



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

JHONATA FERNANDES FERREIRA SILVA

**ALTERNATIVAS PARA CONTROLE DE ALAGAMENTOS
URBANOS UTILIZANDO TELHADOS VERDES E
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM UM BAIRRO DA CIDADE
DO RECIFE**

Caruaru
2019

JHONATA FERNANDES FERREIRA SILVA

ALTERNATIVAS PARA CONTROLE DE ALAGAMENTOS
URBANOS UTILIZANDO TELHADOS VERDES E
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM UM BAIRRO DA CIDADE
DO RECIFE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Profa. D.Sc. Sylvana Melo dos Santos

Caruaru
2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecário – Raul César de Melo - CRB/4 - 1735

S586a Silva, Jhonata Fernandes Ferreira.
Alternativas para controle de alagamentos urbanos utilizando telhados verdes e pavimentos permeáveis em um bairro da cidade do Recife. / Jhonata Fernandes Ferreira Silva. – 2019.
114 f. ; il. : 30 cm.

Orientadora: Sylvana Melo dos Santos.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2019.
Inclui Referências.

1. Drenagem de habitação. 2. Pavimentos. 3. Sistemas de informação geográfica.
I. Santos, Sylvana Melo dos (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-270)

JHONATA FERNANDES FERREIRA SILVA

ALTERNATIVAS PARA CONTROLE DE ALAGAMENTOS
URBANOS UTILIZANDO TELHADOS VERDES E
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM UM BAIRRO DA CIDADE
DO RECIFE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 22 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Sylvana Melo dos Santos (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^º. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^ª. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^º. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha
família que sempre me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada disso teria se tornado possível. Ele que é sinal de força e superação em minha vida.

A todos da minha família que sempre me deram forças, acreditaram que eu era capaz e se fizeram presentes durante minha vida. De forma especial agradeço ao meu pai João Batista e minha mãe Graça Silva, por estarem durante minha caminhada conversando comigo, me ensinando sobre humildade, paciência, bondade, determinação, mostrando que o caráter e o conhecimento são os maiores bens que eu posso adquirir. A vocês, toda minha gratidão.

Aos meus avós, João Leandro, Josefa Adelina, Maria do Carmo, Fernando Ferreira, que sempre oraram por mim e me deram carinho durante essa jornada.

Ao meu irmão João Paulo, por ser um amigo incrível sempre compartilhando ótimos momentos comigo.

Ao meu amor, Daniele, pela paciência, motivação e carinho que me deu durante todo esse tempo.

A minha professora orientadora Sylvana Santos, por toda sua competência em me orientar, por todos os ensinamentos e por ter me ajudado durante essa jornada em busca de conhecimento.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, que participaram da minha formação, sempre despertando em mim a determinação em busca do conhecimento. A todos, minha sincera gratidão.

A Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco pelo apoio e incentivo no desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

O acelerado crescimento urbano tem levado a altos índices de impermeabilização nos centros urbanos, que cada vez mais têm sofrido com problemas de alagamentos. O método de drenagem utilizado, que prioriza a canalização e o aceleração do escoamento, geralmente tem se mostrado ineficiente, apontando a necessidade de novas soluções. Visando isso, esse projeto teve como objetivo estudar a aplicação de telhados verdes e pavimentos permeáveis como alternativas para controle de alagamentos urbanos, avaliando sua eficiência do ponto de vista técnico e econômico. Para tal, será utilizado o EPA SWMM (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana) na simulação de eventos chuvosos intensos e escoamento superficial em áreas urbanas. Os eventos de precipitação foram definidos através de cenários específicos com a utilização da equação da chuva do Recife, os cenários contemplaram a variação do tempo de retorno das precipitações e porcentagem de aplicação das alternativas de controle. Os resultados obtidos mostram que a aplicação de telhados verdes em 25% da área disponível de telhados, pode levar a uma redução de 45,70% dos valores de escoamento superficial e de até 9,51% do volume total alagado. Enquanto que uma aplicação de pavimentos permeáveis sob condições similares pode levar a uma redução de até 42,70% dos valores de escoamento superficial e 5,67% do volume total alagado. A utilização conjunta de telhados verdes e pavimentos permeáveis também é uma boa alternativa, levando a uma redução de até 36,37% do volume de alagamento. Os resultados mostraram que os telhados verdes apresentam melhor desempenho para a área de estudo em comparação com a aplicação de pavimentos permeáveis. Ainda assim os pavimentos permeáveis também constituem uma boa alternativa ao controle de alagamentos.

Palavras-chave: Drenagem urbana. Geoprocessamento. QGis. SWMM.

ABSTRACT

The accelerated urban growth has led to high rates of waterproofing in urban centers, which have increasingly suffered from flooding problems. The drainage method used, which prioritizes channeling and acceleration of flow, has generally proved to be inefficient, pointing to the need for new solutions. Aiming at this, this project aims to study the application of green roofs and permeable pavements as alternatives to control urban flooding, evaluating their efficiency from a technical and economic point of view. To do so, the EPA SWMM (Storm Water Management Model) will be used in the simulation of intense rainfall events and runoff in urban areas. Precipitation events were defined through specific scenarios using the Recife rain equation, the scenarios considered the variation of precipitation return time and percentage of application of control alternatives. The results show that the application of green roofs in 25% of the available roof area can lead to a reduction of 45.70% of the runoff values and up to 9.51% of the total flooded volume. While application of permeable pavements under similar conditions may lead to a reduction of up to 42.70% of runoff values and 5.67% of total flooded volume. The joint use of green roofs and permeable pavements is also a good alternative, leading to a reduction of up to 36.37% of flooding volume. The results showed that green roofs present better performance for the study area compared to the application of permeable pavements. Even so, permeable pavements are also a good alternative to flood control. The results show that green roofs perform better for the study area. It was concluded that the use of either of the two alternatives presented in this work leads to a significant reduction of the surface runoff peaks and a good reduction in the flooding volumes.

Keywords: Urban drainage. Geoprocessing. QGis. SWMM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 -	Principais elementos da microdrenagem.....	20
Figura 1 -	Infiltração em Perfil de solo uniforme.....	22
Figura 2 -	Perfil do conteúdo de água.....	25
Figura 3 -	Camadas do telhado verde.....	29
Quadro 2 -	Vantagens e desvantagens dos telhados verdes.....	31
Fotografia 1 -	Pavimento permeável com concreto moldado <i>in loco</i>	32
Figura 4 -	Seção típica de um pavimento permeável.....	33
Quadro 3 -	Vantagens e desvantagens dos pavimentos permeáveis.....	33
Fotografia 2 -	Jardim de chuva.....	34
Quadro 4 -	Vantagens e desvantagens dos Jardins de chuva.....	35
Figura 5 -	Vala de vegetada com capacidade de infiltração.....	36
Quadro 5 -	Vantagens e desvantagens das valas vegetadas.....	36
Quadro 6 -	Custo estimado de implantação e nível de manutenção.....	38
Mapa 1 -	Localização da área de estudo.....	47
Fotografia 3 -	Estado atual do Canal da malária.....	48
Fotografia 4 -	Canal da malária alagado.....	49
Quadro 7 -	Parâmetros da bacia utilizados em uma modelagem no SWMM.....	52
Mapa 2 -	Relação entre Sub-bacias e rede de drenagem.....	53
Mapa 3 -	Amostras das classes de uso do solo.....	55
Mapa 4 -	Sub-bacia 5 classificada por uso do solo.....	55
Quadro 8 -	Armazenamento em depressões.....	56
Figura 6 -	Divisão de camadas e parâmetros dos telhados verdes dentro do modelo SWMM.....	58
Quadro 9 -	Parâmetros para a camada <i>Surface</i> dos telhados verdes (recomendado x adotado).....	60
Quadro 10 -	Parâmetros para a camada <i>Soil</i> dos telhados verdes (recomendado x adotado).....	60
Quadro 11 -	Parâmetros para a camada <i>Drainage Mat</i> dos telhados verdes (recomendado x adotado).....	60
Figura 7 -	Conjuntos de parâmetros dos pavimentos permeáveis dentro do SWMM.....	61
Quadro 12 -	Parâmetros para a camada <i>Surface</i> dos pavimentos permeáveis (recomendado x adotado).....	64
Quadro 13 -	Parâmetros para a camada <i>Pavement</i> dos pavimentos permeáveis (recomendado x adotado).....	64
Quadro 14 -	Parâmetros para a camada <i>Soil</i> dos pavimentos permeáveis (recomendado x adotado).....	64
Quadro 15 -	Parâmetros para a camada <i>Storage</i> dos pavimentos permeáveis (recomendado x adotado).....	65
Gráfico 1 -	Curva de Infiltração para o ensaio no Curado.....	67
Figura 8 -	Altura da lâmina d'água durante evento de precipitação em 19 de janeiro de 2018.....	68
Quadro 16 -	Cenários de simulação.....	69
Quadro 17 -	Alíquotas do IPTU para a cidade do Recife.....	71

Figura 9 -	Rede de drenagem dentro das sub-bacias do Canal da Malária no SWMM.....	72
Mapa 5 -	Área alagada em torno do ponto de controle na Avenida Senador Robert Kennedy.....	73
Figura 10 -	Alagamentos nos nós após o evento de precipitação de 19 de janeiro de 2018 (Resultados simulados).....	74
Gráfico 2 -	Escoamento superficial do cenário 1 simulado para sub-bacia 19.	76
Gráfico 3 -	Escoamento superficial do cenário 1 simulado para sub-bacia 20.....	77
Gráfico 4 -	Escoamento superficial no cenário 2 simulado para a sub-bacia 19.....	79
Gráfico 5 -	Escoamento superficial no cenário 2 simulado para a sub-bacia 20.....	80
Gráfico 6 -	Escoamento superficial no cenário 3 simulado para a sub-bacia 19 (com pavimentos permeáveis e sem pavimentos permeáveis).....	82
Gráfico 7 -	Escoamento superficial simulado no cenário 3 simulado para a sub-bacia 20 (com pavimentos permeáveis e sem pavimentos permeáveis).....	83
Gráfico 8 -	Escoamento superficial no cenário 4 simulado para a Sub-bacia 19 (com e sem aplicação de pavimentos + telhados).....	85
Gráfico 9 -	Escoamento superficial no cenário 4 simulado para a Sub-bacia 20 (com e sem aplicação de pavimentos + telhados).....	86
Gráfico 10 -	Escoamento superficial no cenário 5 simulado para a Sub-bacia 19 (com e sem aplicação de pavimentos 50%).....	89
Gráfico 11 -	Escoamento superficial no cenário 5 simulado para a Sub-bacia 20 (com e sem aplicação de pavimentos 50%).....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Resultado da intensidade das chuvas no Recife em mm/h a partir da equação elaborada pela EMLURB (2014).....	51
Tabela 2 -	Resultados dos totais precipitados para as intensidades de chuvas calculadas pela equação de chuvas da EMLURB (2014).....	51
Tabela 3 -	Síntese dos dados de entrada para as sub-bacias.....	57
Tabela 4 -	Dados de infiltração obtidos no ensaio da Encibra no bairro do Curado.....	66
Tabela 5 -	Volume simulado x Volume observado no alagamento no ponto de controle (nó 13).....	74
Tabela 6 -	Erros de continuidade no evento de precipitação de 19 de janeiro de 2018.....	75
Tabela 7 -	Erros de continuidade na simulação sem alternativas de controle.....	75
Tabela 8 -	Escoamentos superficiais máximos no cenário 1 simulado para as sub-bacias 19 e 20.....	77
Tabela 9 -	Volume alagado e quantidade de nós alagados por tempo de retorno no cenário 1.....	77
Tabela 10 -	Volume alagado no ponto de controle (nó 13) para o cenário 1.....	78
Tabela 11 -	Erros de continuidade na simulação com telhados a 25%.....	78
Tabela 12 -	Redução do escoamento superficial devido a aplicação de telhados verdes.....	80
Tabela 13 -	Redução no volume alagado após a aplicação de telhados verdes.....	81
Tabela 14 -	Volume alagado no Nó 13 antes e depois dos telhados verdes.....	81
Tabela 15 -	Erros de continuidade na simulação com pavimentos a 25%.....	82
Tabela 16 -	Redução do escoamento superficial devido a aplicação de pavimentos permeáveis.....	83
Tabela 17 -	Redução no volume alagado após a aplicação de pavimentos permeáveis.....	84
Tabela 18 -	Volume alagado no Nó 13 antes e depois dos pavimentos permeáveis.....	84
Tabela 19 -	Erros de continuidade na simulação com pavimentos permeáveis a 50% + telhados verdes a 50%.....	85
Tabela 20 -	Redução do escoamento superficial devido a aplicação de pavimentos permeáveis + telhados verdes.....	86
Tabela 21 -	Redução no volume alagado após a aplicação de pavimentos permeáveis + telhados verdes.....	87
Tabela 22 -	Volume alagado no Nó 13 antes e depois dos pavimentos permeáveis + telhados verdes.....	87
Tabela 23 -	Erros de continuidade na simulação com pavimentos a 50%... ..	88
Tabela 24 -	Redução do escoamento superficial devido a aplicação de pavimentos permeáveis a 50%.....	90

Tabela 25 -	Redução no volume alagado após a aplicação de pavimentos permeáveis a 50%.....	90
Tabela 26 -	Volume alagado no Nó 13 antes e depois dos pavimentos permeáveis a 50%.....	90
Tabela 27 -	Redução do volume total alagado (pavimentos 50% x pavimentos 25%).....	91
Tabela 28 -	Redução do escoamento superficial para Sub-bacia 19 e 20 respectivamente (pavimentos permeáveis 50% x pavimentos permeáveis 25%).....	91
Tabela 29 -	Reduções no escoamento superficial para cada cenário.....	92

LISTA DE SIGLAS

APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
BMP	<i>Best Management Practices</i>
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (Recife)
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente (Minas Gerais - MG)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPTU	Imposto Predial Territorial e Urbano
LID	<i>Low Impact Development</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
PE3D	Pernambuco Tridimensional
SCP	<i>Semi-automatic Classification Plugin</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WET	<i>Water Ecosystems Tool</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
h	Hora
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
m/s	Metro por segundo
m/s ²	Metro por segundo ao quadrado
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
mm	Milímetro
mm/h	Milímetros por hora
s	Segundos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral.....	18
2.2	Objetivos específicos.....	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1	Drenagem urbana tradicional.....	19
3.1.1	Microdrenagem	20
3.1.2	Macro drenagem	20
3.2	Infiltração e escoamento.....	22
3.2.1	Infiltração	22
3.2.1.1	<i>Modelo de Horton</i>	23
3.2.1.2	<i>Modelo de Green-Ampt</i>	24
3.2.2	Escoamento superficial e escoamento em tubulações	26
3.2.2.1	<i>Equação de Hazen-Williams</i>	27
3.3	Alternativas de controle.....	27
3.3.1	Telhados verdes	28
3.3.2	Pavimentos permeáveis	31
3.3.3	Jardins de chuva	34
3.3.4	Valas vegetadas	35
3.4	Incentivos e custos à adoção de tecnologias alternativas.....	37
3.4.1	Incentivos à adoção de tecnologias alternativas de controle de alagamentos	37
3.4.2	Comparativo entre alternativas de controle de alagamentos	38
3.5	Modelagem.....	39
3.6	Geoprocessamento.....	42
3.6.1	Classificação de imagens	43
3.6.2	PE3D	44
4	METODOLOGIA	46
4.1	Área de estudo.....	46
4.1.1	Equações de chuva do Recife e precipitação na área de estudo	49
4.2	O modelo SWMM.....	52
4.2.1	Delimitação e caracterização das sub-bacias	52
4.2.2	Largura média da sub-bacia	54
4.2.3	Declividade média das sub-bacias	54
4.2.4	Taxa de impermeabilização	54
4.2.5	Coefficiente 'n' de Manning para áreas permeáveis e impermeáveis	56
4.2.6	Altura de armazenamento em depressões de áreas permeáveis e impermeáveis	56
4.2.7	Parâmetros das alternativas de controle dentro do modelo ..	58
4.2.8	Parâmetros de infiltração do modelo	65
4.2.9	Inserção dos dados do modelo	67
4.3	Calibração do modelo.....	67
4.3.1	Erros de Continuidade	69
4.4	Cenários de simulação.....	71

4.4.1	Descrição dos cenários.....	69
4.4.2	Cenários sem alternativas de controle.....	70
4.4.3	Cenários com alternativas de controle individualmente à 25%.....	70
4.4.4	Cenários com aprimoramento do pior resultado.....	70
4.4.5	Cenários com a combinação de telhados verdes e pavimentos permeáveis.....	71
4.5	Impacto do incentivo de instalação através do IPTU.....	72
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
5.1	Calibração.....	72
5.1.1	Modelo Construído.....	72
5.1.2	Resultado do processo de calibração.....	73
5.2	Cenários sem alternativas de controle.....	75
5.3	Telhados verdes cobrindo 25% dos telhados.....	78
5.4	Pavimentos permeáveis em 25% das vias.....	81
5.5	Telhados verdes a 50% + Pavimentos permeáveis a 50%.....	84
5.6	Pavimentos permeáveis em 50% das vias.....	87
5.7	Incentivo por redução do IPTU.....	92
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
	REFERÊNCIAS.....	97
	APÊNDICE.....	103
	APÊNDICE A - VALORES MÁXIMOS DE VAZÕES EM CADA SUB-BACIA PARA CADA CENÁRIO SIMULADO.....	104
	APÊNDICE B - SUB-BACIAS CLASSIFICADAS POR TIPO DE USO DO SOLO.....	114

1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização nos últimos anos, somada ao uso desordenado do solo com intensas impermeabilizações, tem agravado os problemas de alagamentos nas grandes cidades. Um fato que intensifica esses problemas, é a continuidade da utilização única e exclusiva de técnicas antigas para a solução dos problemas de drenagem (TOMINAGA, 2013). Um outro agravante do problema é que, no Brasil, os planos diretores avaliam os problemas de drenagem de forma pontual, e as obras são mais emergenciais do que preventivas. Órgãos responsáveis pela urbanização de cidades não têm controle da ocupação de áreas ribeirinhas, e a população acaba sendo atingida por enchentes naturais.

Muitas vezes, a visão restrita acerca dos problemas de drenagem e o mau planejamento dos sistemas de drenagem têm sido as principais causas dos recorrentes problemas de alagamentos. Rezende *et al.* (2009) apontou que os projetos de drenagem apesar de serem desenvolvidos corretamente, do ponto de vista técnico, se tornam ineficientes muito rápido devido à grande demanda urbana por infraestrutura. Eles mostram também que a simples retirada da água através de canalizações, é um meio insustentável e que novas visões sobre os problemas de alagamentos são necessárias. Para Righetto, Moreira & Sales (2009), estratégias de uso temporário das áreas sujeitas a inundações devem ser incorporadas na gestão de manejo das águas pluviais urbanas, por meio do uso de simulações hidrológicas, do controle de inundações e do planejamento do espaço urbano. De acordo com Carbone *et al.* (2014), os riscos de alagamentos, de fato, não podem ser totalmente eliminados, mas seus impactos devem ser reduzidos. Estudos que tratem da avaliação de alternativas de controle são extremamente importantes já que os alagamentos são desastres naturais destrutivos e apresentam ameaça significativa para a vida humana (DIAKAKIS *et al.*, 2017).

Diante desses problemas, surgiram novas abordagens no tema de manejo de águas pluviais. As novas abordagens se baseiam em técnicas de retenção e infiltração, reduzindo a probabilidade de inundações. De acordo com Nascimento & Baptista (2009), na atualidade, existe uma grande diversidade de técnicas compensatórias em drenagem pluvial e, a maioria envolve o armazenamento e a infiltração de águas pluviais. Porém, segundo Ellis (2008), há também soluções que

promovem a interceptação e a evapotranspiração, como os telhados ou coberturas verdes, e o manejo de áreas verdes em meio urbano, com o foco na redução de escoamentos de origem pluvial. Sobre os efeitos dos telhados verdes, Lima (2013) apresenta um estudo que ratifica a capacidade deste tipo de tecnologia na diminuição do pico de escoamento superficial durante precipitações intensas, aliviando assim o sistema de drenagem. Neste contexto, Righetto, Moreira & Sales (2009) destacam as cisternas, os pavimentos permeáveis e os telhados verdes como alternativas que contribuem efetivamente para a redução do volume escoado e filtragem da carga poluidora.

Nascimento & Baptista (2009) destacou a vantagem da integração de tais soluções que são implantadas de forma associada às estruturas urbanas, como os pavimentos permeáveis no sistema viário ou em áreas de estacionamento, e às coberturas verdes naturalmente, pois não requerem espaço suplementar de implantação. Azout *et al.* (1994 *apud* ACIOLI, 2005) apontou como vantagens desses tipos de soluções, a possibilidade da integração com a estética do ambiente e os custos menores que a solução tradicional.

Assim, este trabalho se propõe a avaliar a utilização de soluções alternativas (telhados verdes e pavimentos permeáveis) combinados às redes de drenagem convencionais atuando diretamente na diminuição dos picos de cheia durante os eventos de precipitação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização de telhados verdes e pavimentos permeáveis como uma solução complementar às redes de drenagens no controle de alagamentos em centros urbanos em cenários específicos aplicando a um bairro da cidade do Recife.

2.2 Objetivos específicos

- Criar um modelo que represente o cenário atual;
- Avaliar a utilização unicamente de redes de drenagem como solução para problemas de alagamentos;
- Quantificar o impacto nos picos de escoamento da associação do sistema de drenagem existente com o emprego de telhados verdes;
- Quantificar o impacto nos picos de escoamento da associação do sistema de drenagem existente com o emprego de pavimentos permeáveis;
- Avaliar a solução conjunta do sistema de drenagem existente com o emprego de pavimentos permeáveis e telhados verdes.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Drenagem urbana tradicional

Há muito tempo, a ocupação de áreas ribeirinhas acontece pelo mundo, principalmente por se tratar de uma fonte abundante de água, facilitar a dessedentação de animais, entre outros fatores. Por outro lado, à esta ocupação também estão associados os riscos de inundações em consequência da ocorrência de períodos chuvosos. Em situações em que o rio é utilizado para a evacuação de dejetos, os riscos são ainda mais graves e culminam com a possibilidade de ocorrência de contaminações a partir de doenças de veiculação hídrica.

Considerando os riscos de inundações, foram desenvolvidos os projetos iniciais de drenagem urbana com o objetivo de remover o excesso de águas proveniente das chuvas dos centros urbanos da forma mais eficiente possível para evitar transtornos e prejuízos. Ao se estudar a drenagem urbana, é necessário ter em mente duas peculiaridades importantes (TOMINAGA, 2013):

- O escoamento acontecerá com ou sem a existência de um sistema de drenagem adequado. Para o caso de inexistência ou mal funcionamento de um sistema de drenagem, a água se acumulará em pontos críticos provocando alagamentos;
- O sistema de drenagem urbana é solicitado apenas durante e imediatamente depois de um evento de precipitação.

De forma geral, o sistema de drenagem começa desde os coletores pluviais de edifícios ligados à rede pública e vai até os sistemas compostos de pequenos rios que compõem a macrodrenagem. Mais especificamente, ao se estudar a drenagem urbana, pode-se dividi-la em dois níveis principais, a macrodrenagem e a microdrenagem. Outro nível que vem ganhando cada vez mais espaço é o controle de drenagem a partir do lote.

3.1.1 Microdrenagem

A microdrenagem é determinada pelo uso e ocupação do solo, em áreas onde o escoamento não é bem definido, ou seja, de acordo com Porto *et al.* (2001), a microdrenagem é definida pelo traçado das ruas em uma área urbana. A microdrenagem funciona como o sistema inicial de drenagem ou coletor pluvial e seu adequado dimensionamento pode evitar vários transtornos provocados por alagamentos. Porto *et al.* (2001) definem os principais elementos utilizados na microdrenagem (galeria, poço de visita, bocas de lobo, entre outros), e a descrição sucinta destes elementos está apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais elementos da microdrenagem.

Elemento	Descrição
Galeria	Canalizações públicas destinadas a conduzir as águas pluviais provenientes de bocas de lobo.
Poço de visita	Dispositivos localizados estrategicamente que permitem a mudança de direção, mudança de declividade, mudança de diâmetro e inspeção e limpeza.
Trecho	Porções de galerias situadas entre dois poços de visitas.
Bocas de Lobo	Dispositivos localizados estrategicamente nas sarjetas para captação de águas pluviais.
Tubos de ligação	Canalizações destinadas a conduzir as águas pluviais das bocas de lobo para as galerias ou poços de visita.
Meio-fio	Elementos de pedra ou concreto, colocados entre o passeio e a via pública, paralelamente ao eixo da rua com sua face superior no nível do passeio.
Sarjetas	Faixas de via pública, paralelas e vizinhas ao meio fio. A calha formada é a receptora das águas pluviais que incidem sobre as vias públicas e que para elas escoam.
Sarjetões	Calhas localizadas nos cruzamentos de vias públicas, formadas pela sua própria pavimentação e destinadas a orientar o fluxo que escoam pelas sarjetas.
Conduitos forçados	Obras destinadas à condução das águas superficiais coletadas de maneira segura e eficiente.
Estações de bombeamento	Conjunto de obras e equipamentos destinados a retirar água de um canal de drenagem, quando não houver mais condição de escoamento por gravidade, para um outro canal ou receptor final em nível mais elevado.

Fonte: adaptado de Porto *et al.* (2001).

3.1.2 Macrodrenagem

A macrodrenagem se aplica aos escoamentos em fundos de vale que normalmente são bem definidos, mesmo que não possuam um curso perene. Sua

função é a condução final dos escoamentos oriundos de diferentes sistemas de microdrenagem. As obras de macrodrenagem buscam evitar as enchentes através da construção de canais, revestidos ou não, com maior capacidade de transporte, além da construção de bacias de detenção (PORTO *et al.*, 2001). É de extrema importância um bom dimensionamento assim como a manutenção dos sistemas de macrodrenagens, a fim de se evitar transtornos e prejuízos gerados por alagamentos.

Ainda que todo cuidado possa ser tomado com relação ao projeto e manutenção do sistema de macrodrenagem, sua contribuição aos eventos de inundação estão condicionados também ao bom funcionamento do sistema de microdrenagem. Sobre isso, Kusumawardhani, Sutjningsih e Anggraheni (2019) descreveram o cenário observado em Jacarta, onde a inundação é um dos problemas anuais recorrentes e, por isso, o governo construiu o canal East Flood, esperando reduzir as inundações. Um estudo apresentado por Suzanti (2017 *apud* KUSUMAWARDHANI, SUTJININGSIH & ANGGRAHENI, 2019) mostrou que mesmo com a existência do novo canal, ainda existem vários pontos de inundação nas proximidades do mesmo. Kusumawardhani, Sutjningsih e Anggraheni (2019) investigaram a causa das inundações na área, com base na avaliação da capacidade do canal no sistema de microdrenagem usando o modelo hidrológico HEC-RAS 4.1.0 e WinTR. De acordo com os autores, os resultados da simulação mostraram que vários canais no sistema de microdrenagem que não acomodam o influxo, causando as inundações citadas.

Rezende *et al.* (2009) apontou que os projetos de drenagem apesar de serem desenvolvidos, do ponto de vista técnico, corretamente, se tornam ineficientes muito rápido devido à grande demanda urbana por infraestrutura. Ele mostrou também que a simples retirada da água através de canalizações é um meio insustentável e que novas visões sobre os problemas de alagamentos são necessárias. Os riscos de alagamentos, de fato, não podem ser eliminados, mas devem ter seus impactos reduzidos, já que são catástrofes que apresentam risco significativo à vida humana.

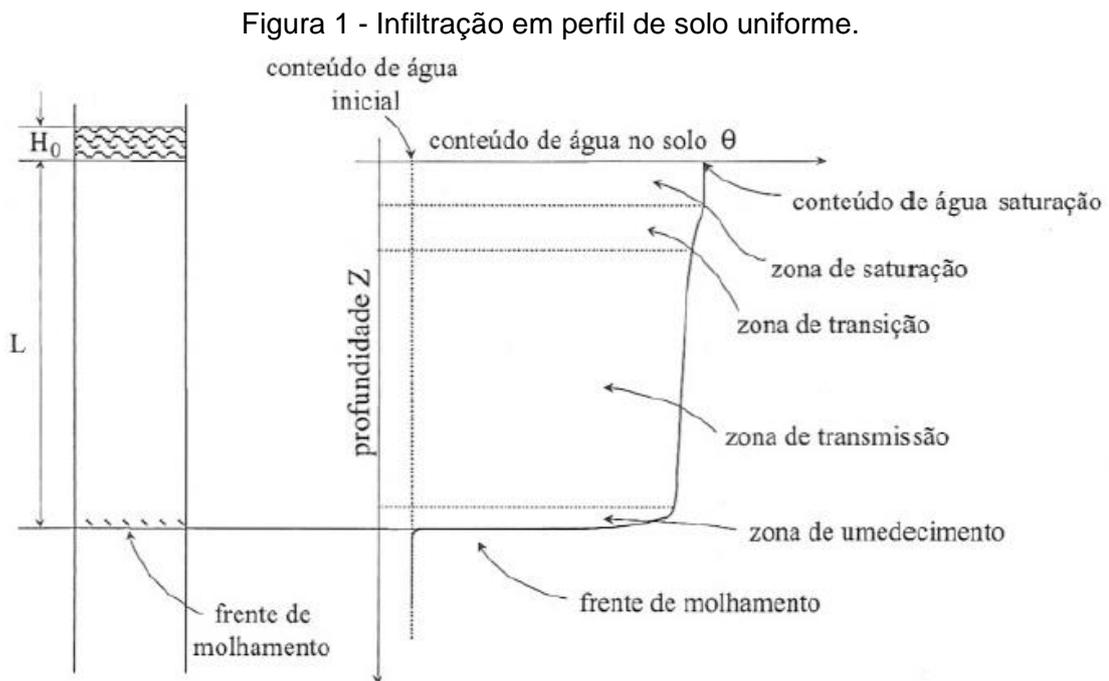
De forma geral, o conceito de detenção/retenção possui algumas limitações uma vez que sua capacidade está limitada à quantidade de entrada no sistema que não exceda à capacidade disponível no reservatório. Tendo em mente a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas para combater os problemas de alagamentos,

vários estudos nessa área surgiram ao longo dos anos e apontam, em sua maioria, para soluções alternativas com enfoque na sustentabilidade.

3.2 Infiltração e escoamento

3.2.1 Infiltração

O processo de infiltração é aquele pelo qual a água atravessa a superfície do solo. Muitos fatores interferem na infiltração de água no solo, dentre os quais se destacam os relacionados às características do solo e à cobertura vegetal, e os relacionados às características da precipitação. Dentre as características do solo, segundo Brandão (2003), a textura e a estrutura influenciam bastante, pois definem a quantidade de macroporos do solo, fator relacionado diretamente com a condutividade hidráulica. Este processo, em um solo com perfil uniforme, está associado à distribuição da água com a profundidade, ao manter-se uma pequena carga hidráulica sobre o solo (Figura 1).



Fonte: Bodman & Coleman (1944 *apud* LIBARDI, 2005).

A zona de saturação é onde presume-se que o solo esteja saturado, seguida (de cima para baixo) pela zona de transição, que é uma região de decréscimo do conteúdo de água. A zona de transmissão é uma porção do perfil pela qual a água é

transmitida com variações muito pequenas no conteúdo de água. A zona de umedecimento, por sua vez, apresenta uma rápida variação do conteúdo de água. Por fim, a frente de molhamento compreende uma pequena região na qual o gradiente de conteúdo de água sofre uma variação acentuada, esta representa o limite visível da penetração de água (BODMAN & COLEMAN, 1944 *apud* LIBARDI, 2005).

A descrição da infiltração da água no solo pode ser feita por modelos empíricos ou por modelos teóricos. Os modelos empíricos têm a vantagem de relacionar diretamente parâmetros do modelo e as características do solo, mesmo sem significado físico. Em contrapartida, esses modelos têm a desvantagem de ser apenas válidos nas condições em que foram determinados. Os modelos teóricos são baseados na teoria do escoamento em meio poroso, descrito pela equação de Richards ou pela equação de Darcy (BRANDÃO, 2003).

De acordo com Clemmens (1983 *apud* URCHEI & FIETZ, 2002), em decorrência das dificuldades operacionais para medição da infiltração, bem como a variabilidade inerente ao processo, várias equações têm sido propostas para sua estimativa e representação matemática, sendo a de Philip, Green-Ampt, Kostiakov, Soil Conservation Service, Horton e Collis-George as mais conhecidas. A equação de Horton é uma equação empírica, desenvolvida de experimentos e a equação de Green-Ampt é baseada nas propriedades físicas do solo.

3.2.1.1 Modelo de Horton

A partir de experimentos, Horton estabeleceu empiricamente uma relação para representar o decaimento da infiltração com o tempo, para o caso de um solo submetido à uma precipitação com intensidade sempre superior à capacidade de infiltração. A Equação 1 descreve o modelo de Horton (SILVEIRA, LOUZADA & BELTRAME, 2001):

$$I_t = I_b + (I_o - I_b)e^{-kt} \quad (1)$$

onde: I_t é a taxa de infiltração no tempo t (mm/h); I_b é a taxa mínima de infiltração (mm/h); k é taxa de decaimento (1/s); I_o é a taxa de infiltração inicial (mm/h); t é o tempo decorrido (s).

Onde o coeficiente de decaimento é dado por:

$$k = \frac{(I_o - I_b)}{F_c} \quad (2)$$

Em que F_c é dado pela área sob a curva da taxa de infiltração.

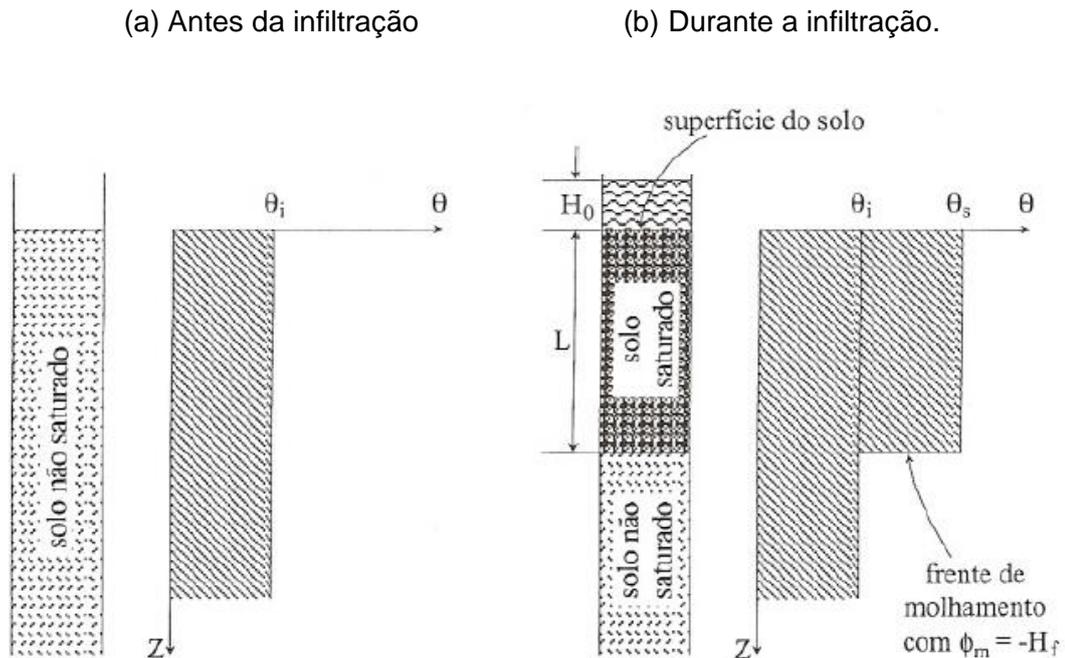
A Equação 1 é de difícil utilização na previsão da parcela que vai infiltrar de uma futura precipitação, pois os ajustes prévios nos parâmetros dependem das umidades do solo nos ensaios de campo, além de variarem durante a infiltração (PARLANGE & HAVERKAMP, 1989 *apud* SILVEIRA, LOUZADA & BELTRAME, 2001).

Avila (2014) pesquisou sobre como a variação do uso do solo afeta a infiltração em um estudo de caso de implantação de floresta em bioma Pampa. O autor aplicou, dentre outros modelos empíricos, o modelo de Horton e apontou que este representou satisfatoriamente o ajuste da taxa de infiltração observada, indicando que o parâmetro I_b do modelo pode ser utilizado como indicador de impacto do uso do solo nos processos hidrológicos. Paixão *et al.* (2004) também estudaram a infiltração em solos desta vez utilizando modelos não lineares e modelos empíricos. Os autores apontaram que o modelo de Horton foi o que apresentou o melhor desempenho na estimativa de valores médio da taxa de infiltração em comparação com os outros modelos empíricos.

3.2.1.2 Modelo de Green-Ampt

No modelo de infiltração apresentado por Green-Ampt, considera-se que a carga hidráulica H_0 é constante na superfície do solo, a frente de molhamento é bem definida, atrás dela o solo se encontra uniformemente saturado com condutividade hidráulica K_0 e, por fim, o potencial matricial permanece sempre constante. Com essas hipóteses adotadas, o perfil de conteúdo de água no solo apresenta-se na forma de um degrau (Figura 2). De acordo com Libardi (2005), sabe-se que, na prática, essa situação é impossível, porém essas suposições simplificam a equação de fluxo, tornando possível uma solução analítica.

Figura 2 - Perfil do conteúdo de água.



Fonte: Libardi (2005).

De acordo com Silveira, Louzada & Beltrame (2001), a Equação 3, derivada da equação de Darcy considerando as simplificações mencionadas, descreve o modelo de Green-Ampt.

$$i = K \left[\Psi_z \frac{\theta_s - \theta_i}{I} + 1 \right] \quad (3)$$

onde: i é a taxa de infiltração (mm/h); K é a condutividade hidráulica do solo (cm m^{-1}); Ψ_z é o potencial matricial na frente de umedecimento (cm); θ_s e θ_i são respectivamente o conteúdo de água na saturação final e inicial; e I (cm) é a infiltração acumulada, a qual é calculada em função da profundidade da frente de umedecimento, z_f (cm), obtidos pela Equação 4.

$$I = z_f(\theta_s - \theta_i) \quad (4)$$

Como vantagem sobre os modelos empíricos, o modelo de Green-Ampt permite prever o valor da taxa de infiltração para qualquer condição de umidade de perfil de solo quando inicia a precipitação (OLIVEIRA, 2015).

Oliveira (2015) realizou um estudo de infiltração em solos para dez eventos de precipitação em parcelas de solo heterogêneo com o modelo Green-Ampt. O autor aponta que o modelo permitiu estimar satisfatoriamente o escoamento em todos os eventos estudados, principalmente nos mais longos. Souza Netto (2011) também realizou um estudo sobre infiltração para avaliar o desempenho de modelos de infiltração em sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na região Alto Rio Grande - MG. O autor apontou que o modelo de Green-Ampt foi o que melhor se ajustou aos dados observados na situação real.

3.2.2 Escoamento superficial e escoamento em tubulações

A drenagem urbana constitui um conjunto de medidas que visam diminuir os riscos e prejuízos provocados pelas inundações, auxiliando no desenvolvimento urbano harmônico (PORTO *et al.* 1993 *apud* TOMINAGA, 2013).

Da parcela da precipitação que cai em superfície impermeável, a parte que gera o escoamento superficial é captada e conduzida no sistema de drenagem urbana. Os escoamentos podem ser divididos em superficial, subsuperficial e subterrâneo. O escoamento superficial é a parcela do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha. No caso de uma bacia localizada em zona rural, a precipitação sofrerá influência da cobertura vegetal aumentando assim a parte que infiltra. No caso de bacias urbanas, há uma grande interferência na infiltração por conta da impermeabilização provocada pelo homem (TUCCI, 2001).

De acordo com Tucci (2001), para descrição do escoamento superficial os modelos são usualmente classificados em lineares e não lineares e, em empíricos e conceituais. Os modelos lineares e não lineares estão diretamente ligados a linearidade das equações diferenciais que os regem. Enquanto os modelos conceituais e empíricos se diferenciam pelo fato de o primeiro levar em consideração os processos físicos e o segundo se basear em funções empíricas não relacionadas com tais fenômenos (TUCCI, 2001).

Segundo Porto (2006), os escoamentos estão sujeitos a determinadas condições gerais, princípios e leis da Termodinâmica e à teoria da Turbulência. Os escoamentos podem ser classificados como laminar e turbulento. No caso de escoamento laminar, as partículas possuem trajetórias bem definidas, em lâminas, o que ocorre em baixas velocidades com líquidos de alta viscosidade. No caso da água,

devido à sua baixa viscosidade, o escoamento é classificado como turbulento onde as partículas do líquido se movem em trajetórias irregulares, com movimento aleatório (PORTO, 2006).

Porto (2006) ainda classifica os escoamentos em superfície livre ou escoamento em pressão ou forçado. O escoamento em superfície livre ocorre em rios, córregos ou canais onde a superfície do líquido está sempre em contato com a atmosfera. O escoamento em pressão ou forçado ocorre no interior de tubulações, onde o líquido em seu interior preenche completamente sua seção e não há contato com a atmosfera. Neste caso a pressão interna é diferente da atmosférica. Durante uma precipitação intensa, o escoamento dentro das tubulações de drenagem se dá como escoamento em conduto forçado, devido ao grande volume de água.

Durante o processo de escoamento do fluido, ocorre uma perda de energia deste, principalmente devido aos efeitos da sua viscosidade. Para determinar o valor da perda de carga no escoamento são utilizadas equações como a de Darcy-Weisbach e a de Hazen-Williams.

3.2.2.1 Equação de Hazen-Williams

Dentre as fórmulas empíricas mais utilizadas para a descrição desse tipo de escoamento, podemos citar a de Hazen-Williams. Sua expressão é dada na Equação 5 (PORTO, 2006):

$$J = 10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (5)$$

onde: J é a perda de carga unitária; Q é a vazão em m^3/s ; D o diâmetro em m ; e C em $m^{0,367}/s$ é o coeficiente de rugosidade que depende da natureza e estado das paredes do tubo.

3.3 Alternativas de controle

Estão inseridas neste contexto as soluções para a drenagem urbana, que buscam devolver as características próximas àquelas existentes durante a pré-urbanização nas bacias de aplicação, principalmente àquelas relacionadas à capacidade de infiltração que é o ponto mais prejudicado com o avanço da

impermeabilização urbana. As soluções que utilizam estruturas de infiltração, contribuem diretamente para diminuição do volume escoado, reduzindo a probabilidade de alagamentos. Com o passar do tempo, essas soluções passaram a ser conhecidas como medidas compensatórias, BMP (*Best Management Practices*) ou LID (*Low Impact Development*).

3.3.1 Telhados verdes

Segundo Ohnuma, Almeida Neto & Mediondo (2014), as coberturas ou telhados verdes datam de milhares de anos, sendo das mais antigas construídas, as mais famosas citadas são os Jardins Suspensos da Babilônia, considerados uma das sete maravilhas da antiguidade. Construídos por volta de 500 anos a.C., eles estão sobrepostos em feixes de pedra com camadas de linguetas e de piche grosso, compostos por camadas de solo, plantas e árvores. Esse tipo de estrutura apresenta benefícios através da diminuição do volume de água escoada superficialmente para áreas de drenagem durante as chuvas. A espessura da sua camada de solo está diretamente relacionada com sua capacidade de armazenamento durante o processo de infiltração. A ideia de sua utilização parte da necessidade de substituir as áreas verdes perdidas devido ao processo de urbanização.

Para a construção é necessário levar em conta alguns fatores que podem acarretar problemas de funcionamento dos telhados. O primeiro ponto que deve ser salientado é a verificação da capacidade de suporte do telhado para aplicação em uma estrutura já existente. Também se faz necessário uma execução cuidadosa, principalmente na parte da impermeabilização a fim de evitar problemas com infiltração na cobertura convencional. Todas as camadas executadas dentro dos padrões de projeto. Pode-se resumir em duas condições as características que definem um bom telhado verde: suporte suficientemente resistente e boa execução de suas diferentes camadas.

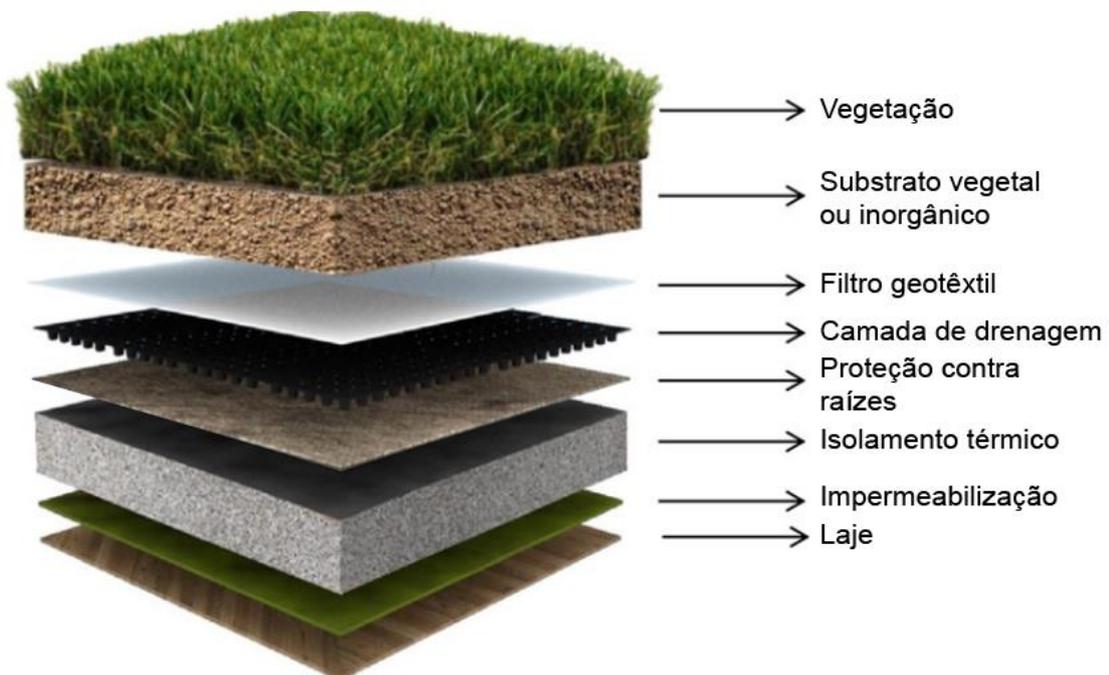
Britto (2001) define um telhado verde, Figura 3, como composto pelas seguintes camadas:

- Vegetação: espécies que possam melhor se adaptar às condições impostas pelo clima, substrato, estrutura de cobertura que se dispõe;
- Substrato vegetal ou inorgânico: dependendo do tipo de vegetação escolhida, com capacidade para fornecer nutrientes e reter água;

- Filtro geotêxtil: funcionando como membrana filtrante para impedir a passagem de finos oriundos dos substratos;
- Camada de drenagem: com a função de extrair do substrato o excesso de água da chuva;
- Isolamento térmico: colocado de acordo com as necessidades térmicas locais;
- Proteção contra raízes: de fundamental importância pois impede a penetração das raízes na laje e garante a idoneidade do sistema da cobertura;
- Camada de impermeabilização: protege a construção da infiltração de água na laje;
- Laje: adequadamente dimensionado para receber o peso do substrato e da vegetação que deve suportar.

Existem dois tipos principais em que podem ser classificados os telhados verdes, de acordo com a espessura do substrato, tipo de vegetação e necessidade de manutenção. Estes tipos são: os telhados verdes extensivos e os telhados verdes intensivos.

Figura 3 - Camadas do telhado verde.



Fonte: Traduzido de Vijayaraghavan & Joshi (2015).

Para Britto (2001), o telhado verde extensivo é formado por uma cobertura vegetal delgada, com espessura geralmente menor que 10 cm, por plantas de baixo porte, com abastecimento de água e substâncias nutritivas por processos naturais. Enquanto que o telhado verde intensivo possui um substrato de espessura maior, geralmente acima de 20 cm, plantas, árvores e arbustos de altura maior e manutenção típica de um jardim. Vale notar que o telhado verde intensivo necessita de estrutura bem mais reforçada que o extensivo, devido ao acréscimo de carga e à alta necessidade de manutenção. Devido às suas características, o telhado verde intensivo possui custo maior e demanda mais irrigação do que o telhado verde extensivo que, por sua vez, possui limitações para escolha de vegetação devido ao substrato menor.

Dentre as aplicações para o telhado verde, pode-se destacar sua funcionalidade na mitigação de problemas de alagamentos. Não obstante, pesquisas como a de Kolb (2003 *apud* OHNUMA, ALMEIDA NETO & MEDIONDO, 2014) também mostram a possibilidade de benefícios térmicos através da aplicação dos telhados. O autor realizou estudos na cidade de Veitshochheim, na Alemanha, e comprovou que essas estruturas verdes podem diminuir significativamente a demanda por refrigeração ao ser comparado com um telhado convencional, apresentando redução da amplitude térmica de 60 a 90%. Já na área de drenagem, Lima (2013) estudou a utilização de telhados verdes como técnica de redução dos picos de escoamento superficial durante eventos de precipitação intensa obtendo resultados satisfatórios, com o telhado chegando, após um longo período de estiagem com precipitação de baixa intensidade, a reter 100% do volume precipitado.

Uma característica que torna os telhados uma solução interessante é sua fácil integração com o meio já existente. As vantagens e desvantagens de sua aplicação são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens dos telhados verdes.

Vantagens	Desvantagens
Redução do volume de escoamento superficial durante precipitações.	Maior necessidade de manutenção se comparado com telhados convencionais.
Redução do desconforto térmico nos ambientes abaixo dos telhados.	Baixa eficiência para chuvas intensas e prolongadas.
Possibilidade de implantação em telhados já existentes desde que avaliada a condição estrutural.	Dificuldade de implantação quando o telhado possui inclinação elevada.
Apresenta ótima integração com projetos paisagísticos.	Volume armazenado depende da área do telhado.

Fonte: Adaptado de Tominaga (2013), Santos *et al.* (2019).

3.3.2 Pavimentos permeáveis

Usualmente as obras de pavimentação visam conferir maior impermeabilidade possível, com uma escolha cuidadosa de materiais a prova d'água. Esse tipo de medida visa garantir ao solo melhor estabilidade, uma vez que a umidade maior provoca redução da capacidade de carga do solo que suporta o pavimento. Essa impermeabilização se torna um problema principalmente em grandes centros urbanos, onde as superfícies destinadas ao sistema viário podem ocupar áreas consideráveis, intensificando o escoamento superficial e os problemas de alagamentos. A partir desse problema, surgiu a ideia do uso de pavimentos permeáveis, visando devolver ao solo condições próximas àquelas que haviam antes da pavimentação.

O pavimento com estrutura porosa foi pioneiramente aplicado entre 1945 e 1950 na França, sem muito sucesso principalmente devido às limitações tecnológicas inerentes à época. No final dos anos 1970 o tema voltou a ser estudado em alguns países como a França, os Estados Unidos, o Japão e a Suécia (AZZOUT *et al.*, 1994 *apud* ACIOLI, 2005). De forma sucinta, pode-se definir como pavimentos permeáveis, as estruturas que possuem, em sua composição, vazios que permitem a passagem de ar e água. Sua camada de revestimento é, normalmente, constituída de concreto poroso moldado *in loco* ou pré-moldado (Fotografias 1a e 1b, respectivamente).

Fotografia 1 - Pavimento permeável com concreto moldado *in loco*.a) Concreto moldado *in loco*.

b) Concreto pré-moldado.

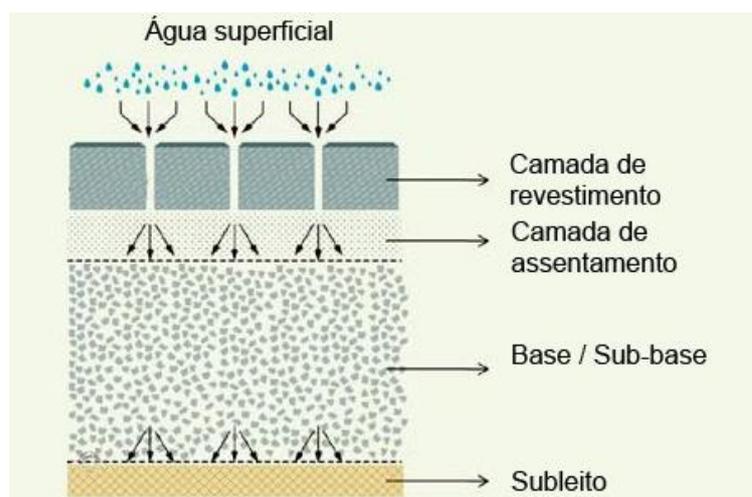


Fonte: ABCP (2011).

Para se atingir alta porosidade, o concreto moldado *in loco* deve possuir poucos finos, resultando nos vazios por onde a água passa, e o revestimento deverá permitir a passagem rápida da água, que ficará armazenada por um determinado período nas camadas de base e sub-base, funcionando como reservatório e filtro. Na maioria das vezes, os pavimentos permeáveis podem contribuir mais do que áreas urbanas livres de pavimentação no combate ao problema de impermeabilização. Isso se dá principalmente pelo fato de que as áreas livres de pavimentos possuem camadas de solo altamente compactadas, e mesmo àquelas que apresentam cobertura vegetal, também possuem camadas inferiores compactadas. Essa compactação dificulta o processo de infiltração da água (ABCP, 2011). Azzout *et al.* (1994 *apud* ACIOLI, 2005) definem que os pavimentos permeáveis funcionam através da entrada imediata da água da chuva no seu corpo.

Após permanecer armazenada temporariamente nos vazios da camada reservatório, a água deverá evacuar de forma lenta favorecendo a infiltração no solo, ou sendo direcionada à rede de drenagem. Pode-se definir como sendo suas camadas constituintes as seguintes: camada de revestimento, camada de assentamento (para o caso de pavimentos permeáveis com blocos pré-moldados), base ou sub-base e subleito. Na Figura 4 é apresentada uma seção típica para esse tipo de pavimento.

Figura 4 - Seção típica de um pavimento permeável.



Fonte: Adaptado de ABCP (2011).

Apesar de não se constituir em uma técnica usual no Brasil, os pavimentos permeáveis têm ganhado cada vez mais espaço no meio acadêmico. Pinto, Martins & Porto (2011) pesquisaram os pavimentos permeáveis, através da implantação de dois módulos de pavimentos em revestimento de blocos de concreto de cimento Portland. Os autores monitoraram os pavimentos por seis meses utilizando uma estação pluviométrica e sensores de níveis instalados em caixas coletoras. Os resultados mostraram um amortecimento para o pico de vazão de até 85% em alguns casos. No Quadro 3 são apresentadas algumas vantagens e limitações referentes ao emprego de pavimentos permeáveis.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens dos pavimentos permeáveis.

Vantagens	Desvantagens
Retenção temporária das águas diminuindo assim os picos de escoamento.	Pavimentos porosos envolvem um risco de falha considerável (colmatagem ou má construção).
Redução da necessidade de meio-fio e canais de drenagem.	Necessidade de mão de obra especializada para sua construção.
Aumento da segurança e conforto em vias.	Risco de contaminação de aquífero.
Alta integração com a obra, não necessitando de espaço exclusivo para implantação.	Tende a se tornar obstruído se mal construído ou erroneamente mantido.

Fonte: Adaptado de Tominaga (2013) e Acioli (2005).

3.3.3 Jardins de chuva

Os jardins de chuva são dispositivos de drenagem do tipo controle na fonte que funcionam como estruturas de retenção, infiltração e tratamento de águas advindas da chuva. São cobertos por uma camada vegetal e baseados no sistema de biorretenção. Eles são extremamente funcionais uma vez que se adaptam facilmente a paisagem do local. Contribuem para a redução de alagamentos devido à sua capacidade de retenção e de infiltração de água que retarda o escoamento superficial (MELO *et al.*, 2014). Na Fotografia 2 é apresentado um modelo exemplo de jardim de chuva que foi implantado em Sydney, Austrália.

Fotografia 2 - Jardim de chuva.



Fonte: Ciclo Vivo (2018).

Melo *et al.* (2014) apresentaram um estudo experimental de um jardim de chuva, em Recife, avaliando as funções de retenção, armazenamento e infiltração da água de chuva proveniente de um telhado. Os autores utilizaram os modelos introduzidos por Horton e Mezencev para representar as características de infiltração do solo natural e da primeira camada do jardim de chuva. Segundo os autores, os resultados foram satisfatórios e durante o período de monitoramento não foi observado extravasamento na estrutura, mostrando-se uma técnica aplicável para o manejo das águas pluviais urbanas.

Como são estruturas rasas, os jardins de chuva podem ser implantados em passeios ou áreas adjacentes a estacionamentos. No Quadro 4 são apresentados vantagens e desvantagens inerentes a esse tipo de estrutura.

Quadro 4 - Vantagens e desvantagens dos Jardins de chuva.

Vantagens	Desvantagens
Retenção temporária das águas diminuindo assim os picos de escoamento.	Custo de implantação elevado em comparação com outras técnicas de controle de alagamentos.
Recarga das águas subterrâneas.	Riscos de colmatção para estruturas muito grandes.
Menor custo de manutenção por não utilizar tubulações.	Necessidade de um espaço para implantação relativo a área de contribuição.
Fácil aceitação pela população.	

Fonte: Adaptado de Melo (2011).

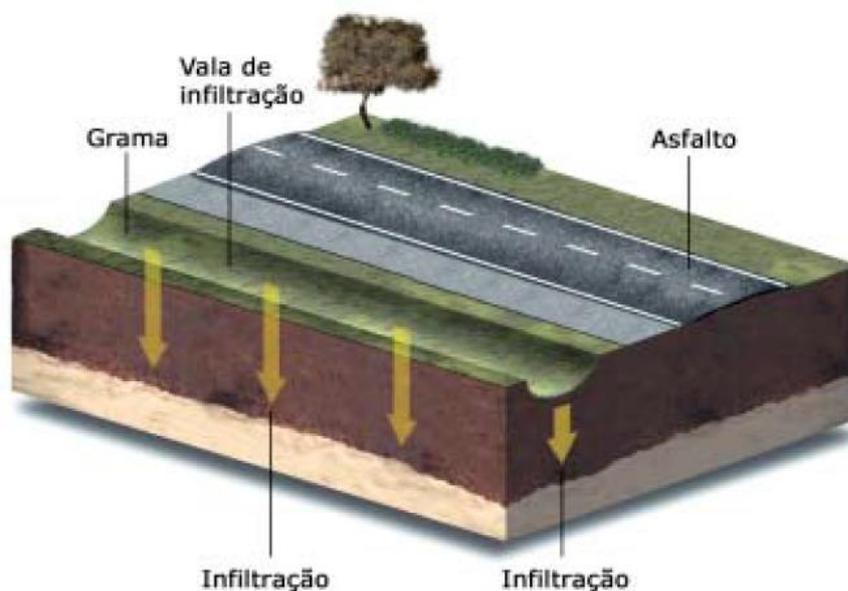
3.3.4 Valas vegetadas

As valas vegetadas ou valetas são simples depressões escavadas no solo com o objetivo de permitir a detenção ou a infiltração de água proveniente das chuvas. Quando estas depressões possuem dimensões longitudinais significativamente maiores que suas dimensões transversais, elas são denominadas de valas ou valetas. Quando sua dimensão longitudinal não é tão maior que sua dimensão transversal pode-se chama-la de plano de infiltração ou detenção. Estas estruturas possuem a função de armazenamento temporário da água proveniente das chuvas, quando estas contam também com a capacidade de infiltração, são denominadas de valas ou planos de infiltração (BAPTISTA, NASCIMENTO & BARRAUD, 2005).

Seu funcionamento é bastante simples, a água incide de forma direta nestes dispositivos a partir da precipitação, ou também pode ser feito a afluência a partir de tubulações. A detenção da água é efetuada a superfície livre e a evacuação das águas é efetuada por infiltração, nas estruturas com essa capacidade, ou por deságue superficial em corpo receptor. A escolha desta estrutura, entretanto, está condicionada ao grau de manutenção e fiscalização demandados, uma vez que as valas ou valetas precisam de manutenção permanente, do contrário correm o risco de serem alvos de despejos clandestinos indesejáveis e se tornarem esgotos a céu aberto. A manutenção da vala vai desde manter a vegetação no tamanho ideal, até irriga-la

durante o período de seca, bem como coletar folhas e evitar o acúmulo de lixo. Na Figura 5 é apresentada uma disposição de uma vala vegetada com a capacidade de infiltração.

Figura 5 - Vala vegetada com capacidade de infiltração.



Fonte: FEAM (2006).

As valas ou planos vegetados constituem alternativas facilmente adaptáveis aos projetos paisagísticos sendo de fácil instalação e com a função de diminuir o escoamento superficial durante precipitações. As vantagens e desvantagens em se utilizar estas estruturas são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Vantagens e desvantagens das valas vegetadas.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de instalação e manutenção.	Necessidade de manutenção periódica.
Recarga das águas subterrâneas.	Possibilidade de estagnação de águas com sérias consequências sanitárias.
Ganhos paisagísticos, resultando na valorização do espaço urbano.	Necessidade de um espaço para implantação exclusivo.

Fonte: Baptista, Nascimento & Barraud (2005).

3.4 Incentivos e custos à adoção de tecnologias alternativas

3.4.1 Incentivos à adoção de tecnologias alternativas de controle de alagamentos

O resultado negativo que o alto grau de impermeabilização gera nos grandes centros urbanos afeta diretamente a qualidade de vida de seus moradores. Durante as precipitações, a água sem ter para onde escoar acaba por provocando vários pontos de alagamentos. Dessa forma, com o intuito de melhorar a sustentabilidade algumas cidades ao longo do Brasil têm aprovados leis que visam incentivar a implantação de medidas capazes de reduzir o impacto da urbanização. Algumas leis versam sobre a redução do IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) para edificações que contemplem a construção dessas medidas, enquanto outras leis falam da obrigatoriedade da implantação de tais medidas para edificações a partir de um certo limite de área.

A cidade do Recife possui a lei nº 18.112 (RECIFE, 2019a) que dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação de telhados verdes e/ou construção de reservatório de acúmulo. Através desta foi estabelecido que todos os projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais com mais de 400 m² de coberta, deverão prever a implantação de Telhados verdes para sua aprovação. Também na linha de obrigatoriedade de instalação de telhados verdes, o município de Guarulhos estabelece através da lei nº 7031 (GUARULHOS-a, 2019) que todos os projetos de edificações, residenciais ou não, com mais de 3 pavimentos, protocolados na Prefeitura deverão prever a construção de telhados verdes para sua aprovação.

Atuando de uma forma diferente, podemos citar os municípios de Salvador e do Rio de Janeiro que, respectivamente através do decretos nº 25.899 de 24 de março de 2015 (SALVADOR-a, 2019) e decreto nº 35.745 de 06 de junho de 2012 (RIO DE JANEIRO, 2019), criaram programas de qualificação para atribuir às edificações selos/certificações de qualidade de acordo com as tecnologias verdes implantadas dentre elas, os telhados verdes.

Outras leis por sua vez promovem a utilização de telhados verdes por meio de incentivos fiscais, em sua maioria concedendo desconto no IPTU. Dentre elas podemos citar a Lei complementar nº 235 de 2012 do município de Goiânia (GOIÂNIA, 2019) que concede descontos de até 20% do IPTU a quem instalar infraestruturas

sustentáveis, dentre elas, os pavimentos permeáveis e os telhados verdes. O município de Guarulhos através da lei nº 6.793 de 2010 (GUARULHOS-b, 2019) também concede descontos no IPTU de 3% a 5% pela implantação de telhados verdes, sistemas de captação de água de chuva, entre outros.

3.4.2 Comparativo entre alternativas de controle de alagamentos

As alternativas para controle de alagamentos destacadas nesta pesquisa foram: pavimentos permeáveis, jardins de chuva, valas vegetadas e telhados verdes. por serem técnicas que apresentam boa integração com o meio. Além dessas, existem outras como: trincheiras de infiltração e retenção, poços de infiltração e micro reservatórios ou cisternas. Apresenta-se no Quadro 6 um comparativo com relação à manutenção e ao custo de implantação das técnicas destacadas.

Quadro 6 - Custo estimado de implantação e nível de manutenção.

Estrutura de controle	Manutenção	Custo de implantação (R\$)
Telhado verde	Mínima	173,00/m ²
Pavimento permeável	Alta	118,57/m ²
Jardim de chuva	Moderada	397,38/m ²
Vala vegetada	Moderada	151,55/m a 198,70/m

Fonte: Costa, Bordin & Maffessoni (2018), Acioli (2005), ICPRB (2018) e Tominaga (2013).

De acordo com as informações apresentadas na Tabela 6, observou-se que o telhado verde é o que apresenta a manutenção mais fácil entre as alternativas, enquanto os pavimentos permeáveis apresentam a mais difícil. Em contrapartida, o pavimento apresenta o menor custo de implantação que é estimado em R\$ 118,57/m², enquanto o jardim de chuva apresenta o custo de implantação mais caro de R\$ 397,38/m².

Com base nas informações acima, e considerando a exigência prevista na Lei Municipal No. 18.112 (RECIFE, 2019a), o telhado verde foi escolhido como sendo um dos objetos de estudo deste trabalho. Por outro lado, sendo a tecnologia de menor custo de implantação, os pavimentos permeáveis, ambas estruturas foram investigadas.

3.5 Modelagem

De acordo com Maksimovic (2001), a modelagem na drenagem urbana se propõe atender a diversos objetivos, tais como a avaliação de todas as respostas da bacia, como parte da estratégia e planejamento detalhado do sistema, avaliação da poluição, gerenciamento operacional, controle em tempo real e análise de interação entre sub-bacias. Para Righetto, Moreira & Sales (2009), a modelagem hidrológica integra os procedimentos metodológicos de quantificação do escoamento na bacia a partir da precipitação máxima, associada a uma probabilidade de ocorrência. Segundos os autores, os modelos matemáticos do tipo chuva-vazão simulam os processos de escoamento na bacia, podendo ser usados em projeto de estruturas, na estimativa do nível de enchente ou na avaliação do impacto da urbanização sobre a drenagem. O diferencial trazido com a incorporação das novas abordagens da drenagem urbana se refere à grande consideração que deve ser dada à infiltração e consequentemente a redução na parcela vazão associada ao escoamento superficial.

De acordo com Cabral *et al.* (2009), os pacotes computacionais de drenagem urbana podem ser entendidos como a associação de modelos tipo chuva-vazão com modelos de propagação de escoamentos (em canais ou galerias). Para o estudo de alagamentos urbanos, existem vários métodos de análises. Dentre estes destaca-se a pesquisa de Carbone *et al.* (2014), onde os autores, na ausência de radares, utilizaram uma rede densa de pluviômetros, no município de Londres, para prever precipitações que poderiam conduzir a alagamentos. Para Cabral *et al.* (2009), os pacotes computacionais mais usados atualmente são: o SOBEK (*Delft Hydraulics*, Holanda), o Infoworks (*Wallingford Institute*, Inglaterra), o MOUSE-DHI (Dinamarca) e o modelo SWMM (USEPA, Estados Unidos).

Os autores destacam o pacote SWMM - *Storm Water Management Model* (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana), da EPA, como o pacote computacional mais utilizado para simulação da drenagem urbana, principalmente por ser de domínio público e ter seu código de programação aberto, permitindo modificações. Ao longo das últimas décadas, o SWMM foi incorporando diversos melhoramentos provenientes de pesquisas da USEPA e também de outras instituições (CABRAL *et al.*, 2009). Jang *et al.* (2007) também utilizaram o SWMM no estudo de eventos de precipitação em quatro áreas de desenvolvimento planejado na Korea, obtendo resultados muito próximos aos observados em situações reais.

Cipolla, Maglionico & Stojkov (2016) também utilizaram o SWMM no estudo de precipitações. Os autores estudaram o impacto da utilização de um telhado verde extensivo na redução do escoamento durante precipitações. Eles analisaram 69 eventos de precipitação, onde os resultados das simulações com o SWMM apresentaram uma diferença menor do que 9% dos valores observados. Palla & Gnecco (2015) utilizaram o SWMM para estudar o efeito da utilização de Dispositivos de Baixo Impacto (LID) na restauração das condições naturais de escoamento em centros urbanos obtendo resultados satisfatórios.

Dentro do SWMM o módulo de infiltração utiliza os dados de precipitação inseridos para calcular a quantidade de água que infiltra na parcela permeável de cada sub-bacia. Segundo Rossman (2015), dentre os modelos de infiltração que podem ser empregados temos o modelo empírico de Horton e o modelo teórico de Green-Ampt. Do restante da água que escoar, parte vai para os sistemas de drenagem, que durante uma precipitação intensa ficam com a seção cheia e o escoamento passa a ser escoamento em conduto forçado. Rossman (2015) aponta que o SWMM pode utilizar tanto a equação de Hazen-Williams quanto a de Darcy-Weisbach para a perda de carga unitária durante o escoamento em conduto forçado.

Para a discretização da bacia, deve-se avaliar previamente a necessidade de divisão em sub-bacias. Garcia *et al.* (2004) estudaram a discretização dos dados de bacias hidrográficas para simulações no SWMM. Para uma área de 4,95 km² eles consideraram três cenários, um com a bacia concentrada, um com divisão em sete sub-bacias e outro com divisão em onze sub-bacias. Os autores obtiveram um coeficiente de determinação R² de 0,42 para o cenário da bacia concentrada, e 0,92 para ambos os cenários de sete e onze sub-bacias. O estudo atenta para o fato que uma maior divisão da bacia sem um aumento no detalhamento dos parâmetros, nem sempre significa melhorias nos resultados das simulações.

De forma geral, o SWMM é um modelo capaz de simular a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas. Com possibilidade de aplicação em um único evento chuvoso ou para uma simulação contínua de longo prazo. A parte referente ao escoamento no SWMM opera com um conjunto de sub-bacias que recebem precipitação e geram escoamento e cargas de poluentes. O módulo de transporte simula o percurso das águas através de um sistema composto por tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e

tratamento. O SWMM acompanha a evolução do escoamento superficial e cargas poluidoras dentro de cada uma das sub-bacias assim como as informações de vazões, altura de escoamento e qualidade de água em cada canal (ROSSMAN, 2015).

De acordo com Rossman (2015) são as equações de Saint Venant que regem o transporte de água nos condutos do modelo, cabendo ao usuário a determinação do grau de sofisticação desejado na simulação para resolver as equações. Existem assim três modelos de transportes para resolução das equações de Saint Venant, sendo eles:

- O fluxo em regime uniforme;
- A Onda cinemática;
- A onda dinâmica.

A Equação 6, equação hidrodinâmica, representa resumidamente as equações de Saint Venant (SILVA, 2011).

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1+(gn^2\Delta t)\frac{|V|}{R^{-4/3}}} \left\{ Q_t + 2\bar{V} \left[\frac{\Delta Ac}{\Delta t} \right]_t + \bar{V}^2 \left[\frac{Ac_1 Ac_2}{L} \right] \Delta t - gAc \left[\frac{(H_2 H_1)}{L} \right] \Delta t \right\} \quad (6)$$

Onde: g = aceleração da gravidade em m/s^2 ;

n = coeficiente de rugosidade de Manning;

R = raio hidráulico em metros;

Ac = superfície da seção transversal do conduto em m^2 ;

L = comprimento do conduto em metros;

H = cota piezométrica em metros;

V = velocidade no conduto em m/s ;

Q = vazão no conduto em m^3/s .

O modelo de Fluxo em regime uniforme representa a forma mais simples de transporte de água, para isto, considera-se que em cada intervalo de tempo o escoamento é uniforme e permanente. Em outras palavras o modelo apenas transfere o hidrograma de entrada no nó de montante para o nó de jusante sem atraso ou mudança em sua forma. Enquanto que o Modelo da Onda cinemática resolve a equação da continuidade e uma versão simplificada da equação da quantidade de movimento em cada um dos condutos. Por fim o Modelo da Onda Dinâmica resolve as equações completas unidimensionais de Saint Venant, gerando assim resultados mais precisos. O resultado vem da aplicação da equação da continuidade e da

quantidade de movimento nos condutos e da equação da continuidade dos volumes nos nós (ROSSMAN, 2015).

Desenvolvido em 1971, o SWMM vem sendo atualizado várias vezes desde então. Utilizado amplamente no mundo em planejamento de sistemas de drenagem, análises e projetos ele também possui muitas aplicações em áreas não urbanas.

3.6 Geoprocessamento

Para se efetuar uma boa discretização da área de estudo é necessário o uso de ferramentas especiais, para estabelecer os parâmetros necessários para construção do modelo. Nesse aspecto, Cabral *et al.* (2009) apontou que as ferramentas de geoprocessamento se incorporam muito bem aos modelos de drenagem urbana e trazem grandes facilidades de entrada de dados e de representação geométrica dos sistemas de drenagem. Além disso, também se incorporam aos modelos diversas ferramentas de pós-processamento que apresentam facilidade de elaboração de diversos tipos de mapas e facilidade de construção de gráficos para representar as variáveis envolvidas.

Segundo Dongquan *et al.* (2009), tradicionalmente, a discretização da área de captação para a modelagem precipitação-escoamento é realizada manualmente nos mapas da bacia hidrográfica, o que constitui um trabalho demorado que pode levar à redução da precisão dos resultados. Os autores destacam o avanço proporcionado à modelagem com o SWMM com o emprego de uma base no Sistema de Informação Geográfica (SIG) e apresentaram um estudo combinando a discretização automática à modelagem precipitação-escoamento em Macau usando um modelo SWMM. Os resultados mostraram que a abordagem proposta superou o método de discriminação convencional em termos de produção de parâmetros significativos e evitando a maioria das tediosas tarefas preliminares (DONGQUAN *et al.*, 2009).

Dentre as ferramentas de geoprocessamento empregadas na atualidade, sem dúvidas, uma das mais utilizadas é o Quantum GIS (QGIS), que é um software livre, de código aberto e plataforma cruzada, distribuído em www.QGIS.org. Este software é um SIG que permite a manipulação de dados espaciais nos mais diversos *datums* disponíveis em escala global. De acordo com Bartolini *et al.* (2013), o QGIS inclui todas as funções e recursos GIS comuns e possui uma interface intuitiva e amigável. Segundo os autores, uma das grandes vantagens do QGIS é a disponibilidade de

plugins de repositórios oficiais e de terceiros que oferecem uma grande quantidade de funções adicionais.

Dentre as pesquisas na área de geoprocessamento, podemos citar a de Nascimento *et al.* (2013). Os autores utilizaram o QGIS para classificar imagens de satélites do centro do município de Angra dos Reis - RJ e, mesmo sem modificar as regras classificação do programa, obtiveram uma exatidão de 66 % ao compararem com os dados reais. O fato de possuir código aberto torna o QGIS um ótimo ambiente para desenvolvimento de módulos adicionais pela comunidade de usuários. Isso é demonstrado nas pesquisas de Nielsen *et al.* (2017) e Park *et al.* (2019). Na primeira, os autores desenvolveram o WET (Water Ecosystems Tool) uma área de trabalho como um *plugin* para o QGIS, para aplicação e validação de modelos de ecossistemas aquáticos.

3.6.1 Classificação de imagens

Dentro do Geoprocessamento, uma atividade que contribui bastante para pesquisas é a de classificação de imagens. Principalmente quando a pesquisa envolve grandes áreas que precisam ser mapeadas por tipo de uso do solo, as ferramentas de geoprocessamento são muito mais rápidas na atividade de classificação de imagens.

Pode-se definir como classificação de imagens o processo que busca extrair informações em imagens para reconhecer objetos homogêneos e/ou padrões ao se mapear áreas da superfície terrestre (INPE, 2019). O resultado de uma classificação digital é apresentado por meio de classes ou áreas que possuem características semelhantes. É constituído por um mapa de *pixels* classificados utilizando cores.

O primeiro processo na classificação é a etapa de treinamento ou amostragem, que pode ser supervisionado ou não-supervisionado. No caso em que existem regiões na imagem que o usuário possui informações que permitem a identificação de classes de interesse da pesquisa, o treinamento é dito supervisionado. No treinamento supervisionado o usuário determina uma amostra representativa das classes de interesse na imagem. Se a classificação proceder com a utilização de um algoritmo para identificação das classes presentes na imagem, a classificação é dita não supervisionada.

No repositório do QGis há um *plugin* capaz de realizar a classificação supervisionada de imagens, o SCP ou *Semi-automatic Classification Plugin* (Complemento de classificação semi-automática). O SCP é capaz de realizar o processo de classificação supervisionada, retornando como resultado um raster com os valores de *pixels* já classificados. Segundo Congedo (2019) o SCP foi desenvolvido para ser um conjunto de ferramentas para processamento de imagens raster, com objetivo de tornar mais fácil a classificação de uso do solo que pode ser utilizado até por pessoas que não possuem geoprocessamento como seu principal campo.

3.6.2 PE3D

No que se refere ao geoprocessamento uma das grandes dificuldades é a obtenção de dados precisos com imagens de satélite. Isso se dá pois os satélites que têm imagens disponibilizadas gratuitamente, em sua maioria, não possuem uma alta resolução. Exemplificando, o amplamente conhecido satélite Landsat-8, que fornece imagens gratuitas no Brasil, possui uma resolução espacial de apenas 15,0 m na banda pancromática e 30,0 m nas bandas multiespectrais (ENGSAT, 2019a). Em contrapartida, o satélite Ikonos-1, com imagens pagas, possui uma resolução espacial de 1,0 m na banda pancromática e 4,0 m nas bandas multiespectrais (ENGSAT, 2019b). A baixa resolução para as bandas do satélite Landsat-8 o dificulta consideravelmente a classificação de uso do solo, em se tratando da identificação de telhados residenciais, uma vez que sua resolução espacial (tamanho do *pixel*) pode ser maior do que o telhado de algumas casas.

No geoprocessamento também são muito utilizados os Modelos Digitais de Elevação (MDE) para poder determinar a declividade em bacias hidrográficas, assim como seu exutório. O MDE mais utilizado hoje em dia, e de acesso gratuito, é o obtido pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da Nasa no ano 2000. Muito difundido em estudos, porém conta com uma resolução vertical de 30,0 m para os Estados Unidos e de apenas 90,0 m para outras localidades (EMBRAPA, 2019). A utilização em cidades com características de baixa declividade se torna inviável, já que o modelo possui uma escala de medida grande. Como solução ao problema de resolução para as imagens de satélite disponibilizadas gratuitamente, em Pernambuco, há a disponibilidade de um mapeamento em alta precisão, o Pernambuco Tridimensional (PE3D).

O Pernambuco Tridimensional teve seu início a partir do Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE), financiado pelo banco mundial. Com o êxito obtido no programa, foi tomada a decisão de realizar um perfilamento a laser para todo o Estado de Pernambuco originando assim uma base de dados de alta resolução com dados das variações de altitude ao longo do território do estado. O serviço completo compreende o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de todo o território pernambucano. O conjunto de dados está sendo apresentado todo em meio digital. O levantamento resulta em 75 bilhões de pontos com coordenadas planimétricas e altimétricas, ou seja, um ponto a cada 1,3 m² de todo o território do estado. Isso o torna uma notável base de dados espaciais para suporte a muitas iniciativas para o desenvolvimento sustentável de Pernambuco (PERNAMBUCO, 2019).

4 METODOLOGIA

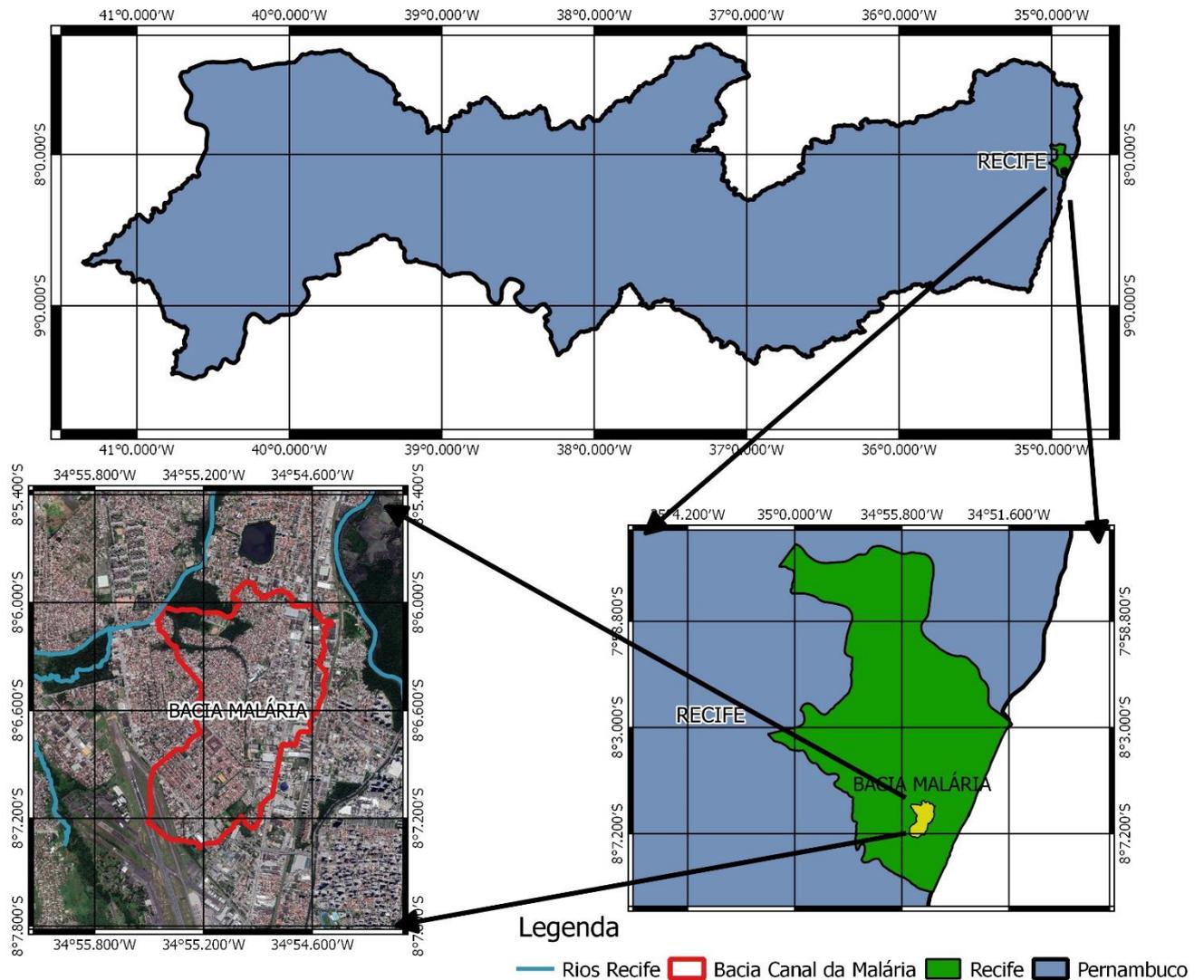
4.1 Área de estudo

A cidade do Recife, localizada no litoral do estado de Pernambuco, apresenta grande parte de seu território em uma planície onde se localizam as bacias de três rios urbanos, o rio Capibaribe, o rio Tejipió e o rio Beberibe. Não diferente de outros grandes centros urbanos, o Recife enfrenta problemas de alagamento, principalmente devido à urbanização acelerada que resultou em um alto grau de impermeabilização do solo. Uma vez que a água proveniente das chuvas não tem como infiltrar, ela passa a escoar nas ruas provocando problemas para o trânsito, para a população e para o comércio local, além de ser um facilitador na transmissão de doenças.

Visando estudar as alternativas para controle de alagamentos, foi escolhido um ponto crítico na cidade do Recife localizado em 8° 06' 59" S, 34° 55' 02" W, que está dentro da bacia do Canal da Malária, que é afluente do Rio Tejipió. No Mapa 1 é demonstrado a localização da área de estudo dentro da cidade do Recife e do estado de Pernambuco. O Canal da Malária possui uma extensão de aproximadamente 3,36 km e sua bacia possui área de 3,06 km² estando localizada entre os bairros do IPSEP e Imbiribeira (EMLURB, 2014). O canal tem seu início próximo ao Aeroporto dos Guararapes e termina ao se encontrar com o Rio Tejipió 3,36 km depois. No Mapa 1, pode-se observar melhor a localização da bacia do Canal da Malária.

Em boa parte de sua extensão, o Canal da Malária possui seção retangular e revestimento em placas de concreto com sua largura variando de 2,70 m até 4,85 m, enquanto o restante possui seção irregular com sua largura chegando a 13,00 m (EMLURB, 2014). Na sua parte revestida, o canal apresenta problemas nas placas de concreto como rachaduras, além de possuir lixo e vegetação ao longo de sua calha. A parte não revestida também apresenta problemas devido a presença de vegetação e lixo.

Mapa 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As dificuldades de drenagem no Canal da Malária ocorrem devido ao estado ruim de conservação de sua estrutura e a falta de consciência da população que joga lixo diretamente no local. Na Fotografia 3, pode-se ver como estão as placas de concreto e o lixo presente no canal.

Fotografia 3 - Estado atual do Canal da Malária.

- a) Lixo ao longo da calha do canal. b) Revestimento do canal com problemas.



- c) Vegetação ao longo da calha do canal.



Fonte: Autor.

Esse mal condicionamento da estrutura do Canal da Malária o tornam um trecho com alagamentos recorrentes durante eventos de precipitação. Mesmo com precipitações menos intensas as ruas já alagam, gerando transtornos para a população no local (Fotografia 4).

Fotografia 4 - Canal da malária alagado.



Fonte: G1-PE (2019).

4.1.1 Equações de chuva do Recife e precipitação na área de estudo

A cidade do Recife dispunha de duas equações de chuvas que haviam sido elaboradas pelas consultoras ENCIBRA, contratada pela Prefeitura do Recife no fim da década de 1970, e Acqua-Plan, contratada pela FIDEM em 1980. Para as equações foram tomados como base dados históricos entre 1926 e 1977 observados nos postos de Olinda e Curado. Diferenciando entre se apenas pelo fato de que a equação da ENCIBRA foi obtida apenas para o Recife, enquanto, que a elaborada pela Acqua-Plan se refere a região metropolitana do Recife (SILVA, 2011).

A equação elaborada pela ENCIBRA para a cidade do Recife é a Equação (7):

$$i = \frac{335,47 \cdot T^{0,218}}{(t + 4)^{0,539}} \quad (7)$$

Onde: T é o tempo de retorno em anos;

t é o tempo de duração da chuva em min.

Equações elaboradas pela Acqua-Plan para a Região Metropolitana do Recife. Deve ser adotado o valor máximo dentre os obtidos para as Equações (8 e 9) a seguir.

$$i_1 = \frac{456,768(T - 1,5)^{0,117} \cdot (1 - 4,54 \cdot 10^{-21} \cdot t^8)}{(t + 6)^{0,5811}} \quad (8)$$

$$i_2 = \frac{72,153(T - 1,75)^{0,173}}{(t + 1)^{0,74926}} \quad (9)$$

Onde: T é o tempo de retorno em anos;

t é o tempo de duração da chuva em min;

i é a intensidade da chuva em mm/h.

Recentemente foi elaborado uma nova equação de chuva intensa para a cidade do Recife. A nova equação foi elaborada no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Recife com o intuito de substituir as equações desenvolvidas pelas consultorias ENCIBRA e Acqua-Plan. Ela foi desenvolvida com base nas precipitações de máximas anuais obtidas de três postos pluviométricos: Recife/Caxangá, Recife/Curado e Recife/Várzea (EMLURB, 2014) e é apresentada na Equação 10.

$$i = \frac{611,3425 \cdot T^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad (10)$$

Onde: T é o tempo de retorno em anos;

t é a duração da chuva em min;

i é a intensidade da chuva em mm/h.

Com base na Equação 10 elaborada pela EMLURB (2014), foi calculado os valores de intensidade de precipitações para os tempos de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos além do total precipitado em cada precipitação. Os valores são apresentados respectivamente na Tabela 1 e 2.

Para a área de estudo também foi considerado um evento de precipitação específico que ocorreu no dia 19 de janeiro de 2018. Neste dia foi registrado chuva que era esperada para o mês inteiro na região do Recife. Na manhã do dia 19 choveu um acumulado de 45 mm em 3 horas, mais da metade dos 88 mm que eram esperados para o mês de janeiro (APAC, 2018; G1-PE, 2018). A partir desse evento específico foi possível realizar o processo de calibração do modelo que será melhor detalhado adiante.

Tabela 1 - Resultado da intensidade das chuvas no Recife em mm/h a partir da equação elaborada pela EMLURB (2014).

t (h)	t (min)	Intensidade (mm/h) de chuva			
		T = 2 anos	T = 5 anos	T = 10 anos	T = 25 anos
0,08	5	139,50	162,58	182,54	212,74
0,17	10	112,35	130,94	147,02	171,34
0,25	15	95,63	111,45	125,14	145,84
0,33	20	84,11	98,02	110,06	128,27
0,50	30	68,99	80,41	90,28	105,22
1,00	60	47,44	55,29	62,08	72,35
2,00	120	31,65	36,89	41,42	48,27
3,00	180	24,77	28,87	32,42	37,78
4,00	240	20,77	24,20	27,17	31,67
6,00	360	16,15	18,83	21,14	24,64
12,00	720	10,47	12,20	13,70	15,97
14,00	840	9,50	11,08	12,44	14,49
20,00	1200	7,59	8,85	9,93	11,58
24,00	1440	6,76	7,88	8,85	10,32
48,00	2880	4,36	5,09	5,71	6,66

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Resultados dos totais precipitados para as intensidades de chuvas calculadas pela equação de chuvas da EMLURB (2014).

t (h)	t (min)	Total precipitado (mm)			
		T = 2 anos	T = 5 anos	T = 10 anos	T = 25 anos
0,08	5	11,62	13,55	15,21	17,73
0,17	10	18,72	21,82	24,50	28,56
0,25	15	23,91	27,86	31,28	36,46
0,33	20	28,04	32,67	36,69	42,76
0,50	30	34,50	40,21	45,14	52,61
1,00	60	47,44	55,29	62,08	72,35
2,00	120	63,31	73,78	82,84	96,55
3,00	180	74,32	86,61	97,25	113,34
4,00	240	83,07	96,81	108,70	126,68
6,00	360	96,93	112,97	126,84	147,83
12,00	720	125,65	146,44	164,42	191,62
14,00	840	133,04	155,06	174,10	202,90
20,00	1200	151,80	176,92	198,64	231,51
24,00	1440	162,36	189,22	212,46	247,61
48,00	2880	209,46	244,12	274,10	319,45

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 O modelo SWMM

Para a simulação no SWMM são necessários alguns dados de entrada sobre a área de estudo. Os principais parâmetros referentes as sub-bacias são apresentados no Quadro 7. A seguir é descrito a obtenção de cada um dos parâmetros necessários para construção do modelo no SWMM, através de técnicas de geoprocessamento e cadastros de microdrenagem obtidos a partir de levantamento feito pela EMLURB (2014) para o Plano Diretor de Drenagem do Recife.

Quadro 7 - Parâmetros da bacia utilizados em uma modelagem no SWMM.

Parâmetros	Descrição
Area	Área da bacia
Width	Largura característica do escoamento superficial
Slope	Declividade média da bacia
Imperv	% da área impermeável da bacia
N-Imperv	Número de Manning da área impermeável
N-Perv	Número de Manning da área permeável
Dstore-imperv	Armazenamento em depressões na área impermeável
Dstore-perv	Armazenamento em depressões na área permeável
Zero-imperv	% da área impermeável sem armazenamento em depressões
Infiltration	Edição dos parâmetros de infiltração da bacia
Land uses	Atribuição dos usos do solo

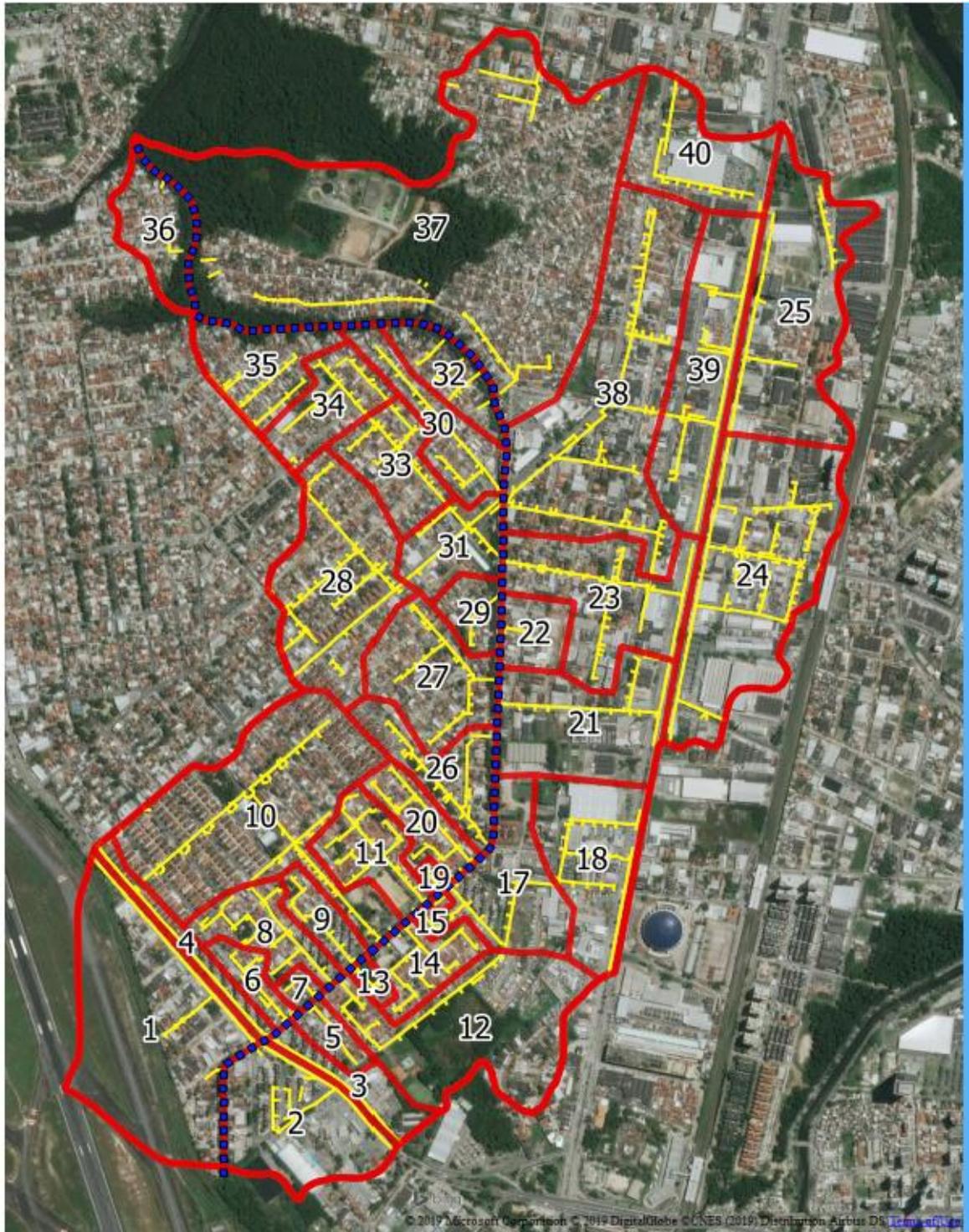
Fonte: Rossman (2015).

4.2.1 Delimitação e caracterização das sub-bacias

Para delimitação das sub-bacias foi utilizado o levantamento aerofotogramétrico obtido através do PE3D. Com imagens de alta resolução foi possível dividir o canal da malária em sub-bacias, levando em consideração a rede de microdrenagem existente e seus limites. A ideia era dividir a área da bacia em sub-bacias que respeitassem o traçado de drenagem existente, dividindo assim a área de influência que cada trecho. No Mapa 2 é possível identificar a relação entre as sub-bacias e a rede de drenagem existente sobrepondo a imagem da bacia do canal da malária.

Com as áreas de contribuição das sub-bacias determinadas e identificadas, conforme Mapa 2, foi necessário a determinação de outras variáveis referentes a cada sub-bacia para construção do modelo.

Mapa 2 - Relação entre Sub-bacias e rede de drenagem.



Legenda

- Canal da Malária
- Rede de drenagem Canal da Malária
- Setorização Canal da Malária

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Largura média da sub-bacia

A largura média em cada sub-bacia foi obtida através da equação do retângulo equivalente que consiste em um retângulo de mesma área e perímetro da bacia original, Equação 11.

$$L_e = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} x \left[1 - \sqrt{\left(1 - \frac{1,128}{K_c}\right)^2} \right] \quad (11)$$

Onde: L_e é a largura equivalente (km); A é área da sub-bacia considerada (km²); P é o perímetro da sub-bacia considerada (km); K_c é o coeficiente de compacidade determinado pela Equação 12.

$$K_c = 0,282 x \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (12)$$

Para os casos em que as sub-bacias já possuem um formato próximo ao de um retângulo, como as sub-bacias 7, 13, 15, 16, 19 e 29, a Equação 5 não possui solução e foi considerado então a largura média da maior rua disponível na sub-bacia.

4.2.3 Declividade média das sub-bacias

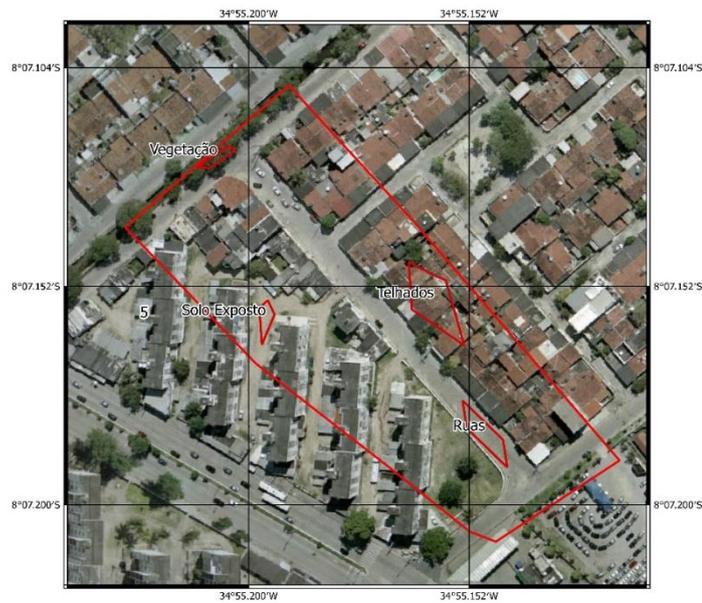
Para obtenção das declividades médias, foi considerado a diferença de altitude entre o ponto mais baixo e o ponto mais alto da rua principal dentro de cada sub-bacia. Para isso foram utilizados os valores de altitudes que constam no Modelo Digital de Elevação obtido a partir do PE3D (PERNAMBUCO, 2019). Obtendo assim uma declividade para cada sub-bacia.

4.2.4 Taxa de impermeabilização

Para obtenção da taxa de impermeabilização em cada sub-bacia foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento dentro do Software *QuantumGis*. Com as imagens de alta resolução obtidas no PE3D, foi realizada classificação supervisionada com o complemento SCP do *Quantum Gis* que, através de amostras conhecidas e determinadas nas imagens de alta resolução, retornou a área de cada sub-bacia referente a quatro tipos de usos do solo, sendo eles: áreas verdes, solo

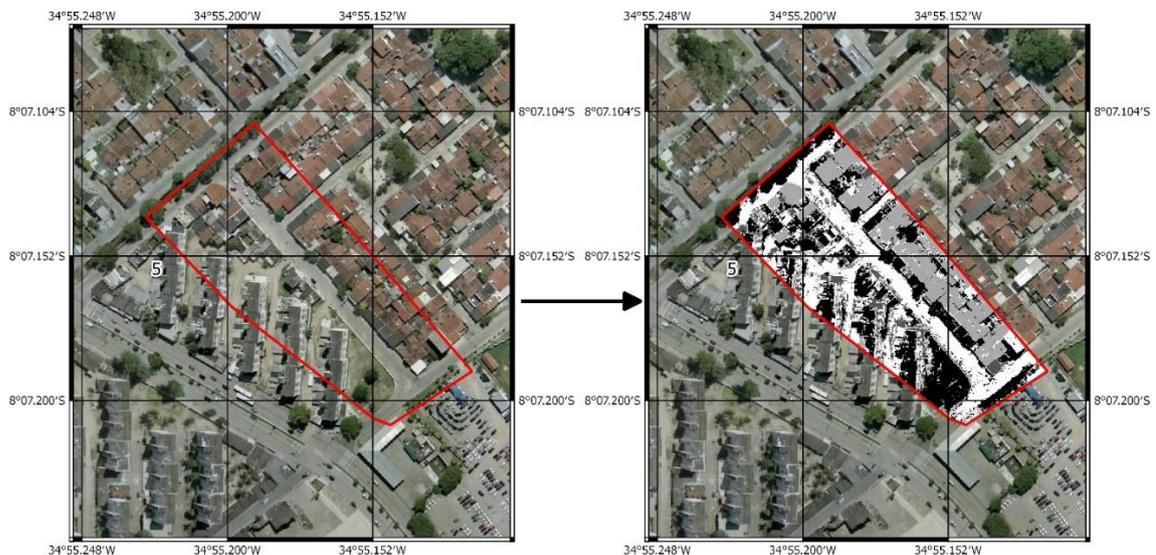
exposto, telhados, ruas e rios ou canais. O *plug-in* de classificação supervisionada retorna uma imagem *raster* com os *pixels* coloridos de acordo com o resultado da classificação. A partir das imagens classificadas foi efetuada a contagem dos *pixels* para determinar a porcentagem de área que era considerada impermeável (área de telhados + área das ruas). No Mapa 3 é apresentado as amostras das classes do processo e no Mapa 4 é apresentado a imagem resultante da classificação para o caso específico da Sub-bacia 5. Na Figura B1 é apresentado o mapa completo da classificação da bacia do Canal da Malária.

Mapa 3 - Amostras das classes de uso do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mapa 4 - Sub-bacia 5 classificada por uso do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 Coeficiente 'n' de Manning para áreas permeáveis e impermeáveis

Para este parâmetro foi levado em consideração as características de recobrimento de solo na área de estudo. Nas áreas impermeáveis, compostas em sua maioria por telhados das edificações e ruas pavimentadas, foi adotado o valor de rugosidade de 0,024, valor que é proposto por Canholi (2005) e utilizado em pesquisa por Silva (2011) e Silva Junior (2015). Já para as áreas permeáveis, compostas por vegetações rasteiras, algumas árvores de grande porte e solo expostos, foi adotado o valor de rugosidade de 0,15. Este valor também é sugerido por Canholi (2005) para áreas permeáveis e foi utilizado nas pesquisas mencionadas acima.

4.2.6 Altura de armazenamento em depressões de áreas permeáveis e impermeáveis

Este parâmetro consiste na definição das condições de retenção de água na superfície durante a precipitação, o SWMM sugere alguns valores a depender do tipo do solo em questão. Para esta pesquisa foram adotados os valores sugeridos pelo modelo através de seu manual que é depressões de 2,54 mm para as áreas impermeáveis. Enquanto para as áreas permeáveis é considerado um armazenamento em depressões de 5 mm (gramas e pastagens) (ROSSMAN, 2015). Ambos os valores estão dentro do sugerido pelo modelo para simulações. No Quadro 8 é apresentado a faixa de valores recomendada para armazenamento em depressões para o modelo SWMM.

Quadro 8 - Armazenamento em depressões.

Cobrimento	Armazenamento em depressões (mm)
Superfícies impenetráveis	1,27 - 2,54
Gramados	2,54 - 5,08
Pastagem	5,08
Serrapilheira	7,62

Fonte: Rossman (2015).

Na Tabela 3 é apresentado uma síntese dos dados de entrada para cada sub-bacia.

Tabela 3 - Síntese dos dados de entrada para as sub-bacias.

SUBBACIA	ÁREA (m ²)	Le (km)	Slope (%)	Imperv. (%)	N permeável	N impermeável
1	183608,88	0,264906	0,970%	55,92%	0,15	0,024
2	92047,52	0,26017	0,560%	55,56%	0,15	0,024
3	28458,49	0,061614	0,670%	75,44%	0,15	0,024
4	24113,93	0,03988	0,170%	65,09%	0,15	0,024
5	15437,12	0,081105	0,694%	60,68%	0,15	0,024
6	17744,39	0,06552	0,292%	66,59%	0,15	0,024
7	10176,88	0,006	0,534%	43,99%	0,15	0,024
8	38150,90	0,083079	0,139%	80,37%	0,15	0,024
9	20459,40	0,075986	0,164%	66,17%	0,15	0,024
10	155642,38	0,147911	0,116%	84,63%	0,15	0,024
11	40320,27	0,107667	0,123%	69,70%	0,15	0,024
12	70439,03	0,080776	0,385%	67,14%	0,15	0,024
13	8923,45	0,0135	0,159%	34,63%	0,15	0,024
14	35363,18	0,102087	0,326%	65,87%	0,15	0,024
15	8422,91	0,01138	0,280%	28,57%	0,15	0,024
16	7121,91	0,01081	0,304%	20,38%	0,15	0,024
17	51691,61	0,092998	0,205%	61,33%	0,15	0,024
18	71929,25	0,145339	0,293%	64,56%	0,15	0,024
19	8306,26	0,0088	0,453%	28,90%	0,15	0,024
20	34459,82	0,097668	0,233%	71,49%	0,15	0,024
21	85666,05	0,152421	0,228%	67,51%	0,15	0,024
22	28428,42	0,01086	0,502%	56,05%	0,15	0,024
23	87075,54	0,111698	0,122%	71,78%	0,15	0,024
24	152853,50	0,184337	0,035%	80,73%	0,15	0,024
25	116485,34	0,130079	0,136%	80,77%	0,15	0,024
26	49432,69	0,095435	0,200%	71,20%	0,15	0,024
27	69331,28	0,185074	0,385%	68,88%	0,15	0,024
28	110503,71	0,183842	0,104%	77,06%	0,15	0,024
29	22252,90	0,0094	0,688%	57,69%	0,15	0,024
30	47215,24	0,085753	0,177%	73,47%	0,15	0,024
31	38757,85	0,122273	0,327%	59,34%	0,15	0,024
32	32243,15	0,089233	0,778%	67,76%	0,15	0,024
33	47586,31	0,140171	0,285%	71,83%	0,15	0,024
34	43391,70	0,126493	0,228%	68,11%	0,15	0,024
35	46184,99	0,105666	0,247%	68,66%	0,15	0,024
36	30745,28	0,07229	0,429%	61,62%	0,15	0,024
37	258574,96	0,141342	0,242%	77,62%	0,15	0,024
38	176563,56	0,163051	0,156%	69,52%	0,15	0,024
39	104621,88	0,145076	0,098%	65,15%	0,15	0,024
40	74416,28	0,157027	0,300%	61,59%	0,15	0,024

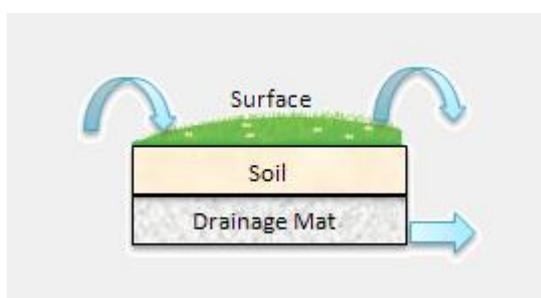
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.7 Parâmetros das alternativas de controle dentro do modelo

Para definição das características das alternativas de controle a serem simuladas neste trabalho, optou-se por seguir as recomendações do manual do Modelo SWMM. O manual define faixas de valores usuais para as características dos telhados verdes e dos pavimentos permeáveis.

Os telhados verdes dentro do SWMM são divididos em três camadas, conforme Figura 6. Cada camada tem um conjunto de parâmetros a serem definidos para permitirem a execução da simulação. Os parâmetros para os telhados verdes são descritos a seguir.

Figura 6 - Divisão de camadas e parâmetros dos telhados verdes dentro do modelo SWMM.



Fonte: Adaptado de Rossman (2015).

Para a camada *Surface* (superfície) os parâmetros são:

- *Berm Height* - altura da berma ou profundidade de armazenamento, para o caso em que há paredes de confinamento no topo da estrutura do telhado é o máximo que a água pode inundar no telhado antes de transbordar;
- *Vegetative volume fraction* - é a fração do volume dentro do armazenamento que é preenchido por vegetação;
- *Surface roughness* - valor do coeficiente “n” de Manning para o escoamento sobre a superfície da estrutura;
- *Surface slope* - é o valor da declividade da superfície da estrutura dada em termos percentuais. Para este caso os telhados foram considerados com uma declividade mínima de 1%.

Para a camada *Soil* (solo) os parâmetros são:

- *Thickness* - ou espessura da camada de solo dada em milímetros;

- *Porosity* - ou porosidade, é o volume de poros relativos ao volume total de solo. Este valor depende da mistura para preparo da camada de solo;
- *Field capacity* - volume de água nos poros relativo ao volume total depois que o solo é completamente drenado. Para valores abaixo do *Field capacity* durante a simulação, significa que a drenagem de água através da camada de solo não está mais acontecendo;
- *Wilting point* - é o volume de água nos poros relativo ao volume total quando apenas a água que mantém o solo úmido resta. O conteúdo de umidade do solo não pode cair abaixo desse limite;
- *Conductivity* - condutividade hidráulica para o solo totalmente saturado em mm/h;
- *Conductivity slope* - inclinação da curva Log(condutividade) por umidade do solo;

Para a camada *Drainage Mat* (camada de drenagem) os parâmetros são:

- *Thickness* - espessura da camada dada em mm;
- *Void fraction* - a razão entre o volume de vazios e o volume total da camada;
- *Roughness* - o coeficiente “n” de Manning usado para calcular o fluxo horizontal de água drenada através da camada.

Para todos os parâmetros citados anteriormente que definem as propriedades das camadas de um telhado verde, há uma faixa de valores ou valor recomendado para simulações no manual do SWMM. A seguir, nos Quadros 9, 10 e 11, é apresentado um resumo dos parâmetros para os telhados verdes com os valores recomendados e os valores adotados nas simulações.

Quadro 9 - Parâmetros para a camada *Surface* dos telhados verdes (recomendado x adotado).

Parâmetro	Valor recomendado	Valor adotado
<i>Berm Height (mm)</i> ¹	75	75
<i>Vegetation volume fraction</i>	0,1 - 0,2	0,2
<i>Surface Roughness</i> ²	0,15 - 0,41	0,15
<i>Surface Slope (%)</i> ³	-	1

¹ Valor depende do projeto do telhado.

² Valores recomendados para cobertura vegetal do tipo grama.

³ Considerado o valor mínimo para existência de escoamento.

Fonte: Rossman (2015).

Quadro 10 - Parâmetros para a camada *Soil* dos telhados verdes (recomendado x adotado).

Parâmetro	Valor recomendado	Valor adotado
<i>Thickness (mm)</i>	75 - 150	75
<i>Porosity</i> ¹	0,453	0,453
<i>Field Capacity</i> ¹	0,19	0,19
<i>Wilting Point</i> ¹	0,085	0,085
<i>Conductivity (mm/h)</i> ¹	10,92	10,92
<i>Conductivity slope</i>	30 - 60	30
<i>Suction Head (mm)</i> ¹	110	110

¹ Valores recomendados e adotados para um solo do tipo areia argilosa segundo Manual.

Fonte: Rossman (2015).

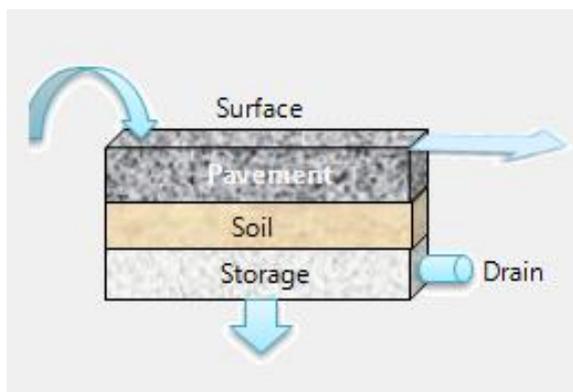
Quadro 11 - Parâmetros para a camada *Drainage Mat* dos telhados verdes (recomendado x adotado).

Parâmetro	Valor recomendado	Valor adotado
<i>Thickness (mm)</i>	25,4 - 50,8	25,4
<i>Void fraction</i>	0,5 - 0,6	0,5
<i>Roughness</i>	0,1 - 0,4	0,1

Fonte: Rossman (2015).

Para os pavimentos permeáveis, o SWMM tem 5 conjuntos de parâmetros diferentes, descrevendo características relativas as camadas do pavimento, a drenagem e ao escoamento. Esses 5 conjuntos de parâmetros são: *Surface*, *Pavement*, *Soil*, *Storage* e *Drain*, que são apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Conjuntos de parâmetros dos pavimentos permeáveis dentro do SWMM.



Fonte: Adaptado de Rossman (2015).

Para o conjunto de parâmetros *Surface*, que trata sobre as informações relativa a superfície do pavimento permeável as seguintes informações são necessárias:

- *Berm Height* - altura da berma ou profundidade de armazenamento, para o caso em que há paredes de confinamento na superfície da estrutura do pavimento. É o máximo que a água pode inundar no pavimento antes de escoar;
- *Vegetative volume fraction* - é a fração do volume dentro do armazenamento que é preenchido por vegetação, que em sua maioria das vezes é considerado zero para os pavimentos;
- *Surface roughness* - valor do coeficiente “n” de Manning para o escoamento sobre a superfície da estrutura;
- *Surface slope* - é o valor da declividade da superfície da estrutura dada em termos percentuais. Para este caso os pavimentos foram considerados com uma declividade mínima de 1%.

Para o conjunto de parâmetros *Pavement*, que trata sobre as propriedades da camada do pavimento as seguintes informações são necessárias:

- *Thickness* - é a espessura da camada pavimento dada em milímetros;
- *Void Ratio* - é a razão entre o espaço de vazios no pavimento ao volume de sólidos;

- *Impervious Surface fraction* - é a razão entre o material impermeável do pavimento e a área total para pavimentos modulares, e é zero para pavimentos permeáveis contínuos;
- *Permeability* - é a permeabilidade do concreto ou asfalto utilizado em sistemas de pavimentos contínuos, ou o valor da condutividade hidráulica para o caso de pavimentos modulares;
- *Clogging Factor* - ou fator de entupimento é o número de volumes de vazio da camada pavimento de escoamento tratado que leva o pavimento a entupir. Neste trabalho foi utilizado o valor zero para esta propriedade a fim de ignorar o entupimento das camadas, uma vez que para seu cálculo são necessários outros parâmetros.

Para o conjunto de parâmetros *Soil*, que trata das propriedades da camada de solo do pavimento as seguintes informações são necessárias:

- *Thickness* - ou espessura da camada de solo dada em milímetros;
- *Porosity* - ou porosidade, é o volume de poros relativos ao volume total de solo. Este valor depende da mistura para preparo da camada de solo;
- *Field capacity* - volume de água nos poros relativo ao volume total depois que o solo é completamente drenado. Para valores abaixo do *Field capacity* durante a simulação, significa que a drenagem de água através da camada de solo não está mais acontecendo;
- *Wilting point* - é o volume de água nos poros relativo ao volume total quando apenas a água que mantém o solo úmido resta. O conteúdo de umidade do solo não pode cair abaixo desse limite;
- *Conductivity* - condutividade hidráulica para o solo totalmente saturado em mm/h;
- *Conductivity slope* - inclinação da curva Log(condutividade) por umidade do solo;

Para o conjunto de parâmetros *Storage*, que trata das propriedades da camada de armazenamento, as seguintes informações são necessárias:

- *Thickness* - é a espessura da camada de armazenamento do pavimento;

- *Void ratio* - é a razão entre o volume de vazios e o volume de sólidos na camada;
- *Seepage Rate* - é a taxa de infiltração pela qual a água infiltra no solo abaixo da camada de armazenamento;
- *Clogging Factor* - volume total de escoamento que é necessário para entupir completamente a base da camada de drenagem dividido pelo volume de vazios da camada. Neste trabalho será utilizado o valor de zero para ignorar o efeito de entupimento (*clogging*).

Para o conjunto de parâmetros *Drain*, que trata das propriedades do sistema de drenagem da camada de armazenamento, quando este existe no projeto, são necessárias as seguintes informações:

- *Drain coefficient* e *Drain exponent* - estes são, respectivamente, o coeficiente de drenagem e o expoente de drenagem que determinam a vazão através do dreno inserido na camada de armazenamento.
- *Drain offset Height* - é a altura da linha de drenagem do tubo de drenagem acima da camada de armazenamento;

No conjunto de parâmetros que descreve a camada *Drain*, será adotado o valor zero para o coeficiente de drenagem (*Drain Coeficiente*). Sendo assim não haverá drenagem na camada de armazenamento, apenas a infiltração pelo fundo da camada. Foi assim adotado para não considerar a instalação de um sistema de drenagem próprio para os pavimentos permeáveis. A seguir, nos Quadros 12, 13, 14 e 15 são demonstrados os valores adotados nesta pesquisa para as propriedades dos pavimentos permeáveis assim como os valores recomendados por Rossman (2015).

Quadro 12 - Parâmetros para a camada *Surface* dos pavimentos permeáveis (recomendado x adotado).

Parâmetro	Valor recomendado	Valor adotado
<i>Berm Height</i> (mm) ¹	-	0
<i>Vegetation volume fraction</i> ²	0	0
<i>Surface Roughness</i>	0,013	0,013
<i>Surface Slope</i> (%) ³	-	1

¹ Considerado 0 para o caso de ausência de berma.

² Considerado 0 já que não há vegetação no topo do pavimento.

³ Considerado o valor mínimo para existência de escoamento, mas depende também da topografia.

Fonte: Rossman (2015).

Quadro 13 - Parâmetros para a camada *Pavement* dos pavimentos permeáveis (recomendado x adotado).

Parâmetro	Valor recomendado	Valor adotado
<i>Thickness</i> (mm)	100 - 150	100
<i>Void Ratio</i>	0,12 - 0,21	0,12
<i>Impervious Surface Fraction</i> ¹	0	0
<i>Permeability</i> (mm/h)	100	100
<i>Clogging Factor</i> ²	-	0

¹ Valor zero para sistemas de pavimentos contínuos (não modulares).

² Valor zero para desconsiderar o efeito de entupimento da camada do pavimento.

Fonte: Rossman (2015).

Quadro 14 - Parâmetros para a camada *Soil* dos pavimentos permeáveis (recomendado x adotado).

Parâmetro	Valor recomendado	Valor adotado
<i>Thickness</i> (mm)	450 - 900	450
<i>Porosity</i> ¹	0,437	0,437
<i>Field Capacity</i> ¹	0,062	0,062
<i>Wilting Point</i> ¹	0,024	0,024
<i>Conductivity</i> (mm/h) ¹	120,40	120,40
<i>Conductivity slope</i> ²	30 - 60	30
<i>Suction Head</i> (mm) ¹	49,02	49,02

¹ Valores recomendados e adotados para um solo do tipo arenoso segundo o Manual.

² Valor varia de acordo com a composição da mistura do solo.

Fonte: Rossman (2015).

Quadro 15 - Parâmetros para a camada *Storage* dos pavimentos permeáveis (recomendado x adotado).

Parâmetro	Valor recomendado	Valor adotado
Thickness (mm) ¹	150 - 450	150
Void Ratio ¹	0,5 - 0,75	0,5
Seepage Rate (mm/h) ²	3,30	3,30
Clogging Factor ³	-	0

¹ Valores considerados levando em consideração uma camada de drenagem composta por cascalhos.

² Valor considerando que o solo abaixo da camada de armazenamento seja uma argila.

³ Considerado zero para ignorar o fator de entupimento na camada de armazenamento.

Fonte: Rossman (2015).

4.2.8 Parâmetros de infiltração do modelo

Para os parâmetros de infiltração necessários ao modelo, optou-se por utilizar os dados de infiltração obtidos pela Encibra (1978 *apud* SILVA, 2011). Época em que esta empresa de consultoria elaborou o antigo plano diretor de drenagem do Recife. A Encibra realizou na época ensaios pelo modelo de infiltração de Horton em 3 pontos da cidade, um no bairro da Várzea, um no bairro do Curado e o terceiro no bairro do Prado. Na realização destes ensaios foi utilizado um infiltrômetro que consiste em dois anéis concêntricos, sendo o diâmetro interno de 400 mm e o diâmetro externo de 600 mm (SILVA, 2011).

Para esta pesquisa em específico optou-se por utilizar os dados de infiltração obtidos no ensaio realizado no bairro do Curado, devido a maior proximidade com a área de estudo se comparado com os outros pontos do ensaio. Os dados obtidos pelo ensaio no Curado são apresentados na Tabela 4 e a partir deles foi possível obter os parâmetros para o modelo de Horton, dado pela Equação 1 e pela Equação 2.

Onde F_c é dado pela área sob a curva da taxa de infiltração, apresentada na Figura 16. O Valor de F_c pode ser obtido a partir da integração da curva ajustada que foi obtida com a utilização do *Software Microsoft Excel*. No caso do ensaio do Curado é a seguinte:

$$y = 64,17x^{-0,519} \quad (13)$$

Sendo assim temos para o valor de F_c considerando o intervalo de tempo de realização do ensaio que foi de 1 a 66 minutos:

$$F_c = \int_1^{66} 64,17x^{-0,519} dx \quad \rightarrow \quad F_c = 123,33$$

O que nos leva de volta a Equação 2 com os valores de taxa de infiltração inicial e final já conhecidos, chegamos ao valor de 2,83 para o coeficiente de decaimento de Horton. A equação do modelo de Horton fica como descrito pela Equação 20:

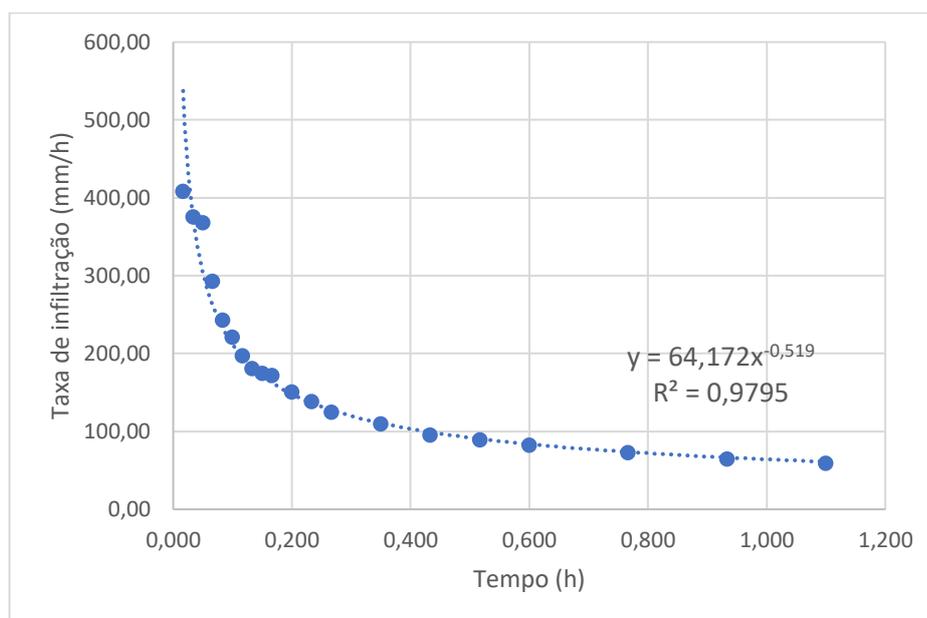
$$I_t = 58,91 + 349,09 \cdot e^{-2,83t} \quad (14)$$

Tabela 4 - Dados de infiltração obtidos no ensaio da Encibra no bairro do Curado.

Hora	PERÍODO	LEITURA	ALTURA	OBS.	TEMPO	QUANT.	TAXA
MEDIÇÃO	(min)	(mm)	INFILTRADA		ACUMULADO	INFIL.	(mm/h)
			(mm)		(min)	ACUM.	
10:05	-	0	-		-	-	-
10:06	1	6,8	6,8		1	6,8	408,00
10:07	1	12,5	5,7		2	12,5	375,00
10:08	1	18,4	5,9		3	18,4	368,00
10:09	1	19,5	1,1		4	19,5	292,50
10:10	1	20,2	0,7		5	20,2	242,40
10:11	1	22,1	1,9		6	22,1	221,00
10:12	1	23	0,9	Zera da a esc. Rervatório	7	23	197,14
10:13	1	1,1	1,1		8	24,1	180,75
10:14	1	3,1	2		9	26,1	174,00
10:15	1	5,6	2,5		10	28,6	171,60
10:17	2	7,1	1,5		12	30,1	150,50
10:19	2	9,3	2,2		14	32,3	138,43
10:21	2	10,1	0,8		16	33,1	124,13
10:26	5	15,2	5,1		21	38,2	109,14
10:31	5	18,3	3,1		26	41,3	95,31
10:36	5	22,9	4,6	Zera da a esc. Rervatório	31	45,9	88,84
10:41	5	28,3	3,4		36	49,3	82,17
10:51	10	8,8	6,3		46	55,6	72,52
11:01	10	13	4,2		56	59,8	64,07
11:11	10	18	5		66	64,8	58,91

Fonte: Encibra (1978 *apud* SILVA, 2011).

Gráfico 1 - Curva de infiltração para o ensaio no Curado.



Fonte: Encibra (1978 *apud* SILVA, 2011).

4.2.9 Inserção dos dados do modelo

Depois de todos os dados necessários para a construção do modelo para simulação no SWMM, foi iniciado o processo de inserção desses dados no programa. A inserção começa pelos dados das sub-bacias que já foram apresentados nos itens anteriores. Após inserido as informações das sub-bacias foram inseridas as informações do cadastro de Microdrenagem com os dados do Canal da Malária que recebem o fluxo de água vindo das sub-bacias.

Com a rede de drenagem pronta para simulação, foi inserido os parâmetros para a simulação dos telhados verdes e pavimentos permeáveis em seguida.

4.3 Calibração do modelo

A utilização do evento de precipitação intensa do dia 19 de janeiro de 2018, teve o objetivo de avaliar o comportamento do modelo desenvolvido no SWMM especificamente no nó 13, doravante ponto de controle, onde foi observado a ocorrência de alagamentos. O ponto de controle está localizado na Avenida Senador Robert Kennedy. Como a região do Recife não dispõe de estações capazes de monitorar a vazão em canais ou nos rios, foi necessário proceder com um processo

de calibração simplificada do modelo. Procurou-se ajustar o volume alagado com o volume obtido através da simulação para o alagamento neste ponto. Esse processo de calibração simplificada também foi utilizado por Silva (2011) e Silva Júnior (2015).

Para uma calibração mais simplificada foi estimado o volume de alagamento no ponto de controle (Nó 13) através da altura da lâmina d'água gerada no alagamento. A altura da lâmina d'água foi obtida com base em levantamento feito em campo como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Altura da lâmina d'água durante evento de precipitação em 19 de janeiro de 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

. O volume inundado foi calculado dentro do software de geoprocessamento, *Qgis*. Utilizando o plugin *Saga Raster Volume*, que calcula o volume entre um plano estabelecido por uma cota informada e um MDE, foi possível obter o volume de inundação na área delimitada. O volume de inundação obtido através do cálculo no *Qgis* foi comparado ao volume obtido na simulação no SWMM. O ajuste do modelo foi feito a partir da alteração manual dos valores do coeficiente de Manning para os trechos do canal da Malária, uma vez que esse coeficiente depende muito do estado do canal. Os resultados obtidos na etapa de calibração serão apresentados posteriormente.

4.3.1 Erros de Continuidade

Durante as simulações realizadas no SWMM, o programa calcula os erros de continuidade associados a simulação numérica dos cenários estabelecidos. Esses erros de continuidade são calculados para o roteamento de vazão e para o escoamento superficial. Os erros são apresentados como um percentual de diferença entre as vazões de entrada no sistema durante a simulação e as vazões de saída, para o caso do erro de roteamento de vazões. Enquanto que o erro de escoamento superficial é dado como o percentual de diferença entre o escoamento superficial de entrada e o de saída. Erros de continuidade muito elevados, podem indicar problemas na simulação, uma vez que indicam alterações nos valores de vazões e escoamento simulados. Neste trabalho foi considerado como erro aceitável aqueles abaixo de 10%.

4.4 Cenários de simulação

Agora serão descritos os cenários que foram simulados e analisados no âmbito deste trabalho. Cenários que compreendem a simulação apenas com a rede de drenagem já existente e outros com a adição de alternativas de controle para os alagamentos no Canal da Malária. Os cenários são apresentados no Quadro 16, e são melhor descritos a seguir.

Quadro 16 - Cenários de simulação.

Cenário	Telhado verde	Pavimento permeável	Tempo de retorno
Cenário 1	0 %	0%	2, 5, 10 e 25.
Cenário 2	25 %	0%	2, 5, 10 e 25.
Cenário 3	0%	25%	2, 5, 10 e 25.
Cenário 4	50%	50%	2, 5, 10 e 25.
Cenário 5	0%	50%	2, 5, 10 e 25.

Fonte: Autor (2019).

4.4.1 Descrição dos cenários

Devido ao grande número de cenários possíveis para análise neste trabalho, optou-se por analisar através da variação de intensidade das precipitações utilizadas

na simulação e na presença ou ausência de alternativas de controle de alagamentos. As intensidades das precipitações foram variadas através da mudança do tempo de retorno dos eventos, para o qual foram considerados os valores de 2, 5, 10 e 25 anos, tendo assim uma maior variabilidade na intensidade da precipitação. O tempo de duração da chuva foi considerado de 180 minutos, que é a mesma duração da chuva utilizada na calibração. Foi analisado um cenário apenas com a drenagem já existente no local para os tempos de retorno diferentes, em seguida a implantação individual de telhados verdes e pavimentos permeáveis. Para a alternativa de controle que teve o pior resultado foi feito uma nova simulação aumentando a área de implantação, e por fim foi feito uma simulação que combina a utilização de telhados verdes e pavimentos permeáveis. Os cenários são descritos detalhadamente a seguir.

4.4.2 Cenários sem alternativas de controle

Estes tiveram o objetivo de estabelecer os valores de escoamento e volume de alagamento antes da implantação de telhados verdes e/ou pavimentos permeáveis. Foram analisados 5 cenários sem alternativa de controle, um para cada tempo de retorno ($T = 2, 5, 10$ e 25 anos) na duração de chuva de 180 minutos e um considerando o evento de precipitação do dia 19 de janeiro de 2018. Os resultados estabeleceram uma base para comparação com os valores obtidos após a implantação de alternativas de controle.

4.4.3 Cenários com alternativas de controle individualmente à 25%

Foram analisados 8 cenários, 4 considerando a implantação de telhados verdes em 25% da área total de telhados disponível em cada sub-bacia e 4 considerando a implantação de pavimentos permeáveis em 25% da área disponível de pavimentos. Cada cenário levou em conta um tempo de retorno diferente ($T = 2, 5, 10$ e 25 anos) considerando o mesmo tempo de duração da precipitação que foi de 180 minutos.

4.4.4 Cenários com aprimoramento do pior resultado

Para a alternativa que apresentou o pior resultado na redução dos escoamentos superficiais nas bacias e alagamentos nos nós no item anterior, foi aumentado a área de implantação desta alternativa para 50% da área disponível. Foi considerado o pior resultado, a alternativa de controle que apresentou diretamente a menor redução no escoamento superficial e no volume de alagamento. Dessa forma foram analisados 4 novos cenários com tempos de retorno em $T = 2, 5, 10$ e 25 anos. Os resultados serviram para mostrar o impacto do aumento da área de implantação das alternativas na redução dos escoamentos superficiais e alagamentos.

4.4.5 Cenários com a combinação de telhados verdes e pavimentos permeáveis

Foram analisados 4 cenários, um em cada tempo de retorno ($T = 2, 5, 10$ e 25 anos) considerando a atuação conjunta dos telhados verdes e dos pavimentos permeáveis durante um evento de precipitação de 180 minutos de duração. Cada alternativa foi considerada implantada em 50% da área disponível, 50% da área disponível de telhados, para telhados verdes e 50% da área disponível de pavimentos para pavimentos permeáveis.

4.5 Impacto do incentivo de instalação através do IPTU

Será utilizado como base as alíquotas do IPTU (Quadro 17) para a cidade do Recife a fim de se estabelecer um valor médio de IPTU a ser pago pelos moradores do bairro. Com base no valor devido, será estimado um desconto para incentivar a implantação dos telhados na área de estudo, usando a mesma ideia do desconto presente em Goiânia (2019). Para valor médio dos imóveis será utilizado como base os dados de ofertas de imóveis na região.

Quadro 17 - Alíquotas do IPTU para a cidade do Recife.

Valor Venal do imóvel	Alíquota do IPTU (%)
Até R\$ 46.397,29	0,6
R\$ 46.397,29 - R\$ 172.598,02	0,8
R\$ 172.598,02 - R\$ 402.728,76	1,0
R\$ 402.728,76 - R\$ 874.637,08	1,20
Acima de R\$ 874.637,08	1,4

Fonte: Recife (2019b).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

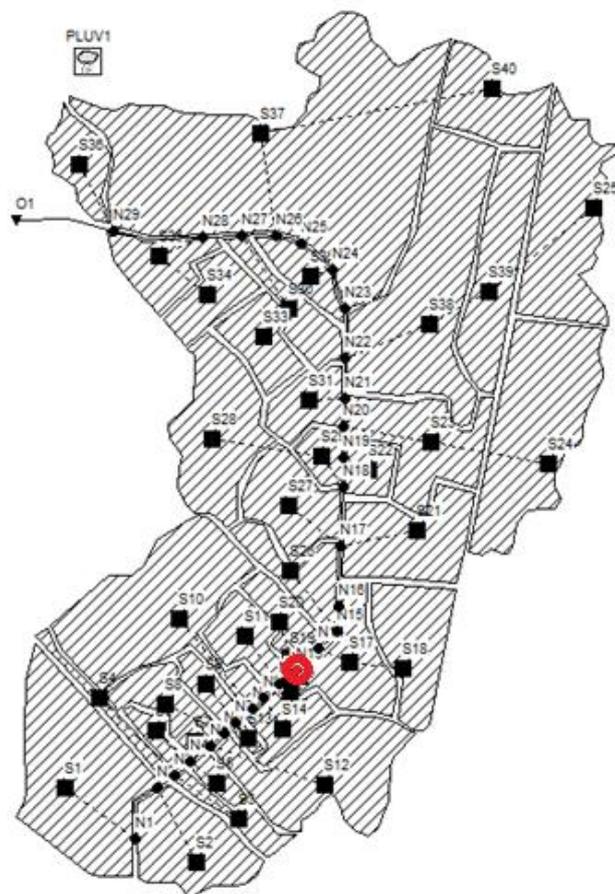
A seguir são demonstrados os resultados obtidos durante a realização deste trabalho, desde os resultados na calibração até os resultados da combinação dos telhados verdes com os pavimentos permeáveis.

5.1 Calibração

5.1.1 Modelo Construído

A partir dos dados inseridos no modelo SWMM foi possível obter uma rede de drenagem esquemática com a localização de cada sub-bacia, trecho e nós detalhados no modelo. O resultado da inserção de dados é apresentado na Figura 18.

Figura 9 - Rede de drenagem dentro das sub-bacias do Canal da Malária no SWMM.



● Nó 13

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.2 Resultado do processo de calibração

Com a altura da lâmina d'água e as curvas de nível obtidas a partir do MDE disponibilizado através do PE3D (PERNAMBUCO, 2019), foi possível definir uma área de inundação em torno do ponto de controle que é exibida no Mapa 5.

Mapa 5 - Área alagada em torno do ponto de controle na Avenida Senador Robert Kennedy.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como já mencionado anteriormente, a cidade do Recife não conta com estações capazes de medir a vazão em canais ou em rios, até a realização desta pesquisa há apenas estações para monitoramento de qualidade da água. Com a ausência dos dados de vazões nos canais e rios da cidade, foi necessário proceder com uma calibração simplificada do modelo desenvolvido na pesquisa. Utilizando a altura da lâmina d'água obtida em campo foi possível estimar o volume de alagamento que foi comparado ao volume simulado no modelo. Na Figura 10 a seguir é apresentado os valores de alagamentos nos nós do modelo após a simulação com o evento de chuva de 19 de janeiro de 2018.

Figura 10 - Alagamentos nos nós após o evento de precipitação de 19 de janeiro de 2018
(Resultados simulados).

Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr
N9	3.02	1071.40	0	04:00	7.461
N12	1.76	26.73	0	04:02	0.117
N13	2.76	88.55	0	04:00	0.654
N16	3.95	670.69	0	04:01	6.633
N17	2.53	330.81	0	04:00	2.065
N18	6.01	584.45	0	04:00	8.507
N19	1.44	15.20	0	04:00	0.043
N20	5.73	478.92	0	04:00	4.783
N21	2.22	77.65	0	04:00	0.432
N24	1.38	177.27	0	04:09	0.513
N26	0.54	113.33	0	04:01	0.126
N28	4.04	1075.34	0	04:02	7.014

Hours flooded - hora alagado; *Maximum Rate LPS* - Escoamento máximo

Day of Maximum flooding - Dias de alagamento máximo

Hour of Maximum flooding - Horas com alagamento máximo;

Total flood volume - volume total alagado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da Figura 10 podemos observar que o volume que alaga no Nó 13 (ponto de controle) é de 654 m³ e que este passou 2,76 horas, cerca de 165 minutos, transbordando. A partir da lâmina d'água calculada no Qgis foi obtido um valor de alagamento de 681 m³. Na Tabela 5 é apresentado a comparação do simulado com o observado e os erros oriundos da simulação no SWMM.

Tabela 5 - Volume simulado x Volume observado no alagamento no ponto de controle (nó 13).

Volume de alagamento	Simulado (m ³)	Diferença (%)
Simulado (m ³)	654,00	3,96
Observado (m ³)	681,00	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença entre o volume de alagamento observado e o simulado foi de apenas 3,96 %, um valor dentro do aceitável nestas condições. Ainda dentro dos resultados da simulação, o SWMM apresentou como erros de continuidade os valores apresentados na Tabela 6. Os erros de continuidade também estão dentro do tolerável, considerado aqui por volta de 10%. Isso significa que a diferença entre a quantidade de água que entra no sistema e a quantidade de água que sai do sistema, encontrada pela equação da continuidade é pequena. Esses erros pequenos indicam uma boa qualidade nos resultados da simulação.

Tabela 6 - Erros de continuidade no evento de precipitação de 19 de janeiro de 2018.

Erros de continuidade (%)	
Escoamento superficial	-0,01
Roteamento de vazões	-5,54

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Cenários sem alternativas de controle

Após o processo de calibração procedeu-se com as simulações da rede de drenagem existente para precipitações com tempo de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos, e duração de 180 minutos. Os resultados permitiram ter uma ideia dos pontos de alagamentos ao longo do canal da malária, assim como dos escoamentos superficiais gerados nas sub-bacias. Os erros de continuidade obtidos nesta etapa da simulação são apresentados na Tabela 7. Todos estiveram abaixo de 10%, o que significa que os resultados desta simulação são de boa qualidade.

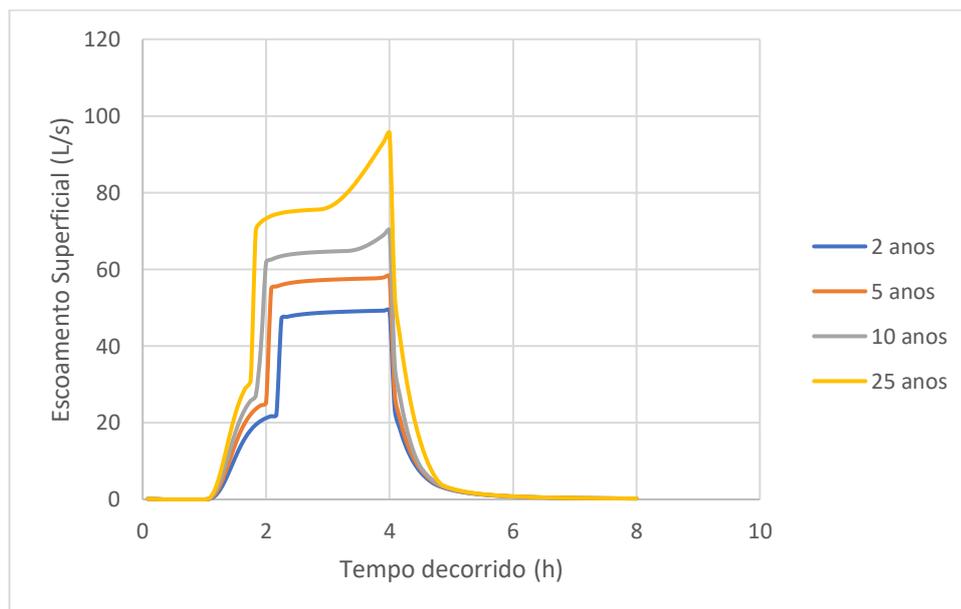
Tabela 7 - Erros de continuidade na simulação sem alternativas de controle.

Tempo de retorno (anos)	Erros de continuidade (%)	
	Escoamento superficial	Roteamento de vazões
2	-0,01	-4,45
5	-0,01	-4,13
10	-0,01	-3,88
25	-0,01	-3,56

Fonte: Elaborado pelo autor.

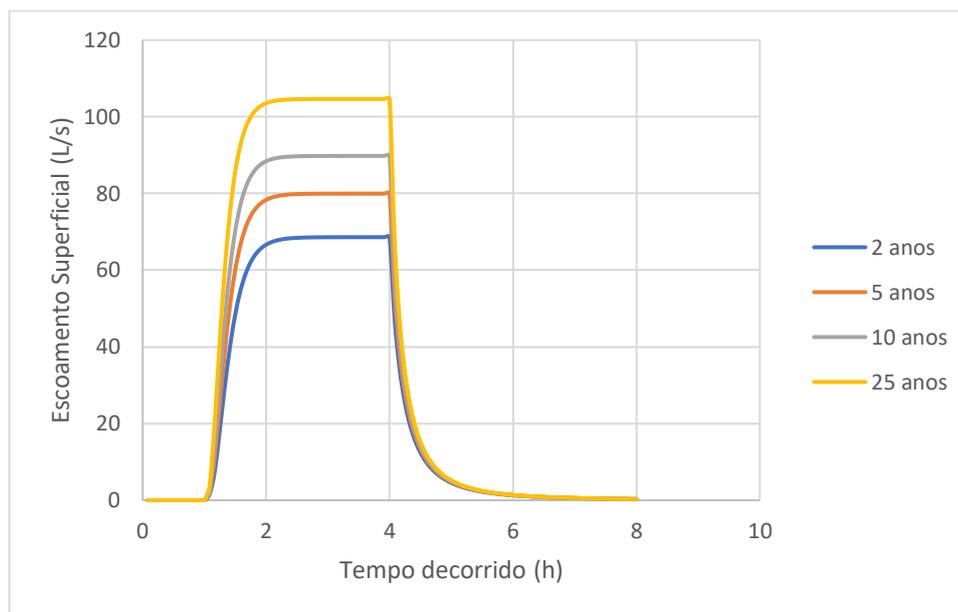
Os valores de escoamento superficial obtidos nas Sub-bacias 19 e 20 para cada tempo de retorno, que tem como nó de saída o ponto de controle (Nó 13), são apresentados, respectivamente nos Gráficos 2 e 3. Para a Sub-bacia 19 o escoamento superficial atingiu 49,26 L/s na simulação com o tempo de retorno de 2 anos, enquanto atingiu até 95,54 L/s com o tempo de retorno de 25 anos. Enquanto que para a sub-bacia 20 o escoamento superficial atingiu 68,60 L/s para 2 anos de tempo de retorno e teve seu máximo de 104,64 L/s para a chuva de 25 anos. Os valores máximos de escoamento superficial nas Sub-bacias 19 e 20 para cada tempo de retorno é apresentado na Tabela 8. Como esperado, os valores do escoamento variam crescentemente com o início da precipitação até atingir seu máximo após 1 ou 2 horas de iniciada, o valor se mantém até começar a cair. Os valores de escoamentos obtidos para a Sub-bacia 20 foram bem maiores que os valores obtidos para a Sub-bacia 19, uma vez que a primeira também possui área maior e conseqüentemente largura equivalente maior.

Gráfico 2 - Escoamento superficial do cenário 1 simulado para sub-bacia 19.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 - Escoamento superficial do cenário 1 simulado para sub-bacia 20.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Escoamentos superficiais máximos no cenário 1 simulado para as sub-bacias 19 e 20.

TR (anos)	Sub-bacia 19 (L/s)	Sub-bacia 20 (L/s)
2	49,26	68,60
5	58,21	79,96
10	70,19	89,79
25	95,54	104,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos valores de escoamento superficiais que foram apresentados, também foram obtidos valores para o volume alagado em cada nó nos tempos de retorno distintos, estes valores encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Volume alagado e quantidade de nós alagados por tempo de retorno no cenário 1.

TR (anos)	Nº Nós alagados	Volume total alagado (m³)
2	13	80.349
5	15	98.625
10	15	114.653
25	17	139.112

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado, há um crescimento do volume total alagado nas simulações ao aumentar-se o tempo de retorno da chuva e conseqüentemente sua intensidade. O número de nós alagados também cresce, com exceção do salto da precipitação de 5 anos para a de 10 anos onde o número manteve-se constante. O volume alagado no nó 13 (ponto de controle) é apresentado na Tabela 10. Os valores também mostram a evolução individual do alagamento no ponto de controle, que aumenta conforme a intensidade da chuva também aumenta. Os valores de escoamento superficial para o restante das sub-bacias no cenário 1 é apresentado na Tabela A1.

Tabela 10 - Volume alagado no ponto de controle (nó 13) para o cenário 1.

TR (anos)	Volume alagado (m ³)
2	990
5	1.107
10	1.213
25	1.401

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Telhados verdes cobrindo 25% dos telhados

Após os resultados obtidos com a rede drenagem existente foi prosseguido com a simulação adicionando telhados verdes em 25% da área de telhados disponíveis. Os valores agora obtidos permitiram se ter uma ideia do impacto da utilização de telhados na área de estudo. Os erros de escoamento obtidos nesta etapa da simulação são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Erros de continuidade na simulação com telhados a 25%.

Tempo de retorno (anos)	Erros de continuidade (%)	
	Escoamento superficial	Roteamento de vazões
2	-0,01	-4,67
5	0,00	-4,36
10	0,00	-4,12
25	0,00	-3,79

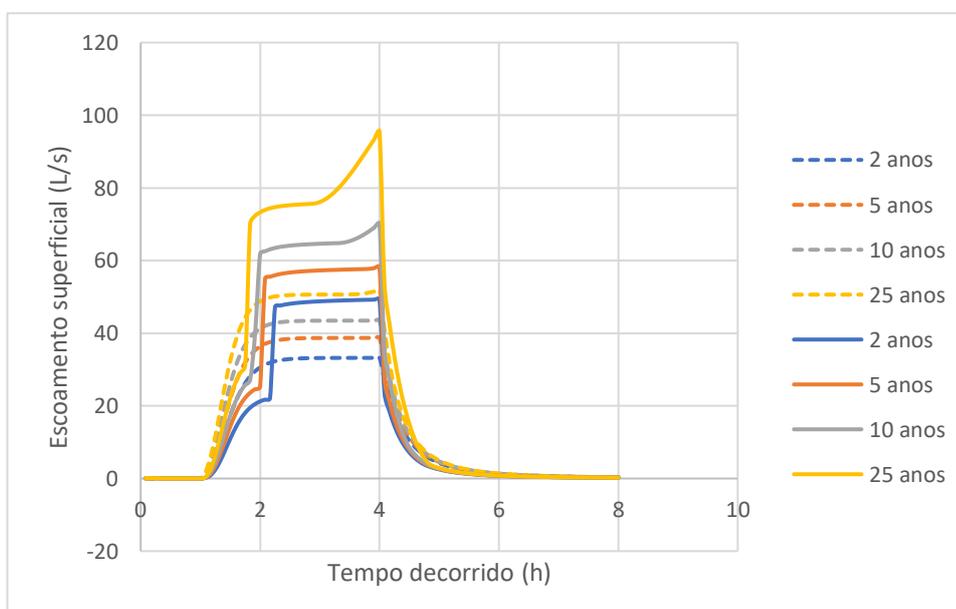
Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os erros de continuidade foram bem abaixo do tido como tolerável nesta pesquisa, que era de 10%. Esses valores muito baixos indicam uma boa qualidade nos resultados da simulação.

O escoamento superficial encontrado nas Sub-bacias 19 e 20, que descarregam diretamente no Nó 13, são apresentados nos Gráficos 4 e 5 e comparados com os resultados obtidos na simulação sem alternativas de controle. Os resultados mostram que a aplicação de telhados verdes em apenas 25% da área de telhados disponíveis pode levar a uma redução de até 45% do escoamento superficial, para a Sub-bacia 19. Os valores obtidos para a redução do escoamento podem variar, uma vez que depende diretamente da área de telhados disponível em cada sub-bacia, no caso da Sub-bacia 20 a redução do escoamento superficial chegou a 12,70%.

O tamanho da área impermeável nas sub-bacias também afeta diretamente os valores dos escoamentos superficiais, a Sub-bacia 19 possui apenas 28,90% de área impermeável, enquanto que a Sub-bacia 20 possui 71,49% de área impermeável. Para o caso da Sub-bacia 19, mesmo para valores pequenos de utilização de telhados o impacto nos escoamentos superficiais é grande, uma vez que sua área impermeável é pequena. A redução do escoamento superficial para a Sub-bacia 19 e 20 é apresentado na Tabela 12.

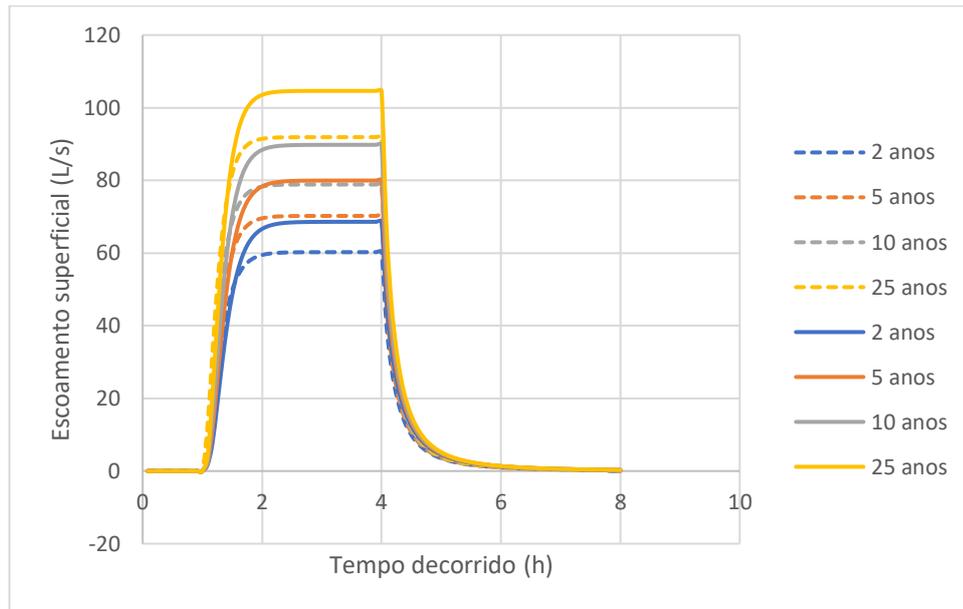
Gráfico 4 - Escoamento superficial no cenário 2 simulado para a sub-bacia 19.



* Tracejado indica aplicação de telhados verdes em 25% dos telhados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5 - Escoamento superficial no cenário 2 simulado para a sub-bacia 20.



* Tracejado indicam aplicação de telhados verdes em 25% dos telhados.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Redução do escoamento superficial devido a aplicação de telhados verdes.

TR (anos)	Sub-bacia 19 (L/s)			Sub-bacia 20 (L/s)		
	Antes	Depois	Redução (%)	Antes	Depois	Redução (%)
2	49,26	33,20	32,60	68,60	60,25	12,17
5	58,21	38,70	33,52	79,96	70,22	12,17
10	70,19	43,46	38,09	89,79	78,86	12,17
25	95,54	51,88	45,70	104,64	91,90	12,17

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos valores de escoamento superficial, o volume alagado em cada nó e o volume total alagado também foi afetado diretamente pela aplicação de telhados verdes. Os novos valores obtidos nesta etapa estão na Tabela 13 juntamente com a comparação com os resultados obtidos na situação sem alternativa de controle. A redução no volume total de alagamento variou entre 8,63% para o tempo de retorno de 2 anos e 9,51% para o tempo de retorno de 25 anos. De forma mais específica também se observou o volume de alagamento no ponto de controle (nó 13) que é apresentado na Tabela 14. O volume alagado no nó 13 teve uma redução que variou entre 8,48% para o tempo de retorno de 2 anos e 17,70% para o tempo de retorno de 25 anos.

Tabela 13 - Redução no volume alagado após a aplicação de telhados verdes.

TR ¹ (anos)	N° Nós alagados	Volume total alagado (m ³)		Redução (%)
		Antes ²	Depois ²	
2	13	80.349	73.412	8,63
5	14	98.625	89.756	8,99
10	15	114.653	104.062	9,24
25	17	139.112	125.877	9,51

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Volume alagado no Nó 13 antes e depois dos telhados verdes.

TR ¹ (anos)	Volume total alagado (m ³)		Redução (%)
	Antes ²	Depois ²	
2	990	906	8,48
5	1.107	988	10,75
10	1.213	1.055	13,03
25	1.401	1.153	17,70

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos ao adicionar-se os telhados verdes nas simulações de chuvas na área de estudo estão dentro do esperado, com os telhados apresentando um bom desempenho na diminuição do escoamento superficial ao longo das sub-bacias. Além disso, os telhados proporcionaram uma diminuição do volume total de alagamento, e conseqüentemente, uma diminuição do volume de alagamento em cada nó. Mesmo que em proporção menor, a redução dos volumes de alagamentos foi bastante significativa, podendo chegar a 17,70%, como no caso do Nó 13. Os valores de escoamento superficial para o restante das sub-bacias no cenário 2 é apresentado na Tabela A2.

5.4 Pavimentos permeáveis em 25% das vias

Os resultados obtidos ao adicionarmos pavimentos permeáveis na simulação da área de estudo foram satisfatórios. Os erros de continuidade associados a esta

etapa da simulação, listados na Tabela 15, ficaram dentro do tolerável de 10%, indicando uma boa qualidade dos resultados. Os valores de escoamento superficiais foram reduzidos em até 42,70%, no caso da Sub-bacia 19, para 25 anos de tempo de retorno, ou até 5,65% de redução para a Sub-bacia 20.

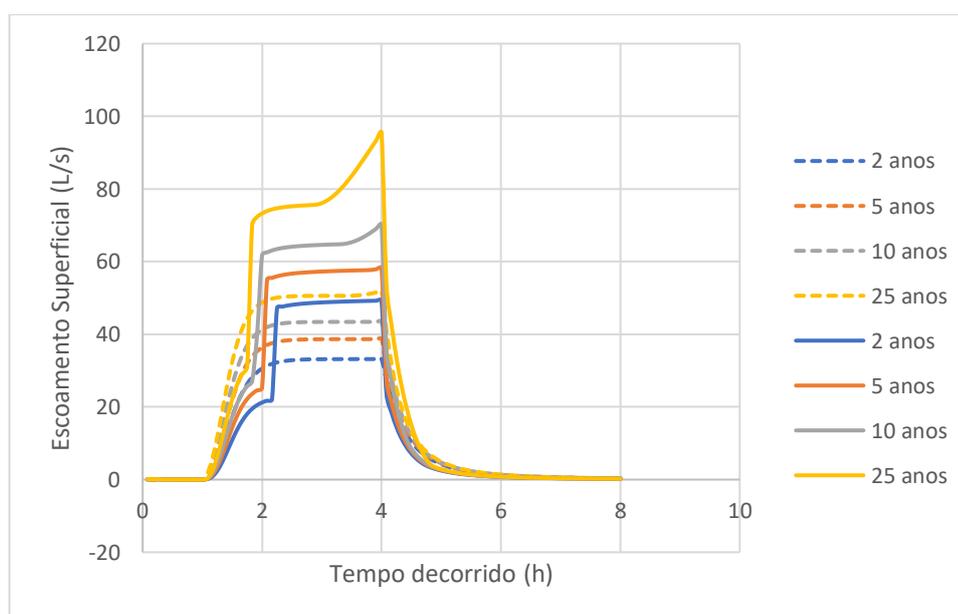
Tabela 15 - Erros de continuidade na simulação com pavimentos a 25%.

Tempo de retorno (anos)	Erros de continuidade (%)	
	Escoamento superficial	Roteamento de vazões
2	-0,01	-4,57
5	-0,01	-4,26
10	-0,01	-4,01
25	-0,01	-3,69

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Gráficos 6 e 7 apresentam a evolução do escoamento superficial, respectivamente, nas sub-bacias 19 e 20 após a aplicação dos pavimentos permeáveis e sem a aplicação destes.

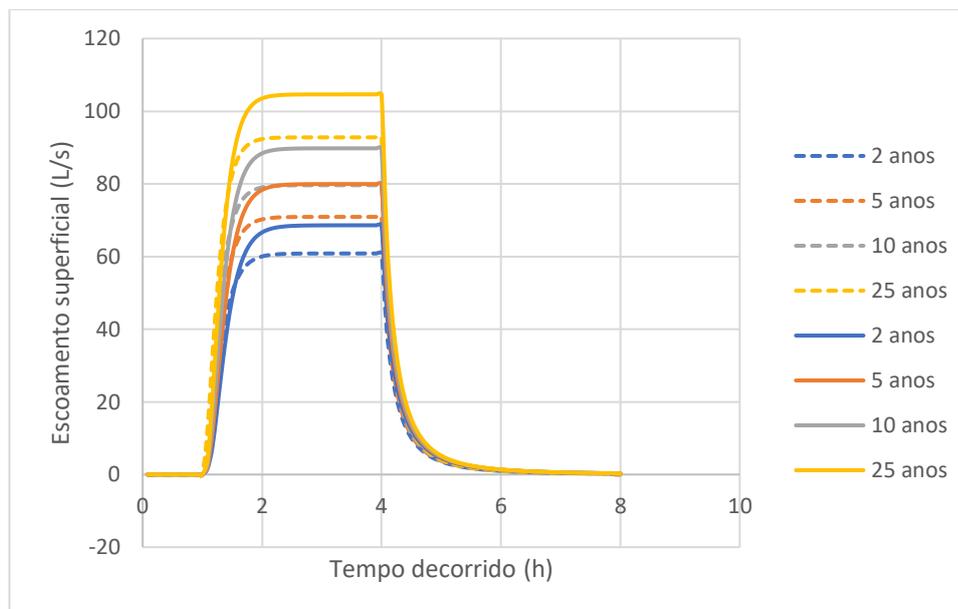
Gráfico 6 - Escoamento superficial no cenário 3 simulado para a sub-bacia 19 (com pavimentos permeáveis e sem pavimentos permeáveis).



*O tracejado indica a aplicação de pavimentos permeáveis em 25% das vias.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7 - Escoamento superficial simulado no cenário 3 simulado para a sub-bacia 20 (com pavimentos permeáveis e sem pavimentos permeáveis).



*O tracejado indica a aplicação de pavimentos permeáveis em 25% das vias.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pavimentos permeáveis apresentaram bons resultados na redução do escoamento superficial das sub-bacias, causando uma amortização do gráfico de escoamento em todos os casos. Na Tabela 16 é apresentado em termos percentuais os ganhos na redução do escoamento com a utilização dos pavimentos.

Tabela 16 - Redução do escoamento superficial devido a aplicação de pavimentos permeáveis.

TR ¹ (anos)	Sub-bacia 19 (L/s)		Redução (%)	Sub-bacia 20 (L/s)		Redução (%)
	Antes ²	Depois ²		Antes ²	Depois ²	
2	49,26	34,75	29,46	68,60	64,72	5,65
5	58,21	40,50	30,42	79,96	75,44	5,65
10	70,19	45,48	35,20	89,79	84,71	5,65
25	95,54	54,75	42,70	104,64	98,72	5,65

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da redução do escoamento superficial, os pavimentos permeáveis também apresentaram uma redução no volume alagado nos Nós e consequentemente

no volume total alagado. A redução no volume total alagado chegou a 5,67% para o tempo de retorno de 25 anos, enquanto que especificamente para o Nó 13 a redução chegou a 14,92 % para o tempo de retorno de 25 anos. As reduções calculadas são apresentadas a seguir nas Tabelas 17 e 18. Os valores de escoamento superficial para o restante das sub-bacias no cenário 3 é apresentado na Tabela A3.

Tabela 17 - Redução no volume alagado após a aplicação de pavimentos permeáveis.

TR ¹ (anos)	N° Nós alagados	Volume total alagado (m ³)		Redução (%)
		Antes ²	Depois ²	
2	13	80.349	76.623	4,64
5	14	98.625	93.640	5,05
10	15	114.653	108.539	5,33
25	17	139.112	131.227	5,67

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 - Volume alagado no Nó 13 antes e depois dos pavimentos permeáveis.

TR ¹ (anos)	Volume total alagado (m ³)		Redução (%)
	Antes ²	Depois ²	
2	990	935	5,56
5	1.107	1.002	9,49
10	1.213	1.090	10,14
25	1.401	1.192	14,92

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Telhados verdes a 50% + Pavimentos permeáveis a 50%

Os resultados para a atuação conjunta de pavimentos permeáveis e telhados verdes foram bastante satisfatórios. Os erros de continuidade, conforme Tabela 19, das simulações ficaram todos dentro do tolerável de 10% e a redução do volume de alagamento e escoamento superficial também apresentaram bons resultados.

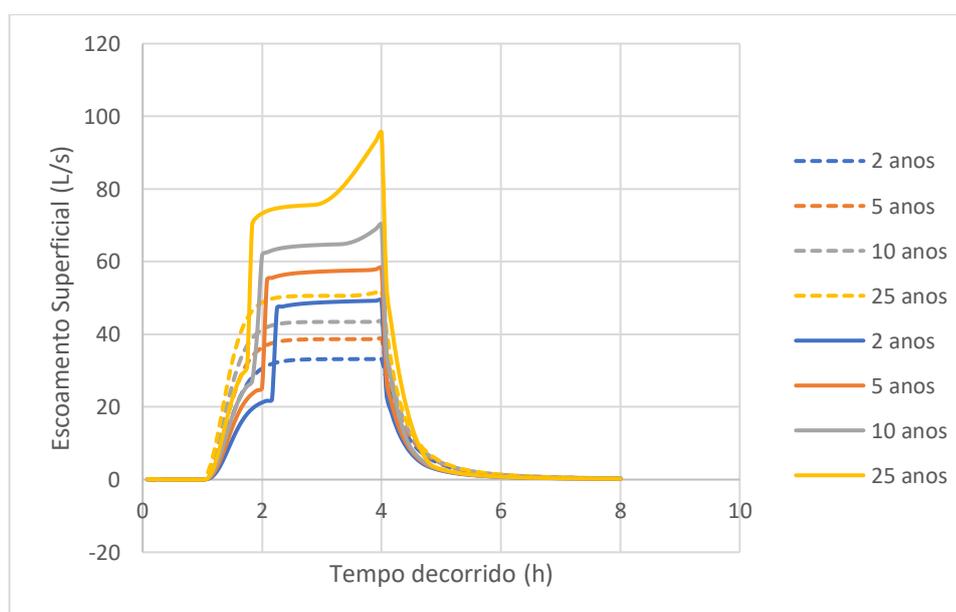
Tabela 19 - Erros de continuidade na simulação com pavimentos permeáveis a 50% + telhados verdes a 50%.

Tempo de retorno (anos)	Erros de continuidade (%)	
	Escoamento superficial	Roteamento de vazões
2	0,00	-5,68
5	0,00	-5,37
10	0,00	-5,12
25	0,00	-4,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado, a combinação dos telhados verdes com os pavimentos permeáveis obteve resultados melhores nas reduções de volume de alagamentos e escoamento superficial, tendo em vista também que a área impermeável tratada agora aumentou significativamente. A redução do escoamento superficial chegou a 56,83% para a Sub-bacia 19 com tempo de retorno 25 anos. Os resultados obtidos para o escoamento superficial nas Sub-bacias 19 e 20 são apresentados nos Gráficos 8 e 9 e na Tabela 20.

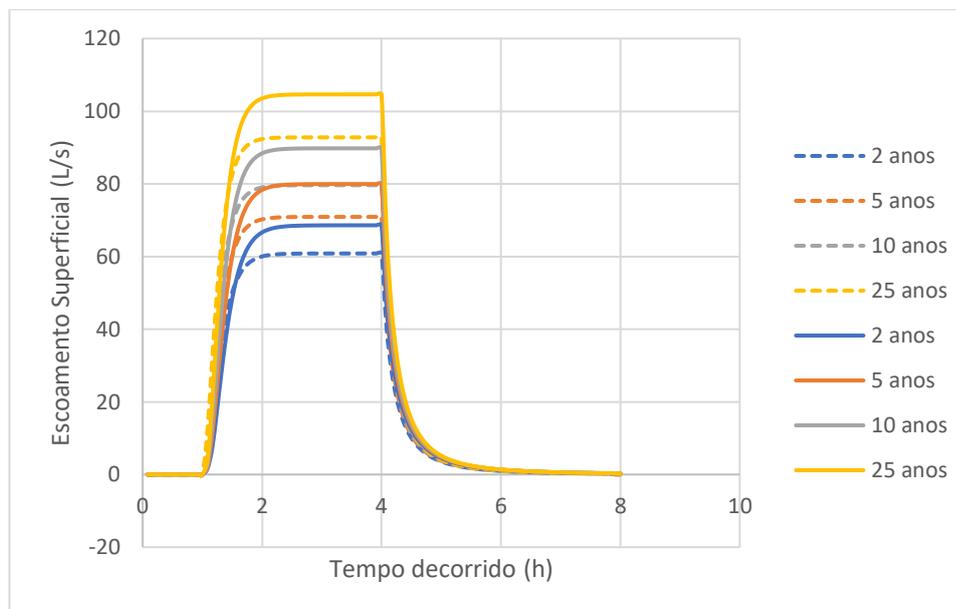
Gráfico 8 - Escoamento superficial no cenário 4 simulado para a Sub-bacia 19 (com e sem aplicação de pavimentos + telhados).



*O tracejado indica a aplicação de pavimentos permeáveis + telhados verdes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9 - Escoamento superficial no cenário 4 simulado para a Sub-bacia 20 (com e sem aplicação de pavimentos + telhados).



*O tracejado indica a aplicação de pavimentos permeáveis + telhados verdes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 - Redução do escoamento superficial devido a aplicação de pavimentos permeáveis + telhados verdes.

TR ¹ (anos)	Sub-bacia 19 (L/s)		Redução (%)	Sub-bacia 20 (L/s)		Redução (%)
	Antes ²	Depois ²		Antes ²	Depois ²	
2	49,26	26,90	45,39	68,60	40,10	35,71
5	58,21	31,35	46,14	79,96	51,40	35,71
10	70,19	35,21	49,84	89,79	57,73	35,71
25	95,54	41,25	56,83	104,64	67,27	35,71

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma semelhante, houve uma melhoria nos resultados obtidos para as reduções dos volumes de alagamentos nos Nós e volume total de alagamentos. Com resultados bem mais expressivos, essa redução chegou a 36,37% do volume total de alagamento para um tempo de retorno de 2 anos e 28,76% para o Nó 13 no tempo de retorno de 25 anos. Estes resultados estão nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Redução no volume alagado após a aplicação de pavimentos permeáveis + telhados verdes.

TR ¹ (anos)	N° Nós alagados	Volume total alagado (m ³)		Redução (%)
		Antes ²	Depois ²	
2	13	80.349	51.130	36,37
5	14	98.625	62.985	36,14
10	15	114.653	73.379	36,00
25	17	139.112	89.341	35,78

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 - Volume alagado no Nó 13 antes e depois dos pavimentos permeáveis + telhados verdes.

TR ¹ (anos)	Volume total alagado (m ³)		Redução (%)
	Antes ²	Depois ²	
2	990	790	20,20
5	1.107	860	22,31
10	1.213	917	24,40
25	1.401	998	28,76

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados bem mais expressivos para esses cenários já eram esperados, uma vez que a área de aplicação de cada uma das alternativas aumentou consideravelmente. A atuação conjunta dos pavimentos permeáveis com os telhados verdes se mostrou uma opção bem interessante, ainda mais levando em consideração que as duas possuem uma integração boa com o ambiente. Os valores de escoamento superficial para o restante das sub-bacias no cenário 4 é apresentado na Tabela A4.

5.6 Pavimentos permeáveis em 50% das vias

Percentualmente temos uma redução menos expressiva para a aplicação de pavimentos permeáveis (Tabela 16) ao compararmos com os resultados obtidos para os telhados verdes (Tabela 12). Apesar disso, não podemos concluir que os pavimentos permeáveis são menos eficientes no controle de alagamentos, pois cada

sub-bacia possui uma área disponível diferente para aplicação de cada alternativa. Isso significa que a área disponível para telhados na Sub-bacia 19 não é necessariamente a mesma disponível para aplicação de pavimentos permeáveis.

Mesmo não sendo necessariamente menos eficiente, os pavimentos apresentaram resultados menores na área de estudo, e por isso foi ampliada sua área de aplicação para 50% da área de pavimentos disponível em cada sub-bacia. Assim pode-se ter uma ideia da evolução da aplicação de pavimentos na área de estudo.

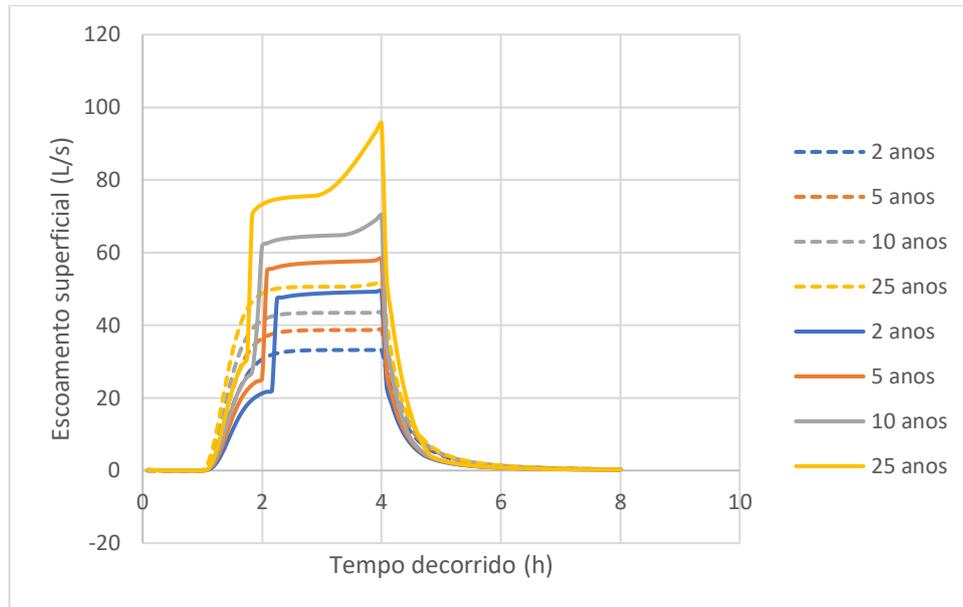
As simulações com 50% de pavimentos permeáveis obtiveram bons resultados com erros de continuidades, Tabela 23, dentro do tolerável de 10%. A redução do escoamento superficial chegou a 45,67% para a Sub-bacia 19 no tempo de retorno de 25 anos e 11,30% para Sub-bacia 20 (Gráfico 10; Gráfico 11; Tabela 24). Os volumes de alagamentos apresentaram uma redução de até 13,28% para o volume total e 17,70% para o Nó 13 no tempo de retorno de 25 anos. Os resultados para os volumes de alagamentos são apresentados nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 23 - Erros de continuidade na simulação com pavimentos a 50%.

Tempo de retorno (anos)	Erros de continuidade (%)	
	Escoamento superficial	Roteamento de vazões
2	-0,01	-4,81
5	-0,01	-4,49
10	-0,01	-4,25
25	-0,01	-3,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

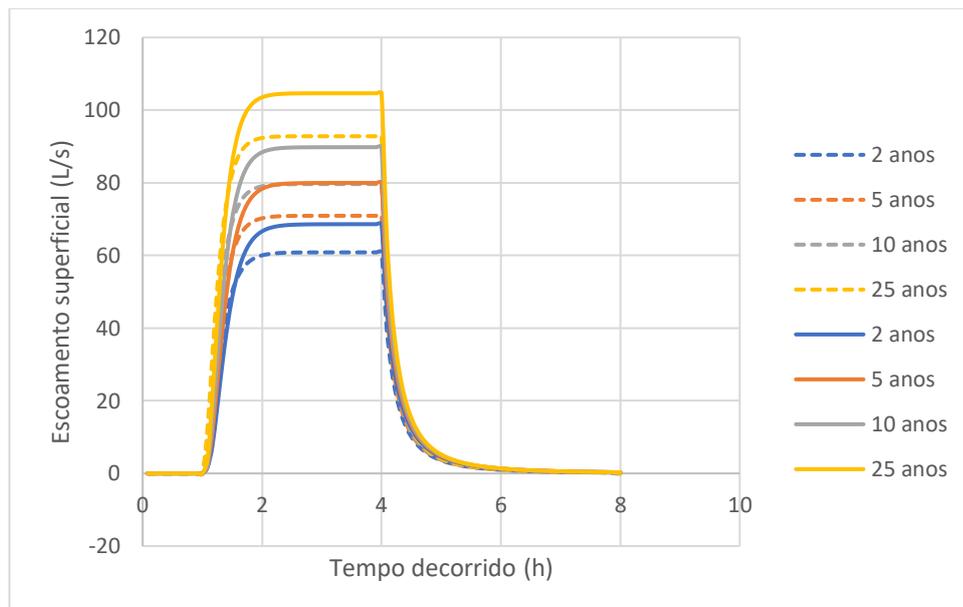
Gráfico 10 - Escoamento superficial no cenário 5 simulado para a Sub-bacia 19 (com e sem aplicação de pavimentos 50%).



*O tracejado indica a aplicação de pavimentos permeáveis em 50% das vias.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 - Escoamento superficial no cenário 5 simulado para a Sub-bacia 20 (com e sem aplicação de pavimentos 50%).



*O tracejado indica a aplicação de pavimentos permeáveis em 50% das vias.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 - Redução do escoamento superficial devido a aplicação de pavimentos permeáveis a 50%.

TR ¹ (anos)	Sub-bacia 19 (L/s)			Sub-bacia 20 (L/s)		
	Antes ²	Depois ²	Redução (%)	Antes ²	Depois ²	Redução (%)
2	49,26	33,17	32,66	68,60	60,85	11,30
5	58,21	38,66	33,58	79,96	70,92	11,30
10	70,19	43,42	38,14	89,79	79,64	11,30
25	95,54	51,90	45,67	104,64	92,81	11,30

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 25 - Redução no volume alagado após a aplicação de pavimentos permeáveis a 50%.

TR ¹ (anos)	N° Nós alagados	Volume total alagado (m ³)		Redução (%)
		Antes ²	Depois ²	
2	13	80.349	70.205	12,62
5	14	98.625	85.919	12,88
10	15	114.653	99.680	13,06
25	17	139.112	120.637	13,28

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26 - Volume alagado no Nó 13 antes e depois dos pavimentos permeáveis a 50%.

TR ¹ (anos)	Volume total alagado (m ³)		Redução (%)
	Antes ²	Depois ²	
2	990	905	8,59
5	1.107	988	10,75
10	1.213	1055	13,03
25	1.401	1153	17,70

¹ Tempo de retorno em anos. ² Antes e depois da aplicação da alternativa de controle.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos após o aumento da área de aplicação dos pavimentos permeáveis foram melhores, como já era esperado. A redução do volume alagado ficou em torno do dobro dos valores obtidos anteriormente, mostrando relação direta com o aumento da área de aplicação. Enquanto que o a melhoria para a redução do

escoamento superficial foi bem menos expressiva, havendo melhorias em torno de apenas 3%. Esses resultados, de certa forma, já eram esperados, uma vez que agora há o dobro da capacidade de armazenamento nos pavimentos eles foram capazes de dobrar o volume que deixou de ser alagado. Em contrapartida, a redução do escoamento superficial nem sempre obedeceu a mesma linha, pois as camadas do pavimento permanecem com as mesmas características hidráulicas e de permeabilidade que ditam a velocidade de absorção do pavimento. Nas Tabelas 27 e 28 constam os dados obtidos em cada cenário lado a lado. Os valores de escoamento superficial para o restante das sub-bacias no cenário 5 é apresentado na Tabela A5.

Tabela 27 - Redução do volume total alagado (pavimentos 50% x pavimentos 25%).

TR ¹ (anos)	Redução (%) Pav. 50%	Redução (%) Pav. 25%
2	8,59	4,64
5	10,75	5,05
10	13,03	5,33
25	17,70	5,67

¹ Tempo de retorno em anos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 28 - Redução do escoamento superficial para Sub-bacia 19 e 20 respectivamente (pavimentos permeáveis 50% x pavimentos permeáveis 25%).

TR ¹ (anos)	Sub-bacia 19		Sub-bacia 20	
	Redução (%) Pav. 50%	Redução (%) Pav. 25%	Redução (%) Pav. 50%	Redução (%) Pav. 25%
2	32,66	29,46	11,30	5,65
5	33,58	30,42	11,30	5,65
10	38,14	35,20	11,30	5,65
25	45,67	42,70	11,30	5,65

¹ Tempo de retorno em anos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 29 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na redução do escoamento superficial em cada cenário de simulação.

Tabela 29 - Reduções no escoamento superficial para cada cenário.

Cenário	Sub-bacia 19	Sub-bacia 20	Volume Alagado	
	Redução (%) Esc. Sup.	Redução (%) Esc. Sup.	Total	Nó 13
1	-	-	-	-
	-	-	-	-
	-	-	-	-
	-	-	-	-
	-	-	-	-
2	32,60	12,17	8,63	8,48
	33,52	12,17	8,99	10,75
	38,09	12,17	9,24	13,03
	45,70	12,17	9,51	17,70
3	29,46	5,65	4,64	5,56
	30,42	5,65	5,05	9,49
	35,20	5,65	5,33	10,14
	42,70	5,65	5,67	14,92
4	45,39	35,71	36,37	20,20
	46,14	35,71	36,14	22,31
	49,84	35,71	36,00	24,40
	56,83	35,71	35,78	28,76
5	32,66	11,30	12,62	8,59
	33,58	11,30	12,88	10,75
	38,14	11,30	13,06	13,03
	45,67	11,30	13,28	17,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7 Incentivo por redução do IPTU

Para os valores de imóveis na área de estudo foi obtida uma média de R\$ 300.000,00 por imóvel e uma área média de 180 m². Para esses imóveis a alíquota do IPTU cobrado, segundo a Tabela 20, é de 1%, resultando em um imposto devido de R\$ 3.000,00 em média ao ano. Para implantação de telhados verdes, conforme visto na Tabela 6, é de R\$ 173,00 por metro quadrado de telhado. Buscando uma implantação mínima considerada nessa pesquisa que é de 25%, que resulta em média

45 m² de telhado por imóvel, é necessário um investimento de R\$ 7.785,00 (Equação 14) para construção do telhado.

$$45 \text{ m}^2 * 173 \frac{\text{R\$}}{\text{m}^2} = \text{R\$ } 7.785,00 \quad (14)$$

Considerando um desconto de IPTU como o concedido em Goiânia (2019) que é de 20%, seria necessário permanecer com este desconto por aproximadamente 13 anos para retomar o investimento (Equação 15). O cálculo foi feito diretamente sem considerar as correções do IPTU feitas pelo IPCA.

$$\frac{\text{R\$ } 7.785,00}{20\% * \text{R\$ } 3.000,00} \sim 13 \text{ anos} \quad (15)$$

Para números mais exatos, caso a prefeitura do Recife oferecesse um desconto de 26% no valor do IPTU por 10 anos (Equação 16) para as pessoas que instalassem os telhados verdes em seus imóveis, os moradores teriam seu investimento retornado através desse desconto. Nesta situação, a prefeitura não precisaria investir, apenas abrir mão de arrecadação. Dessa forma os moradores tem como incentivo, além dos benefícios contra os alagamentos, o desconto sobre o IPTU.

$$\frac{\text{R\$ } 7.785,00}{10 \text{ anos} * \text{R\$ } 3.000,00} \sim 26\% \text{ ao ano} \quad (16)$$

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo estudar a aplicação de alternativas de controle de alagamentos urbanos a partir da utilização do SWMM (*Storm Water Management Model*) na bacia do canal da malária, afluente do rio Tejipío, localizada entre os bairros do IPSEP e Imbiribeira na cidade do Recife. A implantação destas alternativas visa a diminuição dos problemas de alagamentos da área de estudo, problemas estes que são recorrentes em grandes centros urbanos.

As simulações ao longo dos cenários propostos nesta pesquisa retornaram resultados satisfatórios. Os erros de continuidade obtidos em todas as etapas sempre estiveram abaixo dos 10%, indicando uma boa qualidade dos resultados obtidos. Os valores de escoamento superficial e volume alagado para a situação sem alternativas de controle, serviu como base para estimar a redução do impacto das precipitações com o uso de telhados verdes e pavimentos permeáveis.

Durante visitas ao local de estudo, foi constatado a má conservação das estruturas de drenagem, principalmente do próprio canal da malária. O canal encontrava-se com sua calha parcialmente obstruída por lixo e vegetação além do desprendimento das placas de concreto no trecho que é revestido.

Para se avaliar as alternativas de drenagem que podem ser aplicadas no local, foram simulados cenários com diferentes valores de precipitação para o tempo de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos. Foi avaliado o funcionamento de telhados verdes e pavimentos permeáveis separadamente além da atuação conjunta das duas alternativas.

Devido ao tamanho da bacia do canal da malária, esta teve que ser dividida em 40 sub-bacias para discretização do modelo SWMM, como não há dados para calibração não houve a oportunidade de se avaliar se o nível de subdivisão da bacia do canal da malária estava ótimo ou poderia ser aprimorado.

Os problemas principais da área de estudo que foram utilizados para medir a eficácia das alternativas empregadas foram os escoamentos superficiais nas sub-bacias e os volumes alagados em cada Nó da rede de drenagem. Estes que são os problemas que geram mais transtornos para a população local.

Os resultados obtidos na aplicação de telhados verdes em 25% da área disponível de telhados nas sub-bacias foram bastante satisfatórios. Houve uma redução de até 45,70% no escoamento superficial das sub-bacias que drenam para o

Nó 13 (ponto de controle). Enquanto o volume total alagado apresentou uma redução de até 9,51% e o volume alagado no Nó 13 apresentou uma redução de até 17,70%.

Os resultados obtidos na aplicação de pavimentos permeáveis em 25% da área disponível de pavimentos nas sub-bacias também foram satisfatórios. As simulações apresentaram uma redução de até 42,70% nos valores do escoamento superficial e de até 5,67% no volume total alagado na área de estudo.

A aplicação conjunta de pavimentos permeáveis e telhados verdes também retornou resultados satisfatórios. Essa combinação se mostrou uma opção interessante principalmente se combinada em diferentes proporções a fim de se encontrar um melhor custo de implantação. Quanto aos resultados de redução dos efeitos provocados pela precipitação intensa, houve redução de até 56,83% no escoamento superficial e redução de 36,37% no volume total alagado.

O aumento da área de aplicação de pavimentos permeáveis mostrou resultados interessantes. Com o aumento da sua área de aplicação, houve um aumento proporcional no desempenho de retenção das chuvas, o volume alagado que antes tinha uma redução de até 5,67% e passou a ser 13,28%. Em contrapartida, os valores de escoamento superficial também apresentaram resultados melhores, em menores proporções, passando de uma redução de até 42,70% para uma redução de 45,67%.

O cálculo do custo de implantação considerando a taxa do IPTU no Recife, aponta que caso houvesse um desconto de 26% por 10 anos no valor do IPTU para a área de estudo, nos casos de implantação de telhados verdes, o desconto pagaria a implantação dos telhados. Um simples incentivo da prefeitura do município poderia abrir espaço para implantação de tais alternativas. A dificuldade dos pavimentos permeáveis se dá principalmente pela sua dificuldade de manutenção, já que a presença de sólidos no escoamento superficial gera entupimento nos poros do pavimento ao longo do tempo. Esses entupimentos quando não corrigidos levam a uma redução drástica da capacidade de infiltração dos pavimentos.

O canal da malária precisa urgentemente de melhorias em sua infraestrutura, desde reparos até a adição de novos elementos. Há uma necessidade de maior incentivo por parte do governo à implantação de alternativas de controle na bacia do canal, desde os telhados verdes ou até mesmo os pavimentos permeáveis. Simples ações como o desconto no IPTU, proposto nesta pesquisa, poderia dar maior espaço para os moradores implantarem telhados verdes em suas residências. A partir deste

ponto, deve-se trabalhar com conscientização da população local sobre a importância do sistema de drenagem e dos problemas causados pelo lixo em sua calha, e também da importância de alternativas sustentáveis para os problemas de alagamentos.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L. A.. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 162 p., 2005.
- AVILA, C. B.. **Variação da infiltração devido a alterações de uso do solo: Estudo de caso de implantação de floresta em bioma Pampa**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 71 p., 2014.
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. **Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas**. São Paulo - SP, 24 p., 2011.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S.. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 266 p., 2005.
- BARTOLINI, S.; CAPPELLO, A.; MARTÍ, J.; DEL NEGRO, C.. QVAST: a new Quantum GIS plugin for estimating volcanic susceptibility. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 13, 3031-3042, 2013.
- BRANDÃO, V.S.. **Infiltração de água em solos sujeitos a encrostamento**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 68 p., 2003.
- BRITTO, C.. **Análisis de la viabilidad y comportamiento energético de la cubierta plana ecológica**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em construção e tecnologia arquitetônica da Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid - España, 890 p., 2001.
- CABRAL, J. J. S. P.; MASCARENHAS, F. B.; CASTRO, M. A. H.; MIGUEZ, M. G.; PEPLAU, G. R.; BEZERRA, A. A.. Capítulo 3 - Modelos Computacionais para Drenagem Urbana. Em: RIGHETTO, A. M. (org.) **Volume 4 - Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico - PROSAB, p. 112 - 148, 2009.
- CARBONE, M.; GAROFALO, G.; TOMEI, G.; PIRO, P.. Storm tracking based on rain gauges for flooding control in urban areas. **Procedia Engineering**, v. 70, Elsevier, p. 256-265, 2014.
- CICLO VIVO. **Sydney aposta nos jardins de chuva para reduzir poluição das águas**. Disponível em: < <https://ciclovivo.com.br/arq-urb/urbanismo/sydney-jardins-de-chuva/>>. Acesso em: 10 de out. 2018.
- CIPOLLA, S. S.; MAGLIONICO, M.; STOJKOV, I.. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. **Ecological Engineering**, v. 95, Elsevier, p. 876-887, 2016.

CONGEDO, L.. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>>. Acesso em: 05 de jun. 2019.

COSTA, L. F. F.; BORDIN, J.; MAFFESSIONI, D.. Estudo da viabilidade da implementação de telhado verde na Serra Gaúcha. 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, **Anais..**, 6 p., Bento Gonçalves - RS, 2018.

DIAKAKIS, M.; DELIGIANNAKIS, G.; PALLIKARAKIS, A.; SKORDOULIS, M.. Identifying elements that affect the probability of buildings to suffer flooding in urban areas using Google Street View. A case study from Athens metropolitan area in Greece. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 22, Elsevier, p. 1-9, 2017.

DONGQUAN, Z.; JINING, C.; HAOZHENG, W.; QINGYUAN, T.; SHANGBING, C.; ZHENG, S.. GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach: a case study in Macau. **Environ Earth Sci.**, 59:465-472, 2009.

ELLIS, J. B.. Third generation urban surface water drainage: from rooftop to the receiving water subcatchment. 11th International Conference on Urban Drainage, **Anais..**, Edinburgh, UK, August, 2008.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_srtm.html>. Acesso em: 05 de jun. 2019.

EMLURB. Manual de drenagem urbana da cidade do Recife. In: Estudo de elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife. Recife, Maio de 2014.

ENGESAT - Imagens de Satélite e Geotecnologia. **Landsat 8**. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/landsat-8/>>. Acesso em: 05 de jun. 2019a.

ENGESAT - Imagens de Satélite e Geotecnologia. **Ikonos**. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/ikonos/>>. Acesso em: 05 de jun. 2019b.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Orientações básicas para drenagem urbana. Belo Horizonte: FEAM, 32 p., 2006.

G1-PE. Chuva alaga ruas e avenidas do Grande Recife. 19 de jan. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/chuvas-causam-alagamentos-e-transtornos-no-transito-no-grande-recife.ghtml>>. Acesso em: 03 de jun. 2019.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D.; BRITES, A. P. Z.; PAIVA, R. C. D.. Avaliação da discretização em uma bacia hidrográfica urbana, através do modelo SWMM. XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, **Anais..**, p. 10, São Pedro - SP, 2004.

GOIÂNIA. Lei complementar nº 235, de 28 de dezembro de 2012. **Institui o Programa IPTU verde no município de Goiânia.** Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/go/g/goiania/lei-complementar/2012/23/235/leicompl-ementar-n-235-2012-institui-o-programa-iptu-verde-no-municipio-de-goiania>>. Acesso em: 29 de jun de 2019.

GUARULHOS. Lei nº 7031, de 17 de abril de 2012. **Câmara Municipal de Guarulhos, Guarulhos-SP.** Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/sp/g/guarulhos/lei-ordinaria/2012/703/7031/lei-organica-guarulhos-sp>>. Acesso em: 29 de jun de 2019a.

GUARULHOS. Lei nº 6.793, de 28 de dezembro de 2010. **Câmara Municipal de Guarulhos, Guarulhos-SP.** Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/sp/g/guarulhos/lei-ordinaria/2010/680/6793/lei-ordinaria-n-6793-2010-dispoe-sobre-o-lancamento-arrecadacao-e-fiscalizacao-do-imposto-sobre-a-propriedade-predial-e-territorial-urbana-iptu-e-da-outras-providencias?q=6.793%2F2010%20>>. Acesso em: 29 de jun de 2019b.

ICPRB - Interstate Commission on the Potomac River Basin. **Creating a rain garden.** Disponível em: <<https://www.potomacriver.org/resources/get-involved/water/rain-garden/>>. Acesso em: 10 de out. 2018.

JANG, S.; CHO, M.; YOON, J.; YOON, Y.; KIM, S.; KIM, G.; KIM, L.; AKSOY, H.. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment. **Desalination**, v. 212, Elsevier, p. 344-356, 2007.

KUSUMAWARDHANI, A., SUTJININGSIH, D., ANGGRAHANI, E.. Effectivity of micro drainage system as part of macro drainage system: A case study of Kelapa Gading, North Jakarta. **MATEC Web of Conferences**, 276- 04041, 2019.

LIBARDI, P. L.. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: EDUSP, 335 p., 2005.

LIMA, G. C. O.. **Avaliação do Desempenho de Telhados Verdes: Capacidade de Retenção Hídrica e Qualidade da Água Escoada.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru - PE, 128 p., 2013.

MAKSIMOVIC, C.. General Overview of Urban Drainage Principles and Practice. Em: **Urban Drainage in Specific Climates** (IHP-V-Technical Documents in Hydrology). Paris: UNESCO, Vol.1, n.40, p.1-21, 2001.

MELO, T. A. T.. **Jardim de Chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas.** Dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 136 p., 2011.

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONIO, A. C. D.; CIRILO, J. A.. Jardim de Chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, v.14, n.4, Porto Alegre, p. 147-165, 2014.

NASCIMENTO, A. F.; RUBIM, I. B.; PEREIRA, E. G. S.; BARROS, R. S.; RICHTER, M.. Classificação da cobertura da terra utilizando os programas livres: InterIMAGE, WEKA e QuantumGIS. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, **Anais..**, 8 p., Foz do Iguaçu - PR, 2013.

NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B.. Capítulo 4 - Técnicas Compensatórias em Águas Pluviais. Em: RIGHETTO, A. M. (org.) **Volume 4 - Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico - PROSAB, p. 149 - 197, 2009.

NIELSEN, A.; BOLDING, K.; HU, F.; TROLLE, D.. An open source QGIS-based workflow for model application and experimentation with aquatic ecosystems. **Environmental Modelling & Software**, v. 95, Elsevier, p. 358-364, 2017.

OLIVEIRA, A. E.. **Modelagem da infiltração de água no solo com o modelo de Green-Ampt**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 100 p., 2015.

OHNUMA JÚNIOR, A. A., ALMEIDA NETO, P., MEDIONDO, E. M.. Análise da Retenção Hídrica em Telhados Verdes a Partir da Eficiência do Coeficiente de Escoamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 19 (2), P. 41-52, 2014.

PAIXÃO, F. J. R.; ANDRADE, A. R. S.; AZEVEDO, C. A.; SILVA, J. M.; COSTA, T. L.; FEITOSA, R. M.. Estimativa da Infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 5, nº 1, Universidade Estadual da Paraíba, p. 1-11, 2004.

PALLA, A.; GNECCO, I.. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. **Journal of Hydrology**, v. 528, Elsevier, p. 361-368, 2015.

PARK, S.; NIELSEN, A.; BAEILEY, R. T.; TROLLE, D.; BIEGER, K.. A QGIS-based graphical user interface for application and evaluation of SWAT-MODFLOW models. **Environmental Modelling & Software**, v. 111, Elsevier, p. 493-497, 2019.

PERNAMBUCO. **PE3D - PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL, o que é o programa?** Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br>>. Acesso em: 05 de jun. 2019.

PINTO, L., L., A.; MARTINS, J., R., S.; PORTO, R., L., L.. O desempenho de pavimentos permeáveis. XIX Simpósio Brasileiro de recursos hídricos, **Anais..**, 17 p., Maceió - AL, 2011.

PORTO, R. L.; ZAHED FILHO, K.; TUCCI, C. E. M.; BIDONE, F.. Drenagem Urbana. Em: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 943 p., 2001.

PORTO, R. M.. **Hidráulica básica**. São Carlos - SP: EESC-USP, 4º ed., 540 p., 2006.

RECIFE. Lei nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015. **Câmara Municipal de Recife**, Recife-PE. Disponível em <<https://leismunicipais.com.br/a1/pe/r/recife/lei-ordinaria/2015/18112/18112/lei-ordinaria-n-18112-2015-dispoe-sobre-a-melhoria-da>>

qualidade-ambiental-das-edificacoes-por-meio-da-obrigatoriedade-de-instalacao-do-telhado-verde-e-construcao-de-reservatorios-de-acumulo-ou-de-retardo-do-escoamento-das-aguas-pluviais-para-a-rede-de-drenagem-e-da-outras-providencias>. Acesso em 29 de jun de 2019a.

RECIFE. Perguntas Frequentes. Portal de Finanças. Disponível em: <<https://portalfinancas.recife.pe.gov.br/faq>>. Acesso em: 05 de jun. 2019b.

REZENDE, O. M.; AREND FILHO, L. A.; MATHEUS, M. S.; MIGUEZ, M. G.; MAGALHÃES, P. C.. Projeto para controle de inundações: conceito de canalização x conceito de reservação. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais..**, 20 p., Campo Grande - MS, 2009.

RIGHETTO, A. M.; MOREIRA, L. F. F.; SALES, T. E. A.. Capítulo 1 - Manejo de Águas Pluviais Urbanas. Em: RIGHETTO, A. M. (org.) **Volume 4 - Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico - PROSAB, p. 19 - 73, 2009.

ROSSMAN, L. A.. **Storm Water Management Model, Version 5.1: User's Manual**. U.S. Environmental Protect Agency. Cincinnati, Ohio, 2015.

SACOMAN, M. A. R.. Otimização de projetos utilizando GRG, *Solver* e *Excel*. XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, **Anais..**, p. 12, Belém - PA, 2012.

SALVADOR. Decreto nº 25.899, de 24 de março de 2015. **Regulamente e Institui o Programa de certificação sustentável "IPTU Verde"**. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/ba/s/salvador/decreto/2015/2589/25899/decreto-n25899-2015-regulamenta-o-art-5-da-lei-n-8474-de-02-de-outubro-de-2013-e-institui-oprograma-de-certificacao-sustentavel-iptu-verde-em-edificacoes-no-municipio-desalvador-que-estabelece-beneficios-fiscais-aos-participantes-do-programa-assim-como-o-art-5-da-lei-n-8-723-de-22-de-dezembro-de-2014-e-da-outras-providencias>>. Acesso em: 29 de jun de 2019a.

SALVADOR. Decreto nº 29.100, de 06 de novembro de 2017. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/ba/s/salvador/decreto/2017/2910/29100/decreto-n-29100-2017-regulamenta-o-art-5-da-lei-n-8474-de-02-de-outubro-de-2013-e-institui-o-programa-de-certificacao-sustentavel-iptu-verde-em-edificacoes-no-municipio-desalvador-que-estabelece-beneficios-fiscais-aos-participantes-do-programa-assim-como-o-art-5-da-lei-8-723-de-22-de-dezembro-de-2014-e-da-outras-providencias>>. Acesso em: 29 de jun de 2019b.

SANTOS, S. M.; SILVA, J. F. F.; SANTOS, G. C.; MACEDO, P. M. T.; GAVAZZA, S.. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, Elsevier, p. 639-648, 2019.

SILVA, P. O.. **Análise de técnicas compensatórias de drenagem urbana para atenuação de inundações em uma sub-bacia do rio Jiquiá no Recife**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 139 p., 2011.

SILVA JUNIOR, M. A. B.. **Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco, Recife-PE, 153 p., 2015.

SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L.. Infiltração e armazenamento no solo. Em: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 943 p., 2001.

SOUZA NETTO, G. J.. **Desempenho de modelos de infiltração em sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na região Alto Rio Grande - MG**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 75 p., 2011.

RIO DE JANEIRO. Decreto nº 35.745, de 06 de junho de 2012. **Cria a qualificação QUALIVERDE e estabelece critérios para sua obtenção**. Disponível em: <http://smaonline.rio.rj.gov.br/legis_consulta/42362Dec%2035745_2012.pdf>. Acesso em: 29 de jun de 2019.

TOMINAGA, E. N. S.. **Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, São Paulo - SP, 137 p., 2013.

TUCCI, C. E. M.. Escoamento Superficial. Em: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 943 p., 2001.

URCHEI, M., A.; FIETZ, C., R.. Infiltração de água em um latossolo roxo muito argiloso em dois sistemas de manejo. **Irriga**, v. 7, n. 1, Botucatu-SP, 2002.

VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI, U. M.. Application of seaweed as substrate additive in green roofs: Enhancement of water retention and sorption capacity. **Landscape and Urban Planning**, v. 143, Elsevier, p. 25-32, 2015.

APÊNDICE

APÊNDICE A - VALORES MÁXIMOS DE VAZÕES EM CADA SUB-BACIA PARA
CADA CENÁRIO SIMULADO

Tabela A1 - Valores máximos de vazões (L/s) em cada sub-bacia no cenário sem alternativa de controle.

SB/TR	2 anos	5 anos	10 anos	25 anos
1	706,33	823,3	924,56	1077,44
2	158,25	184,45	207,13	241,37
3	147,9	172,4	193,61	225,63
4	107,09	125,13	140,72	164,21
5	64,3	74,94	84,15	98,07
6	81,09	94,52	106,14	123,69
7	30,56	35,74	40,2	46,93
8	209,34	244,69	275,22	321,23
9	93,31	108,77	122,15	142,35
10	810,74	965,52	1099,63	1302
11	192,65	224,8	252,6	294,53
12	322,67	377,04	424,01	494,78
13	21,19	24,7	27,75	32,34
14	160,42	186,98	209,98	244,71
15	16,51	19,24	21,61	25,19
16	9,96	11,6	13,03	15,19
17	412,49	481,48	541,09	630,96
18	319,02	372	417,84	487,02
19	49,26	58,21	70,19	95,54
20	68,6	79,96	89,79	104,64
21	396,46	462,75	520,05	606,47
22	102,26	120,99	137,17	161,54
23	847,95	1022,02	1173,96	1404,7
24	699,47	841,69	965,77	1154,11
25	609,07	719,7	815,24	959,05
26	240,89	281,21	316,07	368,62
27	328,38	382,76	429,85	500,93
28	569,68	668,91	754,52	883,35
29	416,68	521,83	623,25	787,13
30	409,33	478	537,32	626,73
31	158,41	184,64	207,34	241,62
32	150,12	174,97	196,49	228,98
33	235,18	274,15	307,88	358,8
34	203,3	236,99	266,16	310,19
35	357,36	416,78	468,17	545,72
36	130,14	151,7	170,35	198,52
37	1437,81	1716,39	1957,82	2322,15
38	1289,19	1542,47	1761,87	2092,65
39	818,51	972,09	1104,72	1304,26
40	315,07	367,33	412,56	480,82

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A2 - Valores máximos de vazões (L/s) em cada sub-bacia no cenário com telhados verdes a 25% e percentual de redução (continua).

SB/TR	2 ANOS			5 ANOS			10 ANOS			25 ANOS		
	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO
1	654,44	706,33	7,35%	762,79	823,3	7,35%	856,6	924,56	7,35%	998,23	1077,44	7,35%
2	150,2	158,25	5,09%	175,07	184,45	5,09%	196,59	207,13	5,09%	229,1	241,37	5,08%
3	135,72	147,9	8,24%	158,2	172,4	8,24%	177,65	193,61	8,24%	207,03	225,63	8,24%
4	100,02	107,09	6,60%	116,78	125,13	6,67%	131,26	140,72	6,72%	153,1	164,21	6,77%
5	60,16	64,3	6,44%	70,12	74,94	6,43%	78,74	84,15	6,43%	91,76	98,07	6,43%
6	74,22	81,09	8,47%	86,51	94,52	8,47%	97,15	106,14	8,47%	113,21	123,69	8,47%
7	28,59	30,56	6,45%	33,39	35,74	6,58%	37,54	40,2	6,62%	43,8	46,93	6,67%
8	186,41	209,34	10,95%	217,62	244,69	11,06%	244,61	275,22	11,12%	285,3	321,23	11,19%
9	86,63	93,31	7,16%	100,98	108,77	7,16%	113,4	122,15	7,16%	132,15	142,35	7,17%
10	721,1	810,74	11,06%	853,27	965,52	11,63%	967,66	1099,63	12,00%	1140,1	1302	12,43%
11	170,46	192,65	11,52%	198,79	224,8	11,57%	223,31	252,6	11,60%	260,3	294,53	11,62%
12	290,64	322,67	9,93%	339,26	377,04	10,02%	381,29	424,01	10,08%	444,68	494,78	10,13%
13	20,12	21,19	5,05%	23,46	24,7	5,02%	26,35	27,75	5,05%	30,71	32,34	5,04%
14	141,76	160,42	11,63%	165,23	186,98	11,63%	185,55	209,98	11,63%	216,23	244,71	11,64%
15	15,72	16,51	4,78%	18,33	19,24	4,73%	20,58	21,61	4,77%	23,99	25,19	4,76%
16	9,62	9,96	3,41%	11,21	11,6	3,36%	12,59	13,03	3,38%	14,67	15,19	3,42%
17	377,09	412,49	8,58%	439,86	481,48	8,64%	494,15	541,09	8,68%	577,91	630,96	8,41%
18	293,22	319,02	8,09%	341,84	372	8,11%	383,92	417,84	8,12%	447,45	487,02	8,12%
19	33,2	49,26	32,60%	38,7	58,21	33,52%	43,46	70,19	38,08%	51,88	95,54	45,70%
20	60,25	68,6	12,17%	70,22	79,96	12,18%	78,86	89,79	12,17%	91,9	104,64	12,18%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A2 - Valores máximos de vazões (L/s) em cada sub-bacia no cenário com telhados verdes a 25% e percentual de redução (continuação).

SB/TR	2 ANOS			5 ANOS			10 ANOS			25 ANOS		
	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO
21	366,79	396,46	7,48%	427,88	462,75	7,54%	480,72	520,05	7,56%	560,45	606,47	7,59%
22	95,31	102,26	6,80%	112,34	120,99	7,15%	127,06	137,17	7,37%	149,24	161,54	7,61%
23	781,11	847,95	7,88%	933,74	1022,02	8,64%	1066,6	1173,96	9,15%	1275,8	1404,7	9,17%
24	631,21	699,47	9,76%	753,4	841,69	10,49%	859,67	965,77	10,99%	1020,6	1154,11	11,57%
25	561,01	609,07	7,89%	660,43	719,7	8,24%	746,33	815,24	8,45%	875,69	959,05	8,69%
26	212,51	240,89	11,78%	247,89	281,21	11,85%	278,5	316,07	11,89%	324,68	368,62	11,92%
27	290,12	328,38	11,65%	338,16	382,76	11,65%	379,74	429,85	11,66%	442,53	500,93	11,66%
28	506,62	569,68	11,07%	593,24	668,91	11,31%	668,06	754,52	11,46%	780,75	883,35	11,61%
29	383,67	416,68	7,92%	480,66	521,83	7,89%	572,95	623,25	8,07%	725,76	787,13	7,80%
30	364,98	409,33	10,83%	425,82	478	10,92%	478,42	537,32	10,96%	558,14	626,73	10,94%
31	144,13	158,41	9,01%	167,98	184,64	9,02%	188,64	207,34	9,02%	219,83	241,62	9,02%
32	131,94	150,12	12,11%	153,78	174,97	12,11%	172,69	196,49	12,11%	201,24	228,98	12,11%
33	209,03	235,18	11,12%	243,65	274,15	11,13%	273,62	307,88	11,13%	318,86	358,8	11,13%
34	183,2	203,3	9,89%	213,54	236,99	9,89%	239,81	266,16	9,90%	279,47	310,19	9,90%
35	319,52	357,36	10,59%	372,52	416,78	10,62%	418,39	468,17	10,63%	487,61	545,72	10,65%
36	119,13	130,14	8,46%	138,85	151,7	8,47%	155,93	170,35	8,46%	181,71	198,52	8,47%
37	1309,1	1437,81	8,95%	1552,3	1716,39	9,56%	1762,8	1957,82	9,96%	2080,2	2322,15	10,42%
38	1192,5	1289,19	7,50%	1417,3	1542,47	8,12%	1611,8	1761,87	8,52%	1904,8	2092,65	8,97%
39	760,4	818,51	7,10%	898,58	972,09	7,56%	1017,9	1104,72	7,86%	1197,7	1304,26	8,17%
40	287,43	315,07	8,77%	335,06	367,33	8,79%	376,29	412,56	8,79%	438,52	480,82	8,80%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A3 - Valores máximos de vazões (L/s) em cada sub-bacia no cenário com pavimentos permeáveis a 25% e percentual de redução (continua).

SB/TR	2 ANOS			5 ANOS			10 ANOS			25 ANOS		
	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO
1	659,73	706,33	6,60%	768,95	823,3	6,60%	863,52	924,56	6,60%	1006,3	1077,44	6,60%
2	144,36	158,25	8,78%	168,26	184,45	8,78%	188,95	207,13	8,78%	220,19	241,37	8,77%
3	132,51	147,9	10,41%	154,45	172,4	10,41%	173,44	193,61	10,42%	202,12	225,63	10,42%
4	97,4	107,09	9,05%	113,7	125,13	9,13%	127,79	140,72	9,19%	149,04	164,21	9,24%
5	58,66	64,3	8,77%	68,37	74,94	8,77%	76,78	84,15	8,76%	89,47	98,07	8,77%
6	74,5	81,09	8,13%	86,83	94,52	8,14%	97,51	106,14	8,13%	113,63	123,69	8,13%
7	29,38	30,56	3,86%	34,32	35,74	3,97%	38,6	40,2	3,98%	45,03	46,93	4,05%
8	191,64	209,34	8,46%	223,77	244,69	8,55%	251,54	275,22	8,60%	293,41	321,23	8,66%
9	84,63	93,31	9,30%	98,64	108,77	9,31%	110,77	122,15	9,32%	129,09	142,35	9,32%
10	771,27	810,74	4,87%	914,53	965,52	5,28%	1038,7	1099,63	5,55%	1225,9	1302	5,84%
11	181,86	192,65	5,60%	212,12	224,8	5,64%	238,3	252,6	5,66%	277,8	294,53	5,68%
12	302,35	322,67	6,30%	353	377,04	6,38%	396,79	424,01	6,42%	462,81	494,78	6,46%
13	20,45	21,19	3,49%	23,85	24,7	3,44%	26,78	27,75	3,50%	31,21	32,34	3,49%
14	152,75	160,42	4,78%	178,04	186,98	4,78%	199,93	209,98	4,79%	232,99	244,71	4,79%
15	16,11	16,51	2,42%	18,78	19,24	2,39%	21,08	21,61	2,45%	24,57	25,19	2,46%
16	9,78	9,96	1,81%	11,4	11,6	1,72%	12,8	13,03	1,77%	14,92	15,19	1,78%
17	384,17	412,49	6,87%	448,15	481,48	6,92%	503,48	541,09	6,95%	586,96	630,96	6,97%
18	293,49	319,02	8,00%	342,15	372	8,02%	384,27	417,84	8,03%	447,85	487,02	8,04%
19	34,75	49,26	29,46%	40,5	58,21	30,42%	45,48	70,19	35,20%	54,75	95,54	42,69%
20	64,73	68,6	5,64%	75,44	79,96	5,65%	84,72	89,79	5,65%	98,72	104,64	5,66%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A3 - Valores máximos de vazões (L/s) em cada sub-bacia no cenário com pavimentos permeáveis a 25% e percentual de redução (continuação).

SB/TR	2 ANOS			5 ANOS			10 ANOS			25 ANOS		
	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO
21	360,09	396,46	9,17%	420,04	462,75	9,23%	471,9	520,05	9,26%	550,14	606,47	9,29%
22	97,9	102,26	4,26%	115,48	120,99	4,55%	130,67	137,17	4,74%	153,55	161,54	4,95%
23	801,02	847,95	5,53%	958,56	1022,02	6,21%	1095,7	1173,96	6,66%	1304,7	1404,7	7,12%
24	645,8	699,47	7,67%	771,54	841,69	8,33%	880,97	965,77	8,78%	1046,7	1154,11	9,30%
25	554,68	609,07	8,93%	652,82	719,7	9,29%	737,61	815,24	9,52%	865,29	959,05	9,78%
26	227,27	240,89	5,65%	265,17	281,21	5,70%	297,95	316,07	5,73%	347,4	368,62	5,76%
27	310,14	328,38	5,55%	361,49	382,76	5,56%	405,95	429,85	5,56%	473,07	500,93	5,56%
28	532,77	569,68	6,48%	624,28	668,91	6,67%	703,31	754,52	6,79%	822,34	883,35	6,91%
29	400,59	416,68	3,86%	501,51	521,83	3,89%	597,66	623,25	4,11%	751,52	787,13	4,52%
30	381,26	409,33	6,86%	444,89	478	6,93%	499,9	537,32	6,96%	582,86	626,73	7,00%
31	149,23	158,41	5,80%	173,93	184,64	5,80%	195,32	207,34	5,80%	227,61	241,62	5,80%
32	142,71	150,12	4,94%	166,33	174,97	4,94%	186,79	196,49	4,94%	217,67	228,98	4,94%
33	219,13	235,18	6,82%	255,42	274,15	6,83%	286,84	307,88	6,83%	334,27	358,8	6,84%
34	188,86	203,3	7,10%	220,15	236,99	7,11%	247,23	266,16	7,11%	288,12	310,19	7,11%
35	334,44	357,36	6,41%	389,95	416,78	6,44%	437,98	468,17	6,45%	510,46	545,72	6,46%
36	121,17	130,14	6,89%	141,23	151,7	6,90%	158,59	170,35	6,90%	184,82	198,52	6,90%
37	1378	1437,81	4,16%	1637,4	1716,39	4,60%	1862,2	1957,82	4,89%	2201,3	2322,15	5,20%
38	1235,8	1289,19	4,14%	1470,3	1542,47	4,68%	1673,3	1761,87	5,03%	1979,1	2092,65	5,43%
39	764,54	818,51	6,59%	903,48	972,09	7,06%	1023,5	1104,72	7,35%	1204,1	1304,26	7,68%
40	294,36	315,07	6,57%	343,14	367,33	6,59%	385,36	412,56	6,59%	449,1	480,82	6,60%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A4 - Valores máximos de vazões (L/s) em cada sub-bacia no cenário com pavimentos permeáveis a 50% + telhados verdes a 50% e percentual de redução (continua).

SB/TR	2 ANOS			5 ANOS			10 ANOS			25 ANOS		
	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO
1	509,61	706,33	27,85%	593,97	823,3	27,85%	667,01	924,56	27,86%	777,29	1077,44	27,86%
2	114,37	158,25	27,73%	133,3	184,45	27,73%	149,7	207,13	27,73%	174,44	241,37	27,73%
3	92,19	147,9	37,67%	107,45	172,4	37,67%	120,66	193,61	37,68%	140,61	225,63	37,68%
4	73,03	107,09	31,81%	85,17	125,13	31,93%	95,67	140,72	32,01%	111,51	164,21	32,09%
5	44,76	64,3	30,39%	52,17	74,94	30,38%	58,58	84,15	30,39%	68,27	98,07	30,39%
6	54,16	81,09	33,21%	63,12	94,52	33,22%	70,88	106,14	33,22%	82,6	123,69	33,22%
7	23,98	30,56	21,53%	27,98	35,74	21,71%	31,44	40,2	21,79%	36,66	46,93	21,88%
8	126,29	209,34	39,67%	147,25	244,69	39,82%	165,39	275,22	39,91%	192,77	321,23	39,99%
9	62,56	93,31	32,95%	72,91	108,77	32,97%	81,88	122,15	32,97%	95,41	142,35	32,98%
10	507,98	810,74	37,34%	596,28	965,52	38,24%	672,53	1099,63	38,84%	795,05	1302	38,94%
11	125,84	192,65	34,68%	146,7	224,8	34,74%	164,75	252,6	34,78%	192	294,53	34,81%
12	215,6	322,67	33,18%	251,41	377,04	33,32%	282,39	424,01	33,40%	329,16	494,78	33,47%
13	17,51	21,19	17,37%	20,41	24,7	17,37%	22,92	27,75	17,41%	26,71	32,34	17,41%
14	107,55	160,42	32,96%	125,35	186,98	32,96%	140,77	209,98	32,96%	164,04	244,71	32,97%
15	14,11	16,51	14,54%	16,45	19,24	14,50%	18,47	21,61	14,53%	21,53	25,19	14,53%
16	8,93	9,96	10,34%	10,41	11,6	10,26%	11,69	13,03	10,28%	13,62	15,19	10,34%
17	283,73	412,49	31,22%	330,77	481,48	31,30%	371,47	541,09	31,35%	441,57	630,96	30,02%
18	216,22	319,02	32,22%	252,02	372	32,25%	283,02	417,84	32,27%	329,81	487,02	32,28%
19	26,9	49,26	45,39%	31,35	58,21	46,14%	35,21	70,19	49,84%	41,25	95,54	56,82%
20	44,1	68,6	35,71%	51,41	79,96	35,71%	57,73	89,79	35,71%	67,27	104,64	35,71%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A4 - Valores máximos de vazões (L/s) em cada sub-bacia no cenário com pavimentos permeáveis a 50% + telhados verdes a 50% e percentual de redução (continuação).

SB/TR	2 ANOS			5 ANOS			10 ANOS			25 ANOS		
	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO
21	262,96	396,46	33,67%	306,55	462,75	33,75%	344,28	520,05	33,80%	401,24	606,47	33,84%
22	76,76	102,26	24,94%	90,09	120,99	25,54%	101,6	137,17	25,93%	118,93	161,54	26,38%
23	595,14	847,95	29,81%	704,13	1022,02	31,10%	798,42	1173,96	31,99%	974,67	1404,7	30,61%
24	473,32	699,47	32,33%	559,44	841,69	33,53%	633,94	965,77	34,36%	746,23	1154,11	35,34%
25	380,68	609,07	37,50%	445,4	719,7	38,11%	501,3	815,24	38,51%	585,52	959,05	38,95%
26	156,09	240,89	35,20%	181,97	281,21	35,29%	204,37	316,07	35,34%	238,18	368,62	35,39%
27	214,98	328,38	34,53%	250,56	382,76	34,54%	281,37	429,85	34,54%	327,89	500,93	34,54%
28	358,03	569,68	37,15%	417,98	668,91	37,51%	469,82	754,52	37,73%	547,98	883,35	37,97%
29	281,01	416,68	32,56%	352,3	521,83	32,49%	420,56	623,25	32,52%	541,53	787,13	31,20%
30	262,19	409,33	35,95%	305,66	478	36,05%	343,27	537,32	36,11%	413,95	626,73	33,95%
31	111,38	158,41	29,69%	129,82	184,64	29,69%	145,78	207,34	29,69%	169,88	241,62	29,69%
32	99,12	150,12	33,97%	115,53	174,97	33,97%	129,73	196,49	33,98%	151,18	228,98	33,98%
33	150,89	235,18	35,84%	175,86	274,15	35,85%	197,49	307,88	35,85%	230,14	358,8	35,86%
34	134,21	203,3	33,98%	156,43	236,99	33,99%	175,67	266,16	34,00%	204,71	310,19	34,00%
35	235,46	357,36	34,11%	274,45	416,78	34,15%	308,2	468,17	34,17%	366,22	545,72	32,89%
36	90,18	130,14	30,71%	105,11	151,7	30,71%	118,03	170,35	30,71%	137,55	198,52	30,71%
37	979,57	1437,81	31,87%	1151,9	1716,39	32,89%	1300,8	1957,82	33,56%	1525,5	2322,15	34,31%
38	910,88	1289,19	29,34%	1072,3	1542,47	30,48%	1211,6	1761,87	31,23%	1430,1	2092,65	31,66%
39	555,5	818,51	32,13%	651,34	972,09	33,00%	734,04	1104,72	33,55%	862,18	1304,26	33,90%
40	218,34	315,07	30,70%	254,48	367,33	30,72%	285,78	412,56	30,73%	333,03	480,82	30,74%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A5 - Valores máximos de vazões (L/s) em cada sub-bacia no cenário com pavimentos permeáveis a 50% e percentual de redução (continua).

SB/TR	2 ANOS			5 ANOS			10 ANOS			25 ANOS		
	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO
1	613,09	706,33	13,20%	714,59	823,3	13,20%	802,47	924,56	13,21%	935,14	1077,44	13,21%
2	130,47	158,25	17,55%	152,07	184,45	17,55%	170,77	207,13	17,55%	199	241,37	17,55%
3	117,1	147,9	20,82%	136,48	172,4	20,84%	153,27	193,61	20,84%	178,61	225,63	20,84%
4	87,51	107,09	18,28%	102,11	125,13	18,40%	114,73	140,72	18,47%	133,77	164,21	18,54%
5	53,02	64,3	17,54%	61,8	74,94	17,53%	69,4	84,15	17,53%	80,87	98,07	17,54%
6	67,9	81,09	16,27%	79,14	94,52	16,27%	88,87	106,14	16,27%	103,57	123,69	16,27%
7	28,15	30,56	7,89%	32,88	35,74	8,00%	36,96	40,2	8,06%	43,12	46,93	8,12%
8	173,53	209,34	17,11%	202,51	244,69	17,24%	227,58	275,22	17,31%	265,38	321,23	17,39%
9	75,94	93,31	18,62%	88,51	108,77	18,63%	99,39	122,15	18,63%	115,83	142,35	18,63%
10	722,69	810,74	10,86%	855,2	965,52	11,43%	969,9	1099,63	11,80%	1142,8	1302	12,22%
11	170,94	192,65	11,27%	199,35	224,8	11,32%	223,93	252,6	11,35%	261,03	294,53	11,37%
12	281,55	322,67	12,74%	328,59	377,04	12,85%	369,27	424,01	12,91%	430,62	494,78	12,97%
13	19,72	21,19	6,94%	22,99	24,7	6,92%	25,82	27,75	6,95%	30,09	32,34	6,96%
14	145,07	160,42	9,57%	169,09	186,98	9,57%	189,88	209,98	9,57%	221,27	244,71	9,58%
15	15,71	16,51	4,85%	18,31	19,24	4,83%	20,56	21,61	4,86%	23,96	25,19	4,88%
16	9,61	9,96	3,51%	11,2	11,6	3,45%	12,57	13,03	3,53%	14,65	15,19	3,55%
17	355,46	412,49	13,83%	414,55	481,48	13,90%	465,67	541,09	13,94%	542,81	630,96	13,97%
18	267,84	319,02	16,04%	312,23	372	16,07%	350,65	417,84	16,08%	408,65	487,02	16,09%
19	33,17	49,26	32,66%	38,66	58,21	33,59%	43,42	70,19	38,14%	51,9	95,54	45,68%
20	60,85	68,6	11,30%	70,92	79,96	11,31%	79,64	89,79	11,30%	92,81	104,64	11,31%

Fonte: Elaborado pelo autor.

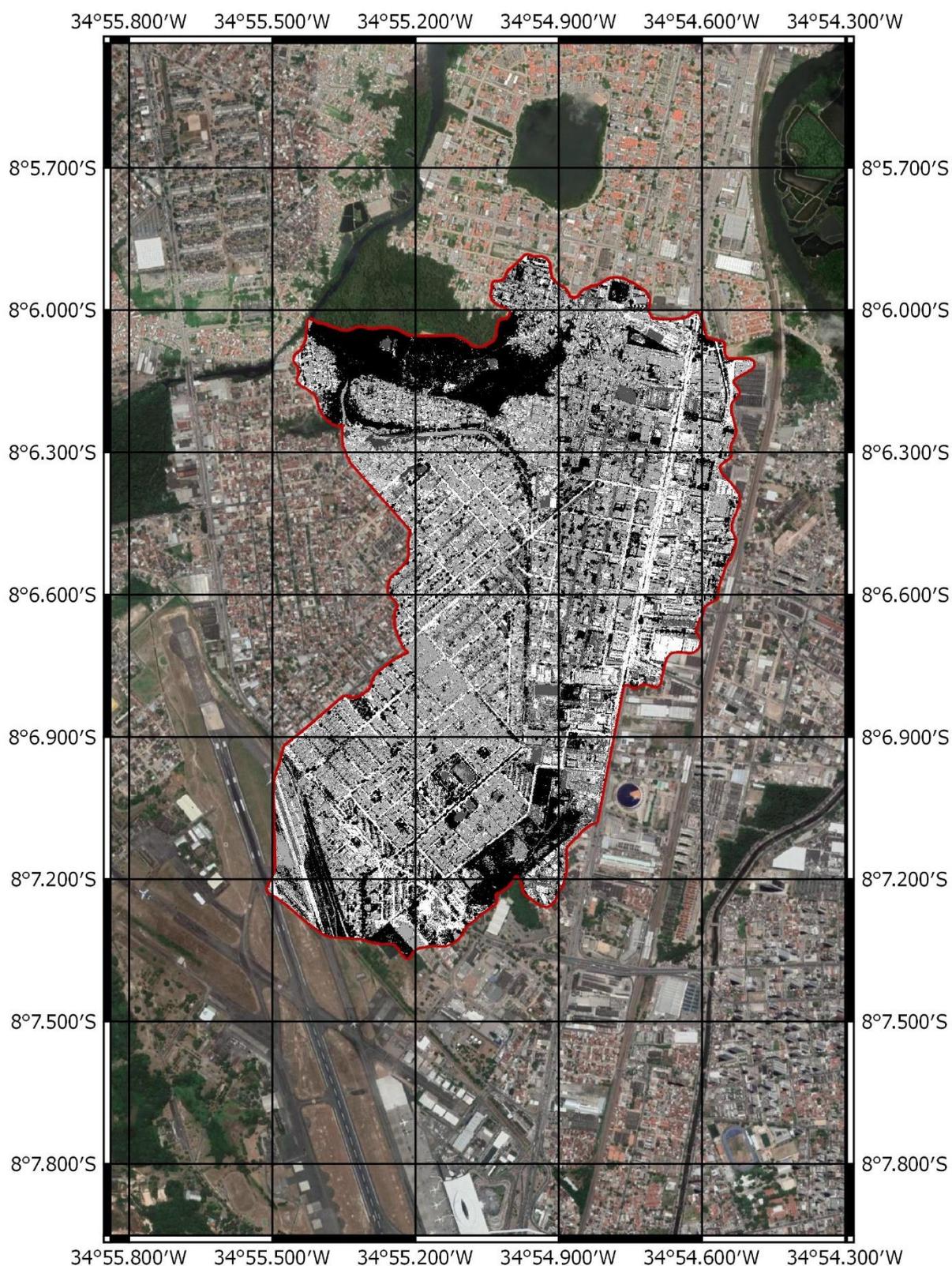
Tabela A5 - Valores máximos de vazões (L/s) em cada sub-bacia no cenário com pavimentos permeáveis a 50% e percentual de redução (continuação).

SB/TR	2 ANOS			5 ANOS			10 ANOS			25 ANOS		
	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO	COM	SEM	REDUÇÃO
21	323,3	396,46	18,45%	377,02	462,75	18,53%	423,5	520,05	18,57%	493,64	606,47	18,60%
22	92,78	102,26	9,27%	109,29	120,99	9,67%	123,56	137,17	9,92%	145,06	161,54	10,20%
23	736,49	847,95	13,14%	877,62	1022,02	14,13%	1000,1	1173,96	14,81%	1186	1404,7	15,57%
24	576,86	699,47	17,53%	686,15	841,69	18,48%	781	965,77	19,13%	924,32	1154,11	19,91%
25	494,46	609,07	18,82%	580,64	719,7	19,32%	655,07	815,24	19,65%	767,14	959,05	20,01%
26	213,43	240,89	11,40%	248,97	281,21	11,46%	279,71	316,07	11,50%	326,09	368,62	11,54%
27	291,88	328,38	11,12%	340,2	382,76	11,12%	382,04	429,85	11,12%	445,21	500,93	11,12%
28	493,44	569,68	13,38%	577,62	668,91	13,65%	650,34	754,52	13,81%	759,88	883,35	13,98%
29	374,65	416,68	10,09%	468,99	521,83	10,13%	558,94	623,25	10,32%	702,65	787,13	10,73%
30	352,68	409,33	13,84%	411,4	478	13,93%	462,19	537,32	13,98%	538,8	626,73	14,03%
31	140,04	158,41	11,60%	163,22	184,64	11,60%	183,3	207,34	11,59%	213,6	241,62	11,60%
32	135,3	150,12	9,87%	157,69	174,97	9,88%	177,09	196,49	9,87%	206,36	228,98	9,88%
33	203,06	235,18	13,66%	236,68	274,15	13,67%	265,79	307,88	13,67%	309,74	358,8	13,67%
34	174,4	203,3	14,22%	203,28	236,99	14,22%	228,29	266,16	14,23%	266,03	310,19	14,24%
35	311,38	357,36	12,87%	363,02	416,78	12,90%	407,7	468,17	12,92%	475,16	545,72	12,93%
36	112,18	130,14	13,80%	130,75	151,7	13,81%	146,83	170,35	13,81%	171,11	198,52	13,81%
37	1300,9	1437,81	9,52%	1542,6	1716,39	10,13%	1751,8	1957,82	10,52%	2067,3	2322,15	10,98%
38	1164,3	1289,19	9,69%	1381,3	1542,47	10,45%	1568,9	1761,87	10,95%	1851,3	2092,65	11,54%
39	700,98	818,51	14,36%	826,13	972,09	15,02%	934,14	1104,72	15,44%	1096,6	1304,26	15,92%
40	273,58	315,07	13,17%	318,9	367,33	13,18%	358,14	412,56	13,19%	417,36	480,82	13,20%

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B - SUB-BACIAS CLASSIFICADAS POR TIPO DE USO DO SOLO

Figura B1 - Sub-bacias no canal da malária classificadas por tipo de uso do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.