudos de telhados verdes têm se concentrado em os efeitos das propriedades físicas do substrato e as profundidades (GRACESON et al., 2013; VANWOERT et al., 2005), inclinação do telhado (GETTER et al., 2007), vegetação (NARDINI et al., 2012; SCHROLL et al., 2011), longo prazo e desempenho sazonal (TODOROV et al., 2018 apud LIU et al, 2019; VILLARREAL, 2007 apud LIU et al, 2019), e abordagens de modelagem (ALFREDO et al., 2009; HILTEN et al., 2008).

Ainda existe espaço para pesquisas sobre o efeito da implantação de telhados verdes na geração de escoamento superficial urbano, pode-se citar os trabalhos de Lan Ma, Chengzhong Pan, Jingjing Liu, também de Anurag Sharma, Oscar Herrera-Granados & Bimlesh Kumare que abordaram resistência ao escoamento superficial em taludes cobertos com cascalho e grama, transporte de carga e variação temporal de sedimentos, entre outras tratativas, que para o dimensionamento de sistemas de drenagem pluvial se faz necessário dados de avaliação do comportamento hidrológico e hidráulico do escoamento das infraestruturas verdes, como os telhados verdes. Essa pesquisa procura apontar as melhores condições de adaptação dessa tecnologia em ambientes tropicais, facilitando sua difusão e proporcionando uma melhor qualidade ambiental para as cidades brasileiras.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Esse trabalho teve como objeto de análise a avaliação de desempenho hidrológico e hidráulico dos escoamentos obtidos em um telhado verde submetido ao de regime de chuvas natural do clima tropical chuvoso de estações definidas do litoral pernambucano, concomitantemente, a realização de chuvas simuladas, como também, avaliar a durabilidade do telhado submetido a sazonalidade do clima tropical chuvoso, por meio de parâmetros de mobilização de sedimentos transportados pelo escoamento superficial desse telhado verde.

### **2.2 Específicos**

- Monitorar o comportamento hidrológico e hidráulico dos escoamentos superficiais em telhado verde com grama Esmeralda, sob chuva natural concomitante a aplicação de chuvas simuladas, e ainda, sob variação sazonal das chuvas do litoral de Pernambuco entre o período chuvoso e de estiagem (julho a novembro) desse ambiente tropical de estações definidas;
- Quantificar a resistência hidráulica gerada pelos telhados verdes e correlacioná-las as descargas líquidas, velocidade média, altura do escoamento superficial, bem como aos regimes de escoamento nos telhados verdes sob a variação sazonal ambiente tropical de estações definidas, na forma das chuvas naturais, concomitante a aplicação de chuvas simuladas;
- Monitorar a durabilidade da espécie Grama Esmeralda sob a sazonalidade do ambiente tropical chuvoso de estações definidas do litoral de Pernambuco por meio dos parâmetros de desagregação/mobilização de sedimentos.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Infraestruturas verdes e as melhores práticas de manejo das águas pluviais

A infraestrutura verde mantém os processos ecológicos naturais, assegura a qualidade do ar e dos recursos hídricos e contribui com a saúde e a qualidade de vida das comunidades (FIREHOCK, 2010), buscando imitar a natureza por meio da adoção de uma engenharia suave, trabalhando com a paisagem e se aproveitando dela para dar soluções multifuncionais e sustentáveis de longo prazo (BRANDÃO; CRESPO, 2016).

Segundo Artmann et al. (2017), a infraestrutura verde adota o princípio da multifuncionalidade, como a capacidade de responder, de forma simultânea, às múltiplas funções e benefícios atribuídos aos espaços verdes, atuando em diferentes escalas, a depender da sua aplicação:

- a) Escala de paisagem: prioriza a conexão da vida silvestre, e necessariamente, maximiza a cobertura florestal no local;
- b) Escala local: abrange, primeiramente, a cobertura das copas das árvores, as condições de sanidade da arborização urbana, florestas ripárias, conexão entre os parques da cidade, estradas verdes, jardins comunitários, pavimentos permeáveis e as outras práticas de infiltração da água de chuva;
- c) Escala particular: limita-se às áreas com necessidade de instalação de jardins verticais, telhados verdes e jardins particulares.

Ainda para Artmann et al. (2017), a infraestrutura verde abrange soluções diversas em diferentes escalas de aplicação e tem capacidade de promover espaços verdes multifuncionais e se integrar com a infraestrutura cinza, que são intervenções com base na engenharia convencional. Dessa forma, tem a capacidade de agregar múltiplos serviços ambientais à infraestrutura cinza. Quanto aos aspectos multifuncionais e multiescala da infraestrutura verde, estes se destinam a fortalecer as conexões entre diferentes tipos de espaços verdes e com a infraestrutura cinza. A infraestrutura verde pode auxiliar na promoção das cidades compactas, propiciando melhor qualidade de vida, enquanto que sua redução, como efeito da ocupação urbana, leva a perda dos serviços ambientais existentes na cidade.

O planejamento e implantação de infraestrutura verde, como componente de um ambiente sustentável, é intrinsecamente interdisciplinar (AHERN, 2009). Isso ocorre porque a maioria das tipologias de infraestrutura verde apresenta soluções para a prevenção e a recuperação de processos da degradação urbana, resultando na provisão de diversos serviços ambientais. A abordagem do uso de infraestrutura verde no planejamento e ordenamento urbano

é tendência mundial, dado que sua implantação pode colaborar com o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável indicados pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015). Na esfera das políticas públicas locais, pode-se citar o avanço dos resultados de programas de gestão, como o Programa Município Verde Azul do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2013).

### **3.1.2 Redução e controle do escoamento pluvial na fonte**

No que se diz respeito a drenagem urbana, Tucci et al. (2005), afirmaram que existem duas formas de se realizar o controle do escoamento pluvial: através de medidas estruturais, e não estruturais. Elas se dão através de ações antrópicas, estas que interferem diretamente na estrutura local, ou preventivas, como os dispositivos legais: plano de gestão de recursos hídricos, plano diretor, zoneamento ambiental e uso do solo, entre outros. Isto não quer dizer que elas sejam excludentes, por diversas vezes as soluções requerem que as medidas atuem em complementaridade.

As medidas de controle podem ser classificadas de acordo com a localização de sua aplicação segundo Canholi (2013):

- a) Medidas de controle regionais;
- b) Medidas de controle locais;
- c) Medidas de controle na fonte.

As medidas de controle regionais e locais são classificadas como medidas de controle de jusante em função do posicionamento relativo de suas estruturas na bacia urbana. Já as medidas de controle na fonte são implantadas de maneira disseminada na bacia urbana, e buscam controlar o escoamento superficial o mais próximo possível da fonte geradora (CANHOLI, 2013).

As medidas de controle na fonte são definidas como a drenagem instalada em um lote de condomínio, estacionamento, parques e passeios públicos (PORTO ALEGRE; UFRGS, 2005). Em relação ao caráter estrutural, a implantação destes dispositivos tem a finalidade de minimizar os impactos negativos ocasionados em decorrência do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica (RIGHETTO, MOREIRA E SALES, 2009).

A adoção de medidas de controle da drenagem junto a fonte tende a proporcionar a reaproximação entre o urbanismo e as águas urbanas (SOUZA, CRUZ e TUCCI, 2012). Em algumas situações, em razão da alta taxa de impermeabilização do solo da bacia hidrográfica e das suas consequências, chega-se a um determinado ponto em que a única solução

ambientalmente aceitável é a utilização do controle do escoamento pluvial na fonte (ACIOLI, 2005).

Os dispositivos de controle das águas pluviais junto à fonte mais comuns são os que fazem uso de infiltração ou evapotranspiração como, por exemplo: trincheiras de infiltração, bacias de infiltração, sistemas de biorretenção, jardins de chuva, e valas de infiltração (FLETCHER et al., 2008). Também é muito utilizado a utilização de sistemas de armazenamento temporário, como os reservatórios de retenção (RD). Estes, apresentam como principal finalidade promover a redução do pico das enchentes (BAPTISTA et al, 2011). Os reservatórios de retenção instalados na fonte ainda, podem ser usados em conjunto com outros usos domésticos, como irrigação de jardim, lavagens de piso, e demais usos que requeiram águas menos nobres (TUCCI et al., 2005).

### **3.1.3 Benefícios da redução do escoamento pluvial na fonte**

O controle do escoamento das águas pluviais com a utilização de dispositivos de controle na fonte, apresenta algumas vantagens e desvantagens, porém permite um melhor aproveitamento do sistema de condução do fluxo a jusante (CANHOLI, 2005). Segundo Urbonas e Stahre (1993), são vantagens:

- a) Redução das vazões máximas a jusante;
- b) Redução do tamanho dos condutos;
- c) Aumento da recarga do aquífero;
- d) Preservação da vegetação natural;
- e) Redução da poluição transportada para os rios;

E desvantagens:

- a) Impermeabilização do solo de algumas áreas pela falta de manutenção;
- b) Aumento do nível do lençol freático, atingindo construções em subsolo.

## **3.2 Controle do escoamento pluvial: Técnicas de baixo impacto**

Ainda se tratando das medidas de controle, com o intuito de remediar os impactos na qualidade e quantidade das águas, surgem as estratégias LID (Low Impact Development), ou em português Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto, que apresenta o planejamento de empreendimentos e de espaços urbanos através da conservação de processos hidrológicos e de recursos naturais, além da prevenção à poluição do solo e das águas. Os elementos-chave para alcançar estes objetivos são (USDoD, 2004):

- a) A conservação – preservação de vegetação e de solo nativos, minimizando o emprego de áreas impermeáveis e permitindo a manutenção de caminhos naturais de drenagem, seguida de projetos locais únicos – elaboração de projetos que respeitem peculiaridades locais naturais e assegurem a proteção de toda a bacia, em detrimento a padronizações; direcionamento do escoamento para áreas vegetadas – encorajar infiltração e recarga de aquíferos, terras úmidas e riachos, e aproveitamento, controle e tratamento realizados pela natureza; controle distribuído de pequena escala – empregar técnicas de manejo hídrico o mais próximo possível da fonte de geração do escoamento, de forma integrada ao ambiente, para mimetizar processos hidrológicos naturais;
- b) A manutenção, prevenção à poluição e educação – trabalhar a educação e o envolvimento público (inclusive de profissionais), objetivando a redução de cargas de poluentes e o aumento da eficiência e da longevidade de sistemas de drenagem, exonerando o poder público.

Tucci (2005) relata que na aplicação das técnicas de baixo impacto são utilizadas infraestruturas de drenagem, divididas em três tipos: Técnicas para controle na fonte, Técnicas para controle na microdrenagem, e Técnicas para controle na macrodrenagem. Algumas delas são: swales (áreas vegetadas), micro-reservatório, pavimentos permeáveis, trincheira de infiltração, telhado verde entre outros.

Com foco no trabalho, as infraestruturas verdes, de acordo com Herzog e Rosa (2010), as infraestruturas verdes visam manter ou restabelecer os processos naturais, apresentando-se como intervenções de baixo impacto que possuem alto desempenho, pois seus espaços são multifuncionais e flexíveis, podendo exercer diferentes funções ao longo do tempo. Essas infraestruturas contribuem para a atenuação do escoamento superficial e também da poluição transportada pelo escoamento, através da captação de águas pluviais, contribuindo com a filtragem e seu processo natural de retorno ao solo.

O conceito apresentado por Cruz, Souza e Tucci (2007) é a estratégia de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LID), que se mostra como um eficiente método para aproximar a drenagem urbana ao desenvolvimento sustentável, considerando que sua implementação pode ser compatível com o sistema existente, além de providenciar melhorias, no caso de reformulações pelo redirecionamento de águas pluviais para seu aproveitamento, infiltração e evaporação, mitigando os impactos provenientes da urbanização desordenada.

### 3.2.1 Telhados Verdes

A palavra telhado tem sua origem no uso das telhas, porém nem todo sistema de proteção do edifício constitui-se, obrigatoriamente, num telhado. Podem-se ter lajes com espelho de água, terraços e jardins suspensos (ARAUJO, 2007). Ele tem a função nas edificações semelhante à de qualquer outra cobertura, que é fornecer a quem está utilizando a privacidade e proteção (térmica e acústica), bem como também das de qualquer condição climática externa (chuva, vento, neve, entre outros).

Os telhados verdes (figura1) em inglês “green roofs”, também conhecidos como tetos verdes, coberturas verdes, e eco-telhados são sistemas construtivos que se constituem em uma cobertura vegetal formada por gramíneas ou outras espécies vegetais, implantadas em telhados ou lajes convencionais (ROSSETI et al., 2013; SOUZA et al., 2015).



**Figura 1 – Telhado Verde.** Fonte: <https://arvoresdesaopaulo.wordpress.com/>

Através dessa infraestrutura verde tem-se uma nova possibilidade de incluir espaços verdes onde antes não era possível, constando também como uma medida para o desenvolvimento sustentável, constituindo-se numa alternativa para manter o crescimento das áreas urbanas de maneira mais harmônica.

Uma infraestrutura ou construção sustentável consiste, portanto, em um sistema construtivo em que se procura atender às necessidades do homem moderno, com qualidade de vida e preservação do meio ambiente para reduzir os impactos ambientais. Construir de modo sustentável requer atenção para aproveitar os recursos naturais com a máxima eficiência de modo a amenizar os impactos ambientais gerados (SKPROJETOS, 2017), consolidando os

princípios de sustentabilidade e representam uma nova concepção que propõe equilíbrio entre a natureza e o impactante segmento da construção civil.

Esta nova realidade que se configura faz com que se torne necessário e imediato ações na indústria da construção civil para auxiliar nas reduções dos impactos ambientais e sociais causados pela falta de planejamento urbano sustentável. A difusão do uso de telhados verdes para toda a sociedade deverá partir de uma mudança de paradigmas, sendo de grande importância as novas tecnologias, o conhecimento e domínio das mesmas (SAVI, 2012).

### 3.2.2 Contexto Histórico

O telhado verde, teve suas primeiras aparições em 600 a.C. na antiga mesopotâmia, atual Iraque, e ficou conhecido como “jardins suspensos da Babilônia” figura 2, quando Nabucodonosor construiu para alegrar sua esposa doente, jardins com arvores da Pérsia (BUENO, 2010).

Eleitos como uma das sete maravilhas do mundo antigo, naquela época “as construções que comportavam jardins suspensos se chamavam Zigurates e o mais famoso era o Etemenanki, na Babilônia, que tinha 91m de altura e uma base de 91x91m” (QUINTELLA, 2012). Hoje tem-se jardins suspensos nas áreas urbanas, figura 3.



**Figura 2 – 3D Ilustração de como seria os Jardins Suspensos da Babilônia.**

Fonte: <https://notaterapia.com.br/2021/04/28/incrivel-video-em-3d-mostra-como-seriam-os-jardins-suspensos-da-babilonia/>.



**Figura 3 – Imagem de jardins suspensos na fachada de um edifício atual.**

Fonte: <https://archtrends.com/blog/jardim-suspenso/>.

Ferreira e Moruzzi (2007) esclarecem que na Escandinávia, esse método era utilizado como forma de isolamento térmico, no qual os telhados eram uma mistura de terra e grama (figura 4), e logo abaixo dessas camadas eram colocadas pesadas vigas de madeiras intercaladas com as cascas de árvores para se fazer a impermeabilização.



**Figura 4 – Casa com telhado verde na Escandinávia.**

Fonte: <https://nerdizmo.uai.com.br/10-incriveis-casas-com-telhados-verdes-da-escandinavia/>.

Historicamente por volta dos anos 30 do século passado, o telhado verde retoma pela mesma necessidade atual, como alternativa verde de recuperar o espaço tomado pelo desenvolvimento das cidades e conseqüentemente das suas construções. Quintella (2012), relata a difusão do telhado verde no continente europeu desde a década de 1960, que posteriormente vem se desenvolver através de políticas que subsidiavam de 35 a 40 marcos alemães (*moeda* oficial na República Federal da *Alemanha* de 1949 a 2002 até a chegada do euro) por metro quadrado de cobertura a ser construída, também citando o avanço científico de drenagem, espécies adequadas, inibidores de raízes, membranas impermeabilizantes, entre outros.

Nos anos 90, embora não muito diferente de problemas que enfrentamos atualmente, Quintella (2012), cita as dificuldades de implementação que os Estados Unidos sofreram sobretudo pela diferença cultural impulsionada pelo capitalismo e baixa difusão e conhecimento dos telhados verdes.

Atualmente, no século XXI voltamos a falar da Alemanha citando sua responsabilidade como difusora do telhado verde e que possui conforme afirmado por Köhler et al. (2002 apud SAVI, 2012), o número de 7% dos novos telhados construídos, que se devem a garantia de 30 anos dada ao produto, se igualando por fim, a garantia de telhados convencionais.

### **3.2.3 Levantamento Arquitetônico**

À medida que a consciência ambiental vai sofrendo evolução ao longo dos anos, a arquitetura sustentável também segue acompanhando esse processo. Carregando elementos da arquitetura bioclimática e vernacular, os telhados verdes traduzem a integração do meio externo com o interno harmonizando as construções com o meio ambiente, empregando materiais e recursos do próprio ambiente na edificação.

Segundo Ramos et al (2017)., esses elementos são notados de forma significativa em 1920 quando o arquiteto modernista Charles-Edouard Jeanneret-Gris, mais conhecido como Le Corbusier utilizando o nome de “Terraços Jardins” introduz esse conceito em suas obras (Figura 6), onde se tinha como objetivo recuperar os espaços ociosos das coberturas em jardins e reinseri-las na natureza. Tornando assim os telhados verdes como um dos cinco princípios do modernismo.

No Brasil, influenciado pelo Movimento Modernista, o primeiro edifício com cobertura vegetal foi o então Ministério da Educação e Saúde, na cidade do Rio de Janeiro (Figura 5), concebido sob a orientação de Le Corbusier e por uma equipe formada por Niemeyer, Costa,

Reidy, Moreira, Leão e Vasconcellos. O projeto paisagístico de traçado orgânico foi idealizado por Burle Marx, este que inclusive possui uma vastidão de jardins públicos e privados em Pernambuco, e considerado o marco na ruptura da linguagem paisagística em nosso país. (SALEIRO FILHO et al, 2015.)



**Figura 5 - Terraço jardim Palácio Capanema projetado por Burle Marx.**

Fonte: Disponível em: < <https://www.gov.br/bn/pt-br/assuntos/noticias/palacio-capanema-sera-destinado-a-cultura-nacional-e-voltara-a-abrigar-biblioteca-euclides-da-cunha-ligada-a-fbn>>. Acesso em: 18 jul.



**Figura 6 – Villa Savoye – Le Corbusier.** Fonte: Foto da autora (2022)

Um século se passou, o conceito de terraço jardim desenvolvido por Le Corbusier é mais atual do que nunca. Por fim, ao longo do tempo o telhado verde mostrou que se constitui solução para alternativas sociais, econômicas, ambientais e tecnológicas, destacando a importância do uso dos telhados verdes em prol da cooperação de uma arquitetura mais sustentável, não só em novas edificações, mas em espaços já existentes suscetíveis a receberem as mudanças.

### 3.3 Tipologia e Estrutura

De acordo com a International Green Roof Association (IGRA), a depender do tipo de vegetação e substrato, eles podem ser classificados em três tipos: telhado verde intensivo, semi-intensivo e telhado verde extensivo. Na tabela 1, temos os critérios utilizadas para classificação pelo IGRA (2017).

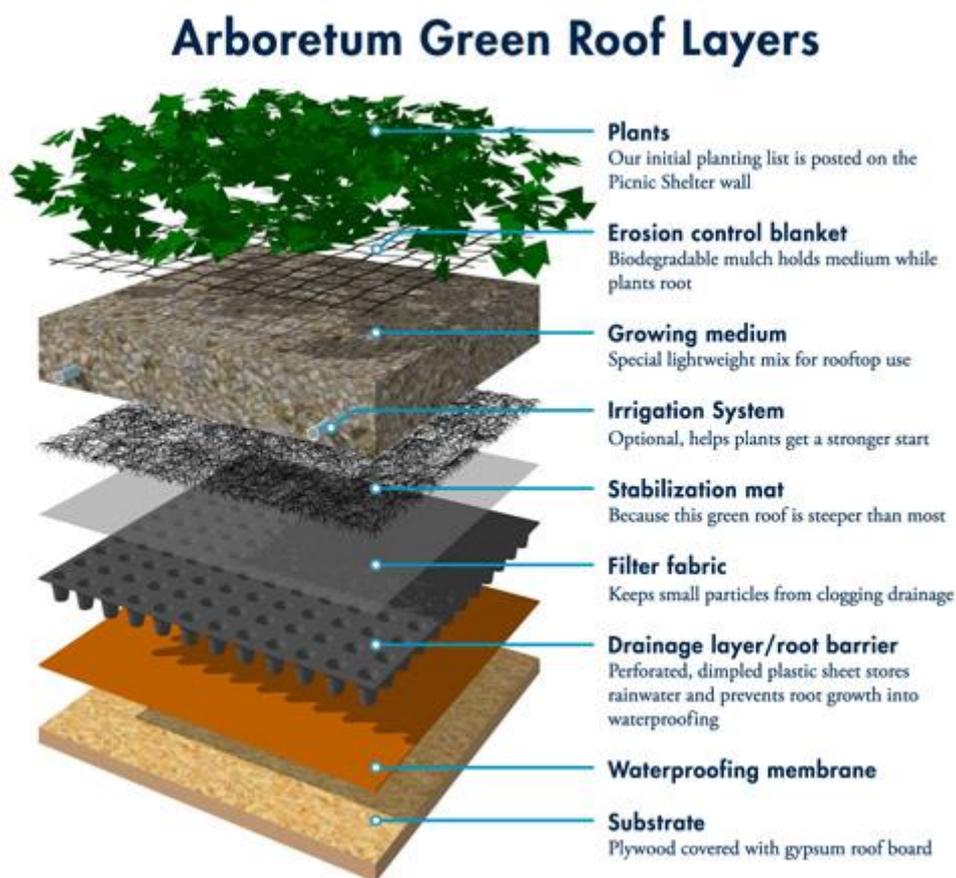
**Tabela 1 – Critérios IGRA: Classificação telhados verdes.**

<b>Crítérios</b>	<b>Telhado Verde Extensivo</b>	<b>Telhado Verde Semi-Intensivo</b>	<b>Telhado Verde Intensivo</b>
<b>Manutenção</b>	Baixo	Periodicamente	Alto
<b>Irrigação</b>	Não	Periodicamente	Regularmente
<b>Comunidade de Plantas</b>	Moss-Sedum, ervas e gramas	Gramas, ervas e arbustos	Gramados ou perenes, arbustos e árvores
<b>Altura do Substrato</b>	60-200mm	120-250mm	150-400mm e em garagens subterrâneas >1000m
<b>Peso</b>	60-150 kg.m <sup>2</sup>	120-200kg.m <sup>2</sup>	180-500kg.m <sup>2</sup>
<b>Custo</b>	Baixo	Médio	Alto
<b>Uso</b>	Camada de proteção ecológica	Telhado verde projetado	Parque como jardim

Fonte: IGRA (2017).

Já se tratando da estrutura que compõe os telhados verdes, variam de acordo com a tecnologia utilizada em cada caso e existem inúmeras técnicas que estão em processo de desenvolvimento e aprimoramento (BLANCO, 2012). Assim, os materiais utilizados em cada camada da cobertura verde podem variar entre regiões, seja pela necessidade de adequação ao clima, disponibilidade de alguns materiais ou pelas técnicas utilizadas por empresas (OLIVEIRA NETO, 2014).

Contudo há uma composição básica da estrutura dos telhados verdes e que são levadas em consideração quando se for implantar o telhado independente de sua tipologia (BALDESSAR, 2012; OHNUMA JÚNIOR et al, 2014; TASSI et al., 2014). Para Thompson (2010), o telhado verde apresenta diferentes camadas que servem para propósitos distintos, sendo composto por: substrato, membrana a prova d'água, camada de drenagem/barreira de raízes, tecido filtrante, tapete de estabilização, sistema de irrigação, camada para cultura, manta de controle de erosão e plantas.



**Figura 7 – Camadas constituintes de um telhado verde.** Fonte: Thompson, 2010.

Outro aspecto importante se dá a respeito do suporte da estrutura que será submetida a uma sobrecarga estática dos materiais saturados de água, que vai desde o dimensionamento de cargas e da drenagem sobre o telhado, superfície impermeabilizada, inclinação mínima e máxima (geralmente variante entre 2% e 35%), bem como, irrigação e manutenção.

### **3.4 Vantagens e Desvantagens dos Telhados Verdes**

Segundo Kozmhinsky et al. (2016), os telhados verdes contribuem no aumento da condição de vida nas grandes cidades através da melhoria da qualidade do ar, redução da poluição sonora e da temperatura ambiental, captação e retenção da água de chuva, umidificação do ar nos meses quentes e secos do ano, abrigo para avifauna, sendo fomentadores de desenvolvimento sustentável para os espaços urbanos e embelezamento das cidades.

Alguns outros autores defendem ainda benefícios terapêuticos, produção de alimentos, redução de consumo energético e vida útil da edificação. Entre tantos benefícios ecossistêmicos, é necessário enfatizar a redução do escoamento que é repetidamente considerada o principal benefício, pelos recorrentes eventos hidrológicos, esta se mostra uma forte razão pelas quais eles são legislados e incentivados no mundo inteiro.

Dentre essa vastidão de benefícios, alguns quesitos também precisam ser citados como empecilhos, que através de um quadro comparativo são segundo Jonston e Newton (2004), um alto custo, sistemas mais complexos que requerem conhecimento técnico, maior peso sobre o telhado, pouco atrativo no inverno, necessidade de sistemas de irrigação e drenagem que implicam em custos com energia, água e materiais.

### **3.5 Tipos de Vegetação**

Na construção do telhado verde, uma das partes mais determinantes é a escolha da vegetação que será utilizada. A variedade de plantas que se adaptam bem ao telhado verde é grande. Podem ser usadas a Estrelinha dourada, Mosquitinho, Bulbine, Russelia, Rosinha de Sol, Alho Social, Lírio dos ventos, Asyssum Lobularia, Campim Azul, Grama preta, Grama Amendoim e Grama Esmeralda. (ECO CASA, 2011)

As plantas mais usadas são o Capim-Chorão, gramínea muito rústica e quase sem exigências de cultivo, deve ser mantida com até 50 cm de altura; Erva-6 gorda, muito boa para telhados verde, e resistente a solos rasos; Capuchina, herbácea comestível sem exigência quanto ao solo, pode se comportar como forrageira; Rabo-de-gato, Rasteira leve e ornamental que suporta bem o sol, mas não é aconselhada para locais aonde ocorrem geadas; Mal-me-quer, excelente para dar estabilidade a telhados muito inclinados: resistente a extremos de umidade; Grama esmeralda, muito usada em telhados verdes, tem efeito atapetado e baixa necessidade de poda, e também contém o avanço de ervas daninhas. (QUINTELLA, 2012)

Um levantamento bibliográfico foi feito com relação as opções de vegetação mais utilizadas em telhados verdes, visto que algumas plantas são agressivas ao sistema de impermeabilização, sendo necessário realizar um recorte estabelecendo os critérios: das que tenha resistência ao sol, possuam pouca manutenção e tenham forte tolerância aos extremos: secas e alagamentos.

Destacaram-se as espécies: Dinheiro em penca (*Callisia repens*), Clusia (*Clusia sp.*), Capuchinha (*Tropaeolum majus*), Bulbine (*Bulbine frutescens*), Lambari (*Tradescantia zebrina*), Grama São Carlos (*Axonopus compressus*), Grama Amendoim (*Arachis repens*) e Grama Esmeralda (*Zoysia japônica*).

### 3.6 Grama Esmeralda

A grama esmeralda, espécie de gramínea de nome científico *Zoysia japônica* (figura 08), é uma gramínea das mais utilizadas para o estabelecimento de telhados verdes, por atender todos os critérios citados acima, e pelo motivo de ser a mais vendida, utilizada e popularmente conhecida no Brasil.



**Figura 8 – Grama Esmeralda (*Zoysia japônica*).** Fonte: Disponível em <http://jardimflordoleste.com.br/tipos-de-grama-e-indicacoes>

Segundo Gurgel (2003), *Z. japônica* é uma grama de ampla adaptação às condições brasileiras, podendo ser usada de Norte à Sul, em regiões litorâneas ou nos Planaltos. Devido à sua boa capacidade de resistência ao pisoteio, foi durante muitos anos a variedade dos principais gramados de futebol do Brasil, como Maracanã, Morumbi, Mineirão e outros. Também é a espécie de grama da grande maioria dos gramados residenciais brasileiros.

Se adapta à diferentes tipos de solo, desde arenosos, a argilosos; exceto os solos com baixa capacidade de drenagem. Desenvolve-se bem em áreas de plena insolação, tolerando um mínimo de sombreamento, tem efeito atapetado e baixa necessidade de poda, e também contém o avanço de ervas daninhas.

### 3.7 Contexto Legal

Com o aumento de políticas ambientais nos últimos anos, cresce também consideravelmente o número de legislações que tratam sobre o tema. Com relação ao uso de telhado verde, houve a edição de várias legislações ambientais que visam não somente proteger o meio ambiente, mas também estimular a mudança de comportamento dos cidadãos através da promoção de incentivos fiscais, bem como da obtenção de selos ou certificados sustentáveis. Além disso, o uso de telhados verdes tem sido bastante utilizada como medida de compensação ambiental em atividades relacionadas à construção civil, demonstrando uma conduta que permite a inserção cada vez maior de políticas voltadas à construção de uma sociedade sustentável.

Se tratando da legislação do território de estudo, a cidade do Recife desde o ano de 2015, juntamente de outras cidades como exemplo a de João Pessoa (Lei 10.047/2013, desde o ano de 2013) e Guarulhos (Lei 7031/2012, desde o ano de 2012) promovem a obrigatoriedade da instalação de telhados verdes de acordo com seus critérios.

*A Lei municipal, Nº 18112 DE 12/01/2015, dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. (RECIFE, 2015, grifos nossos)*

Em suma, ela impõe que edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não habitacionais com mais de 400m<sup>2</sup> de área de cobertura deverão prever a implantação de "Telhado Verde", da seguinte forma:

I - no pavimento descoberto destinado a estacionamento de veículo das edificações, cuja área não se contabilizará para efeito de área construída, desde que:

- a) não sejam cobertas as áreas de solo permeável;
- b) sejam respeitados os afastamentos legais previstos para os imóveis vizinhos;
- c) seja respeitado um afastamento mínimo de 1m (um metro) e máximo de 3m (três metros) em relação à lâmina do pavimento tipo ou qualquer outro pavimento coberto;

II - exclusivamente para os edifícios multifamiliares descritos no caput, nas áreas de lazer situadas em lajes de Piso, no percentual de 60% (sessenta por cento), e nas áreas de lazer em pavimento de cobertura, em pelo menos, 30% (trinta por cento) de sua superfície descoberta. (RECIFE, 2015)

No inciso 2º a lei municipal do Recife estabelece que O "Telhado Verde" poderá ter vegetação extensiva ou intensiva, de preferência nativa para resistir ao clima tropical do município, com as suas variações de temperatura e umidade. Não possuindo caráter de orientação destas, fator pelo qual comumente os telhados verdes são pouco difundidos no Brasil, e com menos força ainda no Nordeste, a lei aparenta evidenciar mais em quesitos que determinam os reservatórios de águas pluviais, o que reforça ainda mais a importância da dissertação em questão.

Embora seja um avanço ambiental e social significativo a implantação dessas legislações, não se observa de fato o cumprimento da lei em vigor, faltando fiscalização pelos órgãos competentes e mostrando uma necessidade de uma política que seja mais harmônica e apropriada para o meio ambiente.

### **3.8 Escoamento Superficial**

O escoamento superficial é uma fase do ciclo hidrológico que consiste no deslocamento de água sobre a superfície do solo após uma chuva intensa, que tende a crescer conforme o aumento do volume, intensidade e duração desta (PRUSKI et al., 2003). Isto acontece quando a taxa de precipitação pluviométrica supera a taxa de infiltração e retenção de água no solo, que quando se encontra saturado forma um acúmulo dos excedentes sobre nas depressões do terreno, que logo extravasa.

Dentre os tipos de escoamento, há duas tipologias a serem levadas em consideração, podendo ser laminar onde é caracterizado pelo movimento em lâminas ou camadas, não havendo mistura macroscópica de camadas de fluido adjacentes ou turbulento, sendo caracterizado pelo movimento tridimensional aleatório das partículas do fluido sobreposto ao movimento da corrente. (PAZWASH, 2011)

O escoamento superficial raso segundo Bezerra et al. (2010), é uma resultante da intensidade do evento pluviométrico quando o volume precipitado excede a taxa de infiltração do solo, após o evento já ter superado as abstrações hidrológicas, tais como a interceptação vegetal, a evaporação, a demanda matricial do solo, a retenção e a detenção superficial.

Para simulação e avaliação de escoamentos rasos, tem-se os simuladores de chuva que são equipamentos nos quais a água é aplicada por aspersão com uma intensidade de aplicação superior à capacidade de infiltração do solo, exceto para um curto intervalo de tempo, logo após o início da precipitação (BRANDÃO et al., 2003), para atuar de forma similar as chuvas naturais. Porém, levanta-se um comparativo entre estas, de forma que para se ter confiabilidade,

segundo Nunes (2018), as características da chuva devem ser simuladas adequadamente, os dados de escoamento e erosão, analisados cuidadosamente e os resultados, interpretados sensatamente.

Segundo Silveira e Salvador (1985), as características desejáveis para que um simulador de chuvas seja adequado a estudos hidráulicos e de erosão do solo são aqueles das chuvas naturais, mais notadamente o tamanho, distribuição, velocidade terminal das gotas e intensidade de aplicação.

Eltz et al. (2001), afirmaram, no entanto, que, avaliar o processo erosivo em condições naturais é mais complicado devido a variação das vazões durante a chuva, eventos que apresentam erosividade igual podem ter perdas de solo diferentes, variando de acordo com a umidade anterior ao evento, junto também à oscilação da intensidade durante o evento devido aos picos de maior intensidade.

Estudos foram realizados com o intuito de se fazer um comparativo entre os resultados de perdas de constituintes do solo no escoamento superficial para chuvas naturais e simuladas, pois, as tendências entre a precipitação natural e simulada apresentaram padrão semelhante, indicando uma consistência entre os processos. (KIBET et al., 2014). Desta forma, Vadas et al. (2007) justificaram que a simulação de chuva pode ser utilizada na realização de estudos para representar os eventos naturais.

### **3.9 Hidráulica do escoamento nos telhados verdes**

O escoamento laminar raso caracteriza-se por uma delgada lâmina de água que flui a curtas distâncias sobre a superfície do solo, carregada de partículas que foram desagregadas do solo pela chuva e pela própria tensão de cisalhamento do escoamento laminar. A alta concentração de nutrientes associados aos sedimentos finos indica que não se deve desprezar este tipo de erosão como mecanismo de transporte (PALIS et al., 1990). Neste contexto, é importante compreender a hidráulica do escoamento laminar e a quantificação do sedimento transportado (CASSOL et al., 2000).

Cantalice et al. (2017) levantaram que o escoamento superficial estará sujeito às forças físicas que atuam sobre ele, ou seja, os parâmetros hidráulicos do escoamento como a viscosidade cinemática da água, a velocidade média do escoamento e a descarga líquida por unidade de largura.

Considerando esses parâmetros hidráulicos, consegue-se chegar aos outros como o fator de perda de carga e os números de Reynolds e Froude e a altura da lâmina de escoamento (MORGAN, 1996; GOVERS, 1989).

Algumas condições que devem ser levadas em consideração no escoamento superficial são os números de Reynolds ( $Re$ ) e Froude, que segundo Herman e Néstor (2007) são variáveis adimensionais. O número de Froude ( $Fr$ ) correlaciona a força de inércia do escoamento pela ação da gravidade, enquanto o número de Reynolds correlaciona a viscosidade e a força de inércia, e para valores  $< 500$ , o fluxo é laminar e entre 500 e 2500, fluxo transicional e  $> 2500$ , o regime é turbulento, isso nas condições de escoamentos livres, como em canais abertos (SIMONS; SENTURK, 1992). Porém, há de salientar que para o escoamento em entressulcos os valores devem ser abaixo de 500, onde o fluxo do escoamento sempre será laminar (CASSOL et al., 2004), podendo variar de acordo com Froude como lento ou rápido (SILVEIRA, 2013).

### **3.10 Rugosidade hidráulica gerada pelos telhados verdes**

A vegetação exerce maior influência diretamente no escoamento superficial aumentando a resistência ao fluxo da água no solo. De forma restrita a presença de vegetação como cobertura do solo se constitui como a circunstância mais relevante para a absorção da energia cinética presente na chuva (PANACHUKI et al., 2011).

Mello et al. (2007) afirmam que a rugosidade hidráulica e a cobertura do solo são diretamente influenciadas pelo tipo de manejo do solo. Cantalice et al. (2017) e Silveira (2013) relataram que a presença de vegetação ou resíduos sobre o solo interfere nas características hidráulicas do escoamento na erosão em entressulcos, o que está de acordo com Cantalice et al. (2009), ao afirmarem que maiores níveis de cobertura do solo elevam a rugosidade hidráulica, diminuindo assim, a desagregação do solo. Einstein e Banks (1950) demonstraram que a resistência de um coletivo de elementos posicionados em fluxo é igual à soma de resistência de cada elemento de forma individual.

Nesse sentido, Shucksmith et al. (2011); Jarvela (2002) relatam que a densidade de plantas também influenciará na resistência ao escoamento superficial, pois uma população de plantas mais densas tende a preencher mais os espaços da área de cultivo, um exemplo disso foi descrito por Nacinovic et al., (2014) que observaram um aumento na rugosidade devido ao aumento da cobertura do solo em áreas de pastagens. Desta forma, pode-se considerar que deste ponto de vista, quando houver aumento na densidade da vegetação, ocorrerá um aumento

proporcional da resistência vegetativa se for considerado que todos os elementos da vegetação são do mesmo tamanho e ocasionam o mesmo valor de arraste (SHUCKSMITH et al., 2011)

No escoamento laminar raso, comum na erosão em entressulcos, a velocidade do escoamento é reduzida pela presença de resíduos vegetais na superfície e essa redução ocorre, geralmente, por causa do aumento da rugosidade hidráulica do fluxo superficial, resultando em aumento da altura do escoamento, impedindo a ação das gotas de chuva na superfície do solo (FOSTER, 1982; BRAIDA, CASSOL, 1999).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

Os ensaios experimentais foram realizados na área do departamento de Agronomia na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Campus Dois Irmãos, Recife, de altitude 4m acima do nível do mar e coordenadas latitude -8.017453320235767, e longitude -34.94575175244139, que possui clima tropical de estações definidas, tendo precipitação média anual de 2457mm segundo a APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima.



**Figura 9** – Ensaio experimental do telhado verde sob a chuva simulada na área do Departamento de Agronomia, UFRPE.

Fonte: Autora.

## 4.2 Delineamento e condução experimental

O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso com 3 repetições, consistindo nos tratamentos os meses de julho, agosto, outubro e novembro de 2021 (quatro blocos, objetivando-se expor os telhados verdes a sazonalidade climática, num total de 12 ensaios experimentais. As unidades experimentais adotadas foram estruturas de alvenaria, que suportaram os telhados verdes constituídos de chapas metálicas galvanizadas com 2 m de comprimento, 1 m de largura, portanto, área de 2m<sup>2</sup>, 10 centímetros de altura e, 16 % de declividade. Os resultados experimentais foram submetidos análise de variação (ANOVA) com aplicação do teste Tukey para diferenciação das médias ao nível de 5% de probabilidade, realizada por meio do programa computacional R, além de análises de regressão por meio do Excel ou CurvExpert.

Os telhados verdes experimentais foram submetidos a precipitação produzida por um infiltrometro aspensor já desenvolvido anteriormente no Laboratório de Manejo e Conservação do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, semelhante ao modelo desenvolvido por Meyer e Harmon (1979).

A intensidade de precipitação nos ensaios foi medida por meio de 10 pluviômetros colocados no entorno dos protótipos, com duração de 40 minutos por eventos. Para avaliação do desempenho hidráulico do telhado verde, a intensidade de chuva planejada foi de alta intensidade, em torno de 130 mm h<sup>-1</sup>, justo para se avaliar o desempenho hidrológico e hidráulico do telhado verde sobre condição extrema.

Os ensaios experimentais foram realizados nos meses de julho, agosto, outubro e novembro de 2021, em três repetições, totalizando 12 ensaios, conforme Figura 12 até 16 abaixo.

Por meio da água bombeada de canal natural por bomba submersa tipo sapo ECCO marca AGAUGER, ligamos o simulador de chuva que iniciava o movimento horizontal de oscilação. O início de cada experimento foi considerado com o início da chuva simulada.

Cada ensaio constava em oito amostragens, no intervalo de cinco minutos entre elas, tendo coleta aproximada de 20 segundos cada uma. Registrava-se o volume coletado de cada intervalo amostrado. No fim de cada ensaio, mediu-se os dez pluviômetros dispostos com auxílio da proveta, a drenagem através do recipiente posicionado abaixo da parcela, e a recessão.

### 4.3 Preparação dos Telhados Verdes

Os telhados verdes foram compostos por uma camada de brita fina de 0,5 cm coberta por tela tipo “bídím”, e o volume foi preenchido com uma camada de argila, solo e tapetes de grama Esmeralda. Os telhados verdes forma providos de três drenos na sua parte posterior, para quantificação desse volume (fotos 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16). Os telhados verdes foram providos de três drenos na sua parte posterior, para quantificação desse volume durante os ensaios experimentais. Na sequência de fotos pode-se perceber a colocação da manta bídím sobre a camada de brita, camada de argila e, posterior colocação de solo e tapetes da grama Esmeralda.

**Figuras 10 e 11 – Chapas galvanizadas com suas respectivas medidas horizontais e verticais, providas de drenos.**



Fonte: Fotos da autora (2022)

Os telhados verdes foram compostos por uma camada de brita fina de 0,5 cm coberta por tela tipo bidim, e o volume foi preenchido com uma camada de argila, e com solo e grama Esmeralda, na forma de tapetes de grama Esmeralda conforme o passo a passo foi descrito abaixo nas Imagens 12 até a 15. Os telhados verdes foram providos de três drenos na sua parte posterior, para quantificação desse volume.



**Figura 12 – Passo 1 – Estrutura metálica sob apoio de alvenaria.** Fonte: Foto da Autora (2022)



**Figura 13: Passo 2 – Posicionamento da manta bídima.** Fonte: Foto da Autora (2022)



**Figura 14: Passos 3 e 4 – Sob a manta, as camadas de substrato e argila expandida.** Fonte: Autora.



**Figura 15: Passo 5 – Plantio das placas de grama esmeralda.** Fonte: Autora



**Figura 16. Perspectiva das unidades experimentais ou protótipos no campo, consistindo de paredes em alvenaria e telhados verdes em chapas metálicas.** Fonte: Foto da autora.

#### **4.4 Avaliação hidrológica e hidráulica do Escoamento no telhado verde**

O comportamento do escoamento superficial dos telhados verdes foram obtidos a partir dos parâmetros descritos a seguir. Segundo Nunes (2018), a velocidade superficial do escoamento superficial foi obtida pela determinação do tempo gasto para que o corante (azul de metileno) levou para percorrer a distância entre o ponto de aplicação e o vertedor da parcela, sendo

expressa em  $\text{m s}^{-1}$ . O produto da velocidade superficial foi multiplicado por um fator de correção ( $\alpha = 2/3$ ) para a obtenção da velocidade média.

De acordo com Woolhiser; Liggett (1967) e Singh (1983) para solução cinemática das equações de Saint-Venant, a altura do escoamento foi obtida pela expressão:

$$h = \frac{q}{V} \quad (1)$$

em que:  $h$  = altura da lâmina de escoamento (m);  $q$  = descarga líquida por unidade de largura ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) e  $V$  = velocidade média do escoamento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

A descarga líquida por unidade de largura ( $q$ ), foi determinada pela medição do volume da descarga líquida coletada na extremidade da calha coletora em provetas, durante o tempo cronometrado, e dividido pela largura do telhado verde, para expressão em  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$  (CANTALICE et al. 2017).

Para a caracterização do regime hidráulico do escoamento superficial gerado, foi determinado o número de Reynolds ( $Re$ ), bem como o número de Froude ( $Fr$ ), por meio das equações encontradas em Simons e Senturk (1992):

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \quad (2)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

em que:  $V$  = velocidade média do escoamento ( $\text{m s}^{-1}$ );  $h$  = altura da lâmina de escoamento (m);  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ ); e  $\nu$  = viscosidade cinemática da água ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ), que foi obtida pela equação desenvolvida por Julien (1995):

$$\nu = [1,14 - 0,031 (T - 15) + 0,00068 (T - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (4)$$

em que:  $\nu$  = viscosidade cinemática da água ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) e  $T$  = temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ) aferida por meio de termômetro.

A resistência ao escoamento em regime laminar será determinada pelo coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach, de acordo com a equação a seguir:

$$f = \frac{8ghS}{V^2} \quad (5)$$

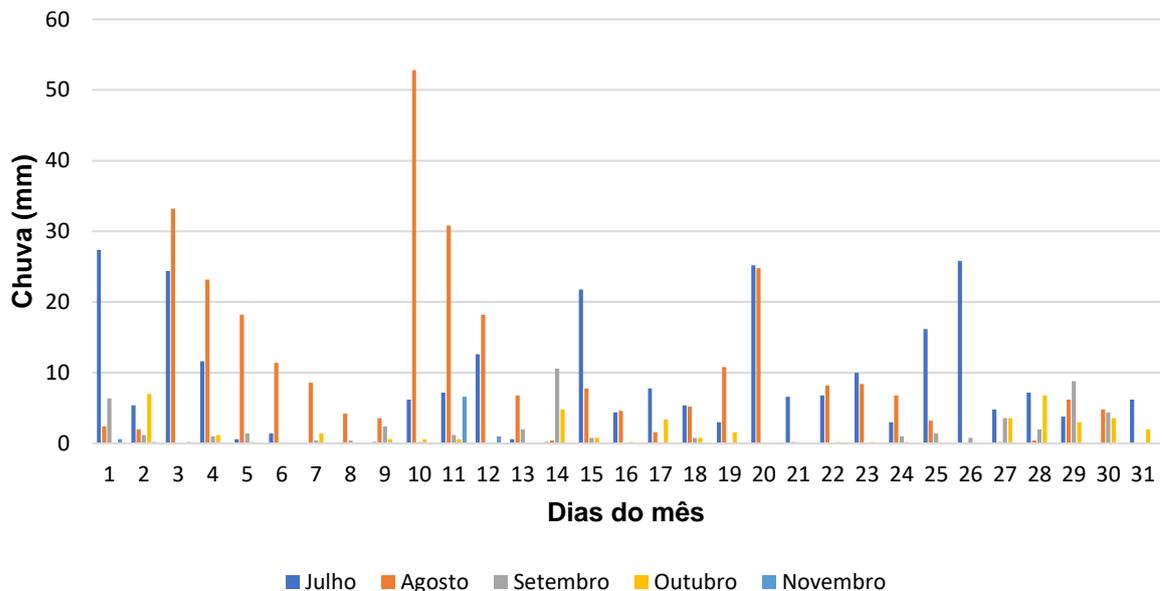
em que  $f$  = coeficiente de Darcy-Weisbach (adimensional);  $g$  = aceleração da gravidade  $\text{m s}^{-2}$ ;  $h$  = altura da lâmina do escoamento (m);  $S$  = inclinação do declive ( $\text{m m}^{-1}$ );  $V$  = velocidade do escoamento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

As abstrações hidrológicas (infiltração da água, drenagem, retenção superficial, detenção superficial, e evapotranspiração) foram determinados conjuntamente, pela subtração do escoamento superficial em  $\text{mm. h}^{-1}$  da intensidade precipitada em  $\text{mm. h}^{-1}$ . Individualmente, o volume de drenagem também foi avaliado por meio de reservatórios acoplados aos três drenos existentes na parte posterior dos telhados verdes. O retardo do escoamento superficial imposto pelo telhado verde foi obtido pela relação entre a taxa de escoamento superficial e a intensidade da chuva, e expresso em percentagem.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Comportamento hidrológico de telhado verde sob chuvas de alta intensidade e chuvas naturais

No gráfico 5.1 consta toda pluviometria natural do período experimental de julho a novembro de 2021, sendo possível observar a variação pluviométrica entre julho e agosto, ainda na estação chuvosa, e outubro e novembro, já na estação sem chuva ou de pouca chuva do litoral de Pernambuco. Estes dados são importantes por trazerem a quantidade de chuva anterior ou no dia dos ensaios experimentais, determinantes na umidade antecedente do solo/substrato do telhado verde e, conseqüente escoamento superficial ocorrido nesse tipo de infraestrutura verde.



**Gráfico 5.1- Pluviometria natural na área experimental entre julho e novembro de 2022.**

Fonte: Elaboração da autora (2022).

A tabela 2 apresenta o comportamento hidrológico sazonal do telhado verde sob chuvas simuladas de alta intensidade e, sob chuvas naturais do ambiente tropical de estações definidas.

**Tabela 2 –Comportamento hidrológico sazonal de telhado verde sob chuvas simuladas de alta intensidade e, sob chuvas naturais do ambiente tropical de estações definidas. Média de 3 repetições as quais foi aplicado o teste de comparação de média de Tukey.**

Mês	Chuva natural (mm) 5 dias antecedentes	Tes (mm.h <sup>-1</sup> )	Ip (mm.h <sup>-1</sup> )	Abstrações (mm.h <sup>-1</sup> )	Retardo escoamento superficial (%)
<b>Julho</b>	45.600	91.78 a	128.21 a	42.46 b	33.13 b
<b>Agosto</b>	111.800	70.71 ab	126.27 a	55.56 ab	44.12 ab
<b>Outubro</b>	0.000	56.71 ab	126.11 a	69.40 a	58.20 a
<b>Novembro</b>	0.000	46.64 b	128.64 a	83.54 a	63.73 a

Fonte: Elaboração da autora (2022).

Pode-se observar que sob altas intensidades de chuva simulada obtidas, e simultaneamente, sob as chuvas naturais significativas o telhado verde chegou a retardar 33 e 44% do escoamento superficial produzido, nos meses de julho e agosto, respectivamente. Nos meses de outubro e novembro, quando o telhado verde esteve somente sob as chuvas simuladas, o telhado verde foi mais eficiente no retardo do escoamento superficial durante os meses de estiagem natural, retardando respectivamente 58 e 63% do escoamento nestes meses.

Em sua relação estrutural, a manta bidim, juntamente do substrato e da argila expandida, geraram uma superfície irregular que auxiliaram a retenção da água tornando-a mais disponível para a planta e ajudando a vegetação a se fixar. Esses obstáculos auxiliam no retardo do escoamento superficial, exigindo um tempo maior para a água percorrer toda superfície do modelo de telhado, até ser lançada para drenagem.

Pode-se inferir a partir desses resultados, que quando da ocorrência de chuva natural, o retardo do escoamento ocorre, e dessa forma, os escoamentos produzidos ficam melhor distribuídos no tempo, o que reduz os picos de vazão, demonstrando-se, assim, a importância do telhado verde para regiões que sofrem principalmente com inundações, auxiliando a reduzir as demandas dos sistemas de drenagem urbana convencionais.

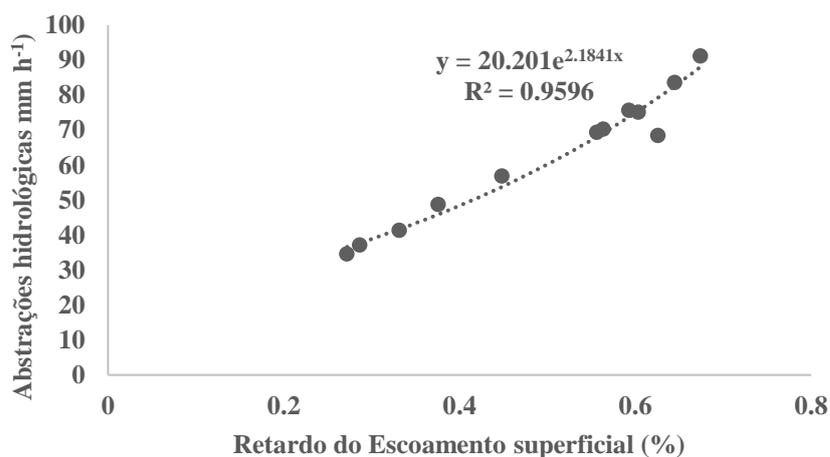
Ainda, na tabela 2, observa-se que as abstrações hidrológicas, como interceptação da chuva, infiltração da água no telhado verde, bem como, a detenção superficial e a retenção de água pelo complexo solo-substrato do telhado foram estatisticamente significativas, entre os períodos seco e chuvoso, sendo obviamente maiores na estação sem chuvas.

Quando há ocorrência de chuva, o retardo é menor, notando-se um menor número correspondendo ao mês chuvoso, com crescimento gradual ao longo dos meses. Os meses que mais se assemelham os parâmetros, em outubro e novembro, vem de uma época seca sem chuva,

sem incidência da chuva natural só da simulada, com uma umidade menor da parcela, visto que o tempo seco aumenta a abstração e conseqüentemente a eficiência do terraço.

Ainda assim, na estação de chuvas, o telhado verde chegou a abstrair de 42 a 56% das chuvas naturais e simuladas. O parâmetro de abstrações hidrológicas, reforçam o bom desempenho hidrológico do telhado verde.

O gráfico 5.2 traz o comportamento simultâneo das abstrações hidrológicas e dos retardos de escoamento superficiais obtidos pelo telhado verde durante todo o período experimental, inicialmente durante a estação de chuvas e em seguida na estação seca quando só ocorreram as chuvas simuladas. Fica demonstrado na figura 1, a eficiência do telhado verde simultaneamente, tanto nos volumes de abstrações hidrológicas como nos de retardo do escoamento, desde a estação chuvosa até o período sem chuvas quando o telhado verde foi mais eficiente.



**Gráfico 2 - Desempenho temporal das abstrações hidrológicas e do retardo de escoamento superficial do telhado verde vegetado com a gramínea Esmeralda, sob condições de chuva natural e simulada no litoral de Pernambuco.**

Fonte: Elaboração da autora (2022)

## 5.2 Hidráulica do escoamento superficial sazonal do telhado verde sob chuvas natural e simulada de alta intensidade

A tabela 3 retrata o comportamento hidráulico do terraço verde sob as chuvas de alta intensidade e sob chuvas naturais do ambiente tropical chuvoso por meio da velocidade média do escoamento superficial, a vazão unitária, altura da lâmina de escoamento, números de

Reynolds e Froude, e rugosidade hidráulica para ensaios realizados entre julho e novembro de 2021. Observa-se que a vazão unitária, mesmo com a variação sazonal da chuva natural entre os meses de julho/agosto e outubro /novembro não mostraram diferenças significativas, no entanto, a velocidade média do escoamento, altura, regime de escoamento e resistência hidráulica do telhado verde mostram diferenças estatísticas vistas a seguir.

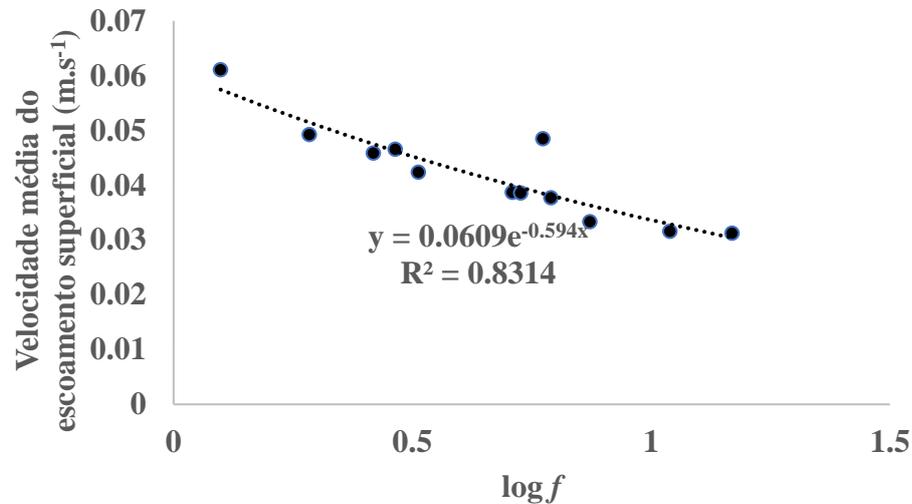
Pelos muito baixos valores do número de Reynolds e, números de Froude abaixo de 1, pode-se inferir que o escoamento superficial foi laminar lento, constatando-se assim, que o escoamento ocorrido no telhado verde foi laminar raso, assemelhando-se ao escoamento observado quando da ocorrência da erosão entressulcos (Leite et al. 2018), como também ao escoamento superficial laminar governado pelo número de Froude observado em culturas agrícolas semiáridas por Cantalice et al. (2021).

O Gráfico 5.3 demonstra o comportamento do escoamento superficial em função da resistência ou rugosidade hidráulica gerada pela grama Esmeralda constituinte do telhado verde, desde o período chuvoso até o fim dos ensaios já no período sem chuvas nos meses de outubro e novembro. Pode-se observar uma redução exponencial decrescente da velocidade média do escoamento devido ao aumento observado da rugosidade hidráulica no telhado verde na passagem entre os meses chuvosos atos meses de estiagem. Essa elevação da resistência hidráulica e sua interferência na velocidade do escoamento superficial também foi observada por Ma et al (2022).

**Tabela 3 – Hidráulica do escoamento superficial em telhados verdes sob chuvas simulada e naturais do ambiente tropical de estações definidas. Média de 3 repetições. Teste de Tukey aplicado para comparação de médias.**

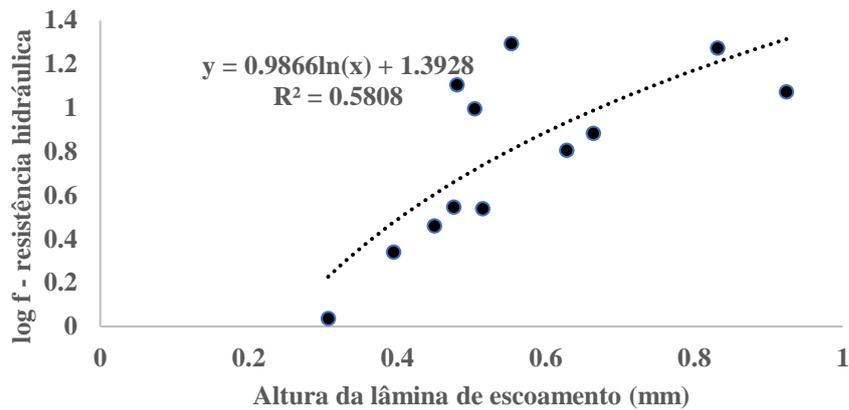
Mês	Q (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Vm (m.s <sup>-1</sup> )	h (altura) (mm)	Reynolds Re	Froude Fr	Rugosidade hidráulica <i>f</i>
Julho	2.1398 x 10 <sup>-5</sup> a	0.042 ab	0.5179 b	19.116 bc	0.624 ab	4.2598 ab
Agosto	2.0296 x 10 <sup>-5</sup> a	0.0523 a	0.4056 b	23.03 ab	0.9010 a	2.2429 b
Outubro	1.8874 x 10 <sup>-5</sup> a	0.042 ab	0.5128 b	17.52 c	0.652 ab	14.1111 a
Novembro	2.5545 x 10 <sup>-5</sup> a	0.0321 b	0.8064 a	25.16 a	0.3688 b	12.7474 a

Fonte: Elaboração da autora (2022)



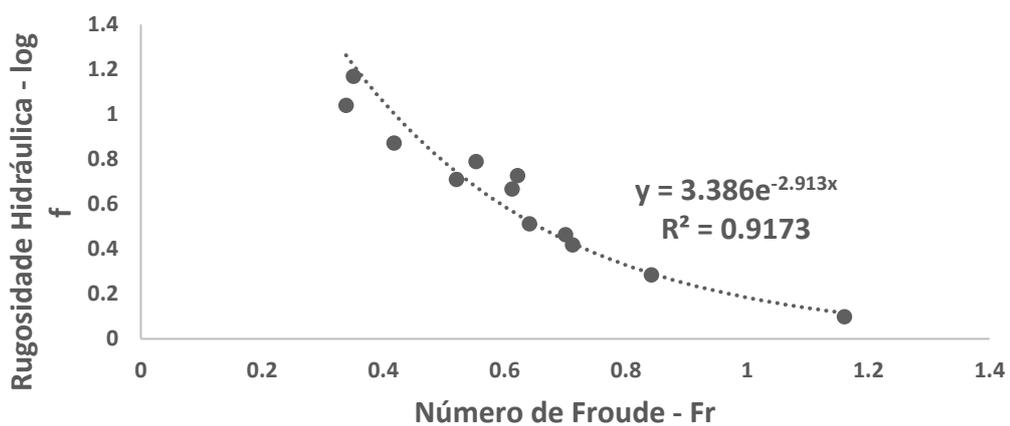
**Gráfico 5.3 - Comportamento da velocidade média do escoamento superficial laminar em resposta a resistência hidráulica gerada do telhado verde ao longo do período experimental, desde os meses com chuvas julho e agosto, até os meses de estiagem de outubro e novembro.** Fonte: Elaboração da autora (2022).

A tabela 3 ainda mostra um aumento da lâmina de escoamento superficial significativo no telhado verde para o mês de novembro, quando foi também observada elevação da resistência hidráulica. Essa sobre-elevação da lâmina é comum de ser observada (Freitas et al, 2008; Bezerra e Cantalice, 2006), que coincidindo com a velocidade mais baixa resulta em mais resistência hidráulica. O gráfico 4, mostra este fenômeno de sobre-elevação da lâmina do telhado verde associada a elevação da resistência hidráulica ocorrida no telhado verde, e a velocidade mais reduzida.



**Gráfico 5.4 – Comportamento da altura da lâmina do escoamento superficial do telhado verde associada a resistência hidráulica ao longo do período experimental, desde os meses com chuvas julho e agosto, até os meses de estiagem de outubro e novembro.**

Ainda pode-se ressaltar do escoamento superficial laminar ocorrido no telhado verde ao longo do período experimental é o comportamento da resistência hidráulica atrelada ao número de Froude, como pode ser observada no gráfico 5. Nessa figura pode-se verificar facilmente, e através de excelente ajuste exponencial de que a resistência hidráulica durante todos os ensaios de escoamento superficial no telhado verde, sempre foi governada pelo número de Froude, como foi revelado por Cantalice et al. (2021) para escoamentos laminares com baixos valores de Reynolds, o que ocorreu também nesse experimento.



**Gráfico 5.5 – Comportamento da resistência hidráulica no escoamento superficial laminar de baixos número de Reynolds ocorridos no telhado verde durante todos os ensaios realizados entre as estações de chuva e seca no litoral de Pernambuco, envolvendo chuvas naturais e simuladas.** Fonte: Elaboração da Autora (2022).

### 5.3. Parâmetros de mobilização de sedimento e durabilidade do telhado verde

A tabela 4 apresenta os valores do sedimento mobilizado no telhado verde através da chuva simulada nos ensaios durante todo o período experimental, da estação chuvosa aos meses de outubro e novembro sem chuvas, para fim de análise e comparação de durabilidade dos telhados verdes. Com relação à durabilidade, três parâmetros relacionados a mobilização de sedimentos foram levados em consideração para discussão: concentração de sedimento, taxa de desagregação e coeficiente de arraste vegetal. Esses parâmetros analisados são aqui utilizados como medida de resiliência e durabilidade dos telhados verdes, sob o clima tropical chuvoso com estações definidas e temperaturas entre 25 e 33 graus Celsius, entre as estações chuvosa e de seca.

Primeiramente, ressalta-se que as taxas de desagregação e/ou mobilização de sedimento e a concentração de sedimentos são muito baixas em todos os meses de avaliação experimental com taxas de desagregação e/ou mobilização de sedimento na magnitude de  $1 \cdot 10^{-10}$  e  $10^{-11}$   $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$ , enquanto em escoamento similar sob culturas agrícolas, Cantalice et al. (2021), obtiveram taxas semelhantes na magnitude de  $1 \cdot 10^{-2}$  a  $10^{-4}$   $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$ , assim demonstrando a eficiência do telhado verde em reter sedimento.

Para os meses de julho a outubro os valores da taxa de mobilização de sedimentos além de muito baixas, não foram significativas, no entanto, no mês de novembro foi obtido um valor significativo pelo teste não paramétrico de Shapiro Wilks e Bartlett, já que esse parâmetro não apresentou distribuição normal. Essa significância estatística se deu pelo fato de que a grama esmeralda não suportou a falta de chuva prolongada no mês de novembro, e ainda sob temperaturas entre 25 e 33 graus Celsius que ocorrem naturalmente neste mês, e dessa forma, portanto, afetaram a sua durabilidade.

Ainda na tabela 04, pode-se constatar que tanto o parâmetro da concentração de sedimentos como o coeficiente de arraste vegetal foram significativos, indicando maior presença de sedimentos no escoamento superficial, bem como, maior potencial de desagregação de sedimento tanto pelas chuvas, como pelo escoamento laminar raso. Assim, esses dois fatores também apontam no sentido de que a durabilidade da grama Esmeralda sofreu alguma redução no período de estiagem.

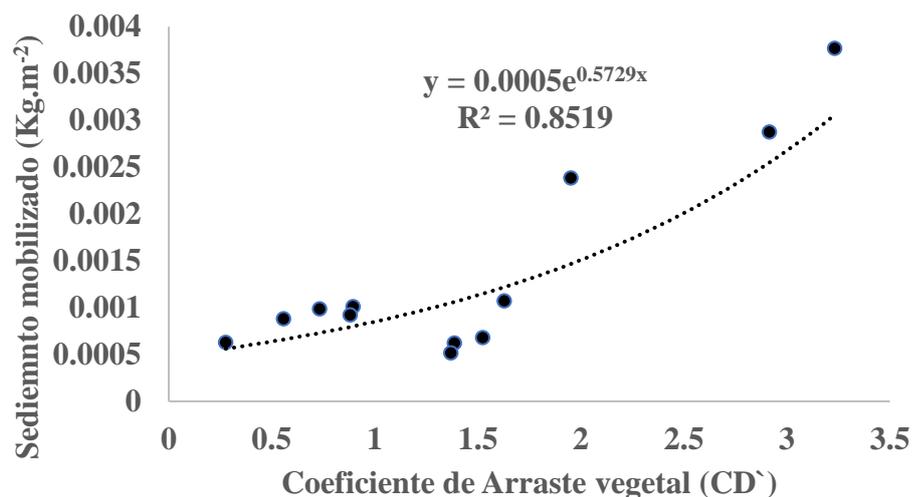
**Tabela 04 – Parâmetros relacionados a mobilização e transporte de sedimento no telhado verde sob chuva natural no ambiente tropical de estações definidas, e sob chuva simulada. Média de 03 repetições as quais foi aplicado o teste de comparação de média de Tukey.**

Mês	Concentração de sedimento (mg l <sup>-1</sup> )	Taxa de Desagregação (Kg.m <sup>-2</sup> . S <sup>-1</sup> )	Coefficiente de Arraste vegetal (CD)
Julho	344.779 b	8.526 x 10 <sup>-11</sup> ns	1.0855 b
Agosto	322.187 b	6.2958 x 10 <sup>-11</sup> ns	0.5715 b
Outubro	310.889 b	8.526 x 10 <sup>-11</sup> ns	1.4268 b
Novembro	831.738 a	2.8165 x 10 <sup>-10*</sup>	2.6997 a

\* Valor 0.0003 significativo pelo Dunn test. Teste Shapiro Wilks e Bartlett dos dados sem distribuição normal.

Fonte: Elaboração da autora (2022).

O gráfico 5.6 traduz o comportamento das taxas de desagregação/mobilização de sedimento ocorridas no telhado verde para todo período experimental, desde julho e agosto com maior volume de precipitação natural até outubro e novembro, os meses mais secos. Percebe-se que com a elevação do coeficiente de arraste vegetal, em novembro houve elevação também das taxas de desagregação de sedimento. A elevação dos valores do coeficiente de arraste vegetal significam que houve maior ação da tensão cisalhante sobre a estrutura vegetal da grama Esmeralda, que foi acompanhada pela redução da velocidade média do escoamento (tabela 03).



**Gráfico 5.6 - Comportamento das taxas de mobilização de sedimentos no telhado verde durante o período experimental de julho a novembro de 2021 em função da elevação do coeficiente arraste vegetal.** Fonte: Elaboração da Autora (2022).

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais até aqui obtidos e analisados permitem as seguintes conclusões:

- a) O telhado verde apresenta resultados hidrológicos positivos, mostrando-se eficiente na redução do escoamento superficial, tendo apresentado bons valores de abstração hidrológica mesmo na estação de chuvas, que foram ainda maiores no período seco, demonstrando-se, assim, a importância do telhado verde para regiões que sofrem principalmente com inundações, auxiliando a reduzir as demandas dos sistemas de drenagem urbana convencionais;
- b) O escoamento superficial laminar ocorrido no telhado verde ao longo do período experimental teve muito baixos números de Reynolds, e dessa forma a resistência hidráulica foi dominada ao número de Froude, demonstrando mais uma vez que em escoamento aberto de baixos valores de Reynolds ocorre dominância das forças gravitacionais sobre a resistência hidráulica;
- c) A gramínea Esmeralda se mostrou resistente ao regime de chuvas da região do experimento nos meses de julho e agosto, que são meses chuvosos e de temperaturas amenas, entretanto apresentou redução de sua durabilidade no mês mais seco, como atestado pela taxa de mobilização de sedimentos.

## REFERÊNCIAS

ACIOLI, L. A. **Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AHERN, Jack. Sustainability, Urbanism and Resilience (Palestra). In: **I Conferência de Humanidades e Indústria Criativa, Universidade de Tecnologia Nacional**. Chyn-Yi, Taichung, Taiwan, 4 de junho de 2009.

ALFREDO, K. et al, 2009. Observed and modeled performances of prototype green roof test plots subjected to simulated low-and high-intensity precipitations in a laboratory experiment. **J. Hydrol. Eng.** v.15, n.6, p. 444–457. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000135](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000135).

ARAUJO, Sidney R. **As Funções dos Telhados Verdes no Meio Urbano, na Gestão e no Planejamento de Recursos Hídricos**. 2007. 28 f. Monografia (curso de Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica- RJ.

ARTMANN, M.; BASTIAN, O.; GRUNEWALD, K. Using the concepts of green infrastructure and ecosystem services to specify Leitbilder for compact and green cities-the example of the landscape plan of Dresden(Germany). **Sustainability**, v. 9, n. 2, p. 198, 2017.

BALDESSAR, S.M.N. **Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba- PR.

BAPTISTA, M et al. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. 318p.

BERNDTSSON, J.C., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecol. Eng.** v.36, n.4, p. 351–360. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>. Acesso em 22 set. 2021.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, n. 1, p. 565–573, 2006.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J.R.B.; CUNHA FILHO, M. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um Cambissolo do Semiárido do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 34, p. 1325 – 1332, 2010.

BLANCO, K.C. **Coberturas verdes**: aplicação como estratégia de mitigação de impacto ambiental em Brasília. 2012. Monografia (Pós-Graduação em Análise Ambiental e Desenvolvimento Sustentável). Centro Universitário de Brasília (UniCEUB/ICPD). Brasília-DF.

BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Relações de erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.711-721, 1999.

BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração da água no solo**. Viçosa, UFV. 2003. 98p.

BRANDÃO, F. C. A. dos S.; CRESPO, H. de A. **Diretrizes relacionadas à implantação da infraestrutura verde para aumentar a resiliência urbana às mudanças climáticas**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia Ambiental). Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 129 p. Rio de Janeiro, 2016.

BUENO, Rafael. **Telhado verde**: os Jardins da Babilônia continuam funcionais Disponível em: <http://www.ecocidades.com/2010/09/02/telhado-verde-os-jardins-da-babilonia-continuam-funcionais/>. Acesso em: 20 de set. 2021.

CANHOLI, Julio Fracarolli. **Medidas de Controle “in Situ” do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas**: Análise de Aspectos Técnicos e Legais. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013. 167 p.

CANTALICE, Jose Ramon B., Dias, I. C. G. M., Andrade, D. S., Assis Filho, F. M., Souza, W. L. S., Nunes, E. O. S., Guerra, S.M.S., Silva Junior, V. P., Sartori, L., Freitas, F. J., Cavalcante, D. M., Lima, José Romualdo de Sousa & Barros Junior, G. (2021). *Hydraulic resistance to overland flow governed by Froude number on semi-arid hillslopes under shrubs and crops*. **Hydrological Sciences Journal**, DOI: 10.1080/02626667.2021.1947506

CANTALICE J. R. B. et al. Interrill erosion and roughness parameters of vegetation in rangelands. **Catena**, Amsterdam, v. 148, p. 111- 116, 2017.

CANTALICE, J. R. B. et al. O. Hidráulica e taxas de erosão em entressulcos sob diferentes declividades e doses de cobertura morta. **Caatinga**. Mossoró- RN, v. 22, p. 68-74, 2009.

CASSOL, E. A. et al. escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 685–690, 2004.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. Controle da Drenagem Urbana no Brasil: Avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XVII, 2007, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: ABRH, 2007.

DUNNETT, N., KINGSBURY, N., 2004. **Planting Options for Extensive and Semi-Extensive Green Roofs**. Greening Rooftops for Sustainable Communities, Portland, USA, 2004.

ECO CASA. **Revestimento vivo**: Qual a planta certa para o seu telhado? Disponível em: <https://www.ecocasa.com.br/revestimento-vivo-qual-planta-certa-seu-telhado/>. Acesso em: 20 set. 2021.

EINSTEIN, H. A.; BANKS, R. B. “Fluid resistance of composite roughness”. **Transactions – American Geophysical Union**, v.31, n.4, p. 603-610, 1950.

ELTZ, F. L. F. et al. Perdas de solo e água em entressulcos em um argissolo vermelho-amarelo submetido a quatro padrões de chuva. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 1, p. 485–493, 2001.

FERREIRA, César Argentieri; MORUZZI, Rodrigo Braga. Considerações sobre a aplicação do telhado verde para captação de água de chuva em sistemas de aproveitamento para fins não potáveis. **Encontro nacional**, v. 4, 2007.

FLETCHER, T. D. et al. Reuse of urban runoff in Australia: a review of recent advances and remaining challenges. **Journal of Environmental Quality**, v. 37, n. 5\_Supplement, p.116-127, 2008.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L. (Ed.). **Hydrologic modeling of small watersheds St. Joseph: American Society of Agricultural Engineering**, 1982. p.297-380. (Monograph, 5).

GETTER, K.L. et al, 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. **Ecol. Eng.** V 4, n. 31, p. 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004>.

GOVERS, G. Grain velocities in overland flow: a laboratory study. **Earth Surface and landforms**, vol. 14, p. 481-489, 1989.

GRACESON, A. et al. The water retention capabilities of growing media for green roofs. **Ecol. Eng.**, n. 61, 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.030>.

GUARULHOS-SP. Lei nº 7031, de 17 de abril de 2012. Dispõe sobre a instalação do "telhado verde" nos locais que especifica, e dá outras providências. **Diário Oficial de Guarulhos**, nº 032, 27 de abril de 2012 - Página 21. P.A. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/sp/g/guarulhos/lei-ordinaria/2012/704/7031/lei-ordinaria-n-7031-2012-dispoe-sobre-a-instalacao-do-telhado-verde-nos-locais-que-especifica-e-da-outras-providencias>. Acesso em 20 set. 2021.

GURGEL, R. G. A. Principais espécies e variedades de grama. In: Simpósio sobre gramados, SIGRA, 1, 2003, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP/FCA, 2003.

HERMAN D.; NÉSTOR, M. V. Open Channel Flow. In: **A New Approach to Sediment Transport in the Design and Operation of Irrigation Canals**. (Ed). Taylor & Francis., 2007. p. 13-14

HERZOG, C. P.; ROSA, L. Z. Infraestrutura verde: sustentabilidade e resiliência para a paisagem urbana. **Revista Labverde**, v.0, n.1, p. 92-115, 2010.

HILTEN, R.N.et al., 2008. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. **J. Hydrol.** n.358, p.288–293. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.010>.

INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION – IGRA. **Green Roof Types**. Disponível em: [https://www.igra-world.com/types\\_of\\_green\\_roofs/](https://www.igra-world.com/types_of_green_roofs/). Acesso em 20 de janeiro de 2021.

JÄRVELÄ, J. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants **Journal of Hydrology**, v. 269, n. 1–2, p.44-54, Dez. 2002

JOÃO PESSOA- PB. Lei 10.047/2013. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do “Telhado Verde” nos locais que especifica, e dá outras providências. **Diário Oficial de João Pessoa**. p. 3. Publicado em 10 de julho de 2013. Disponível em: <http://static.paraiba.pb.gov.br/2013/07/Di%C3%A1rio-Oficial-10.07.2013.pdf>. Acesso em: 20 set. 2013

JONSTON, J.; NEWTON, J. **Build Green**: A guide to using plants on roofs, walls and pavements. London: Mayor of London, 2004. p.1-121. Disponível em: [http://www.legacy.london.gov.uk/mayor/strategies/biodiversity/docs/Building\\_Green\\_main\\_text.pdf](http://www.legacy.london.gov.uk/mayor/strategies/biodiversity/docs/Building_Green_main_text.pdf). Acesso em: 28 de dezembro de 2020.

JULIEN, P.Y. Erosion and sedimentation. Milbourne. Cambridge University Press, 1995. 280p.

KIBET, L. C. et al. A protocol for conducting rainfall simulation to study soil runoff. **Journal of visualized experiments**, n. 86, p. 1–14, 2014.

KOZMHINSKY, M. et al. **Telhados Verdes**: uma iniciativa sustentável.65p. Recife. EDUFRPE.2016.

LIU, Wen et al. Runoff retention assessment for extensive green roofs and prioritization of structural factors at runoff plot scale using the Taguchi method. **Ecological Engineering**. v. 7, n 138, p. 281-288, ago. 2019. DOI:10.1016/j.ecoleng.2019.07.033

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Manual de Orientações PMVA**. 2013. Disponível em: [http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/pactodasaguas/2011/05/Manual\\_PMVA\\_2013\\_2.pdf](http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/pactodasaguas/2011/05/Manual_PMVA_2013_2.pdf). Acesso em 20 set. 2022.

MARTELLI A., SANTOS JÚNIOR, A.R. Arborização Urbana do município de Itapira – SP: perspectivas para educação ambiental e sua influência no conforto térmico. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 2, n. 19, p. 1018-1031, 2015.

MORGAN, R. P. C. **Soil Conservation. England**, 2 ed. Longman Limited, 1996. 198 p.

NARDINI, A. et al, 2012. Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: shrubs versus herbaceous plants. **Urban Ecosyst**, v.3, n.15, p.697–708. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0220-5>.

NACINOVIC, M.G.G. et al. Soil erosion as a function of different agricultural land use in Rio de Janeiro. **Soil and Tillage Research**, v.144, p.164-173, 2014. DOI: 10.1016/j.still.2014.07.002.

NUNES, Elves Obede dos Santos. **Parâmetros Vegetativos-Hidráulicos gerados por culturas agrícolas sobre escoamento laminar em ambiente semiárido**. 2018. Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) Universidade Federal Rural de Pernambuco.

OLIVEIRA NETO, A.C. de. **Cobertura verde: estudo de caso no município de São José dos Campos – SP**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, São Paulo.

OHNUMA JÚNIOR, A.A. et al. Análise da retenção hídrica em telhados verdes a partir da eficiência do coeficiente de escoamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p.41-52, abr/jun 2014.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Agenda 2030**. 2015.

PALIS, R.G.et al. Soil erosion processes and nutrient loss. I. The interpretation of enrichment ratio and nitrogen loss in runoff sediment. **Journal Soil Research**, v.28, n.3, p.623–639, 1990.

PAZWASH, Hormoz. **Urban Storm Water Management**. 2 ed. Londres/Nova York: CRC Press, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19658.eBook> ISBN9780429173714.

PANACHUKI, E. et al. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 35, n. 5, p. 1777-1785, 2011.

PORTO ALEGRE, Prefeitura Municipal, Departamento de Esgotos Pluviais; UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS). **Manual de drenagem urbana de Porto Alegre do Plano Diretor de Drenagem Urbana**. volume VI. Porto Alegre: da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

PRUSKI, F. F et al. **Escoamento Superficial**. Viçosa: UFV, 2003. 88p.

QUINTELLA, Maria Tereza. **A origem dos Telhados Verdes**. Disponível em: <http://telhadoscriativos.blogspot.com.br/2012/03/origem-dos-telhados-verdes.html>. Acesso em: 10 jan. 2012.

RAMOS, Diego Vieira et al. Telhado verde: uma alternativa sustentável para o século XXI. **Synergismus Scientifica UTFPR**. v. 12, n. 1, p.176-182, 2017.

RECIFE-PE. **Lei Ordinária nº 18.112/2015**. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Decretada em 12 de janeiro de 2015. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/pe/r/recife/lei-ordinaria/2015/1812/18112/lei-ordinaria-n-18112-2015-dispoe-sobre-a-melhoria-da-qualidade-ambiental-das-edificacoes-por-meio-da-obrigatoriedade-de-instalacao-do-telhado-verde-e-construcao-de-reservatorios-de-acumulo-ou-de-retardo-do-escoamento-das-aguas-pluviais-para-a-rede-de-drenagem-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 20 set.2021.

RIGHETTO, A.M.; MOREIRA, L.F.F.; SALES, T.E.A. Manejo de Águas Pluviais Urbanas. In: RIGHETTO, A.M. (Coord.). **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 19-73.

ROSSETI, K. de A. C. et al. Interferência microclimática na utilização do telhado verde para regiões tropicais: estudo de caso em Cuiabá, MT. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.9, n. 9, p. 1959-1970, 2013.

SALEIRO FILHO, Mário de Oliveira et al. Além de um Diálogo Reservado com as Estrelas: O Processo de Formação e Transformação do Terraço Jardim ao Telhado Verde. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**. v. 1 n. 1, 2015. Disponível em: <https://revista.ufr.br/rct/article/view/2540/1801>. Acesso em: 20 set. 2021.

SAVI, A. C. **Telhados verdes**: análise comparativa de custo com sistemas tradicionais de cobertura. Monografia (Especialização em Construção Sustentáveis). Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: < [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/788/1/CT\\_CECONS\\_II\\_2012\\_01.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/788/1/CT_CECONS_II_2012_01.pdf)>. Acesso em 18 jan. 2021.

SCHROLL, E. et al, 2011. The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate. **Ecol. Eng.** v. 4, n.37, p.595–600. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.12.020>> . Acesso em 18 dez.2022.

SILVEIRA, R. C.; SALVADOR, N. Uso de um simulador de chuvas no estudo de perdas de solo e água em parcelas com resíduos culturais de milho. **Rev. Bras.de Ciênc. do Solo**, Campinas-SP, v.9, n.1, p.63-66,1985.

SILVEIRA, Flávio Pereira da Mota. **Erosão em entressulcos e parâmetros de rugosidade vegetal em área de pastagem**. 2013. 48 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SHUCKSMITH, J. D.; BOXALL, J. B.; GUYMER, I. Determining longitudinal dispersion coefficients for submerged vegetated flow. **Water Resources Research**, v.47, n. 10, out. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2011WR010547>. Acesso em 20 dez.2022.

SINGH, V.P. Analytical solutions of kinematic for erosion on a plane II. Rainfall of finite duration. **Adv. Water Res.**, v.6, n.2, p.88-95, jun. 1983.

SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. **Sediment transport technology**: Water and sediment dynamics. Littleton: Water resources publications, 1992. 897p.

SKPROJETOS. **Construções Sustentáveis**, o que são e qual a sua importância. Disponível em: < <http://www.skprojetos.com.br/construcoes-sustentaveis/>>. Acesso em: 17 Janeiro 2021.

SOUZA, R.O.L. de et al. Telhado verde de baixo investimento composto por plantas medicinais e aromáticas. **Revista Semioses**. Rio de Janeiro, v. 9, n.2, p. 48-58, 2015.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 9-18, 2012.

TASSI, R. et al. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**. Porto Alegre v.14, n.1, mar. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/SLTzVMTPCbKMQxxTb37FzCr/?lang=pt>. Acesso em 10 jan.2023.

THOMPSON, B. The Green Roof at the Minnesota Landscape Arboretum. Publicado em 2010. **Arboretum**. Disponível em: <http://www.arboretum.umn.edu/green-roof.aspx>. Acesso em: 12 de dezembro de 2020.

TUCCI, Carlos E. M et al. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades; Global Water Partnership; World Bank; Unesco, 2005.

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE [USDoD]. **Unified Facilities Criteria (UFC) Design: Low Impact Development Manual**. 2004. 96 p.

URBONAS, B; STAHR, P. **Stormwater Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage, and Cso Management**. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.

VADAS, P.A., et al. A model for phosphorus transformation and runoff loss for surface-applied manures. **J. Environ. Qual.** n. 36, p.324-332, 2007.

VANWOERT, N.D et al, 2005. Green roof stormwater retention. **J. Environ. Qual.** v.3, n.34, p.1036–1044. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0364>. Acesso em: 13 dez.2022.

WOOLHISER, D.A.; LIGGETT, J.A. Unsteady one-dimensional flow over a plane – the rising hydrograph. **Water Resources Research**, v.3, p.753-771, set. 1967.

XIE, H.; LIU, J. A modeling study of the interflow in the green roof. **Urban Forestry & Urban Greening**. Vol. 54, out. 2020.