

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Cristiano Gabriel Persch

EFEITO DE ESCALA EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS

Santa Maria, RS, Brasil
2019

Cristiano Gabriel Persch

EFEITO DE ESCALA EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito para obtenção do Grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador (a): Prof.^a Dra. Rutineia Tassi

Santa Maria, RS, Brasil

2019

PERSCH, CRISTIANO
EFEITO DE ESCALA EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS /
CRISTIANO PERSCH.- 2018.
147 f.; 30 cm

Orientadora: RUTINEIA TASSI
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2018

1. Controle de Escoamento Superficial 2. Telhados
Verdes 3. Drenagem Urbana I. TASSI, RUTINEIA II. Título.

Cristiano Gabriel Persch

EFEITO DE ESCALA EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito para obtenção do Grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 25 de Fevereiro de 2019

Rutineia Tassi, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Alexandre Swarowsky, Dr. (UFSM)

Priscilla Macedo Moura, Dra. (UFMG)

Santa Maria, RS, Brasil
2019

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pela estrutura física e intelectual durante toda minha trajetória acadêmica, na graduação e pós-graduação;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pela oportunidade de crescimento profissional e intelectual;

À minha família, especialmente na pessoa de meu irmão, Henrique Michel Persch;

À minha orientadora, Prof^a. Dra. Rutineia Tassi, pela amizade, confiança, incentivo e oportunidade de trabalho. Seus ensinamentos me fizeram criar gosto pela Hidrologia e áreas afins;

À Bruna Minetto, Elzon Rippel e Fabiana Campos, por contribuírem significativamente no desenvolvimento desse trabalho;

Aos demais colegas e amigos que de alguma maneira participaram dessa trajetória;

À Eng^a Debora Pavi, pela fiel amizade e contribuição na doação de material;

Ao Eng. Fabio Bocheni, da empresa Maccaferri, por disponibilizar doação de material para o desenvolvimento da pesquisa;

À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido;

À banca avaliadora pela disponibilidade e colaboração no aperfeiçoamento deste trabalho;

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para o êxito da presente pesquisa;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001;

A todos, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

EFEITO DE ESCALA EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS

AUTOR: Cristiano Gabriel Persch
ORIENTADOR (a): Prof.^a Dra. Rutineia Tassi

Data e Local da Defesa: 25 de fevereiro de 2019, Santa Maria, RS, Brasil.

No ambiente urbano, onde as áreas permeáveis são gradativamente ocupadas por superfícies impermeáveis, os processos hidrológicos naturais passam igualmente por alterações. Essas superfícies impermeáveis promovem o aumento do escoamento superficial e, com isso, aumentam a frequência e intensidade dos alagamentos e inundações, realidade de inúmeras cidades brasileiras. Entre as alternativas apontadas para mitigar essa problemática, está a utilização de telhados verdes sobre as edificações. Diversos estudos relatam seus benefícios, que se estendem desde um âmbito local até global. Além da redução do escoamento superficial, os telhados verdes têm comprovado efeito na diminuição das ilhas de calor, redução no consumo energéticas das edificações, promove melhoramento estético e aumento da biodiversidade nos centros urbanos, por exemplo. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo investigar experimentalmente, o comportamento de telhados verdes de diferentes escalas na redução do escoamento superficial ao longo do período de um ano. Para isso, quatro telhados verdes extensivos (1m², 3m², 6m² e 12m²) foram identicamente construídos, variando entre si apenas a área. Para esses quatro telhados, foi realizado monitoramento que permitiu identificar volumes de precipitação escoado, a efetividade na retenção do escoamento, a influência das características de precipitação na resposta hidrológica e o estabelecimento vegetal. Comparativamente aos demais telhados, sobressaiu-se como de melhor efetividade na retenção e controle de escoamento o telhado de 12m², evidenciando a hipótese de que maiores escalas de telhados verdes produzem um maior efeito na capacidade de armazenamento do escoamento pluvial e, conseqüentemente, na redução e atraso na geração de escoamento superficial. O telhado de maior área teve uma retenção média de 11mm/m², valor 11,5% superior à retenção obtida no telhado de 3m², 18,5% acima do valor obtido para o telhado de 6m², e 27,3% acima da retenção do telhado de 1m². Da mesma forma, o telhado verde de maior área teve as menores vazões de pico e os maiores atrasos na geração do escoamento. Quanto às características da precipitação, a de maior influência na retenção e escoamento para as distintas escalas foi o volume precipitado; outros fatores, como volume máximo precipitado em 1hora e umidade antecedente do substrato também se mostraram relevantes e direcionadores da efetividade dos telhados nas quatro escalas analisadas. Não foi possível identificar, ao longo do período de monitoramento, a influência da escala dos telhados verdes no estabelecimento e persistência da vegetação, embora tenham ocorrido diferenças quanto à quantidade de biomassa e vigor das plantas ao longo das diferentes estações. Assim, os resultados do presente estudo fornecem subsídios para o melhor entendimento da efetividade da implantação de telhados verdes como técnica para o manejo das águas pluviais, e destacam a importância da escala de implantação deste tipo de técnica, para aumentar os seus benefícios no controle do escoamento.

Palavras-Chave: coberturas verdes; controle de escoamento superficial; drenagem urbana; desenvolvimento urbano de baixo impacto.

ABSTRACT

Master's Thesis
Postgraduate Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria

SCALE EFFECT IN EXTENSIVE GREEN ROOFS

AUTHOR: Cristiano Gabriel Persch
ADVISOR: Rutineia Tassi

In the urban environment, where the permeable areas are gradually occupied by impermeable spaces, natural hydrological processes are also subject to changes. These impermeable surfaces promote the increase of the surface runoff and, with this, increase the frequency and intensity of the floods and inundations, reality of countless Brazilian cities. Among the alternatives pointed out to mitigate this problem, is the use of green roofs on buildings. Several studies relate their benefits, ranging from local to global. In addition to the reduction of surface runoff, green roofs have a proven effect in reducing heat islands, reducing energy consumption of buildings, promoting aesthetic improvement and increasing biodiversity in urban centers, for example. Therefore, the present study aimed to investigate experimentally the behavior of green roofs of different scales in the reduction of surface runoff over the period of one year. For this, four extensive green roofs (1m², 3m², 6m² and 12m²) were identically constructed, varying only one area. For these four roofs, monitoring was realized which allowed to determine the volumes of precipitation drained, the effectiveness in retention of the flow, the influence of precipitation characteristics on the hydrological response and the plant establishment. Compared to other roofs, the 12m² roof was more effective in retention and control of flow, evidencing the hypothesis that larger green roof scales produce a greater effect on the storage capacity of rainfall and, consequently, on the reduction and delay in generation of surface runoff. The largest roof had an average retention of 11mm / m², 11.5% higher than the 3m² roof retention, 18.5% higher than the 6m² roof, and 27.3% above the retention of the roof of 1m². In the same way, the green roof of larger area had the smaller peak flows and the greater delays in the generation of the flow. As for the precipitation characteristics, the one with the greatest influence on the retention and flow for the different scales was the precipitated volume; other factors, such as maximum volume precipitated in 1 hour and previous moisture of the substrate were also relevant and guiding the effectiveness of the roofs in the four scales analyzed. It was not possible to identify, during the monitoring period, the influence of the scale of the green roofs in the establishment and persistence of the vegetation, although there were differences in the amount of biomass and vigor of the plants throughout the different seasons. Thus, the results of the present study provide support for a better understanding of the effectiveness of the implantation of green roofs as a technique for the management of rainwater, and emphasize the importance of the scale of implantation of this type of technique, to increase its benefits in the control of the flow.

Keywords: green roof; control of surface runoff; urban drainage; low-impact urban development.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Volume dos reservatórios em cada telhado verde	65
Tabela 2 - Resumo mensal da quantidade de eventos monitorados.....	76
Tabela 3 – Médias e variações das porcentagens de retenção e coeficiente de escoamento nas diferentes escalas	82
Tabela 4 - Coeficiente de escoamento nos quatro telhados para os diferentes mecanismos de formação de chuva.....	83
Tabela 5 - Equações para estimativa de escoamento e retenção em função do volume precipitado	91
Tabela 6 - Equações para estimativa do escoamento e retenção em função da intensidade média da precipitação	93
Tabela 7 - Equações para estimativa do escoamento e retenção em função da duração do evento.....	94
Tabela 8 - Equações para estimativa do escoamento e retenção em função do volume máximo acumulado precipitado em 1h	95
Tabela 9 - Equações para estimativa do escoamento em função da UAS.....	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Incidência de Inundações por Região do Brasil	28
Quadro 2 - Causa das inundações.....	28
Quadro 3 - Resumo da aplicabilidade de algumas práticas WSUD em gestão de águas pluviais.....	37
Quadro 4 - Caracterização das categorias de telhados verdes.....	41
Quadro 5 - Especificações para substratos de telhados verdes.....	45
Quadro 6 - Estudos de desempenho na retenção de telhados verdes.....	56
Quadro 7 - Variáveis climatológicas e características dos instrumentos de medição da estação do INMET.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alterações nas componentes do ciclo hidrológico como consequência da urbanização.....	26
Figura 2 - Hidrograma ilustrativo para um ambiente antes e após urbanização	27
Figura 4 – Qualidade do ambiente versus impermeabilidade.....	30
Figura 5 - Ilustração do balanço de água no ambiente urbano com e sem integração das abordagens LID, SUDS e WSUD.	33
Figura 6 - Síntese dos impactos sobre a paisagem hidrológica da integração da abordagem de DBI	34
Figura 7 - Composição Física de Telhados Verdes.....	42
Figura 8 - <i>Sedum rupestre</i>	43
Figura 9 - Esquema do comportamento de telhados verdes no atraso do pico de escoamento.....	51
Figura 10 - Localização do módulo experimental.	60
Figura 11 - Processo de construção dos telhados verdes: A – estrutura do telhado; B – impermeabilização e camada de drenagem; C – geocomposto; D – colocação do substrato; E – plantio das mudas; F – vegetação no início do monitoramento.	62
Figura 12 - <i>Sedum rupestre</i> produzido no viveiro.....	64
Figura 13 - Planta Baixa e Corte Transversal do Telhado. Sem Escala.....	64
Figura 14 - Pluviógrafo e pluviômetros instalados sobre os telhados.....	66
Figura 15 - Caracterização dos hidrogramas em cada telhado	73
Figura 16 – Volume acumulado dos eventos de precipitação monitorados e sua relação com o período de recorrência em anos (TR)	78
Figura 17 – Intesidades médias de cada evento ao longo dos meses e estações....	79
Figura 18 – Coeficiente de escoamento e porcentagem de retenção nas diferentes escalas para o Grupo A e Grupo B.	83
Figura 19 – Retenção nos telhados verdes (A), temperaturas médias e volumes totais precipitados (B) para as estações do ano.....	85
Figura 20 - Variação da retenção (%) em função do volume precipitado (mm).....	89
Figura 21 - Registro fotográfico da vegetação nas respectivas estações e as variáveis climáticas	104
Figura 21 - Registro fotográfico da vegetação nas respectivas estações e as variáveis climáticas	104
Figura 21 - Registro fotográfico da vegetação nas respectivas estações e as variáveis climáticas	104
Figura 21 - Registro fotográfico da vegetação nas respectivas estações e as variáveis climáticas	104

SUMÁRIO

1 .. INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS	23
1.1.1 Objetivo Geral	23
1.1.2 Objetivos Específicos	23
2 .. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 EFEITOS DA URBANIZAÇÃO NO CICLO HIDROLÓGICO.....	25
2.2 ABORDAGEM DBI NO PLANEJAMENTO URBANO	30
2.3 TELHADOS VERDES	39
2.3.1 Aspectos Gerais e de Projeto	39
2.3.2 Benefícios dos Telhados Verdes	48
2.3.3 Efeito quantitativo dos telhados verdes nas águas pluviais	49
2.4 DESEMPENHO DE TELHADOS VERDES EM DIFERENTES ESCALAS.	56
3 .. MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO	59
3.2 MÓDULOS EXPERIMENTAIS DE TELHADOS VERDES EXTENSIVOS..	61
3.3 SISTEMA DE MONITORAMENTO.....	65
3.4 TRATAMENTO DE DADOS	68
3.4.1 Dados de precipitação	68
3.4.2 Dados de escoamento	70
4 .. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1 MONITORAMENTO HIDROCLIMATOLÓGICO	75
4.1.1 Caracterização climática do período de monitoramento	75
4.1.2 Caracterização dos eventos de precipitação	76
4.2 COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DOS TELHADOS VERDES.....	79
4.2.1 Retenção do escoamento pluvial	80
4.2.1.1 Desempenho geral em longo prazo	80
4.2.1.2 Desempenho das diferentes escalas de telhados verdes em longo prazo	81
4.2.1.3 Desempenho das diferentes escalas dos telhados verdes – análise sazonal	84

4.2.1.4	Desempenho das diferentes escalas dos telhados verdes – análise mensal	86
4.2.2	Comportamento hidrológico das diferentes escalas de telhados verdes em relação às características dos eventos de precipitação	88
4.2.2.1	Influência do volume de precipitação	88
4.2.2.2	Influência da intensidade da precipitação.....	91
4.2.2.3	Influência da duração do evento de precipitação	93
4.2.2.4	Influência do volume máximo precipitado em 1 hora	94
4.2.2.5	Influência do período de dias anteriores sem precipitação.....	96
4.2.2.6	Influência da umidade antecedente do substrato (UAS)	97
4.3	ANÁLISE DOS HIDROGRAMAS DOS TELHADOS VERDES	99
4.4	ESTABELECIMENTO DA VEGETAÇÃO.....	100
5..	CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
6..	LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	107
7..	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	APÊNDICES	115
	ANEXOS	146

1 INTRODUÇÃO

O excesso de escoamento gerado pelas superfícies impermeáveis das cidades, como resultado de um processo de ocupação resulta no surgimento de diversos problemas de infraestrutura, adversidades ambientais e prejuízos sociais. Isso decorre da ausência de planejamento adequado das cidades para suprir as consequências dos efeitos hidrológicos adversos provenientes do crescimento. Nesse sentido, a implantação dos telhados verdes se torna uma evidente oportunidade de melhoria ambiental (CARTER; KEELER, 2008), compondo uma estratégia potencial para o ambiente urbano no sentido de aumentar a proporção de superfícies permeáveis, contribuindo na reintegração hidrológica sem prejuízo ao espaço (GRACESON et al., 2013), atuando, entre outras qualificações, no retardo e na diminuição dos volumes e velocidades do escoamento (GWENZI; NYAMADZAWO, 2014).

Uma série de benefícios diretos e indiretos surgem com as implantações de telhados verdes em ambientes urbanos, estendendo-se para escalas locais e globais. Entre os principais benefícios elencados pela literatura, destacam-se: a regulação térmica no meio urbano e no interior das edificações, efeitos sobre a qualidade do ar, promoção da estética e recreação, desenvolvimento da biodiversidade urbana no âmbito de fauna e flora, benefícios acústicos e energéticos, promoção da saúde e bem-estar, gerenciamento qualitativo e quantitativo das águas pluviais (GETTER; ROWE, 2006; GSA, 2011).

É amplamente reconhecido que as respostas dos telhados verdes em termos de escoamento dependem de um conjunto complexo de processos e ações interativas (STOVIN; VESUVIANO; DE-VILLE, 2017), e remontam a diversos fatores que influenciam o controle quantitativo. O tipo e espessura da camada de substrato (LIBERALESSO, 2018), a vegetação (ARBOIT, 2017; CARTER; JACKSON, 2007; KOK et al., 2016), sistema de drenagem, declividade, entre diversos elementos. Um fator pertinente, e até então pouco investigado, é a influência do tamanho e o papel da área de drenagem dos telhados verdes nas condições do escoamento. O tamanho da área de drenagem, em particular, pode influenciar o tempo de deslocamento das águas pluviais através de camadas horizontais de drenagem, bem como a retenção de águas pluviais - armazenamento temporário e liberação lenta de água - que podem afetar o escoamento e a evapotranspiração (HAKIMDAVAR et al., 2014).

A maioria das investigações, realizadas para avaliar regionalmente os efeitos da aplicação de telhados verdes, utilizam dados monitorados a partir de uma estrutura individual e de escala (tamanho) qualquer (HAKIMDAVAR et al., 2014). A partir do resultado desses monitoramentos únicos e isolados sob condições específicas, modelos matemáticos são calibrados e validados para prever o efeito sobre uma determinada cobertura, bacia hidrográfica, região ou cidade, por exemplo. Porém, esse tipo de prática envolve uma série de incertezas, uma vez que se desconhece as ações iterativas e o comportamento dos telhados em diferentes escalas, áreas de drenagem, composições, etc.

Avaliar a atuação e a eficiência do comportamento de telhados verdes em diferentes escalas físicas é um passo valioso para auxiliar no entendimento de como estas estruturas podem ser consideradas elementos de gestão de águas pluviais em escala regional, fornecendo diretrizes importantes para a sua incorporação em planos de gestão das águas urbanas (CARTER; JACKSON, 2007). Além disso, há uma necessidade de identificar as estratégias ótimas para o projeto e a colocação de telhados verdes em ambientes urbanos que respondam pela influência da escala no desempenho hidrológico.

Diante do exposto, o presente trabalho buscou ampliar o conhecimento neste sentido, objetivando avaliar o efeito de escala e o papel da área de drenagem na resposta hidrológica de telhados verdes extensivos, no que tange à retenção, redução da vazão de pico, tempo de concentração, entre outros. O estudo também procurou identificar possíveis efeitos de bordadura e escala no estabelecimento da vegetação, além de diferenças no padrão de escoamento produzido.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

- Avaliar o efeito de escala na resposta hidrológica de telhados verdes extensivos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a resposta hidrológica do escoamento e retenção em telhados verdes extensivos a longo prazo e suas relações com as características de precipitação para diferentes escalas físicas;
- Identificar diferenças nas características dos hidrogramas para as diferentes escalas com relação redução da vazão de pico, tempo de concentração, tempo entre o início da chuva e o escoamento, tempo entre o início da chuva e a vazão máxima, tempo entre o início do escoamento e vazão máxima;
- Avaliar o estabelecimento da vegetação e possíveis efeitos de bordadura nas diferentes escalas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 EFEITOS DA URBANIZAÇÃO NO CICLO HIDROLÓGICO

A partir da década de 60, evidenciou-se uma intensificação do fenômeno da urbanização, desencadeado por um processo de desenvolvimento econômico e social incentivado pela transformação de uma economia rural para uma economia de serviços concentrada em áreas urbanas (BICUDO; TUNDISI; SCHEUENSTUHL, 2010).

A porcentagem da população mundial residente nas zonas urbanas passou de 29% no ano de 1950 para 51% em 2010 (UNITED NATIONS, 2008). Enquanto que na maioria dos países em desenvolvimento a população urbana alcançou a faixa dos 45%, na América Latina o comportamento foi completamente assimétrico, onde atingiu o índice de 80%. Ainda, de acordo com as projeções das Nações Unidas, o processo de urbanização se acentuará ainda mais nas próximas décadas e, em 2050, a média mundial chegará a 69%, enquanto na América Latina esse valor alcançará a faixa dos 89%, ou seja, 9 em cada 10 pessoas irão habitar ambientes urbanos (BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO, 2015).

O processo da urbanização geralmente está vinculado à ausência de planejamento, onde elevado montante populacional se concentra em pequenas áreas, especialmente nas periferias das cidades. Acompanhando essa expansão acentuada, e aliado a um ineficiente crescimento sustentável e deficiência na infraestrutura adequada, repercute o potencial de impactos significativos sobre os recursos hídricos locais e regionais, reduzindo a resiliência dos sistemas naturais (FRANCZYK; CHANG, 2009).

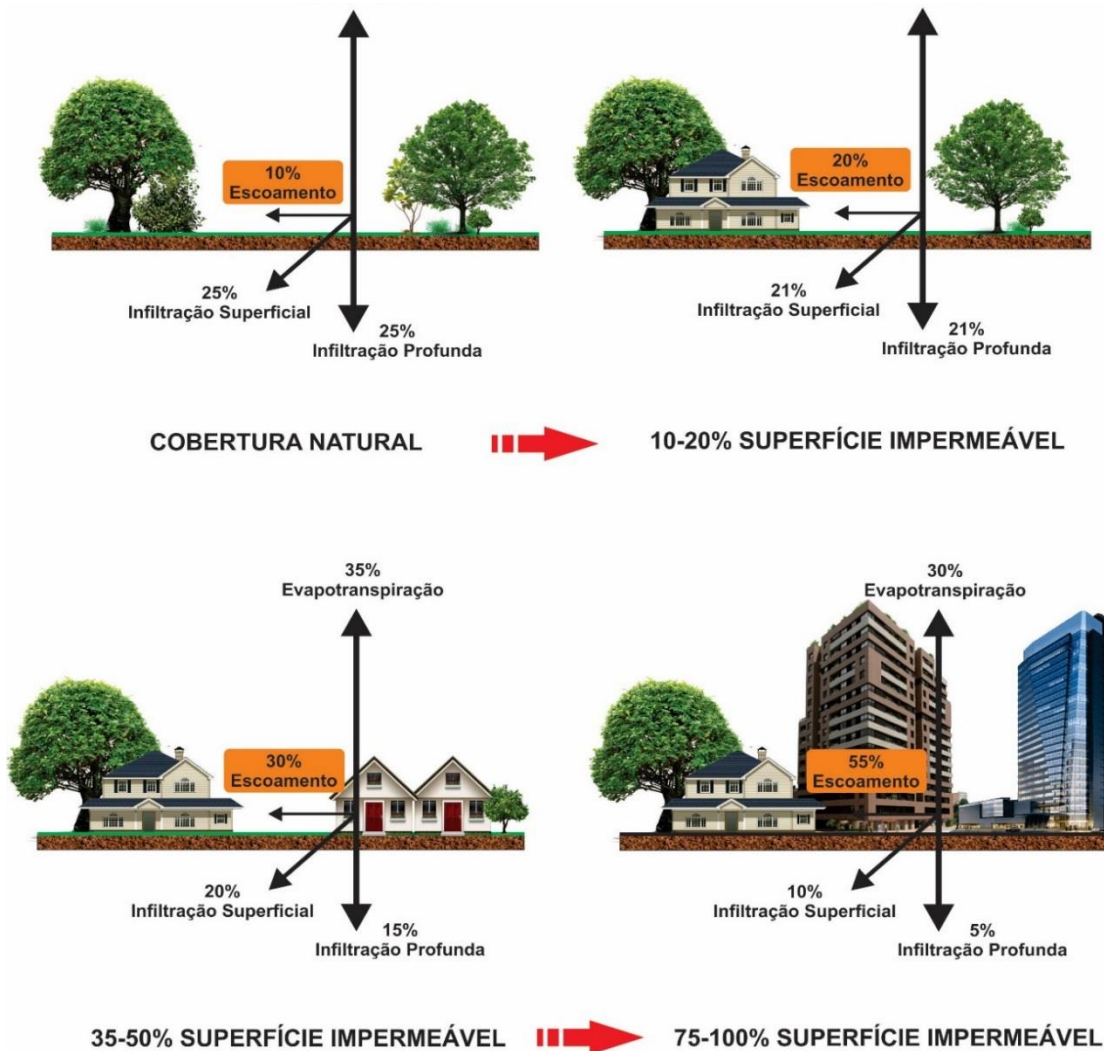
A urbanização remete a alteração do ambiente natural ou seminatural por ambientes construídos, provocando mudanças nas características hidrológicas de uma região (GWENZI; NYAMADZAWO, 2014). Isso decorre, principalmente, das modificações das propriedades da bacia hidrográfica, como a cobertura natural do solo, aumentando a proporção e a conectividade de superfícies impermeabilizadas, alteração na topografia, declividades e orientações do relevo, entre outros fatores (SHUSTER et al., 2005).

O incremento na impermeabilização é o principal agente responsável pelas mudanças hidrológicas associadas a urbanização, exercendo múltiplas pressões sobre o ciclo hidrológico. À medida que uma bacia ou região é dominada por

superfícies impermeáveis, ocorre uma mudança nos fluxos hídricos naturais. A diminuição substancial da capacidade de infiltração, minimiza os processos de escoamentos subsuperficiais e aumentando os superficiais (SHUSTER et al., 2005). Além do mais, altera-se o balanço hídrico e aumenta a velocidade do escoamento, com diminuição no tempo de concentração e recarga freática.

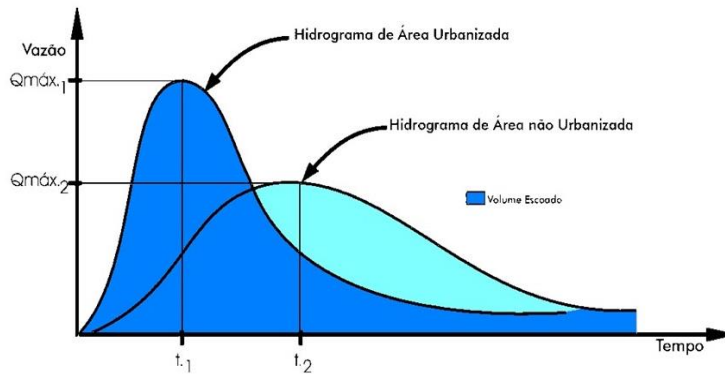
A Figura 1 ilustra um ambiente natural gradativamente modificado pela ocupação urbana, alterando as componentes do ciclo hidrológico e a Figura 2 mostra a alteração no hidrograma de escoamento antes e após a urbanização.

Figura 1 - Alterações nas componentes do ciclo hidrológico como consequência da urbanização.



Fonte: Adaptado de California Coastal Comission, 2005.

Figura 2 - Hidrograma ilustrativo para um ambiente antes e após urbanização



Fonte: Tucci, 2008.

As descargas das águas pluviais em uma bacia urbana densamente impermeabilizada apresentam um maior volume e velocidade nas taxas de escoamento do que em bacias hidrográficas menos urbanizadas (rural, por exemplo). A sensibilidade para os picos de escoamento torna-se muito mais evidente para os eventos associados a altas frequências, tornando constante a incidência de inundações (MOTA, 2008).

Um estudo realizado na bacia de Los Penasquitos Creek (Califórnia, EUA) e exposto no sítio da *California Coastal Commission* tem consistentemente encontrado padrões que são resultantes da degradação ambiental. Para a referida bacia, a urbanização passou de 9% para 37% entre 1966-2000. De 1973 a 2000, o escoamento urbano total na bacia hidrográfica aumentou 4% ao ano, resultando em mais de 100% de aumento para o período de tempo medido. A magnitude do escoamento para uma precipitação de tempo de retorno de 1 a 2 anos também aumentou em mais de 5 vezes a partir de 1965-2000.

No Brasil a incidência de inundações é constante na maioria das cidades de maior concentração populacional. Segundo último relatório da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008), 41% do total de municípios brasileiros sofrem com algum tipo de inundação. Os dados regionais estão resumidos no Quadro 1.

Quadro 1 - Incidência de Inundações por Região do Brasil

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Municípios					
	Total	Com inundações e/ou alagamentos ocorridos na área urbana, nos últimos cinco anos				
		Total	Áreas em que ocorreram inundações e/ou alagamentos			
		Áreas urbanas ocupadas, inundáveis naturalmente pelos cursos d'água	Áreas de baixios naturalmente inundáveis, ocupadas irregularmente e/ou inadequadamente	Não usualmente inundáveis	Outras	
Brasil	5.564	2.274	1.381	1.093	698	156
Norte	449	150	95	83	28	11
Nordeste	1.793	644	375	319	201	41
Sudeste	1.668	851	563	393	229	57
Sul	1.188	508	287	237	195	42
Centro-Oeste	466	121	61	61	45	5

Fonte: Adaptado de IBGE, 2008.

No que concerne às causas das inundações (Quadro 2), um dos fatores mais agravantes são as obstruções dos dispositivos de drenagem, seguido pela ocupação intensa e desordenada do solo, tradicionalmente provocadas pela urbanização.

Quadro 2 - Causa das inundações

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Municípios										
	Total	Com inundações e/ou alagamentos ocorridos na área urbana, nos últimos cinco anos									
		Total	Fatores agravantes das inundações e/ou alagamentos								
		DI	OB	OI	OD	LF	IF	DE	LR	Outros	
Brasil	5.564	2.274	699	1.026	721	980	359	422	485	698	440
Norte	449	150	40	56	45	75	25	24	34	49	39
Nordeste	1.793	644	144	222	202	295	112	116	115	195	144
Sudeste	1.668	851	291	428	284	386	126	159	227	284	143
Sul	1.188	508	189	277	155	181	75	105	84	134	86
Centro-Oeste	466	121	35	43	35	43	21	18	25	36	28

DI - Dimensionamento Inadequado de Projeto / OB - Obstrução de bueiros/bocas de lobo, etc.

OI - Obras inadequadas / OD - Ocupação Intensa e Desordenada do Solo / LF - Lençol Freático Alto

IF - Interferência Física no Sistema de Drenagem / DE - Desmatamento / LR - Lançamento Inadequado de Resíduos

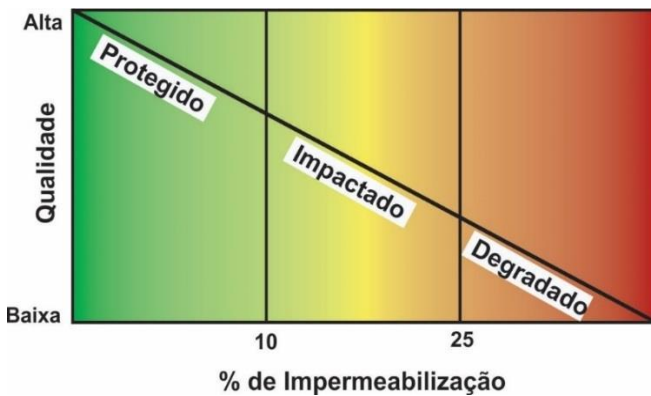
Fonte: Adaptado de IBGE, 2008.

Análogo às alterações no volume do escoamento superficial, há também evidências de que áreas altamente urbanizadas têm valores de evapotranspiração diminuídos devido à remoção da cobertura vegetal. A evapotranspiração potencial é alterada às custas de um menor papel da retenção natural do solo e da vegetação no armazenamento para regulação da geração de escoamento (SHUSTER et al., 2005).

A ocupação urbana associada à impermeabilização também pode influenciar na incidência das precipitações nas bacias hidrográficas, alterando os padrões dos volumes totais e do microclima local. Isso é atribuído ao fato de que regiões urbanas geralmente são mais secas e liberam mais calor do que as áreas rurais circundantes, alterando a convecção e circulação de massas de ar. Corroborando, há também a formação de precipitações induzidas como resultado do efeito das ilhas de calor — aquecimento do clima local devido as mudanças na cobertura do solo, drenagem, sombreamento e albedo (O'DRISCOLL et al., 2010).

A impermeabilização também gera um impacto negativo sobre a qualidade da água resultante do escoamento e que alimenta os corpos hídricos (SHUSTER et al., 2005). Quando a cobertura impermeável de uma determinada bacia hidrográfica é inferior a 10%, os córregos permanecem saudáveis. Acima de 10% já ocorrem grandes alterações na morfologia dos cursos de água, como o aumento dos contaminantes, aumento de sedimentos finos no leito do córrego e degradação geral do habitat aquático. Com valores acima de 25% de cobertura impermeável, os cursos de água sofrem a perda de habitat, conectividade da planície de inundação e estabilidade do banco, bem como a severa contaminação da água (CALIFORNIA COASTAL COMMISSION, 2005). Essa relação conceitual é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Qualidade do ambiente versus impermeabilidade.



Fonte: Adaptado California Coast Commission, 2003.

A modificação do ambiente natural por substituição pelas superfícies impermeáveis, têm um efeito significativo sobre os componentes hidrológicos de uma bacia hidrográfica (qualitativo e quantitativo). O grande aumento da urbanização e os efeitos cada vez mais evidentes das mudanças climáticas são os principais contribuintes para o escoamento excessivo, onde os sistemas convencionais de gerenciamento de águas pluviais, baseado em uma abordagem tradicional, não conseguem lidar adequadamente (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017). A gestão de águas pluviais urbanas é parte essencial de qualquer desenvolvimento, possuindo significativa importância ecológica, econômica e social. Os métodos devem evoluir tecnicamente para atender às crescentes demandas e restrições orçamentárias. Uma maneira pela qual o ambiente urbano evoluiu para acomodar isso é o uso crescente de controles de desenvolvimento de baixo impacto – DBI (TASSI et al., 2014).

2.2 ABORDAGEM DBI NO PLANEJAMENTO URBANO

Em um contexto que incorpora elevados índices de degradação causado pelas modificações no ambiente natural, alguns países alteraram lentamente suas políticas de manejo de águas por meio de investimentos significativos no tratamento de esgoto e no controle de águas pluviais aplicando, principalmente, estruturas de armazenamento. Findando a década de 90, a engenharia passou a reconhecer o papel do solo e da vegetação (sistemas naturais de drenagem) no controle qualitativo e quantitativo de águas pluviais (BERNDTSSON, 2010), ao aplicar técnicas para promover a reintegração dos elementos hidrológicos (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

Um vasto movimento internacional ocorreu em direção à concepção da gestão e do planejamento integrado do solo e da água. O objetivo fundamental desta mudança partiu da necessidade de prover mais economia e menos dano ambiental por meio de soluções para abastecimento de água, esgotamento sanitário e águas pluviais (NUNES, 2011).

Nessa perspectiva, surgiram algumas estratégias de manejo de águas pluviais (e servidas) por meio de uma abordagem de planejamento multidisciplinar integrado a práticas de tratamento e controle em pequena-escala, para mimetizar o comportamento hidrológico natural em configurações residenciais, comerciais e industriais. Esse tipo de abordagem inclui a ideologia do DBI, com técnicas de controle de escoamento na fonte.

As estratégias avançaram principalmente no manejo de águas pluviais, com a utilização de ecossistemas naturais como infraestrutura, promovendo a conservação e aproveitamento das características do solo e da vegetação. Surgiram assim, nos Estados Unidos e Canadá o conceito de LID - Low Impact Development, na Austrália o conceito WSUD - Water Sensitive Urban Design e na Grã-Bretanha o SuDS - Sustainable Drainage Systems (FLETCHER et al., 2015). Embora com terminologias diferentes, tratam-se de abordagens análogas que, numa perspectiva de engenharia, apresentam-se como um paradigma para o ciclo urbano da água.

Low Impact Development – LID, é definida pela USEPA (United States Environmental Protection Agency) como uma abordagem para o desenvolvimento urbano integrado ao ambiente natural para a gestão das águas pluviais tão próximo quanto o possível da fonte de origem. Os seus princípios são a preservação e aproveitamento das características da paisagem natural e a minimização da impermeabilização, de forma a criar uma drenagem funcional, dando a identidade às águas pluviais como um recurso, ao invés de um resíduo.

Sustainable Urban Drainage Systems – SUDS, é a designação atribuída no Reino Unido para uma sequência de práticas de gestão para drenagem da água superficial. A abordagem de SUDS inclui medidas estruturais e não-estruturais para minimizar a impermeabilização do solo e maximizar o seu uso, com a permanência e preservação da vegetação nativa, redução das fontes de contaminação e programas de educação que promovam novas ações e atividades. Ganhos paisagísticos, ambientais e econômicos reforçam as vantagens apresentadas por esta concepção

do tratamento da drenagem urbana, controlando não somente o pico, mas também o volume, a frequência, duração e qualidade do escoamento (POLETO, 2011).

O termo Water Sensitive Urban Design – WSUD foi utilizado pela primeira vez em 1994 na Austrália quando o WHGM (Department of Planning and Urban Development of Western Australia) apresentou um guia para planejamento e projeto de loteamentos residenciais, direcionado para a manutenção dos ambientes aquáticos. O conceito é utilizado principalmente na Austrália, e diz respeito à integração da gestão do ciclo da água no desenho e planejamento dos ambientes urbanos, de forma a suportar ecossistemas, estilos de vida e modos de subsistência saudáveis. A concepção é baseada na formulação de planos estruturais de desenvolvimento urbano que incorpora múltiplos objetivos para a gestão de águas pluviais, envolvendo um processo proativo no qual identificava oportunidades para desenho e projeto da paisagem urbana para serem intrinsecamente ligados com a infraestrutura de drenagem (WONG, 2006).

A abordagem de DBI engloba alternativas autônomas e distintas das utilizadas pela engenharia convencional que, por sua vez, tem foco no afastamento rápido das águas pluviais. O controle do escoamento superficial é realizado na fonte, por meio de técnicas de retenção, privilegiando a infiltração e evapotranspiração, e pela detenção, possibilitando o reúso da água ou gradativo descarte após as precipitações (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017).

Por meio da aplicação de medidas de controle na fonte imita-se hidrológicamente um comportamento similar às condições de pré-desenvolvimento. Além de fornecer potenciais temporários de armazenamento, restauram-se os regimes de fluxo (GOLDEN; HOGHOOGHI, 2018), promovendo a infiltração e evapotranspiração, melhorando e preservando os extremos do ciclo hidrológico natural alterado (WONG; JIM, 2014).

Uma meta da LID é promover a recuperação de captação e de águas pluviais, restaurar regimes de fluxo pré-desenvolvimento e aumentar a capacitância da bacia hidrográfica.

Cria-se uma mudança no cenário do desenvolvimento, invertendo a lógica de adaptação dos sistemas hídricos, onde a cidade se adapta ao ciclo hidrológico, mitigando ao máximo os impactos da urbanização e aproveitando todo o potencial da água na paisagem e na vida urbana. Isso significa menor escoamento superficial,

menores níveis de erosão e de poluição das águas e, conseqüentemente, menores investimentos para a mitigação de impactos a jusante.

A Figura 4 esquematiza um exemplo da mudança do cenário urbano, ilustrando algumas variáveis afetadas pelas abordagens mencionadas e suas contribuições no reestabelecimento das características hidrológicas naturais (HOBAN; WONG, 2006).

Figura 4 - Ilustração do balanço de água no ambiente urbano com e sem integração das abordagens LID, SUDS e WSUD.



Fonte: Adaptado de Hoban e Wong, 2006.

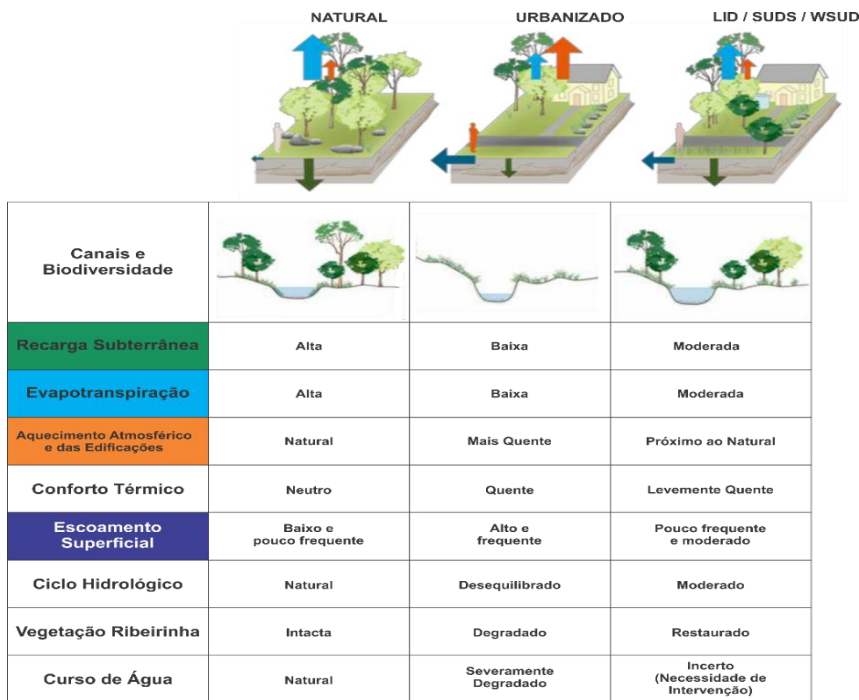
Essa visão que integra a paisagem urbana junto às componentes hidrológicas, tem como principais benefícios, entre outros: gestão integrada das águas potáveis, residuais e pluviais; integração da gestão das águas urbanas na escala de lote à escala regional; integração da gestão sustentável com a arquitetura e paisagismo; integração das medidas estruturais e não-estruturais.

O manual WSUD (GOVERNMENT OF SOUTH AUSTRALIA, 2009) estabelece a lista dos cinco objetivos da abordagem direcionada para as águas pluviais:

- Redução do escoamento superficial (*runoff*) e proteção contra enchentes;
- Proteção dos ecossistemas aquáticos naturais e melhoria da qualidade das águas - tratamento e remoção de poluentes;
- Redução da demanda de água potável - armazenamento e reuso das águas pluviais e/ou efluentes;
- Redução dos custos do sistema de drenagem e de infraestrutura em geral juntamente com a valorização estética do espaço urbano - integração dos sistemas de tratamento de águas pluviais com a paisagem urbana;

Na Figura 5 comparam-se os principais impactos sobre a paisagem, hidrologia e atmosfera da adoção e não adoção de uma abordagem DBI no desenho urbano (WONG et al., 2012).

Figura 5 - Síntese dos impactos sobre a paisagem hidrológica da integração da abordagem de DBI



Fonte: Adaptado de WONG et al., 2012

O manual técnico WSUD da Região Metropolitana de Adelaide (GOVERNMENT OF SOUTH AUSTRALIA, 2009), apresenta um quadro elencando algumas das principais práticas e enfatizando seu grau de aplicabilidade na gestão da qualidade e/ou quantidade da água pluvial, além dos potenciais benefícios e adequabilidade ao ambiente urbano. Alguns dos exemplos e suas descrições são apresentados no Quadro 3.

Inúmeras são as oportunidades para atingir os objetivos gerenciais das águas pluviais dentro dos projetos da paisagem urbana. As técnicas são altamente potenciais pois contemplam uma grande variedade de escalas, desde um domínio público até privado (controle na fonte).

No Brasil, os municípios buscam a adequação a esse modelo de desenvolvimento urbano mais sustentável com a criação de planos de manejo sustentável de águas pluviais, de maneira a abordar a questão da drenagem de forma

mais ampla, e buscando financiamento para a implantação das medidas de controle estruturais e não-estruturais previstas no plano. Porém, o incentivo à adoção de práticas de DBI ainda são tímidas no cenário nacional.

Em termos de legislação, o país ainda tem um conteúdo normativo bastante escasso, ocupando a 25ª posição num ranking mundial de países mais ativos na utilização de incentivos à sustentabilidade empresarial (KPMG, 2017). Algumas cidades apresentam leis ou normas próprias que incentivam ou obrigam a adoção de infraestrutura verde em edificações novas. Alguns exemplos incluem:

- Recife/PE: Lei 18.112/2015, obrigando projetos de edificações habitacionais multifamiliares acima de quatro pavimentos e comerciais com mais de 400m² de área deverão prever a implantação de telhado verde. E metragens de lotes (habitados ou não) acima de 500m² e +25% área impermeabilizada, devem conter reservatórios de acúmulo ou retardo escoamento de água pluvial.
- Porto Alegre/RS: Instrução 22/2007, determina um percentual mínimo, em função da área construída, a serem destinadas a coberturas verdes, a fim de assegurar a valorização da paisagem urbana, a qualificação do microclima, a recarga do aquífero, e a redução da contribuição superficial de água da chuva.
- Balneário Camboriú/SC: Lei 2544/2013 que incentiva a adoção de práticas para fomentar a preservação, proteção e recuperação do meio ambiente, mediante a concessão de benefício tributário ao contribuinte. As técnicas incluem sistema de captação da água da chuva, sistema de reuso de água, sistema de aquecimento hidráulico solar e construção com materiais sustentáveis.
- Brasil: Lei 12836/2013 que estimula à utilização, nos parcelamentos do solo e nas edificações urbanas, de sistemas operacionais, padrões construtivos e aportes tecnológicos que objetivem a redução de impactos ambientais e a economia de recursos naturais. Projeto de Lei 1703/2011, aprovado pelo Congresso Nacional e pela Comissão de Constituição e Justiça e de Cidadania em março de 2017, incentiva, por meio de benefícios fiscais, a utilização de coberturas verdes em condomínios verticais com mais de 3 (três) unidades autônomas.

É de crucial importância criar mecanismos fiscais ou financeiros que incentivem à adesão de práticas de DBI, adaptando o ambiente urbano e fornecendo-lhe uma maior resiliência às alterações climáticas. A adoção de uma abordagem de naturalização e otimização do ciclo da água, nomeadamente em termos de escala desde o lote até uma cidade ou bacia, tem efeito de elevado impacto na gestão dos

efeitos antrópicos sobre o ambiente. Torna-se imprescindível a promoção da finalidade e importância da utilização dessas práticas, para que se torne algo natural no contexto social.

Dentro das perspectivas de atendimento ao contexto DBI, o presente trabalho visa destacar a aplicação de estruturas de telhado verde, motivado, entre outros fatores, pelo seu elevado valor estético, propriedade no desenvolvimento da biodiversidade local, benefícios energéticos e acústicos, facilidade de instalação e custo acessível. Além disso, a implantação dos telhados verdes independe do tipo de solo da bacia hidrográfica, em contrapartida a outras estruturas (CARTER; KEELER, 2008). Cabe mencionar ainda que sua concepção é uma evidente oportunidade de melhoria ambiental sem causar prejuízo ao espaço urbano, uma vez que a maior parte é formado por edificações munidas de coberturas – 40 a 50% das superfícies impermeabilizadas (MENTENS; RAES; HERMY, 2006).

Quadro 3 - Resumo da aplicabilidade de algumas práticas WSUD em gestão de águas pluviais.

(continua)

MEDIDA	INDICAÇÃO DA PRÁTICA WSUD		POTENCIAIS BENEFÍCIOS	CONDICIONANTES APROPRIADOS	CONDICIONANTES NÃO APROPRIADOS
	Qualidade	Quantidade			
Cisternas	Baixa	Alta	Armazenamento para reuso. Reduzir frequência de eventos.	Próximo ao telhado. Sistema é abastecido por gravidade. Deve ser incorporado ao desenho urbano.	Aonde não houver área de telhado para captação. Onde o tanque não é usado exclusivamente para armazenamento de água de chuva.
Sistemas de Biorretenção (Escala lote)	Média	Alta	Retenção do volume da água pluvial. Melhoria da qualidade da água.	Escala de lote	Solos Argilosos
Sistemas de Biorretenção (Escala – vias Públicas)	Alta	Baixa	Remove finas partículas e poluentes solúveis. Valoriza a paisagem urbana. Minimiza frequência de alagamentos e inundações.	Qualquer área urbana de topografia plana.	Locais com declividade íngreme. Nível do lençol freático alto - próximo a superfície.
Telhados Verdes	Média	Média	Retenção do volume da água pluvial. Biodiversidade. Melhoria do microclima.	Telhados planos e com inclinação máxima de 30 graus.	Telhados que não são estruturalmente adequados.
Sistemas de Infiltração	Alta	Média	Retenção do volume da água pluvial. Melhoria da qualidade da água.	Escala de lote e de vizinhança	Solos com baixa capacidade de infiltração. Nível do lençol freático alto - próximo a superfície.

(continuação)

MEDIDA	INDICAÇÃO DA PRÁTICA WSUD		POTENCIAL BENEFÍCIOS	CONDICIONANTES APROPRIADOS	CONDICIONANTES NÃO APROPRIADOS
	Qualidade	Quantidade			
Pavimento Poroso	Alta	Média	Detenção e Retenção do escoamento superficial (runoff).	Escala de lote, em vias públicas (calçadas e áreas de passeio) e estacionamentos.	Áreas de tráfego intenso e bacias urbanas com grande quantidade de sedimentos (ou material particulado atmosférico)
Coleta e reuso da água	Média	Alta	Redução da quantidade de água potável para o abastecimento humano.	Escala de vizinhança em áreas residenciais, comerciais e industriais.	Impactos negativos para a população à jusante da Bacia urbana.
Valas Vegetadas	Média	Baixa	Remove médias e finas partículas. Valoriza a paisagem urbana. Reduz o escoamento superficial.	Locais com declividade até 4%.	Locais com declividade íngreme.
Bacias de Sedimentação	Alta	Média	Captura grandes sedimentos. Pré-tratamento para outras técnicas	Escala de vizinhança. Em geral, necessita de mais espaço físico que as outras técnicas.	Onde o incremento do visual paisagístico é desejado.

Fonte: Adaptado de Government of South Austrália, 2009.

2.3 TELHADOS VERDES

2.3.1 Aspectos Gerais e de Projeto

Os telhados verdes foram utilizados inicialmente para fins de isolamento térmico nos países nórdicos. A primeira iniciativa moderna de implantação foi na Alemanha e, subsequentemente, em outros países europeus vizinhos e partes do mundo, se tornando uma prática relativamente comum e elevando sua expansão nos últimos 20 anos (BERNDTSSON, 2010; MOHAMMED AHMED; HALIL ALIBABA, 2016; VIJAYARAGHAVAN, 2016). O aumento anual da cobertura de telhados verdes é estimada entre 0,1 e 1 km² em países como a Espanha, Brasil, Canadá, Coréia, Reino Unido e Japão, enquanto que na França atinge os 2 km² (VERSINI et al., 2015). Na Alemanha, o aumento anual é de aproximadamente 13,5 milhões de m², sendo que 10% dos seus edifícios utilizam os telhados verdes (OBERNDORFER et al., 2007).

A definição de telhados verdes é bastante difundida e análoga na literatura. Basicamente, consistem em sistemas construídos artificialmente, formados por multicamadas e implantadas nas coberturas das edificações (planas ou inclinadas), sobre as quais são aplicados diversos tipos de materiais com a finalidade de criar um ambiente ou meio de cultura adequada capaz de abrigar uma superfície vegetada (CURRIE; BASS, 2010; GSA, 2011; SUTTON, 2010; VIJAYARAGHAVAN, 2016).

As características físicas intrínsecas aos telhados verdes estão relacionadas ao local de implantação e preponderantemente atreladas aos condicionantes arquitetônicos e exigências estruturais das edificações (BERNDTSSON, 2010). Basicamente, a literatura traz a distinção entre três categorias: telhados verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Telhados Verdes Extensivos

Categoria definida por um substrato de pouca profundidade, em comparação as demais (cerca de 5 a 15cm¹), baixo custo de implantação, mínimo incremento de carga e pouca necessidade de manutenção (GSA, 2011; VIJAYARAGHAVAN, 2016).

¹ A literatura difere bastante com relação a profundidade associada a cada tipo de telhado verde. Os valores apresentados no texto são uma média das profundidades apresentadas dos textos consultadas.

Devido à fina camada de substrato, acomodam apenas tipos limitados de vegetação menos robustas, de boa adaptabilidade e mais tolerantes ao estresse hídrico (Ex., musgos, suculentas, ervas, gramíneas). A acessibilidade do telhado se restringe à manutenção, podendo ser implantados em uma grande variedade de locais sem a necessidade de intervenção significativa, como estruturas planas ou inclinadas pré-existentes (CURRIE; BASS, 2010). Os telhados extensivos são mais comuns em todo o mundo e recebem a maior atenção na literatura devido a sua comodidade de instalação, baixo custo e restrições de carga.

Telhados Verdes Intensivos

Essa categoria é caracterizada por uma maior profundidade de substrato (geralmente acima de 25 cm), projetada para sustentar ambientes paisagísticos mais complexos e com uma biodiversidade mais abrangente, comportando uma vasta variedade de tipos vegetais. Apresentam um custo de implantação relativamente alto, maior carga e níveis regulares de manutenção na forma de fertilização, capina e irrigação (GSA, 2011; VIJAYARAGHAVAN, 2016)(VIJAYARAGHAVAN, 2016). Sua acessibilidade é mais ampla, e geralmente são construídos em edificações sem restrições de carga estrutural (CURRIE; BASS, 2010).

Telhados Verdes Semi-Intensivos

Telhados verdes semi-intensivos têm um substrato com profundidade intermediária (15 a 25cm), permitindo uma vegetação mais robusta em comparação aos telhados verdes extensivos. Além dos musgos, gramíneas e *Sedum* de telhados extensivos, plantações semi-intensivas incluem ervas, plantas com flores, gramíneas mais altas e pequenos arbustos. Essa categoria requer moderada manutenção na forma de poda, fertilização e irrigação ocasional (CURRIE; BASS, 2010).

O Quadro 4 traz um resumo comparativo das diferentes categorias de telhados verdes (IGRA, 2018). As informações referentes às vantagens e desvantagens da categoria semi-intensivo, encontram-se em limites intermediários das categorias adjacentes.

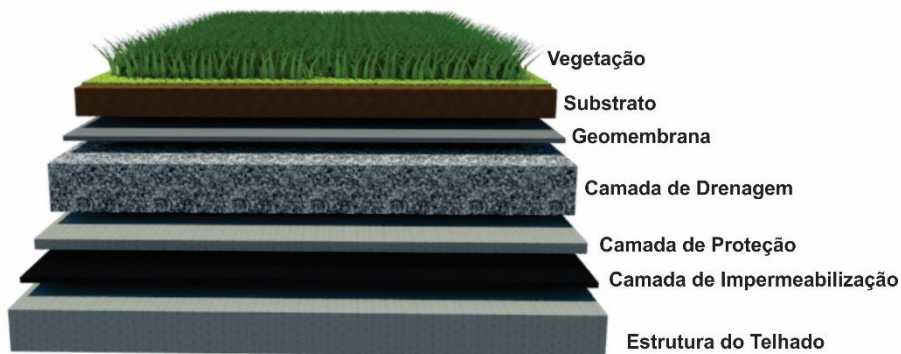
Quadro 4 - Caracterização das categorias de telhados verdes

	EXTENSIVO	SEMI-INTENSIVO	INTENSIVO
PROFUNDIDADE SUBSTRATO	5 a 15 cm	15 a 25 cm	Acima de 25 cm
BIODIVERSIDADE	Gramíneas, <i>Sedum</i> , Ervas, etc.	Gramíneas mais robustas, pequenos arbustos, plantas com flores	Arbustos, árvores, etc.
CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	Baixo	Médio	Alto
MANUTENÇÃO	Baixo	Regular	Alto
CARGA ESTRUTURAL	60 a 150 kg/m ²	120 a 200 kg/m ²	180 a 500 kg/m ²
ACESSIBILIDADE	Restrita	Restrita	Aberta
VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estrutura Leve; ▪ Adequado para telhados com inclinação de até 1 em 3; ▪ Pouca ou nenhuma necessidade de irrigação e sistemas de drenagem específicos; ▪ Pouca gestão da vegetação; ▪ Custo de Implantação Baixo; ▪ Mercado com sistemas pré-fabricados. 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Condições mais favoráveis para as plantas, levando a uma maior biodiversidade potencial; ▪ Melhor desempenho térmico; ▪ Muitas vezes acessíveis, com oportunidades para recreação; ▪ Maior capacidade de retenção de água superficial.
DESVANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Condições mais estressantes para as plantas, levando a uma menor biodiversidade potencial; ▪ Limitação de isolamento ▪ Benefícios limitados de retenção pluviométrica ▪ Benefícios estéticos limitados; ▪ Acessibilidade limitada. 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maior carregamento na estrutura; ▪ Necessidade de sistemas específicos de irrigação e drenagem; ▪ Maiores custos de manutenção e implantação.

Fonte: Adaptado de IGRA, 2018.

A composição física dos telhados verdes, para as diferentes categorias, é análoga à Figura 6. Tipicamente são formados pelos seguintes elementos: camada vegetação, substrato (meio de cultura), geomembranas, camada de drenagem, camada protetora, camada impermeabilizante e estrutura do telhado (BERNDTSSON, 2010; HYDROTECH, 2014). De modo geral, o desempenho e eficiência está intimamente relacionado com a tipificação e variação das estruturas componentes (NAWAZ; MCDONALD; POSTOYKO, 2015).

Figura 6 - Composição Física de Telhados Verdes



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Camada de Vegetação

Constitui a camada superior, tipicamente ligada ao atendimento dos objetivos arquitetônicos. Agrega vida à estrutura do telhado e comporta elevada qualificação estética, sendo responsável por importantes benefícios socioambientais (BIANCHINI; HEWAGE, 2012; NETO, 2014). De modo geral, o êxito de qualquer telhado verde está relacionado com a salubridade da camada vegetal.

Dentre as precauções com relação à vegetação implantada está a adaptabilidade à climatologia local. Características dos ventos, temperaturas extremas, sazonalidade, tipo e volume das precipitações, altura das edificações, tipo de telhado, manutenção disponível e aparência desejada são fatores determinantes para a escolha das espécies vegetais, uma vez que cada espécie apresenta as suas particularidades. O objetivo básico é o desenvolvimento de forma salutar e que necessitem o mínimo de intervenção (OBERNDORFER et al., 2007; VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Considerando os telhados um ambiente extremo, a vegetação que mais prosperará em telhados verdes extensivos apresentam as seguintes características: capacidade de suportar condições de seca, sobreviver sob condições mínimas de nutrientes, boa cobertura no solo, desenvolvimento rápido, raízes pequenas e moles, com baixa manutenção (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Embora seja difícil encontrar uma espécie que contenha todas as condições favoráveis, inúmeras pesquisas progrediram na identificação de espécies adequadas. A vegetação do tipo suculenta foi a que mais intensamente foi examinada em telhados verdes (BERNDTSSON, 2010; TASSI et al., 2014).

Figura 7 - *Sedum rupestre*



Fonte: Acervo Próprio.

Dos diferentes tipos, as espécies *Sedum* (Figura 7) são as mais populares e comprovadamente eficientes para a categoria de cobertura extensiva. Apresentam raízes curtas com crescimento rápido e detêm a capacidade de limitar a transpiração e armazenar o excesso de água para sobreviver às condições de seca (STOVIN et al., 2015; WHITTINGHILL et al., 2015).

Plantas com morfologia de folhas pequenas e duras, com a presença de tecidos de sustentação, como as espécies ditas CAM (Crassulacean Acid Metabolism), tem origem em ambientes desfavoráveis, possuindo maior tolerância ao estresse hídrico e, portanto, sendo ideais para locais de clima tropical ou subtropical (WHITTINGHILL et al., 2015). Entre as famílias pertencentes ao grupo de planta CAM existem as Aizoaceae, Agavaceae, Asclepiadaceae, Bromeliaceae, Cactaceae, Commelinaceae, Crassulaceae, Dracaenaceae, Lamiaceae, Orchidaceae, Piperaceae, Portulaceae, etc.

Para as espécies de *Sedum*, a profundidade de substrato em torno de 7 cm é suficiente para o crescimento. A garantia de uma boa cobertura vegetal retarda o desenvolvimento de ervas daninhas, e evita a erosão do solo quando construídas em telhados inclinados. As raízes curtas e moles também são um fator vital, pois impede a penetração no pavimento do telhado (GETTER; ROWE, 2006).

Entre outras inúmeras vantagens, as plantas desempenham um papel significativo no que diz respeito a redução do escoamento. Essa atuação ocorre por meio da interceptação, cujo processo se dá pela retenção da água nas folhas, caules e ramos. Sua maior ou menor influência está associada às características da precipitação, condições climáticas, salubridade vegetal e, sobretudo, da capacidade de cada planta em atuar na retenção e transpiração (STOVIN et al., 2015; WHITTINGHILL et al., 2015).

Substrato ou Meio de Cultura

Substratos ou meios de cultura são outro fator importante no projeto de telhados verdes. Atuam como camada de suporte e meio de crescimento para a vegetação, podendo também melhorar o desempenho de retenção de água dos sistemas de telhado verde (RAZZAGHMANESH; BEECHAM, 2014). O substrato deve ser capaz de permitir a fixação das plantas e fornecer os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento, atendendo as necessidades físicas, químicas e biológicas. Sua profundidade delimita conceitualmente a categoria de telhado e é fator pertinente na escolha do tipo de vegetação. (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Como a estrutura permanece sobre os telhados, é importante que o substrato tenha baixas densidades de massa seca e úmida, pois das diferentes camadas, é a que agrega carga à estrutura. Em vista que a maioria dos edifícios tem restrições de carregamento, especialmente os mais antigos, é importante que o peso do substrato seja o menor possível.

Vários benefícios dos telhados verdes estão diretamente associados às propriedades do substrato, incluindo a melhoria da qualidade da água, redução do escoamento, benefícios térmicos e isolamento acústico (GRACSON et al., 2013).

Fisicamente, a água é armazenada nas cavidades das partículas minerais porosas e na fração de matéria orgânica, detendo e retendo o escoamento. Posteriormente é absorvida pelas plantas ou retornando para a atmosfera por evapotranspiração. Numa situação ideal, o espaço dos poros presentes seria dividido uniformemente entre duas frações: ar e água. Se a água predomina, o meio fica pesado e encharcado. Se o ar predomina, o meio torna-se mais leve, porém conduzindo a um estresse hídrico para as plantas. Portanto, é necessário que o meio de crescimento tenha drenagem adequada, mas suficiente capacidade de retenção de água (COLLI et al., 2010). A capacidade de reter água é o principal objetivo em

termos quantitativos. Porém, o substrato deve permitir adequada e suficiente drenagem para não tornar as condições do meio anaeróbias, trazendo prejuízo e dificultando o crescimento da vegetação.

De modo geral, são fatores determinantes na maior ou menor capacidade de retenção, propriedades como a profundidade e a composição do substrato (GRACESON et al., 2013).

Um substrato geralmente é composto de três componentes principais: solo, matéria orgânica e um agregado com alta porosidade e baixa densidade (LIBERALESSO, 2018). A composição deve proporcionar um ambiente benéfico ao desenvolvimento das plantas, contendo matéria orgânica, minerais naturais e sintéticos, valores ideais de pH, micro e macro nutrientes, densidade adequada, grau de permeabilidade e porosidade, capacidade de troca de cátions, condutividade elétrica, espaço de aeração, capacidade de retenção de umidade (ZORZETO et al., 2014). Tal como acontece com o solo natural, idealmente, 50% do substrato deve consistir em conteúdo mineral e orgânico. Os 50% restantes devem ser o espaço dos poros (LATSHAW; FITZGERALD; SUTTON, 2009).

O Quadro 5 traz especificações de algumas propriedades dos substrato (FLL, 2002).

Quadro 5 - Especificações para substratos de telhados verdes

PROPRIEDADES	EXTENSIVOS		INTENSIVOS
	Camada Unitária	Múltiplas Camadas	
Capacidade Retenção de Água (%/Volume)	Mín 20%	Mín 35%	Mín 45%
Permeabilidade (mm/min)	≥ 60	≥ 0.6	≥ 0.3
Vazios (%/Volume)	≥ 25%		≥ 20%
pH	6.5 a 9.5	6.5 a 8.0	5.5 a 8.0
Sais (g/L)	3.5		2.5
Nitrogênio (mg/L)			≤ 80
Fósforo (mg/L)			≤ 200
Magnésio (mg/L)			≤160

Fonte: Adaptado de FLL, 2002.

Geomembranas

Geralmente são constituídas de geotêxtil ou outros elementos tecidos, formando um meio filtrante e separando o substrato da camada de drenagem. Sua constituição deve apresentar alta resistência à tração e pequenos poros para permitir uma boa permeabilidade e, conjuntamente, inibir o movimento de partículas finas do substrato para as camadas inferiores. Variados materiais particulados invasivos na camada drenante provocam a colmatção e obstrução do sistema, interferindo negativamente no desempenho (VIJAYARAGHAVAN, 2016). As geomembranas atuam também como uma barreira contra o acesso invasivo de raízes moles e curtas da vegetação.

Camada de Drenagem

Como a própria denominação sugere, tem a função de drenar o excedente da precipitação incapaz de permanecer armazenada na camada de substrato quando alcançado o nível de saturação. A camada deve promover um equilíbrio entre o ar e a água no sistema, uma vez que a vegetação requer um substrato arejado e sem excesso de umidade para um bom crescimento, garantindo condições aeróbias (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

A camada sempre se conecta a dispositivos de saída com capacidade de vazão suficiente para transportar o volume necessário de água do telhado e evitar a acumulação excessiva. Essa dinâmica dependerá de uma série de fatores, como o gradiente hidráulico e a pressão de confinamento aplicada. Algumas normas europeias trazem valores de gradiente hidráulico de 1,0 (para telhados verdes, gradientes mais apropriados seriam da ordem de 0,01) e a pressão de confinamento de 20 kPa (CIRIA, 2015).

Três tipos de camadas de drenagem são utilizados em telhados verdes (VIJAYARAGHAVAN, 2016):

- Painéis modulares: fabricados com materiais plásticos de alta resistência (polietileno ou poliestireno) com compartimentos para armazenar água e evacuar o excesso. São comercialmente bem difundidos, de fácil instalação e com a vantagem de possibilitar a abertura de peças durante o processo de reparo.
- Materiais granulares: geralmente compostos por agregado miúdo de graduação aberta, argilas expandidas leves, tijolos triturados, cascalho e

pedras. Geralmente são mais baratos, porém apresentam restrições limitantes como a declividade do telhado e a maior dificuldade em eventuais manutenções.

- Membranas drenantes: material formado pela associação de um filtro geotêxtil a um núcleo drenante de pequena espessura. Tem elevada resistência a ataques químicos e biológicos, e pequena vazão, ideal para favorecer a manutenção da umidade.

Camada Protetora

Camada que, quando inserida, tem a função de promover proteção física da membrana de impermeabilização. Eventuais interferências mecânicas, crescimento e ação invasiva das raízes e intempéries podem acarretar o rompimento do sistema impermeabilizante.

Impermeabilização

Camada destinada a isolar e proteger a estrutura do telhado frente à umidade presente no meio, que assume valores altos em função do substrato encharcado e a camada de drenagem. O sistema necessariamente precisa ser de material robusto e de alta qualidade, constituindo-se um componente vital do sistema. Mesmo que a impermeabilização não seja uma camada intrínseca ao telhado verde, é um pré-requisito para qualquer instalação dessa natureza (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Dois tipos comuns de membrana são empregados: impermeabilizante asfáltico, aplicadas diretamente ao telhado como um líquido quente ou frio, e manta asfáltica do tipo termoplástica (CIRIA, 2015).

As membranas impermeáveis devem ser resistentes e adequadamente protegidas contra mudanças de temperatura e danos mecânicos para garantir a manutenção da integridade do tecido inferior. É imprescindível o máximo de cuidado para garantir a confiabilidade da camada, pois os reparos são difíceis e onerosos quando do término da estrutura. Assim como em impermeabilizações de coberturas tradicionais, é altamente recomendado testes de estanqueidade durante 72 horas, para garantir a eficiência e estabilidade do sistema (NBR 15575, 2013).

Estrutura do Telhado

Tradicionalmente são compostas pelas lajes de concreto armado, madeira ou pré-moldadas. Devem ser projetadas e dimensionadas para suportar a carga do telhado verde em regime de saturação, bem como quaisquer outras cargas mortas ou vivas que possam estar sujeitas durante a vida útil. A carga adicional imposta na estrutura do telhado subjacente varia com a categoria de telhado verde. Telhados extensivos comumente tem carga em torno de 0,7 a 5 kN/m². Os telhados verdes intensivos, em função das suas características, podem impor cargas de até 10 kN/m² (CIRIA, 2015).

Para o dimensionamento do carregamento, também deve-se considerar a incidência de vento, principalmente em estruturas como edifícios e telhados verdes intensivos com vegetação robusta. Dependendo de seu porte, podem exigir proteção contra o vento, ou então ancoragem. Em edifícios altos, as velocidades mais altas do vento podem conduzir a um aumento da perda de água. Barreiras especificamente alocadas, podem ser usadas para mitigar esses efeitos (CIRIA, 2015).

2.3.2 Benefícios dos Telhados Verdes

A implantação de telhados verdes em ambientes urbanizados traz diversos benefícios no âmbito público e privado, econômico e social, local e global, apresentando-se como uma boa ferramenta para atingir múltiplos objetivos ecológicos (SNODGRASS; MCINTYRE, 2010). Embora as funcionalidades de todos os telhados verdes sejam análogas, cada instalação é única, de modo que o seu desempenho varia de acordo com a região, clima, construção e tipo de telhado verde. Desse modo, sua inclusão como ferramenta no gerenciamento de bacias hidrográficas, por exemplo, deve suprir desafios como a localização particular, metas e restrições de recursos (CARTER; KEELER, 2008).

Os telhados verdes apresentam estratégias potenciais a serem utilizadas em áreas urbanizadas para atuar no sentido de aumentar a proporção de superfícies permeáveis para reter e deter as águas pluviais (GRACESON et al., 2013). A oportunidade de implantação torna-se promissora uma vez que às áreas correspondentes às coberturas representarem cerca de 40-50% das áreas impermeáveis, oportunizando espaços em locais onde não há áreas disponíveis para novas infraestruturas (MENTENS; RAES; HERMY, 2006). A implantação em micro

escala – telhado – tem reflexo positivo sobre a solução de problemas em escala macro – cidade (VERSINI et al., 2015).

Diversos benefícios advêm da implantação de telhados verdes, dos quais merecem maior destaque: regulação térmica urbana (diminuição das ilhas de calor) e também nas edificações (regulação da temperatura interna), efeitos sobre a qualidade do ar, promoção da estética (paisagismo) e recreação, desenvolvimento da biodiversidade urbana no âmbito de fauna e flora, benefícios acústicos e energéticos, promoção da saúde e bem-estar, gerenciamento qualitativo e quantitativo das águas pluviais (BERARDI; GHAFARIANHOSEINI; GHAFARIANHOSEINI, 2014; GETTER; ROWE, 2006; GSA, 2011; MUÑOZ; GARCÍA, 2015; SAADATIAN et al., 2013). A partir dos benefícios diretos surgem ainda as qualificações indiretas, principalmente atreladas a economia de recursos em todas as esferas.

Contextualmente, e em função do objeto da presente pesquisa, esta redação dará ênfase apenas aos efeitos oriundos da atuação dos telhados verdes no gerenciamento quantitativo das águas pluviais. Cabe salientar que tal iniciativa, de nenhuma forma minimiza ou deixa de fazer valer a significância dos demais benefícios citados.

2.3.3 Efeito quantitativo dos telhados verdes nas águas pluviais

Para caracterizar o desempenho de telhados verdes é amplamente reconhecido que as respostas do escoamento dependem de um conjunto complexo de processos e ações interativas (STOVIN et al., 2015). Berndtsson (2010) elenca dois conjuntos de fatores que influenciam a capacidade de retenção e a dinâmica de escoamento: características do telhado verde (espessura de solo, tipo de substrato, cobertura vegetal, tipo de vegetação, geometria e idade do telhado) e as condições climáticas da região (duração do período de seca, climatologia regional, características dos eventos de chuva). Outros fatores pertinentes são o potencial de evaporação e transpiração vegetal, condições de umidade antecedente do substrato durante o evento de precipitação e as propriedades hidráulicas do solo (HILTEN; LAWRENCE; TOLLNER, 2008; LOCATELLI et al., 2014).

Fisicamente, o comportamento dos telhados verdes se assemelha ao que ocorre em superfícies permeáveis que, quantitativamente, atuam armazenando a água proveniente das precipitações e, conjuntamente, atrasam e atenuam o pico de

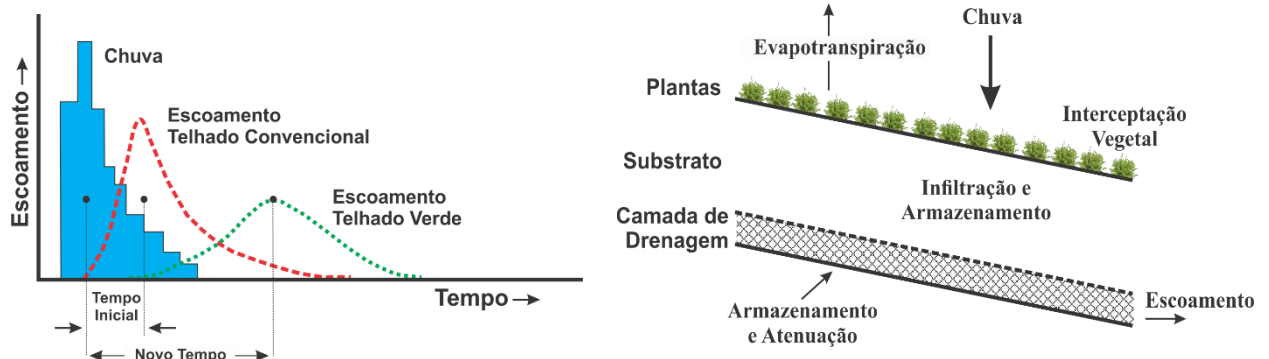
escoamento (BERNDTSSON, 2010; GSA, 2011; MENTENS; RAES; HERMY, 2006). Parte do volume de água fica retido no substrato (capacidade de campo) e o excesso é direcionado para o sistema de drenagem. O volume contido sofrerá evaporação ou será absorvido pelas plantas, com posterior devolução para atmosfera por meio da transpiração. Essa dinâmica é responsável por recuperar a capacidade de armazenamento para eventos posteriores (BERNDTSSON, 2010; SIMS, 2015).

Conceitualmente, a detenção se refere ao atraso temporal que ocorre entre a precipitação, que não é retida no telhado, e a geração de escoamento (STOVIN et al., 2015). A retenção, por sua vez, refere-se à quantidade de precipitação armazenada no substrato ou na camada de drenagem, ocupando os espaços vazios e aderida pela atuação de forças capilares (SIMS, 2015).

Um telhado verde de 7mil m², construído na cidade de Chicago, monitorando o seu desempenho, atrasou o pico de escoamento em quase 2h. Valor significativamente superior a outros telhados de menores dimensões avaliados nas mesmas condições (GSA, 2011). SIMMONS et al. (2008) e VANWOERT et al. (2005) em suas pesquisas, observaram que telhados verdes geralmente retardavam o escoamento (pico a pico) em média 10min. HILTEN; LAWRENCE; TOLLNER (2008), modelando o escoamento em telhados verdes, encontrou valores de retardo no pico de escoamento em torno de 12h para precipitações de 50 a 70mm. Numericamente, as diferenças quantitativas para os diferentes estudos, são significativas, porém não se pode criar relações entre os respectivos valores citados devido às diferenças nas características físicas entre as estruturas monitoradas.

Esquemáticamente, o comportamento do telhado verde frente ao atraso no pico do escoamento se processa conforme representado na Figura 8. Devido à capacidade de armazenamento de água forma-se um tempo de retardo (“lag time”) do escoamento.

Figura 8 - Esquema do comportamento de telhados verdes no atraso do pico de escoamento



Fonte: Adaptado do site Winter Street Architects, 2017.

Dois intervalos de tempo podem ser associados à redução de escoamento em telhados verdes. Um curto período de tempo, onde é considerado a resposta do escoamento para um evento de chuva individual, e um mais longo, em função do seu comportamento diferenciado em função da sazonalidade (BENGTSSON; GRAHN; OLSSON, 2004).

O volume e a intensidade de chuva são os fatores meteorológicos mais significativos na capacidade de retenção de telhados verdes (ZHANG et al., 2015). Carter e Rasmussen (2007) encontraram uma relação inversa entre o volume precipitado e a porcentagem de retenção. Para chuvas de pouco volume (<25,4 mm) a retenção foi de 88%, para chuvas médias (25,4 a 76,2 mm) de 58% e para grandes (>76,2 mm), 48%. Analogamente, SIMMONS et al. (2008) avaliando vários telhados para diferentes volumes de chuva, encontraram que pequenos eventos (<10mm) foram totalmente retidos nas estruturas. Para o evento de chuva de 12 mm, a retenção entre os telhados verdes variou de 88% a 26%. Para eventos de chuva de 28 mm e 49 mm a faixa de retenção variou de 43 a 8% e 44 a 13%, respectivamente. Zhang et al. (2015) encontraram taxas de redução na faixa de 55 a 45% para volumes de 130mm (distribuídos em 4 dias), e retenções de 85 a 90% para chuvas de 30mm (4 dias) e 40mm (3 dias).

Em relação à intensidade dos eventos chuvosos, os telhados têm um efeito maior na retenção quanto menor a intensidade da chuva, atingindo valores em torno ou muito próximos de 100% de retenção (BERNDTSSON, 2010; GSA, 2011; HAKIMDAVAR et al., 2014; TASSI et al., 2014; VERSINI et al., 2015). Para chuvas intensas, o telhado não possui tempo e condições hábeis para perder a umidade para

o ambiente, reduzindo a eficiência na retenção para eventos subsequentes. Villarreal e Bengtsson (2005) avaliando diferentes inclinações (2 e 14%) de telhados para distintas intensidades de chuva, encontraram uma retenção de 62% e 39%, para uma intensidade de chuva simulada de 24 mm/h. Para uma intensidade de 78 mm/h, a retenção foi de 21% e 10%.

Em função da variabilidade climáticas entre as estações, os telhados verdes apresentam taxas de retenção distintas entre as estações sendo, tipicamente, menores no inverno do que no verão (GSA, 2011). Longos períodos de seca (característica de estações quentes) geralmente resultam em elevados coeficientes de retenção (RAZZAGHMANESH; BEECHAM, 2014). Além do mais, no verão, a atividade vegetal é mais operante resultando em maiores taxas de evapotranspiração, conduzindo a uma recuperação mais rápida da capacidade de armazenamento e diminuição do escoamento superficial. Já para o inverno, a vegetação é menos ativa e o substrato leva mais tempo para perder a umidade (ELLIOTT et al., 2016; VILLARREAL; BENGTTSSON, 2005).

Mentens; Raes; Hermy (2006) comparando dois períodos (inverno e verão), em um telhado com substrato de 10cm de espessura, mostraram que o escoamento foi significativamente maior durante o inverno (80%) do que no verão (52%). Tassi et al. (2014) obtiveram valores em torno de 50% de escoamento para o inverno, e 30% para as demais estações do ano. Elliott et al. (2016), avaliado o desempenho de dois telhados verdes de diferentes profundidades (32 e 100mm) com relação a variabilidade sazonal encontraram: valores de retenção maior para os meses mais quentes; telhado de maior espessura mostrou-se menos suscetível a sazonalidade; e o sistema mais fino teve maior variação sazonal quando relacionado ao volume de chuva.

Para os eventos de chuva cujos volumes superam a capacidade de retenção do solo, os telhados verdes absorvem a precipitação temporariamente e a libera de forma lenta e gradual, evitando um pico imediato de escoamento normalmente associada a telhados impermeáveis durante os eventos de chuva (HILTEN; LAWRENCE; TOLLNER, 2008) reduzindo e mitigando a taxa máxima de escoamento e o tempo de concentração. Assim como o armazenamento, a redução no índice de vazão do pico está relacionada intimamente com as configurações e características dos materiais do substrato e da camada de drenagem, que em função das suas

características granulares, tem maior ou menor transmissividade, significando proporcional resistência ao fluxo horizontal de águas pluviais (GSA, 2011).

As propriedades do solo (substrato) conjuntamente com as condições de umidade antecedentes à precipitação são determinantes na capacidade de armazenamento. Durante a chuva, enquanto o conteúdo de água do solo estiver abaixo da capacidade de campo, dificilmente haverá escoamento no telhado verde. O solo é delgado, de modo que quando a chuva é pouco intensa, parte do solo se torna saturado e a água flui no substrato em um fluxo sub-superficial, saturando o meio. Uma vez que todos os poros estiverem preenchidos com água, haverá geração de escoamento (BENGTSSON; GRAHN; OLSSON, 2004; BERNDTSSON, 2010; LOCATELLI et al., 2014). No entanto, fisicamente, equitativamente um telhado verde com certa umidade proveniente de chuvas sucessivas, terá capacidade de reduzir a taxa de escoamento e o tempo de pico, pois mesmo em um meio saturado, o tempo necessário para que a água se mova verticalmente e horizontalmente no substrato e na vegetação é maior do que o tempo necessário para o escoamento em uma superfície impermeável. Tendenciosamente, a redução será tanto maior quanto menor a quantidade de umidade presente no solo (BENGTSSON; GRAHN; OLSSON, 2004; BERNDTSSON, 2010; TASSI et al., 2014).

A capacidade de campo está intimamente relacionada às características físicas do substrato. Quando composto de partículas de menor tamanho, apresentam maior volume de vazios no espaço, podendo armazenar maior quantidade de água em um dado volume específico (GSA, 2011). Em contrapartida, um meio muito poroso, tem menor eficiência em termos de detenção (STOVIN et al., 2015). Graceson et al. (2013) avaliou a contribuição de diferentes composições (telha e tijolos esmagados finos e grosseiros) e profundidades (75 e 150mm) de substrato na retenção de água em telhados verdes. Os resultados indicaram que tanto os espaços de poros e a distribuição entre partículas foram fatores determinantes da capacidade de retenção de água, onde compostos com maior proporção de partículas menores tiveram a capacidade de retenção aumentada. O acréscimo da profundidade, por sua vez, fez elevar a retenção em apenas 20%, indicando uma menor influência quando comparado ao desempenho atribuído composição do substrato.

Hiltner; Lawrence; Tollner (2008) mediram a capacidade do campo e o teor de umidade do ponto de murcha em um telhado verde composto de areia, limo e argila, e encontraram valores em torno de 0,11 e 0,08 m³/m³ (volume de água por volume de

solo). Bengtsson; Grahn; Olsson (2004), encontraram valores em termos de volume em torno de 40 e 50% para a capacidade de campo e 15% para ponto de murcha, para um substrato de 30mm, com predomínio de entulho e areia cobertos por vegetação do tipo *Sedum*. Ainda, com relação à matéria orgânica, maiores quantidades desse composto tendem a aumentar a capacidade de retenção de água. No entanto, o excesso pode fazer com que o meio de cultura perca volume em função da decomposição.

O substrato vegetativo de telhados verdes sofre várias mudanças químicas e físicas ao longo do tempo: as partículas do solo são carregadas, as substâncias dissolúveis são lavadas com a água, o conteúdo orgânico pode aumentar e a porosidade alterar-se devido ao desenvolvimento de raízes. Assim, apesar de poucos estudos abordarem as mudanças do desempenho hidráulico dos telhados verdes em função da idade, pode-se esperar uma alteração na dinâmica do escoamento (BERNDTSSON, 2010). Getter; Rowe (2006) compararam o teor de matéria orgânica e as propriedades físicas do solo após 5 anos em um telhado verde, e concluíram que o teor de matéria orgânica e o espaço dos poros dobraram nesse período de tempo (de 2% a 4% e de 41% a 82%, respectivamente). A capacidade de retenção de água aumentou de 17% para 67%.

A profundidade do substrato também é um fator determinante no desempenho de retenção, assim como mostrado por Colli et al. (2010). Em simulações com diferentes profundidades de substrato, variando entre 15 a 34cm, encontraram coeficientes de escoamento entre 0,37 a 0,13, respectivamente, sob as mesmas condições de análise.

O tipo de vegetação utilizada no telhado tem influência sobre a capacidade de retenção de água, uma vez que o processo de interceptação e evapotranspiração varia individualmente dependendo da espécie e das condições ambientais (RAZZAGHMANESH; BEECHAM, 2014). Vegetações com características de maiores taxas de evapotranspiração, proporcionarão um aumento da absorção de águas pluviais (GSA, 2011). Para a espécie *Sedum moss*, por exemplo, avaliada por Villarreal; Bengtsson (2005) em um telhado de 4cm de espessura, um balanço hídrico anual determinou uma taxa média de evapotranspiração em torno de 46%. Wadzuk et al. (2013) em um experimento realizado na Pensilvânia, quantificaram durante um período de 3 anos a evapotranspiração anual em um telhado verde extensivo, com a utilização de um lisímetro de pesagem. Dos volumes anuais precipitados, as taxas de

evapotranspiração foram de 68,1% (2009), 87,8% (2010) e 72,5% (2011). Arboit (2017) em um estudo avaliando a evapotranspiração com *Sedum rupestre* em condições de campo com clima temperado, encontrou uma taxa média de 2,6mm/dia, atingindo a cifra máxima de 3,0mm/dia para o verão. Feng; Burian; Pardy (2018) avaliando espécie *Sedum* e grama com utilização de lisímetro, chegaram a valores médios anuais de 2.52 e 2.69 mm/dia, respectivamente. Plantas como do tipo suculentas apresentam também uma resistência maior quando, eventualmente, submetidas a um estresse hídrico (VILLARREAL; BENGTTSSON, 2005).

Com relação ao fator de declividade dos telhados, algumas pesquisas mostram que quanto menor a inclinação, maior será capacidade de retenção de água. O efeito da declividade se combina com o efeito de outros fatores como as propriedades físicas do solo, volume e intensidade das precipitações, condições de fluxo (saturado ou insaturado), e composição da camada de drenagem (BERNDTSSON, 2010). Moruzzi; Moura; Barbassa (2014) avaliando o desempenho de três diferentes inclinações para telhados verdes, encontrou que a soma das parcelas escoadas e percoladas apresentavam valores médios de 77% para a inclinação de 10%, e de 80% para inclinações de 20% e 30%. Colli et al. (2010) avaliando diferentes declividades para telhados verdes (0,5; 1 e 2%), para a mesma intensidade de chuva, verificou que o coeficiente se elevava à medida que se aumentava a declividade (0,06; 0,16 e 0,19). Para todos os testes, a elevação no coeficiente e escoamento foi maior quando passava de 0,5 para 1% de declividade, em comparação de 1% para 2%. Telhados com maior inclinação escoam a precipitação com maior rapidez e, tendenciosamente, pode-se criar um gradiente de umidade, onde a parte inferior do telhado fica tipicamente mais úmida do que o topo, conduzindo à necessidade de mudanças no sistema de drenagem e/ou a seleção de vegetação diferenciada (GSA, 2011). Bengtsson; Grahn; Olsson (2004) investigaram a influência da inclinação e o comprimento do telhado verde no pico de escoamento e concluíram que estes não influenciavam significativamente na distribuição de escoamento, sugerindo que a percolação vertical domine o processo de precipitação-escoamento. Fisicamente, os telhados verdes de maior declividade devem prever estruturas de contenção para evitar o carregamento de partículas de uma região para outra da estrutura.

Em termos numéricos, avaliando-se a capacidade de retenção global, enfatiza-se a importância do monitoramento a longo prazo, ou seja, medições completas de retenção cumulativa podem fornecer um indicador mais realista do desempenho de

um telhado verde ao longo da sua vida útil. Como relatado anteriormente, valores anuais de desempenho serão afetados pelas mudanças sazonais, natureza imprevisível dos eventos da chuva e alterações nas características dos telhados (SIMS, 2015; SIMS et al., 2016).

O Quadro 6 foi adaptado do trabalho de Sims (2015), e complementada com publicações nacionais, onde são apresentadas alguns exemplos de diferentes respostas para monitoramentos quantitativos de telhados verdes.

Quadro 6 - Estudos de desempenho na retenção de telhados verdes

Estudo	Retenção (%)	Localização	Monitoramento (Meses/Eventos)	Profundidade Substrato (mm)
<i>Moran, Hunt et al. (2005)</i>	63	North Carolina USA	18 (67)	70
<i>Mentens, Raes et al. (2006)</i>	27-81	Germany	12 – 48	20-150
<i>Voyde, Fassman et al. (2010)</i>	66	Auckland NZ	12 (91)	50-70
<i>Carpenter and Kaluvakolanu (2011)</i>	68.25	Michigan USA	6 (21)	101.6
<i>Stovin, Vesuviano et al. (2012)</i>	50.2	Sheffield UK	29 (468)	80
<i>Stovin, Vesuviano et al. (2012)</i>	30	Sheffield UK	29 (21)	80
<i>Fassman-Beck, Voyde et al. (2013)</i>	56	Auckland NZ	28 (396)	50-70
<i>Fassman-Beck, Voyde et al. (2013)</i>	39	Auckland NZ	14 (166)	100
<i>Fassman-Beck, Voyde et al. (2013)</i>	53	Auckland NZ	14 (166)	150
<i>Fassman-Beck, Voyde et al. (2013)</i>	57	Auckland NZ	8 (79)	100
<i>Bengtsson, Grahn et al. (2005)</i>	46.3	Sweden	18	30
<i>Gregoire and Clausen (2011)</i>	51.4	Connecticut USA	12 (97)	102
<i>VanWoert, Rowe et al. (2005)</i>	60.6	Michigan USA	14 (83)	25
<i>Hutchinson, Abrams et al. (2003)</i>	69	Oregon USA	12	120
<i>Liu and Minor (2005)</i>	57	Toronto Canada	20	100
<i>Carter and Rasmussen (2006)</i>	62.5	Georgia USA	12 (31)	76.2
<i>Zhang et al. (2011)</i>	77,2	Yubei, Chongqing, China	8 (19)	150
<i>Tassi, et al. (2014)</i>	60	Santa Maria - RS	17 (43)	100

Fonte: Adaptado de Sims (2015).

2.4 DESEMPENHO DE TELHADOS VERDES EM DIFERENTES ESCALAS

Os planejamentos e estudos ambientais classificam e ordenam o meio utilizando-se de métodos que dividem ou integram um dado espaço físico. Trabalham as informações em diferentes graus de organização e complexidade, estudando-os

como um sistema completo. Dessa maneira, cada abordagem tem um aprofundamento e uma integração com seus componentes e fenômenos atuantes, e corresponde a uma representação da dimensão espacial e temporal das informações sobre o meio, ou seja, apresenta uma escala (ANDRADE, 2016).

Preponderantemente, nos estudos hidrológicos os fenômenos são avaliados em escala micro. Isso se deve muito pela dificuldade e a inviabilidade de se criar experimentos de grande escala ou, até mesmo de avaliar o seu efeito em termos de aumento gradual no espaço. Na maioria das situações, o que se observa é o monitoramento em pequena escala e, a partir da calibração de algum modelo conceitual ou empírico, sua aplicação em escalas finitamente superiores.

Grande parte da literatura enfoca nas simulações dos efeitos hidrológicos em escala local, contemplando as distintas abordagens de DBI. No entanto, essas sínteses destacam explicitamente a necessidade emergente de se desenvolver pesquisas que escalonem os efeitos das práticas daqueles medidos e modelados em escalas locais para um âmbito de múltiplas escalas espaciais. Isso é de considerável importância para o que se refere ao gerenciamento e obtenção de resultados específicos, como a manutenção do fluxo de base, minimização das condições de pico e fluxo de poluentes (GOLDEN; HOGHOOGHI, 2018).

Isso se replica ao monitoramento de telhados verdes. As pesquisas realizadas para avaliação de algum efeito em escala regional, utilizam dados avaliados de uma estrutura individual e de escala qualquer, sem atentar-se especificamente ao impacto do tamanho do telhado e o papel da área de drenagem nas características do escoamento (HAKIMDAVAR et al., 2014). Tipicamente, são construídas superfícies experimentais de telhados verdes, com tamanho reduzido para avaliar continuamente o escoamento e precipitação em curtos períodos de tempo (não superior a 3 anos) (VERSINI et al., 2015). A partir disso, os dados coletados são utilizados em modelos conceituais ou empíricos para reproduzir seus resultados em escalas maiores, a exemplo de uma bacia hidrográfica.

Isso pode ser observado no trabalho de Versini et al. (2015), que utilizou resultados experimentais em pequena escala (telhado de 35m²), calibrando o modelo SWMS-2D, avaliando seus efeitos para uma escala de bacia urbana, variando respectivamente as proporções de cobertura de telhados verdes sobre as edificações. Nesse estudo, segundo o autor, os impactos estimados na escala do telhado podem

se aproximar globalmente daqueles esperados na escala da bacia para um grande conjunto de eventos de precipitação usando um coeficiente de redução.

Apesar de bastante superficial, essa informação pode ser útil para se ter uma ideia da consequência do telhado verde na escala da bacia. Analogamente, Neto (2014) também avaliou o desempenho de telhados verdes na geração de escoamento, desde a escala de lote até uma bacia urbana completa, partindo de um modelo calibrado por dados de monitoramento em um telhado verde extensivo de 12m².

São bastante inconclusivas as informações disponíveis dentro do âmbito de avaliação de diferentes escalas de telhados verdes no que concerne às respostas hidrológicas. Poucos estudos foram encontrados na literatura no sentido de avaliar os possíveis efeitos. Hakimdavar et al. (2014) tentando suprir essa lacuna, compararam três diferentes tamanhos de telhados verdes com composições idênticas (310m², 99m² e 0.09m²), avaliando a capacidade de retenção, volume do pico da precipitação e o pico do escoamento. Para telhados de maiores proporções, o volume do pico foi menor em comparação a telhados de menor tamanho, especialmente para eventos de até 40mm. Com relação a capacidade de retenção total, não foram observados efeitos em função do aumento da área de drenagem.

Existe uma clara necessidade de se compreender como ocorre a agregação de processos complexos e espacialmente heterogêneos e quantificar seus efeitos em pequenas escalas espaciais às mais amplas, como ecossistemas e bacias hidrográficas (GOLDEN; HOGHOOGHI, 2018). Avaliar a eficiência e o comportamento de telhados verdes para diferentes áreas de drenagem é um passo valioso para determinar a sua aplicação como um elemento de gestão de águas pluviais em escala global (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017). Torna-se imprescindível conhecer o seu comportamento como forma de subsidiar a gestão das águas pluviais, e como estes podem ser incorporados em um plano de gerenciamento em uma bacia hidrográfica urbanizada. As investigações em uma variedade de escalas espaciais de telhados individuais podem fornecer uma orientação abrangente e maneiras eficazes de estabelecer telhados verdes em escala de bacia (CARTER; JACKSON, 2007).

Diante da contextualização e frente à escassez de informações e resultados, o presente trabalho visa elucidar e preencher algumas lacunas referentes ao comportamento hidrológico de telhados verdes em diferentes escalas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Em atendimento aos objetivos propostos, foi construído um sistema experimental de telhados verdes extensivos contendo quatro unidades de composição idêntica, diferindo apenas na área de drenagem. Cada um destes telhados verdes teve as variáveis hidrológicas monitoradas, de forma a permitir avaliar aspectos como a retenção, estimativa de evapotranspiração, redução da vazão de pico e tempo de concentração. O tratamento dos dados possibilitou avaliar a diferença no comportamento hidrológico dos telhados verdes nas diferentes escalas, e também o comportamento de um mesmo telhado verde frente aos diferentes eventos chuvosos.

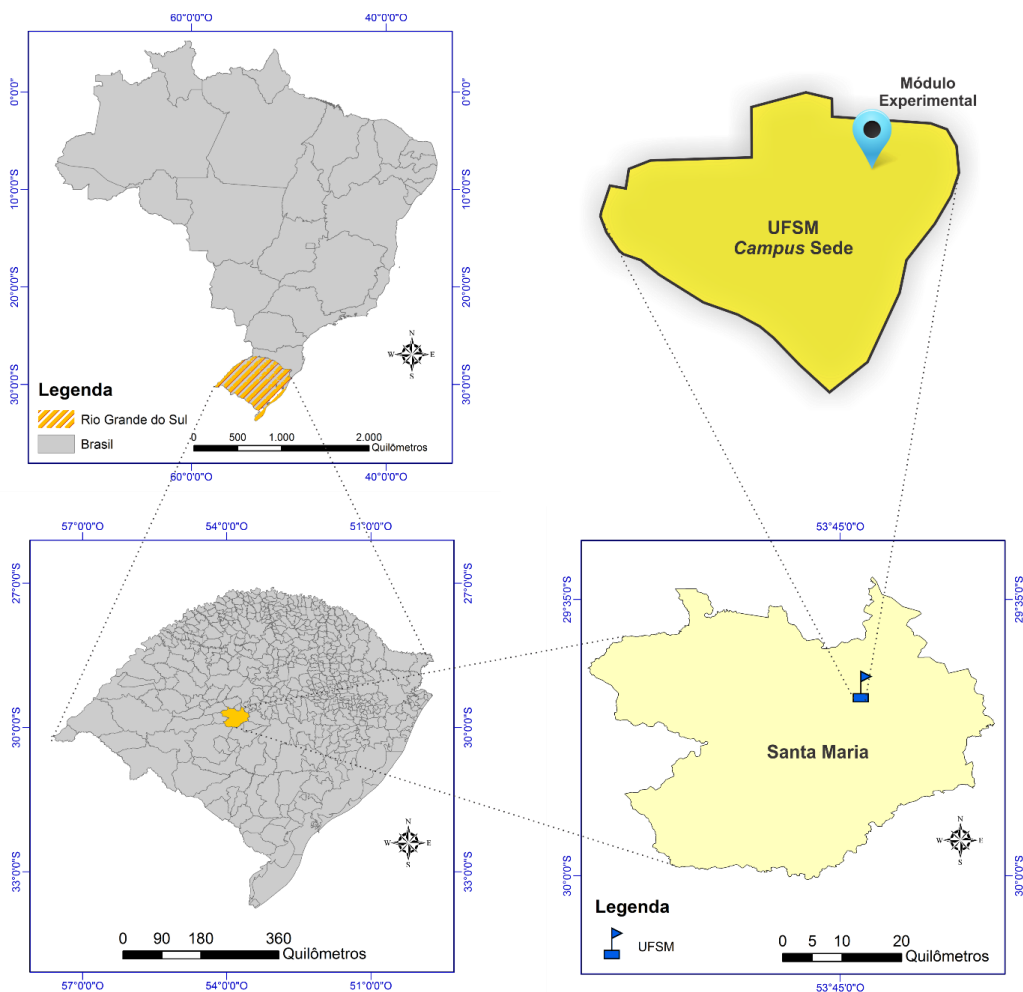
Uma descrição das unidades experimentais, sistema de monitoramento e tratamento de dados, e demais procedimentos metodológicos, é apresentada na sequência.

3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

Os quatro telhados verdes de diferentes escalas foram implantados em uma área aberta, em local experimental nas dependências do Campus Sede, Cidade Universitária, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O local está situado nas coordenadas geográficas de latitude 29° 42' 48" S e longitude 53° 43' 07" O, e é destinado a pesquisas com telhados verdes além de outras estruturas do tipo LID. A localização esquemática pode ser observada na Figura 9.

O Campus Sede, Cidade Universitária, bem como a área experimental, está localizado no município de Santa Maria, região central do Estado do Rio Grande do Sul. Nesta região o clima é mesotérmico brando Cfa (temperado quente), apresentando como características invernos frios, com temperatura média do mês mais frio entre 13°C e 15°C e média das mínimas entre 8°C e 10°C. Os verões são quentes, com temperatura média do mês mais quente superior a 24°C, média das máximas variando entre 28°C e 32°C e as máximas absolutas oscilando entorno dos 39°C. As temperaturas médias anuais situam-se entre 16°C e 20°C. As precipitações são regulares durante todo o ano, não apresentando estação tipicamente seca, com índices pluviométricos anuais entre 1.500 mm e 1.600 mm. Os ventos predominantes são de leste e sudeste (LÖBLER; SCCOTI; WERLANG, 2015).

Figura 9 - Localização do módulo experimental.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No local de instalação do experimento, e nas imediações, há a predominância de vegetação rasteira e algumas árvores exóticas do gênero *Eucalyptus*, bem como, construções de madeira e alvenaria. Em função da disposição do experimento e devido às construções do entorno, em alguns momentos do dia ocorre o sombreamento sobre os telhados, principalmente no período da manhã, ao nascer do sol. O sombreamento é uniforme sobre todas as estruturas. A área experimental é totalmente cercada para evitar a aproximação de pessoas ou animais que possam prejudicar o correto andamento das pesquisas desenvolvidas in situ.

3.2 MÓDULOS EXPERIMENTAIS DE TELHADOS VERDES EXTENSIVOS

No local destinado ao experimento, foram construídos quatro módulos experimentais de telhados verdes extensivos com diferentes tamanhos: 1m² (TV1), 3m² (TV3), 6m² (TV6) e 12m² (TV12).

Os quatro telhados são idênticos em termos de composição física (sistema de drenagem, espessura e tipo de substrato, cobertura vegetal), variando entre si apenas a área superficial (em planta). Para instalação das quatro unidades experimentais, foram utilizadas seis componentes: estrutura do telhado, impermeabilização, camada de drenagem, membrana geotêxtil, camada de substrato e a vegetação.

O processo construtivo, as etapas e o material empregado para todos os telhados foi igualmente idêntico (Figura 10). Iniciou-se com a montagem das estruturas com utilização de madeira apropriada para construção civil. A superfície de instalação dos telhados verdes foi executada com borda lateral interna com altura de 15 cm, que garante a sustentação das diferentes camadas do telhado verde, formando uma espécie de caixa. A declividade da superfície foi de 1%, com convergência da extremidade até os drenos, instalados junto ao fundo do sistema. Os drenos permitem a retirada do volume excedente do escoamento em cada unidade de telhado verde. A elevação dos telhados a partir do solo é de aproximadamente 2 m.

Após a montagem da estrutura, procedeu-se com a impermeabilização para proteger e evitar qualquer tipo de infiltração, ou eventual perda de água. O material empregado nesta etapa foi o plástico de estufa de 250 micras, em camada dupla - o uso deste material baseou-se no sucesso obtido em experiências prévias, critérios econômicos e facilidade de aplicação.

Após a etapa de impermeabilização, foi inserida a camada de drenagem, constituída por um geocomposto de nome comercial MacDrain®2L². Esse geocomposto tem espessura de 10mm e largura de 2m, e é constituído de filamentos de polipropileno termosoldados contendo dois filtros geotêxteis em seus dois lados e núcleo drenante, formando uma geomanta tridimensional com 90% de vazios (Macaferri, 2013). Testes preliminares realizados em laboratório, indicaram uma capacidade de retenção do geocomposto de 2,8mm/m².

² Parte do material utilizado foi doado gentilmente pela Empresa Macaferri do Brasil Ltda.

Sobrepondo toda a extensão da camada de drenagem, cada telhado foi coberto por um geotêxtil do tipo Bidim-RT07 fabricada em filamentos contínuos de poliéster. O objetivo é evitar o carreamento de partículas do substrato para as camadas inferiores, especialmente entre as aproximações do geocomposto e a borda dos telhados verdes, promovendo proteção adicional também com relação ao acesso invasivo de raízes.

Figura 10 - Processo de construção dos telhados verdes: A – estrutura do telhado; B – impermeabilização e camada de drenagem; C – geocomposto; D – colocação do substrato; E – plantio das mudas; F – vegetação no início do monitoramento.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A camada de substrato foi composta unicamente por solo, proveniente de região próxima ao experimento na profundidade de 100mm. Uma amostra de aproximadamente 300g foi submetida a análise físico-química para determinar a sua composição. Fisicamente, o substrato foi classificado, segundo parametrização da ROLAS³, como franco argiloso, cuja composição concentra 20, 38 e 42% de silte, areia e argila, respectivamente. O laudo completo consta em Anexo.

Por fim, os módulos experimentais receberam a cobertura vegetal. A espécie utilizada nos telhados foi o *Sedum rupestre*, devido a estudos prévios no local, que demonstraram que esta espécie teve capacidade de resistir e adaptar-se frente a períodos de estresse hídrico. A região de estudo não apresenta sazonalidade pluviométrica marcada, porém, ocasionalmente, podem ocorrer períodos de intenso calor e seca durante o verão; da mesma forma, durante o inverno as temperaturas baixas, somadas à presença comum de geada na região demandam o uso de espécies mais resistentes como coberturas verdes. Além disso, o gênero *Sedum* é o mais utilizado em telhados verdes em pesquisas científicas em todo o mundo, sobretudo na Europa, o que permitirá a realização de análises comparativas dos resultados desta pesquisa.

Em uma fase anterior ao plantio, as mudas foram produzidas pelo método de estaquias em um viveiro do setor de paisagismo da universidade (Figura 11) em Fevereiro/2017 e, após 4 meses, foi realizado seu transplântio para as unidades experimentais.

O transplântio das mudas sobre os telhados foi realizado de forma manual, inicialmente na proporção de 10 unidades para uma superfície de 30 por 30 cm ($\cong 112 \text{un/m}^2$), igualmente espaçadas. No sentido de garantir uma melhor uniformidade geral da vegetação, durante o período de crescimento e adaptação, os espaços vazios foram completados gradualmente com novos espécimes até atingir uma densidade aproximada de 220 un/m². Logo após o período de transplântio e ao longo do seu crescimento, as plantas foram rotineiramente irrigadas para promover uma melhor adaptação e acelerar o seu desenvolvimento.

³ Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e de Tecido Vegetal dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

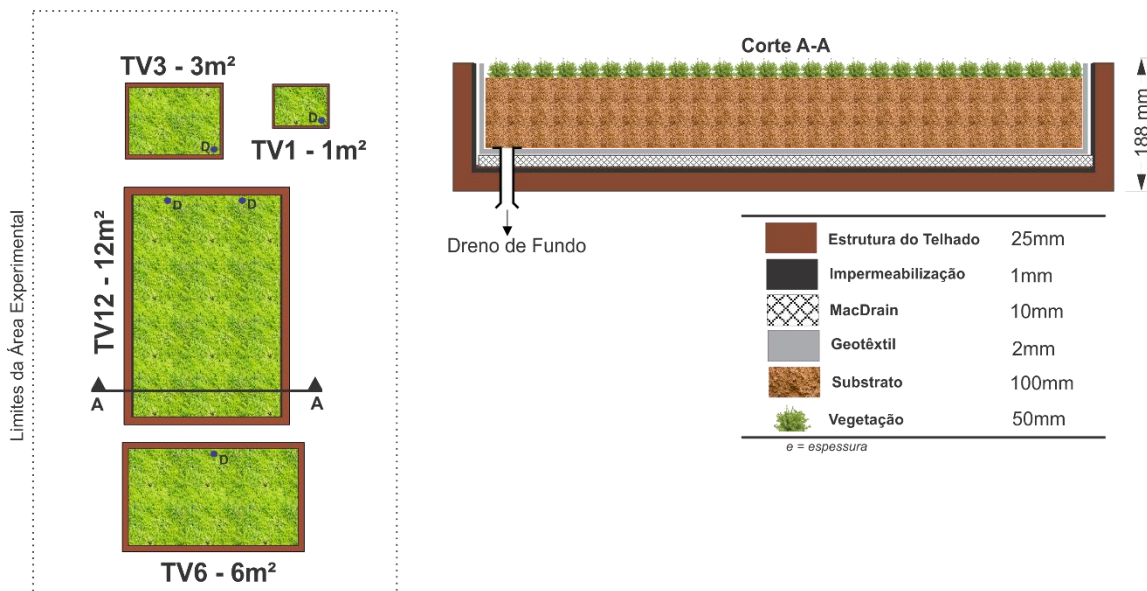
Figura 11 - *Sedum rupestre* produzido no viveiro



Fonte: Acervo Próprio.

A disposição final das quatro unidades de telhado verde, com um esquema em corte transversal e vista superior das estruturas pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 - Planta Baixa e Corte Transversal do Telhado. Sem Escala



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para proporcionar a saída do excesso de água proveniente da precipitação, cada telhado foi munido de drenos de fundo, confeccionados com tubos de PVC de diâmetro de 100mm, e conectados a reservatórios localizados na parte inferior das

estruturas. O volume dos reservatórios foi determinado a partir do volume de chuva que tem 10 anos de período de recorrência e duração de 5 minutos gerado na região, e obtido a partir da equação IDF (intensidade-duração-frequência) de Santa Maria proposta por Roman (2015). A Tabela 1 apresenta um resumo dos volumes dos reservatórios utilizados em cada telhado verde.

Tabela 1 - Volume dos reservatórios em cada telhado verde

Telhado	Área superficial (m²)	Volume Reservatórios
TV1	1	1un x 200L
TV3	3	1un x 200L
TV6	6	1un x 500L
TV12	12	2un x 500L

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3 SISTEMA DE MONITORAMENTO

O monitoramento consistiu na obtenção do volume escoado a partir de cada unidade de telhado verde e da precipitação incidente (chuva efetiva), diretamente no local do experimento. Dados de outras variáveis climatológicas foram obtidos pela estação meteorológica do INMET (INMET-A803) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distante aproximadamente 1,5km da área experimental.

O monitoramento da precipitação foi realizado com um pluviógrafo do tipo basculante da marca comercial Solar sobre o telhado TV12 (Figura 13), com precisão de medida de 0,2mm e intervalo de leitura de 5 segundos. Também foi instalado um pluviômetro individual em cada um dos telhados, de forma a complementar o monitoramento. Os pluviômetros utilizados são da marca São Izidro, fabricados com polipropileno e nylon, abertura de 100mm, precisão de 1mm e capacidade total de medição de 140mm. Após cada evento de chuva, as leituras foram realizadas manualmente em todos os dispositivos.

Figura 13 - Pluviógrafo e pluviômetros instalados sobre os telhados.



Fonte: Acervo próprio.

Para o monitoramento do escoamento nos telhados, cada reservatório foi munido de 1 (um) sensor de ultrassom que monitorava o nível de água ao longo do tempo. O intervalo temporal de leitura adotado foi 5 segundos. Os dados foram gravados em um *datalogger* para posterior download. Para todos os reservatórios elencados foi realizada uma cubagem e construída a curva de cota/volume. Dessa forma, a leitura de nível foi convertida em volume ao longo do tempo. Após cada evento de chuva, também foi realizada a leitura manual da cota do nível de água em cada reservatório para determinação do volume total escoado, de forma a permitir a análise de consistência e aferição das medidas, entre dados monitorados pelo sensor e os volumes obtidos manualmente.

Com relação ao sensor, o mesmo teve um desenvolvimento independente e teve suas características adaptadas exclusivamente para o presente estudo, constituindo-se um desafio no monitoramento. A opção por desenvolver um sensor ao invés de utilizar alguma opção do mercado, se deu em função da inviabilidade financeira das opções comerciais, nível de sensibilidade disponível bastante aquém da necessidade e a baixa autonomia dos sistemas em termos de armazenamento das leituras. Dessa forma, optou-se por desenvolver uma alternativa que suprisse todas as demandas e que reduzisse significativamente os custos de aquisição e implantação.

Depois de exaustiva pesquisa no mercado, como já mencionado, optou-se por um sistema de sensores de ultrassom de baixo custo e concebido na plataforma microcontroladora Arduino Uno rev. 3, a qual é responsável pelo controle de um

circuito eletrônico capaz de coletar e armazenar dados em um dispositivo de memória flash (sd card), e um sensor ultrassônico de baixo custo (HC-SR04) responsável pela leitura do nível de água dentro do reservatório. As etapas de desenvolvimento, os sistemas utilizados, as características dos componentes, a calibração e a validação da plataforma podem ser consultados nas publicações de Minetto (2018).

Para avaliação do efeito de bordadura e estabelecimento vegetal, em uma frequência quinzenal, foi realizado o registro fotográfico de cada telhado com auxílio de uma câmera digital da marca Samsung® com 16MP de resolução. As imagens eram tomadas sempre na mesma posição, aproximadamente a 60cm de altura a partir da cobertura vegetal, em um ângulo que permitisse enquadrar a visualização de todo o telhado. Eram registradas preferencialmente em horários onde houvesse o menor sombreamento possível, para melhor luminosidade.

Cabe ressaltar que após cada evento de chuva, era feita uma inspeção visual no experimento para detectar eventuais anomalias que pudessem interferir nos resultados, como infiltrações e vazamentos. Caso alguma incoerência fosse encontrada, os dados eram descartados e a devida manutenção realizada. Rotineiramente também eram feitas campanhas de manutenção nos telhados e no entorno, retirando sujeiras, vegetação invasora, corte de grama, fixação dos drenos, nivelamento dos reservatórios, entre outros, de forma a mediar um correto monitoramento e evitar qualquer interferência externa.

Para melhor entendimento dos processos hidrológicos nos telhados verdes, também foram utilizadas informações da estação climatológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As variáveis de temperatura, umidade, velocidade do vento, radiação e precipitação foram obtidas por download diretamente do acervo digital. Os dados disponibilizados no sistema correspondem aos registros da estação automática A-803, localizada a aproximadamente 1,5 km da área experimental. Como comentado anteriormente, a precipitação foi monitorada in loco, contudo quando da impossibilidade de medições ou na ocorrência de falhas, recorreu-se aos dados do INMET. Nesta estação, os registros são feitos em altura padrão, com exceção da medição de velocidade do vento que é realizada a 10 metros de altura. As variáveis climatológicas computadas e as características dos equipamentos de medição podem ser observadas no Quadro 7.

As informações são disponibilizadas no site do INMET em períodos horários. Para a caracterização climatológica em escala de tempo diária, mensal e sazonal, a

conversão foi realizada por meio da média horária, com exceção da radiação solar global e precipitação, a qual teve os valores horários somados, resultando na radiação solar total incidente e precipitação total.

Esse tratamento levou à obtenção das seguintes variáveis em um intervalo de tempo mensal e sazonal: Temperatura máxima média ($T_{Máx\ Média}$); Temperatura mínima média ($T_{Mín\ Média}$); Temperatura média ($T_{Média}$); Umidade relativa do ar máxima média ($UR_{Máx\ Média}$); Umidade relativa do ar mínima média ($UR_{Mín\ Média}$); Umidade relativa do ar média ($UR_{Média}$); Velocidade do vento média ($Vv_{Média}$); Radiação solar global (Rad) e Precipitação (P).

Quadro 7 - Variáveis climatológicas e características dos instrumentos de medição da estação do INMET

Variáveis Climatológicas	Instrumentos de medição	Modelo/Marca	Intervalo de medição (s)	Altura acima do solo (m)
Temperatura do ar (máxima e mínima)	Termômetro	QMT102/Vaisala	5	1,80
Umidade relativa do ar (máxima e mínima)	Higrômetro	QMH101/Vaisala	5	1,80
Radiação solar global	Piranômetro	CM6B/Kipp & Zonen	5	1,50
Velocidade do vento	Sônico	1405-PK-021/Gill Instruments	-	10,00
Precipitação	Pluviômetro	QMR102/Vaisala	10	1.50

Fonte: Elaborado pelo Autor, com base nas informações fornecidas pelo INMET.

3.4 TRATAMENTO DE DADOS

O período de monitoramento se deu entre 01/novembro/2017 (dia 1) a 31/outubro/2018 (dia 365). A leitura dos dados monitorados era realizada após cada evento de chuva, e os valores organizados em uma planilha eletrônica.

3.4.1 Dados de precipitação

De forma a dar melhor clareza aos termos utilizados, nesse estudo optou-se por utilizar a palavra “precipitação” ao invés de simplesmente “chuva”. Dessa forma, o mesmo faz referência a toda forma de água que incidiu sobre os telhados (geada,

orvalho, umidade condensada, etc.) e foi fruto de monitoramento pelos pluviômetros e/ou pluviógrafo.

Após cada evento de precipitação, fez-se a leitura do volume captado pelos pluviômetros e pelo pluviógrafo. Nesse processo foram descartados os volumes abaixo de 1mm (em função da precisão dos pluviômetros), quando havia suspeita de vazamentos e obstruções no sistema de medição, demora na medição do evento por parte do observador e eventos com indicativo de inconsistência nos registros.

Em função da variabilidade espacial da precipitação observada na área experimental, e para facilitar as análises, optou-se por utilizar uma precipitação média comum a todos os telhados (precipitação média consistida - $P_{MédC}$). Como critério de determinação foi utilizada a média aritmética entre as leituras dos quatro pluviômetros, em razão da proximidade destes.

Cada evento foi caracterizado de acordo com o seu volume, e a sua duração foi computada como sendo o período de tempo transcorrido entre o início e o fim da chuva. Para obtenção dessa variável, utilizou-se as leituras realizadas pelo pluviógrafo, e quando esse apresentou alguma inconsistência nos registros, foram utilizados os dados fornecidos pela estação do INMET. Para essa caracterização, optou-se por empregar a grandeza temporal horária, uma vez que os dados da estação são fornecidos apenas nessa dimensão.

A partir da relação entre volume e duração da chuva foi determinado a intensidade média de cada evento. O volume máximo precipitado para 1h de duração também foi obtido.

Os totais precipitados em cada evento também foram classificados com relação ao seu volume, tempo de recorrência e mecanismo principal formador de precipitação (frontal ou convectiva).

Os volumes foram classificados como sendo baixos quando a precipitação total foi igual ou inferior a 20mm ($P_{MédC} \leq 20\text{mm}$); médios para volumes compreendidos entre 20mm e 40mm ($20\text{mm} < P_{MédC} \leq 40\text{mm}$) e altos para volumes superiores a 40mm ($P_{MédC} > 40\text{mm}$) (HAKIMDAVAR et al., 2014).

Para determinação do tempo de recorrência utilizou-se a IDF de Santa Maria – RS, descrito em Roman (2015) e apresentando na Equação (1).

$$I = \frac{807,801.TR^{0.1632}}{(t+8,76)^{0.7528}} \quad (1)$$

Sendo:

TR o período de recorrência do evento de precipitação (anos);

t a duração do evento de chuva (min);

I a intensidade do evento de chuva (mm/h);

Com relação ao mecanismo formador, características como as durações, intensidades médias e o volume máximo precipitado em 1 hora, foram analisadas para classificar os eventos em precipitações do tipo convectiva ou frontal. Para tal, nesse estudo pareceu razoável considerar apenas o volume máximo precipitado em 1h para tal classificação. Dessa forma, foi convencionado como sendo do sistema convectivo quando o volume máximo precipitado em 1h foi acima de 12,5mm, considerado um volume razoável e elevado quando comparado a maioria dos eventos.

3.4.2 Dados de escoamento

O monitoramento do nível da água escoado para o interior dos reservatórios instalados sob cada unidade experimental de telhado verde permitiu determinar os volumes escoados ao longo do tempo, por meio da relação cota e volume de cada reservatório. Essa informação permitiu avaliar como cada unidade de telhado verde atuou no controle do escoamento durante o evento chuvoso e qual foi o efeito produzido no armazenamento, redução do pico de vazão, atraso na geração de escoamento, tempo ao pico, entre outros.

Para isso, o controle do volume do escoamento pluvial em cada módulo de telhado verde foi realizado a partir da determinação do coeficiente de escoamento (CE), obtenção do volume de água retido (armazenado) em cada unidade e a porcentagem de retenção. O coeficiente de escoamento superficial foi obtido pela relação entre o volume total escoado e o precipitado. Os valores de CE variam numericamente entre 0 e 1, sendo que valores mais baixos indicam uma maior capacidade de retenção de água no telhado. O volume de água retido nos telhados verdes foi obtido por meio de um balanço hídrico simplificado, considerando a diferença entre o volume total de chuva incidente em cada unidade de telhado verde e o volume drenado para o interior dos reservatórios, conforme equação 2. Para esse cálculo, desprezou-se as perdas de água por evapotranspiração durante o evento.

$$V_{Ret} = V_{Prec} - V_{Dren} \quad (2)$$

Sendo:

V_{Ret} : volume de água retido no telhado (L ou mm)

V_{Prec} : volume de precipitação total incidente no telhado (L ou mm)

V_{Esc} : volume drenado para os reservatórios (L ou mm)

De forma análoga, as porcentagens de retenção em cada telhado foram calculadas conforme equação 3.

$$Retenção (\%) = \frac{V_{Prec} - V_{Dren}}{V_{Prec}} * 100 \quad (3)$$

Sendo:

V_{Prec} : volume de precipitação total incidente no telhado (L ou mm)

V_{Esc} : volume drenado para os reservatórios (L ou mm)

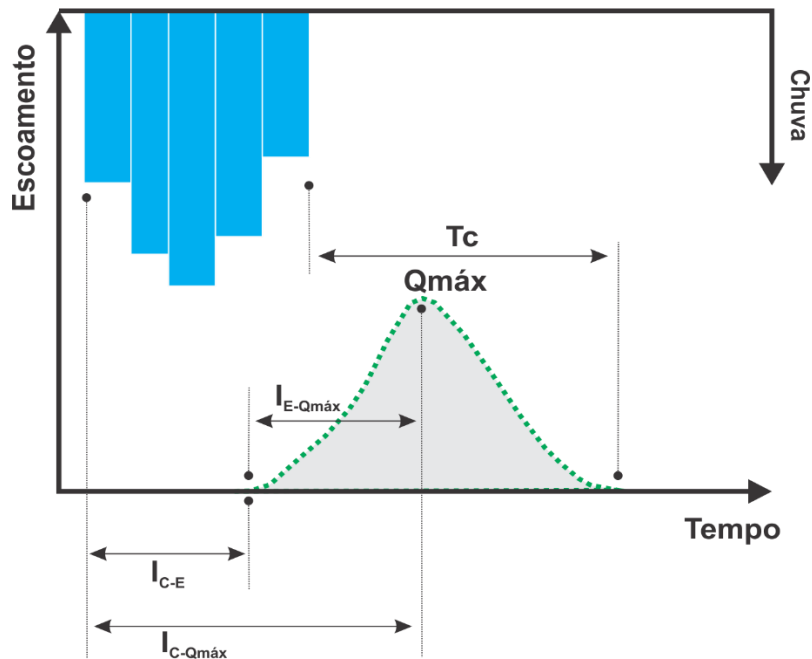
Os dados oriundos do monitoramento também foram organizados de maneira a identificar a condição de umidade do substrato em situação anterior a cada evento chuvoso. Essa informação foi utilizada para caracterizar a disponibilidade de água no substrato e sua capacidade de interferir no maior ou menor armazenamento de água durante o evento chuvoso (TASSI et al., 2014).

A determinação da disponibilidade de água no substrato, se deu de duas maneiras. A primeira faz referência à umidade antecedente (UAS) antes de cada evento de chuva, seguindo a metodologia preconizada pelo SCS (1971). A UAS foi determinada identificando-se o volume precipitado acumulado nos cinco dias (P5) que antecederam cada evento chuvoso monitorado, utilizando os seguintes valores de referência para culturas estabelecidas (SCS, 1971): UAS = I para $P5 \leq 13\text{mm}$; UAS = II para $13\text{mm} < P5 \leq 28\text{mm}$; e UAS = III para $P5 > 28\text{mm}$. A segunda faz referência à quantidade de dias secos antecedentes a um determinado evento, ou seja, quantidade de dias sem precipitação precedentes a um novo evento. Essa alternativa foi preconizada baseando-se na premissa de que após cessado a precipitação, os telhados iniciam o processo de perda de água para o sistema por meio da evapotranspiração, levando a uma recuperação da capacidade de armazenamento.

A partir do monitoramento nos reservatórios, além dos volumes escoados e retidos, foram determinados os hidrogramas para cada evento de chuva. Essa análise permitiu avaliar a resposta hidrológica dos telhados verdes com diferentes escalas com relação ao: tempo entre o início da chuva até o início do escoamento (I_{C-E}), tempo entre o início do escoamento até a vazão máxima ($I_{E-Q_{máx}}$), o tempo de início de chuva até a vazão máxima ($I_{C-Q_{máx}}$) e possíveis diferenças nas vazões máximas ($Q_{máx}$). O tempo de concentração (T_c) foi determinado como sendo o tempo entre o fim da chuva e o fim do escoamento. Esquemáticamente, essas características dos eventos podem ser observadas na Figura 14. Como mencionado na seção 3.3, o intervalo entre leituras dos sensores foi de 5 segundos. Porém, isso adicionalmente se tornou um desafio para o monitoramento, devido ao elevado nível de precisão e pequena discretização temporal. Para mostrar o nível de importância e sensibilidade da precisão e da escala de tempo utilizada nas análises, foram obtidas as variáveis dos hidrogramas a partir de duas escalas de tempo: 5 segundos e 30 minutos. A partir disso, os tempos mencionados foram obtidos e suas diferenças analisadas.

Apenas para fins ilustrativos, foram apresentados os traçados dos hidrogramas e hietogramas com discretização temporal de 30 minutos, definida como melhor duração, após uma série de análises preliminares. Também foram construídas curvas relacionando a porcentagem do volume acumulado de chuva e a porcentagem do acumulado de escoamento.

Figura 14 - Caracterização dos hidrogramas em cada telhado



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os dados de escoamento e retenção foram, ainda, divididos em dois conjuntos de dados – Grupo A e Grupo B. O Grupo A (GA) foi formado pelos dados de todos os eventos, ou seja, eventos que geraram e não geraram escoamento (escoamento ≥ 0). Em contrapartida, o Grupo B (GB) foi composto apenas pelos eventos que registraram escoamento acima de zero (escoamento > 0). Ambos os conjuntos foram analisados por meio de estatística descritiva e suas diferenças foram avaliadas por meio da ANOVA unidirecional com nível de significância de 5%. No relato dos resultados e para uma melhor visualização da informação e entendimento das variações, fez-se o uso de métodos gráficos, como de séries temporais e gráfico de caixas. Para todas as análises e visualizações foram utilizados os softwares Excel (versão 2016) e OriginLab8.

Para avaliar a influência de diferentes determinantes relacionados a precipitação no comportamento dos telhados verdes e o grau de associação na resposta do escoamento e retenção, foram realizadas análises de regressão simples (princípio da parcimônia), na tentativa de estabelecer equações preditivas com base nas informações do período de estudo. A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), considerando que quanto mais próximo de 1, mais influente é a variável na resposta.

Juntamente com as análises de regressão, uma análise de correlação, por meio da matriz de correlação de Spearman, com nível de significância de 5%, foi realizada para identificar possíveis relações na resposta do escoamento e retenção com as distintas variáveis. A correlação foi considerada fraca se o valor do coeficiente de correlação (ρ) era menor 0,5; moderada entre 0,5 e 0,8 e forte acima de 0,8.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MONITORAMENTO HIDROCLIMATOLÓGICO

4.1.1 Caracterização climática do período de monitoramento

O período de monitoramento foi de 1 ano (365 dias), de 01/novembro/2017 a 31/outubro/2018, contemplando assim todas as quatro estações do ano. Os Quadros A.1 e A.2 (Apêndice A) apresentam, juntamente com as normais climatológicas, as médias mensais das variáveis climáticas monitoradas durante o estudo e os acumulados de precipitação mensais.

Durante 8 meses do período de monitoramento (novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, abril, maio, julho e outubro) os volumes mensais precipitados estiveram abaixo da normal climatológica. Os meses com maior volume foram março (174,5mm) e setembro (158,5mm), correspondendo a um volume de 36% e 18% acima da média histórica, respectivamente. O volume total precipitado durante os 12 meses foi de 1552mm, 12% abaixo da média histórica.

Com relação às demais variáveis climatológicas, as menores temperaturas médias foram registradas nos meses de junho (12,14°C) e agosto (12,9°C), enquanto os maiores valores de temperatura ocorreram em dezembro (24,56°C) e janeiro (24,5°C). Valores máximos de umidade foram registradas nos meses de junho (88,51%) e julho (88,06%), e a maior quantidade de radiação solar recebida ocorreu em Janeiro (24,38 MJ/m².dia).

No Quadro A.2 são apresentadas as observações climáticas sazonais do período de estudo, bem como os volumes precipitados acumulados. Para a construção do mesmo, foram utilizadas as estações sazonais meteorológicas. Os maiores volumes precipitados foram no inverno (448,20mm) e na primavera (350,6mm). Com relação aos máximos e mínimos de temperatura, os valores foram de 24,78°C (Verão) e 12,81°C (Inverno).

4.1.2 Caracterização dos eventos de precipitação

Nessa seção, serão discutidos os eventos apenas sob o aspecto da precipitação. Com relação ao comportamento hidrológico dos telhados, foi dedicado uma seção independente (seção 4.2).

No período de 1 ano foram monitorados 73 eventos. Desse montante, 46 eventos (63%) não produziram escoamento, 21 (29%) tiveram escoamento aproveitável para fins de análise, e 6 (8%) eventos produziram extravasamento dos reservatórios de armazenamento não sendo, portanto, aproveitados para fins de análise da capacidade de retenção (Eventos Extravasados – EE).

A quantidade de eventos mensais monitorados no período variou de 3 a 9, sendo todos bem distribuídos ao longo dos meses. A Tabela 2 apresenta o número de eventos mensalmente monitorados e, também, ao longo das estações. O resumo total de registros (numerados em ordem cronológica) e suas características podem ser consultados na Tabela B.1 que consta no Apêndice B. Uma linha do tempo com a indicação dos dias em que foram registrados os eventos é apresentada no Apêndice C.

Tabela 2 - Resumo mensal da quantidade de eventos monitorados

Ano	Estação	Mês	Eventos Registrados	
			Com Escoamento*	Sem Escoamento
2017	Primavera	Novembro	0	5
	Verão	Dezembro	1	6
	Verão	Janeiro	3	6
		Fevereiro	2	5
Outono	Março	4	2	
	Abril	1(1)	3	
	Maio	3	2	
2018	Inverno	Junho	3 (1)	3
		Julho	4 (1)	4
	Primavera	Agosto	1	4
		Setembro	3 (2)	5
	Outubro	2 (1)	1	
		Total	27 (6)	46

*Os valores entre parênteses indicam quantidade de eventos extravasados

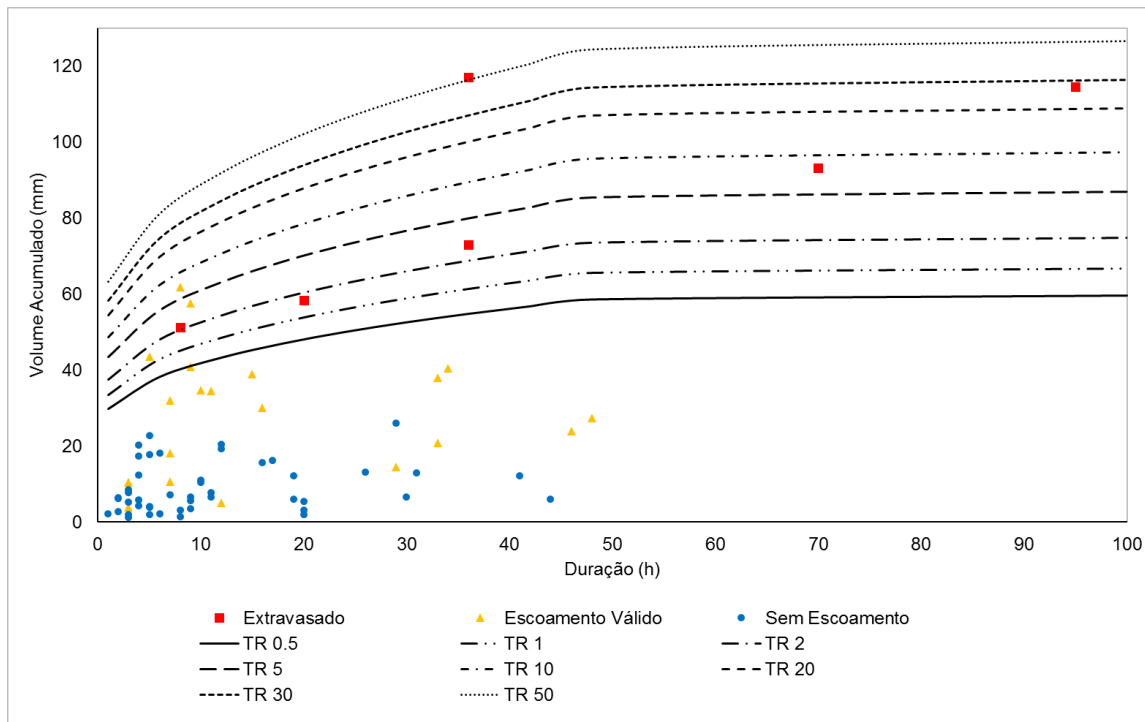
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme apresentado na seção 4.1.1, a precipitação acumulada no período de monitoramento foi de 1552mm (INMET). Desse total, um volume de 1013mm produziu resultados aproveitáveis para fins de análise. A diferença entre o volume ocorrido e monitorado deve-se a fatores como precipitações abaixo de 1mm (em função da precisão dos pluviômetros); detecção de vazamentos e obstruções no sistema; demora na medição do evento por parte do observador e eventos com alguma inconsistência nas medições. Para todos esses casos, os valores foram descartados e excluídos dos registros e análises. Da mesma forma, também foram excluídos das análises os volumes precipitados e escoados que foram monitorados, porém, produziram extravasamento dos reservatórios (Ex: eventos EE de número: 37; 49; 54; 63; 69 e 71).

O volume de precipitação dos eventos monitorados variou entre 1,2mm e 116,95mm, dos quais 49 eventos (67%) foram classificados como de baixos volumes, 13 eventos (18%) como médios e 11 eventos (15%) com volumes altos, conforme critério apresentado na seção 3.4.1. A duração das precipitações variou entre 1h e 95h (aproximadamente 4 dias).

O período de recorrência de cada evento foi determinado utilizando a relação IDF da cidade de Santa Maria, conforme descrito em 3.5.1, e o resultado é apresentado de forma gráfica na Figura 15, com a indicação de extravasamento, evento que produziu escoamento válido, ou evento que não produziu escoamento.

Figura 15 – Volume acumulado dos eventos de precipitação monitorados e sua relação com o período de recorrência em anos (TR)



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Conforme se observa na Figura 15, durante o período de monitoramento foram registrados dois eventos com período de recorrência elevados, de 30 e 50 anos aproximadamente, que totalizaram volumes de 114mm em 95horas e 116,95mm em 36h, respectivamente. Esses eventos produziram extravasamento dos reservatórios, que foram dimensionados para comportar o escoamento produzido por eventos com até 10 anos de período de recorrência.

Pode-se notar, ainda, que todos os eventos que não produziram escoamento tiveram um período de recorrência inferior a 0,5 ano (meio ano). Eventos que produziram escoamento, na sua maioria (17 eventos), apresentaram períodos de recorrência inferior a 0,5 ano, e 4 eventos tiveram tempo de recorrência superior a 0,5 até 10 anos. Sem considerar neste momento a eficiência na retenção dos volumes escoados, é possível verificar que, especialmente para eventos frequentes, os telhados verdes conseguem eliminar o escoamento superficial produzido.

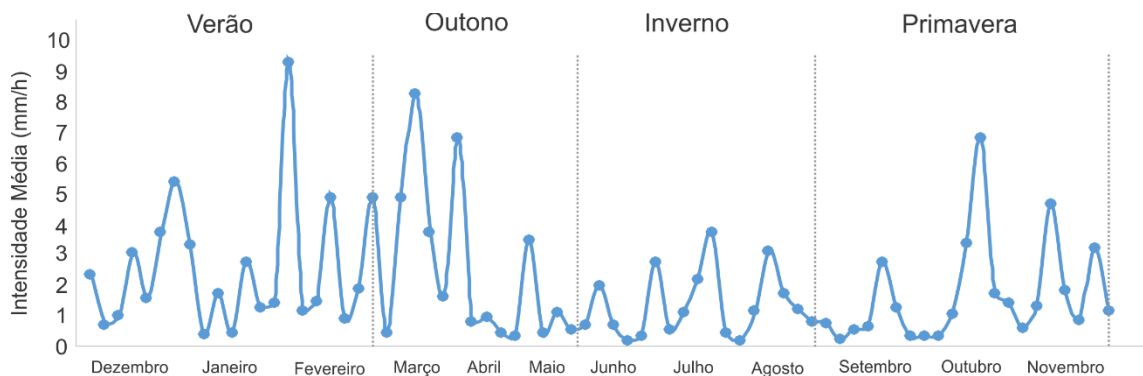
A investigação quanto à característica do tipo de mecanismo de formação de precipitação classificou 16 eventos como sendo do tipo convectiva, dos quais apenas 4 eventos extravasaram (TRs aproximados de 50, 10 e 2 anos). Os demais eventos

(57) foram classificados como do tipo frontal, com 2 extravasamentos (TRs aproximados de 5 e 30 anos).

Eventos de precipitação que não produziram escoamento, tiveram intensidade média que variou de 0,16mm/h a 5,05mm/h, com duração de 20h e 4h, respectivamente. Para os registros com escoamento, a intensidade média variou de 0,42mm/h a 8,71mm/h, com duração de 12h e 5h, respectivamente. Com relação ao máximo volume precipitado acumulado em 1h, a variação foi de 0,4mm a 46,2mm.

A Figura 16 ilustra as intensidades médias dos 73 eventos monitorados ao longo das diferentes estações. Observa-se uma redução das intensidades nos meses de abril a setembro, típico do período de outono e inverno, onde precipitações frontais são mais frequentes, caracterizadas pela longa duração e baixa intensidade.

Figura 16 – Intensidades médias de cada evento ao longo dos meses e estações



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2 COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DOS TELHADOS VERDES

Nesta seção são apresentados os resultados relacionados ao comportamento hidrológico dos telhados verdes monitorados, incluindo as análises gerais e individuais do efeito de escala dos quatro telhados experimentais na retenção do escoamento pluvial, uma análise da relação do comportamento dos telhados frente às diferentes características da precipitação e, finalmente, análises do comportamento mensal e sazonal. Para as análises foram considerados apenas os eventos com escoamento válido (67 eventos), ou seja, foram excluídos os eventos cujo volume precipitado superou a capacidade dos reservatórios (extravasaram).

4.2.1 Retenção do escoamento pluvial

Assim como apresentado na seção 3.4.2, a retenção foi avaliada sob o aspecto de dois conjuntos de dados, tomados e analisados a partir das observações de escoamento registradas: Grupo A (GA) retenção e escoamento para todos os eventos (escoamento ≥ 0) e Grupo B (GB) apenas para aqueles que registraram escoamento acima de zero (escoamento > 0).

4.2.1.1 Desempenho geral em longo prazo

Nessa seção são apresentados os resultados da efetividade média na retenção para todo o período monitorado. Considerando os volumes totais precipitados e monitorados ao longo dos 12 meses (1013mm), o TV12 reteve cerca de 730,24mm (72%), o TV3 reteve um volume de 646,1mm (64%), o TV6 e o TV1 com retenção de 594,85mm (59%) e 530,72mm (52%), respectivamente. Corroborando com o resultado encontrado, Harper et al. (2014) relatou valores bastante próximos, para dois telhados verdes com 10cm de espessura.

Quando avaliada a retenção média para os distintos grupos de dados, para o Grupo A, a retenção foi de 62%, com variação entre 52% e 72%. Valores desta magnitude corroboram com os trabalhos de Harper et al. (2014), que encontraram valores entre 40% e 60% para telhados vegetados e não vegetados; de Berndtsson (2010) que relatou retenções entre 45 e 78%; de Carpenter et al. (2016) que observaram 96,8% de retenção em precipitações de até 3mm, reduzindo 0,53% a cada 1mm adicional; de Driscoll et al. (2015), que reunindo estudos sobre 36 telhados verdes, relataram uma retenção média de 52%, com variações entre 35% e 85%; e Nawaz; McDonald; Postoyko (2015) que relataram valores entre 3,6% a 100%, com média de 66% de retenção. Quando avaliada a retenção média para o conjunto de dados do Grupo B, a efetividade foi de 37%, com variações entre 21% a 54%.

Verifica-se que a capacidade de retenção encontrada no presente estudo adentra-se confortavelmente aos valores relatados pela literatura. Porém, é difícil fazer uma comparação direta com outros estudos devido a diferenças entre a localização e os aspectos construtivos de cada telhado verde. A variabilidade dos resultados também se dá em função de fatores meteorológicos, como a ocorrência de precipitação anterior a um novo evento, volume e intensidade do evento, umidade relativa do ar e época do

ano. As propriedades particulares de cada estrutura fornecem uma fonte adicional de variação, como a capacidade de retenção de água do substrato, a vegetação, a inclinação e a idade do telhado. Todos esses aspectos afetam o desempenho nas reduções do escoamento (CARPENTER et al., 2016; HARPER et al., 2014), o que dificulta a comparação direta, mas fornece um indicativo de comportamento aproximado.

O volume máximo de precipitação que gerou escoamento sem superar a capacidade dos reservatórios foi de 61,75mm/m² (evento n°. 29). Melhores desempenhos na retenção foram observados sempre que os eventos ocorriam após alguns dias de seca, sendo que a média de dias sem precipitação entre os eventos monitorados foi de 4 dias. Dias antecedentes sem precipitação permitem que os telhados recuperem a capacidade de armazenamento, processo protagonizado pela evapotranspiração. Exemplos desse caso podem ser observados nos eventos de n°. 26 e 29, em comparação aos eventos 54 e 56. Mais detalhes da influência dos dias secos precedentes a um novo evento, são apresentados na seção 4.2.2.5.

4.2.1.2 *Desempenho das diferentes escalas de telhados verdes em longo prazo*

Nessa seção, são apresentados os resultados referentes ao desempenho na retenção e escoamento de todo o período monitorado para as diferentes escalas de telhados verdes.

A média de retenção por unidade de área (mm/m²) ocorrida no TV1 foi de 7,92mm. Para o TV3 e TV6, foram de 9,64mm e 8,87mm, respectivamente. O TV12 apresentou a melhor efetividade, com retenção de 10,90mm a cada metro quadrado. A Tabela 3 traz as médias e variações das porcentagens de retenção e o coeficiente de escoamento para ambos os grupos de dados em cada escala de telhado verde. Para fins de visualização, os mesmos dados são apresentados em um gráfico *boxplot* na Figura 17.

Tabela 3 – Médias e variações das porcentagens de retenção e coeficiente de escoamento nas diferentes escalas

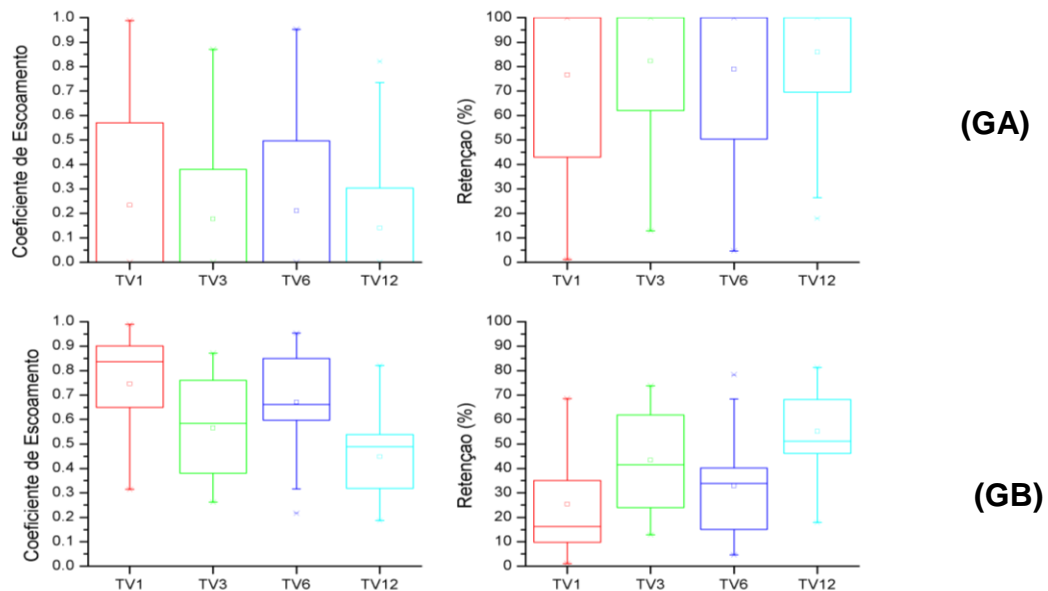
		Grupo A				Grupo B			
		TV1	TV3	TV6	TV12	TV1	TV3	TV6	TV12
Retenção	<i>Média</i>	77%	82%	79%	86%	25%	43%	33%	55%
	<i>Variação</i>	1% a 100%	13% a 100%	5% a 100%	18% a 100%	1% a 69%	13% a 74%	5% a 78%	18% a 81%
Coeficiente de Escoamento	<i>Média</i>	0.23	0.18	0.21	0.14	0.75	0.57	0.67	0.45
	<i>Variação</i>	0 a 0.99	0 a 0.87	0 a 0.95	0 a 0.82	0.31 a 0.99	0.26 a 0.87	0.22 a 0.95	0.19 a 0.82

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quando levado em consideração a efetividade dos telhados na retenção para o Grupo A, o TV12 apresentou desempenho superior comparado aos demais telhados. Essa superioridade aproximou-se de 9% em comparação ao TV1. O coeficiente de escoamento foi o menor entre as 4 escalas, apresentando também, a mais baixa variabilidade. O TV6 teve um comportamento excetuado com relação aos demais telhados verdes, com desempenho inferior ao TV3 e superior ao TV1. Testes estatísticos indicaram não haver diferenças significativas para as médias entre as 4 escalas (nível de significância de 5%), tanto para a retenção como para o coeficiente de escoamento.

Quando analisado o conjunto de dados do Grupo B, o desempenho na retenção do TV12 mais uma vez mostrou-se superior às demais escalas, apresentando menor coeficiente de escoamento e menor variabilidade. Desempenho inferior, com maiores coeficientes de escoamento e maior variabilidade foram observados nos TV1 e TV6. Quando se comparam as diferenças na retenção para as distintas escalas, destaca-se que o TV12 se aproxima de uma efetividade 30% e 22% superior ao TV1 e TV6, respectivamente. Foram identificadas diferenças estatísticas ($p > 0,05$) para as médias de retenção e coeficientes de escoamento foram encontradas entre o TV1 e TV3, TV1 e TV12 e entre TV6 e TV12.

Figura 17 – Coeficiente de escoamento e porcentagem de retenção nas diferentes escalas para o Grupo A e Grupo B.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quando observado o aspecto do mecanismo formador da precipitação e o coeficiente de escoamento entre as escalas (Tabela 4), para as chuvas frontais, dentro do Grupo A, o coeficiente foi significativamente inferior em comparação às precipitações convectivas. Quando tomados os valores para o Grupo B, de modo geral, os coeficientes de escoamento se mantem bastante próximos, com uma leve diminuição nas precipitações frontais. Para ambos os grupos de dados e para as quatro escalas de telhado verde, o comportamento se manteve de forma a apresentar menor coeficiente de escoamento no telhado de maior escala, independentemente do tipo de precipitação.

Tabela 4 - Coeficiente de escoamento nos quatro telhados para os diferentes mecanismos de formação de chuva

		Grupo A				Grupo B			
		TV1	TV3	TV6	TV12	TV1	TV3	TV6	TV12
Convectiva	Média	0.60	0.48	0.54	0.36	0.79	0.64	0.71	0.47
	Varição	0 a 0.95	0 a 0.87	0 a 0.95	0 a 0.64	0.50 a 0.95	0.38 a 0.87	0.32 a 0.95	0.25 a 0.64
Frontal	Média	0.15	0.11	0.14	0.09	0.71	0.51	0.64	0.43
	Varição	0 a 0.99	0 a 0.85	0 a 0.95	0 a 0.82	0.31 a 0.99	0.26 a 0.85	0.22 a 0.95	0.19 a 0.82

Fonte: Elaborado pelo Autor.

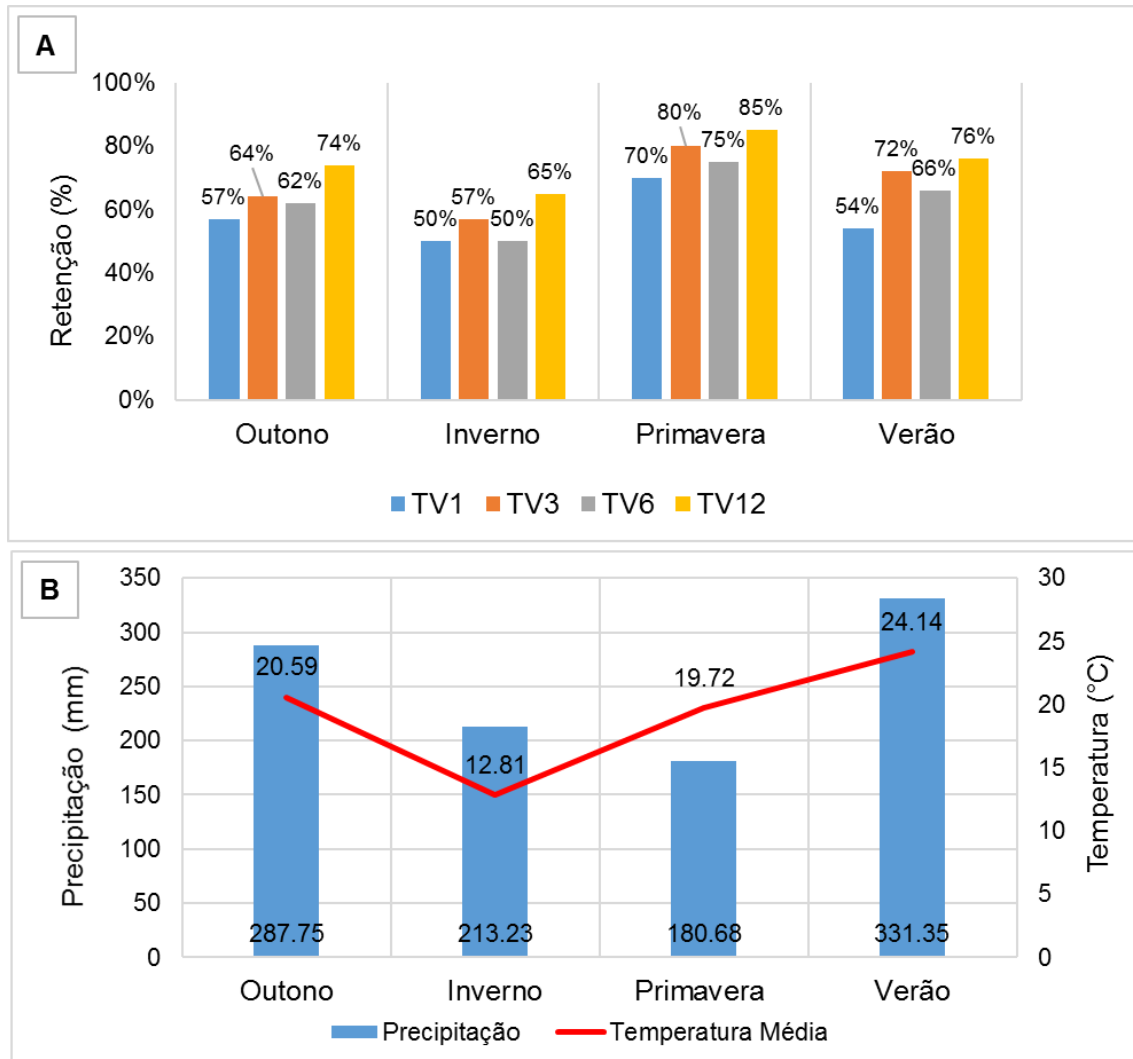
A seguir são apresentados o desempenho dos telhados verdes no escoamento e retenção com tratamento de dados considerando as diferentes estações e meses do período monitorado. Os dados da análise mensal e sazonal foram acumulados a partir dos monitoramentos dos eventos diários.

4.2.1.3 Desempenho das diferentes escalas dos telhados verdes – análise sazonal

Quando se avalia a efetividade de telhados verdes para diferentes estações, muitos estudos sugerem alta influência da evapotranspiração, que protagoniza o processo de recuperação da capacidade de armazenamento dos substratos (ARBOIT, 2017; HARPER et al., 2014). Dessa forma, períodos com temperaturas mais baixas e com o metabolismo vegetal menos ativo, tem diminuída a capacidade de retenção, se comparados a períodos do verão, por exemplo, onde temperaturas mais elevadas são predominantes, justificando a análise nesta unidade temporal.

No presente estudo foram avaliadas as retenções, em termos percentuais, para cada uma das escalas de telhados verdes para as distintas estações do período de monitoramento. A Figura 18 traz o resumo mensal das retenções para as distintas escalas e o comportamento das variáveis climatológicas do período.

Figura 18 – Retenção nos telhados verdes (A), temperaturas médias e volumes totais precipitados (B) para as estações do ano



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A estação com menor efetividade na retenção em todas as escalas foi o inverno, com uma retenção média de 55,5%. A estação teve como característica a ocorrência de elevados volumes de precipitação acompanhado de baixas temperaturas. A prevalência de eventos com volumes maiores e durações mais longas (característica frontal) foram os responsáveis pelos valores de retenção relativamente mais baixos. Esse resultado é análogo ao relatado por Zhang et al. (2015), onde identificaram que a porcentagem de retenção foi dependente do volume e padrões de precipitação para cada mês. Driscoll et al. (2015) reportaram uma retenção média de 48% para o inverno, o que se aproxima do resultado do presente estudo.

A estação com maior efetividade na retenção foi a primavera (média entre TV's de 78%), com valores mínimos bastante superiores ao do inverno (média entre TV's

de 55%). Para essa estação uma recuperação mais rápida da capacidade de armazenamento por conta do processo de evapotranspiração ficou evidente, tanto em função do processo de aumento da biomassa da vegetação, como do predomínio e aumento das temperaturas.

Na estação do outono, apesar das menores temperaturas, os telhados tiveram um desempenho na retenção (média entre TV's de 64%) bastante aproximado ao do verão (média entre TV's de 67%) - ambos os períodos tiveram volumes precipitados bastante próximos. Essa constatação reforça indícios de que o volume precipitado seja a principal variável que influencia na efetividade dos telhados verdes. Nawaz; McDonald; Postoyko (2015) indicaram retenções variando entre 36 a 96% para o verão, desempenho análogo ao diagnosticado no presente estudo.

Os resultados deste estudo mostram que há variação significativa no desempenho de retenção de telhado verde durante o verão e o inverno. A maioria dos estudos sobre telhados verdes atribui a variação sazonal no desempenho hidrológico de um telhado verde a mudanças nas taxas de evapotranspiração entre as estações (FASSMAN-BECK et al., 2013; GRACESON et al., 2013; ZHANG et al., 2015; ZHANG; GUO, 2013). No verão, é esperado que taxas de evapotranspiração relativamente altas levem a altos valores de retenção à medida que a capacidade de retenção de telhados verdes é restaurada rapidamente (BERNDTSSON, 2010; MENTENS; RAES; HERMY, 2006).

Em se tratando da efetividade para as diferentes escalas de telhados verdes, percebe-se que em todas as estações, o telhado TV12 teve um desempenho na retenção superior às demais escalas. Mesmo no inverno, onde a retenção diminuiu, o TV12 manteve-se à frente no desempenho, reforçando a evidência da contribuição da área de drenagem no processo de retenção.

4.2.1.4 Desempenho das diferentes escalas dos telhados verdes – análise mensal

A avaliação do comportamento a níveis mensais pode trazer informações quanto à efetividade e sensibilidade dos telhados frente às diferentes variações climáticas ao longo dos meses. A Figura E.1 traz os volumes escoado e retido, juntamente com a precipitação total para cada mês monitorado. A Figura E.2, traz as

porcentagens de retenção para os respectivos meses em cada escala de telhado verde.

Os meses de novembro, agosto e setembro foram meses com volumes precipitados bastante próximos. Para novembro todo o volume foi retido, em contrapartida de agosto e setembro, que teve certo volume escoado. Isso pode ser atribuído a um regime de precipitação bem distribuído dentro do mês e às elevadas temperaturas de novembro, onde as taxas metabólicas da cultura são mais elevadas, favorecendo a evapotranspiração. Dessa forma ocorre uma rápida e mais acentuada recuperação da capacidade de armazenamento do substrato. No mês de setembro, onde as médias diárias de temperatura vão subindo, percebe-se que a produção de escoamento também vai diminuindo com relação a agosto. Esse comportamento pode ser estendido aos meses de dezembro e julho.

O mês de abril teve uma retenção de 100% em todas as escalas. Porém, conforme é possível verificar na tabela de eventos (Tabela B.1), o período teve um evento extravasado de grande volume (116,95mm), o que correspondeu a 82% do volume total precipitado para o respectivo mês. Assim, a efetividade máxima reflete apenas os 18% de volume precipitado para o período.

Avaliando-se o comportamento das diferentes escalas nos respectivos meses, com exceção de novembro e abril onde foi de 100% em ambos os telhados, o TV12 apresentou a melhor efetividade na diminuição do escoamento, seguido pelo TV3. A média de superioridade foi em torno de 8%, com variação entre 1% a 20%.

O telhado TV6 teve um comportamento diferenciado dos demais. Na maioria dos meses, teve sua efetividade com valores intermediários ao TV1 e TV3; inclusive, para os meses de agosto e outubro, os níveis de retenção ficaram abaixo do desempenhado pelo TV1. Conforme será melhor relatado na seção 4.4, o telhado TV6 apresentou o melhor estabelecimento vegetal em todo o período monitorado. Dessa forma, possivelmente essa condição foi o fator determinante na variabilidade de seu comportamento. Telhados verdes com vegetação bem estabelecida e com expressiva biomassa, atenuam o aquecimento da camada de substrato, diminuindo o processo de evaporação. Dessa forma, a transpiração passa a ter papel mais significativo na retirada de água do substrato. Porém, por ser um processo físico-biológico, sua efetividade é mais lenta. Como consequência, a recuperação da parcela de armazenamento pelo substrato também é mais lenta. Enquanto telhados, onde a vegetação é mais densa podem ser mais efetivos para conservar a água e

proporcionar a sobrevivência das plantas, eles são menos eficientes na retenção das precipitações frequentes em comparação a telhados menos densos. Essa constatação é relatada por Arboit (2017), que verificou que o escoamento em módulos de telhados verdes sem vegetação foi ligeiramente inferior (em torno de 10%) em comparação a telhados com vegetação. Além disso, em função da *Sedum rupestre* apresentar um sistema radicular raso, a extração de umidade em profundidades maiores é comprometida, resultando em menor capacidade de recuperar o volume de armazenamento na camada de substrato.

Nas demais escalas, onde a vegetação teve um estabelecimento levemente inferior, o aquecimento do substrato possivelmente foi mais intenso. Dessa forma, é possível que o processo que regulava a recuperação da capacidade de armazenamento pelo substrato tenha sido a evaporação. Por ser um processo físico se desenvolve de forma mais rápida, tendo reflexo sobre a efetividade na retenção.

4.2.2 Comportamento hidrológico das diferentes escalas de telhados verdes em relação às características dos eventos de precipitação

As seções que seguem avaliam a influência de uma série de variáveis identificadas como sendo as principais determinantes hidrológicas no escoamento e retenção dos telhados verdes, relacionados à precipitação: volume, intensidade média evento, duração do evento, volume máximo precipitado em 1h, período de dias anteriores sem precipitação, umidade antecedente do substrato (BERNDTSSON, 2010; STOVIN; VESUVIANO; DE-VILLE, 2017).

4.2.2.1 Influência do volume de precipitação

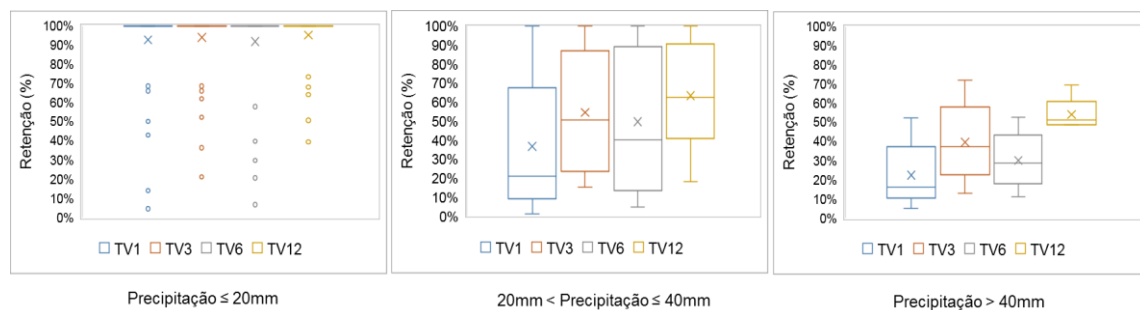
Geralmente, o volume de precipitação é a variável norteadora e que determina o comportamento do escoamento e retenção dos telhados verdes (CARPENTER et al., 2016; LEE; LEE; HAN, 2015; ZHANG et al., 2015).

Percebe-se que, pela Figura 19, para os volumes considerados baixos (49 eventos $\leq 20\text{mm}$), a retenção se manteve praticamente no patamar máximo para ambas as escalas. A menor variabilidade foi verificada no TV12, seguido pelo TV3.

Quando tomados os eventos (13 ocorrências) de volume médio ($20\text{mm} < \text{Precipitação} \leq 40\text{mm}$) a média de retenção para ambas as escalas passou a diminuir.

A menor variação foi verificada no TV12 e no TV3, com médias de 63% e 54%, respectivamente. Para volumes médios precipitados compreendidos na faixa analisada, Carpenter et al. (2016) relataram uma retenção de 88% para um telhado verde de 1190m² no centro do estado de Nova Iorque (EUA). Como o telhado do estudo citado tem maior área, espera-se um reflexo desse elemento na capacidade de retenção. Por outro lado, apesar da maior área de drenagem e climas bastante distintos, esse valor adentra-se na faixa de variação dos valores encontrados no presente estudo.

Figura 19 - Variação da retenção (%) em função do volume precipitado (mm)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para volumes superiores a 40mm, apesar da baixa quantidade de eventos (5 incidências), o comportamento é análogo ao reproduzido nos volumes médios, com médias levemente inferiores em ambas as escalas, e apresentando menor dispersão. Desempenho superior aos demais telhados foi observado no TV12, que apresentou a menor variação e média de retenção de 54%.

Pelos resultados, verifica-se que à medida em que os volumes de precipitação aumentam, as capacidades de retenções reduzem, o que era um efeito esperado. Como o substrato do telhado verde tem uma capacidade finita de armazenamento, eventos de maior volume produzem uma proporção maior de escoamento, quando comparado a um evento menor (GETTER; ROWE, 2006). Da mesma forma, aparentemente, quanto maior a área de drenagem dos telhados maior o seu potencial em produzir um efeito de armazenamento, conforme evidenciado nos resultados.

Apesar de considerar faixas de precipitação um pouco superiores, Zhang et al. (2015) reportaram retenção de 72% para precipitações de até 25mm (volume baixo), 67% para precipitações médias (25 a 50 mm) e 39% para precipitações de maior volume (acima de 50 mm), em um telhado verde com 15cm de espessura. Hakimdavar

et al. (2014) relataram uma retenção média de 85% para eventos com menos de 20 mm, 48% para eventos com volume de 20 a 40 mm e 32% para eventos com mais de 40 mm, em um estudo avaliando 3 telhados verdes em Nova Iorque. Os valores se inserem facilmente nas faixas de variação encontradas no presente estudo, e reforçando o indicativo de que maiores volumes são responsáveis por produzirem um maior escoamento.

No Apêndice D são apresentadas algumas análises de regressão entre o volume precipitado e escoamento (Figura D.1) e volume precipitado e retenção (Figura D.2).

Assim como indicado na literatura (HAKIMDAVAR et al., 2014; NAWAZ; MCDONALD; POSTOYKO, 2015; STOVIN; VESUVIANO; DE-VILLE, 2017) e também diagnosticado neste estudo, o volume precipitado teve forte influência sobre o escoamento em todas as escalas de telhado verde. Porém, quando levado em consideração a resposta hidrológica em termos de volume escoado por unidade de área, observa-se que para o TV12, a mesma quantidade de precipitação produziu menos escoamento, evidenciando que a maior área de drenagem produziu uma menor e mais lenta resposta do sistema.

No estabelecimento das equações de regressão, uma relação não-linear ficou evidente entre a precipitação e o escoamento em todas as escalas. Esse resultado corrobora com os estudos realizados por Fassmann-Beck et al. (2013) e Razzaghmanesh & Beecham (2014).

Como era de se esperar, e analisando-se os dados da Figura D.2 percebe-se a inversão dos comportamentos em se tratando de retenção, onde fica evidente a capacidade limitada de crescimento na retenção até um certo volume precipitado, a partir do qual esse benefício é reduzido, resultando uma relação não-linear. Resultados análogos foram verificados por Hakimdavar et al. (2014), que reportaram um comportamento não-linear. Em contrapartida, Carpenter et al. (2016) relataram um comportamento linear e proporcional entre volume precipitado e escoamento, e inversamente proporcional à retenção; possivelmente as diferenças se deram ao fato de que os autores avaliaram o comportamento até um volume de precipitação máximo de 17,8mm.

A Tabela 5 traz o resumo das equações de regressão estabelecidas e os coeficientes de determinação para os 4 telhados verdes. Os coeficientes de correlação de Spearman podem ser consultados na Tabela D.1, que consta no Apêndice D. Para

a variável de escoamento, a correlação foi moderada entre todos os telhados em relação ao volume precipitado. Já para a retenção, a relação foi forte apenas para o TV12 e TV3, e moderada TV6 e TV1.

Tabela 5 - Equações para estimativa de escoamento e retenção em função do volume precipitado

Escoamento x Precipitação		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$E=0,139*P+0,0137*P^2$	0,88
TV3	$E=0,022*P+0,0129*P^2$	0,86
TV6	$E=0,045*P+0,0139*P^2$	0,87
TV12	$E=0,080*P+0,0080*P^2$	0,80
Retenção x Precipitação		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$R=0,861*P-0,0137*P^2$	0,72
TV3	$R=0,978*P-0,0127*P^2$	0,86
TV6	$R=0,955*P-0,0140*P^2$	0,80
TV12	$R=0,920*P-0,0080*P^2$	0,91

*E – Escoamento (mm) / R – Retenção (mm) / P – Precipitação (mm)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.2.2 *Influência da intensidade da precipitação*

A intensidade da precipitação é fator influente na geração de escoamento (BENGTSSON; GRAHN; OLSSON, 2004; FASSMAN-BECK et al., 2013; STOVIN; VESUVIANO; DE-VILLE, 2017). Dessa forma, para avaliar o grau de associação do efeito dessa variável sobre o escoamento e retenção para ambas as escalas de telhado verde, equações de regressão foram estabelecidas e graficamente podem ser observadas na Figura D.3 e Figura D.4. O resumo da análise, juntamente com os coeficientes de determinação podem ser consultados na

Tabela 6.

As equações estabelecidas mostraram um comportamento não-linear em todas as escalas de telhados verdes com relação ao escoamento, com coeficiente de determinação médio em torno de 0,5. O resultado evidencia que há uma certa influência da intensidade da precipitação sobre o comportamento dos telhados no

escoamento, ou seja, é razoável que maiores intensidades de precipitação tendam a produzir um maior volume de escoamento superficial, sendo a água conduzida ao ponto de descarga com mais rapidez, uma vez que não há tempo suficiente para infiltrar e ocupar os vazios do substrato.

Quando analisadas as equações e o comportamento gráfico, fica evidente que o telhado TV12 e o TV3 foram os que apresentaram melhor desempenho, produzindo menos escoamento superficial. Em contrapartida, e com comportamento bem próximo, o TV1 e TV6 foram os telhados que mais contribuíram na geração do escoamento.

Com relação à retenção, nota-se um comportamento positivo crescente até uma intensidade média em torno de 4,5mm/h, mantendo uma retenção média entre os telhados de 85%. Para valores superiores de intensidade, o comportamento na retenção se inverte e torna-se negativo. A partir desse ponto, a média diminui para 48% em todas as escalas. Nesse contexto, Villarreal e Bengtsson (2005) relataram grande dependência entre essas variáveis, onde valores menores de intensidade resultaram em maiores taxas de retenção. Quando observadas as diferenças entre as quatro escalas, ficou evidente uma maior capacidade de retenção pelo TV12, sobressaindo-se aos demais telhados, analogamente ao desempenho no escoamento.

Quando tomados os coeficientes de correlação de Spearman para a retenção, uma influência fraca foi indicada nas quatro escalas de análise. As equações de regressão mostraram um comportamento não-linear (Tabela 6), com um coeficiente de determinação médio em torno de 0,63.

Tabela 6 - Equações para estimativa do escoamento e retenção em função da intensidade média da precipitação

Escoamento x Intensidade Média da Precipitação		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$E=2,648*I_{med}+0,3136*I_{med}^2$	0,52
TV3	$E=1,687*I_{med}+0,3227*I_{med}^2$	0,52
TV6	$E=1,862*I_{med}+0,3578*I_{med}^2$	0,50
TV12	$E=1,452*I_{med}+0,1987*I_{med}^2$	0,48
Retenção x Intensidade Média da Precipitação		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$R=5,808*I_{med}-0,6204*I_{med}^2$	0,52
TV3	$R=6,769*I_{med}-0,6293*I_{med}^2$	0,66
TV6	$R=6,594*I_{med}-0,6644*I_{med}^2$	0,64
TV12	$R=7,005*I_{med}-0,5054*I_{med}^2$	0,71

*E – Escoamento (mm) / R – Retenção (mm) / I_{med} – Intensidade Média (mm/h)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.2.3 *Influência da duração do evento de precipitação*

A duração dos eventos é considerado um fator determinante para o comportamento no escoamento e retenção dos telhados verdes (NAWAZ; MCDONALD; POSTOYKO, 2015). Nesse contexto, foi investigado as relações entre essas variáveis também no presente estudo por meio de equações de regressão. A Figura D.5 e Figura D.6 apresentam graficamente as relações estabelecidas no escoamento e retenção e a duração dos eventos. Um resumo é apresentado na Tabela 7, juntamente com os coeficientes de determinação.

Observando-se os dados gráficos e as equações da tabela, pode-se aferir uma pequena influência da duração do evento na geração do escoamento. Os coeficientes de correlação para ambas as configurações também indicaram uma relação fraca (Tabela D.1). Esse resultado parece ser bem razoável, uma vez que eventos de maiores ou menores durações, por si só, não explicariam um aumento ou decréscimo do escoamento.

Quando tomado a duração do evento em relação à retenção, essa influência passa ser mais evidente e significativa pelas equações de regressão. Isso é razoável,

pois eventos com maiores durações (geralmente com baixas intensidades), dão tempo hábil para a recuperação da capacidade de armazenamento por parte do sistema. Com relação a associação entre essas variáveis, apesar do bom estabelecimento das equações de regressão, os coeficientes de correlação indicaram uma influência fraca.

Tanto para o escoamento como para a retenção, um comportamento não linear entre estas variáveis e a duração do evento foi o que apresentou melhor equação de regressão. Corroborando com o resultado do presente estudo, comportamento análogo foi relatado nas investigações de Nawaz; McDonald; Postoyko (2015).

Tabela 7 - Equações para estimativa do escoamento e retenção em função da duração do evento

Escoamento x Duração do Evento		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$E=0,798*DE-0,0224*DE^2$	0,22
TV3	$E=0,626*DE-0,0102*DE^2$	0,20
TV6	$E=0,646*DE-0,0089*DE^2$	0,21
TV12	$E=0,457*DE-0,0068*DE^2$	0,21
Retenção x Duração do Evento		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$R=0,622*DE-0,0193*DE^2$	0,62
TV3	$R=1,172*DE-0,0215*DE^2$	0,66
TV6	$R=1,1523*DE-0,0227*DE^2$	0,64
TV12	$R=1,3413*DE-0,0249*DE^2$	0,63

*E – Escoamento (mm) / R – Retenção (mm) / DE – Duração do Evento (h)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.2.4 *Influência do volume máximo precipitado em 1 hora*

Assim como descrito na seção 3.4.1, o volume máximo precipitado para 1h de duração de cada evento foi obtido. Essa investigação foi conduzida para tentar ampliar o conhecimento relacionado ao comportamento dos telhados verdes associado à duração da chuva, já que são escassos os estudos que associam essa variável com a resposta no escoamento e retenção.

A Figura D.7 ilustra as relações estabelecidas e a Tabela 8 traz o resumo das equações de regressão, juntamente com os coeficientes de determinação.

As correlações (Tabela D.1) indicaram uma relação moderada entre o escoamento e o volume máximo em 1h para todas as quatro escalas. As equações de regressão resultaram em um comportamento não-linear positivo, com coeficiente de determinação médio em torno de 0,62. Esse resultado indica que quanto maior o volume ocorrido na duração de 1 hora, maior é a resposta em termos de escoamento.

Quando verificado as diferenças no comportamento para as diferentes escalas, observa-se que o TV12 apresentou uma menor tendência de gerar escoamento. Aparentemente, o resultado é um indicativo de que maior área de drenagem produz um efeito maior em termos de armazenamento.

Quando observado o comportamento na retenção, a correlação foi fraca para o TV1, e moderada para as demais escalas. Analogamente ao escoamento, e como era de se esperar, as regressões indicaram um comportamento não-linear, porém negativo. Da mesma forma, o TV12 se sobressai às demais escalas, apresentando uma maior efetividade na capacidade de retenção.

Tabela 8 - Equações para estimativa do escoamento e retenção em função do volume máximo acumulado precipitado em 1h

Escoamento x Volume máximo precipitado em 1h		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$E=0,980*V_{\text{máx}}+0,0178*V_{\text{máx}}^2$	0,62
TV3	$E=0,620*V_{\text{máx}}+0,0223*V_{\text{máx}}^2$	0,60
TV6	$E=0,588*V_{\text{máx}}+0,0320*V_{\text{máx}}^2$	0,65
TV12	$E=0,496*V_{\text{máx}}+0,0155*V_{\text{máx}}^2$	0,60
Retenção x Volume máximo precipitado em 1h		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$R=1,748*V_{\text{máx}}-0,0547*V_{\text{máx}}^2$	0,62
TV3	$R=2,109*V_{\text{máx}}-0,0592*V_{\text{máx}}^2$	0,74
TV6	$R=2,141*V_{\text{máx}}-0,0689*V_{\text{máx}}^2$	0,72
TV12	$R=2,233*V_{\text{máx}}-0,0524*V_{\text{máx}}^2$	0,79

*E – Escoamento (mm) / R – Retenção (mm) / V_{máx} – Volume Máximo precipitado em 1h (mm)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.2.5 *Influência do período de dias anteriores sem precipitação*

A duração do período sem precipitação antecedente a um novo evento é importante no processo de retenção de água. Quando um telhado verde está sujeito a um longo período sem incidência de precipitação, apresenta um tempo mais adequado para recuperar a capacidade de armazenamento de eventos futuros (LEE; LEE; HAN, 2015; ZHANG et al., 2015). Divergências existem com relação a essa afirmação, onde alguns estudos confirmam a relação entre essas variáveis, contrariando outras afirmações que alegam pouco efeito desta componente sobre a retenção (NAWAZ; MCDONALD; POSTOYKO, 2015).

Para o presente estudo, um maior período seco precedente a novos eventos não se mostrou fator determinante na mudança do comportamento na retenção nas quatro escalas de telhados verdes (Figura D.8). Coeficientes de correlação (Tabela D.1) também indicaram uma influência praticamente nula entre retenção e escoamento com o período seco antecedente.

O resultado talvez seja plausível, uma vez que o período seco não retorna a real umidade do solo. Em outras palavras, um período seco curto (evento 15, por exemplo, com zero dias), porém com evento anterior de baixo volume, não reduz significativamente a capacidade de retenção, retornando um coeficiente de escoamento nulo para o evento subsequente. Por outro lado, períodos secos maiores (evento 47, por exemplo, com 10 dias), porém, com eventos anteriores de elevado volume, tiveram coeficientes de escoamento médio entre os telhados em torno de 0,85.

Possivelmente, outro fator determinante sejam as taxas de evaporação e transpiração vegetal, inferiores nas estações mais frias e chuvosas. Dessa forma, maiores ou menores períodos secos não gerariam forte efeito sobre a capacidade de retenção.

Corroborando com o resultado encontrado no presente estudo, Nawaz; McDonald; Postoyko (2015) também relataram pouco efeito do período seco precedente a novos eventos na retenção do telhado verde e atribuem a causa às baixas taxas de evapotranspiração ocorridas durante o período monitorado. Em contrapartida, Carpenter et al. (2016) encontraram um escoamento superior para eventos que não foram precedidos por um período seco anterior superior a dois dias, embora pouca significância estatística tenha sido encontrada.

4.2.2.6 *Influência da umidade antecedente do substrato (UAS)*

O volume de precipitação necessário para iniciar o escoamento em todas as configurações variou em função do volume precipitado anteriormente ao novo evento, que remete a uma umidade antecedente do solo (UAS).

Para eventos com uma UAS – I, correspondendo a 40 eventos, o volume precipitado responsável pelo início do escoamento foi de 14,5mm e o volume máximo retido foi de 22,8mm. Para uma UAS – II, que contemplou 12 eventos, o início do escoamento se deu com um volume precipitado de 5mm e o máximo retido foi de 20,4mm. Já a efetividade para uma UAS – III (15 eventos) foi bastante análogo ao UAS-II, com o escoamento iniciando com 4mm de precipitação e uma retenção máxima de 20,2mm. Os resultados indicam que a umidade antecedente do substrato é um fator importante, e que controla a função dos telhados verdes. Conclusões análogas foram relatadas por Carpenter et al. (2016) e Tassi et al. (2014).

Equações de regressão foram estabelecidas (Tabela 9) para avaliar o comportamento nos quatro telhados verdes. Os gráficos podem ser observados na Figura D.9.

Tabela 9 - Equações para estimativa do escoamento em função da UAS

Escoamento x UAS I		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$E=0,247*P+0,0113*P^2$	0,82
TV3	$E=0,114*P+0,0104*P^2$	0,78
TV6	$E=0,062*P+0,0142*P^2$	0,81
TV12	$E=0,126*P+0,0077*P^2$	0,74
Escoamento x UAS II		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$E=0,180*P-0,0200*P^2$	0,99
TV3	$E=0,251*P-0,0194*P^2$	0,99
TV6	$E=0,064*P-0,0147*P^2$	0,97
TV12	$E=0,194*P-0,0116*P^2$	0,98
Escoamento x UAS III		
Telhado	Equação	R ²
TV1	$E=0,439*P-0,0198*P^2$	0,12
TV3	$E=0,340*P-0,0153*P^2$	0,12
TV6	$E=0,414*P-0,0190*P^2$	0,11
TV12	$E=0,264*P-0,0119*P^2$	0,12

*E – Escoamento (mm) / P – Precipitação (mm)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O comportamento para ambos os telhados em relação a UAS I e UAS II, seguem um padrão não linear (polinomial de ordem 2), sendo o TV12 a configuração de telhado verde que tem maior efetividade na retenção.

Quando avaliadas as equações para UAS III, as polinomiais de ordem 2 produzem um erro quadrático bastante expressivo, não refletindo um comportamento fiel das estruturas. Porém, é o modelo equacional que mais se adaptou. Uma UAS III é indicativa de grande quantidade de água presente no solo em função de eventos anteriores. Nesse sentido é tendencioso um comportamento onde toda a precipitação incidente é convertida em escoamento. Porém, é necessária uma maior quantidade de dados para conclusões efetivas.

Na Figura D.9, na correspondente a uma UAS-III, destacam-se dois eventos de precipitação com volume aproximado de 10mm que produziram diferentes volumes de escoamento nas distintas escalas. Chama a atenção que o TV12, mesmo com

elevada umidade no substrato, apresentou o melhor desempenho quando comparado as demais escalas, com menor volume escoado. Dessa forma, é evidente um efeito da maior área de drenagem na manutenção do escoamento.

4.3 ANÁLISE DOS HIDROGRAMAS DOS TELHADOS VERDES

Conforme descrito na seção 3.4.2 da etapa metodológica, curvas de acumulados de precipitação *versus* escoamento e os respectivos hidrogramas foram construídos para avaliar as seguintes variáveis: tempo entre o início da chuva até o início do escoamento (I_{C-E}), tempo entre o início do escoamento até a vazão máxima ($I_{E-Q_{máx}}$), o tempo de início de chuva até a vazão máxima ($I_{C-Q_{máx}}$), possíveis diferenças nas vazões máximas ($Q_{máx}$) e o tempo de concentração (T_c).

Cabe salientar, conforme adiantado na seção 3.3, que o monitoramento hidrológico de estruturas como os telhados verdes exigem um nível de precisão muito elevado, capaz de detectar com fidelidade pequenas mudanças de nível nos reservatórios e dentro de uma discretização temporal mínima – em nosso caso adotado 5 segundos. A maioria das soluções comerciais não atendem a essa demanda e, por outro lado, geralmente são inacessíveis financeiramente.

Para ilustrar o nível de significância de se ter uma boa precisão no monitoramento de telhados verdes, foram avaliadas as mesmas variáveis, a partir dos dados monitorados, com discretizações temporais diferentes - 5 segundos e 30 minutos (Tabela F.1 e Tabela F.2). Para a sua composição, em função do alto nível de precisão, foi possível contar com apenas 13 eventos para a análise, e que permitiram algumas conclusões.

Juntamente com os dados das tabelas são apresentadas as curvas dos hidrogramas e os acumulados de precipitação e escoamento nas Figuras F.1 à Figura F.22 do Apêndice F. Depois de testar várias escalas de tempo, apenas para fins ilustrativos, optou-se pela discretização temporal de 30 minutos.

Analisando os dados das tabelas, pode-se tirar conclusões diferentes que são altamente influenciados pela discretização temporal. Por exemplo, quando se analisa o tempo entre o início da precipitação até o início do escoamento do evento 26, observa-se valores mínimos de 15min (0,25h) para uma discretização de 5 segundos e 30min (0,5h) para uma discretização de 30 min. O mesmo se repete para as demais

análises, mostrando a importância da precisão e discretização na coleta das informações, uma vez que podem ser obtidas conclusões bem diferentes.

Os hidrogramas para os eventos de precipitação monitorados demonstraram que o escoamento só iniciou quando todo o substrato estava saturado. Para discretização temporal de 5 segundos, em todas as configurações observa-se um atraso no início do escoamento de, no mínimo 15 min (TV6) com relação ao início da precipitação, atingindo valores máximos de 778,8min (12,98 horas) no TV12. Esse resultado confirma a capacidade dos telhados verdes em deter e postergar o início de escoamento. Resultados análogos foram encontrados por Nawaz; McDonald; Postoyko (2015), relatando um atraso no início do escoamento em média de 95min para um telhado verde extensivo de 30cm de espessura e 830m² de área, monitorado durante 3 anos.

Poucas conclusões puderam ser realizadas quando avaliados os tempos entre início do escoamento até a vazão máxima, e tempos de concentração. O padrão de comportamento das quatro unidades experimentais foi bastante aleatório nesse sentido, não permitindo precisar o real comportamento dos telhados. Possivelmente, uma maior quantidade de eventos poderia aprimorar esta análise.

Menores vazões (picos de escoamento) foram observadas no TV12, na maioria dos eventos, confirmando a suposição de que a escala do telhado verde tem impacto na redução das vazões máximas. Embora menos significativas, Hakimdavar et al. (2014) relatou desempenho análogo para 3 escalas distintas de telhado verde.

Quando avaliado as curvas de acumulado de precipitação e escoamento, maior quantidade de dados foi possível monitorar no TV6 (7 registros) e TV12 (9 registros). Para essas duas escalas, o TV12 iniciou seu escoamento, em média, após ocorridos 46% do volume precipitado. Já no TV6, o escoamento iniciou quando o volume precipitado atingiu 30% do total. Para as demais escalas, apenas 3 registros foram obtidos sendo, portanto, insignificantes para tirar alguma conclusão.

4.4 ESTABELECIMENTO DA VEGETAÇÃO

A vegetação, quando inicialmente inserida foi irrigada regularmente a fim de auxiliar no seu estabelecimento. Dado início à etapa de monitoramento, em novembro de 2017, evitou-se realizar a irrigação dos telhados verdes.

A Figura 20 mostra algumas imagens do aspecto da vegetação e o seu estabelecimento para as diferentes estações do ano, juntamente com algumas variáveis climatológicas importantes.

Observando-se as quatro escalas dos telhados verdes, é possível notar que o melhor estabelecimento vegetal ocorreu no TV6, se destacando claramente sobre os demais. Assim como relatado na seção 4.2.1.4, possivelmente um sombreamento disponibilizado por uma vegetação alta do entorno foi determinante na criação de condições que permitissem um melhor crescimento das plantas. Em função dessa possível proteção (sombra), houve um menor aquecimento do substrato, e a perda de água do solo por evaporação foi menor, mantendo abundância hídrica para o desenvolvimento vegetal.

Nos demais telhados verdes (TV1, TV3 e TV12), o aumento da biomassa e estabelecimento da vegetação foi mais lento e menos expressivo. Nestes telhados, é possível observar na imagem a exposição do substrato em certa extensão da superfície. Contrariamente ao ocorrido no TV6, é razoável um maior aquecimento da superfície em função do não sombreamento e exposição direta do substrato a temperaturas mais elevadas; essa condição favorece as perdas de água por evaporação de forma mais intensa e rápida. Assim, forma-se um ciclo no estabelecimento, onde o estresse hídrico experimentado acaba inibindo o desenvolvimento e progresso de nova vegetação.

Como relatado nas seções anteriores, no que diz respeito à avaliação das quatro escalas de telhado frente à retenção do escoamento, o telhado TV6 teve um desempenho atípico às demais escalas. Em algumas ocasiões apresentou efetividade intermediária ao TV1 e TV3, e em outros momentos, teve um desempenho inferior ao TV1. Possivelmente, o motivo é a diferenciação no estabelecimento vegetal. Neste sentido, Stovin et al. (2015) relatam que, apesar de telhados com uma cobertura vegetal mais densa serem melhores para conservar a água e proporcionar a sobrevivência da vegetação, eles são menos eficientes na retenção das precipitações, em comparação a telhados não vegetados. Isso corrobora com os resultados obtidos neste estudo. Ainda, acredita-se que em função da *Sedum rupestre* apresentar um sistema radicular raso, a extração de umidade em profundidades maiores possa ter sido comprometida, resultando na menor capacidade do substrato recuperar o armazenamento de água frente a novos eventos de precipitação (ARBOIT, 2017). Como no TV1, TV3 e TV12, o estabelecimento da vegetação foi menos pronunciado,

com exposição do substrato e incidência de elevadas temperaturas, o processo de evaporação foi predominante, promovendo a recuperação da capacidade de armazenamento do substrato de forma mais rápida, refletindo na superior efetividade na retenção.

Embora essa constatação nas unidades experimentais esteja baseada em análises visuais, e corroborem com estudos prévios (ARBOIT, 2017), surge o questionamento quanto à real necessidade de se utilizar vegetação em telhados concebidos para serem verdes. Neste caso, deve-se pensar no fato de que estes sistemas oferecem benefícios térmicos, estéticos e de biodiversidade urbana, os quais são alcançados apenas com a presença da vegetação. Além disso, a vegetação pode contribuir na proteção da camada do substrato, minimizando a sua perda por meio do carreamento das partículas sólidas, e comprometimento da qualidade da água escoada a partir das coberturas.

De modo geral, notou-se um declínio na cobertura vegetal principalmente no fim da primavera e durante o verão, principalmente nos telhados TV1, TV3 e TV12, com significativa redução de sua biomassa e alteração de coloração. Nesse período houveram os menores volumes precipitados, altas incidências de radiação e elevadas temperaturas. O fim do inverno (agosto) e início da primavera (setembro) foram períodos de pleno crescimento da vegetação com grande aumento da biomassa verde. Outubro observou-se uma fase reprodutiva das plantas, com o aparecimento de flores e coloração levemente amarelada.

A senescência e a morte das plantas ficaram mais evidente no fim da primavera (novembro) e durante o verão. Isso ocorre em função de alterações hormonais e por fatores ambientais. Essa fase é marcada, muitas vezes, pela abscisão ou perda das folhas, o que acaba por reduzir a área foliar (TAIZ; ZEIGER, 2006). Após a senescência, a vegetação remanescente estagnou seu desenvolvimento, apresentando folhas concentradas apenas no ápice do caule.

No período do outono (março a maio) notou-se um brotamento das folhas e a coloração das plantas ficou mais esverdeada. No inverno, a coloração e o estabelecimento mantiveram-se bastante parecidos ao outono. Possivelmente, essas características se deram pelo aumento da precipitação e diminuição da incidência de radiação e temperaturas mais baixas. A espécie *Sedum rupestre*, pertencente à família Crassulaceae é uma suculenta, e retém a água em seus tecidos em períodos de estresse hídrico diminuindo suas taxas metabólicas e contendo o crescimento. Já

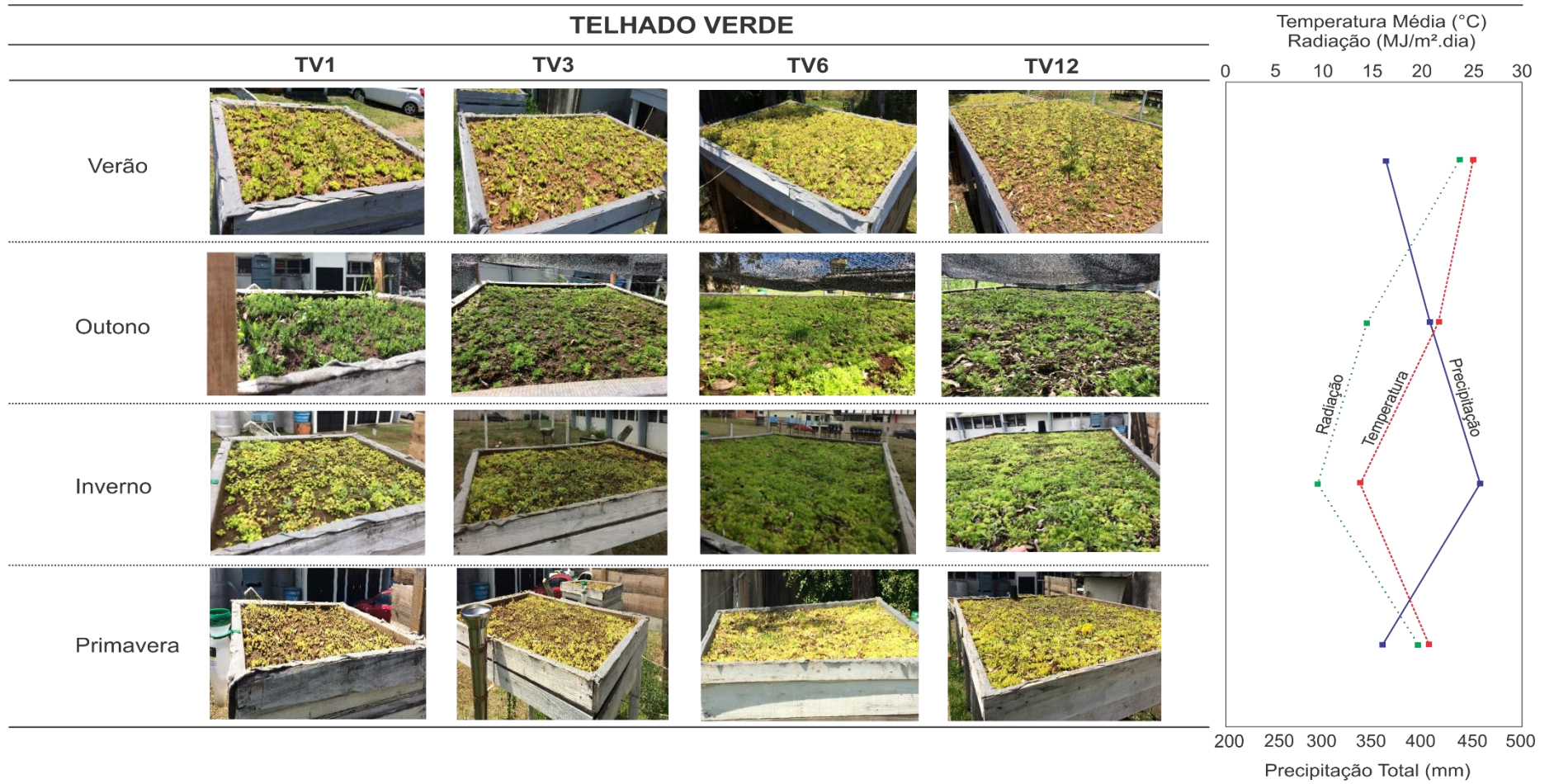
para períodos de elevada abundância hídrica, crescem e desenvolvem-se abundantemente (ARBOIT, 2017).

Anteriormente ao presente estudo (ano de 2015 a 2017), pesquisas com aplicação da *Sedum rupestre* foram realizadas no mesmo local por dois diferentes autores (ARBOIT, 2017; PALMEIRA, 2016). Análogo aos presentes resultados, os autores relataram o mesmo comportamento para a *Sedum rupestre*, constatando uma mudança fenotípica desta espécie ao longo do tempo. Os autores também verificaram aumento da biomassa vegetal e a floração entre os meses de setembro e novembro (2015) e a senescência das plantas para o período do verão (dezembro/2015 a fevereiro/2016).

Assim, em função do ciclo vegetativo inerente à planta, é de se esperar que os telhados verdes apresentem um comportamento diferenciado ao longo dos meses, o que ficou evidente conforme apresentado nas seções 4.2.1.3 e 4.2.1.4. A efetividade no controle do escoamento pode ser influenciada pelo decréscimo nas taxas de evapotranspiração e, porventura, um comprometimento no desempenho das funções em determinadas épocas do ano.

Para as quatro escalas de telhados verdes analisados, não ocorreram evidências de efeitos de bordadura, ou seja, o aquecimento mais acentuado esperado nas bordas dos telhados, o que poderia comprometer o desenvolvimento da vegetação. Da mesma forma, o tamanho dos telhados (aumento da área de drenagem) também não refletiu no vigor e estabelecimento vegetal.

Figura 20 - Registro fotográfico da vegetação nas respectivas estações e as variáveis climáticas



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal do presente trabalho foi avaliar o efeito de escala de telhados verdes na redução do escoamento superficial e compreender o seu comportamento e efetividade como técnica para gestão das águas pluviais. Dessa forma, quatro estruturas experimentais de telhados verdes extensivos foram identicamente construídas e monitoradas durante 1 ano, alternando entre si apenas o tamanho da área de drenagem (1m², 3m³, 6m² e 2m²).

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que os telhados verdes apresentaram um desempenho efetivo no atraso e redução do volume de escoamento superficial. Mesmo nas mais variadas condições climatológicas, experimentadas durante os meses e estações monitoradas, os telhados verdes mostraram atuantes e eficientes na gestão das águas pluviais. Isso demonstra a importante contribuição que estruturas dessa natureza têm na mitigação das inundações e no alívio dos sistemas de drenagem, principalmente em ambientes urbanos.

Os resultados obtidos durante o período de monitoramento, permitiram inferir que:

- Os telhados verdes mostram-se eficientes alternativas para a retenção do escoamento, retendo mais da metade do volume precipitado para o período monitorado, constituindo promissora possibilidade para minimização dos impactos da impermeabilização em ambientes densamente urbanizados. Porém, cabe salientar, que os telhados verdes, por si só, não detêm a retenção de 100% do escoamento, mas combinado com outras estruturas, podem cumprir ainda melhor o papel no controle do escoamento superficial.

- A ação dos telhados verdes foi superior na retenção da precipitação e com menor variabilidade nos resultados, à medida em que a área de telhado verde foi maior. O TV12 teve a melhor efetividade em praticamente todas as análises realizadas, indicando que a utilização de telhados verdes em grandes áreas de cobertura tem grande potencial para contribuição no processo de armazenamento das águas pluviais;

- Os telhados tiveram comportamentos distintos dentro das diferentes estações do ano, e ao longo dos meses, muito dependentes do volume precipitado e temperatura. Períodos mais quentes e com volumes menores de chuva (verão e

primavera), tiveram uma retenção significativamente maior. Em contrapartida, meses que contemplaram estações mais frias e com volumes de precipitação maiores, apresentaram as menores taxas de retenção. Por guardar dependência com a sazonalidade e com as características do clima local, é necessário que os estudos sejam realizados em diferentes regiões do Brasil. De igual forma, o comportamento foi mais efetivo na retenção do escoamento para maiores áreas;

- As análises indicaram que a principal característica da precipitação relacionado ao comportamento dos telhados verdes, foi o volume precipitado. Para os quatro telhados verdes monitorados, a efetividade no controle do escoamento diminuiu à medida que aumentavam os volumes de precipitação. Quando avaliado por faixas volumétricas, para volumes considerados baixos, os telhados tiveram comportamento análogo, com retenção acima de 90%. Para volumes considerados médios e altos, a efetividade na retenção foi diminuindo, porém, desempenho superior ocorreu no telhado verde de maior área (TV12);

- O volume máximo precipitado em 1h de duração, juntamente com a intensidade média também foram variáveis importantes no desempenho dos telhados verdes;

- Foi verificada pouca influência da duração dos eventos e da quantidade de dias precedentes sem precipitação na capacidade de retenção nos telhados verdes;

- Avaliando-se os hidrogramas, menores picos de vazão foram observados no TV12, juntamente com os maiores atrasos no início do escoamento;

- O estabelecimento vegetal mostrou-se bastante variável ao longo do período de monitoramento. Períodos com abundância hídrica e temperaturas mais amenas (fim do inverno e primavera), marcaram as fases de elevado vigor e expressiva biomassa. Por outro lado, períodos mais quentes e com menores disponibilidades hídricas (verão) apresentaram significativo declínio do vigor. Quando comparado o estabelecimento nas distintas escalas, não foram evidenciadas significativas diferenças no estabelecimento e vigor ao longo do período monitorado. A exceção se deu apenas no TV6, tendo como provável fator a influência do sombreamento permanente dessa estrutura por vegetação do entorno.

6 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa apresentou algumas limitações com relação ao sistema de monitoramento. A opção pelo desenvolvimento de um sensor nas características da plataforma Arduino, se deu pela necessidade da elevada precisão das leituras e registros, além da sensibilidade na discretização temporal e baixo custo de aquisição e concepção. Sensores comerciais geralmente remontam a elevado valor financeiro e, na maioria das vezes, não atendem à demanda de precisão. Dessa forma, o sensor desenvolvido apresentou resultados eficientes, porém é uma tecnologia que ainda precisa ser aprimorada para atender as necessidades e condições ambientais para o monitoramento de estruturas verdes.

Apesar de que, para maioria das variáveis monitoradas e avaliadas, a quantidade de dados pôde ser considerada representativa, ressalta-se que um maior período de monitoramentos poderia fornecer uma informação mais precisa e fiel a respeito do real comportamento dos telhados verdes.

Outro fator importante, e como sugestão para objeto de futuras pesquisas, é desenvolver um modelo matemático que reproduza com precisão o escoamento dos telhados verdes para diferentes áreas de drenagem. Esse tipo de ferramenta calibrado e validado, fornece potencial para extrapolar o comportamento para outros cenários, de forma a prever o desempenho sob diferentes situações.

Para uma maior confiabilidade nos resultados obtidos, recomenda-se a continuidade do monitoramento em campo para diferentes escalas e preferencialmente por igual período, para que se possa avaliar, entre outros fatores, a interferência da variabilidade climática, idade do telhado, comportamento do substrato, adaptação vegetal, entre outros, no desempenho no escoamento e retenção.

Por fim, espera-se que este trabalho sirva de base para a continuação de pesquisas voltadas ao uso de telhados verdes, disseminando e fortalecendo a sua contribuição tanto em escala de edificação como à níveis urbanos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C. D. **Avaliação de escala de monitoramento e do comportamento hidrológico na Bacia do Rio Piabanha/RJ.** [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- ARBOIT, N. K. S. **Evapotranspiração da Sedum rupestre em telhados verdes extensivos.** [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2017.
- BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO, B. **Sustentabilidade Urbana na América Latina e Caribe Liderando O Desenvolvimento Sustentável das Cidades.**, 2015. Disponível em:
<https://d37djvu3ytnwxt.cloudfront.net/assets/courseware/v1/fbafc072ad39d8b8b605e44ecb93199a/assetv1:IDBx+IDB4.1x+2016_T1+type@asset+block/Semana_1_Primera_parte__Rev_.pdf>
- BENGTSSON, L.; GRAHN, L.; OLSSON, J. **Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden.** Nordic Hydrology, v. 36, n. 3, p. 259–268, 2004.
- BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, A. H.; GHAFARIANHOSEINI, A. **State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs.** Applied Energy, v. 115, p. 411–428, 2014.
- BERNDTSSON, J. C. **Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review.** Ecological Engineering, v. 36, n. 4, p. 351–360, 2010.
- BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. **How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials.** Building and Environment, v. 48, n. 1, p. 57–65, 2012.
- BICUDO, C. E. DE M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. **Águas Do Brasil Análises Estratégicas.** In: Águas Do Brasil Análises Estratégicas. Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 224.
- CALIFORNIA COASTAL COMMISSION, W. **How Urbanization Affects the Water Cycle.** CA WALUP Partnership, p. 1–4, 2005.
- CARPENTER, C. M. G. et al. **Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations *.** Environmental Pollution, p. 1–9, 2016.
- CARTER, T.; JACKSON, C. R. **Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales.** Landscape and Urban Planning, v. 80, n. 1–2, p. 84–94, 2007.
- CARTER, T.; KEELER, A. **Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems.** Journal of Environmental Management, v. 87, n. 3, p. 350–363, 2008.
- CARTER, T. L.; RASMUSSEN, T. C. **Hydrologic Behavior of Vegetated Roofs.** JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 42, n. 5, p. 1261–1274, 2007.
- CIRIA. **The SUDS manual.** [s.l: s.n.].

- COLLI, M. et al. **Hydrologic performance of green-roof systems from a laboratory test-bed.** n. September, 2010.
- CURRIE, B. A.; BASS, B. **Using Green Roofs to enhance Biodiversity in the City of Toronto.** Response, n. April, p. 47, 2010.
- DRISCOLL, C. T. et al. **Green Infrastructure: Lessons from Science and Practice.** Science Policy Exchange, n. June, p. 32, 2015.
- ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISSETTI, T. **Performance and implementation of low impact development – A review.** Science of the Total Environment, v. 607–608, p. 413–432, 2017.
- ELLIOTT, R. M. et al. **Green roof seasonal variation:** Comparison of the hydrologic behavior of a thick and a thin extensive system in New York City. Environmental Research Letters, v. 11, n. 7, 2016.
- FASSMAN-BECK, E. et al. **4 Living roofs in 3 locations:** Does configuration affect runoff mitigation? Journal of Hydrology, v. 490, p. 11–20, 2013.
- FENG, Y.; BURIAN, S. J.; PARDYJAK, E. R. **Observation and estimation of evapotranspiration from an irrigated green roof in a rain-scarce environment.** Water (Switzerland), v. 10, n. 3, p. 13–21, 2018.
- FLETCHER, T. D. et al. **SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage.** Urban Water Journal, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.
- FLL, F. L. L. **Guidelines for the Planning , Execution and Upkeep of Green-roof sites.** [s.l: s.n.].
- FRANCZYK, J.; CHANG, H. **Advanced Bash-Scripting Guide An in-depth exploration of the art of shell scripting Table of Contents.** Hydrological Processes, v. 23, p. 805–815, 2009.
- GETTER, K. L.; ROWE, D. B. **The role of extensive green roofs in sustainable development.** HortScience, v. 41, n. 5, p. 1276–1285, 2006.
- GOLDEN, H. E.; HOGHOOGHI, N. **Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science.** WIREs Water Published by Wiley Periodicals, v. 5, p. 14, 2018.
- GOVERNMENT OF SOUTH AUSTRALIA. **Water Sensitive Urban Design Technical Manual Greater Adelaide Region.** n. July, 2009.
- GRACESON, A. et al. **The water retention capabilities of growing media for green roofs.** Ecological Engineering, v. 61, n. PA, p. 328–334, 2013.
- GSA. A Report of the United States General Services Administration. **The Benefits and Challenges of Green Roofs on Public and Commercial Buildings.** n. May, 2011.
- GWENZI, W.; NYAMADZAWO, G. **Hydrological Impacts of Urbanization and Urban Roof Water Harvesting in Water-limited Catchments: A Review.** Environmental Processes, v. 1, n. 4, p. 573–593, 2014.
- HAKIMDAVAR, R. et al. **Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying**

the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological Engineering*, v. 73, p. 494–508, 2014.

HARPER, G. E. et al. **Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri , USA.** Elsevier B.V., 2014.

HILTEN, R. N.; LAWRENCE, T. M.; TOLLNER, E. W. **Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D.** *Journal of Hydrology*, v. 358, n.3–4, p. 288–293, 2008.

HOBAN, A.; WONG, T. H. F. **WSUD resilience to Climate Change.** Perth WA: 2006

HYDROTECH. **Garden Roof Planning Guide.** p. 33, 2014.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.** Rio de Janeiro: [s.n.].

IGRA, A. I. G. R. **Benefits of Green Roofs.**

KOK, K. H. et al. **Evaluation of green roof performances for urban stormwater quantity and quality controls.** *International Journal of River Basin Management*, v. 14, n. 1, p. 1–7, 2016.

KPMG. **The KPMG Green Tax Index.** *Issues and Insights*, p. 108, 2017.

LATSHAW, K.; FITZGERALD, J.; SUTTON, R. **Analysis of Green Roof Growing Media Porosity.** *RURALS: Review of Undergraduate Research in Agricultural and Life Sciences*, v. 4, n. 1, p. Article 2, 2009.

LEE, J. Y.; LEE, M. J.; HAN, M. **A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs.** *Journal of Environmental Management*, v. 152, p. 171–176, 2015.

LIBERALESSO, T. **Telhados Verdes Extensivos: Influência da composição do substrato na retenção hídrica e no desenvolvimento da vegetação.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

LÖBLER, C. A.; SCCOTI, A. A. V.; WERLANG, M. K. **Contribution to the delineation of Pampa and Atlantic Forest biomes in Santa Maria, RS.** *Revista eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 1250–1257, 2015.

LOCATELLI, L. et al. **Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications.** *Journal of Hydrology*, v. 519, n. PD, p. 3237–3248, 2014.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. **Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?** *Landscape and Urban Planning*, v. 77, n. 3, p. 217–226, 2006.

MINETTO, B. **Desenvolvimento de sensores de baixo custo para monitoramento hidrológico.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, 62p., Santa Maria, RS, 2018.

MOHAMMED AHMED, R.; HALIL ALIBABA, A. Z. **An Evaluation of Green roofing in Buildings.** *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 6, n. 1, p. 366–2250, 2016.

MORUZZI, R. B.; MOURA, C. C. DE; BARBASSA, A. P. **The effect of slope and of antecedent soil moisture on quality and quantity of stored, percolated and retained fractions on extensive green roofs.** *Ambiente Construído*, v. 14, n. 3, p. 59–73, 2014.

MOTA, S. **Gestão Ambiental de Recursos Hídricos.** 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

MUÑOZ, J.; GARCÍA, C. **Global research trends in green roofs: benefits, main developments and future needs.** *Researchgate.Net*, v. 10, n. 2, p. 173–185, 2015.

NAWAZ, R.; MCDONALD, A.; POSTOYKO, S. **Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate.** *Ecological Engineering*, v. 82, p. 66–80, 2015.

NBR 15575, A. **Guia para Arquitetos na aplicação da Norma de Desemepnho ABNT NBR 15.575CAU**, 2013. Disponível em:
<http://www.caubr.gov.br/wpcontent/uploads/2015/09/2_guia_normas_final.pdf>

NETO, F. L. **Modelagem De Telhado Verde : Uma Análise Da Eficiência No Controle Do escoamento.** [s.l: s.n.].

NUNES, R. T. S. **Métodos para inserção de técnica em gestão de águas pluviais no processo de planejamento e desenho urbano: Estudos de caso em Guarantã do Norte, na Região Amazônica Brasileira, e na Região Metropolitana de Melbourne, Austrália.** Tese de Doutorado, v. 1, p. 211, 2011.

O'DRISCOLL, M. et al. **Urbanization Effects on Watershed Hydrology and In-Stream Processes in the Southern United States.** *Water*, v. 2, n. 3, p. 605–648, 2010.

OBERNDORFER, E. et al. **Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services.** *BioScience*, v. 57, n. 10, p. 823–833, 2007.

PALMEIRA, A. N. **Balanco de energia em telhado verde.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

POLETO, C. **SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems): Uma Contextualização Histórica.** *Revista Thema*, v. 08, n. 01, p. 1–12, 2011.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S. **The hydrological behaviour of extensive and intensive green roofs in a dry climate.** *Science of the Total Environment*, v. 499, n. 1, p. 284–296, 2014.

ROMAN, C. A. **Controle da drenagem na fonte e sua compatibilização ao plano municipal de saneamento ambiental de Santa Maria.** Dissertação (Mestrado), 2015.

SAADATIAN, O. et al. **A review of energy aspects of green roofs.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 155–168, 2013.

SHUSTER, W. D. et al. **Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review.** *Urban Water Journal*, v. 2, n. 4, p. 263–275, 2005.

SIMMONS, M. T. et al. **Green roofs are not created equal: The hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate.** *Urban Ecosystems*, v. 11, n. 4, p. 339–348, 2008.

- SIMS, A. **Stormwater Management Performance of Green Roofs**. [s.l.] University of Western Ontario London, 2015.
- SIMS, A. W. et al. **Retention performance of green roofs in three different climate regions**. *Journal of Hydrology*, v. 542, p. 115–124, 2016.
- SNODGRASS, E. C.; MCINTYRE, L. **The Green Roof Manual**. London: [s.n.].
- 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*. [s.l.: s.n.].
- STOVIN, V. et al. **The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance**. *Ecological Engineering*, v. 85, p. 159–172, 2015.
- STOVIN, V.; VESUVIANO, G.; DE-VILLE, S. **Defining green roof detention performance**. *Urban Water Journal*, v. 14, n. 6, p. 574–588, 2017.
- SUTTON, R. K. **Green Roof Ecosystems**. [s.l.: s.n.]. v. 223
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3ª ed. Porto Alegre: [s.n.].
- TASSI, R. et al. **Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais**. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 3, p. 139–164, 2014.
- UNITED NATIONS. **World Urbanization Prospects The 2007 Revision Highlights**. Nova York: [s.n.]. v. 1
- VANWOERT, N. D. et al. **Watering regime and green roof substrate design affect Sedum plant growth**. *HortScience*, v. 40, n. 3, p. 659–664, 2005.
- VERSINI, P. A. et al. **Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale**. *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 562–575, 2015.
- VIJAYARAGHAVAN, K. **Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, p. 740–752, 2016.
- VILLARREAL, E. L.; BENGTSSON, L. **Response of a Sedum green-roof to individual rain events**. *Ecological Engineering*, v. 25, n. 1, p. 1–7, 2005.
- WADZUK, B. M. et al. **Evapotranspiration from a Green-Roof Storm-Water Control Measure**. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 139, n. 12, p. 995–1003, 2013.
- WHITTINGHILL, L. J. et al. **Comparison of stormwater runoff from sedum, native prairie, and vegetable producing green roofs**. *Urban Ecosystems*, v. 18, n. 1, p. 13–29, 2015.
- WONG, G. K. L.; JIM, C. Y. **Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime**. *Ecological Engineering*, v. 70, p. 366–378, 2014.
- WONG, T. H. F. **An Overview of Water Sensitive Urban Design Practices in Australia**. *Water Practice and Technology*, v. 1, n. 1, 2006.

WONG, T. H. F. et al. **Stormwater Management in a Water Sensitive City.** Melbourne, Australia: [s.n.].

ZHANG, Q. et al. **The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution.** Landscape and Urban Planning, v. 144, p. 142–150, 2015.

ZHANG, S.; GUO, Y. **Analytical Probabilistic Model for Evaluating the Hydrologic Performance of Green Roofs.** Journal of Hydrologic Engineering, v. 18, n. 1, p. 19–28, 2013.

ZORZETO, T. Q. et al. **Caracterização física de substratos para plantas.** Bragantia, v. 73, n. 3, p. 300–311, 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Caracterização climática do período

Quadro A.1 – Caracterização climática mensal do período monitorado

VARIÁVEIS	2017						2018						
	NOVEMBRO	DEZEMBRO	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	
Temperatura (°C)	Gráfico T Média												
	T Média	20.90	24.56	24.50	23.37	22.15	22.39	17.22	12.14	13.40	12.90	18.51	19.74
	T Máx Média	21.56	25.23	25.12	24.01	22.76	22.96	17.71	12.67	13.84	13.49	19.01	20.60
	T Min Média	20.24	23.91	23.90	22.75	21.57	21.86	16.75	11.64	12.98	12.33	18.03	18.88
	Normal	21.60	24.10	24.90	24.00	22.90	19.40	16.00	14.20	13.40	15.10	16.40	19.40
Umidade Relativa (%)	Gráfico UR Média												
	UR Média	66.97	70.85	75.22	78.17	78.89	83.50	86.60	88.51	88.05	78.87	82.16	74.91
	UR Máx Média	x	x	x	x	x	x	x	x	x	82.09	84.63	81.88
	UR Min Média	x	x	x	x	x	x	x	x	x	75.45	79.63	71.83
	Normal	70.60	68.70	72.30	76.80	78.50	81.30	83.30	83.70	81.80	78.90	78.50	76.30
Radiação (MJ/m ² .dia)	Gráfico Rad Média												
	Rad Média	24.38	24.03	21.49	22.68	17.71	13.11	9.65	7.87	7.16	10.91	12.87	18.75
	Normal	21.90	23.00	21.70	20.60	17.40	13.70	11.30	9.20	9.80	11.70	14.50	14.50
Velocidade Vento (m/s)	Gráfico V _v Média												
	V _v Média	2.11	2.23	2.09	1.90	1.63	1.53	1.79	1.58	1.83	1.95	2.23	2.39
	Normal	2.40	2.30	2.30	2.10	2.00	2.00	1.90	2.10	2.20	2.30	2.40	2.40
Precipitação Total (mm)	Gráfico P _{Período}												
	P _{Período}	73.60	86.60	131.80	136.20	174.00	149.00	75.40	152.80	155.60	139.80	187.60	89.40
	Normal	132.70	154.30	166.30	139.60	127.70	170.10	154.40	149.10	159.00	111.20	158.50	173.30

Normais: normais climatológicas do Brasil 1981 a 2010 (disponibilizadas pelo INMET). **Normais de Radiação:** retirado do Atlas Climatológico do RS, período de 1976 a 2005, fornecido pelo CEMET (Centro Estadual de Meteorologia) **P_{Período}:** precipitação observada nos meses de monitoramento a partir de dados registrados *in loco* e provenientes do INMET. **Rad:** Radiação; **T:** temperatura; **UR:** umidade relativa; **V_v:** velocidade do vento; **"x":** Dados Indisponíveis

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quadro A.2 - Caracterização climática sazonal do período monitorado

VARIÁVEIS		ESTAÇÕES*			
		OUTONO (01/03 até 31/05)	INVERNO (01/06 até 31/08)	PRIMAVERA (01/09 até 30/11)	VERÃO (01/12 até 28/02)
Temperatura (°C)	Gráfico T Média				
	T Média	20.59	12.81	19.72	24.14
	T Máx Média	21.14	13.33	20.39	24.78
	T Mín Média	20.06	12.32	19.05	23.52
Umidade Relativa (%)	Gráfico UR Média				
	UR Média	83.00	85.14	74.68	74.75
Radiação (MJ/m².dia)	Gráfico Rad Média				
	Rad Média	13.49	8.65	18.67	22.73
Velocidade Vento (m/s)	Gráfico V _v Média				
	V _v Média	1.65	1.79	2.24	2.07
Precipitação Total (mm)	Gráfico P _{Período}				
	P _{Período}	398.40	448.20	350.60	354.60

PPeríodo: precipitação observada nos meses de monitoramento a partir de dados registrados *in loco* e provenientes do INMET. **Rad**: Radiação; **T**: temperatura; **UR**: umidade relativa; **V_v**: velocidade do vento; *Considerado as estações do ano meteorológicas

Fonte: Elaborado pelo Autor

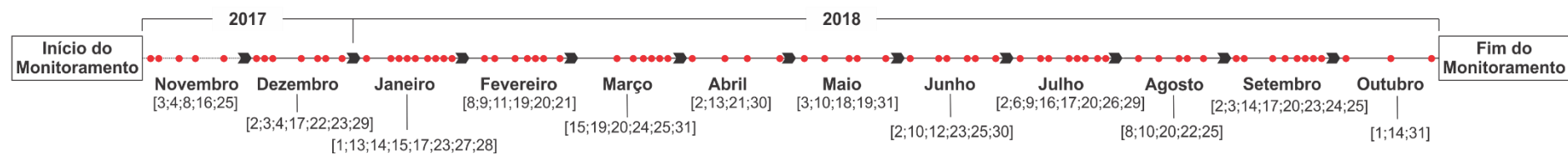
(Continuação)

Evento Coletado	Data Evento	Precipitação INMET (mm)	Precipitação Média Consistida (mm)	Nível Régua (cm)				Escoamento (L/m²)				Coeficiente de Escoamento (CE)				Dias Secos Precedentes	Duração Evento (h)	UAS	Intensidade Média (mm/h)	Máximo Volume Acumulado de Chuva em 1h (mm)	Tipo de Chuva	
				TV1	TV3	TV6	TV12	TV1	TV3	TV6	TV12	TV1	TV3	TV6	TV12							
48	25/06/2018	7.20	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	7	III	1.03	2.40	Frontal
49	30/06/2018	75.40	73.05	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	5	36	I	2.09	10.80	Frontal
50	02/07/2018	16.60	10.50	8.00	22.00	9.00	8.00	9.04	8.28	9.79	5.18	0.86	0.79	0.93	0.49	0.00	1	3	III	3.50	13.40	Convectiva
51	06/07/2018	5.00	5.00	1.50	4.50	2.00	2.50	1.69	1.69	2.11	1.59	0.34	0.34	0.42	0.32	0.00	3	12	II	0.42	0.40	Frontal
52	09/07/2018	3.20	3.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2	20	I	0.16	1.80	Frontal
53	16/07/2018	5.40	5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6	5	I	1.08	4.20	Frontal
54	17/07/2018	59.60	58.35	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	0	20	I	2.98	16.80	Convectiva
55	20/07/2018	17.80	17.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2	11	III	1.62	5.60	Frontal
56	26/07/2018	41.00	38.00	23.00	50.00	21.50	11.00	25.98	18.83	24.74	7.18	0.68	0.50	0.65	0.19	0.00	5	33	II	1.15	6.80	Frontal
57	29/07/2018	6.60	6.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2	9	III	0.73	3.20	Frontal
58	08/08/2018	5.60	5.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10	8	I	0.70	4.60	Frontal
59	10/08/2017	3.20	3.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	16	I	0.20	1.00	Frontal
60	20/08/2018	17.00	15.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9	30	I	0.52	3.60	Frontal
61	22/08/2018	6.60	6.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	11	II	0.60	1.60	Frontal
62	25/08/2018	38.20	39.00	30.00	88.00	31.00	45.00	33.89	33.14	37.15	32.02	0.87	0.85	0.95	0.82	0.00	2	15	I	2.60	10.80	Frontal
63	02/09/2018	94.60	114.60	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	7	95	I	1.21	9.80	Frontal
64	03/09/2018	7.80	7.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	26	III	0.30	1.20	Frontal
65	14/09/2018	13.20	13.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11	44	I	0.30	2.00	Frontal
66	17/09/2018	6.00	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2	20	II	0.30	1.80	Frontal
67	20/09/2018	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5	2	II	1.00	0.80	Frontal
68	23/09/2018	37.20	34.60	20.50	35.00	10.00	13.00	23.16	13.18	10.93	8.53	0.67	0.38	0.32	0.25	0.00	2	11	I	3.15	14.20	Convectiva
69	24/09/2018	46.00	51.23	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	0	8	III	6.40	20.60	Convectiva
70	25/09/2018	6.40	6.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	4	III	1.60	3.00	Frontal
71	01/10/2018	81.00	93.10	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	EE	5	70	I	1.33	20.60	Convectiva
72	14/10/2018	24.40	27.38	20.50	43.00	21.00	20.00	23.16	16.19	24.11	13.36	0.85	0.59	0.88	0.49	0.00	8	48	I	0.57	9.00	Frontal
73	31/10/2018	12.40	12.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16	10	I	1.24	4.80	Frontal

Fonte: Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE C – Linha do tempo correspondente aos eventos monitorados

Figura C.1 – Linha do tempo para os eventos de precipitação monitorados em ordem cronológica

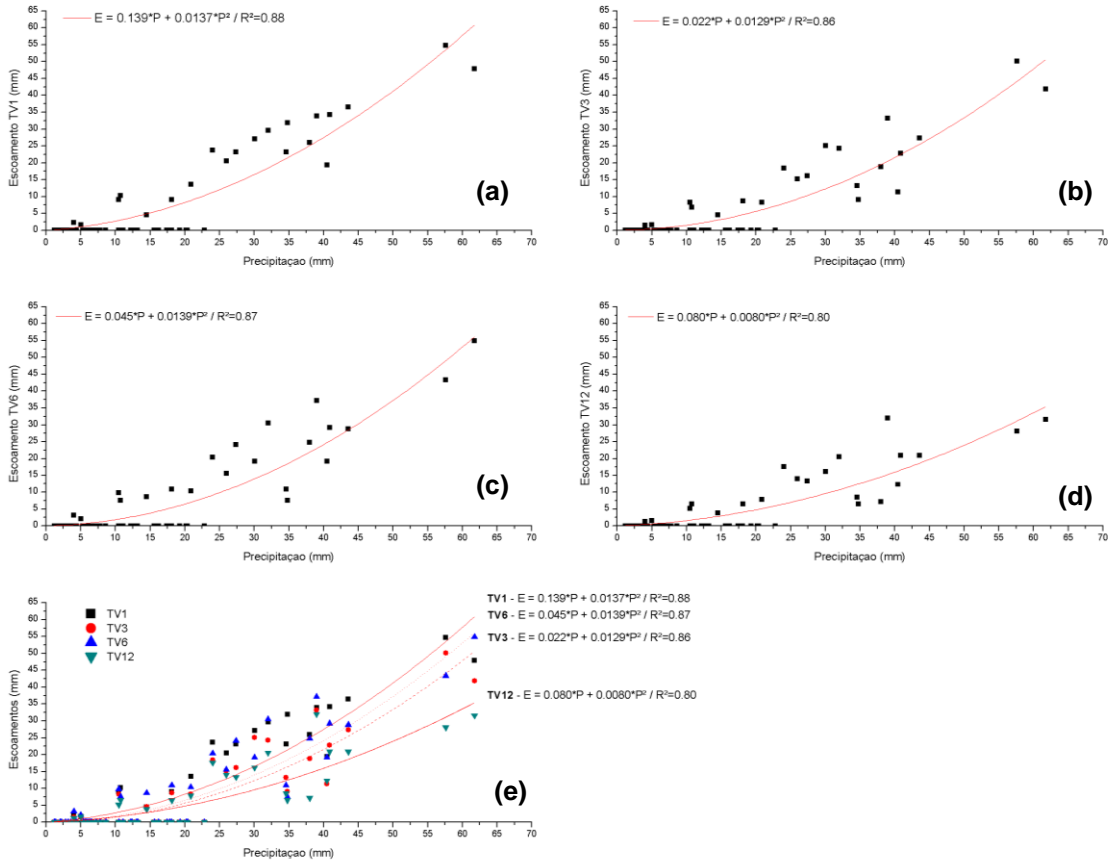


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observação: Os valores que se encontram inseridos nos colchetes, correspondem ao dia em que ocorreu o evento dentro do respectivo mês.

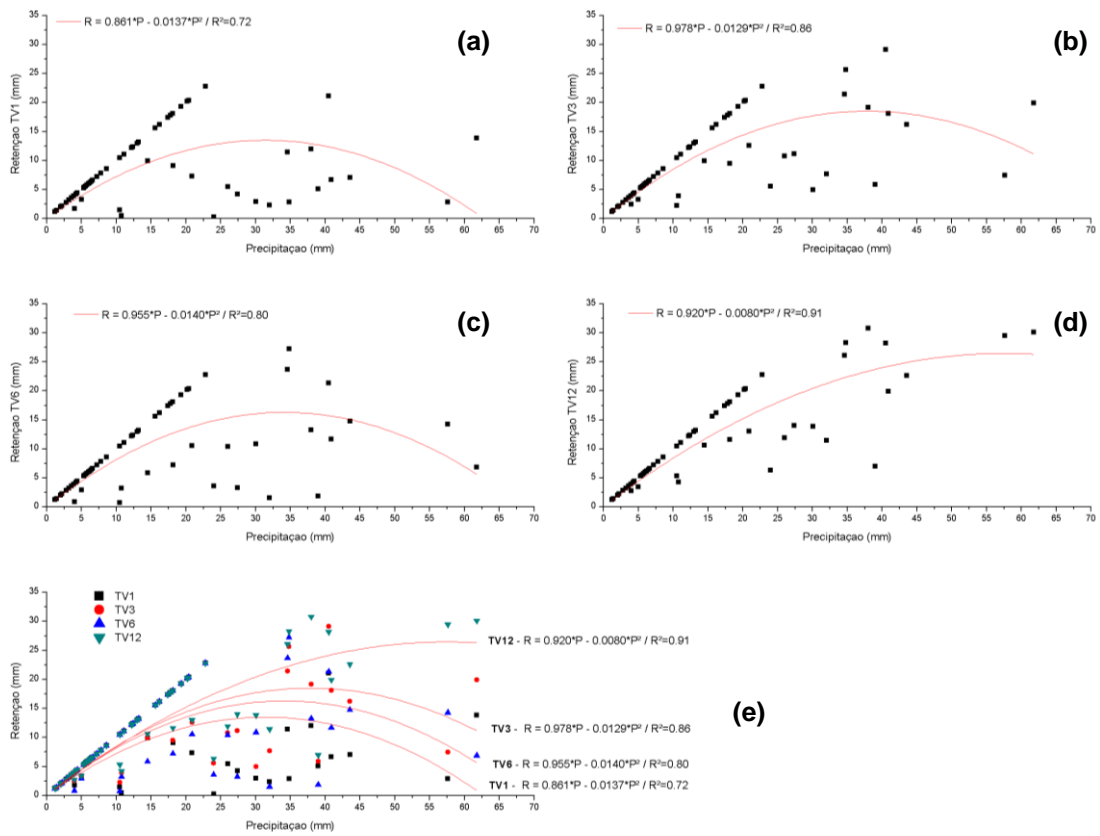
APÊNDICE D – Dados das relações estabelecidas para escoamento e retenção com às características de precipitação nas diferentes escalas

Figura D.1 – Relação entre volume precipitado e volume de escoamento nas diferentes escalas: (a) TV1; (b) TV3; (c) TV6; (d) TV12; (e) Resumo



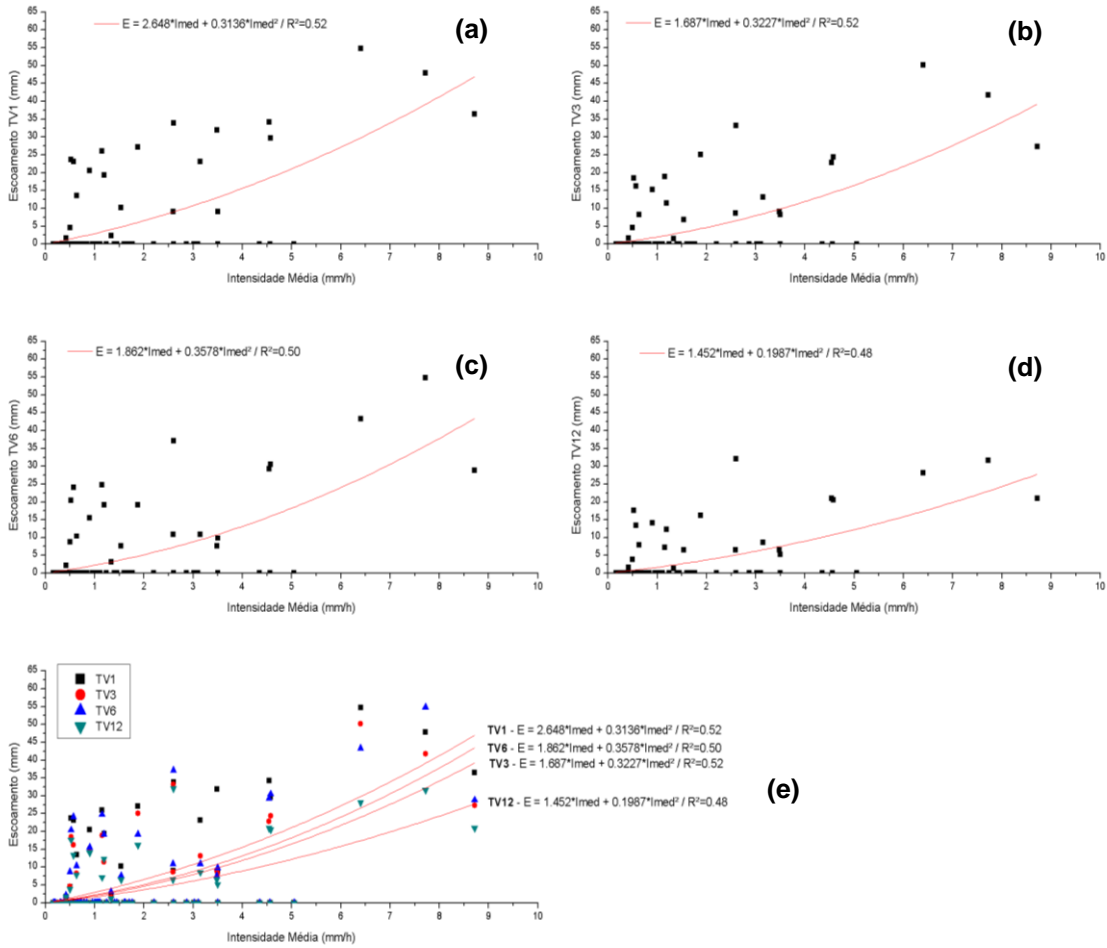
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.2 – Relação entre volume precipitado e volume retido nas diferentes escalas: (a) TV1; (b) TV3; (c) TV6; (d) TV12; (e) Resumo



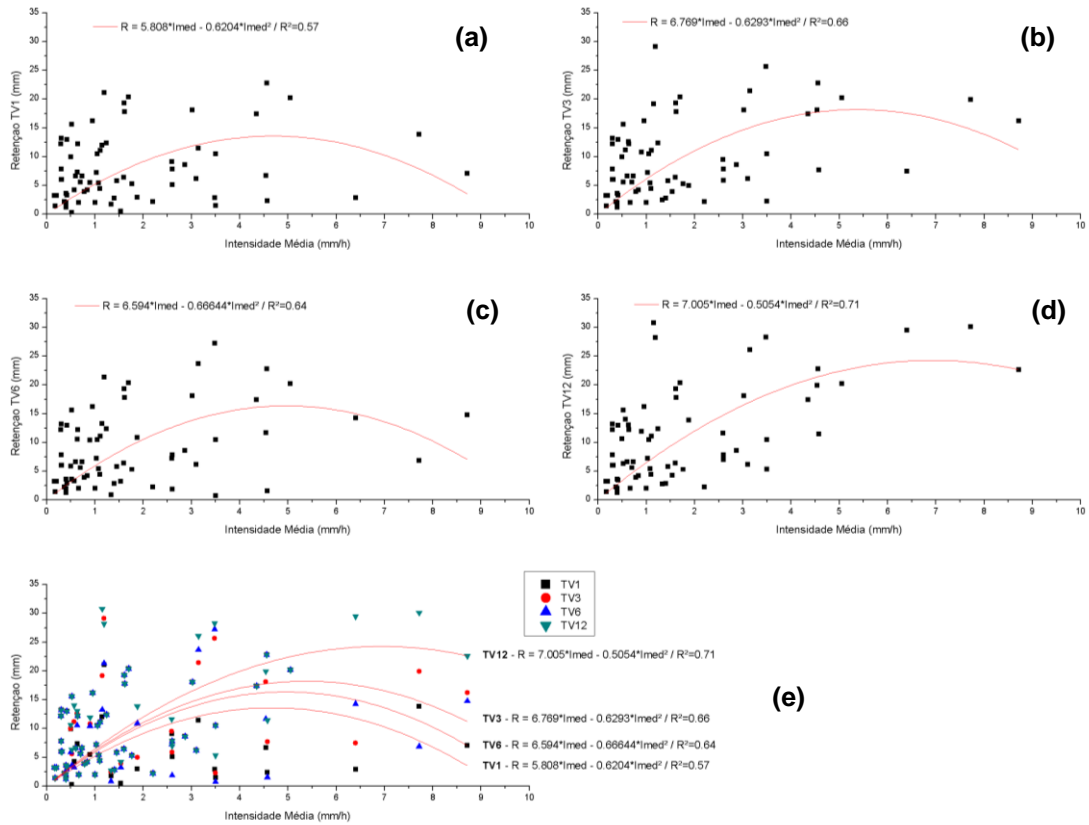
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.3 – Relação entre intensidade média da precipitação e volume de escoamento nas diferentes escalas: (a) TV1; (b) TV3; (c) TV6; (d) TV12; (e) Resumo



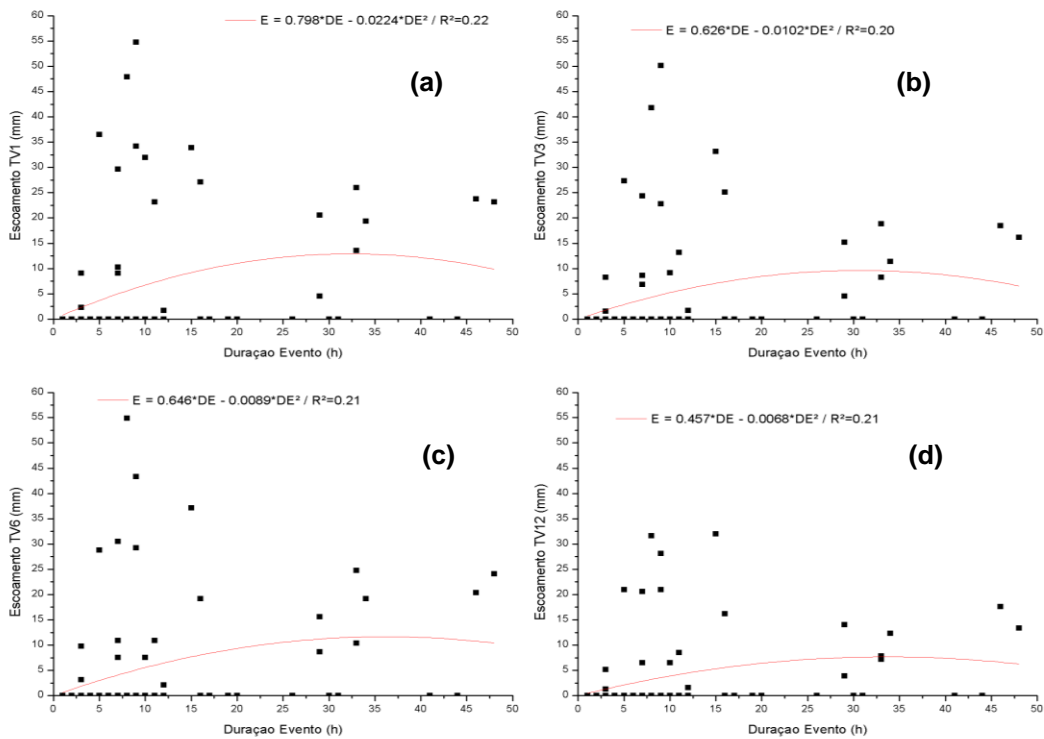
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.4 - Relação entre intensidade média de precipitação e volume de retenção nas diferentes escalas: (a) TV1; (b) TV3; (c) TV6; (d) TV12; (e) Resumo



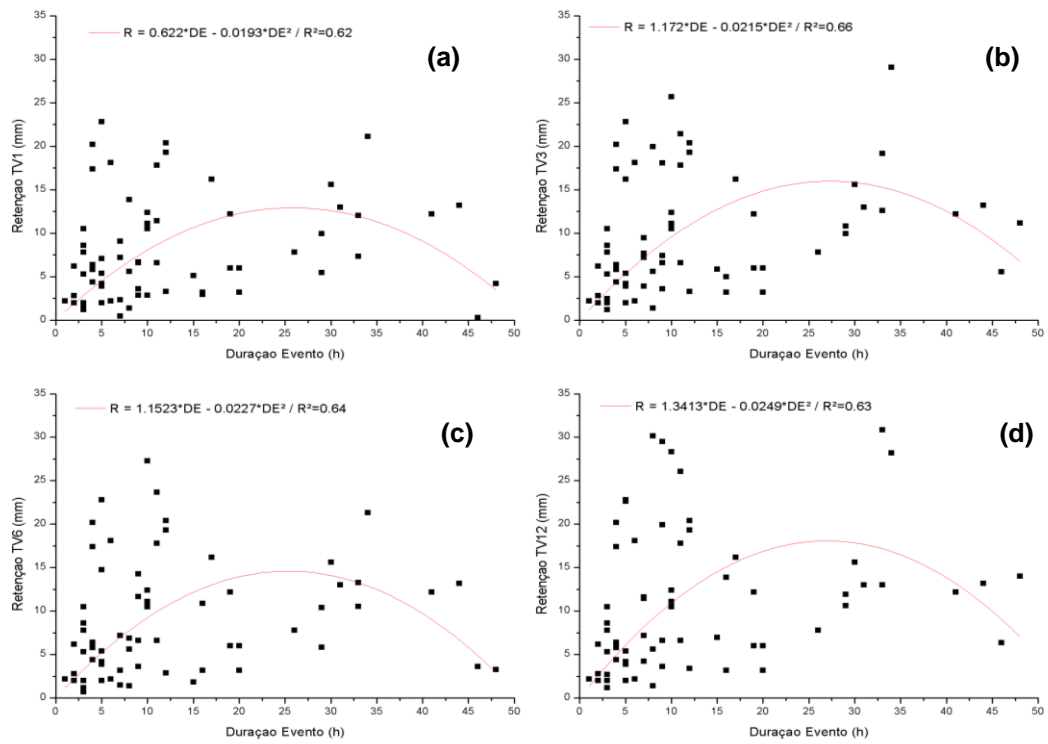
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.5 – Relação entre a duração do evento e volume de escoamento nas diferentes escalas: (a) TV1; (b) TV3; (c) TV6; (d) TV12



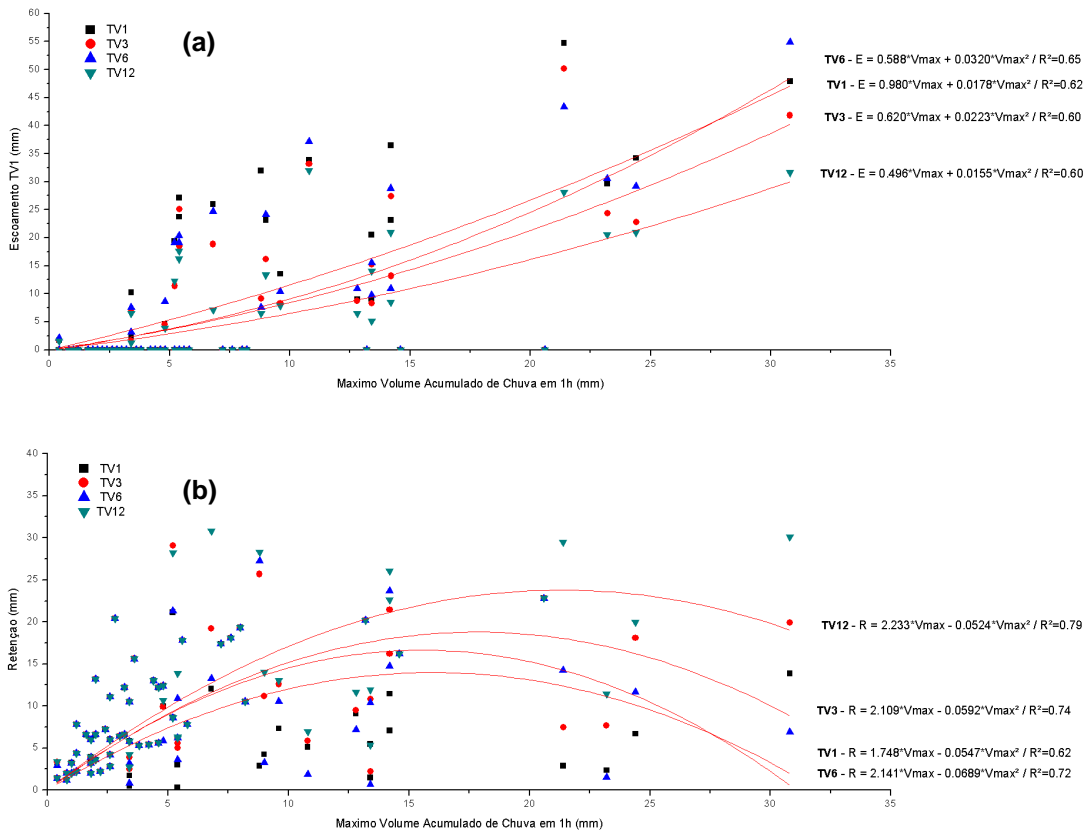
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.6 – Relação entre a duração do evento e retenção para as diferentes escalas: (a) TV1; (b) TV3; (c) TV6; (d) TV12



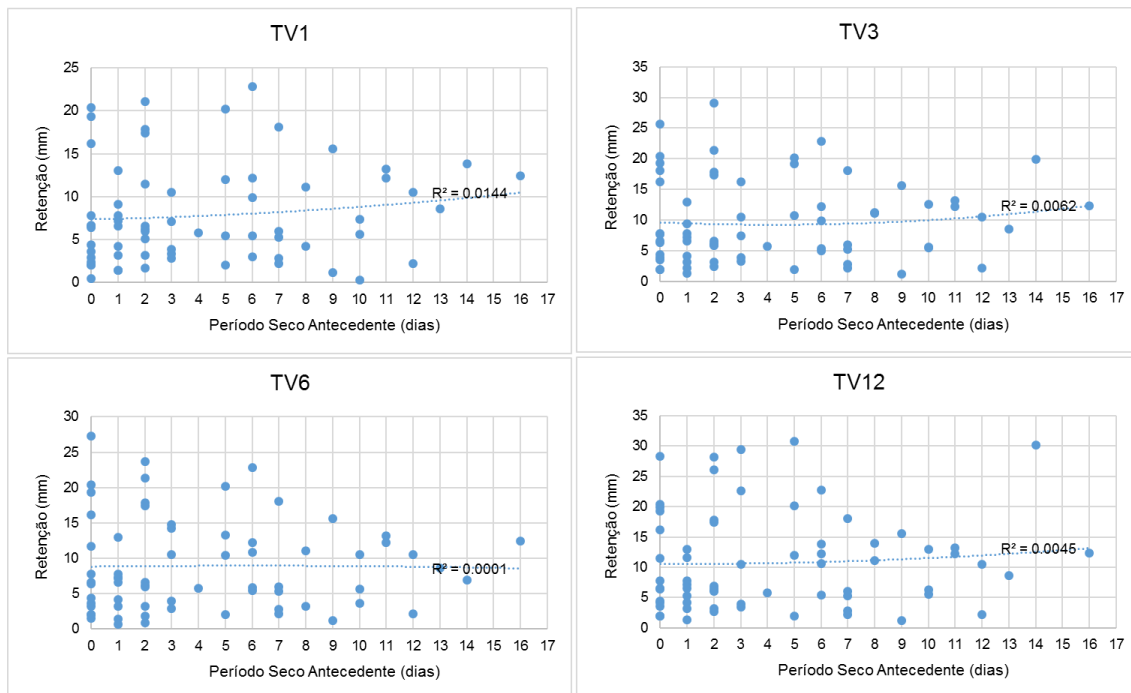
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.7 – Influência do volume máximo precipitado em 1h no volume de escoamento (a) e retenção (b) para as diferentes escalas



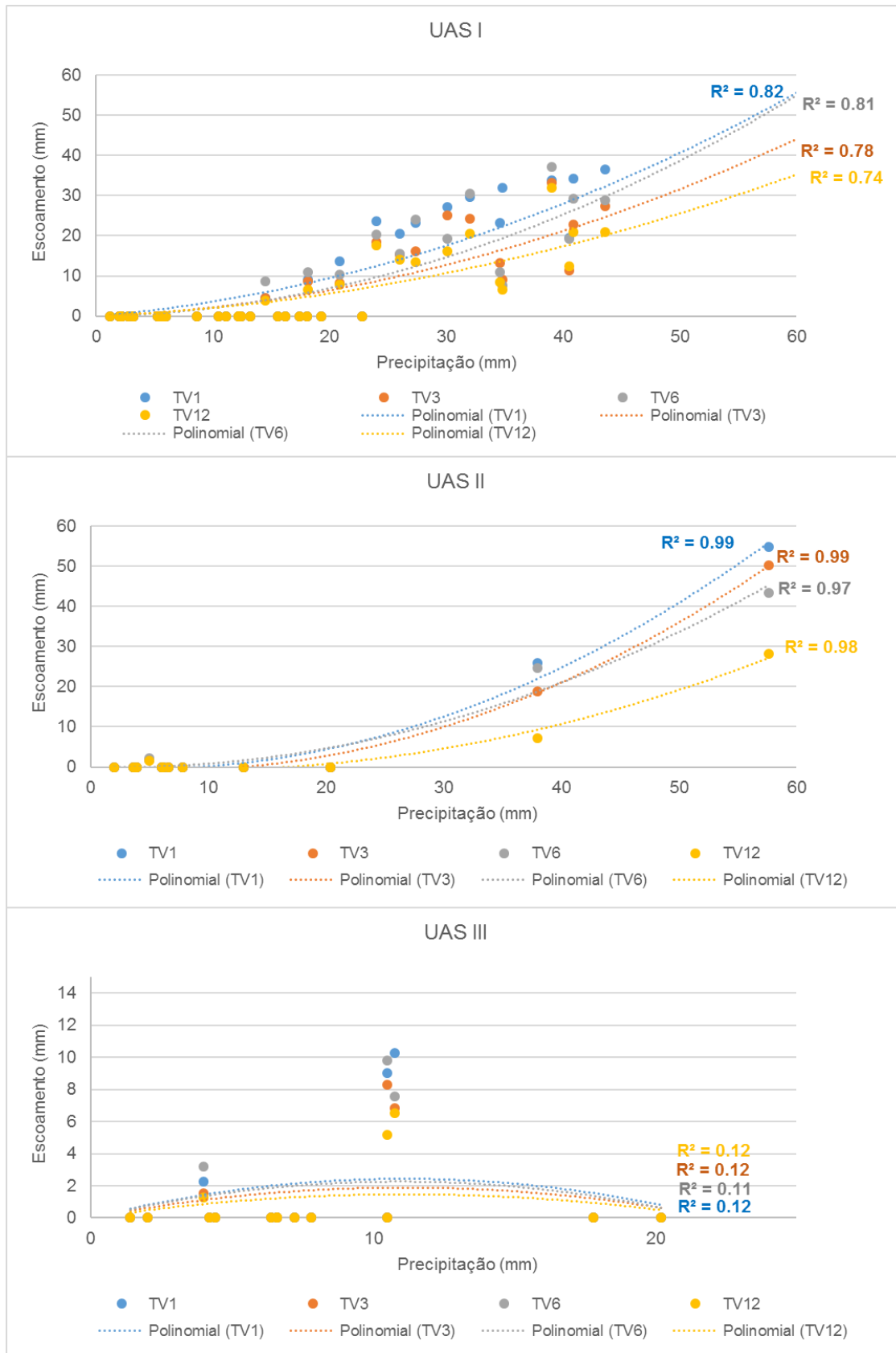
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.8 – Influência do período antecedente sem precipitação na retenção do escoamento para as diferentes escalas



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.9 – Influência da UAS no escoamento para as diferentes escalas



Fonte: Elaborado pelo Autor.

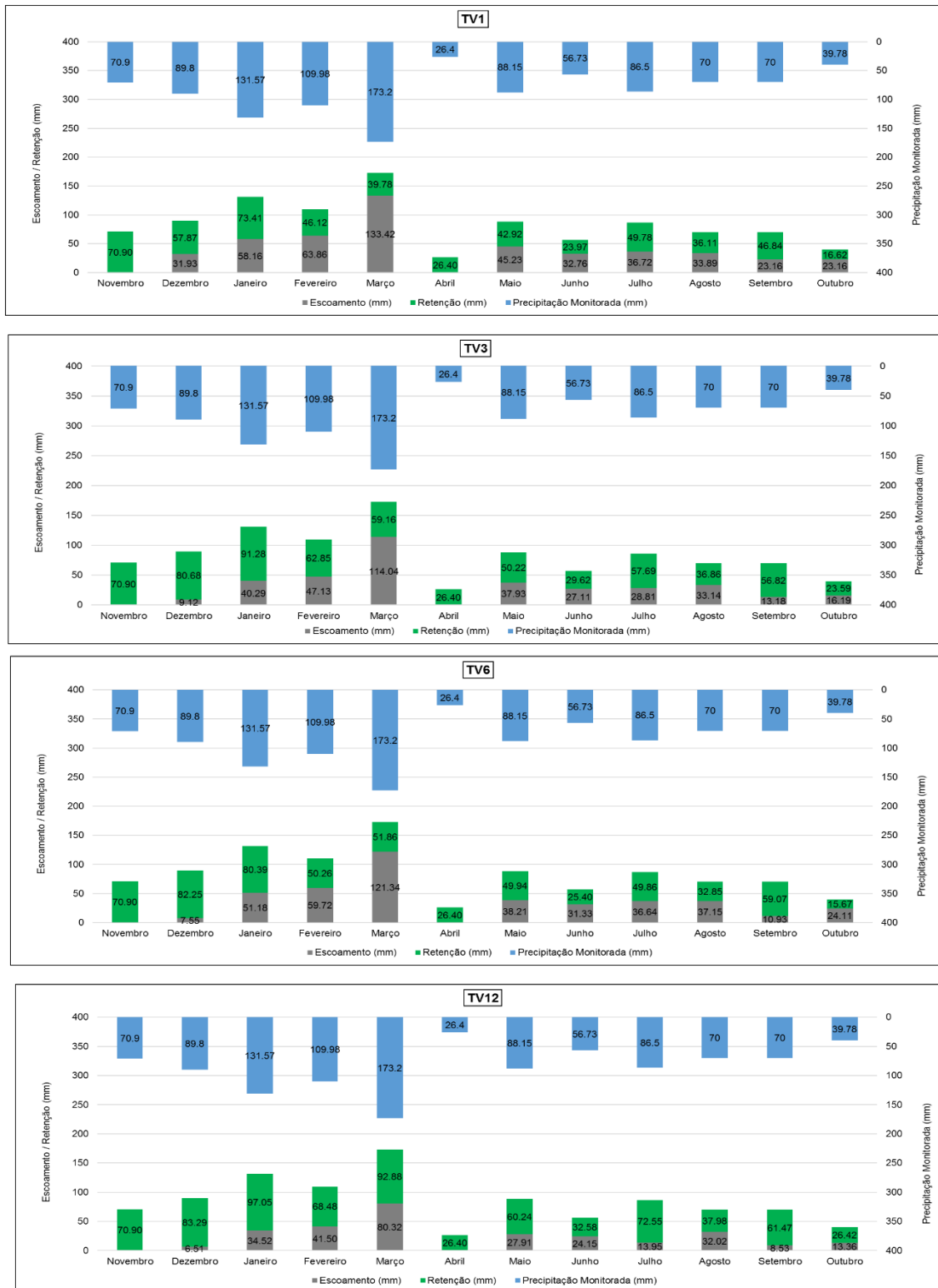
Tabela D.1 – Coeficientes de correlação de Spearman

		Volume Precipitado (mm)	Duração do Evento (h)	Intensidade Média (mm/h)	Volume Máximo Precipitado em 1h (mm)	Período Seco Antecedente (dias)
Escoamento (mm)	TV1	● 0.68	● 0.27	● 0.39	● 0.6	● -0.001
	TV3	● 0.68	● 0.28	● 0.38	● 0.6	● 0.004
	TV6	● 0.69	● 0.28	● 0.37	● 0.6	● 0.006
	TV12	● 0.68	● 0.29	● 0.37	● 0.6	● 0.005
Retenção (mm)	TV1	● 0.52	● 0.32	● 0.23	● 0.39	● 0.15
	TV3	● 0.82	● 0.42	● 0.41	● 0.65	● 0.07
	TV6	● 0.68	● 0.35	● 0.35	● 0.5	● 0.06
	TV12	● 0.92	● 0.47	● 0.49	● 0.75	● 0.09
Descrição:		● Forte	● Moderado	● Fraco		

Fonte: Elaborado pelo Autor.

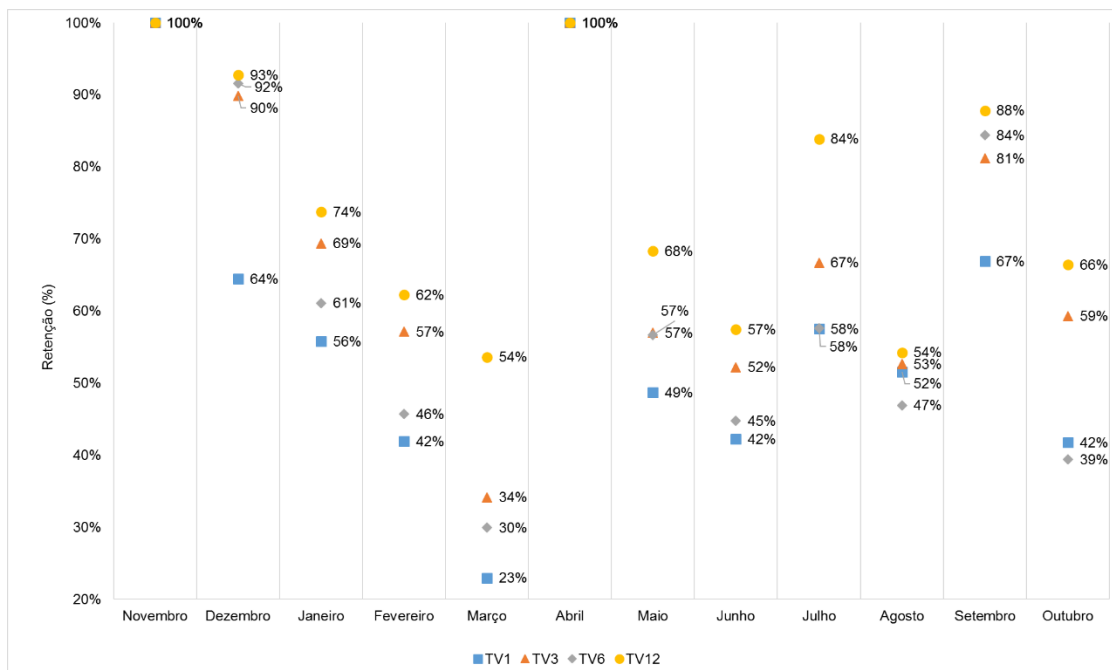
APÊNDICE E – Dados de escoamento e retenção mensal para as diferentes escalas de telhado verde

Figura E.1 – Volmes de retenção e escoamento mensal nas diferentes escalas de telhados verdes



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura E.2 – Porcentagens de retenção mensal nas diferentes escalas de telhados verdes



Fonte: Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE F – Hidrogramas e análise do comportamento para as diferentes escalas

Tabela F.1 - Resumo dos resultados das análises para as variáveis dos hidrogramas nas diferentes escalas em discretização de 5 segundos e 30 minutos (parte 1)

*Evento	**Início chuva / Início escoamento (h)								**Início de chuva / Vazão Máxima (h)								**Início Escoamento / Vazão Máxima (h)**							
	TV1		TV3		TV6		TV12		TV1		TV3		TV6		TV12		TV1		TV3		TV6		TV12	
	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min
(11) 23/12/2017	x	x	x	x	x	x	4.13	4.5	x	x	x	x	x	x	11.59	5	x	x	x	x	x	x	7.46	0.5
(18) 20/01/2018	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0.5	8.3	2	6.36	6
(20) 27/01/2018	1.35	1.5	x	x	x	x	1.85	2	1.35	3	x	x	x	x	9.02	3.5	0	1.5	x	x	x	x	7.16	1.5
(23) 09/02/2018	x	x	3.41	3.5	1.24	1	2.48	2.5	x	x	3.41	3.5	8.56	3	7.6	5	x	x	0	0	7.32	2	5.12	2.5
(26) 20/02/2018	x	x	0.49	0.5	0.25	0.5	0.37	0.5	x	x	0.49	1.5	6.84	1	8.84	1.5	x	x	0	1.5	6.58	1	8.47	1.5
(29) 15/03/2018	x	x	x	x	2.13	2	3.2	3	x	x	x	x	8.48	3	6.5	3.5	x	x	x	x	6.35	1	3.3	0.5
(32) 24/03/2018	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	20.86	5.5	10.43	0.5
(34) 31/03/2018	x	x	x	x	5.58	5.5	8.16	8	x	x	x	x	47.38	47.5	50.95	50.5	x	x	x	x	41.8	41.5	42.78	42.5
(42) 19/05/2018	8.62	8.5	x	x	6.3	6	12.98	12.5	8.62	28	x	x	32.5	26.5	40.27	30.5	0	19.5	x	x	26.2	20.5	27.29	18
(46) 12/06/2018	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	0	0.5	5.34	0.5	26.49	8
(47) 23/06/2018	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0.5	0	0	x	x	49.86	1.5
(62) 25/08/2018	x	x	2.45	2	0.55	0.5	2.21	2	x	x	2.45	4	8.04	2.5	5.69	2.5	x	x	0	2	7.48	2	3.48	0.5
(72) 14/10/2018	7.69	7.5	x	x	7.02	7	5.85	5.5	7.69	8	x	x	16.22	7	15.15	6	0	0.5	x	x	9.2	0	9.3	0.5

*Valor entre parênteses indica o número do evento / ** (x) Dado não determinado por problemas no sistema de monitoramento

Fonte: Elaborado pelo Autor.

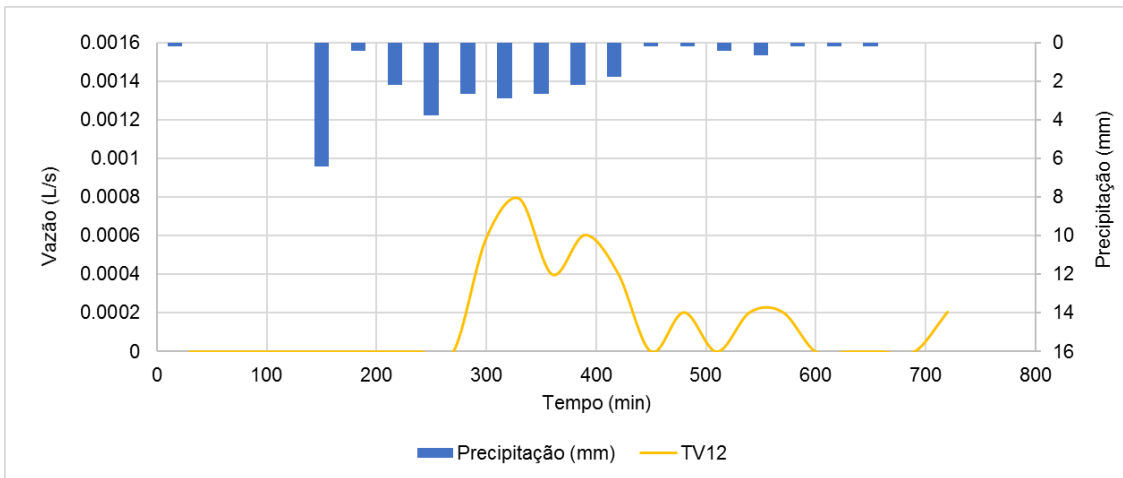
Tabela F.2 - Resumo dos resultados das análises para as variáveis dos hidrogramas nas diferentes escalas em discretização de 5 segundos e 30 minutos (parte 2)

*Evento	**Vazão Máxima ÷ Área (5s - L/s) e (30min - L/s x 10 ⁻³)								**Tempo de Concentração (h)							
	TV1		TV3		TV6		TV12		TV1		TV3		TV6		TV12	
	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min	5 seg	30 min
(11) 23/12/2017	x	x	x	x	x	x	0.0741	0.6087	x	x	x	x	x	x	2.31	2
(18) 20/01/2018	x	x	0.152	1.2671	0.3418	1.8207	0.0521	1.0728	x	x	x	x	x	x	x	x
(20) 27/01/2018	0.52	4.3447	x	x	x	x	0.1508	2.3221	0.07	0.5	x	x	x	x	0.33	0.5
(23) 09/02/2018	x	x	0.1473	3.2775	0.233	5.5084	0.1575	2.8938	x	x	2.19	2	2.56	2.5	1.6	1.5
(26) 20/02/2018	x	x	0.163	4.071	0.3065	8.1489	0.1733	3.4291	x	x	0.4375	0	0.81	0.5	2.83	2.5
(29) 15/03/2018	x	x	x	x	0.3205	14.316	0.1556	5.5731	x	x	x	x	2.42	2.5	0.44	0.5
(32) 24/03/2018	x	x	x	x	0.275	4.0787	0.1371	1.6132	x	x	x	x	x	x	x	x
(34) 31/03/2018	x	x	x	x	0.2537	0.7048	0.1643	0.4565	x	x	x	x	4.38	4	0.38	0
(42) 19/05/2018	0.181	1.0042	x	x	0.2567	1.3445	0.156	0.8136	1.81	2	x	x	x	0	5.93	6
(46) 12/06/2018	0.226	1.2552	0.0787	1.531	0.2843	2.2643	0.148	0.4112	x	x	x	x	x	x	x	x
(47) 23/06/2018	0.226	1.8828	0.077	1.9221	x	x	0.1564	0.7713	x	x	x	x	x	x	x	x
(62) 25/08/2018	x	x	0.1617	2.2451	0.2985	4.095	0.173	3.6744	x	x	1.586	1.5	0.94	1	0	0
(72) 14/10/2018	0.272	2.2705	x	x	0.2912	4.9178	0.1558	2.417	8.97	8.5	x	x	5.877	6	4.81	4.5

*Valor entre parênteses indica o número do evento / ** (x) Dado não determinado por problemas no sistema de monitoramento

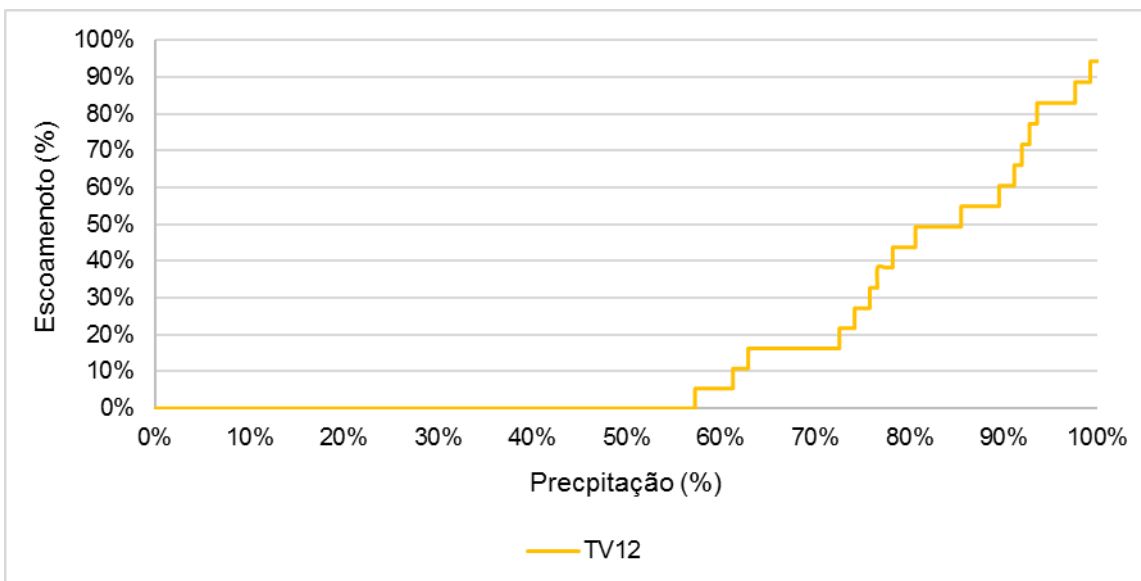
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.1 – Hidrograma do evento 11 (23/12/2017)



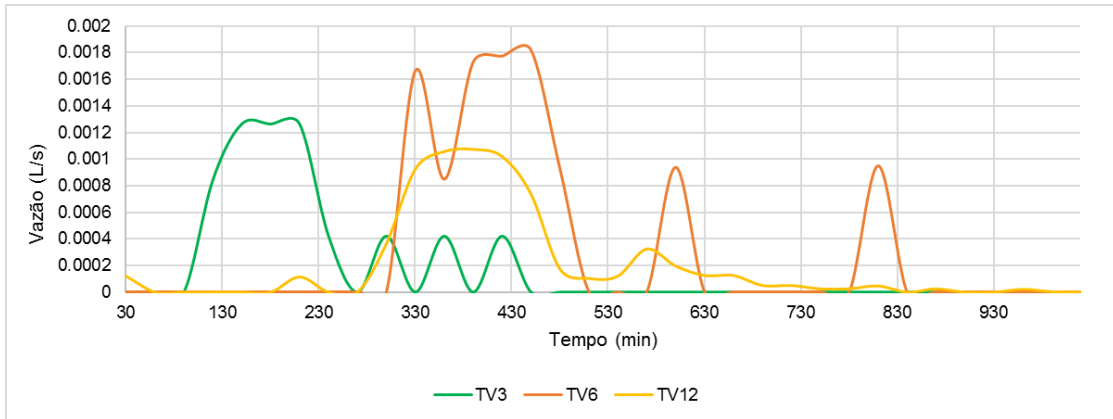
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.2 – Acumulado de precipitação X acumulado de escoamento – Evento 11



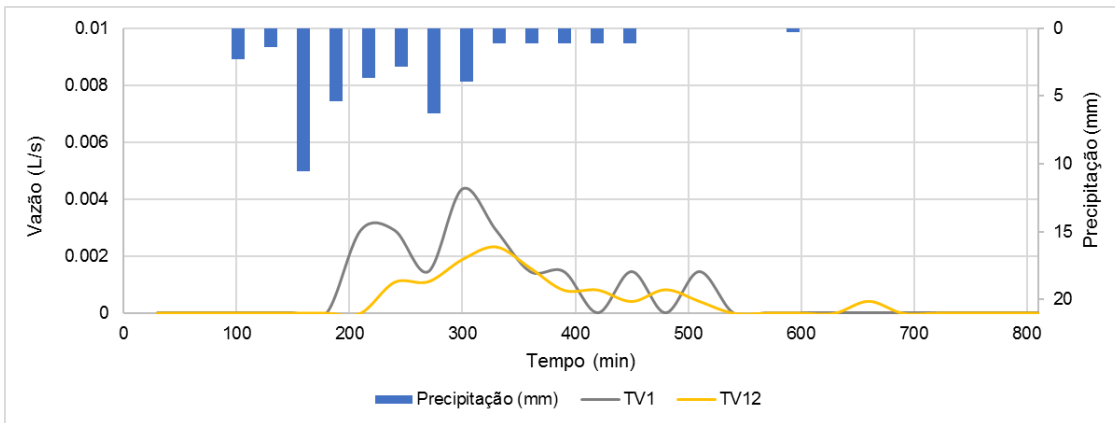
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.3 – Hidrograma do evento 18 (20/01/2018)



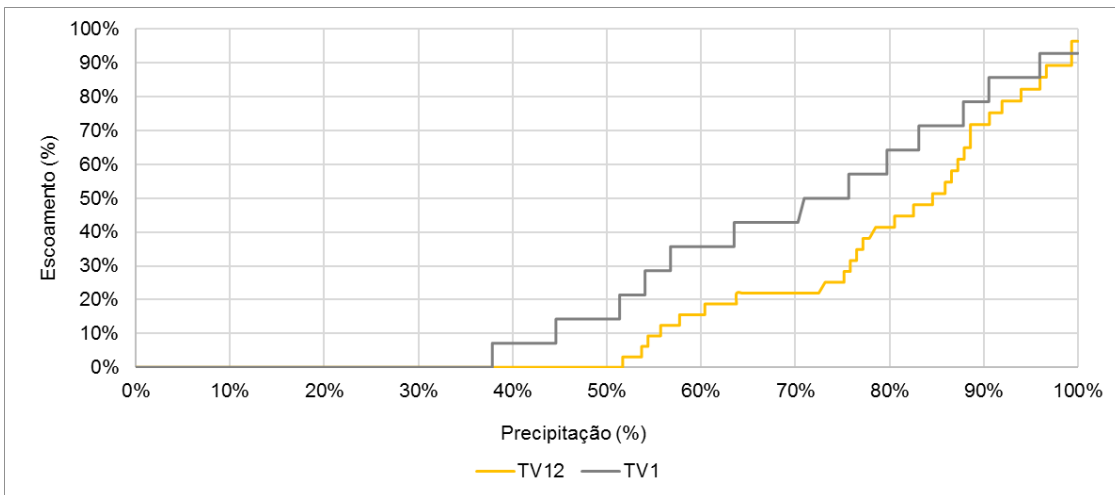
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.4 – Hidrograma do evento 20 (27/01/2018)



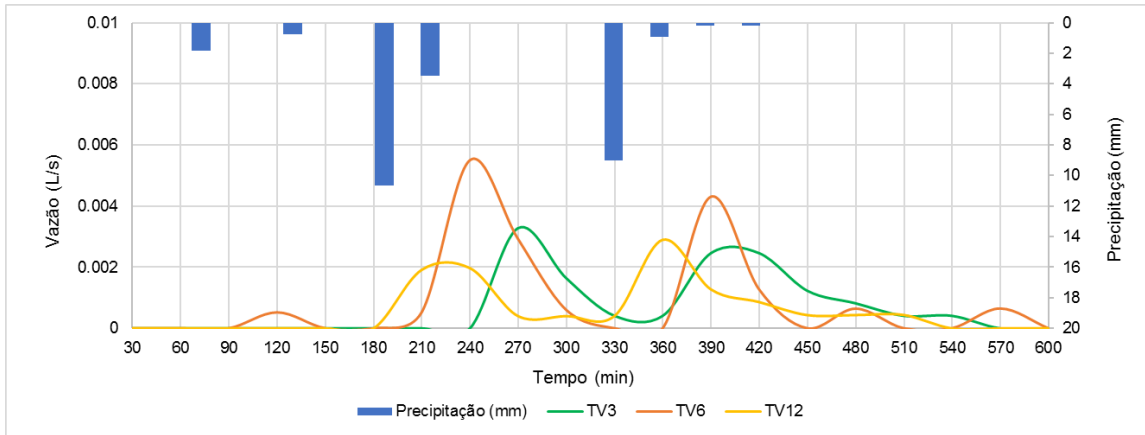
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.5 - Acumulado de precipitação X acumulado de escoamento – Evento 20



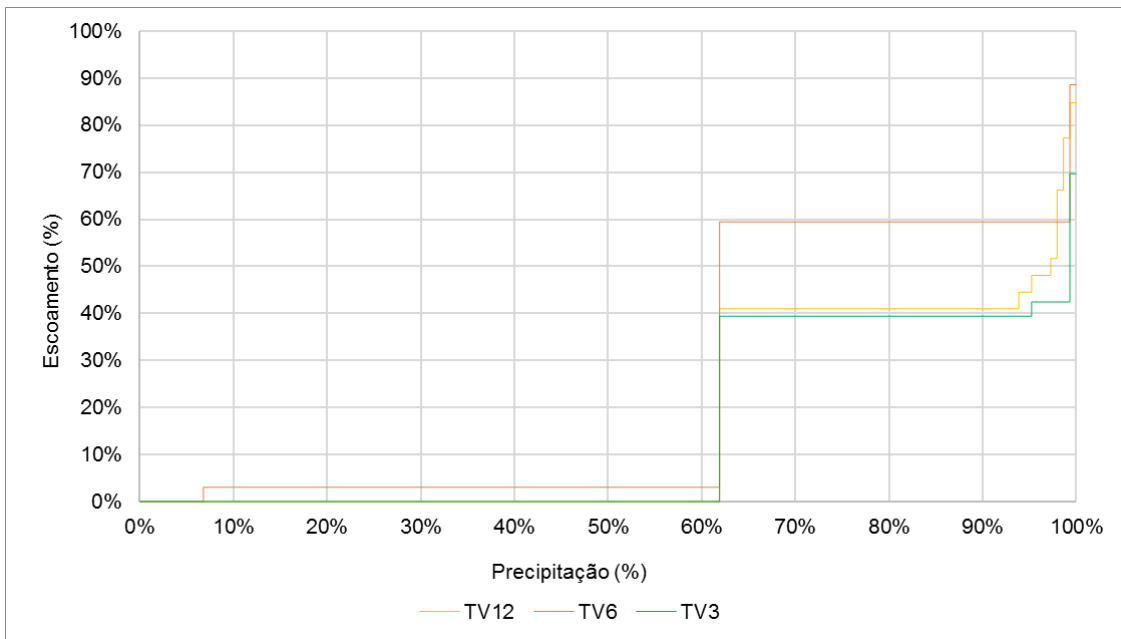
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.6 - Hidrograma do evento 23 (09/02/2018)



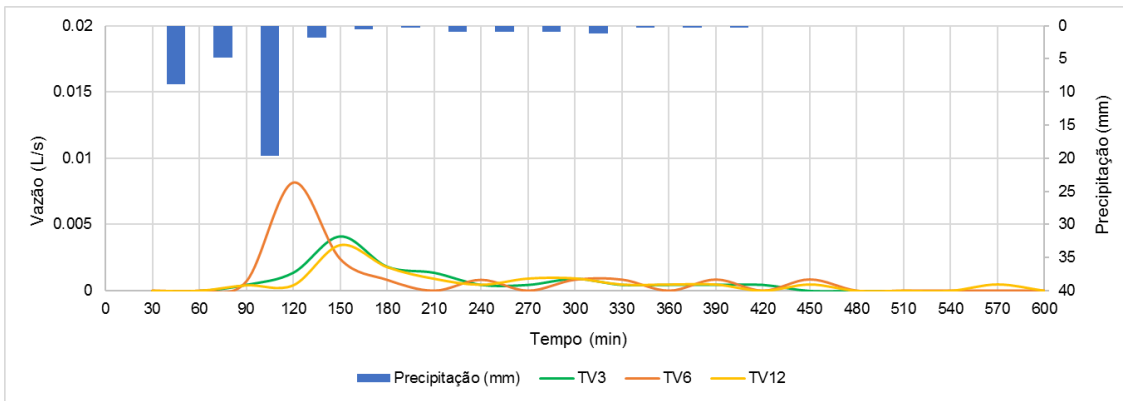
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.7 - Acumulado de precipitação X acumulado de escoamento – Evento 23



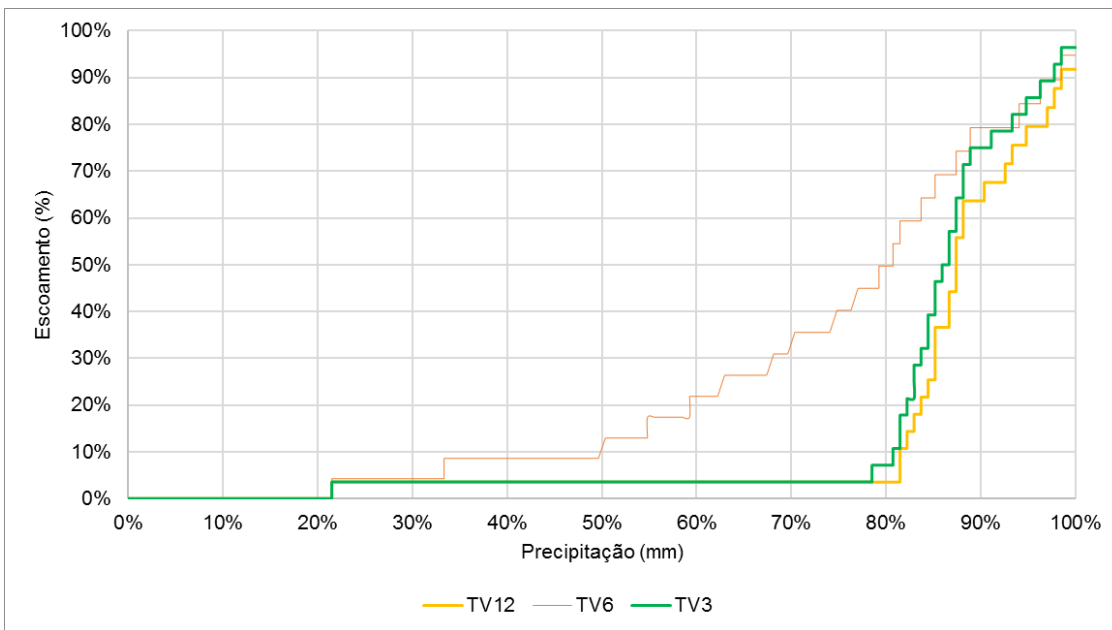
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.8 - Hidrograma do evento 26 (20/02/2018)



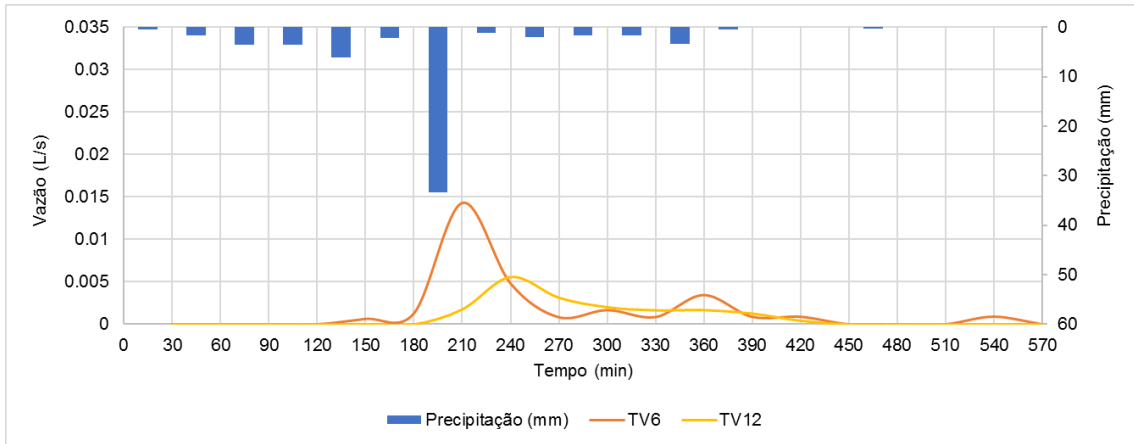
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.9 - Acumulado de precipitação X acumulado de escoamento – Evento 26



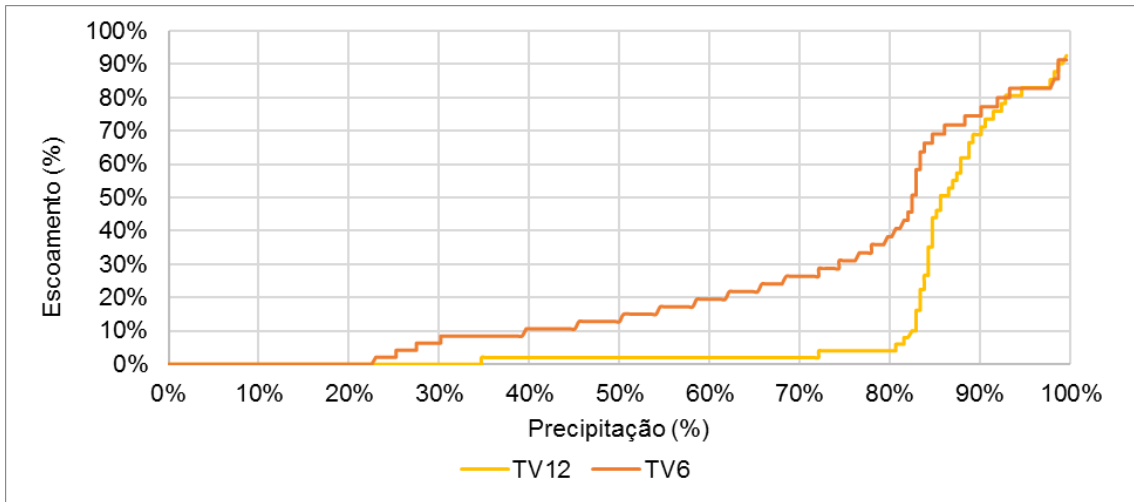
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.10 - Hidrograma do evento 29 (15/03/2018)



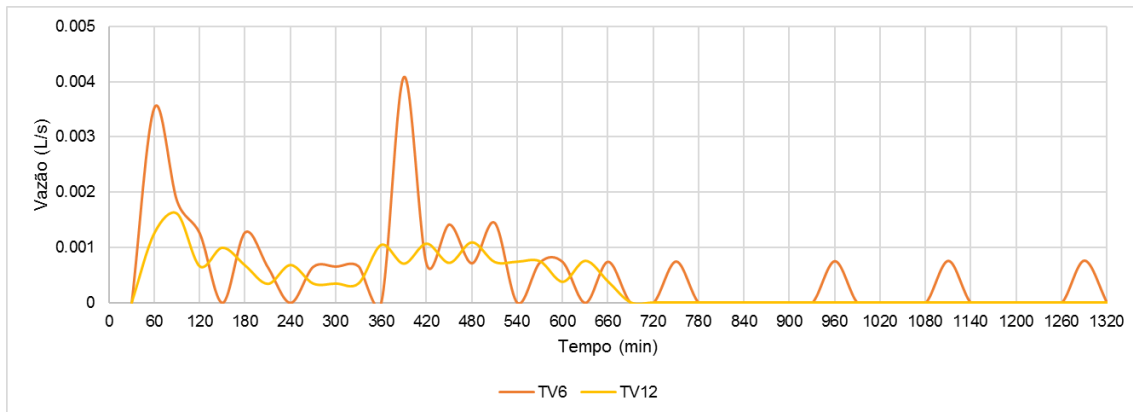
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.11 - Acumulado de precipitação X acumulado de escoamento – Evento 29



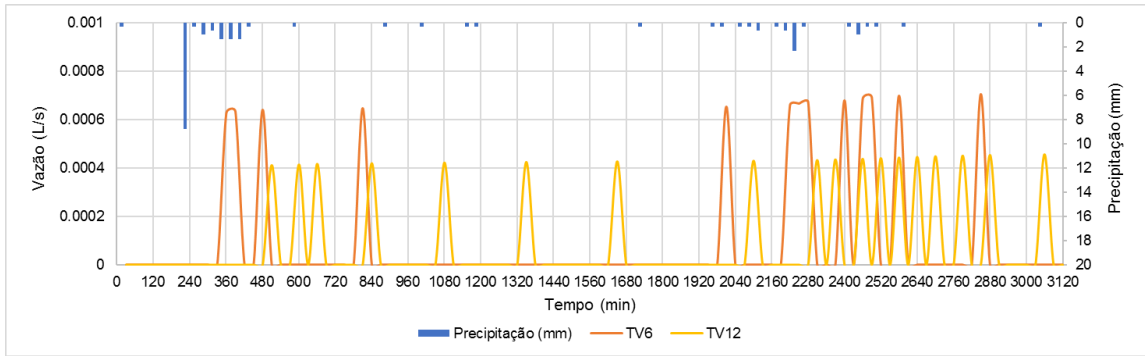
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.12 - Hidrograma do evento 32 (24/03/2018)



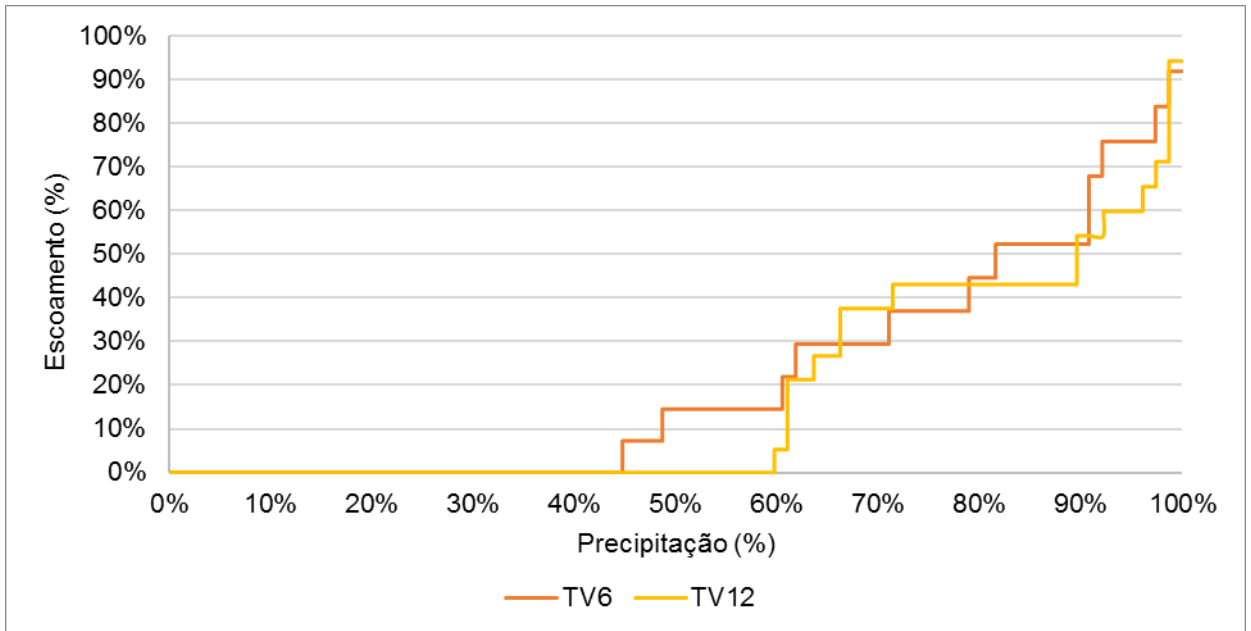
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.13 - Hidrograma do evento 34 (31/03/2018)



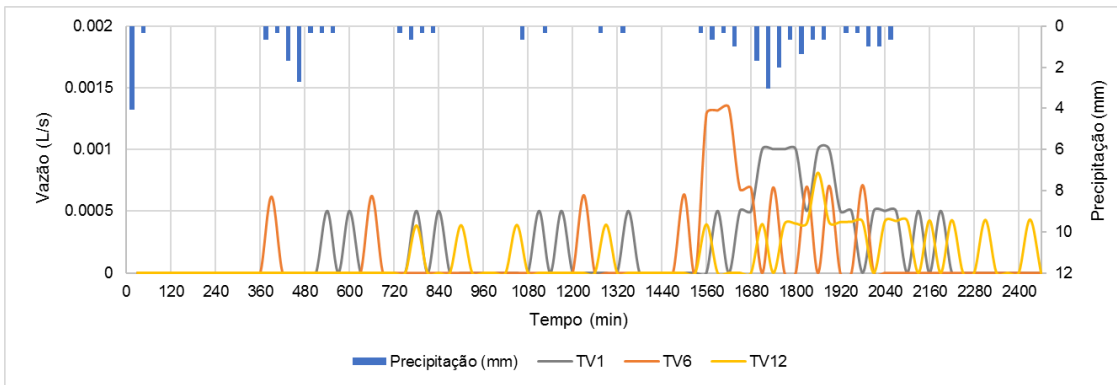
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.14 - Acumulado de precipitação X acumulado de escoamento – Evento 34



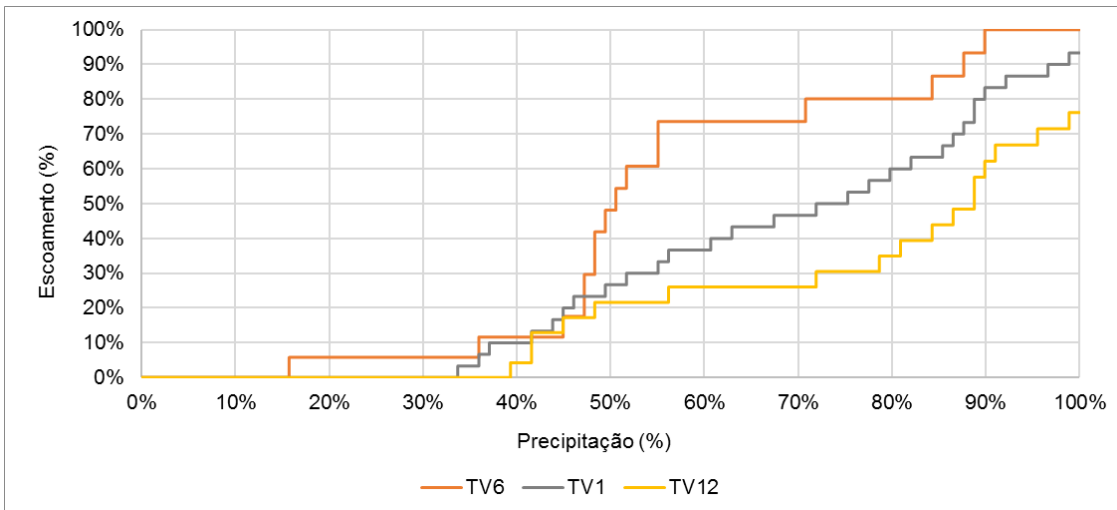
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.15 - Hidrograma do evento 42 (19/05/2018)



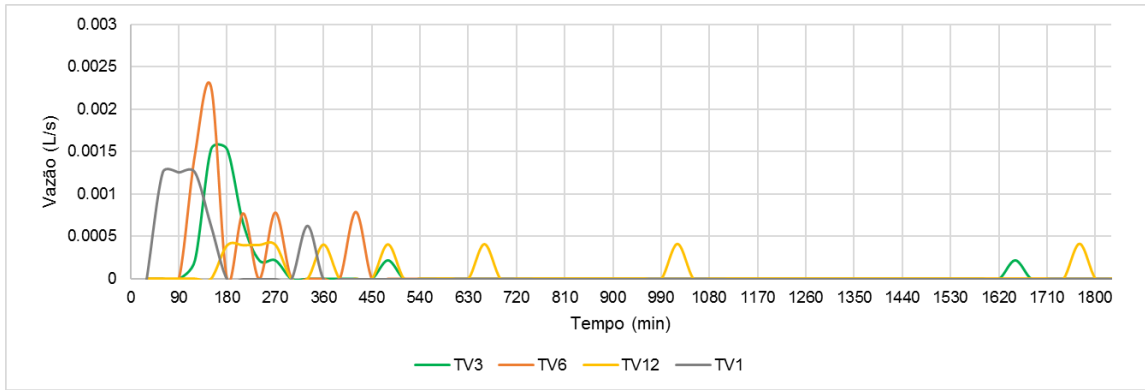
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.16 - Acumulado de precipitação X acumulado de escoamento – Evento 42



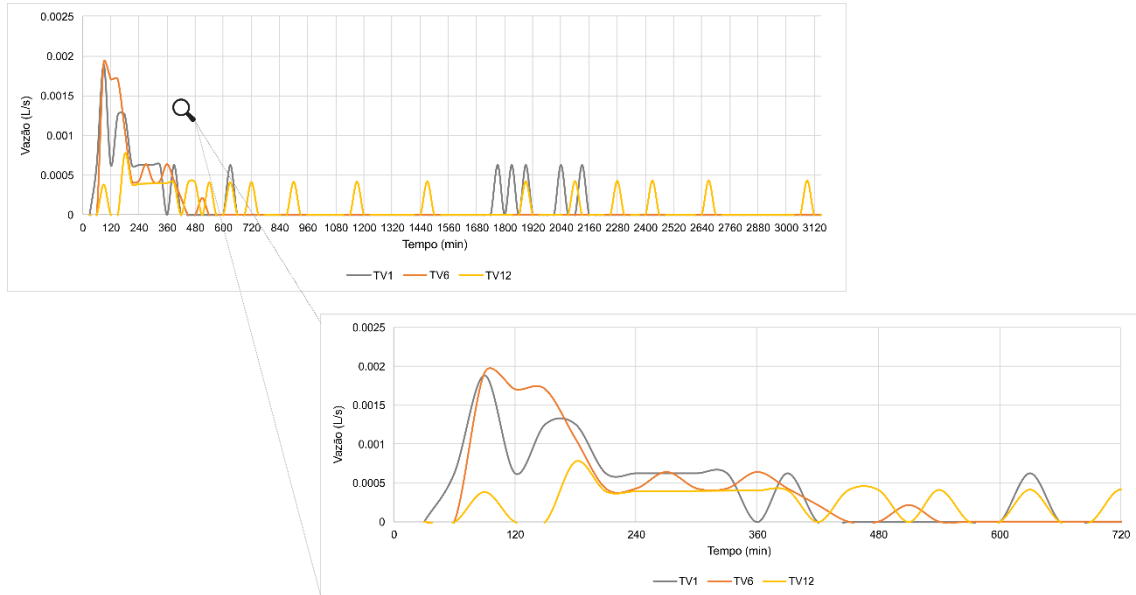
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.17 - Hidrograma do evento 46 (12/06/2018)



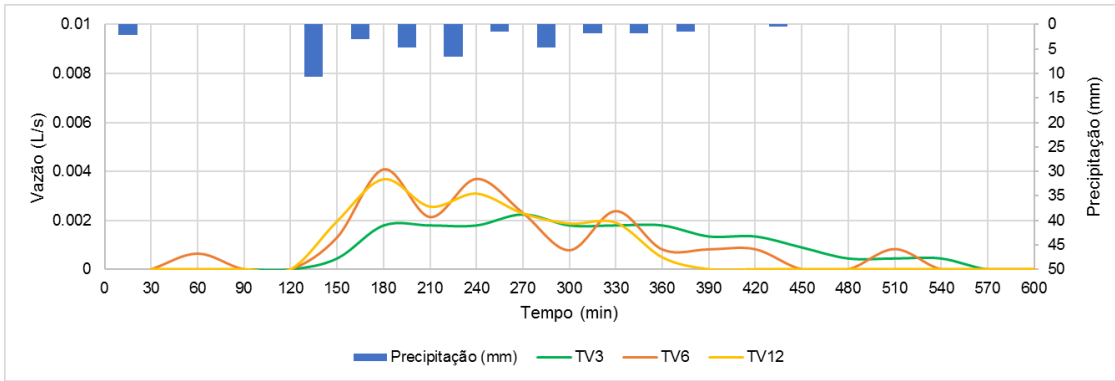
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.18 - Hidrograma do evento 47 (23/06/2018)



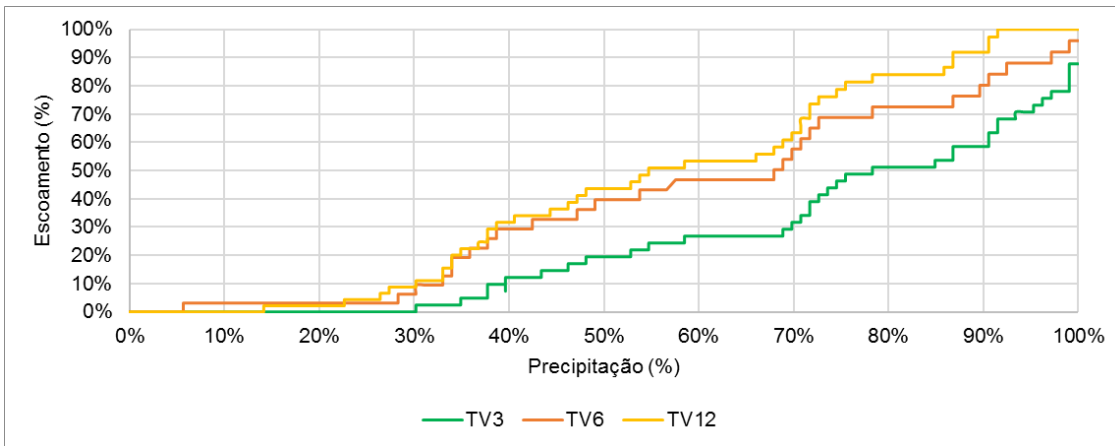
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.19 - Hidrograma do evento 62 (25/08/2018)



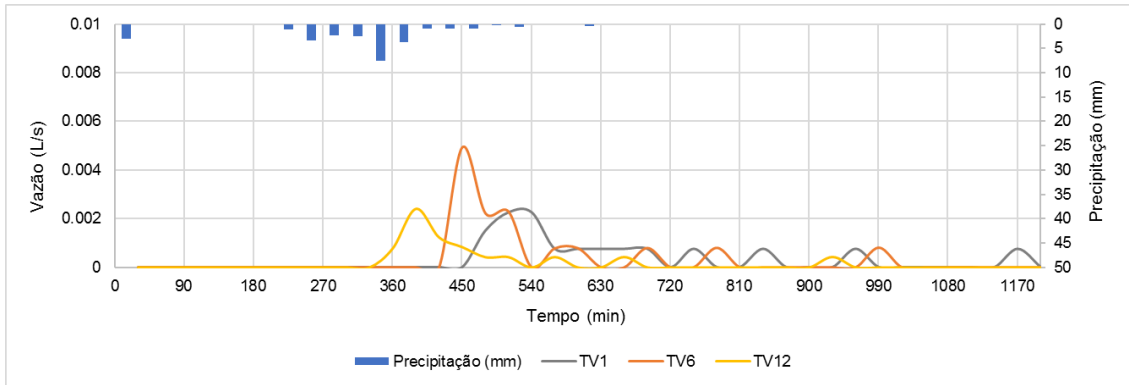
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.20 - Acumulado de precipitação X acumulado de escoamento – Evento 62



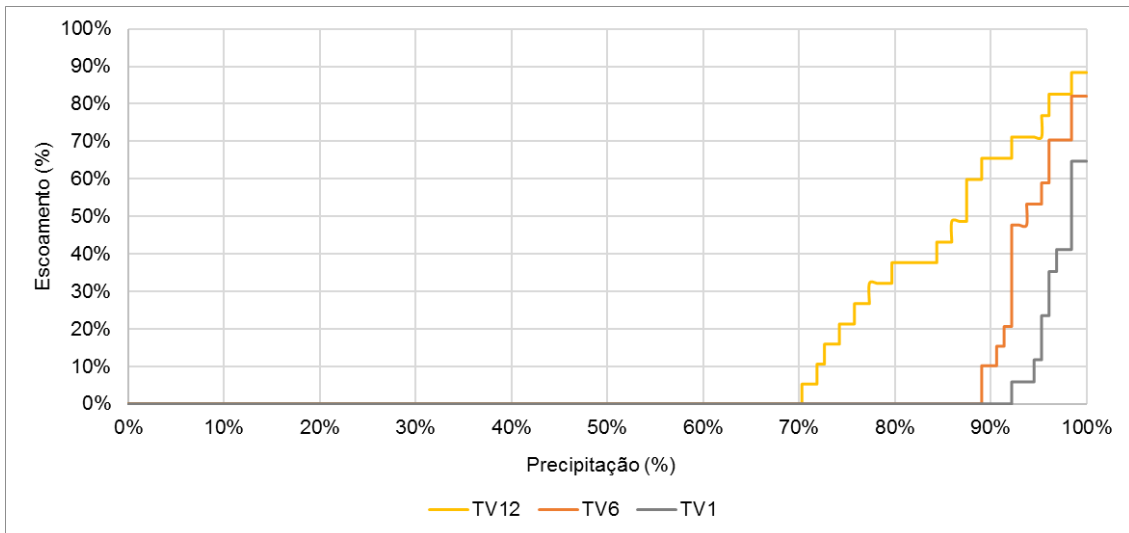
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura F.21 - Hidrograma do evento 72 (14/10/2018)



Fonte: Elaborado pelo Autor.


Figura F.22 - Acumulado de precipitação X acumulado de escoamento – Evento 72



Fonte: Elaborado pelo Autor.

ANEXOS

Anexo 1 – Laudo de análise química do solo



LAUDO DE ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

Nome: Cristiano Persch
Município: Santa Maria
Endereço: UFSM
Fazenda:
CPF: 018.355.910-00

Solicitante: Fertilizantes Multifertil Ind. e Com. Ltda
Coletador:
Entrada: 26/09/2017
Emissão: 29/09/2017

Cód. Barras	Cx.	Cel.	Talhão	Identificação de Amostra	Área/Gride	Prof.
193429	C956	3	--X--	--X--	--X--	0-10cm

Diagnóstico para acidez do solo e calagem: "pH em água 1:1; Ca, Mg, Al, e Mn trocáveis extraídos com KCL mol L⁻¹ e CTC a pH 7,0." (Bibliografia: Boletim Técnico nº05, Tedesco et al, 1995).
Índice SMP (Bibliografia: Solução Tampão TSM, Toledo, J. 2011)

Cód. Barras	pH água 1:1	Ca	Mg	Relação	Al	H+Al	CTCefetiva	Saturação (%)		Índice SMP
		cmol/dm ³	cmol/dm ³	Ca/Mg	cmol/dm ³	cmol/dm ³	cmol/dm ³	Al	Bases	
193429	4,98	3,0	1,0	3,0	2,027	12,7	6,2	32,3	25	5,07


Diagnóstico para macronutrientes e recomendação de adubação NPK-S. *Argila determinada pelo método do densímetro; MO por digestão úmida; S₅₀ extraído com CaHPO₄ 500mg L de P e K, e Na determinados pelo método de Mehlich I." (Bibliografia: Boletim Técnico nº05, Tedesco et al, 1995)

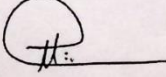
Cód. Barras	%MO m/v	%Argila	Textura	S	P-Mehlich	P-resina	P-rem	K	CTCpH7	K
					mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	cmol/dm ³	cmol/dm ³	mg/dm ³
193429	2,1	29	3	6,4	4,3	--X--	--X--	0,157	16,9	61,2

Diagnóstico para micronutrientes e relações molares. *Zn e Cu extraídos com mehlich I e B extraído com água quente." (Bibliografia: Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes, Embrapa, 2009). Fe extraído com Okalato de amônio.

Cód. Barras	Cu	Zn	B	Fe	Mn	C Total	Relações Molares			
	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	K/CTC	Ca/CTC	Mg/CTC	(Ca + Mg)/K
193429	1,2	2,8	--X--	--X--	--X--	--X--	0,9	17,8	5,9	25,5

As amostras analisadas serão armazenadas por 30 dias, conforme estabelecido pelo CDC. Condições ambientais: Temperatura de secagem das amostras: 45° C (± 2° C). Condutividade da água (tratado por osmose reversa): (± 2°). Temperatura da sala de preparo e leitura: 25° C (± 5°).





Charles Bolson Pontelli
Responsável Técnico - CREA - RS 121906

Av. Osvaldo Zambonato, 623 - B. Centro - Silveira Martins/RS - CEP: 97195-000
Fone: 55 3224.1234 | www.base.agr.br | laboratorio@base.agr.br

Anexo 2 - Laudo de análise física do solo



LAUDO DE ANÁLISE FÍSICA DO SOLO

Nome: Cristiano Persch

Município: Santa Maria

Endereço: UFSM

Fazenda:

CPF: 018.355.910-00

Solicitante: Fertilizantes Multifertil Ind. e Com. Ltda

Coletador:

Entrada: 26/09/2017

Emissão: 29/09/2017

Cód. Barras	Cx.	Cel.	Talhão	Identificação de Amostra	Área/Gride	Prof.
260361	F172	4	-X-	-X-	-X-	0-10cm

Cód. Barras	Areia	Silte	Argila
260361	38,180	19,420	42,400

Cód. Barras	Zoneamento Agrícola	Classe Textural
260361	Tipo 3	Franco argiloso

As amostras analisadas serão armazenadas por 30 dias, conforme estabelecido pelo CDC. Método de determinação: método da pipeta (Embrapa, 1987).

Charles Bolson Pontelli
Responsável Técnico - CREA - RS 121906

