

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA PARA
SIMULAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE DRENAGEM URBANA
SUSTENTÁVEL UTILIZANDO EVENTOS DE CHUVA
CARACTERÍSTICOS**

LUAN SERAFIM MENDES GONÇALVES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Bernardo Arantes do Nascimento Teixeira

Serafim Mendes Gonçalves, Luan

Desenvolvimento de ferramenta para simulação de dispositivos de drenagem urbana sustentável utilizando eventos de chuva característicos / Luan Serafim Mendes Gonçalves -- 2022.
269f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Bernardo Arantes do Nascimento
Teixeira

Banca Examinadora: Ademir Paceli Barbassa, Daniel Jadyr Leite Costa, José Eduardo Alamy Filho, Jozrael Henriques Rezende

Bibliografia

1. Drenagem Urbana. 2. Simulação Hidrológica. 3. Eventos de Chuva. I. Serafim Mendes Gonçalves, Luan.
II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Luan Serafim Mendes Gonçalves, realizada em 03/06/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Bernardo Arantes do N. Teixeira (UFSCar)

Prof. Dr. Ademir Paceli Barbassa (UFSCar)

Prof. Dr. Daniel Jadyr L. Costa (UFSCar)

Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho (UFU)

Prof. Dr. Jozrael H. Rezende (FATEC)



Documento assinado digitalmente

BERNARDO ARANTES DO NASCIMENTO TEIXEIRA

Data: 10/06/2022 15:38:46-0300

Verifique em <https://verificador.itl.br>

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

“Sou de opinião de que não se devia desprezar aquele olhar atentamente para as manchas da parede, para os carvões sobre a grelha, para as nuvens, para a correnteza da água, descobrindo assim coisas maravilhosas.”

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Ao meu filho Daniel, por ser minha alegria e motivação a todo momento. Ficou ao meu lado dormindo no carrinho e compreendia que o papai estava trabalhando. Algumas vezes tive que dividir a tela entre o texto da tese e o Vlad e Niki, foram os melhores momentos.

À minha esposa, Lauren, agradeço pela amorosa presença e incansável incentivo. Obrigado por ser muito atenciosa e compreensiva comigo. Produzir uma tese ao lado de uma companheira como você é um verdadeiro presente.

Ao meu orientador, um exemplo de profissional, sempre guiando com muita paciência, presente em todos os momentos do trabalho e principalmente nas horas em que mais precisei. Tenho eterna gratidão por ter aceitado ser meu orientador neste trabalho, por me direcionar à tantos conhecimentos novos e por toda paciência com as minhas dificuldades.

Aos meus pais, Osana e Inácio, pelas calorosas orações, pelos valiosos conselhos e por tudo que fizeram por mim para chegar até esse momento. É um longo caminho que espero ser capaz de guiar meu filho também.

À Universidade Federal de São Carlos, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana pela oportunidade concedida para realização do curso. Aos professores do PPGEU, pelos sábios conhecimentos transmitidos. Ao secretário Alex, pela atenção e prestatividade.

Aos meus colegas orientandos do Prof. Bernardo, obrigado pela convivência onde aprendemos e apoiamos uns aos outros. Aos amigos da infância, Bruno e Adriano, pelos momentos de descontração.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

GONÇALVES, Luan Serafim Mendes. **Desenvolvimento de ferramenta para simulação de dispositivos de drenagem urbana sustentável utilizando eventos de chuva característicos**. 2022. 269 f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

RESUMO

Frequentemente as cidades brasileiras sofrem com inundações, alagamentos, deslizamentos e erosões causadas pelo escoamento superficial da água da chuva. Com o propósito de mitigar esses problemas, as técnicas de drenagem urbana sustentável incorporam estratégias de infiltração, evapotranspiração e retenção do escoamento superficial com o objetivo de mimetizar o ciclo hidrológico pré-urbanização. Diante disso, a simulação do funcionamento de dispositivos de drenagem sustentável promove um melhor entendimento do comportamento destas estruturas, o que pode refletir em projetos mais eficientes e de melhor aceitação pela comunidade. Deste modo, este trabalho adapta, avalia e aplica a metodologia dos Eventos de Chuva Característicos (ECC) para seleção de eventos pluviométricos históricos que sejam estatisticamente relevantes para realização de simulações hidrológicas de sistemas de drenagem sustentável. Para isso foi desenvolvida uma ferramenta computacional em linguagem VBA, nomeada Ferramenta DDU+S, capaz de selecionar eventos de chuva e calcular o balanço hidrológico de algumas técnicas de drenagem sustentável utilizadas no Brasil. Assim, através da simulação de alguns cenários utilizando poços de infiltração, reservatórios de chuva, superfícies de infiltração, valas de infiltração e trincheiras de infiltração, observou-se que os resultados obtidos com a ferramenta proposta se mostraram satisfatórios em comparação ao SWWM através da aplicação dos testes estatísticos PBIAS, NSE e RSR.

Palavras-chave: Eventos de Chuva; Drenagem Urbana; Simulação Hidrológica.

GONÇALVES, Luan Serafim Mendes. **Development of a tool for simulation of sustainable urban drainage techniques using characteristic rain events**. 2022. 269 f. Thesis (Urban Engineering) – Federal University of São Carlos, São Carlos, 2022.

ABSTRACT

Brazilian cities often suffer from floods, landslides and erosion caused by surface runoff. In order to mitigate these problems, sustainable urban drainage techniques incorporate infiltration, evapotranspiration and surface runoff retention strategies in order to mimic the pre-urbanization hydrological cycle. Therefore, the simulation of the operation of drainage techniques promotes a better understanding of the behavior of these structures, which can reflect in more efficient projects and better acceptance by the community. In this way, this work adapts, evaluates and applies the Characteristic Rain Events (CRE) methodology for selecting historical rainfall events that are statistically relevant for carrying out hydrological simulations of drainage systems. For this purpose, a computational tool capable of selecting rain events and calculating the hydrological balance of the most used sustainable drainage techniques in Brazil was developed using VBA language. Thus, through the simulation of some scenarios, using infiltration wells, infiltration trenches, rain barrels and vegetative swales it was observed that the results obtained with the proposed tool were similar to those obtained with the SWMM model and that the ECC through the application of PBIAS, NSE and RSR performance ratings.

Keywords: Rain Events; Urban Drainage; Hydrologic Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –Evolução temporal da porcentagem da população em áreas urbanas e rural.....	24
Figura 2 – Ciclo hidrológico em diferentes condições de urbanização.....	26
Figura 3 - Ciclo Hidrológico Urbano	27
Figura 4 - Comportamento do escoamento de águas superficiais	28
Figura 5 - Hietogramas para chuvas de projeto.....	32
Figura 6 – Curvas de distribuição de massa do Método de Huff	34
Figura 7 – Eventos Pluviométricos.....	39
Figura 8 – Condições de separação de eventos de chuva pelo método de máximas deslizantesFonte: Adaptado de Ahn <i>et al.</i> (2014).....	41
Figura 9 – Aumento do escopo da drenagem urbana	47
Figura 10 - Pilares da Drenagem Urbana Sustentável.....	48
Figura 11 – Linha do tempo dos termos relacionados a drenagem sustentável	50
Figura 12 - Classificação dos termos em drenagem urbana.	51
Figura 13 – Perfil de custos de um projeto de drenagem urbana	54
Figura 14 - Uso potencial para os principais modelos aplicados a águas pluviais.....	62
Figura 15 – Considerações para extração de eventos	70
Figura 16 – Fluxo de operações usado para extração dos ECH	71
Figura 17 – Evapotranspiração Total Anual em (mm) 1981-2010.....	78
Figura 18 – Sólidos geométricos utilizados para simulação da superfície de infiltração da Ferramenta DDU+S.....	80
Figura 19 – Sólidos geométricos utilizados para vala de infiltração da Ferramenta DDU+S..	82
Figura 20 – Modelo considerado para Trincheira de Infiltração na Ferramenta DDU+S.....	83
Figura 21 – Modelo considerado para Poço de Infiltração na Ferramenta DDU+S	84
Figura 22 – Modelo considerado para Reservatório de Água de Chuva na Ferramenta DDU+S	85
Figura 23 – Áreas de aplicação dos cenários simulados da Ferramenta DDU+S	87
Figura 24 – Modelagem do Superfície de infiltração no SWMM.....	89
Figura 25 – Modelagem da Vala de Infiltração no SWMM.....	90
Figura 26 – Modelagem da trincheira de Infiltração no SWMM.....	91
Figura 27 – Modelagem do poço de infiltração isolado no SWMM.....	92
Figura 28 – Modelagem do reservatório de água de chuva no SWMM.....	93
Figura 29 – Eventos de chuva (mm) vs. Tempo de retorno	97

Figura 30 – Altura dos eventos de chuva vs. Duração dos eventos de chuva	98
Figura 31 – Determinação dos Eventos de Chuva Característicos para as diferentes classes (continua).....	99
Figura 32 – Hietogramas acumulados de Huff e ECC (continua).....	103
Figura 33 – Quantidade de eventos históricos determinados em função do intervalo entre eventos	105
Figura 34 – <i>Boxplot</i> classes de tempo de retorno variando o intervalo entre eventos.....	107
Figura 35 – Eventos de chuva característicos em função do intervalo entre eventos para a Classe VI.....	108
Figura 36 - Quantidade de eventos históricos determinados em função da Intensidade Mínima	110
Figura 37 - <i>Boxplot</i> classes de tempo de retorno variando a intensidade mínima	112
Figura 38 - Eventos de chuva característicos para a classe VI variando a intensidade mínima	113
Figura 39 – Tela inicial ilustrando a Interface Gráfica do Usuário da Ferramenta DDU+S..	115
Figura 40 – Fluxograma simplificado do algoritmo da Ferramenta DDU+S.....	116
Figura 41 - Tela de informações do local	120
Figura 42 – Mensagem de erro no formulário	122
Figura 43 – Tela de informações do solo	123
Figura 44 - Diagrama para classificação textural em campo.....	124
Figura 45 – Frações de solo de acordo com a ABNT e USDA.....	125
Figura 46 – Tela de informações pluviométricas e de evaporação	126
Figura 47 – Carregamento de Dados Pluviométricos: a) Obtenção de dados; b) Dados carregados; c) Definição de intensidade e intervalo.....	127
Figura 48 – Formulário de alteração das classes de percentis.....	128
Figura 49 – Caixas de mensagem de informação ao usuário: a) Confirmação de cálculo; b) Processamento; c) Conclusão	129
Figura 50 – Tela de configuração da Superfície de Infiltração na Ferramenta DDU+S	131
Figura 51 – Tela de Configuração da Vala de Infiltração na Ferramenta DDU+S	132
Figura 52 – Tela de Configuração da Trincheira de Infiltração na Ferramenta DDU+S	133
Figura 53 – Tela contendo o diagrama de seleção de áreas de infiltração para trincheiras de infiltração.....	133
Figura 54 – Tela de Configuração do Poço de Infiltração na Ferramenta DDU+S.....	134

Figura 55 – Tela contendo o diagrama de seleção de áreas de infiltração para poços de infiltração.....	135
Figura 56 – Tela de Configuração do reservatório de água de chuva na Ferramenta DDU+S	136
Figura 57 – Caixa apresentando o resumo das informações do projeto	137
Figura 58 – Tela de Resultados da Ferramenta DDU+S	138
Figura 59 – Janela de exibição das curvas do balanço hídrico calculado pela Ferramenta DDU+S	138
Figura 60 – Área de estudo da superfície de infiltração	140
Figura 61 – Porcentagens do balanço hídrico para a superfície de infiltração simulada.....	141
Figura 62 - Porcentagens do balanço hídrico para a vala de infiltração simulada	143
Figura 63 – Trincheiras de infiltração em estacionamento.....	144
Figura 64 - Porcentagens do balanço hídrico para a trincheira de infiltração (50x50cm) simulada	145
Figura 65 - Porcentagens do balanço hídrico para a trincheira de infiltração (80x60cm) simulada	146
Figura 66 –Laboratório de Biopolímeros UFSCar	147
Figura 67 – Detalhe Poço de Infiltração	148
Figura 68 - Porcentagens do balanço hídrico para o poço de infiltração simulado.....	149
Figura 69 - Porcentagens do balanço hídrico para o reservatório de água de chuva simulado	150
Figura 70 – Comparativo do Balanço Hídrico obtido com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM.....	152
Figura 71 – Balanço Hídrico da superfície de infiltração para os diversos ECC	153
Figura 72 - Comparativo do Balanço Hídrico obtido com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para a vala de infiltração.....	154
Figura 73 – Balanço Hídrico da vala de infiltração para os diversos ECC	155
Figura 74 - Comparativo do Balanço Hídrico obtido com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para a trincheira de infiltração	156
Figura 75 – Balanço Hídrico da trincheira de infiltração para os diversos ECC.....	157
Figura 76 - Comparativo do Balanço Hídrico em volumes acumulados obtidos com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para o poço de infiltração	158
Figura 77 – Balanço Hídrico do poço de infiltração em porcentagens para os diversos ECC com uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para o poço de infiltração.....	159

Figura 78 - Comparativo do Balanço Hídrico obtido com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para o reservatório de chuva.....	160
Figura 79 – Balanço Hídrico do reservatório de água de chuva para os diversos ECC	161
Figura 80 – Resumo dos testes estatísticos aplicados à Ferramenta DDU+S considerando os componentes do balanço hídrico.	162
Figura 81 - Resumo dos testes estatísticos aplicados à Ferramenta DDU+S considerando os cada ECC.	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores propostos por diferentes autores para os parâmetros da equação IDF	30
Tabela 2 – Modelos de Hietogramas	31
Tabela 3 – Distribuições de tempo médio de chuvas por Huff	35
Tabela 4 – Características de eventos utilizadas por diversos autores	45
Tabela 5 – Prefixos de objetos utilizando a notação húngara no VBA	63
Tabela 6 – CN para áreas urbanas	75
Tabela 7 – Correlação entre textura e classe do solo.....	75
Tabela 8 – Parâmetros do solo de acordo com a classe textural.....	77
Tabela 9 – Avaliação de desempenho para testes estatísticos PBIAS, NSE e RSR.....	94
Tabela 10 – Pontuação para avaliação de desempenho.....	95
Tabela 11 – Classes de chuva por percentis para São Carlos.....	97
Tabela 12 – Propriedades dos Eventos de Chuva Característicos.....	101
Tabela 13 - Classes de chuva para São Carlos em função do Tempo Entre Eventos.....	106
Tabela 14 – Classes de chuva para São Carlos em função da Intensidade Mínima.....	111

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

3PA	<i>Three Points Approach</i>
AVM	Método de Variabilidade Média
BDMEP	<i>Banco de Dados Meteorológicos do INMET</i>
BGI	<i>Blue-Green Infrastructure</i>
BMP	<i>Best Management Practices</i>
CMA	Abordagem de Modelagem Contínua
CN	<i>Curve Number</i>
CUHP	<i>Colorado Urban Hydrograph Procedure</i>
DDU+S	Dispositivo de Drenagem Urbana Mais Sustentável
DOS	<i>Microsoft Disk Operating System</i>
DWA	<i>Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft</i>
EbA	<i>Ecosystem-based Adaptation</i>
ECC	Evento de Chuva Característico
ECH	Evento de Chuva Histórico
Eco-DRR	<i>Ecosystem-based Disaster Risk Reduction</i>
EMA	Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática
EPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
G2P	Função Gama de Dois Parâmetros
GI	<i>Green Infrastructure</i>
GPD	Distribuição Generalizada de Pareto
GUI	Interface gráfica do usuário
GVE	Distribuição Generalizada de Valores Extremos
HSPF	<i>Hydrologic Simulation Program-Fortran</i>
IDF	Intensidade, Duração, Frequência
IE	<i>Intervalo entre Eventos</i>
ISWS	<i>Illinois State Water Survey</i>
LID	<i>Low Impact Development</i>
MOUSE	<i>Hydroworks Model of Urban Sewers</i>
NBS	<i>Nature Based Solutions</i>
NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PURRS	<i>Probabilistic Urban Rainwater and Wastewater Reuse Simulator</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SUDS	<i>Sustainable Urban Drainage System</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TR	Tempo de Retorno
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USDA	<i>U.S Department of Agriculture</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da bacia (km ²)
a,b,c,d,ω	parâmetros de ajuste
A _i	área impermeabilizada (m ²)
b	abertura de fundo (cm, m)
B	abertura superficial (cm, m)
C	coeficiente de escoamento superficial
CS	<i>conductivity slope (%)</i>
E	lâmina de escoamento superficial (mm)
e	taxa de evaporação (mm/h)
E _i	evaporação obtida pelo evaporímetro de Piché (mm/dia)
ETP	evapotranspiração Penman- Piché
f	taxa de infiltração no solo (mm/h)
F(t)	infiltração acumulada (mm)
γ	probabilidade de exceder ou igualar um evento
h	profundidade (cm, m)
I	intensidade da precipitação (mm/h)
i	altura de chuva (mm)
in	inclinação (%)
IP	índice pluviométrico (mm/h)
K	condutividade hidráulica (mm/h, cm/h)
l	largura (cm, m)
L	comprimento (cm, m)
m	número de ordem do evento
N	período de observação dos dados (anos)
O	vazão de saída (m ³ /s, m ³ /h)
P	altura de precipitação (mm)
p	profundidade de água na superfície (cm, m)
P _{ap}	altura de chuva antes do pico (mm)
P _{dp}	altura de chuva depois do pico (mm)
P _{tot}	altura de chuva total (mm)

Q	vazão (m ³ /s, m ³ /h)
q ₀	escoamentos superficiais a montante (mm)
q ₁	escoamento superficial (mm)
Q _p	vazão de pico (m ³ /s, m ³ /h)
r	relação entre o tempo para atingir o pico e a duração total do evento
r	raio (cm, m)
S	capacidade máxima de retenção do solo (mm)
S _b	área a ser considerada do fundo (%)
S _e	saturação efetiva
S _p	área a ser considerada de infiltração das paredes (%)
t	duração da chuva (min, hora), tempo (min, hora)
T _{obs}	duração total da série (anos)
t _p	tempo antes do pico (min)
Tr	tempo de retorno (anos)
Tr _m	tempo de retorno de um evento de classificação m (anos)
V	volume armazenado (m ³)
V _d	volume do dispositivo (m ³)
w	coeficiente da temperatura do ar
y _i	intensidade pluviométrica do evento histórico (mm/h)
ȳ _i	intensidade da chuva média fictícia (mm/h)
Δθ	acréscimo de umidade no solo pela infiltração
η	porosidade (cm ³ /cm ³)
θ _e	porosidade efetiva (cm ³ /cm ³)
Λ	valor obtido do numerador da equação IDF dividido por 60 (mm/min)
Ψ	sucção na frente de molhamento (mm, cm)

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	18
Introdução.....	18
1.1 Considerações Gerais	18
1.2 Objetivos.....	19
1.3 Estrutura do Trabalho	20
CAPÍTULO II.....	22
Revisão Bibliográfica	22
2.1 Contexto Geral dos Sistemas de Águas Pluviais.....	22
2.1.1 Introdução.....	22
2.1.2 Aspectos Gerais e Alterações no Ciclo Hidrológico Urbano	25
2.2 Chuvas de Projeto.....	29
2.2.1 Relações Intensidade, Duração e Frequência	29
2.2.2 Eventos de Chuva	38
2.3 Método dos Eventos de Chuva Característicos	43
2.4 Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis.....	46
2.4.1 Evolução dos Sistemas de Drenagem Urbana	46
2.4.2 Considerações acerca dos Dispositivos de Drenagem Urbana Sustentáveis.....	51
2.4.3 Dimensionamento de Dispositivos de Drenagem Urbana Sustentáveis.....	54
2.5 Modelagem Computacional Aplicada a Águas Pluviais	57
2.5.1 Considerações Gerais	57
2.5.2 Storm Water Management Model – SWMM.....	61
2.6 Princípios de Programação Computacional.....	62

CAPÍTULO III	66
Metodologia.....	66
3.1 Introdução.....	66
3.2 Etapa 1 – Revisão Bibliográfica	67
3.3 Etapa 2 – Aplicação do Método de Eventos de Chuva Característicos.....	68
3.3.1 Caracterização dos Eventos de Chuva.....	69
3.3.2 Codificação para Extração dos Eventos de Chuva	70
3.3.3 Determinação de Eventos de Chuva Característicos	71
3.4 Etapa 3 – Análise Comparativa entre ECC e Hietograma de Huff	72
3.5 Etapa 4 – Estudo de Fatores Intervenientes nos ECC: Intensidade Mínima e Intervalo Entre Eventos.....	72
3.6 Etapa 5 – Programação da Ferramenta DDU+S.....	73
3.6.1 Escoamento Superficial da bacia.....	74
3.6.2 Infiltração.....	76
3.6.3 Evapotranspiração	77
3.6.4 Balanços Hídricos nos DDUS	79
3.7 Etapa 6 – Aplicação da Ferramenta DDU+S.....	86
3.8 Etapa 7 - Avaliação da Ferramenta DDU+S	88
3.8.1 Construção do modelo da superfície de infiltração no SWMM.....	88
3.8.2 Construção do modelo da vala de infiltração no SWMM	90
3.8.3 Construção do modelo da trincheira de infiltração no SWMM.....	91
3.8.4 Construção do modelo do poço de infiltração no SWMM.....	91
3.8.5 Construção do modelo do reservatório de água de chuva no SWMM.....	93
3.8.6 Testes Estatísticos para avaliação do desempenho da Ferramenta DDU+S.....	93
CAPÍTULO IV	96
Resultados e Discussões	96
4.1 Eventos de Chuva.....	96

4.1.1	Categorização dos Eventos de Chuva Históricos	96
4.1.2	Seleção dos Eventos de Chuva Característicos (ECC).....	98
4.1.3	Discussões a respeito da metodologia ECC	101
4.2	Análise Comparativa ECC vs. IDF	102
4.2.3	Comparativo Hietogramas de Projeto com ECC.....	102
4.3	Estudo dos Fatores Intervenientes nos ECC.....	105
4.3.1	Impacto da Escolha de Tempo Entre Eventos Para a Determinação do ECC.....	105
4.3.2	Impacto da Escolha da Intensidade Mínima Para a Determinação do ECC.....	110
4.3.3	Discussões sobre a intensidade mínima para determinação de ECC.....	114
4.4	Ferramenta DDU+S.....	114
4.4.1	Características Gerais	114
4.4.2	Esquema computacional.....	116
4.4.3	Telas da Ferramenta DDU+S	119
4.5	Aplicação da Ferramenta DDU+S.....	139
4.5.1	Superfície de infiltração.....	139
4.5.2	Vala de Infiltração	142
4.5.3	Trincheira de Infiltração	143
4.5.4	Poço de Infiltração.....	147
4.5.5	Reservatório de água de chuva	150
4.5.6	Discussões sobre a aplicação da Ferramenta DDU+S.....	151
4.6	Avaliação da Ferramenta DDU+S.....	151
4.6.1	Avaliação da Ferramenta DDU+S vs. SWMM para a Superfície de Infiltração...	152
4.6.2	Avaliação da Ferramenta DDU+S vs. SWMM para a Vala de Infiltração	154
4.6.3	Avaliação da Ferramenta DDU+S vs. SWMM para a Trincheira de Infiltração ..	156
4.6.4	Avaliação da DDU+S vs. SWMM para o Poço de Infiltração	158
4.6.5	Avaliação da DDU+S vs. SWMM para o Reservatório de Água de Chuva	159
4.6.6	Testes Estatísticos PBIAS, RSR e NSE	161

CAPÍTULO V	168
Conclusão	168
REFERÊNCIAS	171
APÊNDICE A	185
Efeito das variações dos fatores intervenientes nos ECC.....	185
A.1 ECC em função da variação do intervalo entre eventos.....	185
A.2 ECC em função da variação da intensidade mínima de chuva.....	190
APÊNDICE B.....	196
Gráficos comparativos dos elementos do balanço hídrico calculados pela FERRAMENTA DDU+S e SWMM	196
B.1 Superfície de Infiltração.....	196
B.2 Vala de Infiltração.....	204
B.3 Trincheira de Infiltração	210
B.4 Poço de Infiltração	218
B.5 Reservatório de Água de Chuva	225
APÊNDICE C.....	230
Testes estatísticos PBIAS, RSR E NSE	230
C.1 Teste Estatístico PBIAS.....	234
C.2 Teste Estatístico RSR.....	239
C.3 Teste Estatístico NSE.....	244
APÊNDICE D	249
Dados de Entrada dos Modelos	249
D.1 Superfície de Infiltração	249

D.2 Vala de Infiltração	254
D.3 Trincheira de Infiltração – Dados de Entrada dos Modelos	259
D.4 Poço de Infiltração – Dados de Entrada dos Modelos.....	263
D.5 Reservatório de Água de Chuva – Dados de Entrada dos Modelos	266

CAPÍTULO I

Introdução

1.1 Considerações Gerais

A urbanização brasileira seguiu um modelo de limitado planejamento urbano com grande densidade habitacional. Este padrão foi incentivado para redução dos custos de infraestrutura e maximização do parcelamento do solo. Todavia, essa filosofia tende a produzir efeitos indesejáveis no manejo das águas pluviais urbanas, com aumento das áreas impermeáveis e conseqüente aumento das vazões de escoamento superficial, sobrecarregando o sistema de drenagem urbana (TUCCI, 2012).

Assim, desde o final dos anos 80, as abordagens *Low Impact Development* (LID), *Sustainable Urban Drainage System* (SUDS), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), *Best Management Practices* (BMP), Técnicas Compensatórias, Infraestrutura Verde, Cidades Esponja entre outras, passaram a fazer parte do rol de alternativas a serem consideradas pelos profissionais da área de drenagem, uma vez que a abordagem tradicional tem se mostrado ineficaz no manejo do escoamento superficial urbano.

Segundo Bemfica *et al.* (2000) uma estrutura hidráulica de drenagem é dimensionada partindo de uma chuva de projeto descrita em um hietograma, com um determinado risco de ocorrência, sendo uma simplificação da distribuição temporal da chuva. Existem diversos métodos para determinar chuvas de projeto, porém em sua maioria não visam a reprodução de eventos reais, mas sim a determinação de situações com efeito crítico ao escoamento. Backhaus e Fryd (2013) questionam se os projetistas de dispositivos de drenagem possuem conhecimentos específicos da quantidade de água de chuva precipitada em uma dada região, já que é comum observar dispositivos superdimensionados, que criam verdadeiras crateras no meio urbano.

Deste modo, a modelagem de dispositivos de drenagem urbana sustentáveis antes da sua instalação ou como uma verificação do projeto *as built* melhora o desempenho geral por meio da análise de diversos cenários, permitindo a identificação de consequências de projeto não previstas, ou como uma ferramenta para estudar parâmetros de balanço hídrico, que são difíceis de medir em diferentes condições meteorológicas ou climáticas (ALIKHANI *et al.*, 2019).

Nesse sentido, a determinação da chuva de projeto é um ponto crítico nos projetos de drenagem urbana. Ao se realizar simulações hidrológicas por método dos eventos, é importante que o evento selecionado seja representativo dentre os dados históricos. Escolhas inadequadas poderão levar ao superdimensionamento das estruturas hidráulicas com decorrentes custos desnecessários, ou no pior dos casos ao subdimensionamento com potencial catastrófico.

Em vista disso, a metodologia dos Eventos de Chuva Característicos (Andersen *et al.*, 2017) pode ser empregada para diversos cenários de chuva, que associado a modelos hidrológicos permite calcular as eficiências de um dispositivo de drenagem sustentável, fornecendo métricas que ajudam a determinar o desempenho de um dispositivo de forma clara e lógica.

Kim *et al.* (2017) observam que existem barreiras políticas, regulatórias, financeiras e de educação que dificultam a implementação de dispositivos de drenagem sustentáveis. Dhakal e Chevalier (2017) comentam que essas barreiras só serão superadas com o reconhecimento da comunidade que a drenagem sustentável é de fato benéfica para ela. Ahammed (2017) avaliou que é necessário o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem os diversos profissionais ligados a drenagem urbana a projetar dispositivos sustentáveis, e Lerer (2019) concluiu que ferramentas simples e de fácil utilização podem contribuir para a disseminação do uso de dispositivos sustentáveis.

1.2 Objetivos

Esta tese propõe a adaptação do método dos Eventos de Chuva Característicos (ECC), com a construção de uma ferramenta computacional (Ferramenta DDU+S) de fácil utilização que irá auxiliar diferentes profissionais a simular dispositivos de drenagem mais sustentáveis para manejo da água da chuva em diversos cenários pluviométricos.

Para atingir esta proposta, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver rotina computacional para obtenção de Eventos de Chuva Característicos a partir de uma série histórica de dados pluviométricos;
- Avaliar o impacto das variações de intensidade pluviométrica mínima e do intervalo entre eventos na determinação dos Eventos de Chuva Característicos;
- Desenvolver ferramenta computacional que permita simular o comportamento hidrológico de dispositivos de drenagem urbana sustentável quando sujeito a ECC;
- Aplicar a ferramenta computacional desenvolvida em cenários simulados e fazer sua avaliação comparada ao modelo SWMM.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em 5 capítulos, sendo:

Capítulo 1: Introdução

Breve contextualização sobre o tema de drenagem sustentável e apresentação dos objetivos a serem alcançados.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Estruturação da fundamentação teórica do trabalho, compreendendo uma revisão bibliográfica dos seguintes temas: contexto geral dos sistemas de águas pluviais; chuvas de projeto; método dos eventos de chuva característicos; sistemas de drenagem urbana sustentáveis, modelagem computacional aplicada a água pluviais e princípios de programação computacional.

Capítulo 3: Metodologia

Apresentação da base metodológica do trabalho, com descrição detalhada dos materiais e métodos aplicados na pesquisa, incluindo: a aplicação do método dos Eventos de Chuva Característicos, análise comparativa entre ECC e hietograma de Huff, estudo dos fatores intervenientes nos ECC, programação da ferramenta computacional, aplicação da ferramenta em cenários simulados e avaliação da ferramenta proposta.

Capítulo 4: Resultados e Discussões

Apresentação dos resultados e as discussões pertinentes, abordando a Ferramenta DDU+S e suas aplicações em cenário simulado e comparado ao modelo SWMM.

Capítulo 5: Conclusões e Recomendações

Apresentação das conclusões e recomendações do trabalho.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

2.1 Contexto Geral dos Sistemas de Águas Pluviais

2.1.1 Introdução

A Revolução Industrial iniciada no século XVIII intensificou a urbanização das sociedades, alterando profundamente a estrutura das cidades o que fez surgir questões de saneamento, mobilidade e habitação (MIGUEZ *et al.*, 2015).

Até meados do século 18, era aceitável o risco de inundações urbanas, sendo considerado um preço a se pagar pelo desenvolvimento próximo à água (BRASIL, 2007). No século 19, tornou-se padrão a canalização das águas urbanas no continente europeu, principalmente devido a relação direta entre saúde pública e construção de sistemas de drenagem (ASHLEY *et al.*, 2015).

O sistema clássico de drenagem urbana seguia um conceito higienista, e era projetado de forma a permitir a rápida evacuação das águas urbanas. No Brasil, o conceito higienista de “tudo para o esgoto” foi adotado efetivamente a partir da proclamação da república no final do século 19. Essa linha de pensamento prevê a canalização das águas pluviais, conduzindo a mesma preferencialmente no subterrâneo e por gravidade, permitindo o desenvolvimento urbano e a fácil circulação viária, evitando a presença da água na superfície e as possíveis doenças de veiculação hídrica (BRASIL, 2007).

O conceito higienista permaneceu em evidência até a década de 1970, quando o aumento da urbanização mostrou que essa concepção era insustentável e não era capaz de conter as enchentes. Foi necessário rever o sistema tradicional que possuía uma infraestrutura

sobrecarregada, sendo necessário atuar na fonte ao invés de meramente conduzir a água, criando-se medidas de reservação e infiltração (MIGUEZ *et al.*, 2015).

O modelo tradicional não tem preocupação com a qualidade da água e transfere o problema do aumento da vazão para jusante. Desde a década de 80, outras técnicas estão sendo utilizadas nos projetos de drenagem urbana, conhecidas como técnicas alternativas ou sustentáveis. Estas técnicas buscam reproduzir as condições do ciclo hidrológico pré-urbanização, proporcionando algumas vantagens em relação ao sistema clássico.

A drenagem urbana, historicamente uma disciplina da Engenharia Civil, desenvolveu-se então para abordagens integradas, ampliando as perspectivas para disciplinas e profissionais de arquitetura e urbanismo, gestão pública, ecologistas e sociólogos (FLETCHER *et al.*, 2014). Segundo Ashley *et al.* (2015) esta disciplina de engenharia tem evoluído a partir de preocupações com a saúde pública e segurança da população, em uma visão multifacetada, vinculando a drenagem com amplos imperativos ambientais, sociais e econômicos para entregar resultados multifuncionais. Neste sentido, a gestão do escoamento superficial é um desafio considerável na maioria das áreas urbanas. Requisitos conflitantes para a prevenção de inundações, bem como proteger o ambiente natural da poluição podem levar a decisões difíceis no projeto do sistema de drenagem.

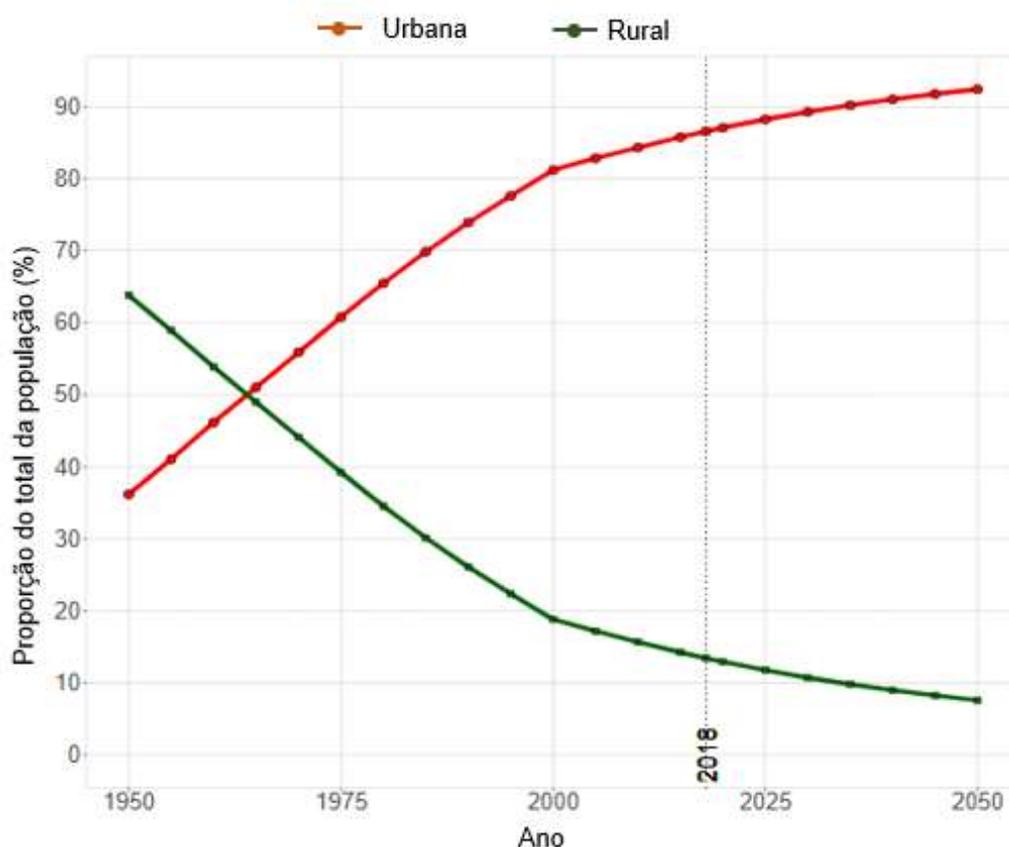
Segundo o IBGE (2001), em 1950 a população brasileira era predominantemente rural, porém com o processo de industrialização do país e o crescimento vegetativo das áreas urbanas ocorreu um processo de rápida urbanização. As novas estimativas do IBGE (2018) indicam que cerca de 85% da população atualmente vive em áreas urbanas. Estudos da ONU (2018) indicam que em 2050 cerca de 93% da população brasileira viverá em cidades, como ilustra a Figura 1.

É fundamental destacar que dentre os 5570 municípios brasileiros, em apenas 317, que representam 5,7% do total, habitam 57% da população total do país, estimada em 208 milhões de habitantes. Essas cidades abrigam mais de 100 mil habitantes. A maior parte dos municípios (68,4%) possui até 20 mil habitantes e abriga cerca de 15% da população (IBGE, 2018). Nos municípios onde há maior concentração de pessoas, os efeitos do ciclo da chuva têm maior impacto.

O rápido processo de urbanização causou inúmeros impactos negativos no ambiente, com ocupação de áreas de risco e de preservação, e ausência de infraestrutura para atender a nova população urbana. Quanto à gestão da água pluvial, alguns fatores como a excessiva impermeabilização do solo, urbanização intensiva e em locais impróprios, remoção da cobertura vegetal, deficiências na infraestrutura e manutenção das redes de drenagem, e o descaso do poder público são os principais causadores das enchentes. As enchentes urbanas

causam danos significativos às edificações, vias e patrimônio público, contribuem para a poluição e contaminação das águas com disseminação de doenças e promovem problemas importantes de saúde pública e na mobilidade urbana, além do pior cenário que é o risco à vida humana (PERES, 2011).

Figura 1 –Evolução temporal da porcentagem da população em áreas urbanas e rural



Fonte: Adaptado de ONU (2018)

Segundo Tucci (1997), o desenvolvimento urbano que se intensificou em meados do século XX, obrigou o desenvolvimento de estudos sobre os diversos aspectos da água no meio urbano. Além do óbvio abastecimento da população e a coleta, transporte e tratamento do esgoto, deve-se considerar o escoamento e tratamento da água pluvial e seus impactos sobre a população e o meio ambiente.

Desde o período pré-industrial (1850-1900) até os dias atuais, foi observado um aumento na temperatura média do ar de 1,53°C, consideravelmente superior ao aumento da temperatura média da terra e dos oceanos que foi de 0,87°C. A elevação da temperatura do ar gerou aumento na intensidade, duração e frequência (IDF) das precipitações em todo o mundo, assim como alterou a severidade dos períodos de secas. Em um cenário de mudanças climáticas,

é esperado que os climas regionais se alterem, modificando o padrão das chuvas e aumentando a frequência de eventos extremos, sendo que em áreas tropicais espera-se aumento das alturas totais precipitadas (IPCC, 2019).

Tanto o aquecimento global quanto a urbanização podem acelerar a elevação das temperaturas das cidades e seus arredores com o efeito das ilhas de calor. Esse efeito altera principalmente as temperaturas durante o período noturno e aumenta as intensidades dos eventos extremos de precipitação. Algumas projeções indicam que nos trópicos a frequência e intensidade dos eventos de chuva serão maiores, o que poderá causar emergências sem precedentes já no meio do século 21 (IPCC, 2019).

2.1.2 Aspectos Gerais e Alterações no Ciclo Hidrológico Urbano

Um dos conceitos mais fundamentais da hidrologia é o ciclo da água. Os efeitos combinados de urbanização, industrialização e crescimento da população afetam as respostas hidrológicas das bacias. Apesar dos princípios fundamentais serem os mesmos, o ciclo hidrológico é severamente modificado em áreas urbanas (MARSALEK *et al.*, 2008). Naturalmente, o ciclo da água mantém um balanço entre evapotranspiração, precipitação, infiltração e absorção. A urbanização reduz a permeabilidade do solo e remove a vegetação natural que intercepta, reduz a velocidade e absorve a água pluvial, aumentando, portanto, o escoamento superficial (BALLARD *et al.*, 2015). A aplicação de técnicas mais sustentáveis na drenagem urbana busca aproximar o balanço hídrico urbano ao natural. A Figura 2 ilustra as diferenças no ciclo hidrológico natural e urbano com e sem aplicação de técnicas de drenagem sustentáveis.

Figura 2 – Ciclo hidrológico em diferentes condições de urbanização

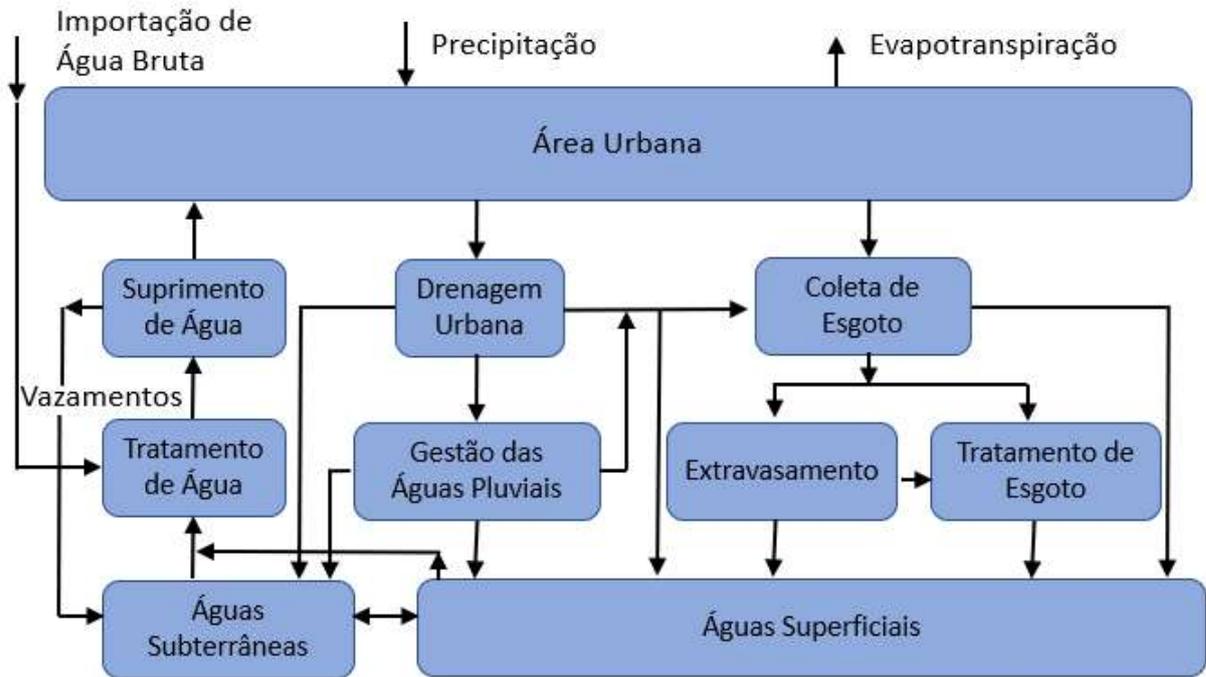


Fonte: Autor (2020)

Karamouz *et al.* (2010) observam que o microclima urbano é geralmente superior entre 4 a 7 °C em relação ao seu entorno, o que causa um aumento da taxa de evaporação entre 5 a 20%. Como a temperatura é maior, chuvas convectivas também são mais comuns. Quanto à precipitação, a taxa anual de precipitação é de 5 a 10% maior em áreas densamente povoadas em relação às áreas vizinhas. Para um único evento de chuva, esse incremento pluviométrico pode ser até 30% maior. Os valores absolutos de transpiração das árvores e da vegetação reduzem significativamente uma vez que há redução das áreas verdes. Por fim, a infiltração é reduzida pela impermeabilização das áreas e construção de sistemas de drenagem.

As principais entradas de água no ciclo urbano são a precipitação e o abastecimento público de água potável. O abastecimento público normalmente retira água de locais fora da zona urbana, podendo até mesmo importar água de outra bacia. Após tratada ela é distribuída para consumo sendo que uma fração dessa água é perdida através de vazamentos nas redes. Convertida em esgoto, retorna a um corpo hídrico superficial após seu tratamento. Já a água de precipitação pode ser parcialmente infiltrada, mas a maior parte irá gerar escoamento superficial que será descarregada em rios através do sistema de drenagem artificial ou natural. Parte da água pluvial pode ser interceptada e armazenada, ou sofrer evapotranspiração (MARSALEK *et al.*, 2008). A Figura 3 ilustra o ciclo hidrológico urbano.

Figura 3 - Ciclo Hidrológico Urbano



Fonte: Adaptado de Marsalek *et al.* (2008)

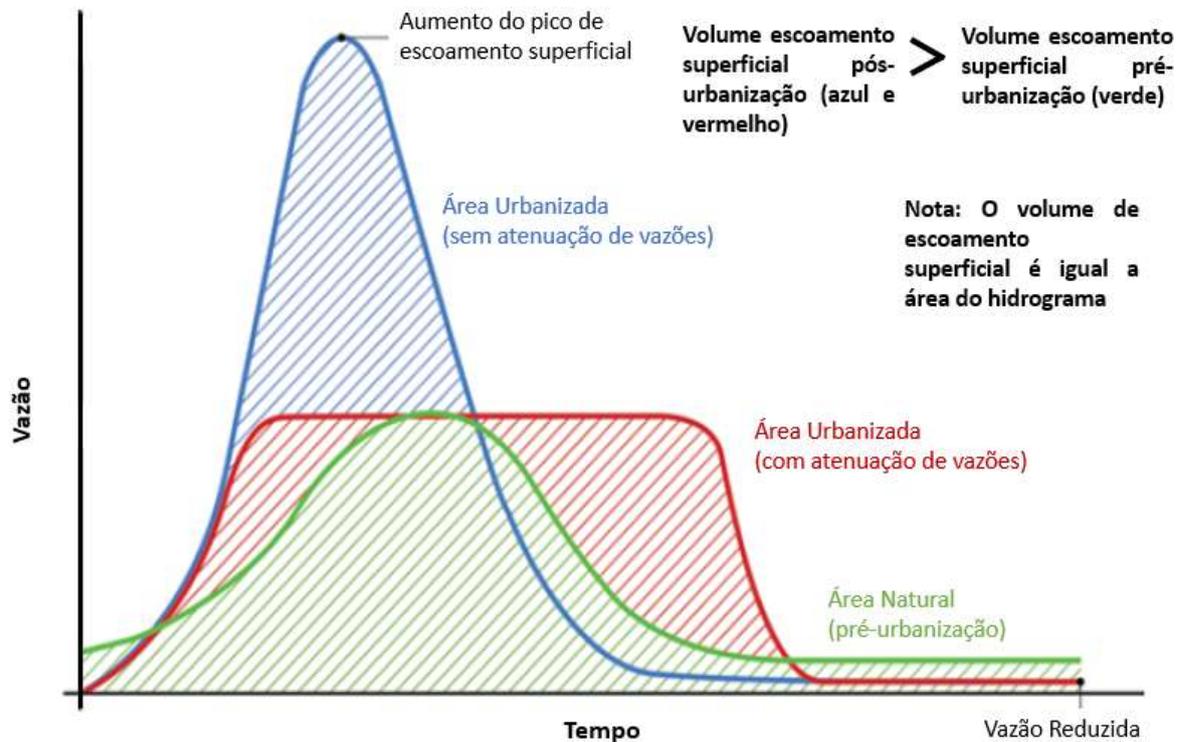
Tucci (1997) observa que a resposta hidrológica às chuvas no meio urbano é diferente do período pré-urbanização. A proporção das alterações varia de acordo com a localidade em função do solo, cobertura vegetal, geologia e clima, sendo que o impacto é maior para precipitações de maior frequência, onde a infiltração é uma variável importante. Para precipitações com elevado tempo de retorno, a diferença entre as condições naturais e urbanizadas são consideravelmente menores.

A Figura 4 ilustra o comportamento de uma bacia urbana ao escoamento de águas superficiais. É possível verificar que há uma antecipação e um grande incremento na vazão máxima para as condições urbanas. Segundo Karamouz *et al.* (2010), a vazão de pico aumenta entre 2 a 3 vezes, o intervalo entre o início da chuva e o início do escoamento superficial diminui 3 vezes e o volume de escoamento superficial aumenta entre 3 a 4 vezes na condição urbanizada em relação a pré-urbanização.

Apesar do senso comum imaginar que o escoamento urbano ocorre apenas em eventos de chuva ou derretimento de neve, na realidade o fluxo seco também é representativo. Esse fluxo é gerado pela lavagem das ruas, irrigação de jardins e praças entre outros, que inclusive podem possuir cargas poluidoras maiores do que o escoamento da água da chuva quando é considerado o ano todo. Para um correto monitoramento dos dispositivos de drenagem urbana,

além do fluxo seco e úmido, deve ser consideradas substâncias que podem ser despejadas, vazadas, derramadas ou descarregadas no sistema de drenagem (NAS, 2006).

Figura 4 - Comportamento do escoamento de águas superficiais



Fonte: Ballard *et al.* (2015)

Existem três tipos principais de chuvas que se distinguem por sua estrutura de tempo e espaço. O primeiro tipo são as chuvas convectivas, de distribuição localizada e com duração típica de alguns minutos até duas horas. O segundo tipo são as chuvas frontais, que possuem distribuição generalizada na região e duração entre 2 e 12 horas. O terceiro tipo de chuva são as orográficas, de escala regional e de longa duração, superiores a 12 horas (WARTALSKA *et al.*, 2020a).

O volume e duração de uma chuva que precipita em um determinado local é medido por um pluviômetro e registrado por um pluviógrafo. Esses equipamentos, juntamente com outros utilizados na aquisição de dados meteorológicos são reunidos em uma estação meteorológica, que pode ser convencional ou automática (INMET, 2020).

Um dos grandes problemas da engenharia urbana reside justamente na seleção de um cenário de chuva que permita o planejamento, cálculo e construção do sistema de drenagem urbana de forma eficiente. Existem vários métodos para solução deste problema, podendo ser

utilizados desde eventos pluviométricos reais, ou a adoção representações gráficas ou matemáticas da intensidade, duração e frequência das chuvas.

Palynchuk e Guo (2007) observam que existem algumas formas básicas de caracterização da chuva, sendo que cada técnica tem um uso adequado, sendo elas:

- Evento de Chuva Especial: para análises de grandes eventos, como no caso de furacões. A distribuição do volume e duração da chuva são utilizados para calcular o escoamento superficial.
- Chuvas de projeto: construídas a partir de curvas IDF, é uma padronização da distribuição da intensidade da chuva no tempo, para uma duração de chuva em estudo.
- Eventos pluviométricos: As chuvas são agregadas em eventos com um certo tempo entre eventos.
- Séries Contínuas: onde todos os registros históricos da distribuição da chuva são utilizados em modelagens contínuas

2.2 Chuvas de Projeto

2.2.1 Relações Intensidade, Duração e Frequência

A relação IDF de uma chuva é tipicamente usada para projetos de drenagem urbana. Gutiérrez-López e Barragán-Regalado (2019) comentam que a primeira fórmula matemática para representar as intensidades máximas em função da duração de uma chuva foi proposta pelo engenheiro Arthur N. Talbot em 1904. Na sequência, na década de 1930, primeiro Charles W. Sherman e depois Merrill M. Bernard apresentaram outras formulações para descrever a relação IDF com objetivo de caracterizar uma chuva em função do seu tempo de retorno. Depois desses pesquisadores, diversas outras formulações foram propostas.

Seong (2014) observa que dentre as várias formas de descrever a relação IDF, as fórmulas empíricas são as mais comuns, com uso frequente em projetos hidráulicos de pequena escala. Os parâmetros das fórmulas empíricas refletem as diversas condições meteorológicas de uma região. Existem várias fórmulas sugeridas na forma de equações de regressão univariadas baseadas na análise de frequência das chuvas.

Gutiérrez-López, Hernandez e Sandoval (2019) comentam que de forma geral, as equações IDF podem ser escritas de acordo com a equação 1.

$$I = \frac{a \times T_r^b}{(t^\omega + c)^d} \quad (1)$$

onde I é a intensidade da precipitação em mm/h; T_r é o tempo de retorno em anos; t é a duração da chuva em minutos e a , b , c , d e ω são parâmetros de ajuste. A Tabela 1 mostra os valores propostos por diferentes autores para parametrização da equação 1.

Tabela 1 – Valores propostos por diferentes autores para os parâmetros da equação IDF

Formulação	a	b	d	ω	c
Lei de Montana	-	-	0	-	-
Sherman	-	-	-	1	-
Bernard	-	0	1	1	0
Talbot/Linsley	-	0	1	1	-
Wenzel/Kimijima	-	0	1	-	-
Chow	-	-	1	1	-
Koutsoyiannis	-	$Tr^b = b \cdot \ln[-\ln(1-1/Tr)]$	-	1	-
Seong	-	1	$(b \cdot d)$	1	-

Fonte: Adaptado de Gutiérrez-López, Hernandez e Sandoval (2019)

Para obtenção dos parâmetros das equações IDF propostas, geralmente são utilizadas distribuições de frequências, sendo as mais comuns de acordo com Wayal e Menon (2014):

- Distribuição de Gumbel para valores extremos
- Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GVE)
- Distribuição Gamma
- Distribuição Log-Pearson Tipo III
- Distribuição Log-Normal
- Distribuição Exponencial
- Distribuição de Pareto

Burn (2014) observa que um grande desafio na construção das relações IDF é a obtenção de séries dados pluviométricos de longa duração. Wayal e Menon (2014) observam também que o uso das relações IDF é prática padrão para dimensionamento de estruturas hidráulicas a várias décadas, mesmo na era da computação.

Ao realizar um projeto de drenagem pode ser preciso assumir um hietograma de projeto. Hietogramas são uma representação gráfica da distribuição da chuva ao longo do tempo. Existe grande variabilidade nos tipos de hietogramas para precipitações de mesma duração. Balbastre-Soldevila *et al.* (2019) apresentam alguns hietogramas típicos utilizados em alguns países na Tabela 2. Os dois primeiros grupos são construídos diretamente a partir de relações IDF, enquanto o terceiro grupo é feito com perfis padrões de chuvas observados.

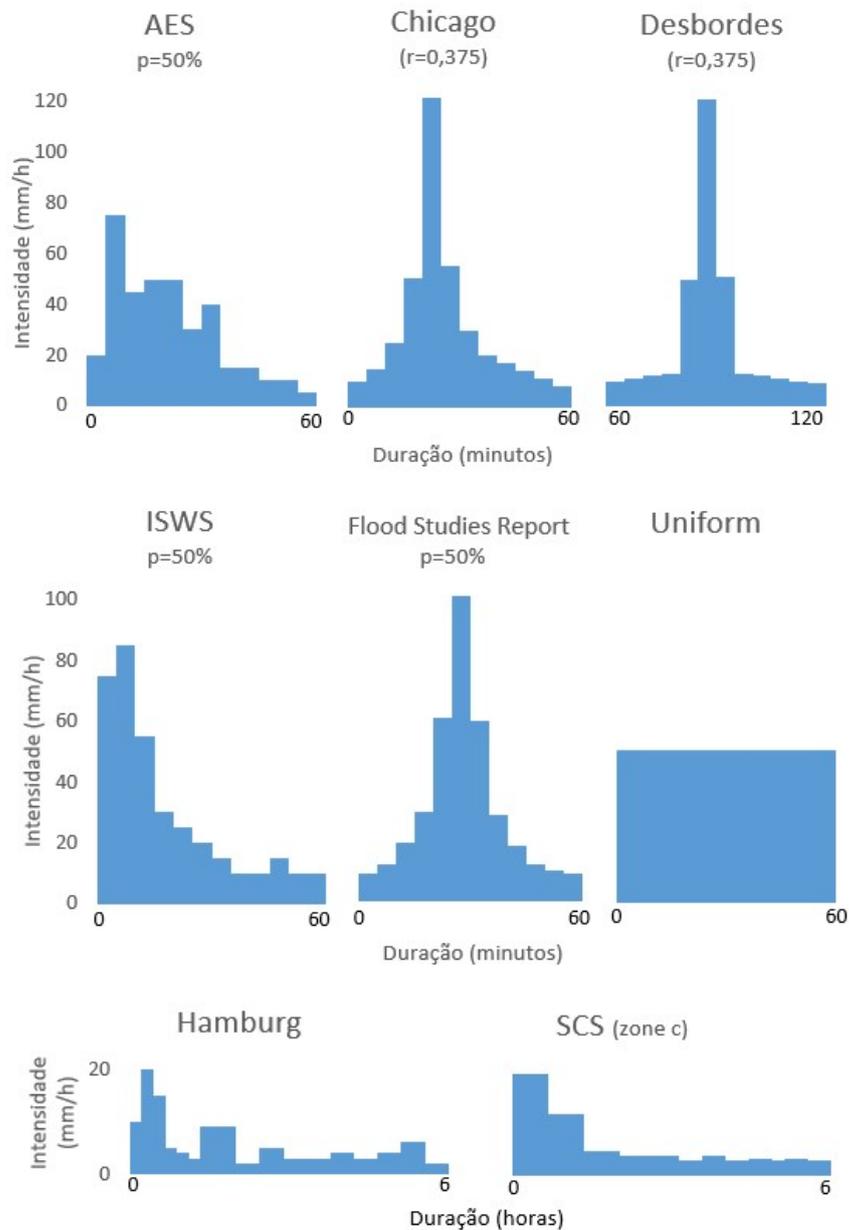
Tabela 2 – Modelos de Hietogramas

Classificação	Modelo Hietograma	País
	Retangular	E.U.A.
Padrão geométrico simples vinculado a um único ponto da curva IDF	Sifalda	Rep. Tcheca
	Triângulo Duplo	França
	Triangular	E.U.A.
	Linear/Exponencial	Canadá
Uso de toda a curva IDF	Blocos Alternados	E.U.A.
Perfis padronizados de registros de chuva	ISWS	E.U.A.
	AVM	Austrália
	NRCS	E.U.A.
	G2P	Espanha

Fonte: Adaptado de Balbastre-Soldevila *et al.* (2019)

Segundo Marsalek e Watt (1983), uma chuva de projeto urbana pode ser definida como uma especificação arbitrária da distribuição temporal de uma precipitação, que é usada junto com condições de umidade do solo e técnicas computacionais para determinar vazões de projeto. Os autores citam entre alguns motivos para a adoção de chuvas de projeto é a utilização mínima de recursos financeiros e de tempo, boa aceitação do meio técnico, clientes e agências de aprovação, além dos altos custos envolvidos em simulações contínuas de dados históricos ou de dados sintéticos que necessitam de calibração. A Figura 5 ilustra alguns modelos típicos de hietogramas utilizados em projetos de drenagem.

Figura 5 - Hietogramas para chuvas de projeto



Fonte: Adaptado de Marsalek e Watt (1984)

Marsalek e Watt (2013) indicam que aplicações que incluem um hietograma de chuva de projeto datam do final dos anos 1930. A pesquisa e o desenvolvimento de hietogramas atingiram seu apogeu nas décadas de 1970 e 1980 com o amplo acesso aos computadores. No entanto, após esse período, a pesquisa e desenvolvimento na área caíram por cerca de 20 anos e apenas recentemente o interesse aumentou, possivelmente estimulado por preocupações com as potenciais alterações climáticas. As chuvas de projeto podem ser eventos que nunca ocorreram, mas são derivados pela síntese de dados de precipitação ou eventos de chuva históricos reais que foram bem documentados com relação a suas características.

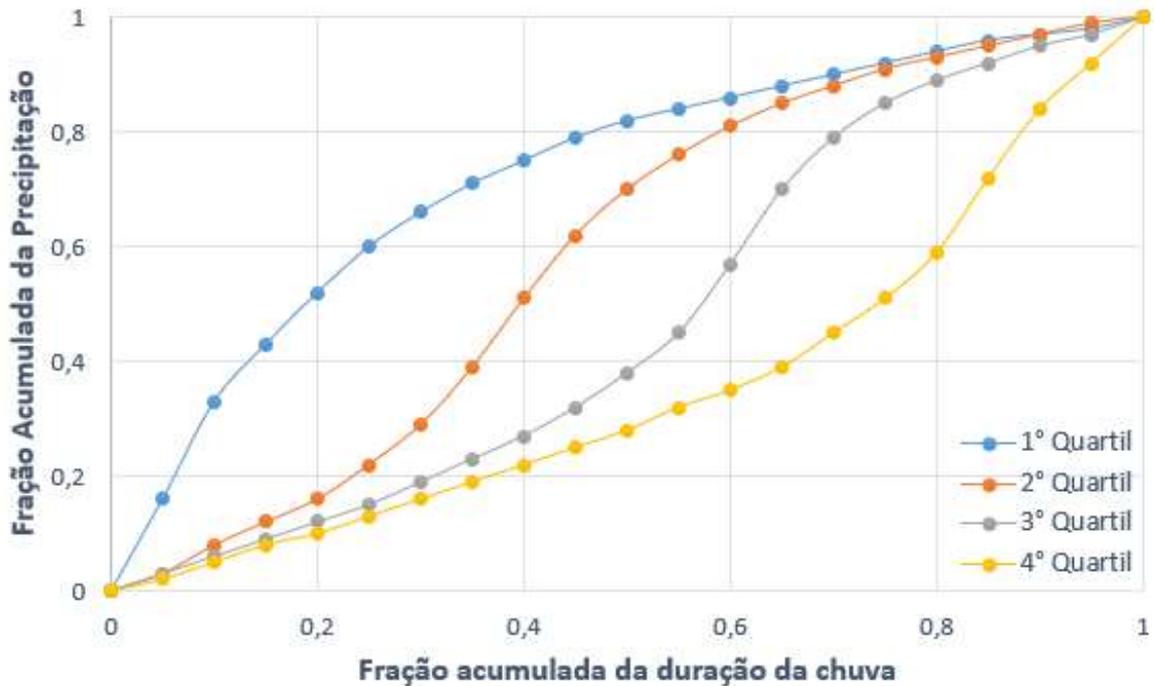
Ainda segundo Marsalek e Watt (2013), em meados do século 20, o desenvolvimento dos chamados métodos hidrográficos em centros urbanos nos Estados Unidos (Los Angeles e Chicago) marcou um grande avanço na inclusão da ciência hidrológica nos projetos de drenagem. Seguindo o trabalho de Los Angeles e Chicago, várias distribuições temporais foram desenvolvidas usando dados de chuvas observadas em vários países.

Prodanovic e Simonovic (2004) comentam que dos hietogramas de base geométrica, é comum o uso de hietogramas retangulares com intensidade média da chuva aplicada durante toda a duração do evento. Esse método é frequentemente associado ao método racional para estudo de enchentes. Outras formas geométricas utilizadas são as triangulares (Desbordes) e lineares/exponenciais. Balbastre-Soldevila *et al.* (2019) acrescentam ainda neste grupo de hietogramas o método de Sifalda e o triângulo duplo. Veneziano e Villani (1999) alertam que esses hietogramas não têm base conceitual sólida e podem produzir escoamentos subestimados, por outro lado são simples de serem construídos e intuitivos.

Prodanovic e Simonovic (2004) observam também que entre os hietogramas construídos com base em toda curva IDF podem-se citar os métodos de Chicago (também conhecido como método Keifer e Chu) e o método USACE. Balbastre-Soldevila *et al.* (2019) observam ainda que o método de Chicago possui algumas variantes, entre elas o método dos Blocos Alternados, que é um dos mais utilizados. Prodanovic e Simonovic (2004) alertam que esses métodos carregam as incertezas das curvas IDF, que representam intensidades médias ao longo das durações especificadas e não representam de fato eventos históricos reais, havendo, portanto, a possibilidade de suavização das intensidades e representação incorreta das durações.

Nos hietogramas baseados em perfis padronizados, Prodanovic e Simonovic (2004) comentam que são largamente utilizados nos estudos hidrológicos, sendo o método de Huff e do NRCS os mais utilizados. Balbastre-Soldevila *et al.* (2019) adicionam a este grupo os Método de Variabilidade Média (AVM) utilizado na Austrália, ISWS do estado de Illinois (EUA) e a função gama de dois parâmetros (G2P). Veneziano e Villani (1999) orientam que os principais pontos fracos dos métodos são a variabilidade da precipitação, que requer grandes amostras para produzir uma média estável. Sobre a distribuição Huff, Prodanovic e Simonovic (2004) indicam que ela possui quatro quartis. Especificar um quartil particular implica escolher o quartil em que a chuva produz o pico. Em outras palavras, a escolha do quartil I implica que o pico ocorrerá no primeiro quarto da chuva, a escolha do quartil II significa que o pico ocorrerá no segundo, e assim por diante, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Curvas de distribuição de massa do Método de Huff



Fonte: Adaptado de Prodanovic e Simonovic (2004)

O hietograma proposto por Huff (1967) é um gráfico cumulativo adimensional com determinadas probabilidades de ocorrência, sendo largamente utilizada em projetos de drenagem. Os dados de chuva são classificados em quatro quartis de acordo com o momento do pico de chuva, e uma série de curvas são então desenvolvidas em diferentes probabilidades dentro cada quartil.

Huff (1990) identificou distribuições de tempo médio de chuvas em um ponto para cada um dos quatro quartis, conforme exibido na Tabela 3. Como bem orientado por Huff (1967) existem diferenças significativas na chuva ao longo do tempo entre regiões e climas diferentes. Apesar disso, é comum a realização de estudos comparativos com base na curva de Huff, assim como feito por Abreu *et al.* (2017) e Alamy *et al.* (2016).

Tabela 3 – Distribuições de tempo médio de chuvas por Huff

% Acumulada de tempo de chuva	1° Quartil	2° Quartil	3° Quartil	4° Quartil
0	0	0	0	0
0,1	0,33	0,08	0,06	0,05
0,2	0,52	0,16	0,12	0,1
0,3	0,66	0,29	0,19	0,16
0,4	0,75	0,51	0,27	0,22
0,5	0,82	0,7	0,38	0,28
0,6	0,86	0,81	0,57	0,35
0,7	0,9	0,88	0,79	0,45
0,8	0,94	0,93	0,89	0,59
0,9	0,97	0,97	0,95	0,84
1	1	1	1	1

Fonte: Huff (1990)

Quanto ao método de Chicago, Bemfica *et al.* (2000) comentam que este modelo de hietograma é bem difundido e aplicado. Wang *et al.* (2018) observam que o método é baseado na equação IDF e apresenta apenas um pico de intensidade, sendo desenvolvido por Keifer e Chu. Silveira (2016) comenta ainda que é um método clássico da hidrologia para definição de hietogramas de projeto, com intensidades apresentadas por funções contínuas antes e depois do pico, sendo este posicionado arbitrariamente.

Sobre simulações estocásticas da chuva, Veneziano e Villani (1999) observam que nenhum dos métodos anteriores considera o fato de que padrões de precipitação no tempo e no espaço não se conformam com funções simples e são, além disso, altamente variáveis de evento para evento. Na verdade, os métodos evitam deliberadamente a variabilidade natural das chuvas, visando gráficos padronizados. Para capturar a complexidade de chuva natural, pode-se simular um ou mais hietogramas em um modelo de chuva estocástico. Os hietogramas são gerados como sequências de células com tempos de ocorrência, intensidades e durações aleatórios. Existem muitas variantes desses modelos, que diferem na forma das células individuais, distribuição de sua intensidade e variação temporal. Esses métodos têm como ponto negativo a parametrização complexa, o que limita seu uso.

Oliveira (2003) desenvolveu um modelo estocástico para geração de séries sintéticas de precipitações (ClimaBR) uma vez que a falta de modelos nacionais têm forçado a utilização de modelos desenvolvidos no exterior, que nem sempre são representativos para o Brasil.

2.2.1.1 Hietogramas aplicados em estudos de dispositivos de drenagem

Os estudos de drenagem sustentável utilizam os mais diversos tipos de hietogramas. Em alguns países existe indicação legal ou técnica e em outros há apenas preferência cultural na escolha do modelo de hietograma. Wartalska *et al.* (2020b) comentam que na Polônia o método de Euler tipo II, também conhecido como modelo DWA (*Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft*) é o mais utilizado. Este método foi desenvolvido e é largamente aplicado na Alemanha. Este modelo assume que a maior intensidade de precipitação ocorre a um terço da duração da precipitação. Gonçalves *et al.* (2018) utilizaram este padrão de hietograma para estudo de caso de aplicação LID no município de Joinville/SC.

Fen *et al.* (2020) utilizaram chuvas sintéticas elaboradas através da distribuição de Huff com pico no terceiro quartil, que é o método padrão para dimensionamento de estruturas de drenagem na Coreia do Sul. No trabalho, os autores trabalharam com chuvas de tempo de retorno 2, 3, 5, 10, 30, 50 e 100 anos, e duração de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 e 120 minutos. Também na Coreia do Sul, Lee e Kim (2018) utilizaram técnica similar para estudo de previsão de inundações na bacia do rio Sintaein. Li *et al.* (2020) analisaram o ciclo de vida de dispositivos sustentáveis com distribuição Huff e chuvas de duração de 3h e 6h para Tianjin, cidade no norte da China. Para esta mesma cidade, Cao, Li e Feng (2019) utilizaram a distribuição de Chicago com duração de 1h e relação r de 0,25; 0,5 e 0,75.

Yao *et al.* (2020) trabalharam com chuvas construídas pelo método Chicago, com duração de 2h, r igual a 0,4 e tempos de retorno de 0,1; 0,15; 0,2; 0,5; 1 e 5 anos para estudo de telhados verdes. Leng *et al.* (2020) e Ren *et al.* (2020) adotaram técnica idêntica para projeto em Ping Jiang New City e Wuhan, respectivamente.

Qin *et al.* (2013) estudaram as alterações no comportamento de dispositivos de drenagem urbana sustentáveis sob diferentes condições de chuva utilizando o hietograma de Chicago, alterando a altura de chuva, a duração e o tempo para atingir a intensidade de pico. Os autores montaram 3 grupos de chuva, sendo que no primeiro grupo variou o tempo de retorno (1, 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos) e manteve a duração da chuva (2h); o segundo grupo manteve a altura de chuva em 109mm e alterou-se as durações do evento entre 1h e 4h em intervalos de meia hora; e no último grupo os autores alteraram o tempo para atingir o pico (r) no hietograma entre 0,1 até 0,9, mantendo a duração em 2h e altura da chuva de 109mm. O estudo mostrou que os dispositivos do estudo se mostraram mais efetivos para chuvas de alta intensidade porém curtas. Os autores comentam ainda que no sul da China geralmente adota-se o hietograma de Chicago para projetos de drenagem urbana. Zhang *et al.* (2021) e Zhang *et al.* (2020) estudaram

a implantação de LIDs na cidade de Suzhou na China e de Kyoto no Japão, também através do hietograma de Chicago.

Kourtis *et al.* (2020) trabalharam com eventos de chuva de duração de 1 hora e tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos utilizando o método dos blocos para estudo de dispositivos LID na cidade de Atenas na Grécia. Carvalho *et al.* (2020) também utilizaram o método dos blocos alternados, porém com chuvas de 2h de duração, para estudar reservatório de água de chuva em Fortaleza.

Liu *et al.* (2020) fizeram estudo experimental com dispositivos sustentáveis para 2 eventos de chuvas fictícias, sendo a primeira com altura total de 25,4 mm e duração de 54 min, e a segunda de altura total de 42 mm e duração de 42,8 min. As intensidade foram mantidas constantes ao longo do ensaio, utilizando portanto o hietograma retangular. Bateni *et al.* (2020) estudaram pavimentos permeáveis com chuvas fictícias variando entre 80 mm e 200 mm, com intensidade constante e duração entre 15 minutos e 3 horas. Alves *et al.* (2020) utilizaram em simulações de implantação LID no semiárido brasileiro 2 chuvas obtidas através de equação IDF local para duração de 2 horas e TR de 2 e 5 anos, utilizando o hietograma retangular.

Panos *et al.* (2020) fizeram análise de sensibilidade de dispositivos LID em área residencial de Berkeley nos EUA utilizando chuvas sintéticas adotadas de 46,6 e 71 mm adotando a distribuição Tipo II *National Resources Conservation Service* (NRCS) em intervalos de 5 minutos.

Fry e Maxwell (2017) utilizaram chuvas obtidas pelo *Colorado Urban Hydrograph Procedure* (CUHP) com tempo de duração de 2 horas. O método foi criado em 1982 para a montagem de chuvas de projeto com distribuição consistente com os dados observados na cidade de Denver no Colorado.

Abenayake *et al.* (2020) utilizaram um valor de chuva diária extrema de referência determinada pelo departamento de meteorologia do Sri Lanka, que para a região do estudo foi de 150 mm, e hipoteticamente lançaram esse valor em escala horária em uma distribuição normal (também conhecida como curva de Gauss ou curva do Sino). Samouei e Özger (2020) fizeram estudo de caso com LID no campus da universidade de Istambul utilizando tempo de retorno de 25 anos e duração do evento de 2 horas utilizando também a distribuição normal.

Nos estudos realizados na UFSCar, Tecedor *et al.* (2015) dimensionaram planos de infiltração através de equação IDF utilizando tempo de retorno de 10 anos e duração da precipitação de 70 minutos. Santos (2017) estudou dispositivos sustentáveis através de equação IDF local, com TR de 2 anos e duração da chuva de 12 minutos, igual ao tempo de concentração da bacia em estudo. Essas chuvas de projeto adotaram o hietograma retangular.

Apesar do modelo de hietograma ter implicações diretas e significativas no estudo do comportamento de LIDs, não há consenso geral sobre qual dos procedimentos é o mais adequado para cada região. Coutinho *et al.* (2014) realizaram estudo no semiárido brasileiro buscando classificar eventos reais de acordo com 6 tipos diferentes de hietogramas (retangular, bimodal, triangular com pico a esquerda, triangular com pico a direita, triangular com pico central e sem forma definida). De forma geral, dos 1386 eventos analisados, cerca de 54% se aproximaram de hietogramas retangulares, aproximadamente 24% se aproximaram do triangular a esquerda, sendo os outros com parcelas menores e aproximadamente iguais, com exceção do triangular central que obteve 2,81% dos eventos. Considerando classes de duração dos eventos, o estudo mostrou que chuva menores do que 10 minutos são em sua maioria triangulares, enquanto aquelas que duram mais do que 120 minutos são principalmente classificadas como sem forma definida.

Naghattini e Pinto (2007) explicam que o tempo de retorno de um evento pluviométrico pode ser obtido pela análise de frequência local a partir de séries de duração anual, formadas por um único valor máximo para cada ano, e séries de duração parcial, que consideram valores superiores a um limiar de referência com sugestão de uma taxa de excedências de 2 a 3 eventos por ano. Estes métodos consideram apenas os valores extremos e permitem ajustar um modelo de distribuição generalizada de valores extremos (GVE) ou de distribuição generalizada de Pareto (GPD) aos dados subsequentes. Sørup *et al.* (2016) e Andersen *et al.* (2017) por sua vez trabalham com todos os eventos de chuva de uma série histórica, obtendo, portanto, uma série contínua independente da data de ocorrência do evento e não dividida por anos hidrológicos ou anos civis.

2.2.2 Eventos de Chuva

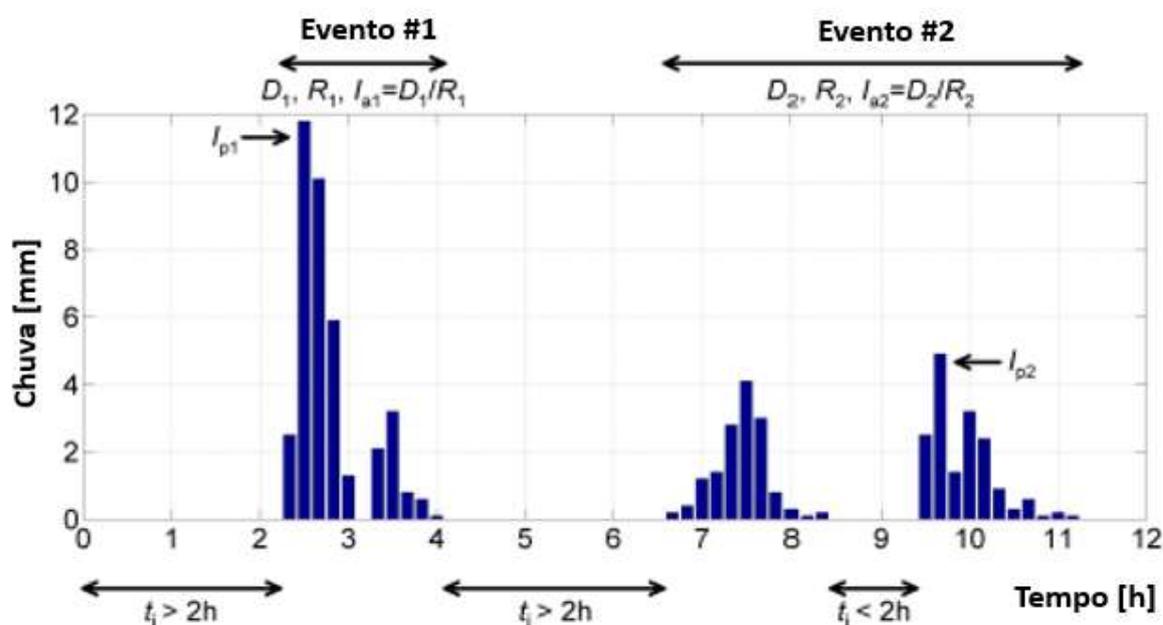
O potencial de dano de um evento de chuva depende não apenas do volume total de chuva, mas também de outras características como a intensidade de pico e a duração do evento. Propriedades estatísticas dessas características e sua inter-relação são fundamentais para projetos e estudos científicos (GAÁL *et al.*, 2014).

Dunkerley (2015) observa que sempre foi dada atenção aos períodos de chuva ativa ou aos picos de intensidade, porém os eventos pluviômetros raramente são analisados. Quantificar a intermitência dos eventos de chuva é de fundamental importância para aplicação no meio urbano, sendo ainda fundamental para modelagem e validação computacional de sistemas de

drenagem. É importante conhecer os intervalos entre eventos de chuvas, uma vez que longos intervalos contínuos podem secar a camada superficial do solo e afetar as plantas ali instaladas

Dunkerley (2015) observa ainda que existem muitas abordagens para delinear o que é um evento chuvoso, porém normalmente adota-se um intervalo mínimo de tempo para esta tarefa. Para determinar esse período de tempo, pode-se considerar que um evento chuvoso deve estar flanqueado por intervalos de tempo sem chuva maiores que o período de chuva, ou ainda especificar um intervalo de tempo em horas para separar os eventos. Gaál *et al.* (2014) comentam também que um evento de chuva pode ser definido por um intervalo de tempo sem chuva, chamado período entre eventos. A Figura 7 ilustra a identificação de eventos pluviométricos, onde D é a duração dos eventos, R é o volume precipitado, I_a é a intensidade média, I_p é a intensidade de pico e t é o período entre eventos.

Figura 7 – Eventos Pluviométricos



Fonte: Adaptado de GAÁL *et al.* (2014)

O intervalo entre eventos varia consideravelmente na literatura, havendo estudos partindo de 3 minutos até 48 horas (Dunkerley, 2008; Andersen *et al.*, 2017) e depende do objetivo da pesquisa. Dunkerley (2015) comenta que tipicamente são usados valores de 6h nos estudos científicos. Palynchuk e Guo (2007) observam que o tempo entre eventos pode ser adotado em 6h para a maioria das bacias urbanas, uma vez que o tempo de concentração costuma ser menor do que isso. Uma vez que o tempo de concentração é menor que o tempo

entre eventos, a resposta ao escoamento superficial de diferentes eventos pode ser tratada independentemente.

Ainda segundo Dunkerley (2015) existem duas intermitências em eventos pluviométricos, a interna e a externa. A intermitência externa é o período de espera para início de uma chuva, e a intermitência interna são períodos secos uma vez que a chuva já se iniciou. A análise de intermitências externas empregando dados agregados de chuva em até 1 hora são muito utilizados e são de boa resolução.

Gaál *et al.* (2014) observam que o período entre eventos garante que os eventos de chuva são independentes, e pode ser determinado em bases conceituais ou estatísticas. As bases conceituais podem considerar o tempo necessário para evaporação da água em determinado ambiente, ou o período que a umidade do solo decresce suficientemente para não impactar nas taxas de infiltração do próximo evento de chuva. A base estatística pode considerar o tempo entre eventos como o período suficientemente longo para tornar a auto correlação entre os eventos estatisticamente insignificantes ou considerar outras distribuições probabilísticas. A escolha do tempo entre eventos adequado é importante para não criar uma falsa interpretação da duração e intensidade dos eventos.

Ainda para determinação dos eventos pluviométricos, é comumente determinado um limite mínimo de volume pluviométrico em um período compatível com a resolução dos dados a fim de evitar a consideração de condensações ou sobras da drenagem no funil do pluviômetro de eventos anteriores, prevenindo assim o aumento na duração dos eventos com mínimo incremento nos volumes. Essa intensidade mínima varia de 0,1 mm/h a 1 mm/h (DUNKERLEY, 2015; GAÁL *et al.*, 2014; ANDERSEN *et al.*, 2017). As intensidades de 0,1 mm/h ou 0,2 mm/h são menores que os valores tipicamente encontrados para a evaporação em eventos chuvosos e para as taxas de infiltração de solos de alta impermeabilidade (DUNKERLEY, 2015). Já a intensidade de 1 mm/h considera as potenciais perdas iniciais de um sistema de drenagem pluvial (ANDERSEN *et al.*, 2017).

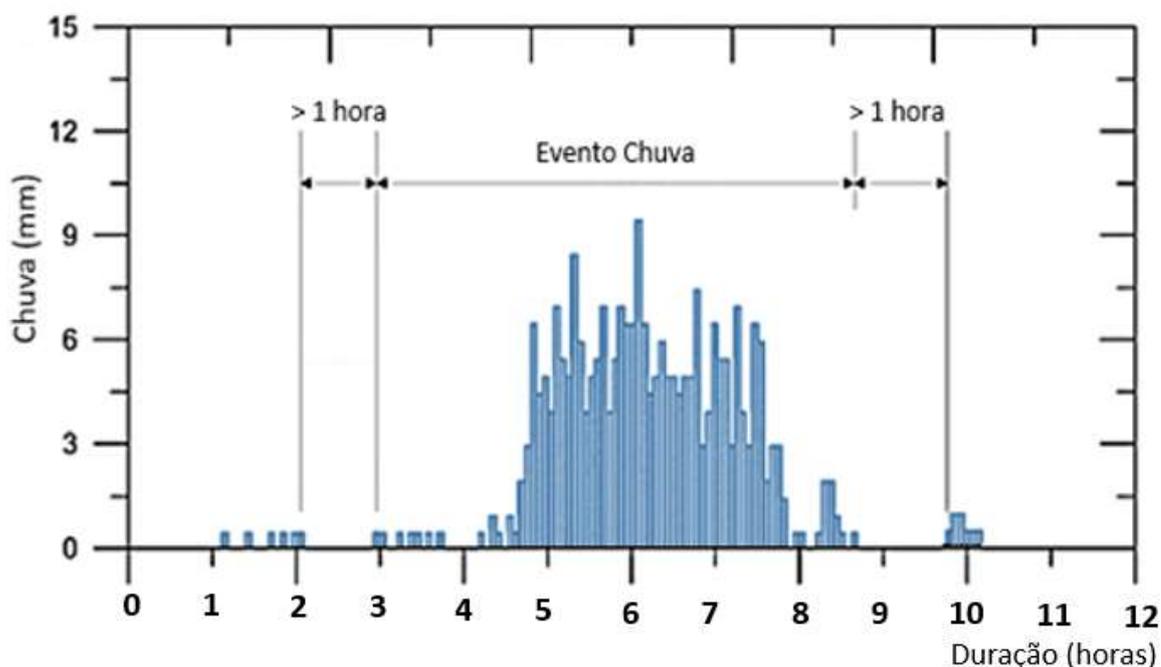
2.2.2.1 Eventos de Chuva aplicados em estudos de dispositivos de drenagem

Segundo Palynchuk e Guo (2007), a gestão adequada da água de chuva passa por estimativas realistas dos volumes de escoamento e descargas de pico. Projetistas, reguladores, comunidade, políticos e operadores devem possuir entendimento claro do desempenho e limites do sistema de drenagem. Com um melhor entendimento dos eventos pluviométricos, os custos podem ser menores e novas alternativas podem surgir.

Vários pesquisadores utilizaram técnicas estatísticas distintas no tratamento dos dados pluviométricos históricos para determinação do evento de chuva de projeto no estudo de dispositivos sustentáveis. Joshi *et al.* (2021) identificaram em seu estudo todos os eventos pluviométricos com base em critérios de duração, intensidade e volume total. Após a identificação dos eventos, os autores selecionaram 3 eventos para simulação, o de maior intensidade, o de maior duração e o de maior volume.

Ahn *et al.* (2014) utilizaram o método de máximas deslizantes ou Técnica de Van Montfort para selecionar eventos de chuva para estudo de inundações. O método para identificar eventos de chuva independentes possui 4 etapas indicadas: (1) separar temporariamente todos os eventos com base em um intervalo sem chuva de 1 h; (2) simular o escoamento máximo anual desses eventos; (3) calcular o tempo necessário a partir do final do evento de chuva até o final do escoamento superficial para todos os eventos candidatos; e (4) aumentar o intervalo sem chuva em mais 1h e repetir os passos 2 e 3. O evento selecionado será aquele que proporcionar o maior valor de escoamento superficial. A Figura 8 ilustra a lógica do método.

Figura 8 – Condições de separação de eventos de chuva pelo método de máximas deslizantes



Fonte: Adaptado de Ahn *et al.* (2014)

Khan, Chapa e Hack (2020) estudaram a implantação de dispositivos LID em área residencial da Costa Rica utilizando 8 eventos de chuva. Os eventos foram obtidos de 3 estações pluviométricas distintas, sendo o Evento 1 e 2 determinados para calibração do modelo, os

eventos 3 e 4 os de maiores intensidades, e os eventos 5 a 8 foram escolhidos aleatoriamente entre os dos percentis 50,75,90 e 95% dos registros históricos.

Ebrahimian *et al.* (2021) realizaram estudo de trincheiras de infiltração utilizando modelos contínuos e baseados em eventos. Para seleção dos eventos, o autor considerou um tempo entre eventos de 6 horas e altura pluviométrica total mínima de 2,5 mm. O trabalho não fornece maiores detalhes do método estatístico de escolha dos eventos históricos, porém foram selecionados 5 eventos para simulação. Randall *et al.* (2020) fizeram estudo comparativo entre o modelo SWMM e medições de campo de pavimentos permeáveis, onde os autores registraram as chuvas por 1 ano. O evento de chuva foi definido com tempo de intervalo de 12 horas, sendo que fim do evento foi considerado 6h após um registro de intensidade mínima de 1 mm/h. Só foram considerados eventos com mais de 8 mm totais.

Existe ainda a linha de pesquisa que utiliza eventos chuvas artificiais aplicadas em dispositivos já construídos. No âmbito da UFSCar, Ferreira *et al.* (2018) estudaram poços de infiltração através de chuva artificial com aparato experimental provido de caixa d'água com volume de 2 m³ e válvula para controle de vazões, onde o evento foi distribuído em cerca de 15 minutos. Não foi aplicado método estatístico para determinação da chuva simulada, porém os autores apresentaram o hidrograma do ensaio de acordo com o nível medido do reservatório do ensaio. Barbassa *et al.* (2014) também trabalharam com aparato experimental semelhante com reservatório de 5 m³, descarregados em cerca de 45 minutos em poço de infiltração. Justino (2019) utilizou o mesmo aparato experimental, com reservatórios de 2 m³ e 10 m³, porém o ensaio foi conduzido fechando a saída do reservatório quando o poço de infiltração do estudo atingia o nível máximo. Neste trabalho também foram utilizados eventos de chuvas reais para avaliação do comportamento do poço, onde foram acompanhados eventos pluviométricos entre 08 de março e 08 de outubro de 2017. A autora identificou 36 dias de chuva, e selecionou os 2 maiores eventos registrados no período de avaliação. Moruzzi *et al.* (2014) montaram esquema experimental com uso de aspersores para estudar telhados verdes, houve variação de intensidade devido às incertezas experimentais, porém a intensidade média da chuva simulada foi de 103,5 mm/h, sendo a chuva aplicada com duração de 30 minutos.

Marsalek e Watt (2013) observam que um problema na determinação das chuvas de projeto que surge é o que pode ser denominado de "síndrome do pior caso", em que um projetista seleciona mais de um chuva de projeto e escolhe a mais crítica sem considerar os objetivos e aplicações que cada método possui. Digiovanni (2018) comenta que o método dos Eventos de Chuva Característicos, apresentado por Andersen *et al.* (2017) foi desenvolvido com

o objetivo de conectar engenharia e urbanismo, de forma a permitir a urbanistas visualizarem como a água vai se apresentar nos dispositivos sustentáveis

2.3 Método dos Eventos de Chuva Característicos

Segundo Andersen *et al.* (2017) com base em observações do processo de projeto e entrevistas com diversos profissionais, foi constatado que ferramentas simples que refletem a distribuição dos eventos de chuva seriam relevantes e valiosas para projetistas, especialmente no que tange ao aspecto de amenidade dos dispositivos de drenagem. Os autores comentam que a metodologia utiliza métodos quantitativos e estatísticos para selecionar ECC para uma variedade de períodos de retorno, sendo uma metodologia flexível e que pode ser ajustada a quaisquer configurações climáticas.

A justificativa apresentada por Andersen *et al.* (2017) para desenvolvimento do método reside na constatação que para garantir os valores de utilidade, os engenheiros projetam os dispositivos para os piores cenários, usando eventos de chuva sintéticas representando o pior caso imaginável com base em propriedades estatísticas da chuva. Essa filosofia de blindagem contra falhas é normalmente utilizada em projetos de infraestrutura. Esses eventos de chuva sintéticos irão determinar o volume geral de detenção-retenção exigido de um dispositivo. Dentro deste requisito, a forma do dispositivo pode variar, e é aqui que as habilidades de projeto do arquiteto urbanista entram em jogo. Para imaginar como água aparecerá no dispositivo com mais frequência, é útil saber mais sobre as chuvas. Seria possível usar os métodos estatísticos clássicos e criar chuvas sintéticas, mas escolhendo alguns eventos históricos representativos de chuva, a produção pode ser muito mais tangível e o processo de projeto é executado sem maiores intercorrências.

Ainda segundo Andersen *et al.* (2017) para integrar os valores de amenidade e utilidade, foi usada a Abordagem dos Três Pontos (3PA). A abordagem identifica três domínios únicos de precipitação onde diferentes regras, partes interessadas e prioridades dominam. Tradicionalmente a gestão de águas pluviais abordou apenas o valor de utilidade, cumprindo critérios de dimensionamento e regulamentos ambientais. Com o aumento da urbanização, juntamente com o aumento esperado na frequência de tempestades maiores devido às mudanças climáticas, resultou em um aumento do interesse na redução da vulnerabilidade das cidades às enchentes, exigindo soluções visando eventos extremos. Ao mesmo tempo, as demandas crescentes por sustentabilidade e habitabilidade, ou seja, os valores de amenidade podem ser

interpretados como um aumento do interesse em pequenas chuvas com maior frequência (chuvas do dia-a-dia).

O método dos Eventos de Chuva Característicos pode ser dividido em 3 fases principais: definição dos eventos históricos, determinação de classes de eventos, e determinação do evento de chuva característico de cada classe.

Para determinação dos eventos históricos, é importante definir o período entre eventos. Há diferentes justificativas e objetivos na definição deste tempo. No trabalho de Andersen *et al.* (2017) foi adotado o valor de 24 h e comparado com períodos de 12 h e 48 h apenas para avaliar o impacto dessa escolha. Outros autores adotaram valores diferentes, conforme ilustrado na Tabela 4, elaborada por Dunkerley (2008). Existe ainda outra forma de determinar um evento, que é considerando o período entre eventos um tempo seco igual ou maior que o período chuvoso, conforme utilizado por Sørup *et al.* (2016) e Madsen *et al.* (2018). É importante ainda a definição de valores de chuva mínima, que pode ser tanto um valor total para o evento ou um valor de intensidade, Andersen *et al.* (2017) utilizaram o valor de chuva mínima de 1 mm, enquanto Gaál *et al.* (2014) utilizaram intensidades de 0,1mm/10minutos. Um resumo de valores de chuva mínima observada na literatura também é exibido na Tabela 4.

Para seleção das classes de eventos de interesse, Andersen *et al.* (2017) se fundamentaram na metodologia 3PA para escolha de tempos de retorno rotineiros, de projeto e extremos de acordo com a legislação norueguesa e necessidades do seu estudo.

Quanto à duração da chuva, Andersen *et al.* (2017) criaram 3 subcategorias, sendo elas: abaixo de 6 h; entre 6 h e 24 h; e acima de 24 h. Sørup *et al.* (2016) por sua vez só avaliaram eventos com 3, 12 e 24h.

Por fim, é determinado o evento de chuva característico através de tratamento estatístico. Andersen *et al.* (2017) reordenaram cada evento da maior intensidade por minuto para a menor e então calcularam um evento médio fictício. O ECC é determinado selecionando o evento histórico que mais se aproximou do evento médio fictício observado pelo método dos mínimos quadrados.

Tabela 4 – Características de eventos utilizadas por diversos autores

Intervalo entre eventos	Chuva mínima	Autores
3 min		Vilar and Burgueno (1995)
15 min		Cattan <i>et al.</i> (2006)
15 min	0,2 mm	Vernimmen <i>et al.</i> (2007)
20 min		Bidin and Chappell (2006)
30 min	0,5 mm	Balme <i>et al.</i> (2006)
30 min		Cosgrove and Garstang (1995)
1 h	0,1 mm	Cutrim <i>et al.</i> (2000)
1 h	5 mm	Ziegler <i>et al.</i> (2006)
2 h	5 mm	Fornis <i>et al.</i> (2005)
2 h		Klassen <i>et al.</i> (1998)
2 h	0,5 mm/30 min	Germer <i>et al.</i> (2006)
3 h		Cuartas <i>et al.</i> (2007)
4 h		Xiao <i>et al.</i> (2000a)
5 h		Deguchi <i>et al.</i> (2006)
6 h		Loukas and Quick (1996)
6 h	13 mm	Agnese <i>et al.</i> (2006)
6 h		Murakami (2006)
6 h		Manfroi <i>et al.</i> (2004)
6 h	0,5 mm	Link <i>et al.</i> (2004)
6 h		Tob'on Marin <i>et al.</i> (2000)
8 h		Asdak <i>et al.</i> (1998)
10 h		Toba and Ohta (2005)
12 h noturno ou 8 h diurno		Silva and Okumura (1996)
12 h		Bracken <i>et al.</i> (2008)
24 h		Levia and Herwitz (2002)
24 h	0,254 mm	Levia (2004)

Fonte: Dunkerley (2008)

Sørup e Lerer (2021) estudaram dispositivos sustentáveis em cascata utilizando o método ECC de Andersen *et al.* (2017). Para as características do estudo, os autores identificaram que a instalação de mais dispositivos a montante do que a jusante estava acarretando em pior desempenho global dos dispositivos. A disposição de dispositivos em cascata também é discutida por Baptista, Nascimento e Barraud (2011), onde os autores também orientam a analisar globalmente para agir localmente, já que qualquer intervenção no ciclo da água urbano pode acarretar em um impacto mais ou menos significativo.

2.4 Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis

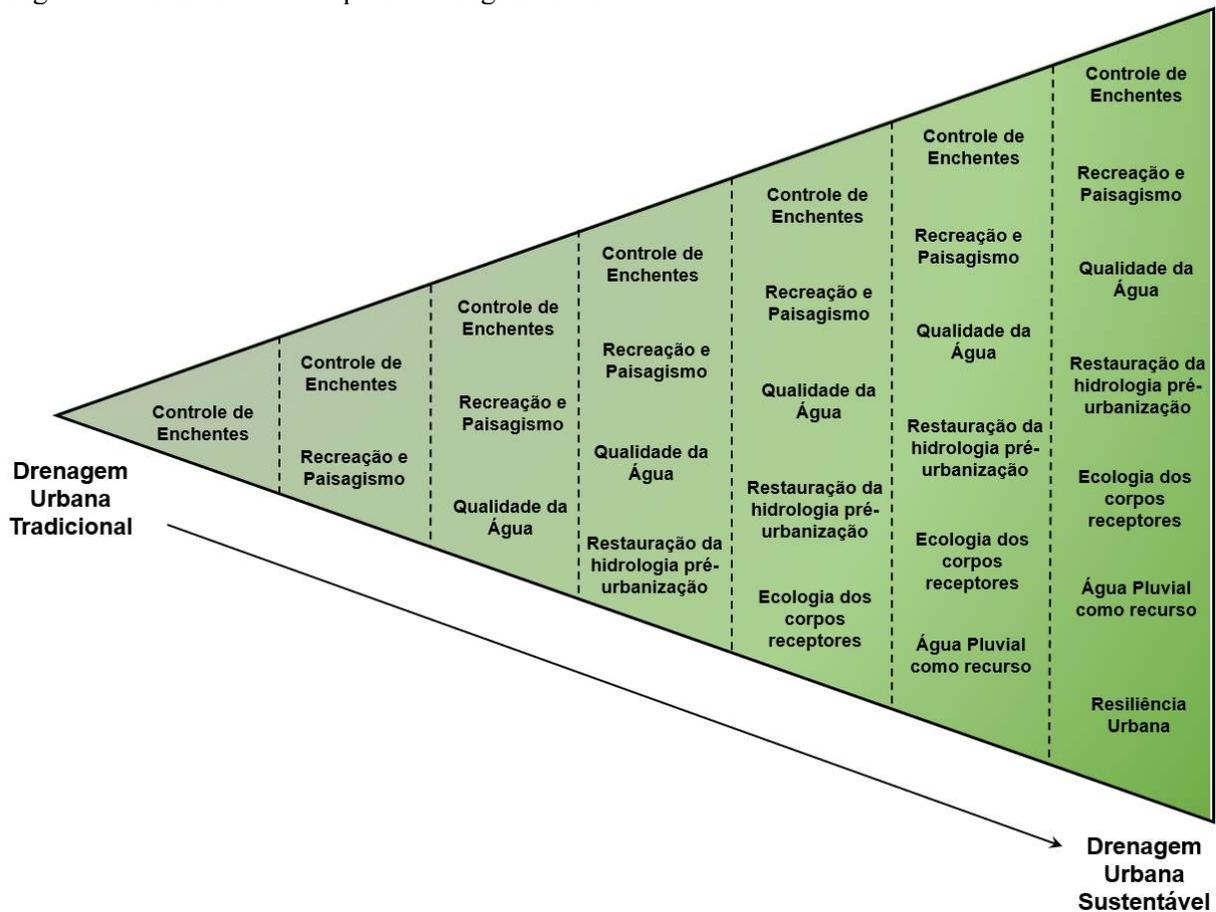
2.4.1 Evolução dos Sistemas de Drenagem Urbana

Neste trabalho adota-se o conceito de drenagem urbana mais sustentável uma vez que a sustentabilidade não é uma condição final fixa. Um sistema mais sustentável é assim declarado por melhor atender as diversas dimensões da sustentabilidade, seja em tempos diferentes ou em relação a outros sistemas. De modo geral os dispositivos de drenagem urbana mais sustentáveis tentam aproximar o sistema de drenagem urbano da condição natural pré-urbanização.

A drenagem urbana passou por significativas mudanças recentemente, saindo do modelo tradicional focado na proteção à saúde humana e redução de enchentes para uma visão ampla que considera os aspectos sanitários, ambientais, sociais, paisagísticos e econômicos.

Com a melhoria do entendimento sobre a ecologia dos corpos receptores e o ciclo hidrológico urbano, além da oportunidade de agregar múltiplos benefícios a gestão das águas pluviais urbanas, profissionais como arquitetos, biólogos, urbanistas e sociólogos passaram a fazer parte das discussões, projetos e gestão das águas da chuva. A Figura 9 ilustra o aumento da integração e sofisticação da gestão da água pluvial urbana partindo do conceito tradicional até o conceito mais atual de drenagem urbana sustentável (FLETCHER *et al.*, 2014).

Figura 9 – Aumento do escopo da drenagem urbana



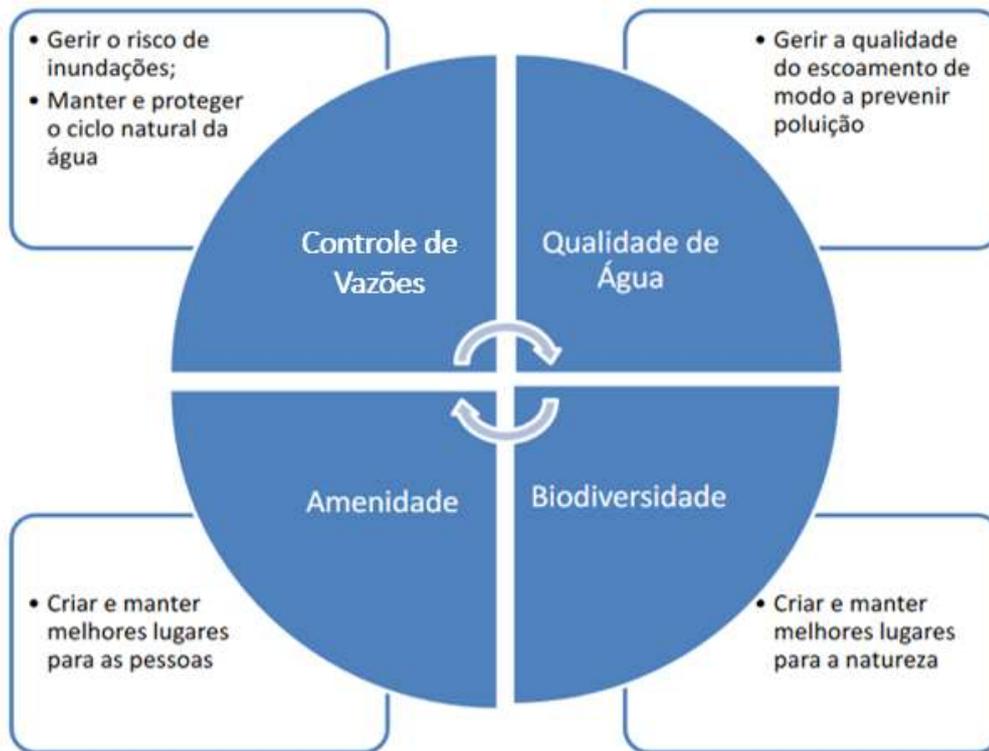
Fonte: Adaptado de Fletcher *et al.* (2014)

É recente a associação dos conceitos de sustentabilidade e urbanização. A gestão dos recursos hídricos, na década de 80, era definida como todas as atividades que buscavam atender as necessidades de água do presente e do futuro com quantidade suficiente e qualidade apropriada. Porém esta definição não deixa claro que o meio ambiente deve ser preservado dos abusos antrópicos e de desastres naturais, uma vez que o objetivo principal é suprir a demanda (BENEDINI e TSAKIRIS, 2013).

Nas últimas décadas este conceito tem mudado, e a água da chuva é entendida como um recurso valioso. A gestão sustentável da água pluvial integra agora objetivos hidrológicos, ecológicos, sociais e econômicos (GOULDEN *et al.*, 2018). Segundo Pompêo (2000), a visão da drenagem urbana sob a perspectiva da sustentabilidade introduziu uma nova forma de gerenciamento das águas urbanas, baseada na complexidade das relações do homem assentado no ambiente urbano artificial e os ecossistemas naturais.

De acordo com Ballard *et al.* (2015) os sistemas de drenagem urbana mais sustentáveis são estruturados sobre 4 pilares, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Pilares da Drenagem Urbana Sustentável



Fonte: Adaptado de Ballard *et al.* (2015)

Peroni e Teixeira (2016) observam que a sustentabilidade do processo de drenagem de áreas urbanizadas pode ser conquistada por meio dos dispositivos de drenagem urbana mais sustentáveis. Estes dispositivos compreendem a micro e macrodrenagem, assim como a tradicional, porém de forma integrada ao meio urbano, com o objetivo de complementar as estruturas com soluções compensatórias que permitam a valorização da água nas cidades com a criação de áreas verdes e espaços de convivência, garantindo maior segurança quanto às inundações, além de locais de recreação e lazer.

As técnicas compensatórias de drenagem urbana, têm como objetivo básico a retenção e infiltração das águas pluviais, melhorando a distribuição temporal das vazões escoadas em relação ao sistema clássico e, por consequência, provocando a diminuição ou incoerência de inundações. Alguns destes dispositivos podem ser integrados ao meio urbano, permitindo diversos usos pela população (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD,2011).

Baptista, Nascimento e Barraud (2011) observam que as técnicas compensatórias podem ser divididas em dois grupos: medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais são subdivididas pelo princípio de funcionamento entre técnicas de infiltração e técnicas de retenção, que podem ou não combinar os dois princípios de funcionamento em um único

dispositivo. Quanto as medidas não-estruturais, os autores definem que são ações que buscam alterar o comportamento da população, através de legislação própria, racionalização do uso e ocupação do solo, sensibilização da população e educação ambiental.

Baptista, Nascimento e Barraud (2011) classificam ainda as técnicas compensatórias em três tipos de acordo com sua posição de implantação:

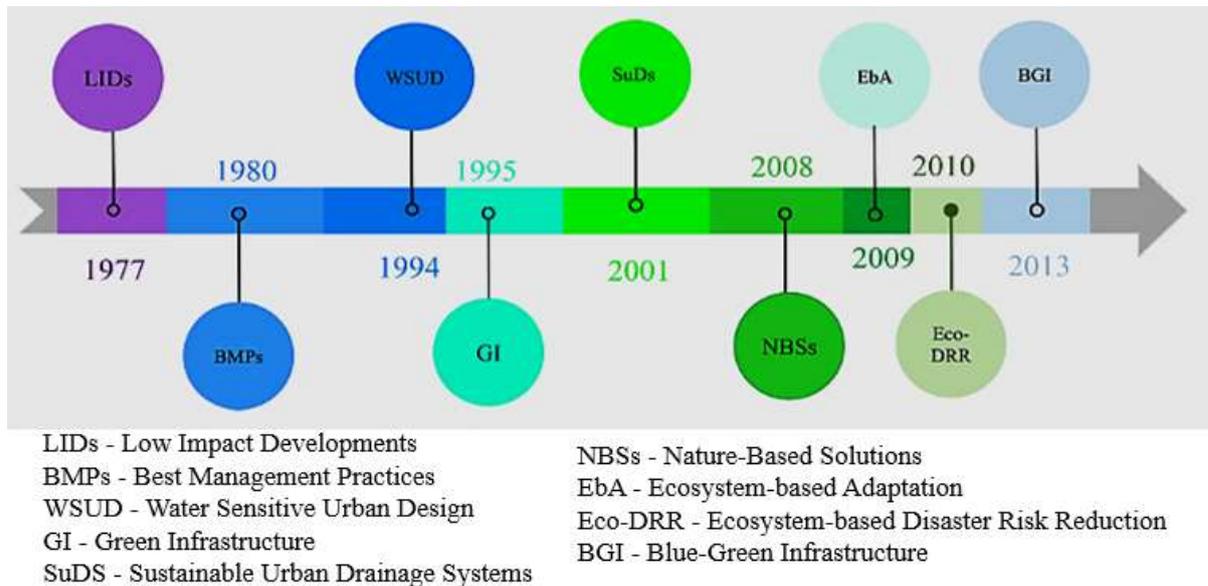
- Técnicas de controle na fonte, como os poços de infiltração, valas ou valetas de armazenamento ou infiltração, os telhados armazenadores, e os reservatórios individuais executados próximos a superfícies de drenagem pequenas;
- Técnicas lineares, como os pavimentos porosos e as trincheiras, implantadas em pátios, estacionamentos e vias urbanas;
- Técnicas de controle centralizado, como as bacias de detenção e retenção, ou infiltração, associadas a áreas de drenagem de grande porte.

Tucci (2003) realizou classificação semelhante das técnicas de controle de escoamento, de acordo com sua ação na bacia hidrográfica, sendo:

- Técnicas de controle na fonte, com atuação sobre o lote, praça e passeios;
- Técnicas de controle na microdrenagem, com atuação sobre o hidrograma do escoamento superficial resultante de um ou mais loteamentos;
- Técnicas de controle na macrodrenagem, que é aquela que age sobre os principais riachos urbanos.

Sobre a terminologia empregada para designar sistemas de drenagem sustentáveis, Ruangpan *et al.* (2020) traçaram uma linha do tempo dos termos mais utilizados, conforme ilustra a Figura 11, onde surgem *Low Impact Developments* (LIDs), *Best Management Practices* (BMPs), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), *Green Infrastructure* (GI), *Sustainable Urban Drainage Systems* (SuDS), *Nature-Based Solutions* (NBSs), *Ecosystem-based Adaptation* (EbA), *Ecosystem-based Disaster Risk Reduction* (Eco-DRR), *Blue-Green Infrastructure* (BGI).

Figura 11 – Linha do tempo dos termos relacionados a drenagem sustentável



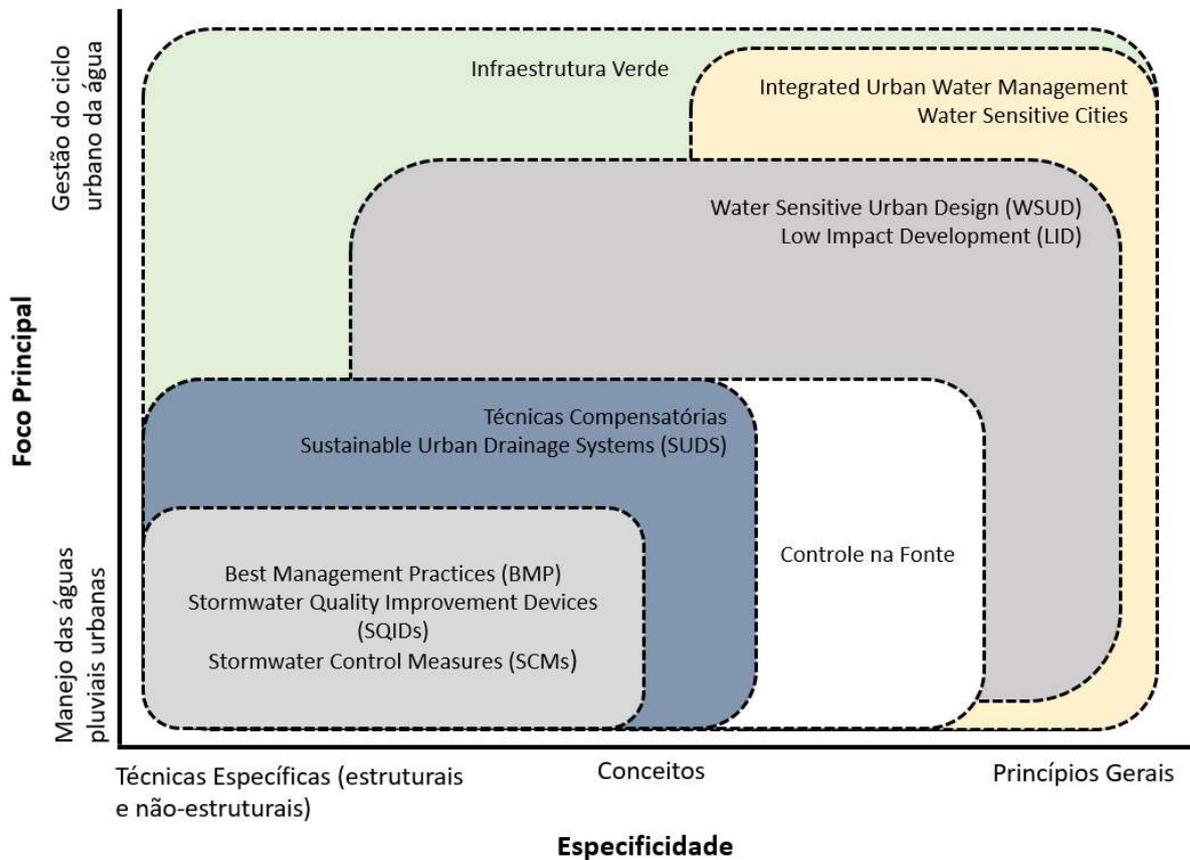
Fonte: Ruangpan *et al.* (2020)

A evolução da drenagem clássica para a drenagem mais sustentável fez surgir, portanto, novos termos para descrever as novas abordagens, o que acabou gerando várias confusões de terminologia, com alguns autores utilizando termos diferentes para retratar a mesma coisa. A Figura 12 apresenta uma classificação dos termos em drenagem urbana, observando seu foco original (FLETCHER *et al.*, 2014).

A gestão da água urbana garante a maximização das oportunidades criando valor para a comunidade. Uma vez que a infraestrutura tradicional ainda irá se manter em uso por anos, os dispositivos de drenagem urbana sustentável não devem ser projetados apenas em novas construções, mas também na reabilitação das existentes. A água no meio urbano deverá ser parte das cidades inteligentes do futuro, onde os serviços, sistemas e infraestruturas urbanas possuem funções múltiplas. Entretanto, a experiência indica que é necessário regulações específicas, ações e monitoramento apropriados por todos os envolvidos (ASHLEY *et al.*, 2015).

Segundo Lerer (2019), projetar estruturas no nível do solo é um desafio para engenheiros que estão habituados a trabalhar com infraestruturas enterradas. Além disso, o projeto de medidas de controle superficiais é interdisciplinar, o que pode ser desafiador para os engenheiros mais tradicionais.

Figura 12 - Classificação dos termos em drenagem urbana.



Fonte: Adaptado de Fletcher *et al.* (2014)

2.4.2 Considerações acerca dos Dispositivos de Drenagem Urbana Sustentáveis

Os dispositivos de drenagem urbana possuem um volume para detenção e/ou retenção da água, para retardar a descarga no corpo receptor ou ainda permitir a infiltração e evaporação dela. A condutividade hidráulica do solo e as características de projeto do dispositivo são os principais fatores que determinam seu tempo de esvaziamento (ANDERSEN *et al.*, 2017).

Segundo Lucas *et al.* (2015) as características do solo além da cota do lençol freático são determinantes para as taxas de infiltração dos dispositivos de drenagem. A diminuição das taxas de infiltração pode encurtar a vida útil das estruturas, por isso é importante o controle de material fino, que pode vir a colmatar o solo, reduzindo a infiltração.

Peroni e Teixeira (2019) avaliaram a percepção da população a respeito das bacias de detenção em uma cidade de médio porte no estado de São Paulo. A maioria dos entrevistados não sabia claramente a função dos dispositivos, além de associar os mesmos a ocorrência de insetos, animais domésticos e vetores de doenças, vegetação descontrolada, disposição ilegal de resíduos sólidos e falta de segurança. Por serem localizadas na periferia, depósitos com

função meramente hidrológica são uma perda de oportunidade para promover a qualidade de vida da população local através de dispositivos multifuncionais.

Lucas *et al.* (2015) observaram também alguns problemas construtivos de sistemas de drenagem urbana, como a falta de cadastro de sistemas intervenientes, dificuldades na locação e nivelamento, compactação do solo pelo maquinário utilizado nas escavações e dificuldades de conter o carreamento de material fino de áreas adjacentes durante a execução da estrutura.

Petit-Boix *et al.* (2017) avaliaram dispositivos quanto ao seu impacto e retorno ambiental sob a perspectiva do ciclo de vida. A relação entre o investimento ambiental no dispositivo e os possíveis danos evitados pela construção dele, em termos de emissão de CO₂, é superavitária, com tempo de retorno previsto de 10 anos, que pode ser considerado baixo perante a vida útil do dispositivo.

Backhaus e Fryd (2013) observam que a maioria dos projetos de drenagem urbana dão ênfase nos aspectos de qualidade e quantidade de água, e que a questão estética dos dispositivos é negligenciada. As características de um terreno natural são percebidas pelos olhos do observador, e mudanças bruscas de inclinação do terreno causam a desarmonia entre o dispositivo e o terreno natural. Os dispositivos de drenagem devem ser o mais discreto e imperceptível possível.

Oliveira e Gonçalves (2018) comentam que apesar do objetivo principal dos dispositivos de drenagem serem o controle das águas pluviais, é essencial a integração destes dispositivos com o meio urbano. O maior desafio para implantação dos dispositivos de drenagem sustentáveis são a abordagem multidisciplinar exigida e o envolvimento popular na aprovação e utilização dessas estruturas urbanas. Backhaus, Dam e Jensen (2012) orientam que os dispositivos de drenagem são na maior parte do tempo verdes, e não azuis, ou seja, estão a maior parte do tempo secos. Deve ser rotina nos projetos dos dispositivos essa consideração, a fim de evitar visões agradáveis e cênicas de dispositivos cheios de água quando apresentados e aprovados pela comunidade, mas que na realidade após implantados serão desagradáveis visualmente.

Lerer (2019) observa que os conhecimentos sobre drenagem urbana devem ser incorporados desde o início dos trabalhos de urbanização, uma vez que as decisões do urbanista nos primeiros estágios do projeto irão impactar nas opções da gestão das águas pluviais do local. Quando o projeto de águas pluviais é feito após o projeto urbanístico as soluções de engenharia são mais restritas e caras.

É questionável se os projetistas de dispositivos de drenagem possuem conhecimentos específicos da quantidade de água de chuva local. Observa-se comumente dispositivos

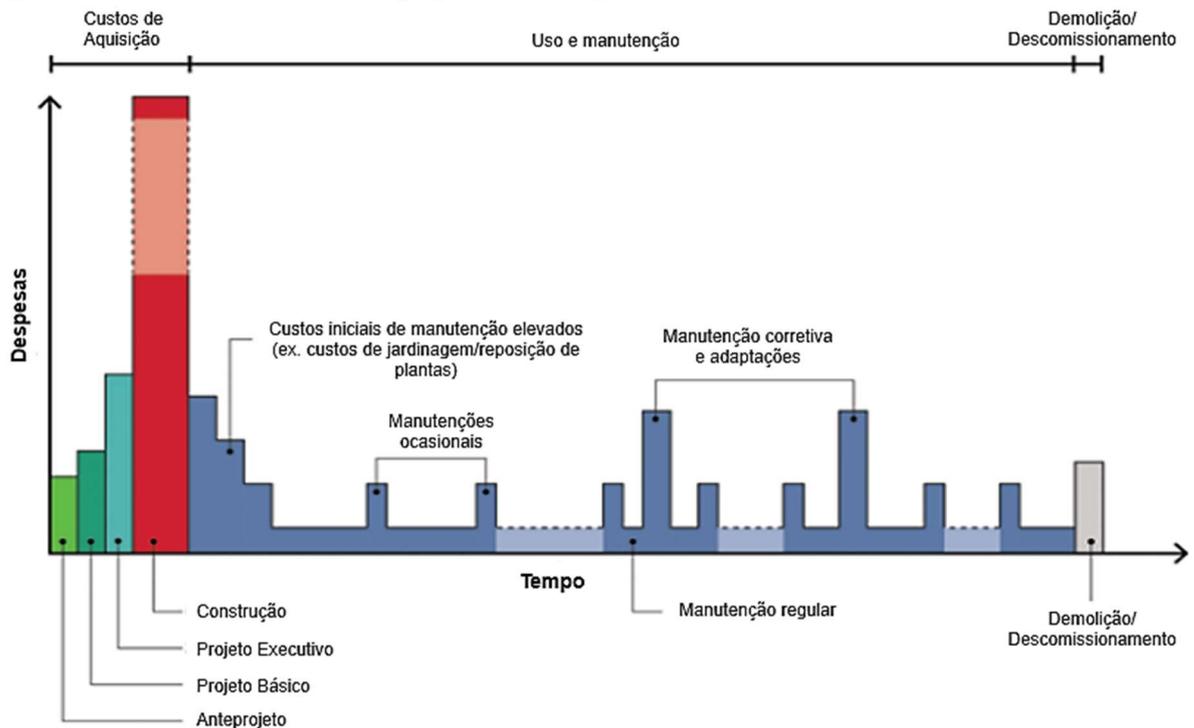
superdimensionados, que criam verdadeiras crateras no meio urbano. Há uma razão histórica para essa questão: os sistemas de drenagem tradicionais possuem uma margem de segurança elevada. Existem algumas formas de superar o dilema de dispositivos de drenagem que sejam eficientes e ao mesmo tempo esteticamente adequados ao ambiente, sendo: 1) projetar espaços abertos para retenção que trabalham melhor secos, mas que são resilientes para enchentes periódicas; 2) projetar elementos de drenagem menores que possam ser preenchidos com água frequentemente, conectados a sistemas que suportem um pico de vazão (BACKHAUS, DAM e JENSEN, 2012).

Backhaus e Fryd (2013) observam que as estruturas de drenagem urbana extrapolam as competências dos engenheiros de drenagem, sendo um projeto interdisciplinar, o que por si só é um grande desafio. O superdimensionamento das estruturas de drenagem, que criam dispositivos preparados para grandes quantidades de água, mas que ficam a maior parte do tempo secos, refletem a falta de entendimento da dinâmica da água da chuva. São desafios para a implantação dos dispositivos de drenagem urbana as questões de qualidade da água, custos de construção e manutenção, integração com o meio urbano e suporte a biodiversidade.

Ballard *et al.* (2015) apresentam um perfil de gastos de todo ciclo de vida de um projeto de drenagem urbana na Figura 13. Esse perfil esquemático mostra os custos potenciais de um projeto, abrangendo desde os estudos de viabilidade, investigações do local, projeto, construção, operação, manutenção, adaptações e descomissionamento.

Andersen *et al.* (2017) observam que no dimensionamento de dispositivos de drenagem, os engenheiros utilizam uma chuva de projeto que representa o pior caso possível baseado em estatísticas pluviométricas. A chuva de projeto é a variável determinante nos volumes de detenção/retenção. Quanto à estética do dispositivo, o urbanista dá sua visão de acordo com o terreno natural, no entanto, para entender como a água vai ocupar o dispositivo com maior frequência é importante conhecer quais chuvas são frequentes. Utilizando chuvas que são comuns no dia-a-dia local, permite que o processo criativo do urbanista seja mais fácil.

Figura 13 – Perfil de custos de um projeto de drenagem urbana



Fonte: Adaptado de Ballard *et al.* (2015)

2.4.3 Dimensionamento de Dispositivos de Drenagem Urbana Sustentáveis

Estruturas hidráulicas são dimensionadas a partir de chuvas de projeto, que são uma representação simplificada do histórico de precipitações, com um determinado risco de ocorrência. Guo (2006) observa que a maioria dos sistemas de drenagem urbana tradicional no mundo são projetados utilizando o método racional para estimar a vazão de pico de uma chuva com um determinado período de retorno. O método racional pode ser expresso pela Equação 2.

$$Q_p = C \times I \times A \quad (2)$$

onde Q_p é a vazão de pico utilizada no projeto, C é o coeficiente de escoamento superficial que depende as condições do solo e de urbanização, I é a intensidade da chuva para um determinado período de retorno e A é a área da bacia.

Baptista, Nascimento e Barraud (2011) observam que dispositivos de drenagem sustentável são principalmente dimensionados a partir de três métodos, sendo: método da curva envelope, método dos volumes e método de Puls, onde os dois primeiros são métodos simplificados e o último é fundamentado em um modelo conceitual.

O método da curva envelope é bastante utilizado para dimensionamento de dispositivos que possuem algum volume de armazenamento. Neste método, a curva de massa afluente do dispositivo é comparada a curva de massa efluente, sendo a maior diferença entre as duas curvas o volume de dimensionamento do dispositivo. Para simplificação, adota-se a curva efluente constante, enquanto a curva afluente é dada pela relação IDF das chuvas (SILVEIRA E GOLDENFUM, 2007).

Já o método dos volumes parte do mesmo princípio do método da curva envelope, porém se baseia nas alturas pluviais acumuladas anualmente, e não em eventos selecionados sobre o período total da amostra de dados. Com o método dos volumes não se perde a sucessão de eventos pluviométricos, respeitando a cronologia dos eventos, o que implica que este método pode ser capaz de dimensionar dispositivos aptos a atender dois ou mais eventos que ocorrem em sequência, gerando volumes à armazenar significativamente maiores (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD,2011).

Entre os modelos conceituais, o Método de Puls (Cudworth Junior, 1989) permite o cálculo do volume de armazenamento de um dispositivo em função da vazão de entrada e de saída. Essa modelo parte da equação da continuidade descrita na equação 3, e pela curva cota-descarga.

$$Q - O = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3)$$

sendo Q a vazão de entrada, O a vazão de saída, V o volume armazenado e, t é o tempo.

Segundo Xiong e Melching (2005) a equação 3 é a base para diversos modelos de armazenamento-extravasão. Dois tipos comuns desses modelos são os lineares e os não lineares. Os modelos lineares consideram que a vazão de saída é linearmente proporcional ao volume armazenado e a vazão de entrada não influencia a vazão de saída, já nos modelos não lineares o volume armazenado é uma função não linear da vazão de entrada e de saída.

Como regra prática, em vários locais no mundo, adota-se que um dispositivo de drenagem urbana deve ser esvaziado em 24h, estando apto após esse período a receber o próximo evento de chuva (ANDERSEN *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2016; BEECHAM E CHOWDHURY, 2012). O prazo de 1 dia para esvaziamento do dispositivo garante ainda que em áreas tropicais e subtropicais que alguns organismos vetores de doenças, como mosquitos e pernilongos, não se desenvolvam (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD,2011).

Quanto a hidrologia, Backhaus, Dam e Jensen (2012) observam que os engenheiros urbanos possuem necessidades específicas de informações sobre as estatísticas das chuvas. Períodos de retorno menores e esquemas de dimensionamento fáceis e compreensíveis devem ser incorporados nos atuais guias de drenagem urbana sustentável.

As estatísticas pluviométricas e os cálculos complicados tornam o projeto de dispositivos de drenagem difíceis. Há um déficit entre as tradições hidrológicas e a percepção dos projetistas que trabalham com água. Dependendo das características de projeto, os dispositivos de drenagem podem requerer manutenção intensiva. Os custos de manutenção devem ser previstos na fase de projeto e soluções de longo prazo exigem integração social. Manuais de drenagem não podem ser generalizados, já que cada localidade possui suas especificidades. A história do local é de grande importância para a criação de projetos que agradem a população (BACKHAUS E FRYD, 2013).

Do ponto de vista legal, as recomendações de dimensionamento de dispositivos de drenagem são diferentes entre cada jurisdição. O Código de Obras e Edificações do município de São Carlos, descrita na Lei 15958/2011 (São Carlos (SP), 2011) por exemplo, determina que seja implantado, no lote, poço de infiltração cujo volume seja de no mínimo 5 L/m² impermeabilizado. Por sua vez, na cidade de São José do Rio Preto a Lei nº 10290/2008 (São José do Rio Preto (SP), 2008) estabelece a obrigatoriedade de instalação de dispositivo de retenção/detenção em edificações acima de 100 m² com previsão de vazão máxima de 13 L/h.m². Já a Lei estadual SP-12.526/2007 (São Paulo, 2007) obriga a implantação de sistema para captação e retenção de águas pluviais em lotes com área impermeabilizada acima de 500 m², permitindo três destinos para a água armazenada: infiltração, despejo na rede pública uma hora após a chuva ou uso não potável da água. A legislação paulista traz como fórmula de cálculo do volume do dispositivo a equação 4.

$$V_d = 0,15 \times A_i \times IP \times t \quad (4)$$

onde V_d é o volume do dispositivo (m³), A_i a área impermeabilizada, IP o índice pluviométrico determinado em 60 mm/h e t o tempo de duração da chuva, estabelecido em 1 h.

Na prática a equação 4 se torna $V = 0,009 \times A_i$ ou 9 litros por m² impermeabilizado. He e Davis (2011) observaram divergências similares nos EUA entre os estados de Maryland e Delaware para dispositivos de bioretenção.

2.5 Modelagem Computacional Aplicada a Águas Pluviais

2.5.1 Considerações Gerais

Um modelo é um conjunto de equações que pode ser utilizado para descrever os processos naturais ou humanos em uma bacia, como por exemplo o escoamento superficial. Como utilizam a relação de causa e efeito, os modelos podem ser usados para prever e estimar as futuras situações que podem ocorrer sobre variadas condições. Os modelos podem ser altamente sofisticados, considerando processos específicos como a infiltração, erosão, transporte e evapotranspiração, mas também podem ser genéricos, fazendo apenas relações empíricas baseadas na precipitação. Alguns modelos são pacotes comerciais, enquanto modelos simples são calculados utilizando planilhas e calculadoras. Quanto mais detalhadas são as equações utilizadas para construir o modelo, mais parâmetros de entrada são necessários (EPA, 2008).

Segundo Benedini e Tsakiris (2013), a realidade pode ser representada por um modelo, que permite que decisões sejam tomadas sem interferir na mesma. A aplicação de soluções no campo físico demanda obras de engenharia complexas, destrutivas e de alto custo, assim, um modelo que representa corretamente a realidade e seus fenômenos pode permitir que soluções sejam testadas em um curto prazo a um baixo custo.

Ainda segundo Benedini e Tsakiris (2013), existem 3 tipos de modelos utilizados para soluções de problemas relacionados com a água, sendo eles: Hidráulicos, Analógicos e Matemáticos. Os modelos hidráulicos são uma reprodução em escala da realidade, de forma que os fenômenos envolvidos podem ser estudados em laboratório de acordo com as leis de similaridade. Os analógicos são baseados na correlação de expressões matemáticas de fenômenos de natureza diferente, como no caso típico das águas subterrâneas, em que o fluxo da água que é expressada pela Lei de Darcy, que é similar a Lei de Ohm, utilizada para interpretar a corrente elétrica em um condutor. Com as devidas considerações, um aquífero pode ser estudado através de uma rede elétrica com resistências e capacidades apropriadas. Por último, os modelos matemáticos interpretam a realidade através de equações matemáticas. Os autores observam que os modelos hidráulicos e analógicos estão sendo gradativamente substituídos pelos matemáticos, que são mais efetivos.

Segundo Niazkar e Afzali (2016), a solução da maioria dos problemas de engenharia pode ser tratada resolvendo equações específicas que governam o processo. Essas equações podem ser comumente resolvidas usando abordagens analíticas, experimentais, numéricas ou

quaisquer outras. No entanto a metodologia numérica tornou-se mais popular em comparação com outras técnicas após a popularização dos microcomputadores nas últimas décadas. A fim de utilizar programas computacionais na solução problemas de engenharia, vários softwares de código aberto e comerciais foram propostos para trabalhar com diversos tipos de problemas. O Visual Basic for Applications (VBA), pode ser utilizado para soluções de engenharia, já que é reconhecidamente uma linguagem de programação ideal para redução do tempo de programação, compatível com recursos limitados, e de fácil controle de qualidade.

A maioria dos modelos são públicos, desenvolvidos em universidades ou agências governamentais, no entanto, alguns modelos são privados e comercializados. Não se recomenda o uso de modelos onde não é possível conferir o código, além da limitação da distribuição e revisão, pode reduzir sua aceitação (EPA, 2008). Lerer (2019) alerta que modelos podem se tornar “caixas-pretas”, onde o usuário não consegue acompanhar os cálculos internos da ferramenta, nem os alterar caso deseje.

De acordo com Lerer (2019) nem sempre modelos complexos são melhores que modelos simples. É necessário entender as necessidades e limitações do usuário. Apesar disso, cada vez mais são produzidas ferramentas de nível avançado, que são complexas demais para o usuário comum. Segundo a EPA (2008) um dos critérios para seleção de um modelo é a transparência dos resultados para a comunidade. Até modelos complexos podem ser efetivamente descritos e revisados. No entanto, abordagens simplificadas, quando suficientes para atender as necessidades, são mais fáceis de entender e de serem executadas.

Sana (2013) observa que muitas situações práticas de engenharia requerem softwares técnicos desenvolvidos especificamente para aquele fim, que em sua maioria são produtos comerciais de alto custo. No entanto, em muitos casos, programas simples podem ser utilizados de forma eficaz para projeto e análise. Esses programas são fáceis de usar e atualizar de acordo com as necessidades de campo, além de permitir a compreensão dos princípios fundamentais subjacentes à solução do problema prático.

Para simulação do escoamento superficial, é possível escolher entre 3 níveis de detalhamento: genérico, intermediário ou detalhado. Os genéricos fazem relações simples entre precipitação e escoamentos, com apenas um fator representando a evaporação e o consumo das plantas, não sendo feitas considerações a respeito da inclinação e das características do solo, inclusive umidade do mesmo. Em nível intermediário, são feitas relações considerando o tipo de solo, umidade do solo, vegetação e inclinação, porém não são considerados variações na intensidade da chuva e é utilizado dados diários de chuva. Em nível detalhado, é possível descrever a infiltração e a evapotranspiração, considerando o tipo e umidade do solo, vegetação

e inclinação, além de variações na intensidade da chuva e dados horários ou até de intervalos menores dos índices pluviométricos. Como exemplo, com um modelo para avaliar técnicas sustentáveis em nível genérico é possível determinar apenas a porcentagem de remoção, enquanto em nível intermediário seria possível calcular o volume armazenado estimado, e em nível detalhado seria calculado a hidrologia do sistema, a deposição, reações de primeira ordem e transformações das substâncias (EPA, 2008).

Le *et al.* (2017) observam que o entendimento de como as características de um evento de chuva podem influenciar os parâmetros de um modelo ainda é limitado. Esse entendimento é particularmente é mais complexo nos trópicos, onde a frequência e intensidade das chuvas causam uma resposta mais rápida e volumes maiores.

Segundo Alikahni *et al.* (2019), para a avaliação do comportamento de um dispositivo de drenagem urbana com eventuais possibilidades de melhoria do projeto, é importante modelar os processos hidráulicos e hidrológicos envolvidos. Os dispositivos sustentáveis são muito sensíveis a variações na intensidade, duração e frequência das chuvas, assim como quanto as suas dimensões e propriedades do solo.

A modelagem de dispositivos de drenagem sustentável antes da sua instalação ou como uma verificação do projeto *as built*, pode melhorar o desempenho geral por meio da análise de diversos cenários, permitindo a identificação de consequências de projeto não previstas, ou como uma ferramenta para estudar parâmetros de balanço hídrico, que são difíceis de medir em diferentes condições meteorológicas ou climáticas (ALIKHANI *et al.*, 2019).

Veneziano e Villani (1999) afirmam que modelos podem ser construídos baseados em eventos ou em modelos contínuos. A primeira variante envolve a simulação de processos de chuva-escoamento para eventos de chuva única; o último envolve simulação de processos com escalas de tempo mais longas, que envolvem a análise de sequências de escoamento de precipitação ao longo de vários anos. Um modelo de evento é, portanto, mais simples do que um modelo contínuo, uma vez que processos complexos como a umidade do solo, fluxo subsuperficial e evapotranspiração não precisam ser incluídos. O modelo contínuo, por causa de sua escala de tempo mais longa, precisa levar em consideração todos os processos envolvidos.

A abordagem de modelagem contínua (CMA) é entendida como a simulação hidrológica contínua conduzida por longas séries de tempo meteorológicas que podem ser produzidas por um gerador de clima (LAMB *et al.*, 2016). Existem diferentes abordagens para estimar chuvas de projeto em estudos de inundações. Rogger *et al.* (2012), comentam que eles podem ser divididos em métodos estatísticos, métodos determinísticos e uma combinação dos dois.

Krvavica e Rubinić (2020) observa que os métodos baseados em eventos são mais amplamente adotados e aplicados na engenharia por causa de sua simplicidade, disponibilidade de dados de eventos de chuva e menos tempo necessário para realizar as simulações. Um dos elementos-chave na modelagem de escoamentos superficiais é representar com precisão a distribuição temporal das intensidades de chuva características de uma região. Isso geralmente é alcançado considerando uma chuva histórica representativa ou construindo uma chamada chuva de projeto.

Ahn *et al.* (2014) comentam que em geral, a abordagem baseada em eventos é usada para avaliar inundações através de chuvas estimadas por análise de frequência. Este método usa eventos de chuva únicos e individuais selecionados a partir da série de dados históricos com resolução fina. Assim, hietogramas e conceitos de duração de chuva entre outras considerações podem ser descartadas do método para simulação do escoamento. A condição de umidade do solo, que é um fator importante em modelos baseados em eventos, possui grande impacto nos resultados finais da simulação, e em contraste com os métodos de simulação contínua, é normalmente assumida a partir de valores da literatura por falta de informações mais precisas.

Knapp *et al.* (1991) orientam que modelos de eventos normalmente estimam o escoamento de um evento individual de chuva, descrevendo um período relativamente curto dentro do registro hidrológico. Modelos de eventos normalmente avaliam um conjunto parcial dos processos hidrológicos que afetam a bacia hidrográfica: infiltração, escoamento superficial, interceptação e detenção da água. A maioria dos modelos de eventos usa um intervalo de tempo constante, cujo valor pode variar tipicamente de minutos a várias horas. Modelos de simulação contínua operam por um período sustentado que inclui os eventos de chuva e os períodos entre as precipitações. Para avaliar o escoamento durante períodos entre chuvas, os modelos contínuos devem incluir propriedades hidrológicas adicionais, como evapotranspiração, fluxo subterrâneo superficial e fluxo subterrâneo profundo. Também é crucial para estes modelos a estimativa da umidade do solo e como ela se relaciona com as mudanças na infiltração. Para um modelo de evento, as condições iniciais (umidade do solo antecedente, níveis de reservação, etc.) devem ser atribuídos subjetivamente pelo usuário, calibrados com alguns procedimentos de redução de erros, ou aproximado por um procedimento externo, sendo mais comum as duas primeiras abordagens.

Ebrahimian *et al.* (2021) observam que modelos baseados em eventos podem considerar apenas um evento individual de chuva do registro hidrológico ou um evento de chuva sintética, com duração predeterminada, distribuição temporal e frequência que produz o pior

carregamento hidrológico e, portanto, o projeto mais conservador. Esta abordagem utiliza um intervalo de tempo constante entre eventos geralmente variando de 2 a 72 horas.

Hossain *et al.* (2019) fizeram estudo comparativo entre modelagem baseada em eventos e modelagem contínua para uma bacia no sul da Austrália. Os autores concluíram que na bacia em estudo a modelagem por eventos foi mais precisa na representação do hidrograma de escoamento, porém deixam claro que esse desempenho pode variar de acordo com o local de estudo.

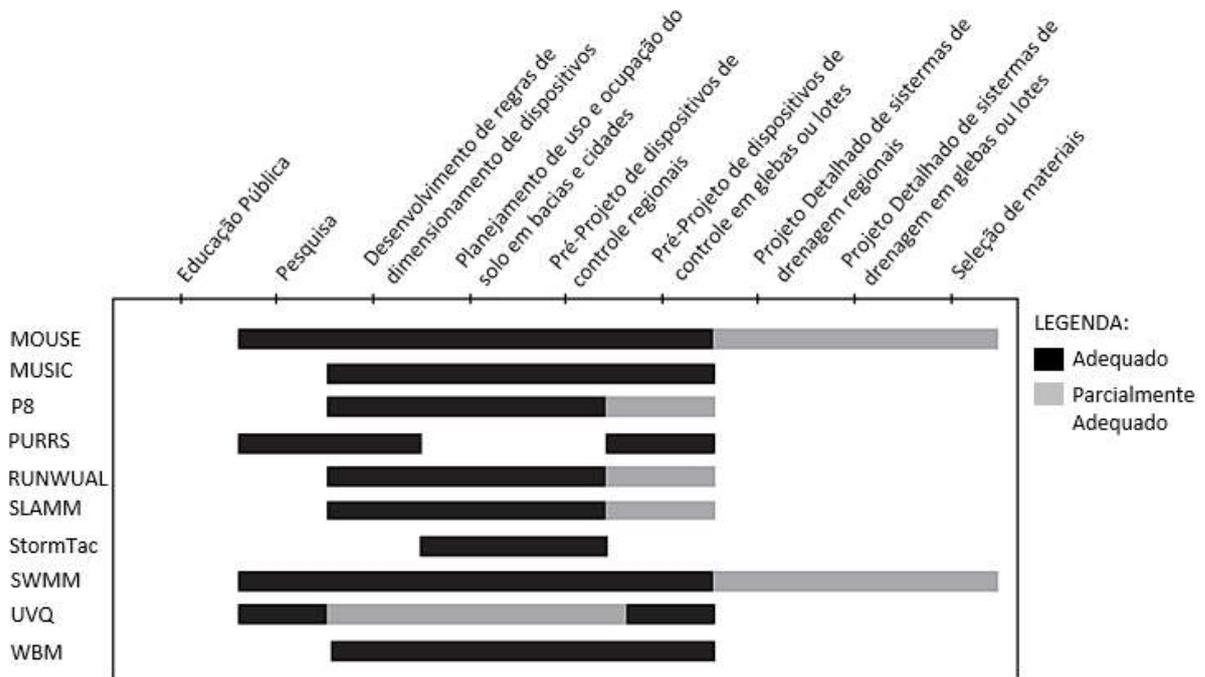
2.5.2 Storm Water Management Model – SWMM

Existem diversas ferramentas computacionais comerciais e de código aberto que realizam a modelagem hidrológica de dispositivos de drenagem urbana sustentável com excelente nível de precisão, como o Storm Water Management Model – SWMM, Hydroworks Model of Urban Sewers - MOUSE, Hydrologic Simulation Program-Fortran - HSPF, entre outros.

Recentemente, alguns modelos americanos como o EPA National Stormwater Calculator e o CNT Green Values Stormwater Calculator, o canadense Water Balance Model, e o alemão Wasserbilanz, buscam simplificar a simulação de dispositivos de drenagem sustentável, porém são modelos focados no público local e com limitações a sua aplicação no Brasil.

Elliott e Trowsdale (2007) avaliaram os 10 modelos mais utilizados em publicações sobre drenagem sustentável. A respeito dos usos potenciais, os autores classificaram os modelos quanto a sua adequação ao uso em diversos aspectos, conforme ilustra a Figura 14. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Os modelos Mouse e SWMM possuem a maior abrangência de usos, apesar de serem complexos para uso do público em geral e para os projetistas não habituados com modelagem. Já o StormTac e o PURRS possuem aplicação restrita, enquanto os demais apresentam usos intermediários. Observa-se que nenhum dos modelos estudados possuem aplicação para educação pública.

Figura 14 - Uso potencial para os principais modelos aplicados a águas pluviais



Fonte: Adaptado de Elliott e Trowsdale (2007)

Rossmann (2015) indica ainda que o SWMM reconhece arquivos de precipitação gerados pelos centros climatológicos americanos e canadenses. O programa aceita a entrada de dados preparado pelo usuário em um modelo específico, devendo constar o nome da estação, ano, mês, dia, hora, minutos e a leitura de precipitação não pode ser nula. Esse formato é frequentemente fonte de dúvidas e falhas na inserção de dados de precipitação customizadas, conforme se observa no fórum de discussões do software (EPA, 2021).

2.6 Princípios de Programação Computacional

Os modelos computacionais podem ser programados em diversos tipos de linguagem, entre elas o Visual Basic, C, Java e Python, havendo particularidades próprias de cada método. No entanto, os princípios básicos de programação se aplicam a qualquer tipo de estrutura utilizada, e permitem que o código computacional seja estável, editável e funcional.

O princípio KISS (*Keep It Simple, Stupid*) foi formulado por Kelly Johnson, engenheiro da empresa fabricante de produtos aeroespaciais Lockheed Martin, como forma de garantir que as aeronaves fossem projetadas de forma a serem facilmente reparadas com treinamento básico e ferramentas simples em situações de combate. Hoje, o princípio é aplicado no

desenvolvimento de programas computacionais, como forma de evitar falhas no código e facilitar sua utilização (RICH, 1995).

Entre as boas práticas de programação, a indentação facilita a leitura do código e compreensão das funções. As funções devem estar aninhadas e em pequenos comprimentos. Quanto aos comentários, recomenda-se evitar o máximo possível, sendo indicado que a explicação esteja no próprio código, com variáveis, funções e lógica clara. Os comentários que devem ser utilizados são aqueles para explicação da intenção, informativos, esclarecimento e de alerta de consequências (MARTIN, 2009).

Foxhall (2002) orienta que os comentários em um código devem ser para documentar o propósito e não explicar como o código funciona. Além disso, devem possuir indicação clara do pensamento e lógica do código e chamar a atenção para pontos importantes. Os comentários devem ser capazes de reduzir o tempo de leitura e simulação do código na cabeça dos leitores.

Quanto a convenção de nomenclaturas para programação, a Notação Húngara é sugerida pelo Dr. Charles Simonyi, ex-programador chefe da Microsoft, e têm por objetivo facilitar a lembrança de variáveis pelo programador, permitir a fácil leitura e acompanhamento do código por outros programadores, reduzir o tempo na construção de nomes de variáveis, que deve ser rápida e intuitiva, e finalmente permitir uma boa estética de programação. O nome da notação faz referência ao país de origem do Dr. Simonyi e à forma de escrita de nomes da língua húngara, onde o nome da família vem antes do nome próprio (SIMONYI, 1999). Foxhall (2002) sugere a Notação Húngara para os objetos, incluindo os formulários e controles para aplicação em programação VBA, conforme mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Prefixos de objetos utilizando a notação húngara no VBA

Objeto	Prefixo	Exemplo
Formulário (<i>form</i>)	frm	frmInicial
Caixa de texto (<i>text box</i>)	txt	txtChuva
Imagem (<i>image</i>)	img	imgSolo
Botão de opção (<i>option button</i>)	opt	optTriangular
Etiqueta (<i>label</i>)	lbl	lblVolumePoço

Adaptado de Foxhall (2002)

Elliott e Trowsdale (2007) observam que quanto a interface do usuário, existe grande variação entre os modelos mais utilizados em trabalhos científicos da área de hidrologia e

drenagem. Existem desde modelos com interface de base texto em DOS até modelos com interfaces mais amigáveis em ambiente Windows. Alguns modelos dependem de acesso contínuo a internet para acesso ao banco de dados e outros funcionam fora da rede. Um modelo simples como o Storm-TAC, por exemplo, é baseado em Microsoft Excel com elementos gráficos que facilitam sua operação. Interfaces mais atrativas são capazes de incentivar o uso de modelos pelos engenheiros e promover o uso de soluções mais sustentáveis.

Foxhall (2002) observa que uma interface de usuário pode ser uma ponte ou uma barreira. Uma boa interface permite que o usuário faça seu trabalho sem ter que pensar muito na mecânica do processo. A Interface gráfica do usuário (GUI) deve permitir que os usuários potencializem habilidades já existentes, aplicando conhecimentos pré-adquiridos, evitando a confusão e frustração do mesmo. Interfaces visualmente atrativas constroem confiança e satisfação no usuário. Quando possível, é interessante utilizar a estrutura e a aparência de outros programas populares já conhecidos do usuário alvo.

Ainda segundo Foxhall (2002), o usuário se comunica com o programa através de comandos de mouse e teclado, e na via oposta, o programa se comunica com o usuário através de sons, caixas de mensagens, caixas de diálogo e outras orientações visuais. Essa comunicação de duas vias permite que o usuário trabalhe facilmente com o programa.

Myers (2003) observa que quanto mais fácil de ser utilizada, mais difícil é a criação dessa interface. Hoje as GUI são praticamente universais, porém essas interfaces requerem que o programador lide com gráficos elaborados, múltiplas formas de receber o mesmo comando, múltiplos assincronismos de entrada (teclado e mouse) em modo livre, onde o usuário pode emitir qualquer comando a qualquer hora, além da requerida resposta rápida aos comandos. Por causa das dificuldades intrínsecas na construção de uma boa interface, são necessários constantes ajustes e testes exaustivos, o que torna todo o processo ainda mais complexo.

Apesar de quase universais nos programas atuais, há uma diferença significativa entre Interface do Usuário e a Percepção do Usuário (*user experience*). A percepção do usuário é um conceito mais amplo, que abrange além da aparência, usabilidade e facilidade de uso do programa, sustentando também aspectos afetivos como o prazer, eficiência e até mesmo divertimento. Não há definição padrão para a percepção do usuário, sendo um termo subjetivo (SIANG, 2020).

A percepção do usuário está além da funcionalidade e estética do produto. Muitos projetistas carregam o conceito de “a forma segue a função”, porém as partes do produto que são visíveis ao usuário são governadas pela psicologia e comportamento do mesmo. A estética do produto garante um formato e textura agradável, a funcionalidade garante que tudo funcione

devidamente, e a percepção positiva do usuário é obtida quando os botões estão nos lugares corretos, com proporções de acordo com sua importância. Quando as pessoas utilizam tecnologias que não funcionam conforme o esperado, elas tendem a se culpar, acreditando não possuir conhecimento básico para fazer a ferramenta funcionar e com isso se sentem frustradas e deixam de utilizar o produto. O sucesso de um produto está diretamente ligado a percepção do usuário (GARRETT, 2011).

CAPÍTULO III

Metodologia

3.1 Introdução

Os métodos utilizados para estudo dos ECC e construção da ferramenta computacional consistiram em 7 etapas distintas sintetizadas no Quadro 1. Na sequência cada fase é descrita detalhadamente. A fim de avaliar o funcionamento da Ferramenta DDU+S (Dispositivos de Drenagem Urbana Mais Sustentável), foram utilizados dados e simulações para a cidade de São Carlos-SP.

Quadro 1 – Síntese da metodologia utilizada no trabalho (continua)

Etapa	Método	Resultados
1.Revisão Bibliográfica	Pesquisa na literatura a partir de bases de dados sobre temas da tese.	Fundamentação Teórica desta tese.
2.Adaptação e aplicação do Método de Eventos de Chuva Característicos (ECC)	Definição das características dos eventos, criação de rotina computacional para extração de eventos de chuva a partir de dados históricos e seleção de ECC.	Eventos de Chuva Característicos definidos.
3.Análise Comparativa entre ECC e Hietograma de Huff	Construção de hietogramas de Huff a partir dos dados dos ECC.	Gráficos comparativos apresentando as diferenças entre os métodos.

Quadro 1 – Síntese da metodologia utilizada no trabalho (conclusão)

4. Estudo dos fatores intervenientes nos ECC	Obtenção de ECC distintos a partir de alterações no intervalo entre eventos e na intensidade mínima.	Compreensão e avaliação do impacto de alterações das principais variáveis na geração dos ECC.
5. Programação da Ferramenta DDU+S	Escrita do programa em linguagem <i>Visual Basic for Applications</i> (VBA).	Ferramenta programada apta a testes.
6. Aplicação e testes da Ferramenta DDU+S	Aplicação e testes da Ferramenta utilizando dados reais em cenários simulados.	Ferramenta testada, e apta a ser utilizada.
7. Avaliação da Ferramenta DDU+S	Avaliação da Ferramenta DDU+S a partir de critérios sugeridos pela <i>American Society of Civil Engineers</i> (ASCE) simulados comparativamente ao <i>Storm Water Management Model</i> (SWMM).	Métricas de desempenho da Ferramenta DDU+S em comparação ao SWMM.

Fonte: Autor (2022)

3.2 Etapa 1 – Revisão Bibliográfica

Esta primeira etapa visou formar as bases teóricas do trabalho, obtendo conhecimentos sólidos sobre os conceitos do problema alvo desta pesquisa. Para isto, foram consultados os bancos de dados Scielo, ScienceDirect, Scopus, Web of Science e repositórios digitais de universidades brasileiras, além de busca na rede social ResearchGate para seleção de manuais, legislações, livros e artigos, recentes e clássicos que abordam o tema de drenagem urbana mais sustentável. A Revisão Bibliográfica foi apresentada no Capítulo 2 deste trabalho.

3.3 Etapa 2 – Aplicação do Método de Eventos de Chuva Característicos

Foi determinado que as chuvas de projeto que seriam utilizados na ferramenta seriam eventos históricos representativos ao invés das opções normalmente adotadas, como a construção de hietogramas de projeto a partir de relações IDF ou a escolha de eventos chuvosos aleatórios. Dessa forma, a metodologia dos Eventos de Chuva Característicos proposta por Andersen *et al.* (2017) foi adaptada para melhor atendimento ao escopo deste estudo.

Foram quatro as principais adequações realizadas em relação ao método proposto por Andersen *et al.* (2017) sendo:

- a) o período entre eventos foi fixado em 24h;
- b) os eventos de chuva foram classificados de acordo com os percentis da amostra, sendo utilizados o 50º, 75º, 90º, 95º, 98º e 100º percentil da amostra;
- c) não foram adotadas faixas de tempo de duração do evento com vista a simplificar o método;
- d) os eventos históricos não foram individualmente ordenados em ordem decrescente para seleção do ECC a fim de manter a cronologia real do evento.

Os eventos de chuvas históricos foram extraídos a partir do desenvolvimento de um código em VBA, utilizando os dados pluviométricos em escala horária que são tipicamente fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para Estações Automáticas. O VBA, por estar inserido no Pacote Office, garante o atendimento de praticamente todos os possíveis usuários da ferramenta. Quanto à velocidade de processamento, o tempo para extração de eventos com um computador de nível doméstico intermediário utilizando o VBA é de aproximadamente 1 minuto. O VBA permite ainda a construção de uma interface gráfica agradável ao usuário e facilidade na alteração das principais variáveis da rotina computacional. Essa etapa do trabalho foi dividida em três fases, sendo:

- Caracterização dos eventos de chuva: que buscou estabelecer os percentis de trabalho da amostra, determinar o período sem chuva entre eventos para separação dos mesmos e um valor pluviométrico mínimo de chuva para consideração de perdas do sistema;
- Codificação para extração de eventos pluviométricos: através dos critérios estabelecidos na primeira fase foi escrito código em VBA para identificação, separação e plotagem dos eventos de chuva históricos;

- Seleção do evento de chuva característico: Uma vez definidos os eventos históricos, foi aplicado método estatístico para escolha de um evento de chuva característico para um dado intervalo de tempo de retorno.

Para avaliação da metodologia proposta para determinação dos eventos de chuva históricos (ECH) e dos ECC é necessária a utilização de uma série histórica pluviométrica real com dados horários. A finalidade da utilização desta série é verificar possíveis falhas de programação, assim como permitir a realização das etapas 3 a 7 deste trabalho. Foram utilizados dados pluviométricos cedidos pelo INMET a partir de solicitação no portal BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos do INMET) para a estação meteorológica de observação de superfície automática (EMA) de São Carlos/SP. Os dados estão com intensidade em mm de chuva e agregados com duração horária, compatíveis portanto com o objetivo do trabalho.

A estação meteorológica automática coleta a cada minuto informações de temperatura ambiente, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos, e radiação solar. Esses dados são agregados e transmitidos para a sede do INMET em Brasília. O Centro de Controle da Informação Meteorológica valida então esses dados através de procedimentos de controle da qualidade e armazena os mesmos (INMET, 2011).

Os dados pluviométricos são medidos com contador de pulso e medidos a cada 10 segundos. A EMA de São Carlos está implantada em latitude: 21°58'49.02"S e longitude: 47°53'2.24"O (Datum WGS84) nas instalações da Universidade Federal de São Carlos e iniciou a coleta de dados em 05/09/2006 (INMET, 2011). Os dados pluviométricos deste estudo estão compreendidos entre 05/09/2006 e 05/05/2021.

3.3.1 Caracterização dos Eventos de Chuva

Para determinação dos eventos de chuva, primeiro foram consideradas 6 classes de acordo com percentis da amostra, sendo utilizados os 50°, 75°, 90°, 95°, 98° e 100° percentil. As três subdivisões entre os valores compreendidos o 90° e 100° percentil foram necessárias devido às características da amostra que apresentou grande amplitude de dados. A utilização de uma menor quantidade de classes iria provocar a sub-representação de eventos com alto volume pluviométrico total.

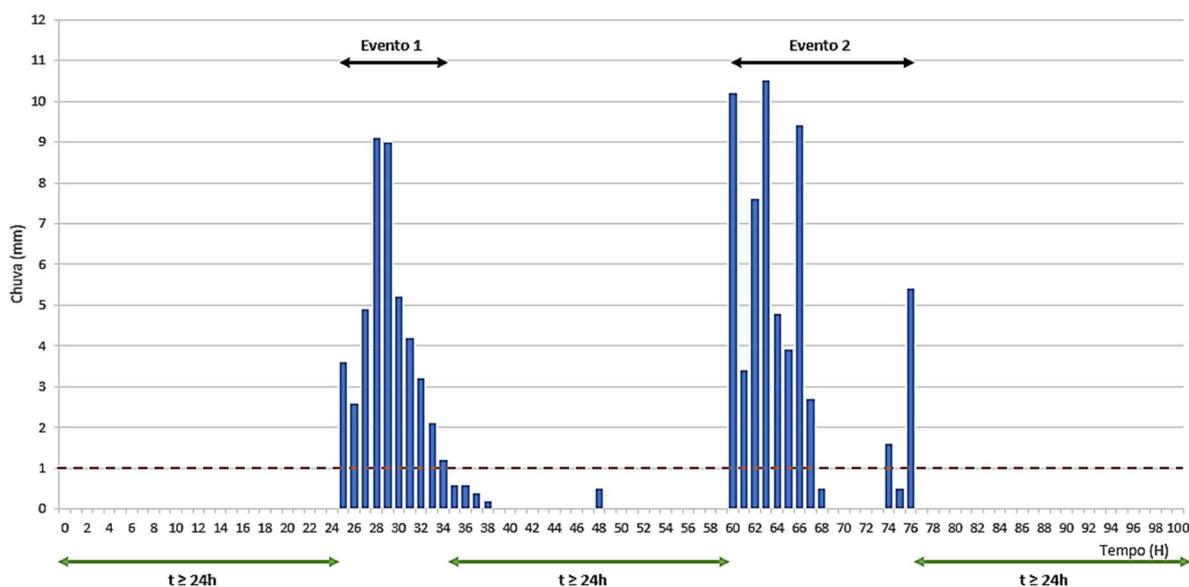
Desta forma, os eventos de chuva foram ordenados em ordem decrescente de acordo com sua altura total precipitada e calculada a frequência relativa de cada um desses dados, para classificação de acordo com os percentis da amostra.

O valor mínimo padrão para a intensidade de um evento de chuva foi adotado como sendo 1 mm/h, que representam as perdas do sistema, e o intervalo entre eventos foi adotado em 24 h. O impacto dessa escolha também é avaliado neste trabalho, alterando os valores de intensidade mínima e de período entre eventos.

3.3.2 Codificação para Extração dos Eventos de Chuva

Para extração dos eventos pluviométricos a partir dos dados horários típicos do INMET, foi realizada codificação em linguagem VBA. As considerações para extração de eventos programada pode ser melhor entendida na Figura 15.

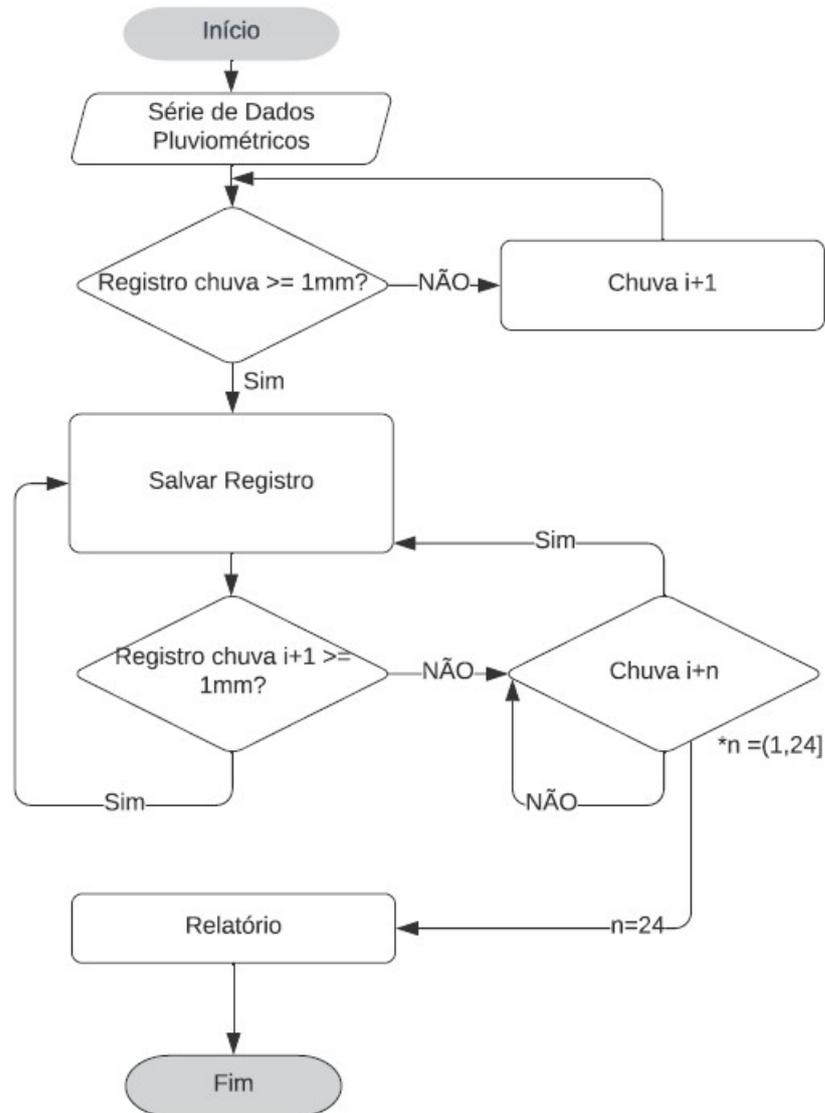
Figura 15 – Considerações para extração de eventos



Fonte: Autor (2020)

O tempo entre eventos padrão foi determinado como sendo 24 h. A intensidade mínima a ser considerada no evento é de 1 mm/h. Chuvas com registro abaixo da intensidade de 1 mm/h são consideradas nulas, pois aumentariam a duração do evento sem efetivamente aumentar o volume de água escoado. Quando o dado horário registra menos de 1 mm, mas está entre valores acima de 1 mm, ele é considerado para a altura total do evento. A Figura 16 mostra o fluxo operações utilizado para extração dos eventos de chuva históricos (ECH).

Figura 16 – Fluxo de operações usado para extração dos ECH



Fonte: Autor (2022)

Para consolidação do evento, caso o bloco horário subsequente estiver separado por um período seco de ao menos o intervalo determinado de 24h, esse bloco é agregado ao evento. Caso o período seco seja maior que o intervalo inter-evento determinado, então consideram-se eventos separados. Cada evento é caracterizado por sua intensidade e duração.

3.3.3 Determinação de Eventos de Chuva Característicos

Para cada uma das 6 categorias de eventos, que representam os percentis da amostra, foi selecionado um ECC. Todos os eventos de chuva históricos foram considerados. Foi calculada

a média de chuva para cada hora, produzindo uma distribuição média, criando, portanto, um evento de chuva fictício. Para encontrar o ECC entre todos os eventos históricos, foi utilizado o método dos mínimos quadrados entre os dados históricos e a chuva fictícia, considerando também a duração do evento, como mostra a equação 5.

$$\text{mín}(SSQ) = \text{mín} \left(\sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{H} \right) \quad (5)$$

onde y_i é a intensidade pluviométrica do evento histórico em escala horária i , \hat{y}_i é a intensidade da chuva média fictícia em escala horária e H é o número de horas do evento. O evento de chuva histórico que mais se aproxima da chuva fictícia é o que tem a melhor distribuição de alturas de chuva, e será, portanto, o ECC.

3.4 Etapa 3 – Análise Comparativa entre ECC e Hietograma de Huff

Esta etapa do trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa direta entre a metodologia ECC e as chuvas que seriam tipicamente pelos tradicionais hietogramas de Huff.

Foram produzidos hietogramas com o método Huff utilizando como dados de duração e altura total precipitada as informações dos respectivos ECC. O quartil da distribuição Huff foi escolhido para melhor aderência entre as curvas. A distribuição das alturas de chuva em relação para cada tempo do evento foi realizada utilizando os dados apresentados na Tabela 3 da revisão bibliográfica.

Uma vez traçados os hietogramas de Huff, as curvas foram sobrepostas aos eventos de chuva característicos como forma de visualizar diretamente as principais diferenças entre os dois métodos.

3.5 Etapa 4 – Estudo de Fatores Intervenientes nos ECC: Intensidade Mínima e Intervalo Entre Eventos

Os eventos de chuva característicos são determinados a partir de critérios de tempo entre eventos, intensidade mínima e em função das classes de percentis da amostra. Considerando que as classes de percentis são fixas, o impacto da variação dos outros fatores pode ser estudado para avaliar a sensibilidade dos ECC do município de São Carlos a esses aspectos.

Para avaliar o impacto do intervalo entre eventos na determinação dos eventos de chuva característicos, foram determinados ECC de acordo com os critérios de percentis já estabelecidos neste trabalho, fixando-se a intensidade mínima de 1 mm/h para intervalos entre eventos (IE) de 6, 12, 24 e 48 horas. Os ECC definidos para cada uma das classes de tempo de retorno foi comparado com seus pares através de gráfico da intensidade pluviométrica (mm/h) vs. duração do evento.

O impacto da escolha da intensidade mínima horária a ser considerada foi determinada fixando o intervalo entre eventos em 24h e determinados os ECC para intensidades mínimas de 1, 2, 5 e 7 mm/h. Os ECC definidos para cada uma das classes de percentil foi comparado com seus pares através de gráfico da intensidade pluviométrica (mm/h) vs duração do evento.

Para avaliação gráfica dos resultados obtidos pela análise de variação da intensidade mínima e do intervalo entre eventos quanto a quantidade de eventos obtidos, foram construídos gráficos do tipo funil que possibilitam a visualização das variações em cada caso estudado.

Já para a análise comparativa dos resultados obtidos em cada classe de evento de chuva, foram utilizados diagramas de caixa (*boxplot*). Esta técnica gráfica da estatística descritiva permite demonstrar a dispersão e assimetria dos dados numéricos através de quartis da amostra.

3.6 Etapa 5 – Programação da Ferramenta DDU+S

O uso de modelos matemáticos é simplificado quando se pode utilizar uma ferramenta que facilite a inserção de dados e leitura dos resultados por diferentes pessoas interessadas, reduzindo o trabalho delas e possivelmente aumentando a propagação e aplicação de uma metodologia. Estão disponíveis no mercado uma série de programas comerciais que realizam a simulação de dispositivos de drenagem urbana sustentável. No entanto, o custo elevado, código fechado, restrições de parâmetros e excesso de variáveis desses programas fazem atrativa a ideia de produzir uma ferramenta simples e robusta para simulação de dispositivos de drenagem urbana mais sustentáveis (DDU+S).

Assim, na presente tese foi desenvolvida uma ferramenta computacional denominada **Ferramenta DDU+S**, com o objetivo de simular o comportamento de dispositivos de drenagem sustentáveis quando submetidos a eventos de chuvas característicos. A ferramenta permite calcular o balanço hídrico, mostrando ao operador os potenciais benefícios hidrológicos do dispositivo para cada ECC. A simulação de dispositivos de drenagem quando carregados com eventos de chuva reais, com todas as propriedades de altura precipitada, duração do evento e distribuição temporal é desejável para planejar adequadamente estes dispositivos.

Existem alguns modelos computacionais que são amplamente utilizados pelo meio técnico e científico, no entanto a sua complexidade pode ser desnecessária e não desejada para a finalidade que a Ferramenta DDU+S se propõe, que é auxiliar profissionais que trabalham com a gestão da água pluvial urbana, assim como indivíduos com conhecimentos básicos da área, e que não possuem dados técnicos suficientes para utilizarem os modelos complexos, a buscar soluções para o problema do escoamento superficial da água de chuva. A Ferramenta DDU+S pode ser um instrumento de apoio a multidisciplinaridade que a gestão das águas urbanas exige.

A Ferramenta DDU+S foi programada utilizando a linguagem VBA, que é uma linguagem desenvolvida pela Microsoft e presente no pacote Office. Através do VBA é possível analisar dados, realizar cálculos e desenhar gráficos através da escrita de rotinas de comandos e cálculos.

O VBA é uma linguagem de programação simples, mas poderosa, utilizada principalmente para acelerar tarefas repetitivas. Com o VBA é possível solicitar e interagir com o usuário de forma específica para atender suas necessidades. A vantagem de utilizar a linguagem VBA reside no fato de que a maioria dos prováveis usuários possuem e são familiarizados com o pacote Office da Microsoft, que possui cerca de 1,2 bilhões usuários licenciados (MICROSOFT, 2020).

Para construção da Ferramenta DDU+S, foram utilizados modelos matemáticos consagrados para determinação do escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração e balanço hídrico, explicados nos itens 3.6.1 a 3.6.4 deste trabalho.

3.6.1 Escoamento Superficial da bacia

O escoamento superficial é calculado pela Metodologia do Natural Resources Conservation Service (NRCS), anteriormente conhecido como Metodologia Soil Conservation Service (SCS). De acordo com NJDEP (2004), este método é possivelmente o mais utilizado para estimativas do escoamento superficial de águas pluviais, sendo particularmente útil para comparativos entre pré e pós-urbanização. O elemento chave do método é o número de curva (*curve number* – CN) que é função da permeabilidade do solo, tipo de ocupação e condições hidrológicas. O documento NEH-4 (SCS, 1985) apresenta em detalhes a equação 6, determinada empiricamente para cálculo do escoamento superficial.

$$E = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{(P + 0,8 \times S)} \quad (6)$$

onde E é a lâmina de escoamento superficial (mm), P é a altura de precipitação (mm) e S é a capacidade máxima de retenção do solo, calculada pela equação 7 para valores de chuva em mm.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

O CN para áreas urbanas é determinado pela Tabela 6 em função de 4 classificações de solo (A até D). Como resultado da urbanização as características do solo são severamente alteradas, dessa forma, Brakensiek e Rawls (1983) orientam a correlacionar a classe do solo do método NRCS com a textura do mesmo, ilustrado na Tabela 7.

Tabela 6 – CN para áreas urbanas

Tipo de ocupação	CN de acordo com a classe do solo			
	A	B	C	D
Áreas abertas em boas condições (cobertura vegetal >75%)	68	79	86	89
Áreas impermeáveis	98	98	98	98

Fonte: Adaptado de USDA (2012)

Tabela 7 – Correlação entre textura e classe do solo

Classe Solo	Textura do solo
A	Areia, Areia Franca ou Franco Arenoso
B	Franco ou Franco Siltoso
C	Franco Argilo Arenoso
D	Franco Argiloso, Franco Argilo Siltoso, Argilo Arenoso, Argilo Siltoso e Argiloso

Fonte: Adaptado de Brakensiek e Rawls (1983)

3.6.2 Infiltração

Para cálculo da infiltração, diversos métodos de ampla utilização foram considerados, entre eles o de Darcy, Horton, Green-Ampt, e o NRCS Curve Number. Considerando as aplicações, referências bibliográficas, vantagens e desvantagens entre os métodos, foi selecionado o modelo Green-Ampt, que é de grande precisão e necessita como parâmetros de entrada: condutividade hidráulica, déficit de saturação do solo, porosidade e a espessura da zona capilar do solo. Apesar de serem parâmetros que exigem ensaios de laboratório, Rawls, Brakensiek e Miller (1983) sugeriram valores típicos para 11 tipos de solos, partindo do arenoso até o argiloso, conforme mostrado na Tabela 8.

O método de Green-Ampt pode ser descrito pela equação 8 para o cálculo da taxa de infiltração.

$$f(t) = K \times \left(\frac{\Psi \times \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (8)$$

onde $f(t)$ é a taxa de infiltração no tempo t ; K é a condutividade hidráulica saturada (mm/h), Ψ é a sucção na frente de molhamento (mm), $\Delta\theta$ é o acréscimo de umidade no solo pela infiltração e $F(t)$ é a infiltração acumulada.

A equação 9 permite calcular o $\Delta\theta$ através da saturação e porosidade.

$$\Delta\theta = (1 - S_e) \times \theta_e \quad (9)$$

onde S_e é a saturação efetiva e θ_e é a porosidade efetiva

As equações mostram que a capacidade de infiltração depende do volume infiltrado, que por sua vez depende da taxa de infiltração em cada intervalo de intervalo. A fim de evitar erros numéricos em intervalos de tempo maiores, a equação 10 é uma forma integrada mais adequada para o cálculo da infiltração. Substituindo, portanto, $f(t)$ por dF/dt , obtém-se:

$$F(t) = K + \Psi \times \Delta\theta \times \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\Psi \times \Delta\theta} \right) \quad (10)$$

Inicialmente $F(t)$ é estimada como sendo $0,1 \times k$, e a partir de iterações de convergência é encontrado o $F(t)$ real para cada intervalo de tempo.

Tabela 8 – Parâmetros do solo de acordo com a classe textural

Classe Textural	K (mm/h)	Ψ (mm)	θ	θ_e
Areia	117,8	49,5	0,437	0,417
Areia Franca	29,9	61,3	0,437	0,401
Franco Arenoso	10,9	110,1	0,453	0,412
Franco	3,4	88,9	0,463	0,434
Franco Siltoso	6,5	166,8	0,501	0,486
Franco Argilo Arenoso	1,5	218,5	0,398	0,330
Franco Argiloso	1,0	208,8	0,464	0,309
Franco Argilo Siltoso	1,0	273,0	0,471	0,432
Argilo Arenoso	0,6	239	0,430	0,321
Argilo-siltoso	0,5	292,2	0,479	0,423
Argiloso	0,3	316,3	0,475	0,385

Fonte: Adaptado de Rawls, Brakensiek e Miller (1983)

3.6.3 Evapotranspiração

Quanto à evapotranspiração, foi utilizado o modelo de Penman-Piché, estimado de acordo com a equação 11.

$$ETP = \frac{(0,28 \times E_i)}{(1 - w)} \quad (11)$$

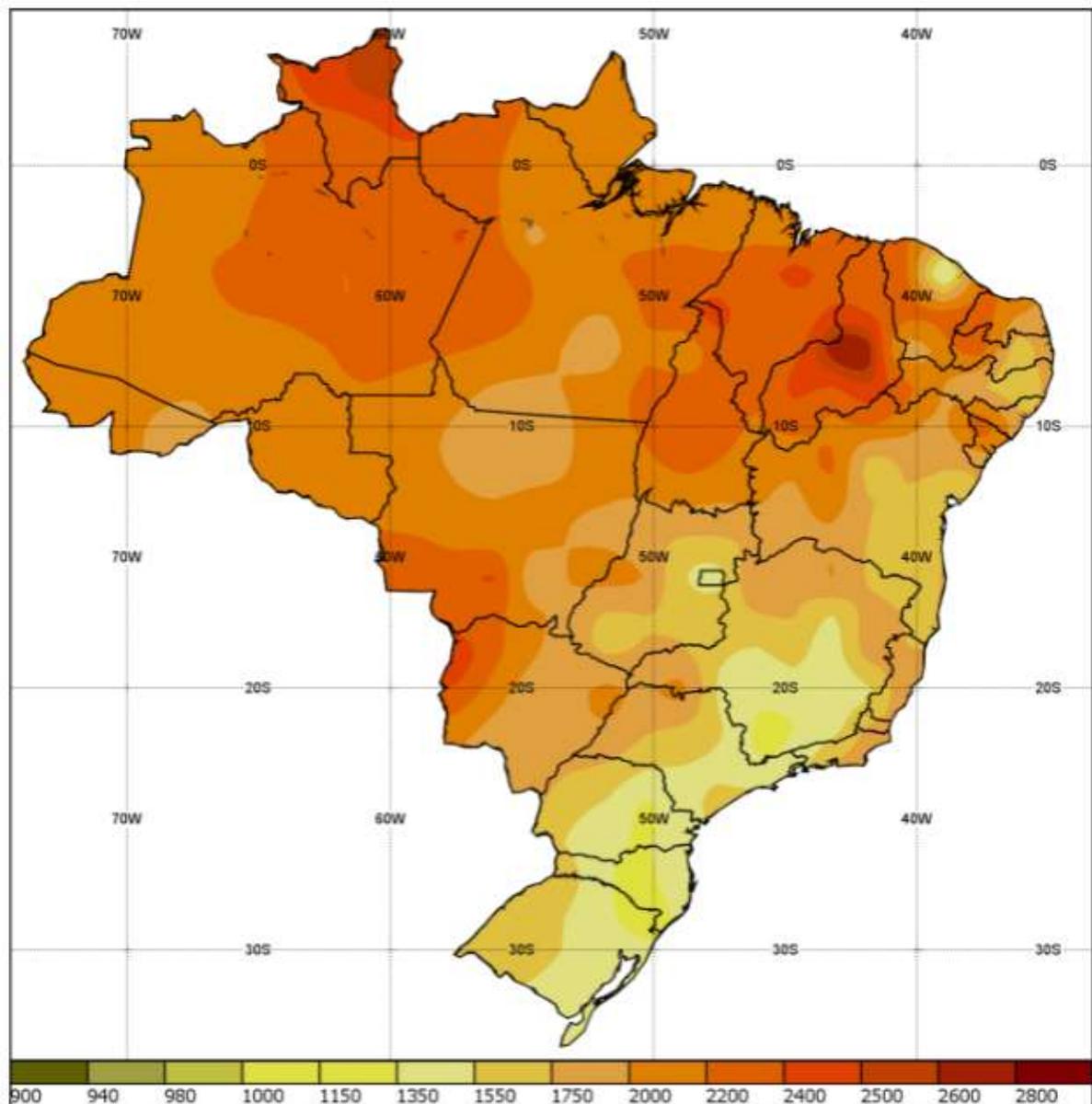
onde E_i é a evaporação obtida pelo evaporímetro de Piché (mm/d), w é função da temperatura do ar (t_a) e é obtida pelas equações 12 e 13.

$$w = 0,407 + 0,0145 \times t_a \quad \text{quando } 16 < t < 32^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$w = 0,483 + 0,01 \times t_a \quad \text{quando } t < 16^\circ\text{C} \quad (13)$$

O INMET (2018) realizou estudo das normais climatológicas do Brasil para o trintenário 1981-2010, onde a taxa de evapotranspiração anual e mensal de 310 municípios brasileiros foram determinadas através de estimativa pelo método de Thornthwaite, o que permite uma boa aproximação para a maioria das cidades do país. A Figura 17 ilustra a média dos dados anuais de evaporação obtidos pelo INMET no período 1981-2010, com valores estão em milímetros.

Figura 17 – Evapotranspiração Total Anual em (mm) 1981-2010.



Fonte: INMET (2018)

Existem diversas equações para estimativa da evapotranspiração entre elas as mais comuns são Blaney e Criddle, Thornthwaite, Camargo, Priestley & Taylor, Turc e Penman-

Monteith (FERNANDES *et al.*, 2010). A vantagem da equação de Penman-Piché reside na simplicidade do método, dispensando valores como velocidade do vento, umidade do ar e radiação solar necessárias nos outros modelos. Conforme estudado por Fernandes, Fraga Júnior e Takay (2011) e Minuzzi e Tripadalli (2019) o método apresenta excelente aproximação aos métodos tradicionais sendo viável sua utilização para a Ferramenta DDU+S.

Os municípios estudados pelo INMET (2018) possuem boa distribuição geográfica no território brasileiro o que permite aproximação dos dados para a maioria das cidades brasileiras.

3.6.4 Balanços Hídricos nos Dispositivo de Drenagem Urbana Sustentável

Para o cálculo do volume retido e extravasado nos dispositivos, os modelos hidrológicos e hidráulicos são os dois tipos mais utilizados para estudo de escoamento superficial (Xiong e Melching, 2005). O princípio de conservação de massa e o método não linear de reservação são os pilares do programa SWWM para cálculo de dispositivos de drenagem (XIONG e MELCHING, 2005). Rossman e Bernagros (2019) apresentam a equação 14 para cálculo do balanço hídrico típico de um dispositivo de drenagem urbana sustentável.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = i + q_0 - e - f - q_1 \quad (14)$$

sendo p a profundidade de água nos dispositivos, i é a altura de chuva no local, q_0 é o escoamento superficial a montante, e é a taxa de evapotranspiração, f é a taxa de infiltração no solo, q_1 é a taxa de extravasão e t é o tempo.

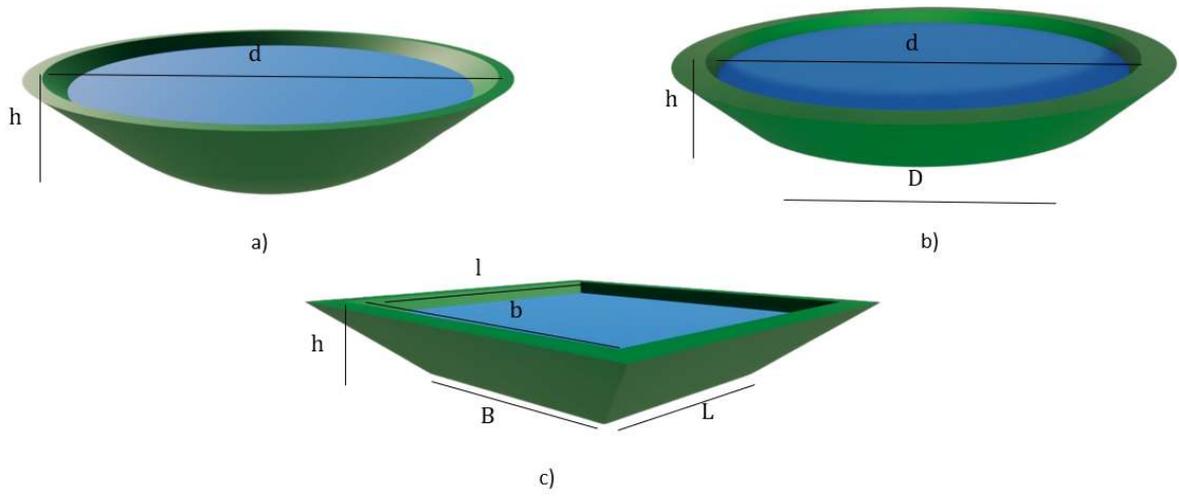
Para cálculo do balanço hídrico é necessário conhecer, portanto, o volume útil de cada dispositivo, assim como as áreas de infiltração e características do solo. Essas informações são próprias de cada dispositivo e estão detalhadas nos itens 3.6.4.1 a 3.6.4.4.

3.6.4.1 Superfície de Infiltração (SI)

Considera-se neste trabalho superfícies de infiltração (SI) os dispositivos que possuem pequena profundidade em relação a sua área superficial, enquanto as valas de infiltração (VI) são dispositivos que possuem as três dimensões similares. Através da Equações 15, 16 e 17 é possível determinar os volumes de armazenamento deste dispositivo com volumes tronco de pirâmide retangular, tronco de cone e calota esférica, respectivamente. A Figura 18 ilustra as

formas geométricas consideradas para a SI, assim como os elementos das equações de cálculo de área e volume destes dispositivos. Alternativamente, será permitido ao usuário a utilização de dispositivos sem forma geométrica definida, uma vez que as paredes não têm grande influência na área de infiltração destes dispositivos.

Figura 18 – Sólidos geométricos utilizados para simulação da superfície de infiltração da Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

$$VolSITP = \frac{h}{3} \times \left[(b \times l) + \sqrt{(b \times l) \times (B \times L)} + (B \times L) \right] \quad (15)$$

$$VolSITC = \frac{\pi \times h}{3} \times \left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right) \times \left(\frac{d}{2}\right) + \left(\frac{d}{2}\right)^2 \right) \quad (16)$$

$$VolSICE = \frac{\pi \times h}{6} \times \left(3 \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 - h^2 \right) \quad (17)$$

onde b é o comprimento superficial, B é o comprimento de fundo, l é a largura superficial, L é a largura de fundo e h é a altura, d é o diâmetro superficial, D é o diâmetro de fundo.

As áreas de infiltração destes dispositivos são uma parcela a ser considerada da área de fundo, já que por serem dispositivos de pequena profundidade e grande área superficial, a predominância da infiltração se dá pelo fundo. Assim as áreas de paredes podem ser desprezadas. Para as situações de formato em tronco de pirâmide retangular, o fundo é um retângulo; para o formato tronco de cone o fundo é um círculo; e para a calota esférica o fundo

confunde-se com a parede, sendo necessário utilizar a equação 18 para cálculo da área de superfície aproximada, uma vez que não se espera que o operador possua informações sobre o raio da calota.

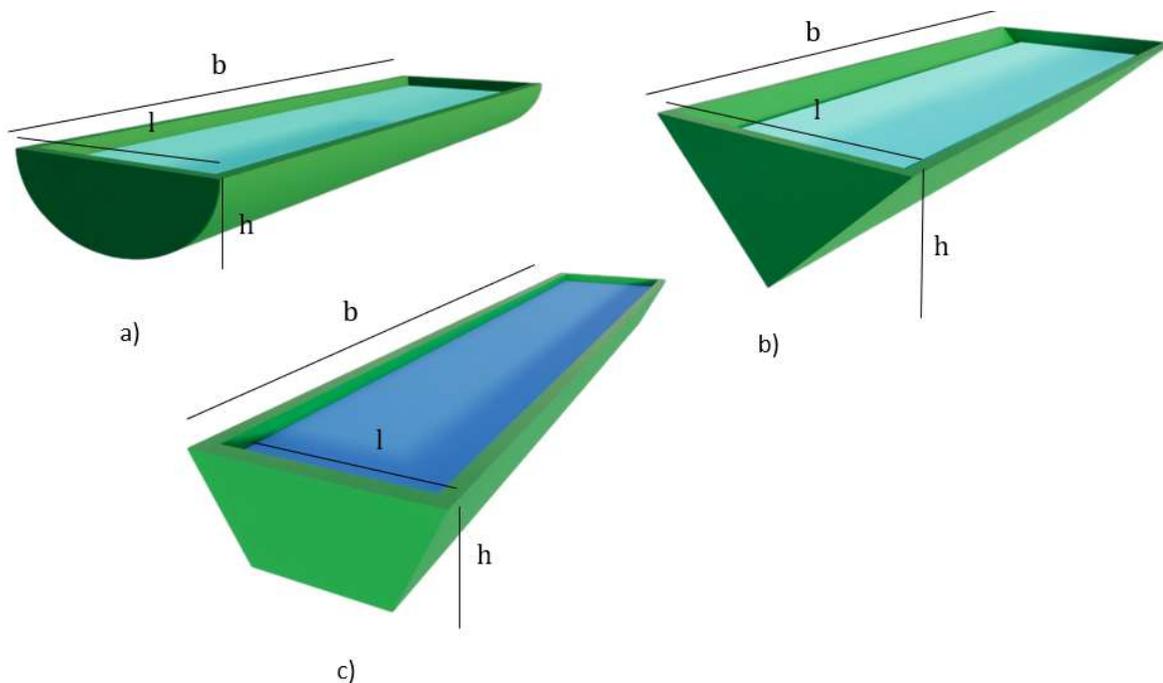
$$AreaSICE = 2 \times \pi \times \frac{d}{2} \times \sqrt{h^2 + \frac{d}{2}^2} \quad (18)$$

Como a Ferramenta DDU+S desconsidera a área de infiltração de paredes em superfícies de infiltração, é possível determinar o volume e área de infiltração de superfícies de formato ameboide, onde é necessária a área de projeção do dispositivo e a altura do mesmo.

3.6.4.2 Vala de Infiltração (VI)

As Valas de Infiltração (VI) são dispositivos similares às superfícies de infiltração quanto ao processo de funcionamento hidrológico, porém possuem forma geométrica distinta, com altura significativa em relação às demais dimensões. Estes dispositivos possuem área de fundo e de parede que contribuem para a infiltração da água retida. Podem ocorrer alguns casos de valas que não possuem área de fundo bem estabelecidas, como no caso de seções triangulares, onde as áreas laterais têm o papel de permitir a infiltração. Através das Equações 19, 20 e 21 é possível determinar os volumes de armazenamento deste dispositivo com seções transversais triangulares, trapezoidais e côncavas, respectivamente, sendo a seção côncava simplificada para uma seção triangular, uma vez que não será solicitado o raio real do segmento de círculo ao usuário. A Figura 19 ilustra as formas geométricas consideradas para as valas de infiltração, assim como os elementos das equações de cálculo de área e volume destes dispositivos.

Figura 19 – Sólidos geométricos utilizados para vala de infiltração da Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

$$VolVITri = \frac{l \times h}{2} \times b \quad (19)$$

$$VolVITrap = \frac{(l + L) \times h}{2} \times b \quad (20)$$

$$VolVICon = \frac{l \times h}{2} \times b \quad (21)$$

onde l é a abertura superficial (boca), L corresponde a abertura de fundo (base), h representa a altura média e b é o comprimento médio.

Para cálculo das áreas de infiltração das valas de infiltração é utilizada a equação 22, para os dispositivos triangulares e côncavos, e equação 23 para os dispositivos trapezoidais, sendo o do côncavo uma aproximação uma vez que não se solicitará ao usuário o raio real do segmento de círculo.

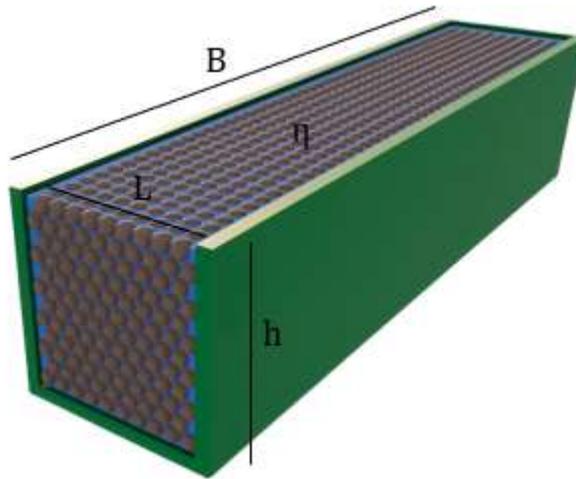
$$AreaVITri = AreaVIcon = 2 \times B \times \left(\sqrt{h^2 + l/2^2} \right) \quad (22)$$

$$AreaVITrap = 2 \times B \times \left(\sqrt{h^2 + ((L-l)/2)^2} \right) \quad (23)$$

3.6.4.3 Trincheira de Infiltração (TI)

As Trincheiras de Infiltração (TI) são dispositivos lineares, normalmente preenchidas com material poroso. As equações utilizadas para determinação do volume de trincheiras de infiltração são as indicadas por Baptista, Nascimento e Barraud (2011) na equação 24, quando não há inclinação na trincheira. A Figura 20 ilustra a TI retangular preenchida com material poroso, considerada para Ferramenta DDU+S, assim como os elementos utilizados nas equações deste dispositivo.

Figura 20 – Modelo considerado para Trincheira de Infiltração na Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

$$VolTI = \eta \times l \times h \times L \quad (24)$$

onde η é a porosidade do material de enchimento, h é a profundidade, l a largura e L o comprimento.

A área de infiltração de trincheiras é calculada pela equação 25.

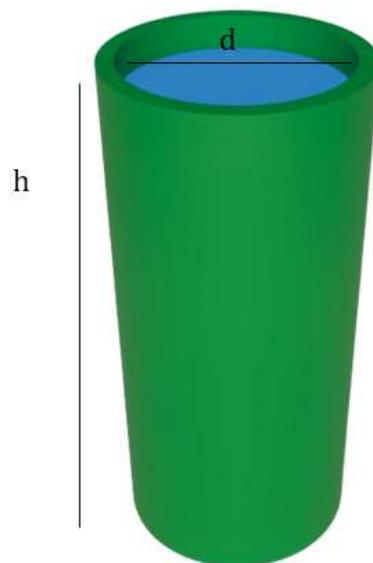
$$AreaInfTI = (L \times h \times 2 \times S_p) + (l \times L \times S_b) \quad (25)$$

sendo S_p a área a ser considerada de infiltração das paredes e S_b a área a ser considerada do fundo das trincheiras.

3.6.4.4 Poço de Infiltração (PI)

Os Poços de Infiltração (PI) são dispositivos que ocupam pequena área superficial e podem ser preenchidos ou não com material poroso. A Figura 21 ilustra o PI de infiltração cilíndrico preenchido com material poroso, considerado para Ferramenta DDU+S, assim como os elementos utilizados nas equações deste dispositivo.

Figura 21 – Modelo considerado para Poço de Infiltração na Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

Os poços de infiltração são elementos cilíndricos e têm seu volume calculado pela equação 26, podendo haver ou não material de enchimento. Já a área de infiltração é uma soma entre a área de fundo e a área de parede do cilindro, determinada pela equação 27.

$$VolInfPI = \left(\pi \times \left(\frac{d}{2} \right)^2 \times h \right) \times \eta \quad (26)$$

onde d é o diâmetro do poço, h a profundidade do poço e η a porosidade do material de enchimento.

$$AreaInfPI = \left(2 \times \pi \times \left(\frac{d}{2} \right) \times h \times S_p \right) + (\pi \times r^2) \times S_b \quad (27)$$

sendo S_p a porcentagem de área a ser considerada de infiltração das paredes e S_b a porcentagem de área a ser considerada do fundo.

3.6.4.5 Reservatório de água de chuva (RC)

Os Reservatórios de Água de Chuva (RC) são dispositivos normalmente retangulares ou cilíndricos, onde não se espera que possuam material de enchimento. A equação 28 permite calcular o volume de RC paralelepípedos, enquanto a equação 29 determina o volume de RC cilíndricos. A Figura 22 ilustra os RC em formato de paralelepípedos e cilíndricos, utilizados na Ferramenta DDU+S.

Figura 22 – Modelo considerado para Reservatório de Água de Chuva na Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

$$VolRr = l \times h \times L \quad (28)$$

onde h é a profundidade, l a largura e L o comprimento. Não são considerados para este dispositivo a possibilidade de introdução de materiais de preenchimento.

$$VolRc = \left(\pi \times \left(\frac{d}{2} \right)^2 \times h \right) \quad (29)$$

onde d é o diâmetro do poço e h a profundidade do poço.

3.7 Etapa 6 – Aplicação da Ferramenta DDU+S

O grupo de estudos G-Hidro - Sistemas Hídricos Urbanos da UFSCar possui vasta experiência na investigação de dispositivos de controle da água de chuva e no desenvolvimento urbano de baixo impacto. Adotaram-se neste trabalho as áreas de estudo e características do solo definidos em pesquisas anteriores para modelagem dos cinco dispositivos programados na Ferramenta DDU+S, o que permitiu avaliar o balanço hídrico destes dispositivos quando submetidos aos ECC, e visualizar claramente a contribuição destas estruturas para aproximação do ciclo hidrológico pré-urbanização.

Foram utilizados os ECC definidos através da metodologia exposta em 3.3.3 como fonte de geração de escoamento superficial nas bacias em estudo. Os ECC utilizados são, portanto, originários dos registros pluviométricos da estação pluviométrica automática de São Carlos, localizada a poucos metros dos locais que foram estudados pela Ferramenta DDU+S.

Para aplicação da ferramenta em cenários simulados, foi considerada parte da microbacia norte do campus da UFSCar, abrangendo os edifícios do Departamento de Medicina II, Gerontologia e estacionamento adjacente, conforme ilustrado na Figura 23. Foi proposta uma SI retangular em um primeiro momento, e na sequência uma VI trapezoidal foi simulada para recebimento das águas de escoamento superficial da microbacia.

Conforme indicado por Baptista, Nascimento e Barraud (2011) um dos usos recomendados das trincheiras de infiltração é em áreas de estacionamento. Neste estudo, adotou-se área de estacionamento de veículos presente no campus da UFSCar para coleta de áreas, estimativa do tipo de solo e proposta de disposição dos dispositivos. Este estacionamento é parte da microbacia de estudo das superfícies e valas de infiltração.

Por fim, para a avaliação dos poços de infiltração foi utilizado como referência o poço estudado por Ferreira (2016) que recebe a água do telhado do Laboratório de Biopolímeros da UFSCar, tomando como dados de partida as áreas de geração de escoamento superficial, as dimensões do poço instalado e as propriedades do solo local. Para aplicação do RC foi proposto a substituição do PI da edificação do Laboratório de Biopolímeros.

Figura 23 – Áreas de aplicação dos cenários simulados da Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

Para a construção dos modelos na Ferramenta DDU+S é necessário somar todas as áreas permeáveis e impermeáveis da microbacia antes do lançamento no programa, já que não é possível individualizar áreas de contribuição. A condutividade hidráulica do solo seguiu os parâmetros do trabalho de Rawls, Brakensiek e Miller (1983) para o solo local, que já foram cadastrados na Ferramenta DDU+S. O lançamento dos dados geométricos dos dispositivos simulados é simples na Ferramenta DDU+S, havendo campos específicos para cada dimensão.

Os cenários propostos são melhores descritos nas apresentações dos resultados obtidos nesta etapa, no item 4.5 deste trabalho. Os resultados das simulações foram resumidos e analisados nesse item, sendo as curvas detalhadas de cada elemento do balanço hídrico, ao longo do tempo, apresentadas no Apêndice B.

3.8 Etapa 7 - Avaliação da Ferramenta DDU+S

Os resultados obtidos com a Ferramenta DDU+S na Etapa 6 foram comparados com simulações realizadas utilizando o SWMM. O modelo SWMM pode ser aplicado em diversas escalas espaciais, variando desde lotes residenciais até bacias com centenas de hectares, além de permitir análises contínuas ou de eventos únicos. Para analisar o balanço hídrico dos dispositivos de drenagem calculado pela Ferramenta DDU+S para a Superfície de Infiltração (SI), Vala de Infiltração (VI), Trincheira de Infiltração (TI), Poço de Infiltração (PI) e Reservatório de Chuva (RC), o SWMM foi utilizado para estudo comparativo direto das proporções calculadas de cada elemento do ciclo hidrológico.

Existem diversas etapas necessárias para construção e obtenção de respostas satisfatórias no modelo SWMM. Neste estudo foi utilizada a versão 5.1.015 que já incorpora os principais dispositivos sustentáveis utilizados. A fim de não tornar o modelo demasiadamente complexo e manter estrutura próxima ao utilizado pela Ferramenta DDU+S, foi estabelecido que cada DDUS seria implantado em uma bacia à parte das bacias geradoras de escoamento superficial. A rigor, manter uma bacia exclusiva para os DDUS não é necessário, porém essa forma de modelagem permite uma melhor visualização das vazões. As bacias que representam os DDUS possuem área total idêntica à necessária para aplicação do dispositivo e foi associada a uma série pluviométrica de dados nulos.

Foi considerado neste estudo, como método de cálculo do escoamento superficial, a metodologia *curve number*. É importante observar aqui que a equação utilizada no SWMM é diferente da equação *curve number* utilizada na Ferramenta DDU+S, sendo chamada por Rossman e Huber (2016) de método clássico do modelo *SCS Curve Number*. Para cálculo da infiltração do dispositivo de infiltração o SWMM utiliza o método Green-Ampt modificado por Mein e Larson. Por não possuir cadastrado em seu sistema todos os dispositivos utilizados na Ferramenta DDU+S, foi necessário adotar algumas estratégias de simulação no SWMM, que serão expostas a seguir.

3.8.1 Construção do modelo da superfície de infiltração no SWMM

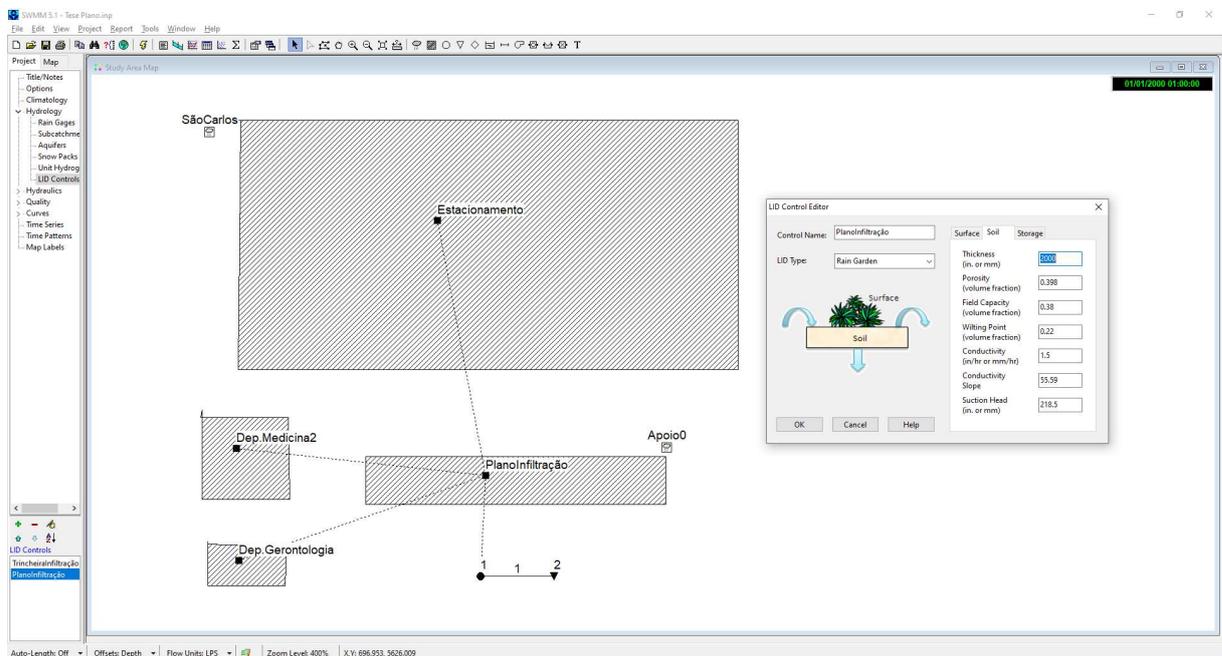
O SWMM possui 2 alternativas para modelagem de superfícies de infiltração, sendo a primeira delas “*bio-retention cell*” e a outra “*rain garden*”. A diferença fundamental entre os 2 dispositivos é que o primeiro possui células de armazenamento da água na porção inferior. Dessa forma, o modelo “*rain garden*” é mais adequado para a proposta em estudo. Para a

construção da camada de solo do modelo, o SWMM solicita além da porosidade, condutividade hidráulica, sucção na frente de molhamento e outras informações como a umidade mínima do solo para sobrevivência das plantas, que considera apenas a água higroscópica (*wilting point*), a capacidade de campo (*field capacity*) que leva em consideração a umidade do solo após sua drenagem completa e, por fim a inclinação da curva log entre a condutividade hidráulica e a umidade do solo (*conductivity slope*). As informações de *wilting point* e *field capacity* foram obtidas no trabalho de Saxton e Rawls (2006) e o *conductivity slope (CS)* foi determinado pela equação 30, sugerida por Rossman (2015).

$$CS = 0,48 \times (\%Areia) + 0,85 \times (\%Argila) \quad (30)$$

A Figura 24 ilustra a construção do modelo da microbacia norte da UFSCar com a SI no SWMM. Foram construídas um total de 4 bacias, sendo 3 representativas das áreas de contribuição e uma para o dispositivo de drenagem implantado.

Figura 24 – Modelagem do Superfície de infiltração no SWMM



Fonte: Autor (2022)

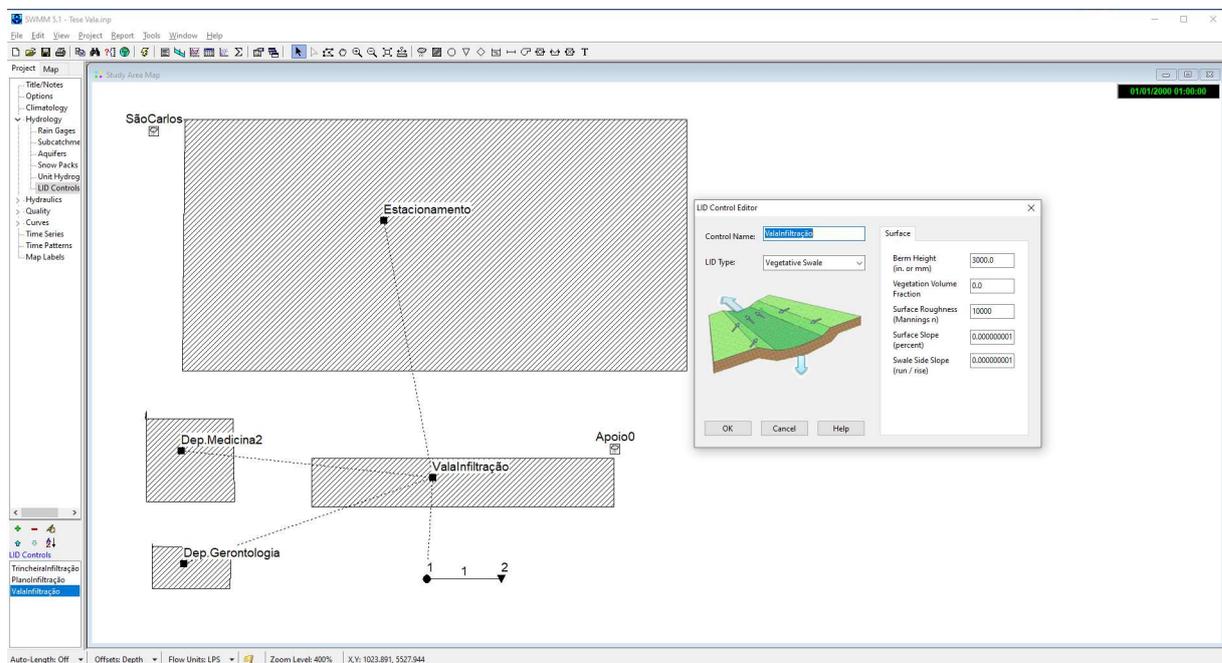
No modelo SWMM é possível informar os valores de temperatura para cálculo da evapotranspiração, ou é possível informar diretamente o valor da evapotranspiração mensal,

sendo a última opção adotada para este modelo. Os dados de entrada do modelo SWMM estão apresentados no Apêndice D deste trabalho.

3.8.2 Construção do modelo da vala de infiltração no SWMM

Para as valas de infiltração, a estratégia de modelagem no SWMM utilizou como dispositivo padrão o “*vegetative swale*” que tem tradução livre de valas gramadas. Em testes realizados utilizando a estratégia adotada para as superfícies de infiltração, onde foi utilizado o dispositivo “*rain garden*” alternando para o “*vegetative swale*”, foram obtidos resultados similares. A diferença da programação do “*vegetative swale*” no SWMM, é que este modelo espera que haja fluxo de água neste dispositivo, semelhante aos canais gramados utilizados no Brasil, o que não ocorre nas valas de infiltração. Assim, foi inserido um valor elevado de coeficiente de Manning e um valor reduzido da declividade como forma de simular a detenção da água. Uma vantagem em adotar o “*vegetative swale*” está na possibilidade de atribuir um valor pra inclinação das paredes do dispositivo. A Figura 25 ilustra a tela de modelagem da VI no SWMM.

Figura 25 – Modelagem da Vala de Infiltração no SWMM



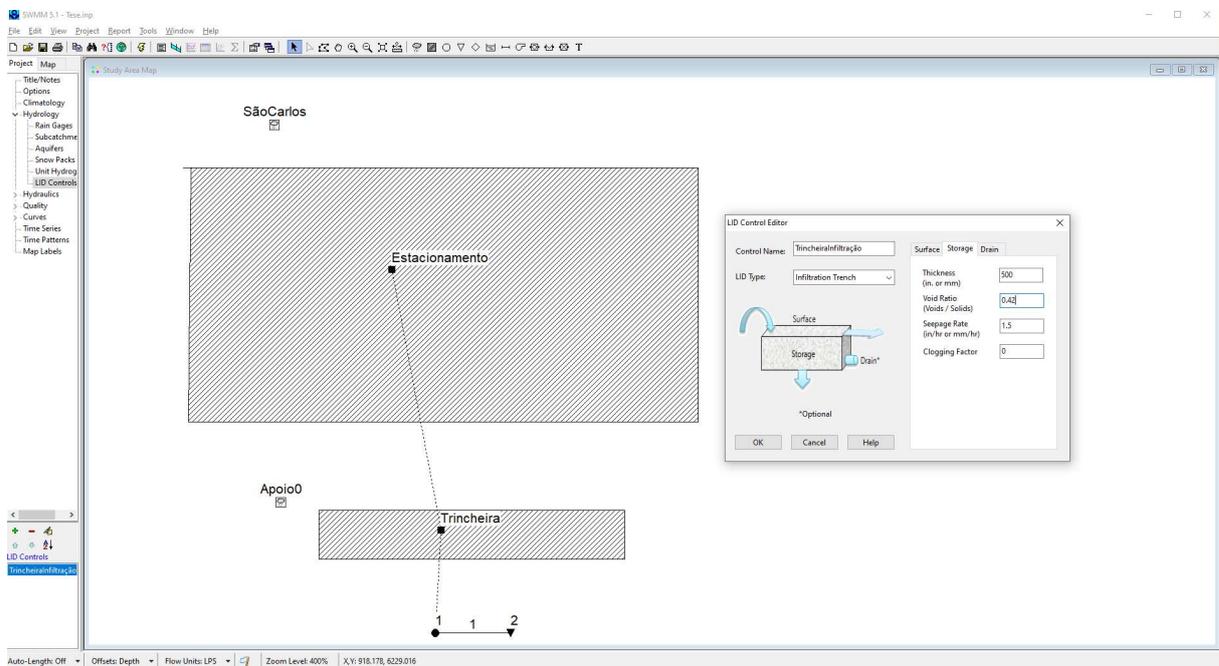
Fonte: Autor (2022)

Os dados de entrada do modelo SWMM para a vala de infiltração estão apresentados no Apêndice D deste trabalho.

3.8.3 Construção do modelo da trincheira de infiltração no SWMM

A trincheira foi projetada com material de enchimento de porosidade 30%, descrito por Baptista, Nascimento e Barraud (2001) como sendo porosidade comum da brita. Neste ponto deve ser dada atenção ao fato que o SWMM utiliza como indicador de referência a taxa de vazios e não a porosidade, o que é contra intuitivo. Para esta trincheira não foram atribuídos drenos, sendo que o volume extrapolado irá escoar superficialmente ao encher a trincheira para o exutório. A Figura 26 mostra o modelo no SWMM.

Figura 26 – Modelagem da trincheira de Infiltração no SWMM

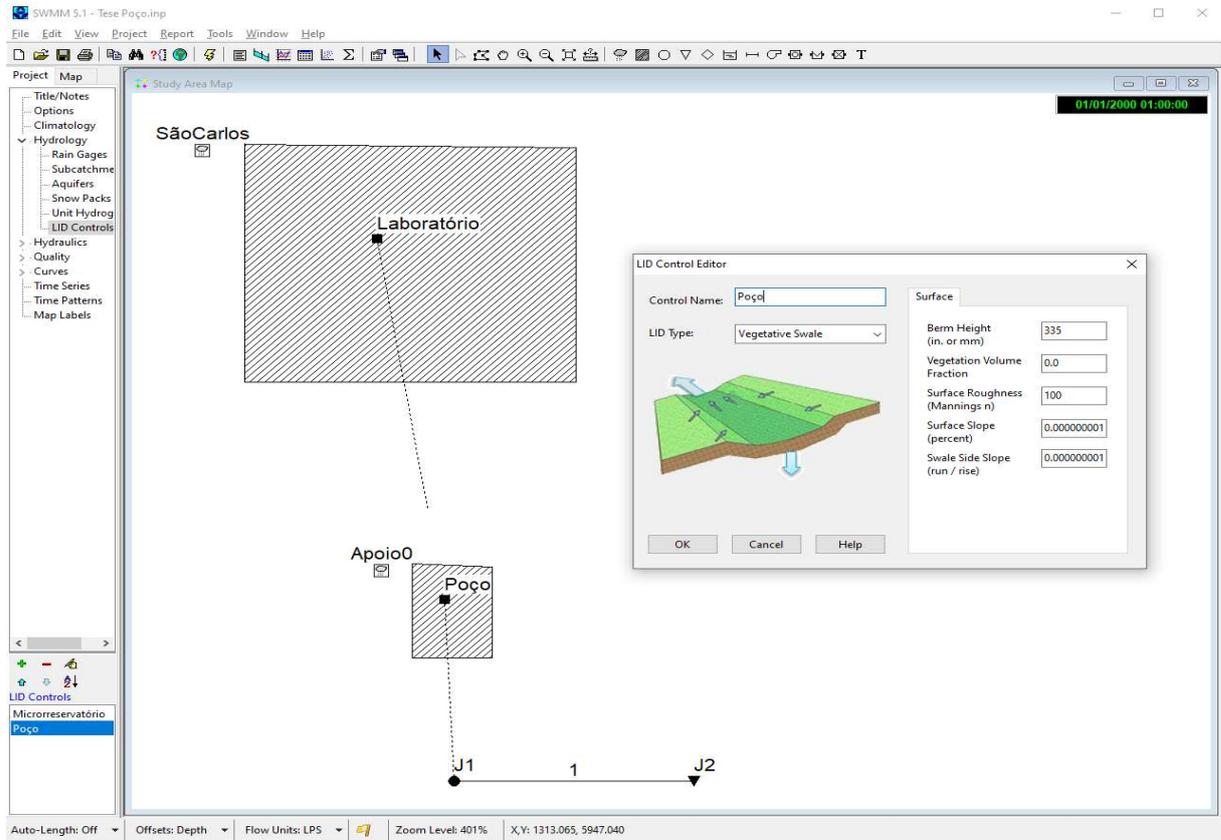


Fonte: Autor (2022)

3.8.4 Construção do modelo do poço de infiltração no SWMM

O modelo SWMM na sua atual versão 5.1.015 não possui programado os poços de infiltração como dispositivo LID. Conforme comentado por Gonçalves e Teixeira (2021) são necessárias mais pesquisas na área de drenagem urbana sustentável que utilizem dispositivos que refletem a realidade nacional. Para a simulação de poços de infiltração adotou-se como partida as valas gramadas do SWMM, que foram modeladas com inclinação 0% de forma a armazenar toda a água recebida. A Figura 27 ilustra esta estratégia de modelagem e a tela principal do modelo.

Figura 27 – Modelagem do poço de infiltração isolado no SWMM



Fonte: Autor (2022)

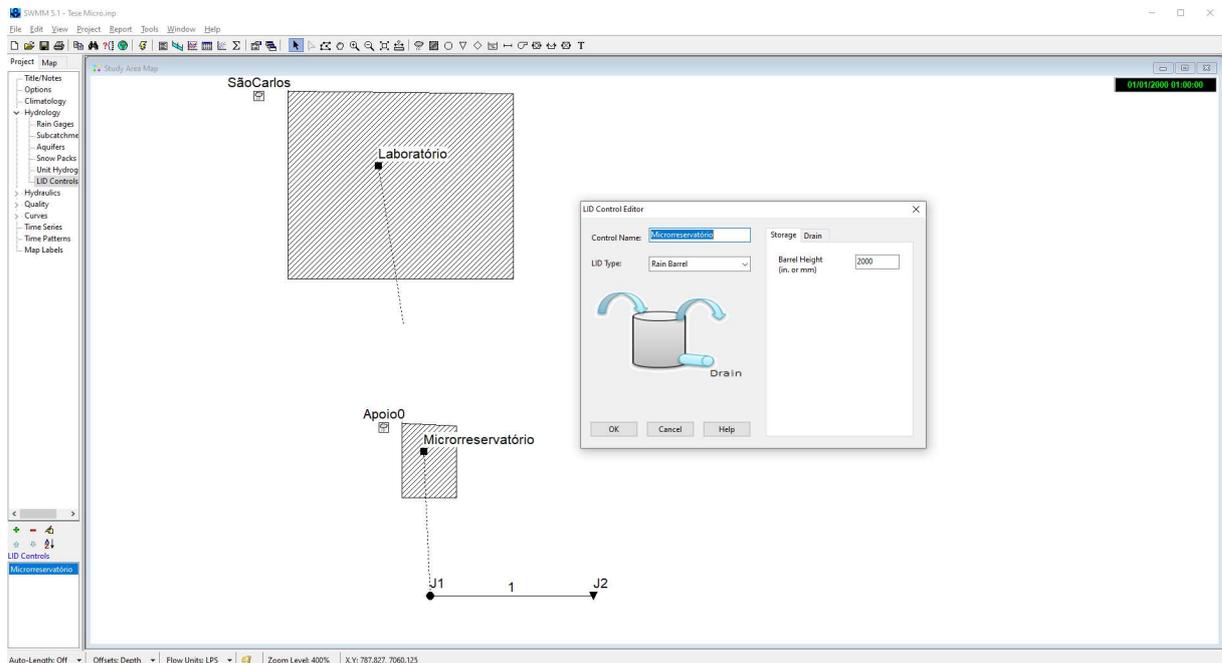
Há uma diferença fundamental entre as valas e os poços que é quanto a sua área de infiltração, onde os poços possuem grande área de infiltração de paredes e pouca de fundo, e as valas trabalham de forma oposta na maior parte dos casos. Dessa forma, para a área superficial da vala foi atribuída a área de infiltração do poço, e para a altura da vala fez-se a proporção entre a área superficial e o volume real do poço.

Adotando esta estratégia, deve-se sempre utilizar uma bacia que represente o PI, pois o valor da taxa de infiltração será determinado pelo solo da bacia, já que não há como determinar a condutividade hidráulica do solo onde o LID está implantado pela página de modelagem dos dispositivos LID do SWMM. Os dados de entrada do modelo SWMM para o poço de infiltração estão apresentados no Apêndice D deste trabalho.

3.8.5 Construção do modelo do reservatório de água de chuva no SWMM

A simplicidade deste dispositivo é refletida na sua modelagem. Deve ser dada atenção apenas ao dreno do dispositivo, uma vez que o SWMM permite o uso de válvulas temporizadas ou de nível para alívio do RC. Neste estudo foi desconsiderado a existência de drenos, supondo a extravasão pelo topo do dispositivo. A Figura 28 ilustra a tela principal do modelo.

Figura 28 – Modelagem do reservatório de água de chuva no SWMM



Fonte: Autor (2022)

3.8.6 Testes Estatísticos para avaliação do desempenho da Ferramenta DDU+S

Na sequência, para avaliar o desempenho da Ferramenta DDU+S foram utilizados como referência os resultados obtidos pelo SWMM, devido à alta aceitação desse modelo. Existem diversos métodos matemáticos que permitem avaliar modelos computacionais. Nesta tese foram adotados 3 critérios recomendados pela Associação dos Engenheiros Civis Americanos (ASCE, 1993) para modelos de bacias hidrográficas, sendo o primeiro uma simples análise percentual dos desvios (PBIAS), apresentado na equação 31, o segundo através da razão dos desvios (RSR), apresentado na equação 32 e o terceiro através do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), apresentado na equação 33.

$$PBIAS (\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{ref} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{ref})} \times 100 \quad (31)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{ref} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{ref} - Y^{méd})^2}} \quad (32)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{ref} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{ref} - Y^{méd})^2} \right] \quad (33)$$

onde, Y_i^{ref} é o dado de referência, neste trabalho os dados do SWMM, Y_i^{sim} é o dado simulado pela Ferramenta DDU+S, e $Y^{méd}$ são os dados médios da referência.

E desejável que o percentual dos desvios (PBIAS) seja o mais próximo de zero possível, o que significaria modelos perfeitamente idênticos. Esse indicador é um complemento a análise visual dos gráficos. Já o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode variar de 0 a 1, sendo 1 o indicador de modelos idênticos. Matematicamente é possível obter um coeficiente NSE menor do que zero, o que significa grande discrepância dos modelos. Por fim, para a razão dos desvios (RSR) deseja-se o menor valor possível, que indica modelos mais semelhantes. Este modelo compara os dados simulados com a média do modelo de referência, também variando de 0 a 1.

Moriasi et al. (2007) realizou extenso estudo bibliográfico e propôs indicadores de desempenho para os três critérios sugeridos pela ASCE para avaliação de modelos, apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Avaliação de desempenho para testes estatísticos PBIAS, NSE e RSR

Avaliação de Desempenho	PBIAS	NSE	RSR
Muito Bom	$PBIAS < \pm 10\%$	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
Bom	$\pm 10\% \leq PBIAS < \pm 15\%$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$0,50 < RSR \leq 0,60$
Satisfatório	$\pm 15\% \leq PBIAS < \pm 25\%$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$0,60 < RSR \leq 0,70$
Insatisfatório	$PBIAS \geq \pm 25\%$	$NSE \leq 0,50$	$RSR > 0,70$

Fonte: Moriasi et al. (2007)

Uma vez que é possível obter avaliações diferentes para cada evento de chuva característico em um dado item do balanço hídrico, foram atribuídas notas de 1 a 4 para cada avaliação, conforme ilustra a Tabela 10, e realizada a média aritmética dos pontos (GPA), exibida na equação 34, para avaliação de desempenho da Ferramenta DDU+S para cada elemento do balanço hídrico e de forma global.

Tabela 10 – Pontuação para avaliação de desempenho

Avaliação de Desempenho	Pontuação (G)
Muito Bom	4
Bom	3
Satisfatório	2
Insatisfatório	1

Fonte: Autor (2022)

$$GPA = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{n} \quad (34)$$

onde G é a pontuação atribuída aos níveis de desempenho e n é o número de avaliações realizadas. Para esta tese, foi adotado que avaliações com GPA abaixo de 1,6 indicariam desempenho geral insatisfatório da Ferramenta DDU+S para o item avaliado. Adotando o mesmo princípio de cálculo do GPA é possível calcular a média aritmética final (GPF) para cada um dos dispositivos estudados.

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta inicialmente os resultados da determinação dos eventos de chuva obtidos com os dados pluviométricos da EMA São Carlos. Em seguida são feitas as análises comparativas dos ECC com o hietograma de Huff, e análise dos fatores intervenientes dos ECC. Por fim é apresentada a ferramenta computacional com aplicações em cenários simulados.

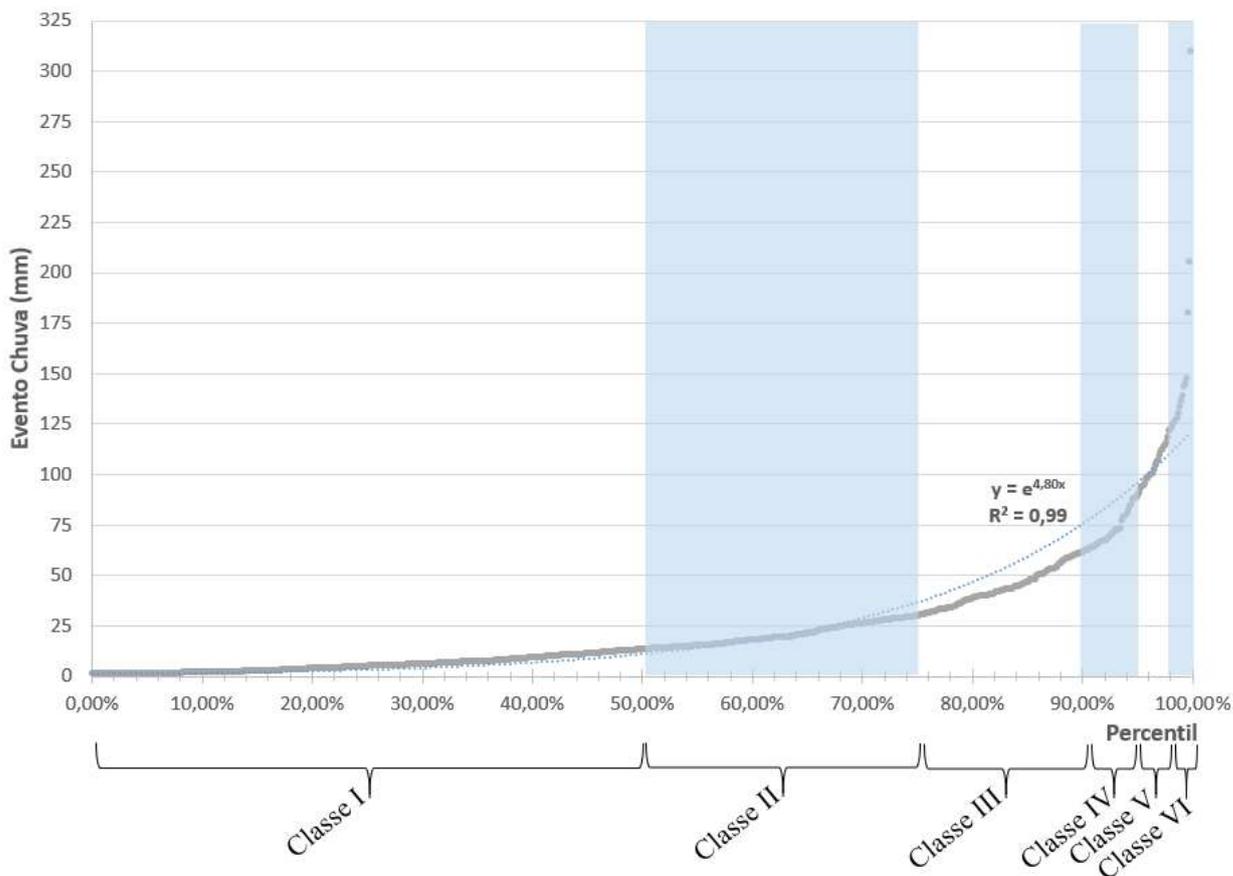
4.1 Eventos de Chuva

4.1.1 Categorização dos Eventos de Chuva Históricos

Os eventos de chuva da cidade de São Carlos foram classificados nas 6 categorias propostas. Na Figura 29 estão plotadas as alturas dos eventos pluviométricos classificados de acordo com a proporção da população de dados. A linha de tendência exponencial dos dados mostra excelente ajuste para as duas primeiras classes, com aumento da discrepância a partir da terceira classe.

O coeficiente de determinação foi calculado como sendo 0,99, o que mostra bom ajuste à amostra. Observa-se ainda, nessa figura, que os eventos com volume total precipitado de até 50 mm representam cerca de 85% dos eventos de chuva registrados, enquanto que os eventos com mais de 100 mm ocorrem em apenas 4% dos registros históricos de chuva. A Tabela 11 sintetiza numericamente as informações da Figura 29, apontando a quantidade de eventos e o intervalo de chuva em mm para cada uma das classes definidas.

Figura 29 – Eventos de chuva (mm) vs. Tempo de retorno



Fonte: Autor (2022)

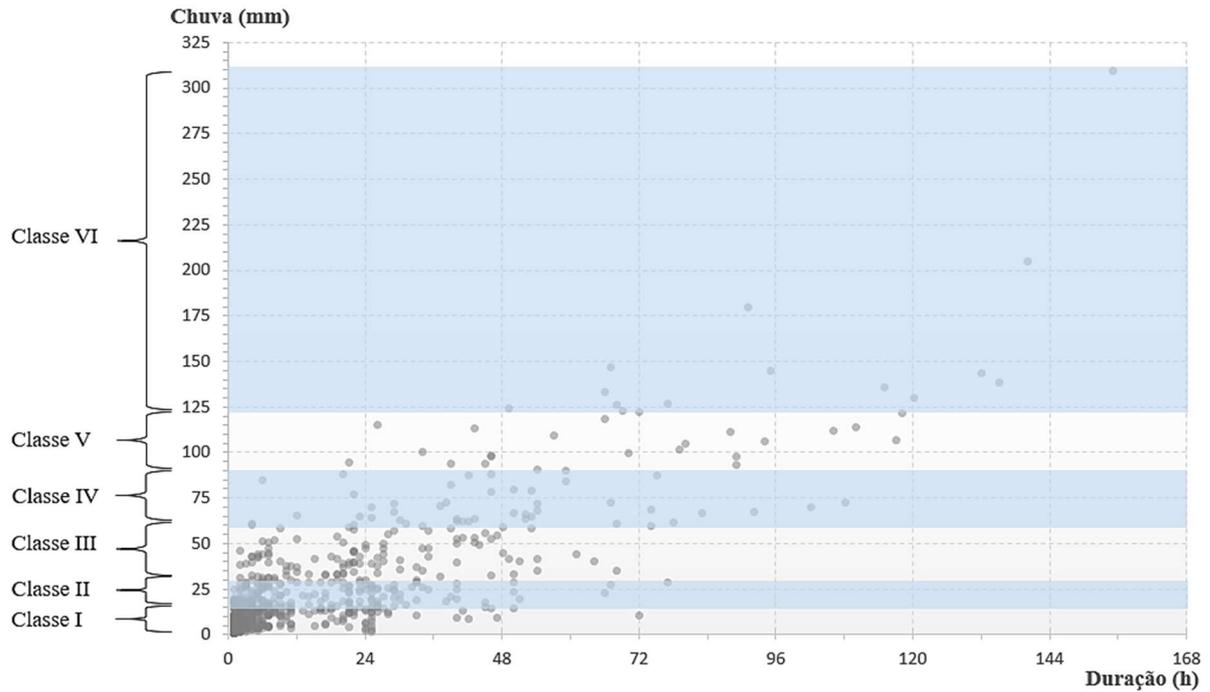
Tabela 11 – Classes de chuva por percentis para São Carlos

Classe	Descrição das categorias	Qtde de Eventos	% de Eventos	Intervalos de chuva (mm)
I	Chuvas até o 50º percentil	385	50	1,0 – 13,2
II	Chuvas entre o 50º percentil e o 75º percentil	193	25	13,2 – 30,0
III	Chuvas entre o 75º percentil e o 90º percentil	115	15	30,0 – 61,0
IV	Chuvas entre o 90º percentil e o 95º percentil	39	5	61,0 – 88,6
V	Chuvas entre o 95º percentil e o 98º percentil	23	3	88,6 – 121,8
VI	Chuva acima do 98º percentil	15	2	121,8 – 310,0

Fonte: Autor (2022)

A Figura 30 foi construída a partir da altura total de chuva de cada evento em relação a sua duração total. Cada ponto na figura representa um único evento de chuva, totalizando os 770 eventos. As classes de acordo com os percentis estão representadas pela altura de chuva.

Figura 30 – Altura dos eventos de chuva vs. Duração dos eventos de chuva



Fonte: Autor (2022)

É possível avaliar através da Figura 29 que existe uma certa relação de proporcionalidade entre duração do evento e volume total precipitado. A grande maioria dos eventos possuem duração menor do que 12h. É possível notar ainda um evento extremo registrado com 310 mm de chuva.

4.1.2 Seleção dos Eventos de Chuva Característicos (ECC)

A Figura 31 mostra as seis categorias de eventos determinadas pelos percentis da amostra, construída de acordo com a intensidade pluviométrica do evento em mm/h pela duração total do mesmo em horas. As propriedades dos Eventos de Chuva Característicos selecionados estão descritas na Tabela 12. Os ECC foram numerados de 1 a 6 de acordo com sua categoria de tempo de retorno.

Figura 31 – Determinação dos Eventos de Chuva Característicos para as diferentes classes (continua)

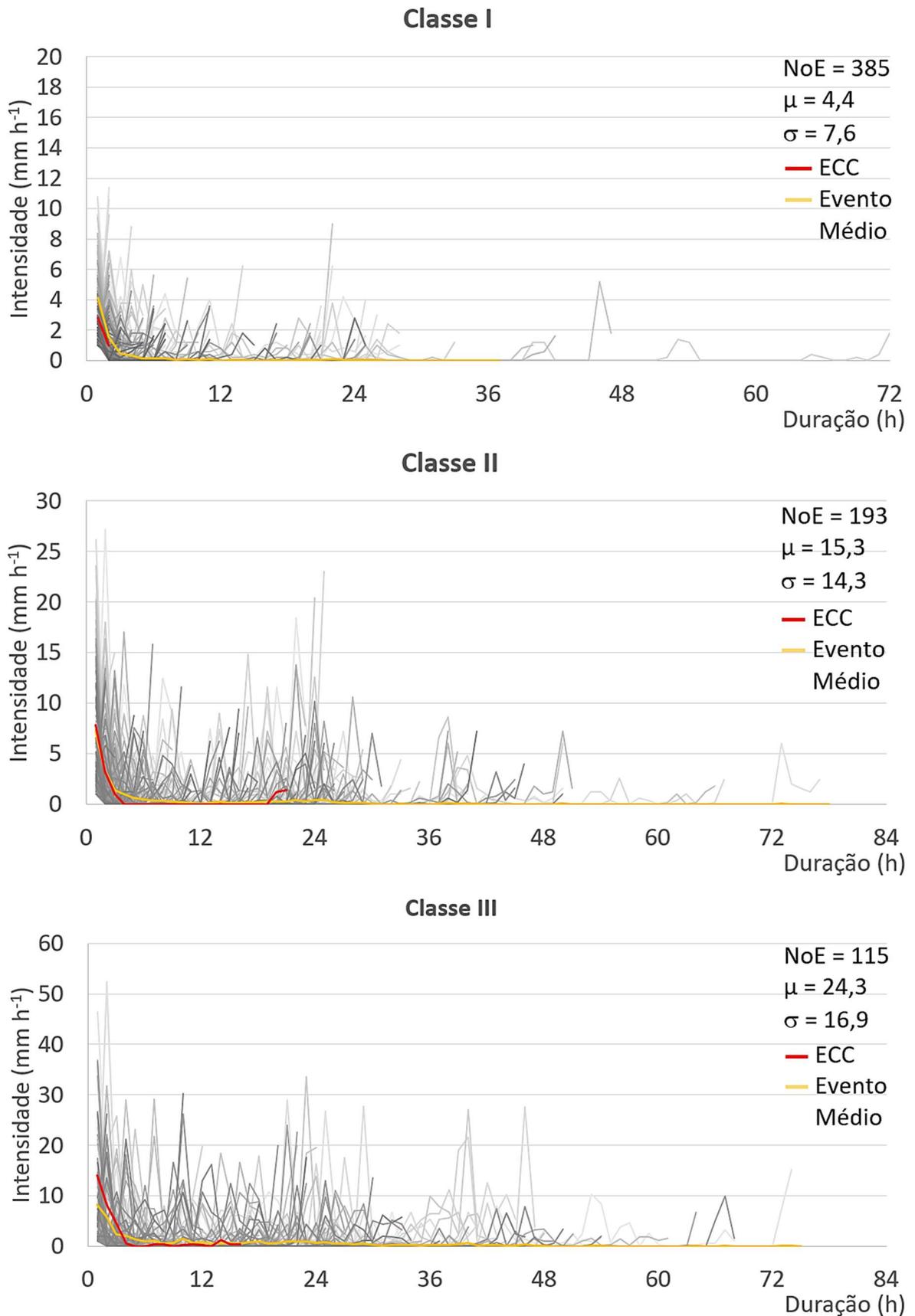
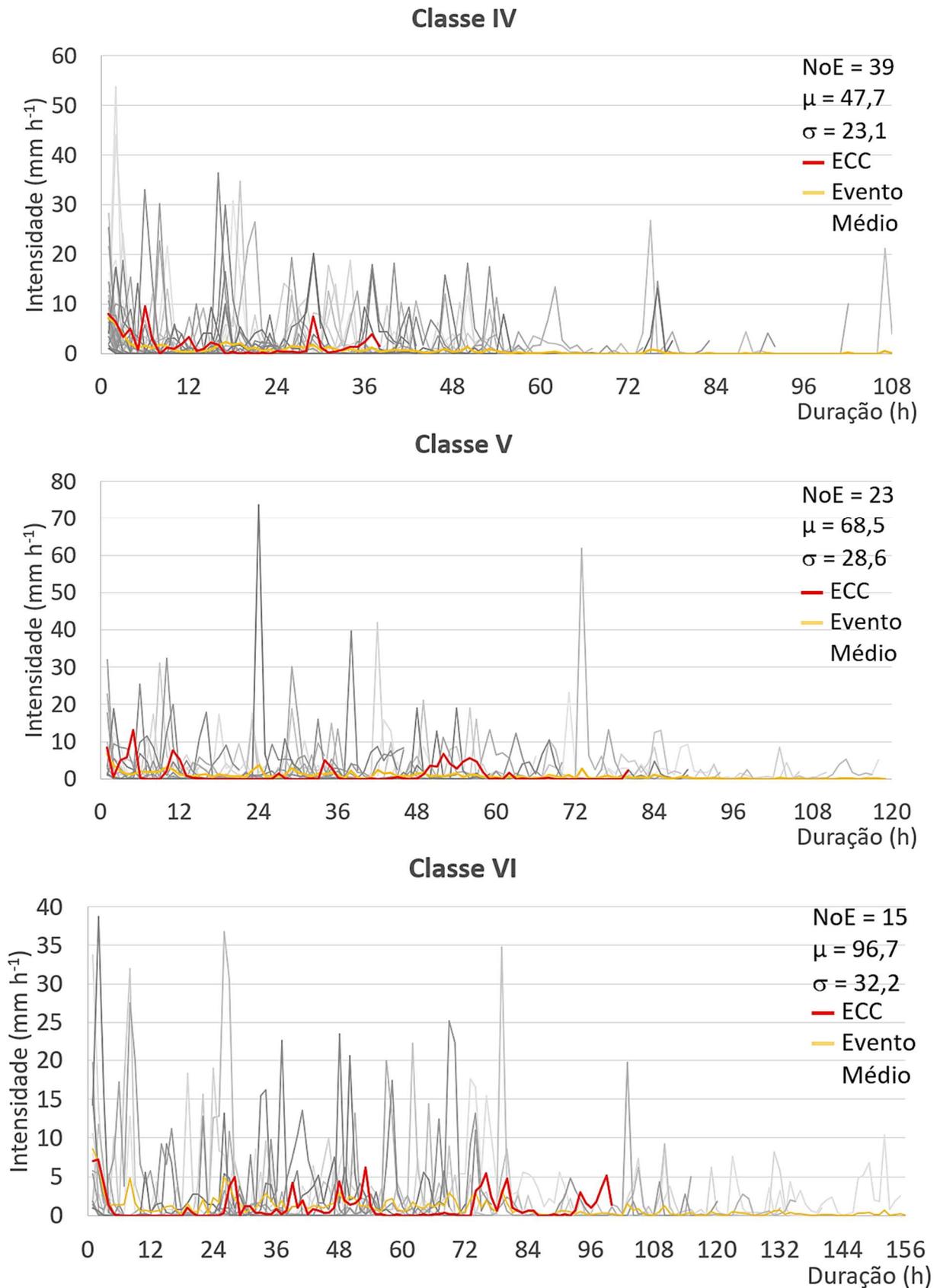


Figura 31 – Determinação dos Eventos de Chuva Característicos (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

Todos os eventos históricos de uma categoria são mostrados em linhas cinzas. A linha amarela representa um evento sintético médio daquela categoria, e a linha vermelha representa o evento histórico que mais se aproxima do evento médio obtido pelo método dos mínimos quadrados, sendo este o evento de chuva característico daquela categoria. São apresentados ainda em cada categoria o número de eventos (NoE), a duração média dos eventos (μ), e o desvio padrão da duração dos eventos (σ). A adoção de classes pluviométricas a partir de percentis da amostra minimiza o impacto do uso de séries pluviométricas de baixa duração. Apesar disso, a classe VI que representa os eventos de chuva acima do 98º percentil possui apenas 15 dados para essa amostra.

Tabela 12 – Propriedades dos Eventos de Chuva Característicos

ECC	Chuva (mm)	Duração (horas)	Horas com intensidade nula	Imín (mm h⁻¹)	Imáx (mm h⁻¹)	IMéd (mm h⁻¹)
1	5,6	2	0	1,8	3,8	2,8
2	14,6	21	16	1,0	7,8	0,7
3	40,0	22	5	0,2	14,0	1,8
4	73,2	38	5	0,2	9,6	1,9
5	105,0	80	41	0,2	13,2	1,3
6	138,8	135	50	0,2	7,2	1,0

Fonte: Autor (2022)

Algumas particularidades podem ser notadas nesta tabela, como o fato do ECC 5, que possui uma duração total de 80 horas, apresentar 41 horas de registros nulos, havendo, portanto, muitos períodos curtos de chuva associados a períodos curtos secos. Observa-se também que o ECC 6, que possui o maior volume total, apresentou intensidades máximas e médias pequenas comparado aos demais. O ECC 1, que é uma chuva de menor volume total e duração, apresentou a maior intensidade média dos eventos característicos. Apenas o ECC 2 apresentou intensidade média abaixo de 1 mm/h.

4.1.3 Discussões a respeito da metodologia ECC

É passível de questionamentos a forma de seleção dos percentis da amostra e consequentemente da quantidade de eventos pluviométricos em cada uma dessas classes. Mudanças nos padrões adotados nesse trabalho irão modificar consideravelmente a escolha dos

ECC. Buscou-se, nesse trabalho, utilizar percentis de amostra já adotados em outros estudos, como o do recente trabalho de Khan, Chapa e Hack (2020) e que mantivessem os intervalos de chuva dentro de cada classe com amplitudes semelhantes. Esses intervalos podem ser ajustados de acordo com os interesses de cada pesquisa.

Quanto à duração dos dados de chuva utilizados neste trabalho, a cada hora, é a máxima recomendada para determinação de eventos pluviométricos. A utilização de uma escala menor, como a cada 5 minutos, forneceria uma evolução do evento mais realista, porém além dos objetivos do estudo e com aumento do esforço computacional.

Outrossim, deve ser considerado que a extração de eventos pluviométricos de uma série de dados históricos demanda recursos computacionais consideráveis. Dados de grande precisão, intervalos entre eventos muito curtos e séries muito longas podem levar ao aumento excessivo do custo computacional.

Outro ponto de destaque é a escolha do período entre eventos e da intensidade mínima horária a ser considerada para o evento, que serão abordados nas próximas seções deste trabalho.

4.2 Análise Comparativa ECC vs. IDF

4.2.3 Comparativo Hietogramas de Projeto com ECC

Nesta etapa do trabalho, foram construídos hietogramas do tipo Huff para análise da evolução do ECC ao longo do tempo em comparação a estes gráficos tradicionais. Em todos os casos, a duração do evento e a altura de chuva total foi a mesma determinada no ECC para construção do hietograma de Huff. A Figura 32 ilustra as chuvas acumuladas para cada hietograma.

Figura 32 – Hietogramas acumulados de Huff e ECC (continua)

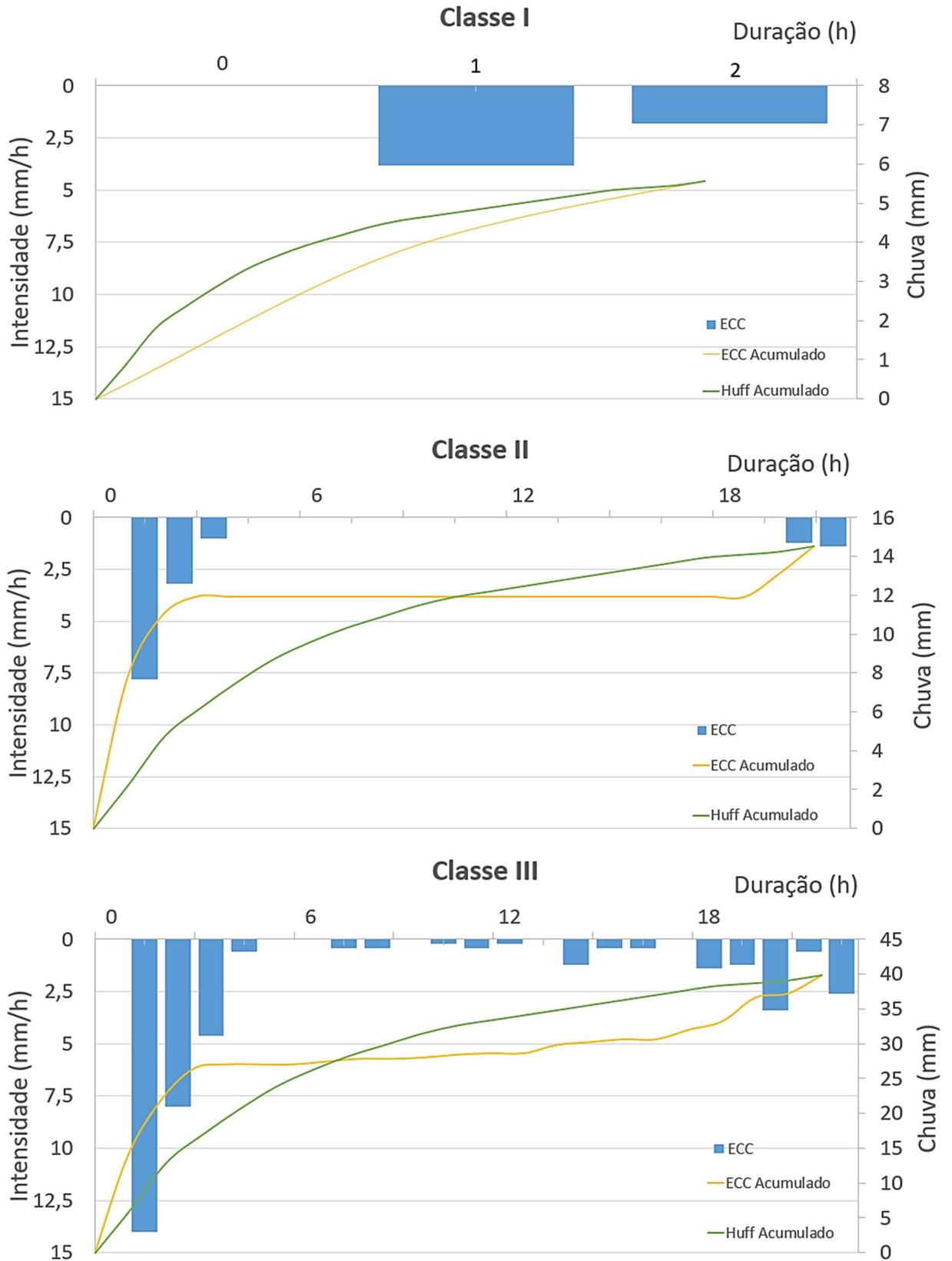
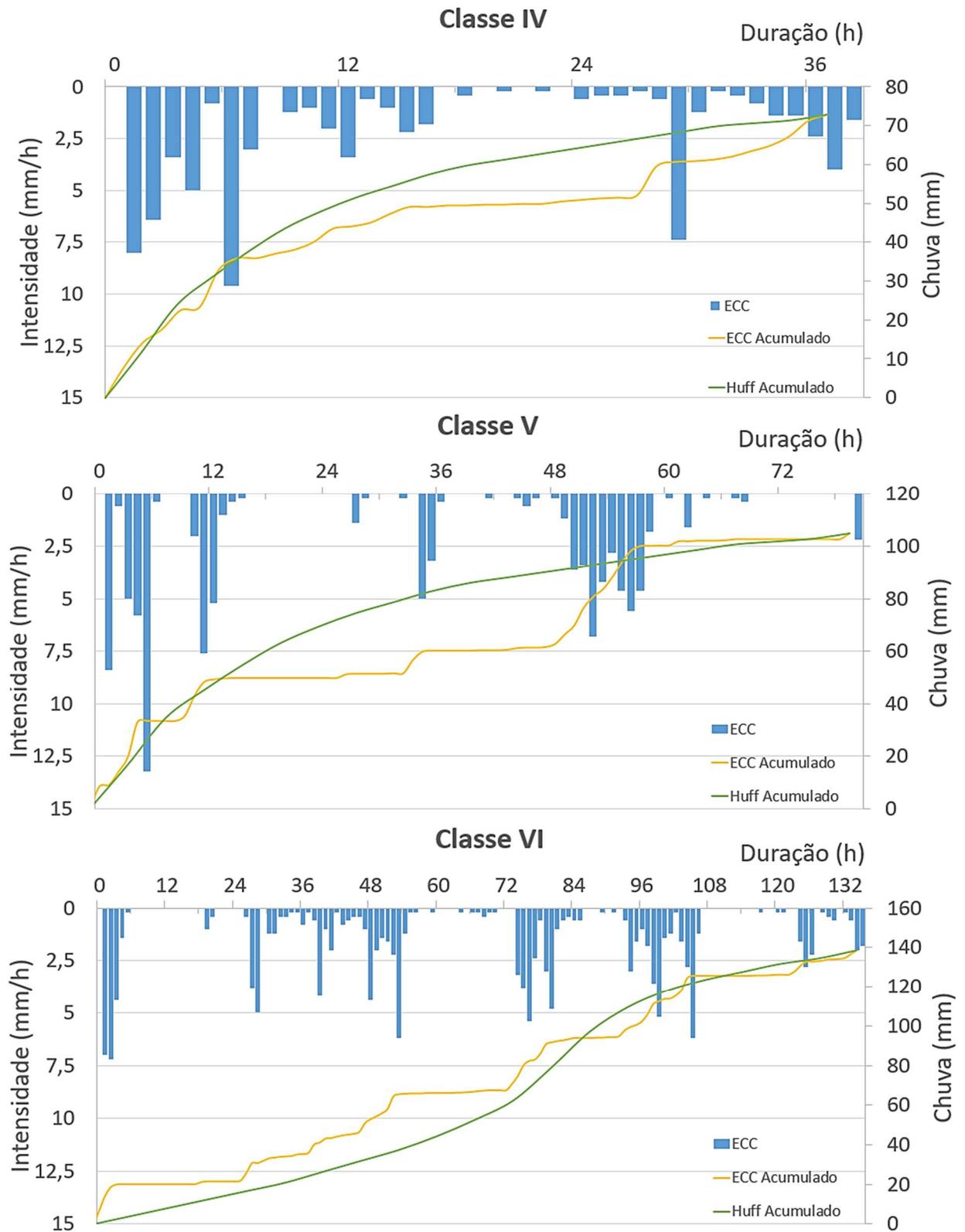


Figura 32 – Hietogramas acumulados de Huff e ECC (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

Há diferenças de escala entre os hietogramas para melhor visualização de cada caso. Para o hietograma de Huff, foram selecionados os quartis que melhor representassem o pico do ECC, sendo 3º quartil para a classe VI e 1º quartil para as demais classes.

A metodologia ECC apresentou de forma geral bom ajuste aos hietogramas de Huff comumente utilizados em projetos de drenagem, especialmente para as classes IV, V e VI, o que permite considerar que os ECC podem ser uma alternativa de fácil aceitação pelo meio técnico para simulação de dispositivos sustentáveis de drenagem pluvial, onde as variações de intensidade é fator de grande importância no seu comportamento. Para as classes II e III, a elevada intensidade pluviométrica nas primeiras horas do evento não foram bem representadas pelo hietograma de Huff, mesmo considerando o 1º quartil, mostrando que se deve ter cuidado adicional para representação da chuva através de hietogramas padrão para as chuvas de menor altura total. É importante observar que os resultados obtidos são válidos para esta série histórica do município de São Carlos, não devendo ser generalizada para outras localidades.

4.3 Estudo dos Fatores Intervenientes nos ECC

4.3.1 Impacto da Escolha de Tempo Entre Eventos Para a Determinação do ECC

Para avaliar o impacto do intervalo entre eventos na determinação dos eventos de chuva característicos, foram determinados ECC de acordo com os critérios de percentis já estabelecidos neste trabalho e intensidade mínima de 1mm/h para intervalos entre eventos (IE) de 6, 12, 24 e 48 horas. A Tabela 13 resume os principais valores das categorias de chuvas obtidas para o município de São Carlos em função da alteração do intervalo entre eventos. A Figura 33 mostra a quantidade de eventos históricos encontrados em cada caso através de gráfico de funil.

Figura 33 – Quantidade de eventos históricos determinados em função do intervalo entre eventos



Fonte: Autor (2022)

Tabela 13 - Classes de chuva para São Carlos em função do Tempo Entre Eventos

IE=6h I _{mín} =1mm/h					IE=12h I _{mín} =1mm/h			
Classe	P _{mín} (mm)	P _{máx} (mm)	N ^o Eventos	% Eventos	P _{mín} (mm)	P _{máx} (mm)	N ^o Eventos	% Eventos
Classe I	1,0	7,8	651	50,0	1,0	9,8	537	50,0
Classe II	7,8	18,4	325	25,0	9,8	22,6	269	25,0
Classe III	18,4	33,2	195	15,0	22,6	41,8	161	15,0
Classe IV	33,4	45,2	65	5,0	42,0	57,2	54	5,0
Classe V	45,2	64,0	39	3,0	58,4	81,4	32	3,0
Classe VI	65,8	152,4	26	2,0	82,6	198,4	21	2,0
		Total	1301	100		Total	1074	100

IE=24h I _{mín} =1mm/h					IE=48h I _{mín} =1mm/h			
Classe	P _{mín} (mm)	P _{máx} (mm)	N ^o Eventos	% Eventos	P _{mín} (mm)	P _{máx} (mm)	N ^o Eventos	% Eventos
Classe I	1,0	13,2	385	50,0	1,0	19,6	253	50,0
Classe II	13,2	30,0	193	25,0	19,6	50,2	126	25,0
Classe III	30,2	61,0	115	15,0	50,4	96,8	76	15,0
Classe IV	61,4	88,6	39	5,0	97,8	128,0	25	5,0
Classe V	90,0	121,8	23	3,0	130,0	160,2	15	3,0
Classe VI	122,4	310,0	15	2,0	160,4	391,2	10	2,0
		Total	770	100		Total	505	100

Fonte: Autor (2022)

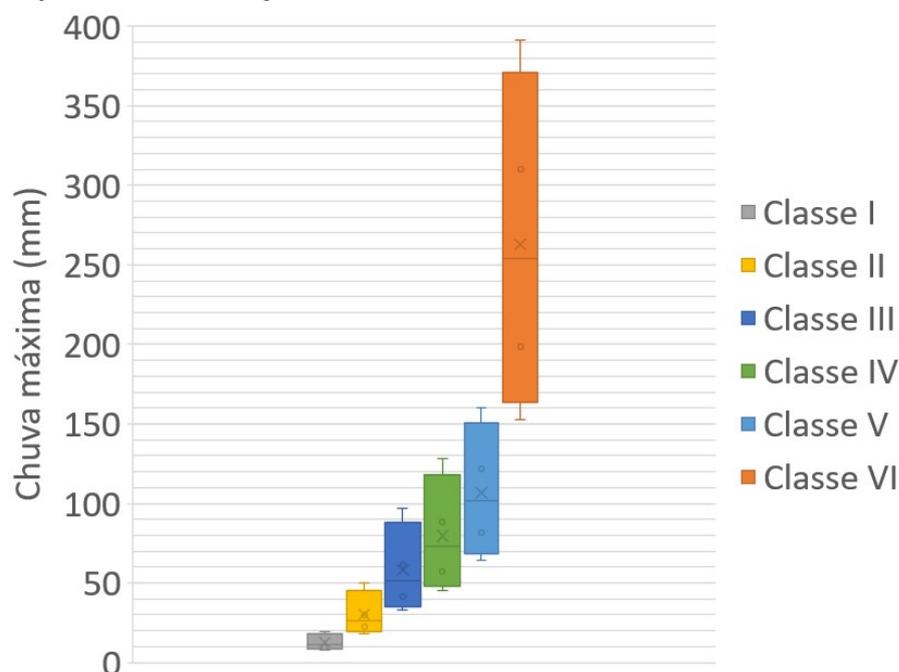
É possível observar que o aumento do intervalo entre eventos encaminha reduções significativas da quantidade de eventos e no incremento das alturas máximas de chuva de cada classe. A diferença entre a altura mínima e máxima em cada classe também é severamente alterada, o que irá impactar diretamente na escolha dos ECC. Para o IE de 6 horas o valor máximo de altura pluviométrica encontrado foi de 152,4 mm, enquanto que para o IE de 48 horas foi determinado um evento com 391,2 mm, o que ilustra bem essa diferença de amplitude entre as classes para cada intervalo entre eventos. Para as classes que abrangem até o 75º percentil, as diferenças entre os intervalos de chuva são menos sensíveis a variação do intervalo entre eventos, sendo que essa amplitude tende a aumentar para os eventos com maior duração e por consequência de maior altura total.

Através da Figura 33 é possível observar que, para intervalos de 6 horas, são gerados cerca 1,7 vezes mais eventos do que para o intervalo de 24 horas. Mesmo comparando o intervalo de 24 horas com o de 48 horas, existe uma diferença de cerca de 52%. Como as classes estão sendo determinadas pelos percentis da amostra e ordenando os eventos históricos em ordem decrescente de volume total precipitado, a maior parcela absoluta dos eventos está

alocada nas classes I e II, o que gera uma grande quantidade de eventos com baixa amplitude de dados de altura pluviométrica nestas classes para todos os intervalos entre eventos.

Para fazer uma análise estatística dessas diferenças, foi calculado o *Boxplot* para cada classe considerando o seu limite superior, ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – *Boxplot* classes de tempo de retorno variando o intervalo entre eventos

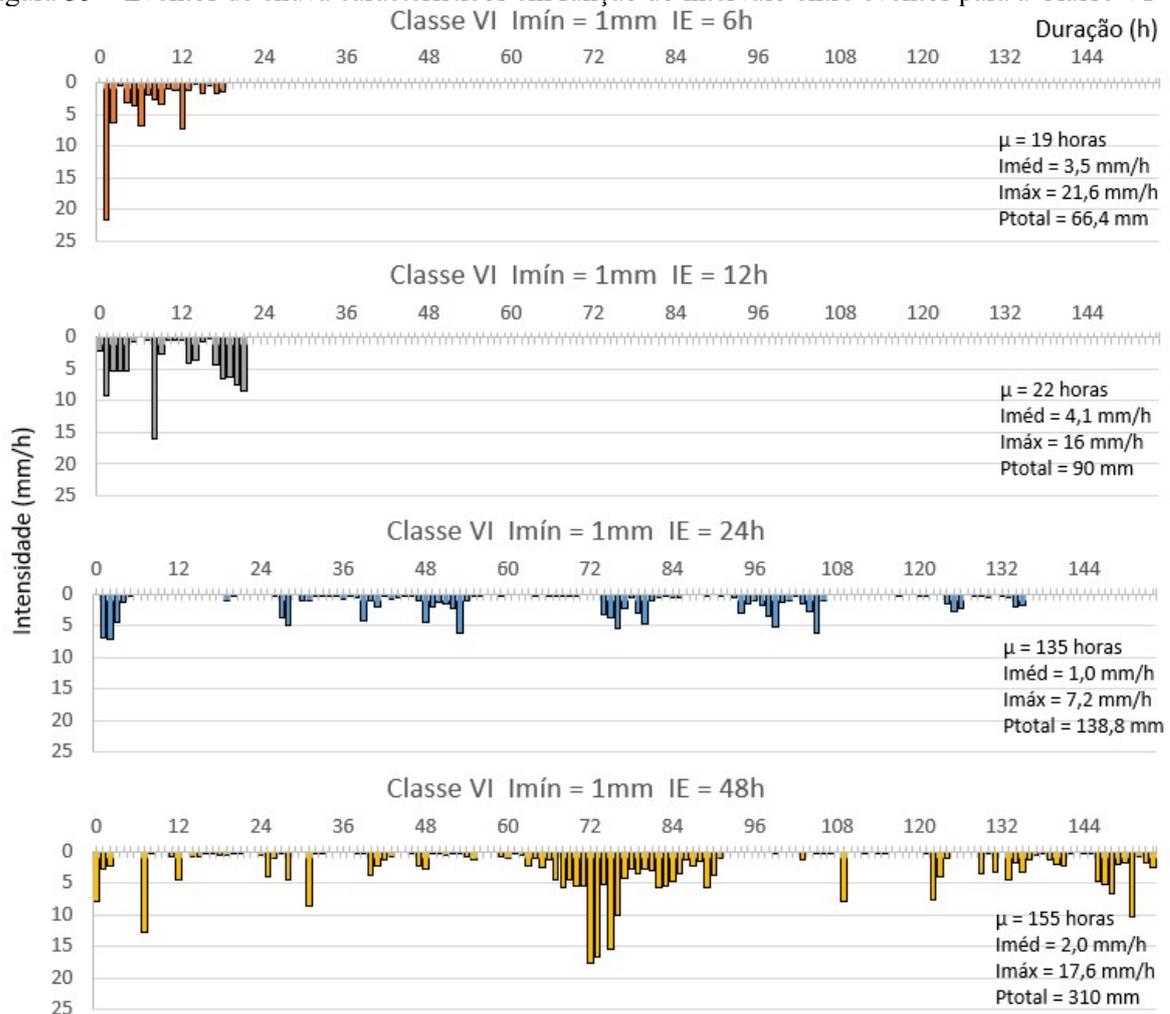


Fonte: Autor (2022)

O *Boxplot* mostra que há grande dispersão dos dados, especialmente para as classes que representam acima do 75º percentil. O intervalo interquartílico para as classes IV e V é semelhante, sendo 82,8 e 96,2 mm, respectivamente, já para a classe VI esse intervalo é de 238,8 mm. Quanto à simetria, todas as classes possuem as linhas medianas ligeiramente afastadas do centro, mais próximas ao primeiro quartil. Para as classes I e II, conforme já verificado através da Tabela 9, as caixas são consideravelmente menores e simétricas em comparação com as demais classes, ilustrando a menor amplitude de dados.

Para melhor entender as diferenças entre o evento de chuva característico determinado em cada grupo de eventos históricos determinados pela variação do intervalo entre eventos foram traçados diagramas para cada ECC. A Figura 35 ilustra os ECC determinados para a classe VI, que representam os eventos históricos acima do 98º percentil da amostra. Os gráficos para as classes V a I também foram traçados e estão apresentados no Apêndice A deste trabalho.

Figura 35 – Eventos de chuva característicos em função do intervalo entre eventos para a Classe VI



Fonte: Autor (2022)

Na sexta classe de percentil não houve similaridades evidentes entre os ECC determinados variando-se o intervalo entre eventos. Observa-se que, para os intervalos de 6 horas e 12 horas, foram obtidos eventos com características similares quanto à duração e intensidade média, porém com altura total e intensidade máxima registrada distintos. Já o ECC determinado com IE de 24 horas possui característica muito distinta dos demais, apresentando baixas intensidades horárias ao longo de todo o evento, sem picos pronunciados. Por fim o ECC para o intervalo de 48 h foi determinado um evento que possui um pico de chuva pronunciado próximo ao meio da duração do evento e com altura total precipitada registrada de mais do que o dobro do que para o intervalo de 24h.

Evidentemente, com maior intervalo entre eventos, eram esperados eventos de chuvas mais longos, porém as durações foram similares para os intervalos entre eventos de 6 e 12 horas, e depois para os eventos determinados com intervalos de 24 e 48 horas. O intervalo entre eventos pode ser alterado em função das características do estudo para essa amostra, no que

tange a duração do evento, não foram constatadas variações significativas entre as duplas de 6 e 12 horas, e 24 e 48 horas, sendo a maior diferença na altura total precipitada.

Neste estudo o maior valor de intensidade pluviométrica para os eventos característicos foi de 21,6 mm/h registrados no IE = 6 horas, enquanto na série histórica há um valor registrado de 73,8 mm/h, que apesar de ser muito elevado não promoveu um evento de grande volume total quando associado às intensidades adjacentes.

Os gráficos para as classes V a I também foram desenhados e apresentam características distintas das observadas na classe VI, apresentados e comentados no Apêndice A deste trabalho.

4.3.1.1 Discussões sobre a escolha do tempo entre eventos para determinação de ECC

Os ECC obtidos para diferentes intervalos entre eventos apontam, para esta amostra, que não há como correlacionar diretamente o período seco máximo a valores de intensidade média e máxima, porém para a altura de chuva total há um aumento significativo que acompanha aumento do intervalo entre eventos. Assim, para estudos onde desejam-se alturas totais de chuva maiores, como é o caso de avaliações de dispositivos de controle da água pluvial que têm como via principal de funcionamento o armazenamento da água para posterior infiltração e evapotranspiração, como nos jardins de chuva, planos de infiltração e bacias de retenção, pode-se adotar intervalos entre eventos maiores.

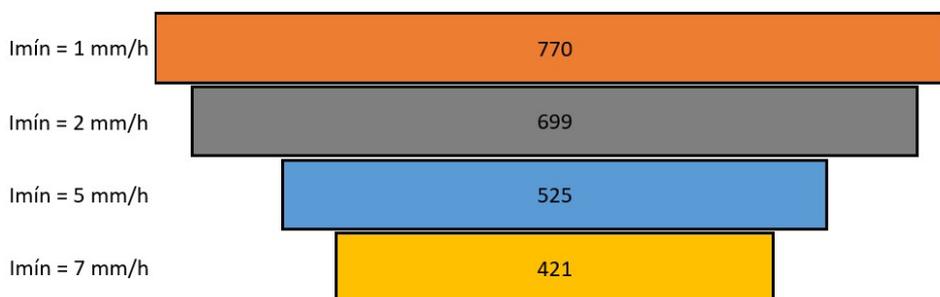
Quanto as durações dos eventos, há também um aumento considerável de duração total com o aumento dos intervalos entre eventos. Existe uma certa proximidade das durações observadas entre o primeiro e o segundo par de intervalos secos, com algumas variações para o primeiro par de valores. Os eventos com intervalos maiores apresentam cauda de pequenas intensidades associadas a um grupamento de intensidades maiores que formam a chuva principal. Assim, de acordo com as necessidades de cada estudo, pode-se adotar intervalos maiores ou menores para obter as características desejadas.

Salienta-se que, para a Classe I, não houve diferenças significativas que justifiquem a adoção de um ou outro intervalo de chuva, tanto para a duração, quanto para as alturas de chuva. Para a Classe II características similares foram encontradas, porém os eventos com intervalo de 24 e 48 horas apresentam uma cauda de alturas de chuva após o pico inicial. Assim, para trabalhos que irão considerar eventos muito frequentes de chuva, que estão abaixo do 50º percentil, não há diferenças relevantes entre os ECC determinados para cada intervalo.

4.3.2 Impacto da Escolha da Intensidade Mínima Para a Determinação do ECC

Uma segunda condição importante a se conhecer sobre a definição de ECC é o impacto da escolha da intensidade mínima horária a ser considerada. Para isso, fixando o intervalo entre eventos em 24 h, foi determinado os ECC para intensidades mínimas de 1; 2; 5 e 7 mm/h. A Tabela 14 resume os valores principais das categorias de chuvas obtidas para o município de São Carlos em função da alteração da intensidade mínima. A Figura 36 exibe em gráfico de funil a quantidade de eventos históricos encontrados em cada caso.

Figura 36 - Quantidade de eventos históricos determinados em função da Intensidade Mínima



Fonte: Autor (2022)

Através da Tabela 14 é possível observar que o aumento da intensidade mínima conduz a reduções da quantidade de eventos, porém com menor sensibilidade do ocorrido com a intervalo entre eventos. Não há variação significativa entre as pluviosidades mínimas e máximas de cada classe de tempo de retorno quando comparado o par $Imín = 1$ mm/h e 2 mm/h, e o par $Imín = 5$ mm/h e 7 mm/h. Com o aumento da intensidade mínima, houve ainda redução da amplitude entre $Imín$ e $Imáx$ para cada classe de percentis.

Tabela 14 – Classes de chuva para São Carlos em função da Intensidade Mínima

IE=24h I _{mín} =1mm/h					IE=24h I _{mín} =2mm/h			
Classe	P _{mín} (mm)	P _{máx} (mm)	N ^o Eventos	% Eventos	P _{mín} (mm)	P _{máx} (mm)	N ^o Eventos	% Eventos
Classe I	1	13,2	385	50,0	1	13,8	350	50,0
Classe II	13,2	30	193	25,0	13,8	30,4	175	25,0
Classe III	30,2	61	115	15,0	30,6	59,2	105	15,0
Classe IV	61,4	88,6	39	5,0	59,2	88,4	35	5,0
Classe V	90	121,8	23	3,0	88,4	114,4	21	3,0
Classe VI	122,4	310	15	2,0	115,6	310	13	2,0
		Total	770	100		Total	699	100

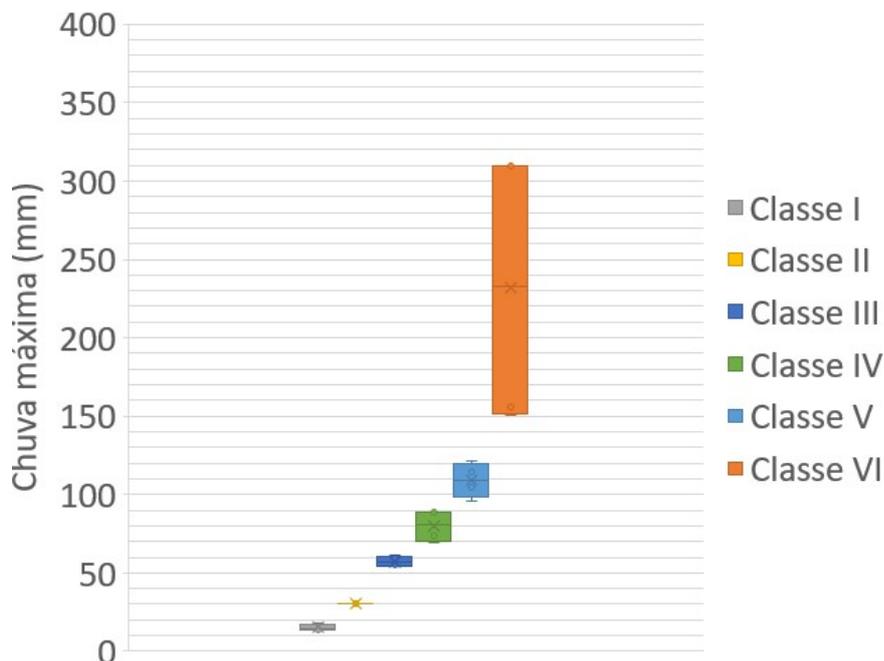
IE=24h I _{mín} =5mm/h					IE=24h I _{mín} =7mm/h			
Classe	P _{mín} (mm)	P _{máx} (mm)	N ^o Eventos	% Eventos	P _{mín} (mm)	P _{máx} (mm)	N ^o Eventos	% Eventos
Classe I	5	16	263	50,0	7	17,8	211	50,0
Classe II	16	30,6	131	25,0	17,8	30,4	105	25,0
Classe III	30,6	54,8	79	15,0	30,6	54,2	63	15,0
Classe IV	55,2	73,6	26	5,0	54,8	69	21	5,0
Classe V	76,8	104,6	16	3,0	69,2	96,2	13	3,0
Classe VI	105,6	155,8	10	2,0	98,4	150,2	8	2,0
		Total	525	100		Total	421	100

Fonte: Autor (2022)

A quantidade eventos históricos determinados com $I_{mín} = 2 \text{ mm/h}$ é cerca de 10% menor quando comparados com os gerados com $I_{mín} = 1 \text{ mm/h}$. Já os eventos históricos produzidos com $I_{mín} = 7 \text{ mm/h}$ possuem uma diferença de cerca de 46% em quantidade quando comparados a $I_{mín} = 1 \text{ mm/h}$.

Para fazer a análise estatística das diferenças entre as alturas totais de chuva máxima determinado para cada classe, foi calculado o *Boxplot* para cada classe, considerando o limite superior da classe de eventos, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 - Boxplot classes de tempo de retorno variando a intensidade mínima

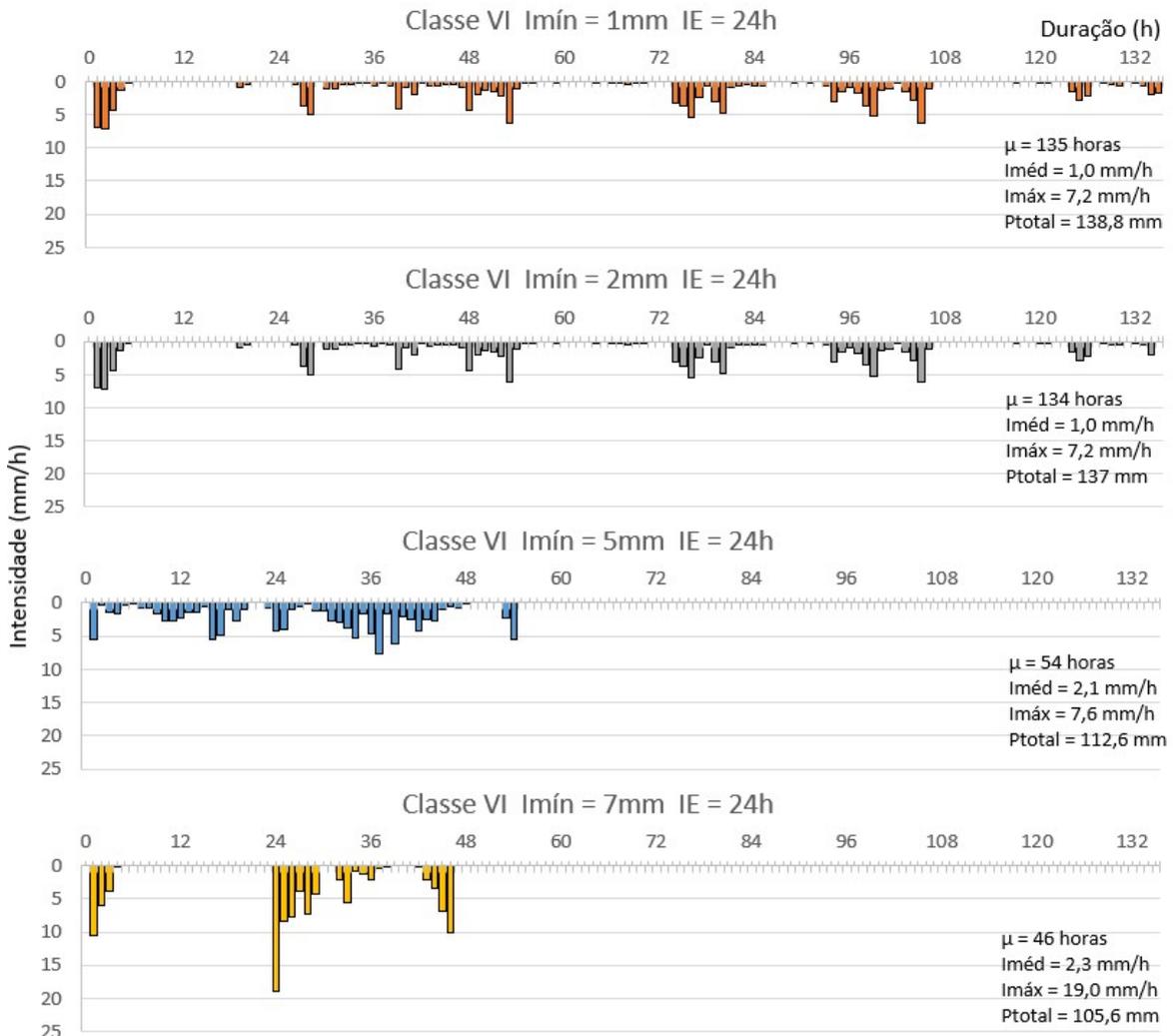


Fonte: Autor (2022)

Comparando o *boxplot* da variação dos intervalos entre eventos ilustrado na Figura 33 e o *boxplot* da variação das intensidades mínimas ilustrado na Figura 36, é possível notar que existe uma menor dispersão dos dados neste segundo estudo, com valores de mínimos e máximos próximos ao primeiros e terceiros quartis. O intervalo interquartilico aumenta significativamente com o aumento dos percentis. Todas as classes de tempo de retorno apresentaram boa simetria. Para as três primeiras classes as caixas são consideravelmente menores e simétricas em comparação às demais classes. A classe dois foi a que apresentou a menor dispersão dos dados.

Para melhor entender as diferenças entre o evento de chuva característico determinado em cada grupo de eventos históricos foram traçados diagramas para cada ECC. A Figura 38 ilustra os ECC determinados para a classe VI, que ilustra os eventos entre o 98º e 100º percentil. As demais classes em estudo estão apresentadas no Apêndice B deste trabalho.

Figura 38 - Eventos de chuva característicos para a classe VI variando a intensidade mínima



Fonte: Autor (2022)

Nesta classe, variando a intensidade mínima entre $Imín = 1 \text{ mm/h}$ e 2 mm/h , foi selecionado o mesmo evento de chuva característico, com pequena diferença para o $Imín$ de 2 mm/h que não anotou um último registro horário de 1 mm . O ECC determinado para o $Imín = 5 \text{ mm}$ neste estudo foi o mesmo definido para a Classe IV com $Imín = 1 \text{ mm/h}$ e $IE = 48 \text{ h}$, apontado no apêndice A deste trabalho. Nesta avaliação para a $Imín = 7 \text{ mm/h}$ foi determinado um evento com evolução diferente dos demais, caracterizado por grandes picos com intervalos sem chuva. O aumento da intensidade mínima conduz a eventos de menor duração e de altura total precipitada menor, no entanto observa-se que existe um par de valores próximos quando comparados o par de $Imín = 1 \text{ mm/h}$ e 2 mm/h e o par $Imín = 5 \text{ mm/h}$ e 7 mm/h .

4.3.2.1 Discussões sobre a intensidade mínima para determinação de ECC

No caso da variação das intensidades mínimas, foi possível verificar uma proximidade de resultados para o par $I_{\text{mín}} = 1 \text{ mm/h}$ e 2 mm/h e para o par $I_{\text{mín}} = 5 \text{ mm/h}$ e 7 mm/h . Assim, estudos que dependem de maior precisão podem trabalhar com os limites inferiores do par, enquanto os que não exigem grande nível de detalhamento podem trabalhar com os limites superiores de cada par de valores. Ressalta-se que quanto maior a intensidade mínima considerada, mais rápido é o processamento dos dados e conseqüentemente menor o custo computacional.

Com exceção da classe I e II, foi encontrado uma certa tendência de redução da duração do evento com o aumento da intensidade mínima. Esse fato ocorre, pois, como visto anteriormente existe relação de proporcionalidade entre duração e altura total precipitada, assim, os eventos de maior intensidade mínima apresentam altura total precipitada maior nos eventos de menor duração.

É importante comentar que os resultados obtidos neste estudo são específicos para esta localidade e características, devendo ser avaliados com cautela antes da sua universalização. Regiões de clima tropical, devido aos níveis elevados de precipitação, tendem a ser mais sensíveis às variações das intensidades mínimas e intervalo entre eventos. Dessa forma, é importante estudar detalhadamente cada localidade e projeto variando os fatores intervenientes na determinação dos ECC. Assim, a Ferramenta DDU+S elaborada neste trabalho deve permitir a fácil alteração desses fatores para atendimento às situações críticas próprias de cada estudo.

4.4 Ferramenta DDU+S

4.4.1 Características Gerais

Para a ferramenta desenvolvida, são necessários como dados de entrada a área total em estudo, a área impermeável, a característica textural do solo, taxa de evaporação, os dados pluviométricos históricos e as características do dispositivo de drenagem urbana sustentável.

O programa permite simular alguns dispositivos, sendo este trabalho desenvolvido para Superfície de Infiltração (SI), Vala de Infiltração (VI), Trincheira de Infiltração (TI), Poço de Infiltração (PI) e Reservatório de Chuva (RC). Como resultado, é exibida ao operador o balanço hídrico para diversos ECC, com dados de infiltração, evapotranspiração, retenção e extravasamento de forma gráfica. É mostrada ainda a simulação do comportamento da estrutura

ao longo do tempo sob ação dos vários ECC. A visualização das informações é feita através de um painel de interface gráfica de fácil interpretação.

Uma função grande valia da ferramenta é justamente a determinação dos ECC a partir dos dados pluviométricos históricos, já que este evento poderá ser utilizado para carregar modelos mais complexos para refinar os estudos, como o SWMM, caso seja desejado pelo usuário. Pelo fato do SWMM ser um dos programas mais utilizados, e ser de código livre, a Ferramenta DDU+S foi codificada para exportar os dados pluviométricos dos ECC no padrão SWMM, sem intervenção do usuário na fonte de dados.

A Ferramenta DDU+S foi desenvolvida ainda com uma Interface Gráfica do Usuário (GUI) amigável, com o uso de botões facilmente identificados por indicadores visuais e sem nenhuma necessidade de interferência através de linhas de comando. A interface projetada realiza inclusive a leitura de dados meteorológicos no arquivo padrão fornecido pelo INMET (extensão .csv), sem a manipulação do documento pelo usuário. A construção do modelo, tratamento dos dados e pós-processamento pode ser realizada por qualquer utilizador com conhecimentos básicos de informática. Eventuais falhas nos dados pluviométricos não são tratadas pela ferramenta, devendo ser previamente avaliado a existência de inconsistência nos dados. A Figura 39 mostra a tela inicial ilustrando a GUI da ferramenta.

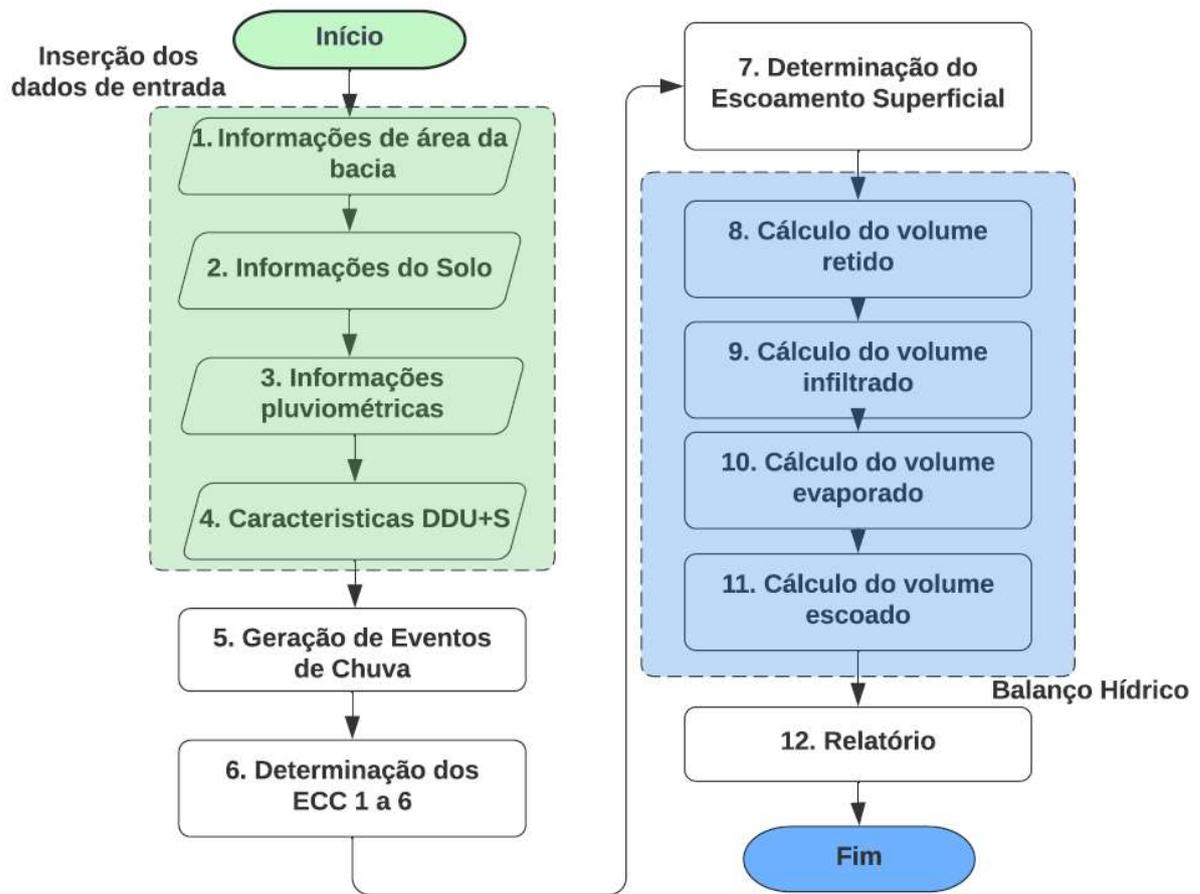
Figura 39 – Tela inicial ilustrando a Interface Gráfica do Usuário da Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

Para o desenvolvimento da ferramenta, foi necessária uma sequência de atividades a serem programadas, apresentadas no fluxograma simplificado da Figura 40. O esquema computacional, assim como cada tela da ferramenta estão descritos a partir no item 4.4.2 e 4.4.3 desta tese.

Figura 40 – Fluxograma simplificado do algoritmo da Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2020)

4.4.2 Esquema computacional

4.4.2.1 – Determinação do Escoamento Superficial da bacia

Os cálculos de escoamento superficial são realizados para o mesmo intervalo de tempo dos dados pluviométricos sendo, nesta tese, de uma hora. Ao iniciar o cálculo do escoamento superficial da bacia, é buscado, no banco de dados da ferramenta, a escolha do tipo de solo e

áreas para determinação do número de curva, além dos eventos pluviométricos característicos para obtenção dos valores de chuva.

O esquema computacional segue a seguinte lógica:

- i. As variáveis do método são zeradas.
- ii. O *curve number* é calculado a partir de média ponderada das áreas permeáveis e impermeáveis e do tipo de solo do local.
- iii. A capacidade de retenção do solo é calculada (equação 7, item 3.6.1).
- iv. O valor da altura de precipitação “P” é obtido a partir do registro do ECC previamente determinado.
- v. Para cada intervalo de tempo Δt é calculado o valor do escoamento superficial (equação 6, item 3.6.1)
- vi. Para cada intervalo de tempo Δt é subtraído, da capacidade de retenção do solo, o valor do escoamento superficial calculado naquele intervalo e atualizado o valor da capacidade de retenção do solo para o próximo intervalo.
- vii. Repetem-se os passos de iv a vi até o fim do evento.

4.4.2.2 – Determinação da Infiltração no Dispositivo Sustentável

Com fins de simplificação, a ferramenta considera o solo não saturado no início do evento e não considera a capacidade de recuperação da capacidade de infiltração nos períodos secos. Entende-se que, por ser baseado em método dos eventos, essas variáveis seriam de pouca utilidade e aumentariam o custo computacional desnecessariamente. O esquema computacional segue a seguinte lógica:

- i. As variáveis do método são zeradas.
- ii. Para cada intervalo de tempo Δt o valor de $F(t)$ inicial é estimado como sendo $0,1 \times k$.
- iii. É realizado cálculo iterativo substituindo o valor de $F(t)$ estimado na equação 10 (item 3.6.2) até que seja atingido o equilíbrio do sistema. O valor de $F(t)$ é considerado determinado quando não há diferença em quatro casas decimais na equação.
- iv. O volume de infiltração potencial é calculado multiplicando o $F(t)$ calculado pelas áreas de infiltração do dispositivo em cada intervalo de tempo.
- v. O volume de infiltração potencial é comparado ao volume de escoamento superficial daquele intervalo de tempo e ao volume armazenado no dispositivo

no intervalo anterior. Caso o volume de infiltração potencial seja maior que o volume de escoamento somado ao volume armazenado, todo o escoamento é infiltrado. Caso o volume de infiltração potencial seja menor na mesma análise comparativa, o volume de infiltração real será igual ao potencial e haverá armazenamento ou extravasão do dispositivo, de acordo com o volume disponível em cada tempo.

- vi. Repetem-se os passos ii a v até o fim do evento.

4.4.2.3 – Determinação da Evapotranspiração do Dispositivo Sustentável

A título de simplificação, a taxa de evapotranspiração horária não considera as flutuações entre os períodos do dia e da noite, assim como as variações que são observadas durante um evento de chuva. Caso o usuário insira um valor nulo para a evapotranspiração a ferramenta irá desconsiderar essa variável quando iniciar o cálculo do balanço hídrico. O esquema computacional para cálculo da evapotranspiração segue a seguinte lógica:

- i. As variáveis do método são zeradas.
- ii. Caso o operador selecione um município já cadastrado na ferramenta, é buscado no banco de dados o valor da evapotranspiração para aquela localidade, e inicia-se o passo v. Caso seja inserida a temperatura do ar e a evaporação obtida no atmômetro de Piché, é iniciado o passo iii.
- iii. O parâmetro w é calculado em função das faixas de temperatura do ar através das equações 11 e 12 (item 3.6.3).
- iv. A evapotranspiração diária é calculada através da equação 11 (item 3.6.3).
- v. O valor da evapotranspiração diária é dividido por 24 para conversão em taxa horária.

4.4.2.4 – Determinação do Balanço Hídrico do Dispositivo Sustentável

Como neste trabalho foi adotado um período entre eventos de chuva de 24 horas, também foi adotado um período de 24h após o término do evento para encerramento dos cálculos do balanço hídrico. Esse intervalo de tempo indicará se o dispositivo de drenagem está apto ou não para receber um novo evento de chuva.

O esquema computacional desta etapa segue a seguinte lógica:

- i. São calculados o escoamento superficial conforme comentado em 4.4.2.1, a infiltração de acordo com o item 4.4.2.2, e a evapotranspiração de acordo com o item 4.4.2.3. Nos dispositivos onde não há infiltração e/ou evapotranspiração, esses cálculos são ignorados.
- ii. O volume armazenado é a diferença positiva entre o escoamento superficial e a infiltração somada a evapotranspiração, até o limite do volume de armazenamento dos dispositivos
- iii. A extravasão é determinada pela diferença positiva entre o escoamento superficial e a infiltração somada ao volume de armazenamento e à evapotranspiração.
- iv. Os passos i a iii são repetidos em cada intervalo de tempo do evento de chuva e mais 24 passos.

4.4.3 Telas da Ferramenta DDU+S

A ferramenta computacional desenvolvida possui 6 telas principais, sendo: 1) inicial, 2) informações de áreas do local de implantação do DDU+S, 3) informações sobre o solo, 4) informações pluviométricas e de evapotranspiração, 5) configurações dos dispositivos sustentáveis, 6) resultados. Essas telas serão apresentadas na sequência.

4.4.3.1 Tela Inicial

A tela inicial da ferramenta traz uma breve apresentação da ferramenta e orientações básicas para início do uso, ilustrado na Figura 35, exibida anteriormente no item 4.4.1. Foi inserido um botão de acesso rápido ao site oficial do PPGEU e outro para o perfil do Facebook do PPGEU para permitir ao usuário conhecer mais sobre os trabalhos desenvolvidos pelos grupos de pesquisa da instituição. À direita da tela inicial é possível ver, no mapa, destaque para o prédio do PPGEU. À esquerda estão os botões de comando com ícones de fácil identificação e que o usuário já está acostumado a ver em outros programas ou faz parte do senso comum, sendo na sequência: tela inicial de apresentação, tela de informações de áreas do local de implantação do DDU+S, tela de informações sobre o solo, tela de informações pluviométricas e de evapotranspiração, tela de informações do DDU+S e, por fim a tela de resultados.

No desenho da interface optou-se por deixar os botões de comando de transferência entre os formulários principais da ferramenta a esquerda da tela, e sem a presença de informação textual, apenas o ícone representativo do formulário. É uma abordagem moderna, com melhor aspecto estético. Para indicação de qual página o usuário está, o botão indicativo da mesma se mantém pressionado.

A cor de fundo dos formulários da ferramenta é branca com textos na fonte Tahoma preto. Esse esquema de cores é sugerido dentro do conceito de percepção do usuário para transmitir simplicidade e confiabilidade.

4.4.3.2 Tela de Informações de Áreas do Local de Implantação do DDU+S

A segunda tela da ferramenta busca coletar as características do local quanto à sua área permeáveis e impermeáveis, conforme ilustra a Figura 41.

Figura 41 - Tela de informações do local



Fonte: Autor (2022)

Neste formulário, a primeira informação a ser inserida é o nome do projeto que o usuário deseja. Por padrão o nome é Projeto 1. Quanto às áreas, obrigatoriamente devem ser fornecidos os valores de área permeável e impermeável na unidade de m². Existe um terceiro campo que

exibe o somatório das áreas. Este campo não pode ser alterado, tendo apenas a função de conferência das áreas pelo usuário. Pensando na melhor experiência do usuário está em destaque neste formulário um mapa onde pode ser inserido o local do projeto e feitas as estimativas de área no próprio mapa, conforme ilustrado na Figura 56. Uma vez obtido as áreas no mapa auxiliar, essa informação deve ser repassada manualmente para o formulário de aquisição de dados de áreas à esquerda da tela. As instruções para essa função estão localizadas na parte inferior esquerda do formulário.

Para utilização do mapa, o usuário deve estar com conexão à internet ativa, uma vez que a ferramenta está utilizando o Google Maps como base. Outras alternativas de mapas online foram testadas na plataforma, como o Bing Maps, Here, OpenStreetMap e Mapy, porém a que apresentou maior facilidade de uso, ferramentas de medição e idioma português foi o Google Maps. Caso o usuário possua projeto com áreas permeáveis e impermeáveis já definidas, elas podem ser inseridas diretamente na ferramenta.

Ainda pensando na melhor experiência do usuário, foi inserido um botão “apagar” que tem a função de limpar os dados inseridos. Isso evita a inconveniência do usuário necessitar apagar cada campo individualmente caso ele deseje fazer diversas simulações. Esse botão se repete em todas as telas que requerem inserção de dados do usuário.

Por fim, para comunicar o usuário que há falhas de preenchimento do formulário foi programada uma mensagem de erro com grande destaque, sendo o fundo em amarelo e a fonte em letras maiúsculas vermelha. Além disso o campo de erro é destacado em vermelho, e a fonte do rótulo do campo também ganha a cor vermelha, conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 42 – Mensagem de erro no formulário



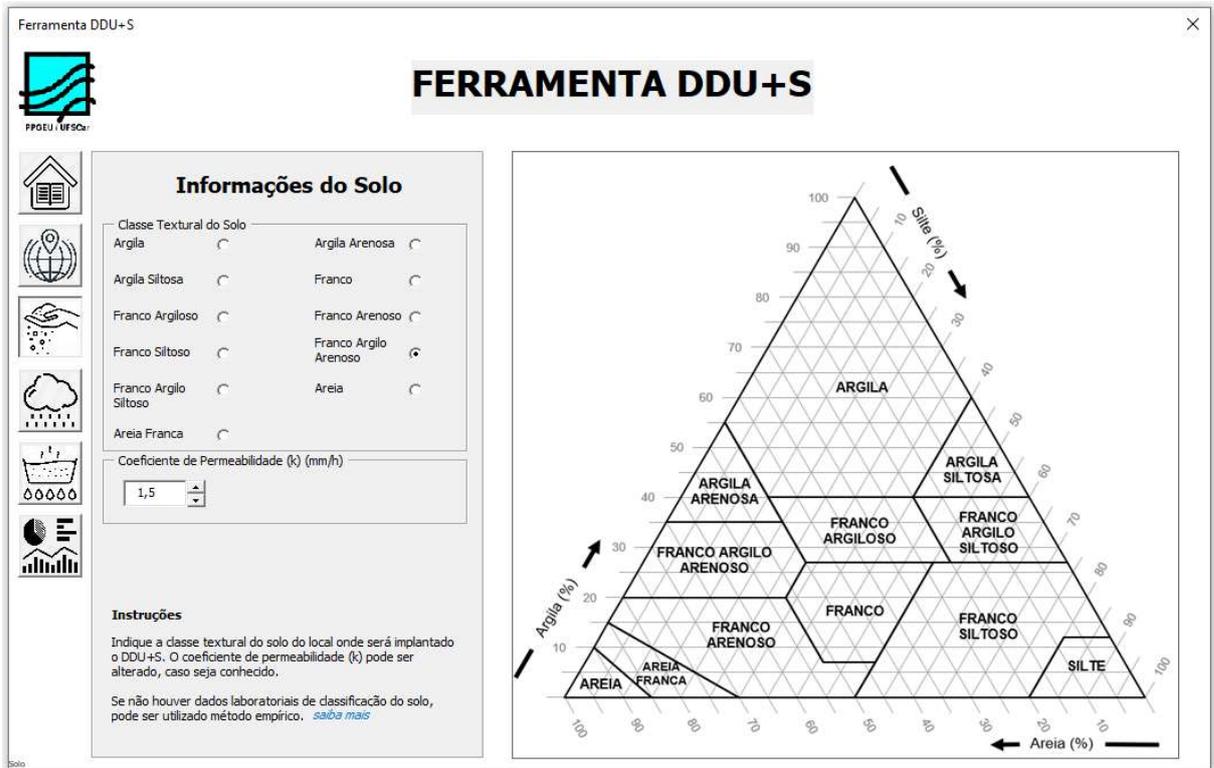
Fonte: Autor (2022)

A comunicação imediata de um erro através de destaque na própria página, sem o uso de caixas de mensagens, e sem permitir que o usuário avance inadvertidamente no preenchimento dos campos do projeto para só tomar conhecimento de eventuais erros quando iniciar processamento final do modelo evita a frustração do usuário com o programa.

4.4.3.3 Tela de Informações Sobre o Solo

A terceira tela da ferramenta registra a indicação de classe textural do solo. Foi adotado como entrada o padrão textural proposto pelo Departamento Americano de Agricultura – USDA. Este método classifica o solo em 12 classes distintas de acordo com as porcentagens de areia, argila e silte encontrada na amostra (USDA, 2012), conforme ilustrado na Figura 43.

Figura 43 – Tela de informações do solo



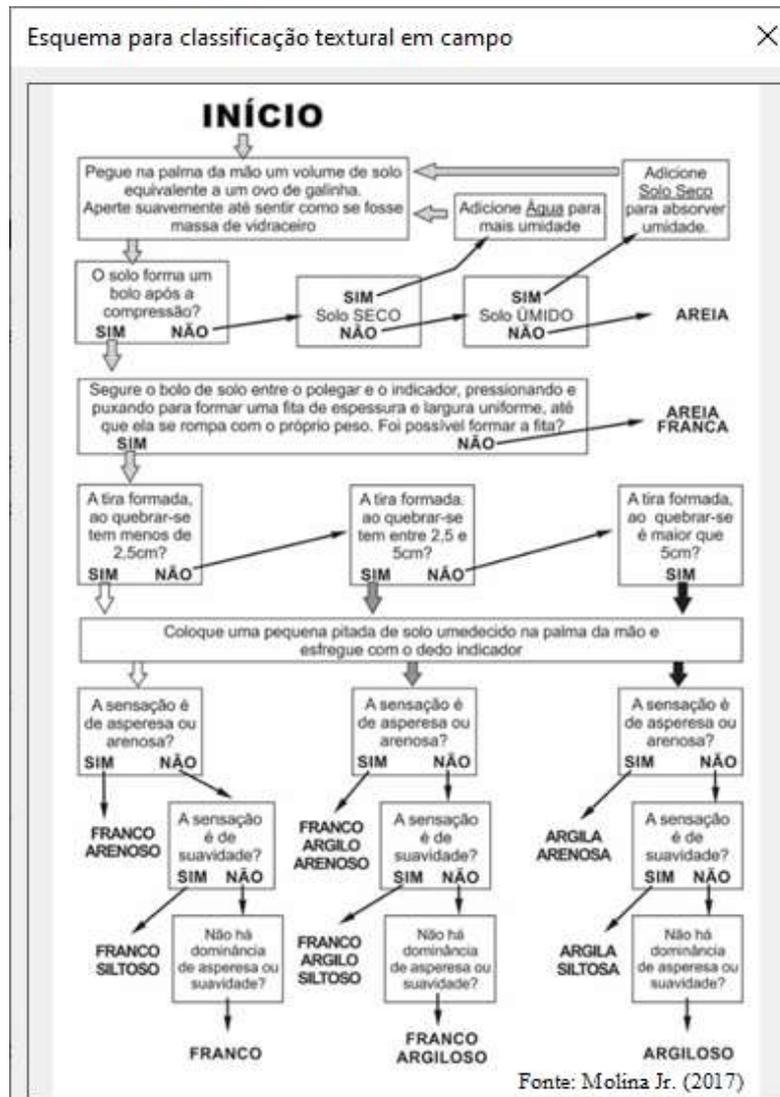
Fonte: Autor (2022)

Neste formulário o usuário deverá apenas selecionar o solo do local do projeto através de botão de seleção. A ferramenta está pré-carregada com valores de coeficiente de permeabilidade (k), sucção na frente de molhamento (Ψ), porosidade (θ) e porosidade efetiva (θ_e) de acordo com valores médios obtidos por Rawls, Brakensiek e Miller (1983) para cada classe textural, já mostrados na Tabela 7 do item 3.6.2 deste trabalho. No estudo de Rawls, Brakensiek e Miller (1983) não foram avaliados os parâmetros do solo silte, que para simplificação da ferramenta, foi adotado como idêntico aos valores do solo Franco Siltoso, porém não se espera que o usuário se depare com uma situação de solo silte puro.

Neste formulário não existe indicação de mensagem de erro, uma vez que por padrão estará selecionado o solo “Argila”, não havendo, portanto, a possibilidade de não existir nenhum solo selecionado.

No campo de instruções, existe a possibilidade de o usuário conhecer um sistema de classificação empírica do solo, através de análise tátil-visual, conforme proposto por Molina Júnior (2017). Ao clicar em “saiba mais” é aberta uma janela com o diagrama de classificação empírica, conforme ilustra a Figura 44.

Figura 44 - Diagrama para classificação textural em campo

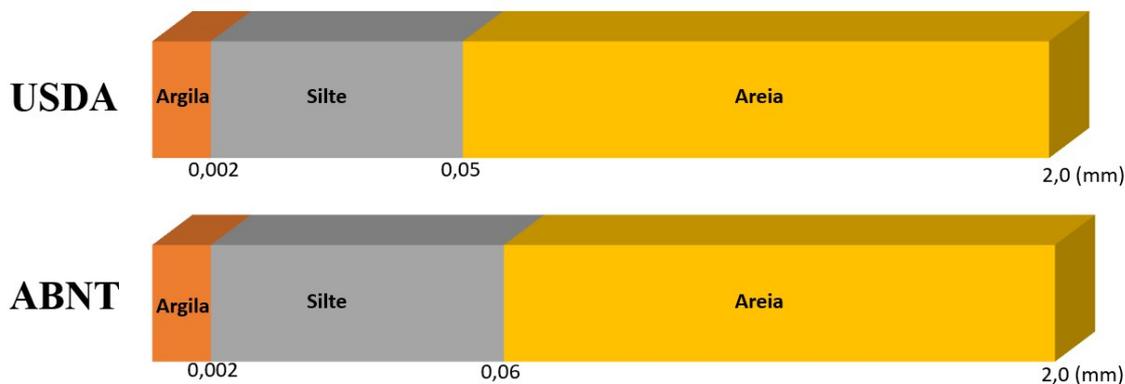


Fonte: Autor (2022)

Com foco na experiência do usuário, a inserção na própria ferramenta de método de campo para estimativa da classe textural do solo, apesar de reduzir a precisão da classificação, ajuda a tornar a utilização agradável, amplia o público capaz de utilizar o modelo, e permite ainda avaliações preliminares onde não se tem nenhum tipo de ensaio do local.

É oportuno ressaltar que existem várias escalas de classificação dos grãos do solo. No Brasil, essa escala é determinada pela NBR 6502 (ABNT, 1995). Uma vez que o triângulo textural do solo utilizado no modelo segue o padrão da USDA, poderia ser esperado variações na classificação dos grãos. No entanto, as diferenças entre o padrão USDA e ABNT são mínimas, ocorrendo apenas no limite superior do silte onde o padrão ABNT é de 0,06mm e o da USDA é de 0,05mm, e não irão impactar significativamente na determinação da classe do solo, conforme ilustra na Figura 45.

Figura 45 – Frações de solo de acordo com a ABNT e USDA



Fonte: Autor (2022)

Caso o usuário tenha ensaio de campo de determinação da condutividade hidráulica do solo, o modelo permite que seja facilmente alterado este valor. Aos valores de porosidade e sucção na frente de molhamento não foi dada a opção de alteração pelo usuário por serem ensaios mais complexos de serem realizados na caracterização do solo, e o excesso de variáveis poderia levar o usuário a hesitar no uso da ferramenta. Na hipótese de um usuário avançado, está indicado, no código do modelo, o local para alteração dessas variáveis.

É importante comentar que a classificação USDA foi adaptada no Brasil por Santos *et al.* (2005) através da inclusão de mais uma classe textural para solos com mais de 60% de argila, denominado solo muito argiloso, no entanto este solo ainda demanda mais estudos quanto aos seus parâmetros hidráulicos, essencial para o cálculo de infiltração realizado nesta tese. Observa-se ainda que os solos americanos possuem formação diferente dos solos brasileiros, com constituição mineralógica e forma das partículas distintas das nacionais, porém a ausência de estudos aprofundados sobre o tema dificulta a adoção de parâmetros brasileiros de infiltração dos solos.

4.4.3.4 Tela de Informações Pluviométricas e de Evapotranspiração

Na quarta tela da ferramenta o histórico pluviométrico deve ser inserido pelo usuário em escala de horas para a precisão adequada do modelo. As principais fontes brasileiras de dados pluviométricos são o Portal Hidroweb, que é uma ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) ou através do portal do banco nacional de dados meteorológicos do INMET (BDMEP). O Hidroweb possui uma navegação mais fácil e a obtenção dos dados é mais rápida, porém o arquivo fornecido de dados pluviométricos é

agregado em duração diária, inadequada para este modelo. Assim, a Ferramenta DDU+S está programada para ler os dados meteorológicos que são tipicamente fornecidos pelo BDMEP sem necessidade de intervenção do usuário. A Figura 46 ilustra a interface do formulário de dados pluviométricos e de evaporação.

Figura 46 – Tela de informações pluviométricas e de evaporação

The screenshot displays the 'Ferramenta DDU+S' interface. On the left is a vertical sidebar with icons for home, location, data input, weather, and charts. The main area is divided into two panels: 'Dados Pluviométricos' and 'Dados de Evapotranspiração'. The 'Dados Pluviométricos' panel includes buttons for 'Solicitar Dados BDMEP' and 'Carregar Planilha BDMEP', a 'Localidades' dropdown menu, and a section of instructions. The 'Dados de Evapotranspiração' panel includes input fields for 'Temperatura do ar (°C)', 'Evaporação pelo atmômetro de Piché (mm/dia)', and 'Evapotranspiração Potencial (mm/dia)', along with 'UF' and 'Municípios' dropdown menus and another instructions section.

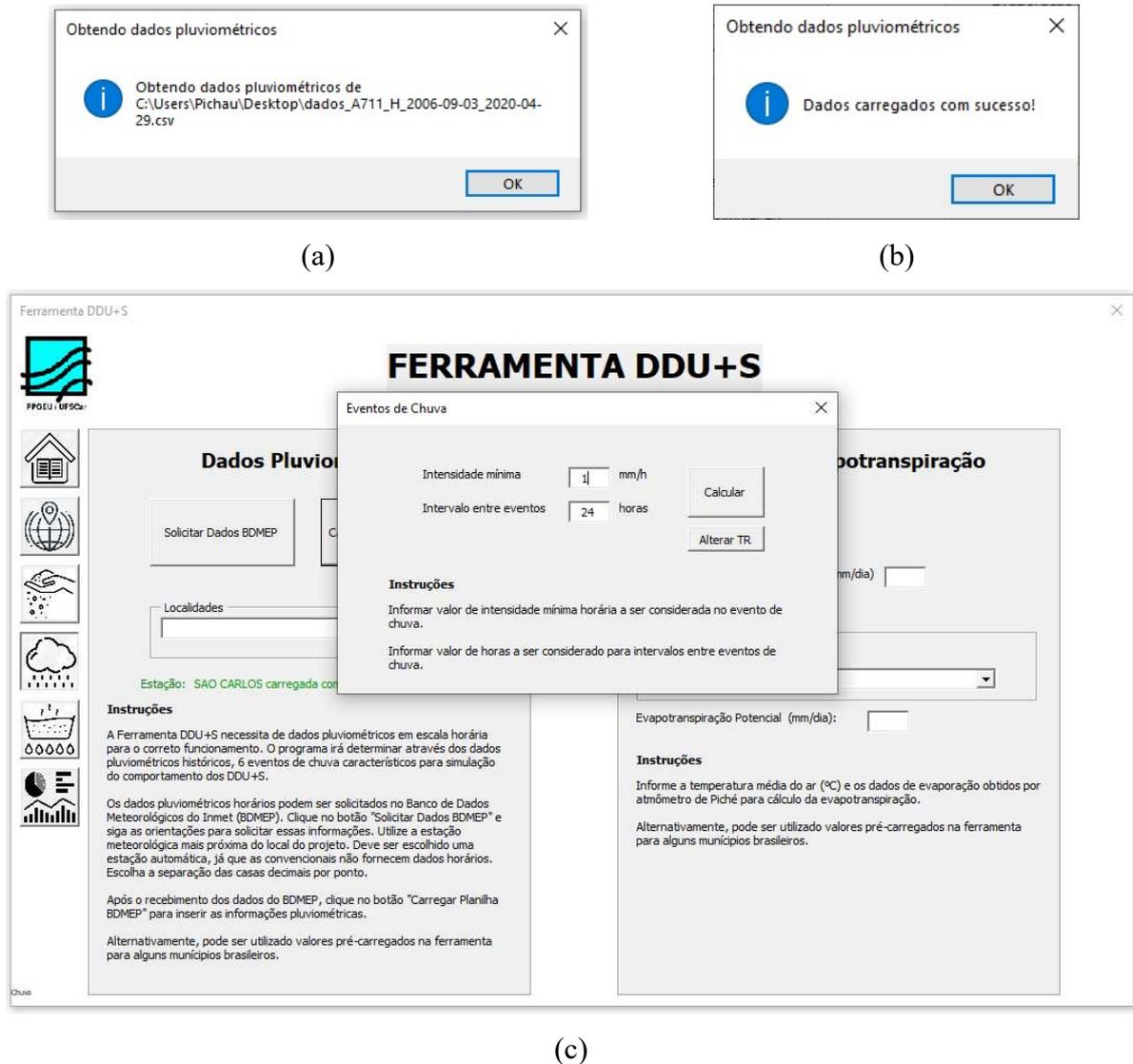
Fonte: Autor (2022)

Na seção de dados pluviométricos, estão em destaque 2 botões: “Solicitar Dados BDMEP” e “Carregar Planilha BDMEP”. O primeiro botão direciona ao portal BDMEP, onde o usuário deverá escolher a estação automática que ele deseja os dados pluviométricos em escala horária. O Portal exige que o usuário confirme o e-mail cadastrado para processar a solicitação. Apesar de indicar que o tempo de processamento pode levar até 24 horas, nos testes feitos para esta pesquisa o processamento da solicitação foi imediato. Após o processamento o usuário recebe um endereço para baixar a planilha com os dados de precipitação históricos para a estação requerida.

O arquivo gerado pelo BDMEP é em formato “comma-separated-values” (.csv). A Ferramenta DDU+S foi programada para importar os dados pluviométricos do padrão BDMEP. Ao clicar no botão “Carregar Planilha BDMEP” o usuário deverá indicar o caminho onde está salvo o arquivo pluviométrico. Para garantir uma experiência do usuário fluida, é exibida uma

caixa de mensagem informando o início do carregamento de dados com a informação do local do arquivo, e ao fim do processamento é exibida nova caixa de mensagem informando o fim. Para confirmação do carregamento, o usuário irá perceber que uma linha de texto com o nome da estação está sendo exibida no formulário principal, conforme exibido na Figura 47.

Figura 47 – Carregamento de Dados Pluviométricos: a) Obtenção de dados; b) Dados carregados; c) Definição de intensidade e intervalo



Fonte: Autor (2022)

Alguns arquivos do BDMEP apresentam o texto “null” ao invés do valor 0. A ferramenta foi programada para reconhecer o texto e substituir por valor numérico nulo. Após o carregamento dos dados, sem necessidade de intervenção do usuário um novo formulário é exibido para modificação dos padrões de eventos de chuva.

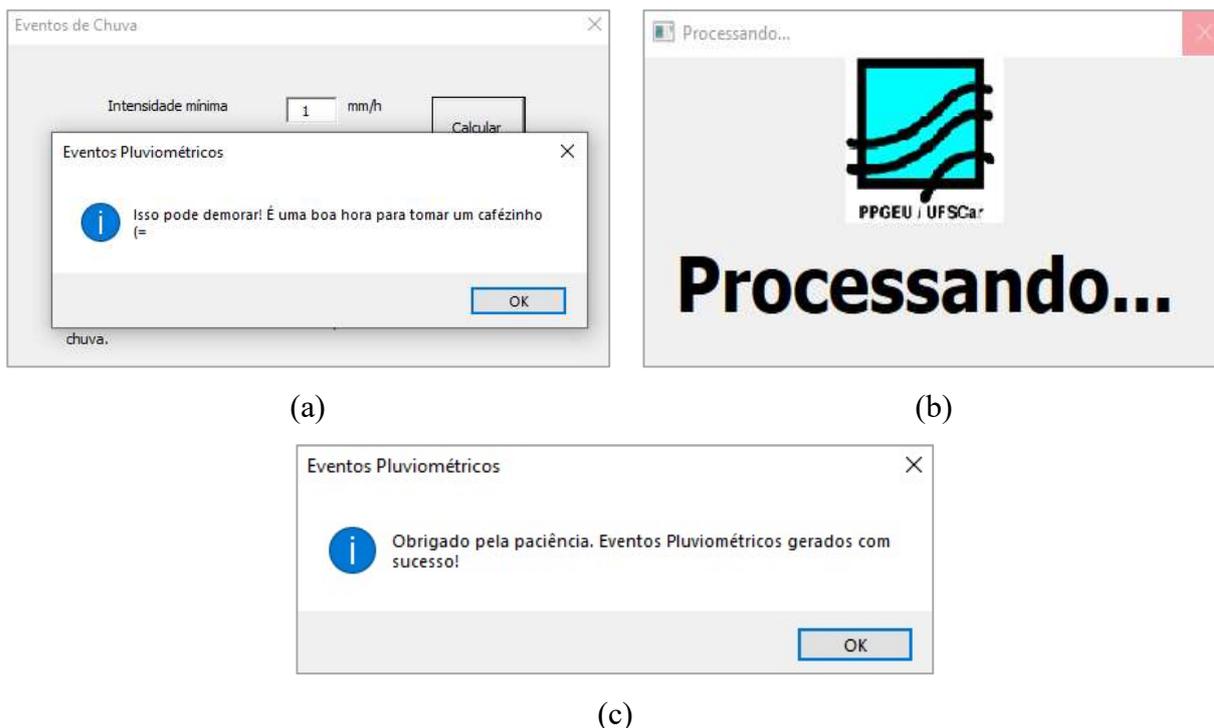
A Ferramenta DDU+S está carregada com valores de intensidade mínima de 1 mm/h e intervalo entre eventos de 24 h, mas é permitido a alteração desses valores pelo usuário de acordo com a finalidade do seu estudo, conforme ilustrado na Figura 48. Existe também neste formulário um botão para alteração das classes de percentis da amostra. Foram considerados como padrão os percentis: 50°, 75°, 90°, 95°, 98° e 100°.

Figura 48 – Formulário de alteração das classes de percentis

Fonte: Autor (2022)

Como o tempo de processamento para geração dos eventos pluviométricos é de cerca de 50 segundos para computadores intermediários, é prudente comunicar ao usuário que essa operação irá demorar, o que é feito através de uma caixa de mensagem. Foi inserida na ferramenta também uma caixa de mensagem simples informando o processamento dos dados, para evitar que o usuário tenha a sensação que a ferramenta não está respondendo. Ao fim do processamento é exibido uma mensagem informativa, conforme ilustrado na Figura 49.

Figura 49 – Caixas de mensagem de informação ao usuário: a) Confirmação de cálculo; b) Processamento; c) Conclusão



Fonte: Autor (2022)

A Ferramenta DDU+S disponibiliza para o usuário lista com 310 municípios pré-carregados com dados de evapotranspiração, devendo ser inserida primeiro a unidade federativa e em sequência o município.

Para um usuário eventual que não queira de fato fazer um projeto completo e está usando a ferramenta somente a título de curiosidade ou para fins educacionais, está também pré-carregado na ferramenta eventos de chuva característicos de 6 localidades, sendo escolhidas as maiores cidades de cada região geográfica brasileira e o município de São Carlos.

Ressalta-se que os dados fornecidos pelo INMET através do BDMEP são em escala horária, que é a máxima sugerida na literatura para determinação de eventos de chuva. Eventos determinados em escala de minutos irão aumentar a precisão da simulação do balanço hídrico de dispositivos de drenagem, no entanto também aumentarão o custo computacional. A Ferramenta DDU+S está programada para trabalhar com os dados horários tipicamente obtidos do INMET, caso haja alterações futuras nesse padrão a ferramenta deverá ser ajustada, porém possivelmente a base VBA não será capaz de trabalhar com o volume extra de dados.

4.4.3.5 Tela de Configurações dos Dispositivos de Drenagem

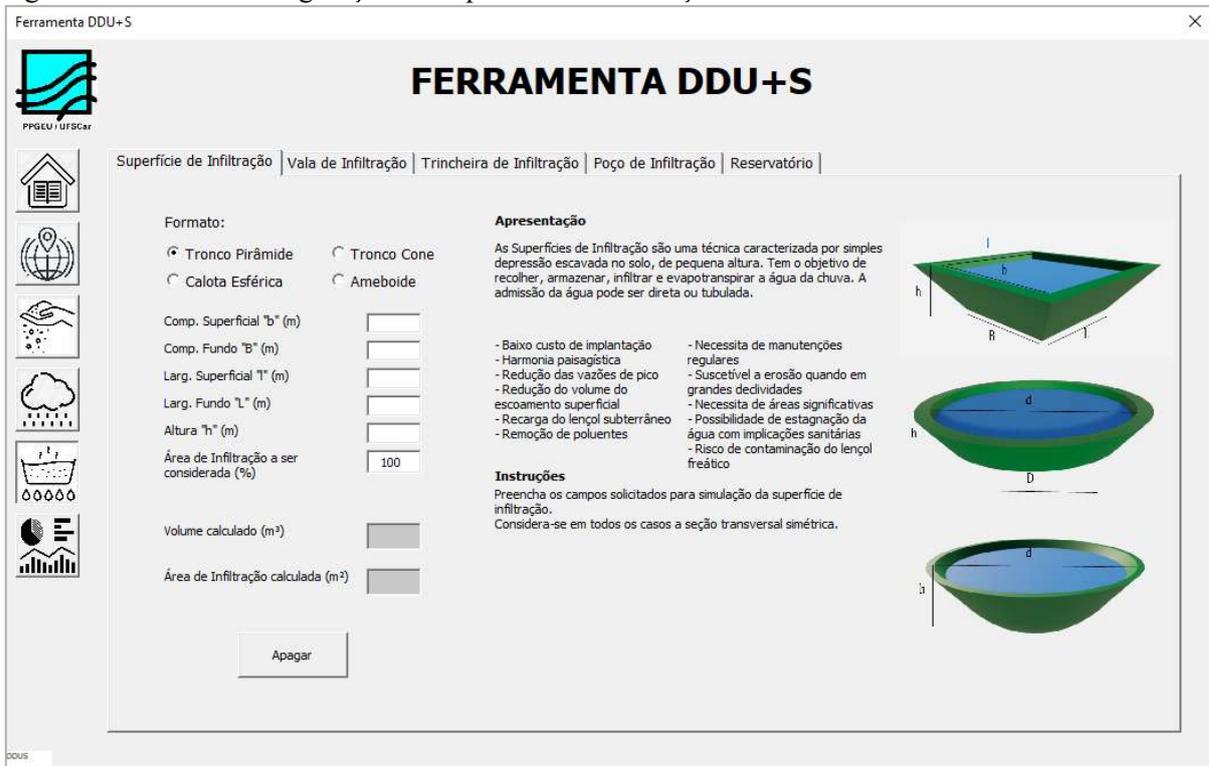
A quinta tela da ferramenta traz a opção de configuração dos dispositivos de drenagem mais sustentáveis. Foram programados 5 dispositivos, sendo: Superfície de Infiltração, Vala de Infiltração, Trincheira de Infiltração, Poços de Infiltração e Reservatório de Água de Chuva. Para cada um dos dispositivos existe o campo de inserção dos dados, breve apresentação do dispositivo, instruções de uso e uma imagem real e outra esquemática. Como em todas as outras telas, este formulário também está programado para mensagens de erro em caso de preenchimento incorreto e se inicia alguns campos com valores sugeridos pela literatura. Em alguns casos existe botão de ajuda que direciona o usuário a maiores informações que o auxiliem no preenchimento daquele campo.

Dependendo do tipo de dispositivo, a ferramenta permite alterar as formas geométricas de uso mais comum no Brasil. A seleção da forma geométrica é necessária para o correto cálculo das áreas de infiltração e do volume de armazenamento, conforme apresentado nos itens 4.4.3.5.a até 4.4.3.5.e

4.4.3.5.a Superfície de infiltração

As superfícies de infiltração apresentam diferentes formatos de perfil transversal e projeção superficial. Para a Ferramenta DDU+S foram considerados 3 volumes de sólidos geométricos conhecidos: tronco de pirâmide, tronco de cone e calota esférica, e a forma ameboide, sem definição geométrica, que ao serem selecionados alteram as informações solicitadas ao usuário. A Figura 50 ilustra a SI na Ferramenta DDU+S.

Figura 50 – Tela de configuração da Superfície de Infiltração na Ferramenta DDU+S



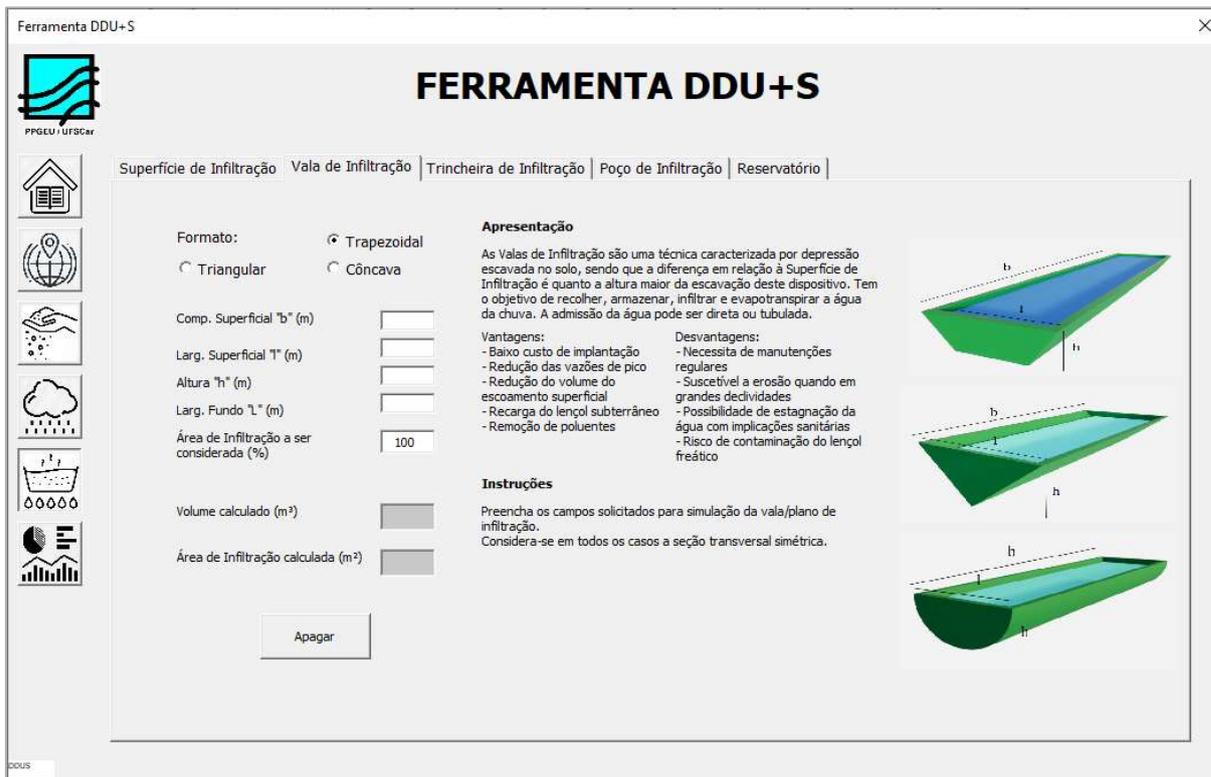
Fonte: Autor (2022)

Quanto as áreas de infiltração, são consideradas o fundo e desconsideradas as paredes para cômputo da área total. Neste ponto é importante comentar que não há na literatura indicação da porcentagem de área a ser considerada para infiltração destes dispositivos, porém foi programado na ferramenta um campo que permite ao usuário alterar essa variável.

4.4.3.5.b Vala de Infiltração

As valas de infiltração são dispositivos com a diversas possibilidades de perfil transversal. Para a Ferramenta DDU+S foram considerados os perfis transversais triangulares, trapezoidal e côncavo. A Figura 51 ilustra a tela da VI na Ferramenta DDU+S.

Figura 51 – Tela de Configuração da Vala de Infiltração na Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

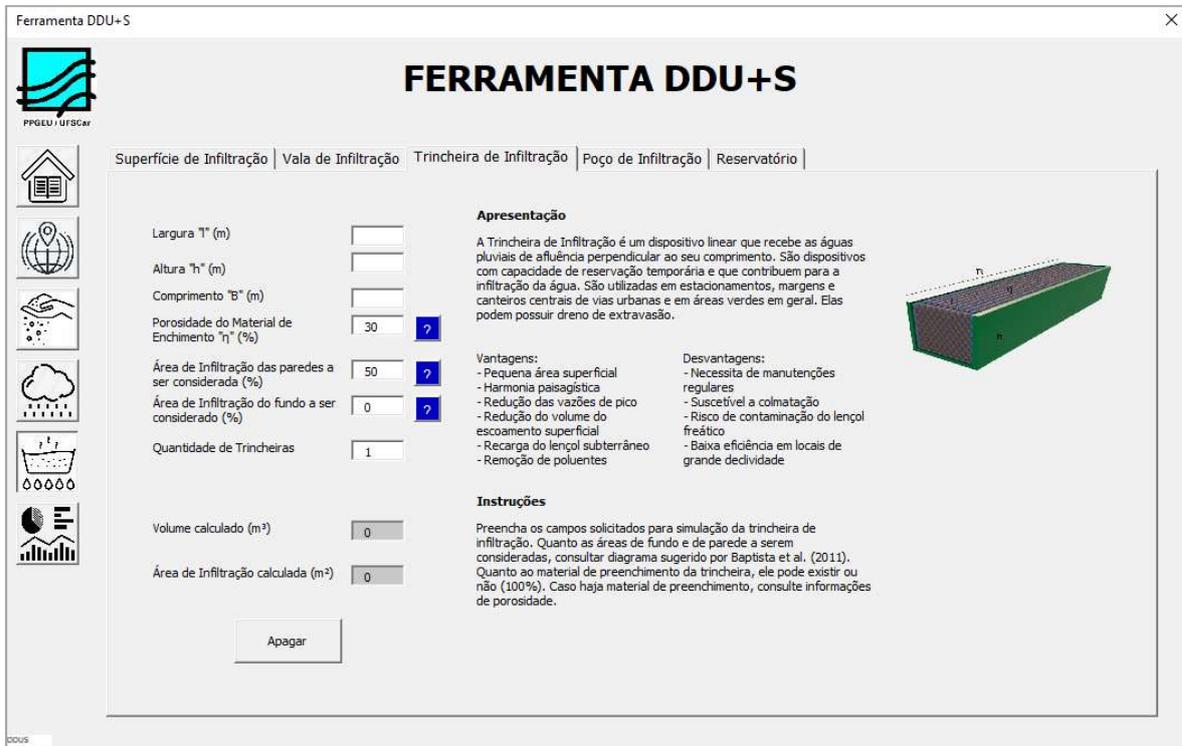
Para simplificação dos dados de entrada deste dispositivo, o programa calcula as áreas de paredes sem ser necessário informar a inclinação da mesma, utilizando as equações apresentadas em 3.6.4.2. No caso do perfil côncavo, a área de fundo confunde-se com a área de parede, calculado a partir das equações também apresentados em 3.6.4.2.

4.4.3.5.c Trincheira de Infiltração

Para a TI o usuário deverá inserir a profundidade, largura, comprimento, porosidade do material de enchimento e a porcentagem das áreas a serem consideradas para a infiltração, conforme a Figura 52. Quanto à porosidade do material de enchimento, assim como os poços, as trincheiras podem ser preenchidas ou não.

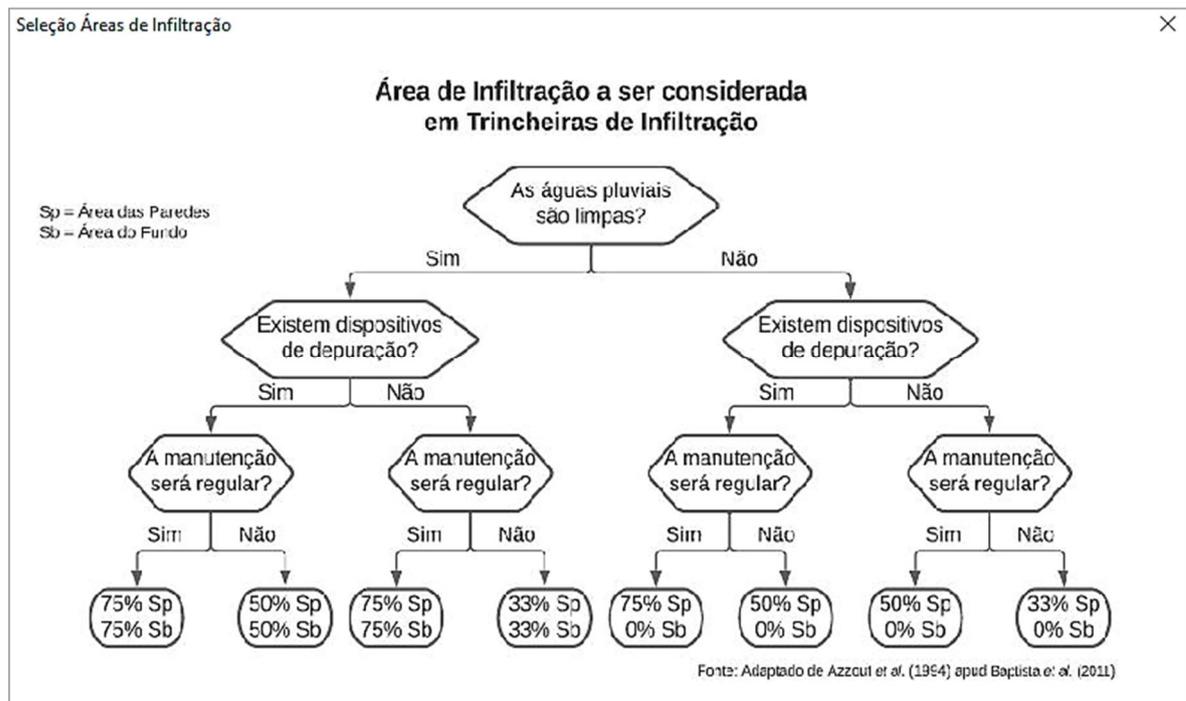
Para as áreas de infiltração a serem consideradas, existe também uma caixa de ajuda ao usuário que traz diagrama apresentado por Azzout *et al.* (1994) apud Baptista, Nascimento e Barraud (2011), conforme ilustrado na Figura 53 e indicado no item 3.6.4.3 da metodologia deste trabalho.

Figura 52 – Tela de Configuração da Trincheira de Infiltração na Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

Figura 53 – Tela contendo o diagrama de seleção de áreas de infiltração para trincheiras de infiltração



Fonte: Autor (2022)

4.4.3.5.d Poço de Infiltração

Para o PI o usuário deverá inserir a profundidade, diâmetro do poço, porosidade do material de preenchimento e percentual das áreas a serem consideradas, conforme ilustrado na Figura 54. Quanto à porosidade, os poços podem ser preenchidos ou não, o que irá alterar o volume de armazenamento do poço (Equação 26). A Ferramenta conta ainda com um campo para indicação da quantidade de poços de infiltração que serão instalados no projeto.

Figura 54 – Tela de Configuração do Poço de Infiltração na Ferramenta DDU+S

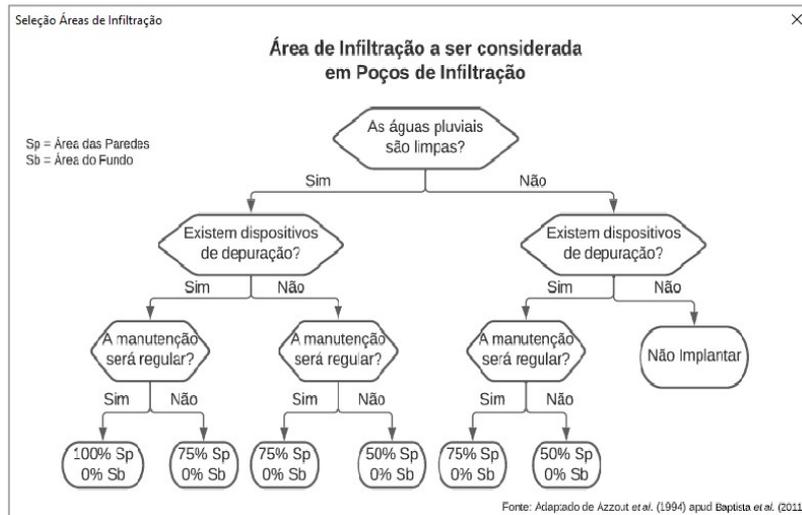
The screenshot shows the 'Ferramenta DDU+S' interface. At the top, there is a navigation bar with tabs: 'Superfície de Infiltração', 'Vala de Infiltração', 'Trincheira de Infiltração', 'Poço de Infiltração' (selected), and 'Reservatório'. The main area contains the following elements:

- Inputs:**
 - Altura "h" (cm):
 - Diâmetro "d" (cm):
 - Porosidade do material de preenchimento "n" (%):
 - Área de Infiltração das paredes a ser considerada (%): ?
 - Área de Infiltração do fundo a ser considerado (%): ?
 - Quantidade de Poços:
 - Volume calculado (m³):
 - Área de Infiltração calculada (m²):
- Buttons:** 'Apagar' button at the bottom left.
- Textual Information:**
 - Apresentação:** O Poço de Infiltração é um dispositivo projetado para temporariamente armazenar e infiltrar a água pluvial. A água infiltrada pelo poço irá alimentar o lençol subterrâneo e a vegetação vizinha. É um dispositivo de excelente integração ao ambiente urbano.
 - Vantagens:**
 - Pequena área superficial
 - Harmonia paisagística
 - Redução das vazões de pico
 - Redução do volume do escoamento superficial
 - Recarga do lençol subterrâneo
 - Desvantagens:**
 - Necessita de manutenções regulares
 - Suscetível a colmatagem
 - Risco de contaminação do lençol freático
 - Baixo volume de armazenamento
 - Instruções:** Preencha os campos solicitados para simulação de poços de infiltração. Quanto as áreas de fundo e de parede a serem consideradas, consultar diagrama sugerido por Baptista et al. (2011). Quanto ao material de preenchimento do poço, ele pode existir ou não (100%). Caso haja material de preenchimento, consulte informações de porosidade.
- 3D Model:** A 3D representation of a green cylindrical well with a blue top surface. The diameter is labeled 'd' and the height is labeled 'h'.

Fonte: Autor (2022)

Quanto às áreas a serem consideradas, existe uma caixa de ajuda ao usuário que traz diagrama apresentado por Azzout *et al.* (1994) apud Baptista, Nascimento e Barraud (2011), conforme ilustrado na Figura 55 e indicado no item 3.6.4.4 da metodologia deste trabalho.

Figura 55 – Tela contendo o diagrama de seleção de áreas de infiltração para poços de infiltração



Fonte: Autor (2022)

4.4.3.5.e Reservatório de água de chuva

A Figura 56 ilustra o cadastro dos dados dos RC na Ferramenta DDU+S. Estes dispositivos de grande simplicidade onde são solicitados ao usuário apenas as informações das dimensões do RC para possibilitar o cálculo do volume total de armazenamento utilizando as equações apontadas no item 3.6.4.5 da metodologia deste trabalho. Alternativamente, existe a possibilidade do usuário inserir as informações de volume para formatos não usuais de RC.

Figura 56 – Tela de Configuração do reservatório de água de chuva na Ferramenta DDU+S



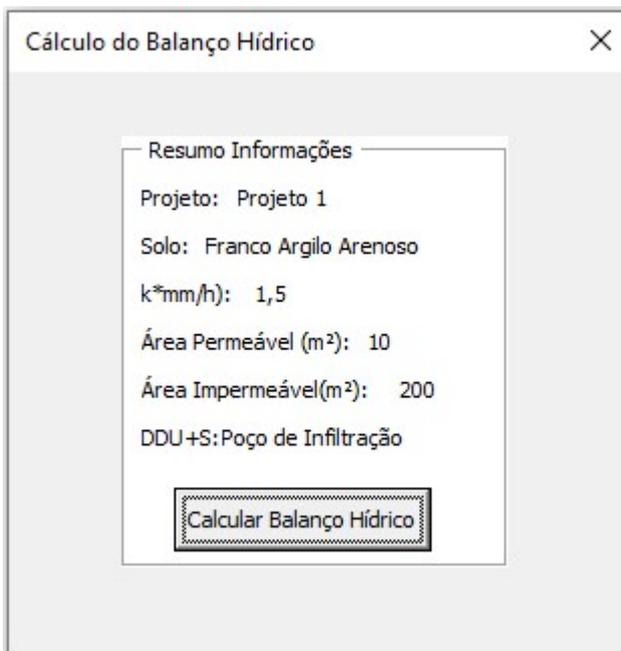
Fonte: Autor (2022)

A Ferramenta possibilita que o usuário escolha dispositivos com área de projeção retangular ou circular, que são as mais comuns de serem utilizadas, quer seja com a adoção de barris reaproveitados ou caixas de água no caso do formato cilíndrico, ou RC moldados *in loco* no caso do paralelepípedo.

4.4.3.6 Tela de Resultados

Ao chamar a última tela da ferramenta DDU+S é exibida uma caixa com o resumo das informações do projeto, como o tipo de solo, áreas permeáveis e impermeáveis, condutividade hidráulica e dispositivo selecionado, conforme ilustrado na Figura 57. Após a verificação, o usuário pode iniciar o cálculo do balanço hídrico através de botão em destaque.

Figura 57 – Caixa apresentando o resumo das informações do projeto

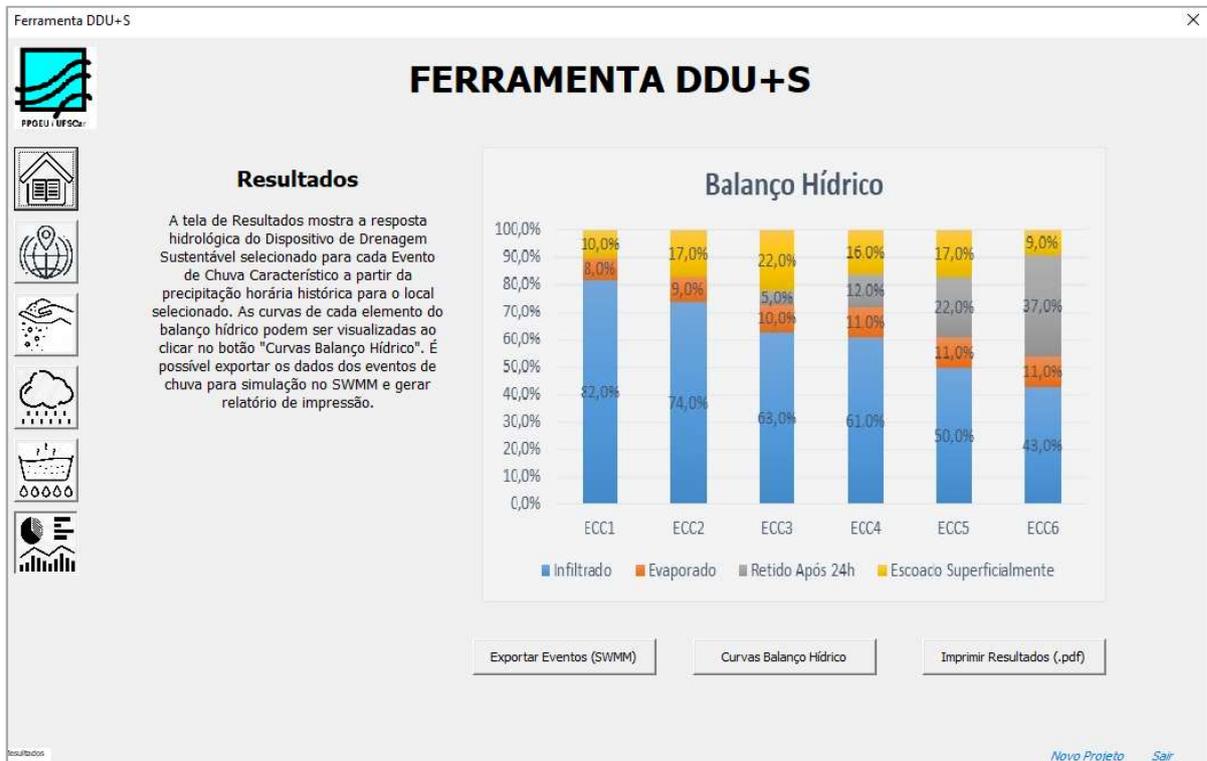


Fonte: Autor (2022)

Após o cálculo do balanço hídrico, a Ferramenta DDU+S exibe a tela de resultados geral, apresentando os dados calculados para cada ECC, conforme ilustrado na a Figura 58. Esta tela da ferramenta possui três botões, sendo o primeiro para executar a exportação dos dados dos eventos de chuva características para o padrão SWMM, o segundo para visualização detalhada das curvas do balanço hídrico e o último para impressão de relatório com os dados da simulação.

Ao solicitar a visualização das curvas do balanço hídrico, a ferramenta abre nova janela, conforme ilustrado na Figura 59, onde o usuário poderá escolher entre cada um dos seis eventos de chuva característicos simulados pela ferramenta para exibir gráfico com a cronologia do respectivo evento, mostrando ao usuário ao longo do tempo qual o volume infiltrado, armazenado, evaporado e extravasado pelo dispositivo. Na parte inferior desta janela é exibido o resumo do evento de chuva com informações principais como a altura total de chuva, duração e intensidades mínima, média e máxima; e resumo do balanço hídrico com os totais de infiltração, evaporação, retenção e extravasão.

Figura 58 – Tela de Resultados da Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

Figura 59 – Janela de exibição das curvas do balanço hídrico calculado pela Ferramenta DDU+S



Fonte: Autor (2022)

A Ferramenta DDU+S apresenta os resultados da simulação de forma gráfica, permitindo visualizar os potenciais benéficos da utilização de um dispositivo de drenagem sustentável para cara ECC, além de permitir a análise da cronologia do evento diretamente do programa. No SWMM é

necessário simular cada evento de forma independente, produzir os gráficos em programa auxiliar para depois permitir a análise do operador. Assim, a Ferramenta DDU+S é mais eficiente para avaliação do comportamento do dispositivo sustentável submetido a diferentes eventos.

4.5 Aplicação da Ferramenta DDU+S

Neste trabalho, foi adotado o padrão de simulação de até 24h após o término do evento de chuva como forma de visualizar como o dispositivo irá se comportar nesse período de tempo e se o mesmo estará apto ou não, em termos de volume de armazenamento, a receber um novo evento de chuva após esse prazo, que coincide com o intervalo entre eventos de chuva usado na determinação de ECC.

Foram utilizados os seis eventos de chuva determinados no item 4.1 deste trabalho. Estes eventos possuem não apenas volume e duração total distintos, como também se desenvolvem de maneira particular, com sequências de intensidades pluviométricas diferentes, causando estresse heterogêneo sobre os dispositivos de drenagem sustentável.

A Ferramenta DDU+S foi aplicada em 3 áreas de contribuição, sendo: microbacia norte do campus da UFSCar para simulação da SI e da VI; estacionamento da microbacia norte do campus da UFSCar para simulação das trincheiras de infiltração; e edificação do Laboratório de Biopolímeros para simulação do PI e RC. Os casos de aplicação buscam reproduzir situações prováveis de utilização da Ferramenta DDU+S. Os dados de entrada utilizados para a construção do modelo SWMM e da Ferramenta DDU+S podem ser visualizados no Apêndice D deste trabalho.

4.5.1 Superfície de infiltração

A SI em estudo irá receber águas pluviais provenientes dos telhados dos edifícios do Departamento de Medicina II com área de 1.426,7 m² e do Departamento de Gerontologia com 188 m², somados a área do estacionamento adjacente com 6000 m², sendo destes 350 m² em área permeável. A SI foi modelada como possuindo 655 m² e 0,8 m de profundidade média em formato de tronco de pirâmide de 32 m por 20,5 m na superfície e 26 m por 15 m no fundo. O trabalho realizado por Tecedor *et al.* (2013) indica que o solo local é franco argilo arenoso. A Figura 60 ilustra a área de estudo.

Figura 60 – Área de estudo da superfície de infiltração

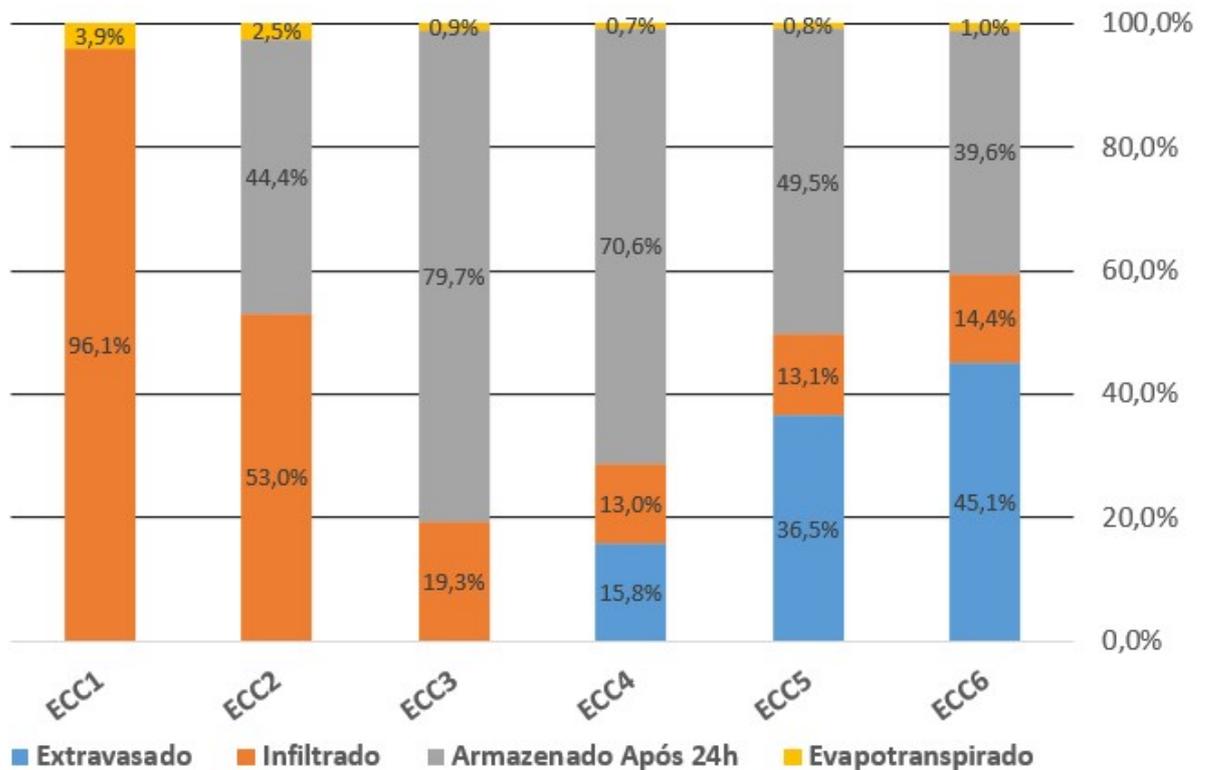


Fonte: Autor (2022)

4.5.1.1 Resultados do Balanço Hídrico para a Superfície de Infiltração

A SI foi simulada até 24h após o fim do evento de chuva. A Figura 61 mostra o balanço hídrico deste dispositivo para cada um dos eventos de chuva característicos simulados pela Ferramenta DDU+S, partindo do ECC1 à esquerda até o ECC6, em porcentagens do volume de escoamento superficial gerado na bacia em estudo. É possível observar, nesta simulação, que este dispositivo apresenta excelente capacidade de reter, infiltrar e evaporar a água de escoamento superficial da bacia estudada até o ECC3, que representa chuvas até o 90º percentil da amostra de dados pluviométricos. Iniciando no ECC4 até o ECC6, ocorre aumento das porcentagens de extravasão, enquanto as porcentagens de infiltração mantêm-se similares, próximos as 13%.

Figura 61 – Porcentagens do balanço hídrico para a superfície de infiltração simulada



Fonte: Autor (2022)

Em todos os casos a porcentagem de evapotranspiração é pequena, o que indica que mesmo o dispositivo com maior potencial de evapotranspiração, devido a sua grande área superficial, tem dificuldade em simular o balanço hídrico pré-urbanização, uma vez que o tempo de 24h após o término do evento não é suficiente para gerar volumes significativos de evapotranspiração.

Considerando que o ECC1 representa até o 50º percentil da amostra de dados pluviométricos, a SI será capaz de fornecer redução do escoamento superficial em grande parte dos eventos que ocorrem nesta bacia, e estando imediatamente apto a receber novos eventos já que não há volume retido após 24h de simulação. Para o ECC2 e ECC3, apesar de apresentar volume armazenado no término da simulação significativo em termos de porcentagem em relação ao escoamento superficial produzido na bacia, ainda existe grande volume útil disponível no dispositivo. As informações de volumes do balanço hídrico simulado podem ser melhor visualizadas no Apêndice B deste trabalho, que apresenta as curvas simuladas para cada evento de chuva e dispositivo.

Apesar de não conseguir, para a SI simulada, reter todo o volume de escoamento superficial para os ECC4, ECC5 e ECC6, por meio dos mecanismos de infiltração, retenção e evapotranspiração, a SI simulada reduziu significativamente a porcentagem de água pluvial em escoamento superficial, ajudando na gestão das bacias a jusante, porém não excluindo a necessidade de manutenção de redes de drenagem pluvial tradicionais.

4.5.2 Vala de Infiltração

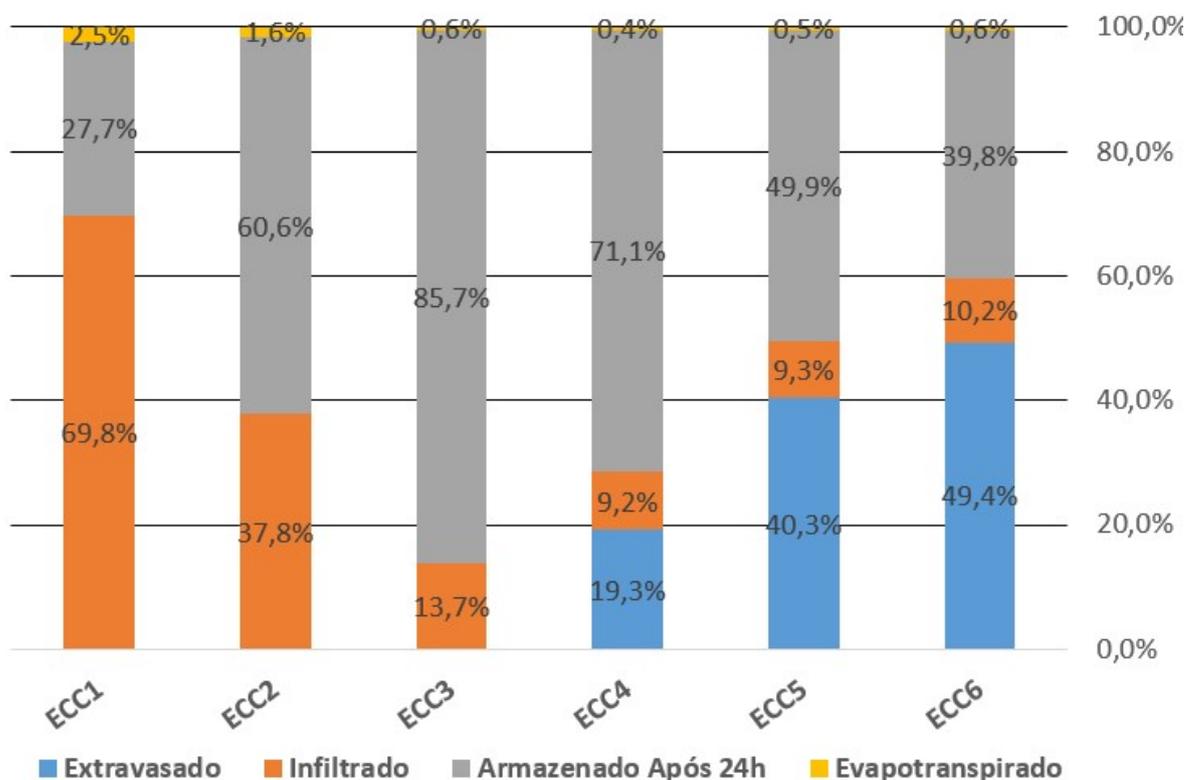
A área de estudo para a VI é a mesma selecionada a SI, conforme ilustrado na Figura 60, porém substituindo a SI pela VI. Foi modelado VI de seção transversal retangular com 20,5m de comprimento, 12m de largura superficial, 4m de largura no fundo e 2,5m de profundidade. O volume total da VI simulada é semelhante ao da SI, porém a vala possui áreas de parede que permitem a infiltração da água no solo e ocupam uma área do terreno significativamente menor.

4.5.2.1 Resultados do Balanço Hídrico para a Vala de Infiltração

A Figura 62 ilustra as porcentagens do balanço hídrico simuladas para a VI até 24h após o fim dos eventos de chuva. Para esta simulação, apesar do volume útil semelhante entre a VI e a SI simulada anteriormente, houve diferenças na dinâmica do comportamento do dispositivo, que podem ser melhor visualizadas no Apêndice B deste trabalho.

Nesta simulação, a menor área de infiltração deste dispositivo em relação a SI teve maior influência nos eventos de chuva com menor volume total precipitado e menor duração total do evento. Para o ECC1, a VI não foi capaz de infiltrar todo o volume recebido da bacia, sendo calculado que cerca de 27,7% do volume de escoamento superficial estará retido no dispositivo após o término da simulação nas condições estabelecidas neste estudo. A partir do ECC2, o comportamento da vala passa a progressivamente se aproximar do comportamento da SI, sendo para o ECC6 calculado valores semelhantes dos elementos do balanço hídrico para os dois dispositivos.

Figura 62 - Percentagens do balanço hídrico para a vala de infiltração simulada



Fonte: Autor (2022)

Considerando a simulação realizada, o maior impacto da adoção de uma VI em substituição a uma SI seria para os eventos até o 75º percentil da amostra, de menor volume total. Os resultados diretos do balanço hídrico obtidos pela Ferramenta DDU+S e a rápida alteração do dispositivo simulado proporcionada pelo modelo auxiliam na escolha do método a ser adotado para gestão do escoamento superficial em uma bacia.

4.5.3 Trincheira de Infiltração

O estacionamento selecionado para estudo situa-se próximo ao departamento de Fisioterapia da UFSCar, possuindo área total de 6000m², sendo destes 350 m² em área permeável. Neste local existem 10 fileiras de parada e via de acesso nas duas laterais principais. Apesar de construído em pavimento de concreto intertravado, que possui uma certa capacidade de infiltração, foi considerado situação que esse pavimento está inteiramente colmatado e, portanto, impermeável. Apesar deste estacionamento receber contribuições de águas pluviais

de áreas vizinhas, para esta análise essa situação foi desconsiderada. As trincheiras de infiltração foram propostas em frente a cada uma das fileiras de parada, totalizando 7 unidades com comprimento aproximado de 50 m, largura e profundidade sugerida de 0,5 m. A Figura 63 ilustra a área de estudo.

Figura 63 – Trincheiras de infiltração em estacionamento



Fonte: Autor (2022)

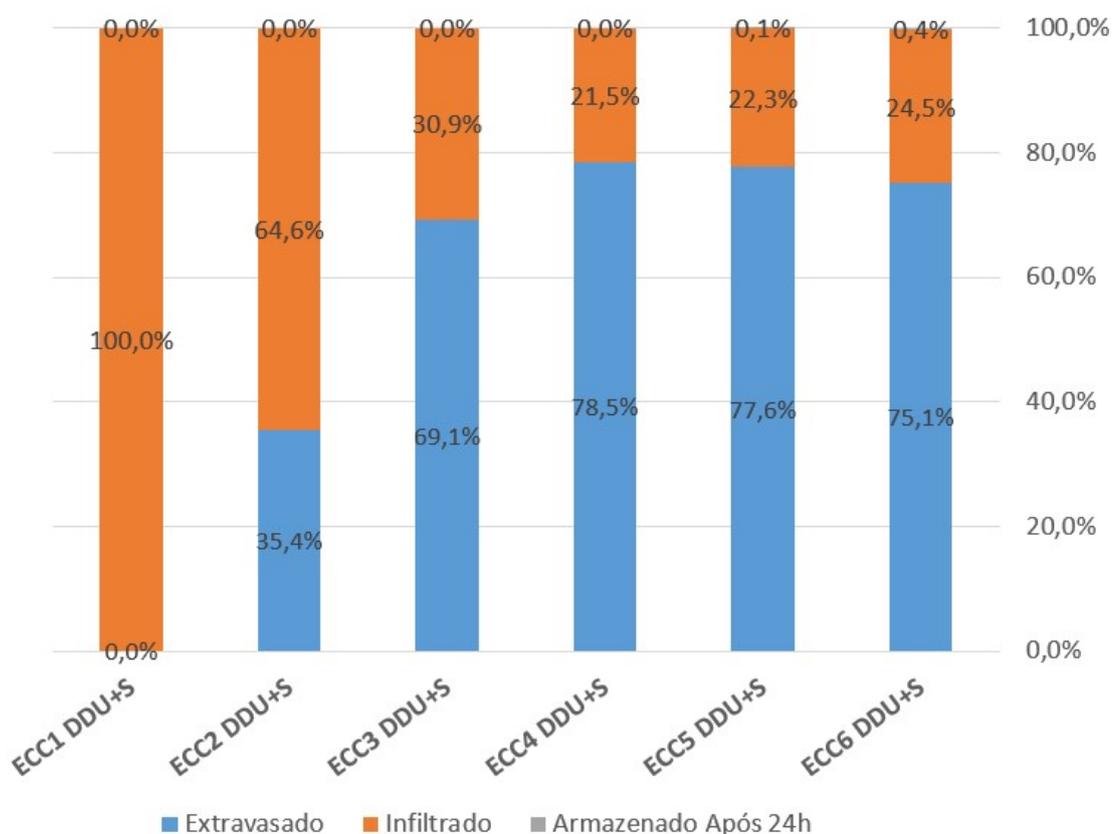
Tecedor *et al.* (2013) realizou como parte do seu trabalho análise granulométrica de solo em área vizinha a este estacionamento. De acordo com as frações granulométricas obtidas pela autora, é possível classificar o solo como sendo franco argilo arenoso na classificação do USDA, que será utilizado para o estudo.

4.5.3.1 Resultados do Balanço Hídrico para as Trincheiras de Infiltração

A Figura 64 ilustra os resultados obtidos na simulação das trincheiras de infiltração até 24h após o fim dos eventos. Estes dispositivos possuem capacidade limitada de reprodução do balanço hídrico pré-urbanização, com extravasos significativos a partir do ECC2. O uso destes dispositivos deve ser incentivado em condições de restrição de área e associados a outras técnicas, já que individualmente não são capazes de provocar grande limitação do escoamento superficial da bacia.

Em nenhum dos cenários pluviométricos simulados a TI foi capaz de reter com todo o volume de água de escoamento superficial da bacia em estudo. Observa-se ainda que o ECC6 é menos crítico do que os ECC5, ECC4 em termos de porcentagem do volume gerado vs. extravasão, por apresentar longos períodos secos que permitem o esvaziamento da trincheira.

Figura 64 - Porcentagens do balanço hídrico para a trincheira de infiltração (50x50cm) simulada



Fonte: Autor (2022)

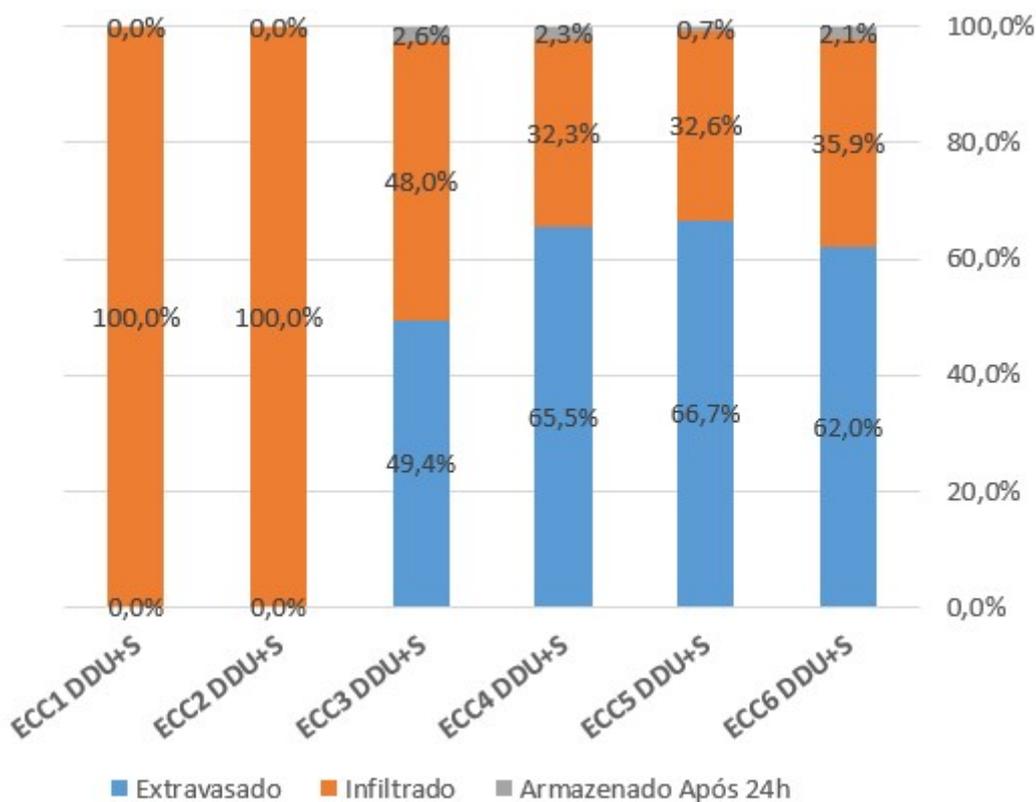
Nesta simulação, as porcentagens relativas à infiltração proporcionada pelas trincheiras são superiores ao caso simulado das valas de infiltração, no entanto o baixo volume útil das

trincheiras contribui significativamente para o aumento da extravasão. O volume retido ao final da simulação é reduzido em comparação às simulações da superfície e VI pelo mesmo motivo. O comportamento dinâmico da TI nos eventos estudados pode ser melhor visualizado no Apêndice B deste trabalho.

É importante ressaltar que qualquer contribuição para redução do escoamento superficial de uma bacia é benéfica do ponto de vista da sustentabilidade, no entanto uma avaliação dos custos envolvidos na implantação de dispositivos perante os benefícios proporcionados é sempre necessária para uma boa gestão das águas pluviais, já que o recurso financeiro é um bem limitado.

Para avaliar a possibilidade de melhorar a capacidade da TI de simular as condições hidrológicas pré-urbanização da área de contribuição do estacionamento, foi proposto o aumento das dimensões desta trincheira, com largura de 80cm e altura de 60cm, e realizada nova simulação, sendo o balanço hídrico apresentado na Figura 65.

Figura 65 - Porcentagens do balanço hídrico para a trincheira de infiltração (80x60cm) simulada



Fonte: Autor (2022)

Observa-se que mesmo duplicando o volume da trincheira e aumentando em 45% sua área de infiltração, essas modificações não significaram grande incremento na capacidade deste

dispositivo em reter do escoamento superficial para os ECC de maior volume precipitado. No entanto, para o ECC2 e ECC3 foi verificado uma redução significativa dos volumes extravasados.

4.5.4 Poço de Infiltração

O telhado em estudo para simulação do PI isolado pertence ao laboratório de Biopolímeros da UFSCar e possui duas inclinações, sendo que uma delas é associada a pátio pavimentado no térreo com área total de contribuição de 287,5 m², conforme ilustrado na Figura 66.

Figura 66 –Laboratório de Biopolímeros UFSCar

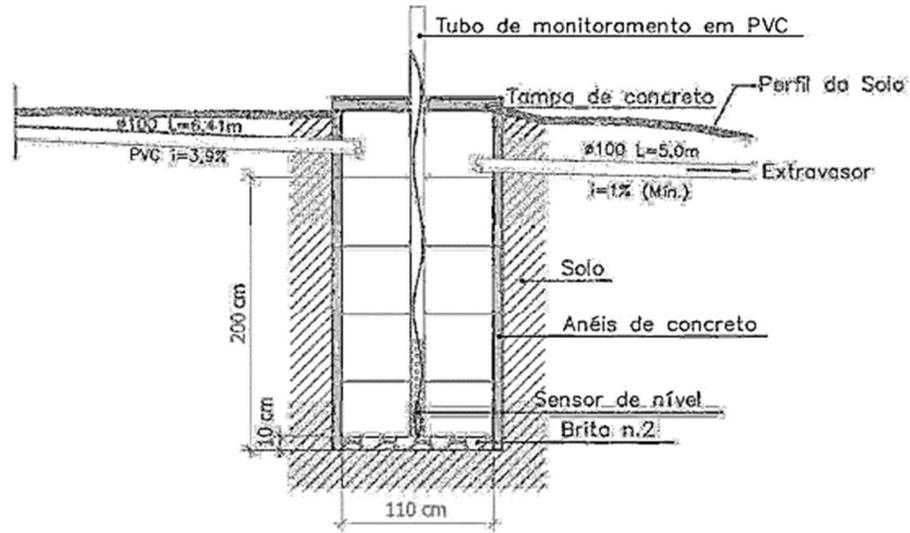


Fonte: Autor (2022)

A face sul do telhado não contribui para o PI estudado. O solo do local pode ser classificado de acordo nomenclatura do USDA como sendo franco argilo arenoso, porém foi determinado o coeficiente de permeabilidade saturado pelo método de Pratt e Powel como

sendo de 17,3 mm/h por Ferreira (2016). O poço modelado seguiu ainda o padrão construído no trabalho de Ferreira (2016), ilustrado na Figura 67.

Figura 67 – Detalhe Poço de Infiltração



Fonte: Ferreira *et al.* (2016)

O poço foi executado com anéis de concreto de diâmetro interno de 110 cm e altura útil até o extravasor de 200 cm, não havendo material de enchimento e sendo permitido a infiltração pelo fundo e laterais do poço. Para simplificação, na Ferramenta DDU+S não foi considerado o volume dos vazios do lastro de brita existente no fundo do poço.

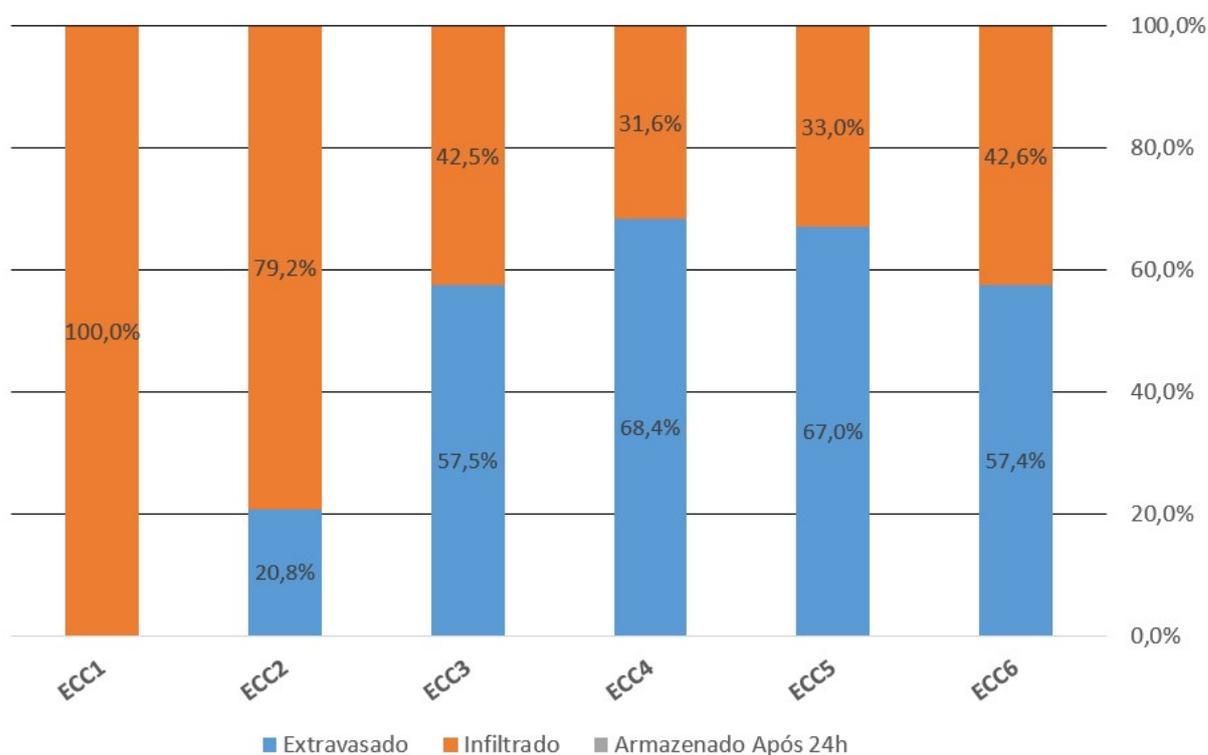
A Ferramenta DDU+S possui campo específico para modelagem de poços de infiltração. As informações principais de altura e diâmetro do poço são inseridas, e as áreas e volumes calculados pela própria ferramenta. Adotou-se neste trabalho que o poço teria 50% da área de fundo e 75% das áreas de paredes a serem considerados no cálculo da infiltração.

A porcentagem de áreas de parede e fundo a serem consideradas em simulações de poços de infiltração é ponto crítico para qualquer modelo. Neste trabalho levou-se em consideração que o poço é recém implantado e, portanto, com baixa colmatação. É importante comentar que com o modelo SWMM é possível realizar simulações contínuas considerando a colmatação ao longo do tempo, através de taxa inserida pelo usuário. Por ser um modelo de evento, a Ferramenta DDU+S não considera a evolução da colmatação.

4.5.4.1 Resultados do Balanço Hídrico para o Poço de Infiltração

A Figura 68 mostra os resultados obtidos na simulação do PI para receber o escoamento superficial da edificação do laboratório de Biopolímeros. Em nenhum evento foi registrado volume armazenado após as 24h do fim do evento de chuva, o que mostra que este dispositivo possui boa relação volume/área de infiltração.

Figura 68 - Porcentagens do balanço hídrico para o poço de infiltração simulado



Fonte: Autor (2022)

Ao receber o escoamento superficial do ECC1, o poço foi capaz de infiltrar todo o volume, anulando o escoamento superficial para este evento, mostrando excelente aplicação para até o 50º percentil da amostra de dados pluviométricos. Para os eventos a partir do ECC3, o PI teve desempenho variado, sendo que o balanço para o ECC3 apresentou uma porcentagem maior escoado do que o ECC4, devido a dinâmica deste último evento. Quando comparado o ECC4 e ECC5, o desempenho do poço foi similar. As curvas do balanço hídrico deste dispositivo para cada ECC também estão apresentadas no Apêndice B deste trabalho.

Nesta simulação, o PI apresentou capacidade de reduzir aproximadamente 80% do volume de escoamento superficial para até o 75º percentil da amostra de chuva, representada

pelo ECC2, o que indica que este dispositivo irá contribuir significativamente na gestão da água pluvial desta edificação na maior parte dos eventos de chuva.

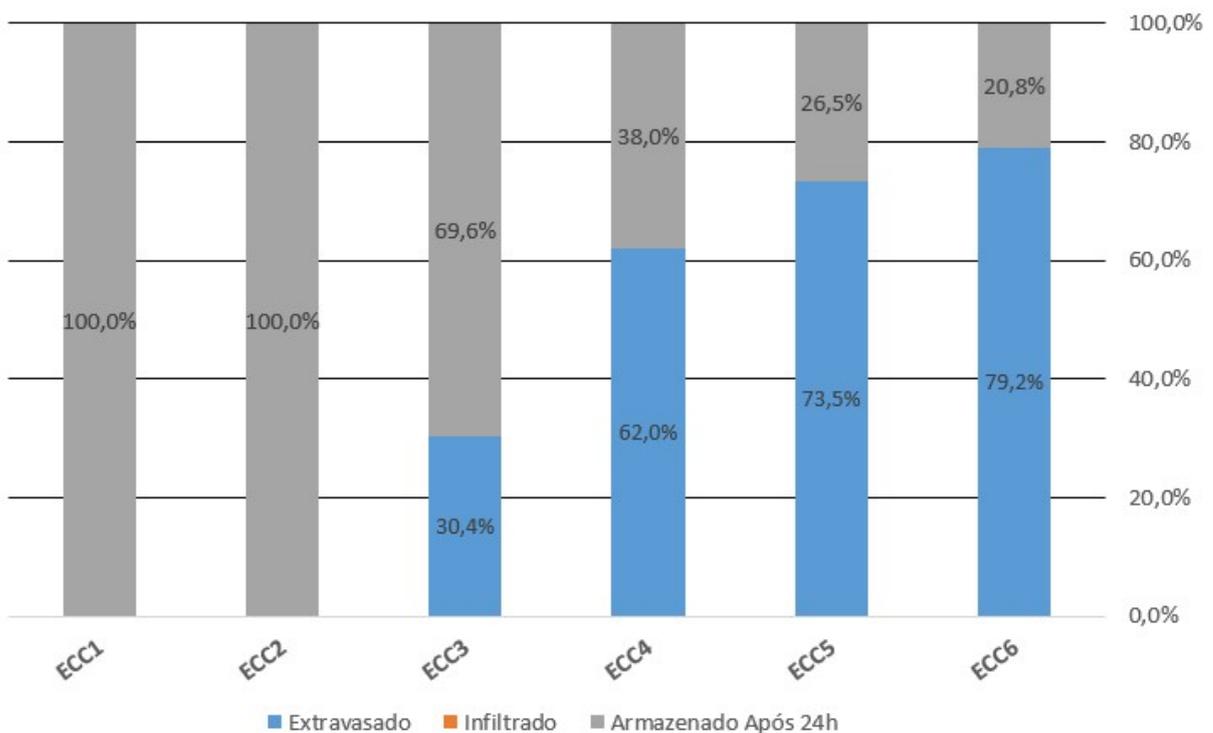
4.5.5 Reservatório de água de chuva

A área de estudo para o RC é a mesma selecionada para o PI, conforme ilustrado na Figura 66. O RC proposto possui forma retangular, com altura, largura e comprimento de 2m. Por ser um RC, a infiltração e evaporação da água armazenada não está prevista. Este dispositivo foi considerado no mesmo cenário do PI e submetido a todos os ECC

4.5.5.1 Resultados do Balanço Hídrico para o Reservatório de Água de Chuva

A Figura 69 mostra os balanços hídricos calculados para o RC no caso em estudo. Observa-se que apesar de não contribuir com evapotranspiração e infiltração, o volume do RC simulado foi capaz de reter todo o volume de escoamento superficial gerado pelo ECC1 e ECC2.

Figura 69 - Porcentagens do balanço hídrico para o reservatório de água de chuva simulado



Fonte: Autor (2022)

Este dispositivo pode auxiliar tanto na redução do escoamento superficial, quanto na redução consumo de água potável através da reutilização da água armazenada para fins não potáveis. No entanto, considerando o objetivo dos DDUS de aproximar o balanço hídrico atual ao de pré-urbanização, os RC não cumprem essa meta, por não proporcionarem a infiltração e/ou evapotranspiração da água retida. A dinâmica do enchimento do dispositivo pode ser melhor visualizada no Apêndice B deste trabalho.

4.5.6 Discussões sobre a aplicação da Ferramenta DDU+S

Os testes de aplicação da Ferramenta DDU+S mostraram que este modelo simples é capaz de fornecer informações de grande valia para o usuário. A ferramenta computacional foi aplicada em escala de lote e de microbacias utilizando dispositivos de drenagem sustentável recomendados para as situações propostas. O resultado final da ferramenta, onde é apresentado o balanço hídrico em 6 cenários de chuva distintos, pode ajudar na seleção de dispositivos e na visualização dos potenciais benefícios de utilização de técnicas sustentáveis.

Os volumes armazenados após 24h do término do evento em termos percentuais não ilustram a capacidade ocupada do dispositivo, e sim a porcentagem do volume de escoamento superficial da bacia simulada que ficou retido no prazo estabelecido de simulação, e fornece, portanto, informações do balanço hídrico do dispositivo nas condições do estudo. Estes volumes podem sofrer infiltração e evapotranspiração nas horas seguintes, no entanto, há também a possibilidade de um novo evento ocorrer ao fim desse prazo, o que irá ocupar o volume útil do dispositivo, iniciando um novo ciclo. Por ser um método de simulação de eventos, não cabe especular o que poderá ocorrer na sequência, e sim avaliar as informações calculadas dentro das condições de contorno do estudo.

É importante destacar ainda que os dispositivos de drenagem sustentável estão configurados de acordo com os métodos construtivos tipicamente adotados no Brasil. A experiência com Ferramenta DDU+S é fluida, e exige pouca capacitação do usuário, que é capaz de gerar resultados em poucos minutos de operação.

4.6 Avaliação da Ferramenta DDU+S

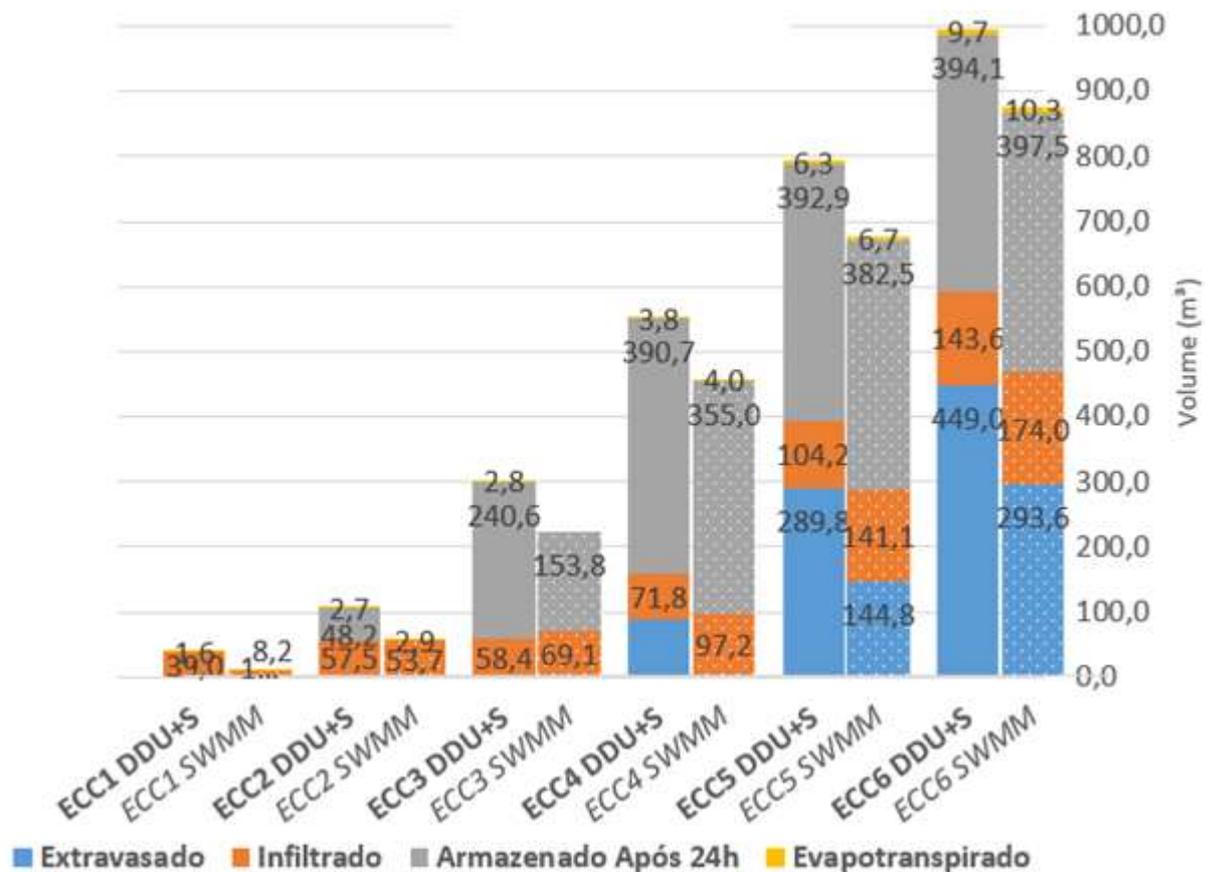
A avaliação da Ferramenta DDU+S foi realizada modelando no SWMM os seis ECC em bacias e dispositivos semelhantes aos construídos no item 4.5 deste trabalho, conforme considerações expostas em 3.7 da metodologia. Inicialmente compararam-se as porcentagens e

volumes totais gerados pelos dois modelos para os elementos do balanço hídrico sob condições semelhantes e, na sequência, aplicaram-se três testes estatísticos (PBIAS, RSR e NSE) para avaliação do desempenho da Ferramenta DDU+S utilizando os resultados do SWMM como referência.

4.6.1 Avaliação da Ferramenta DDU+S vs. SWMM para a Superfície de Infiltração

A Figura 70 ilustra diferenças obtidas no balanço hídrico da SI utilizando a Ferramenta DDU+S e o SWMM para os ECC em termos de volume total de água em metros cúbicos. De forma geral, os volumes calculados de entrada no dispositivo são maiores na Ferramenta DDU+S do que os obtidos pelo SWMM, neste modelo de simulação. Essas diferenças podem ser melhor visualizadas no Apêndice B deste trabalho, que mostra as curvas detalhadas de escoamento superficial, evapotranspiração, infiltração e armazenamento para cada um dos eventos utilizando o SWMM e a Ferramenta DDU+S.

Figura 70 – Comparativo do Balanço Hídrico obtido com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM

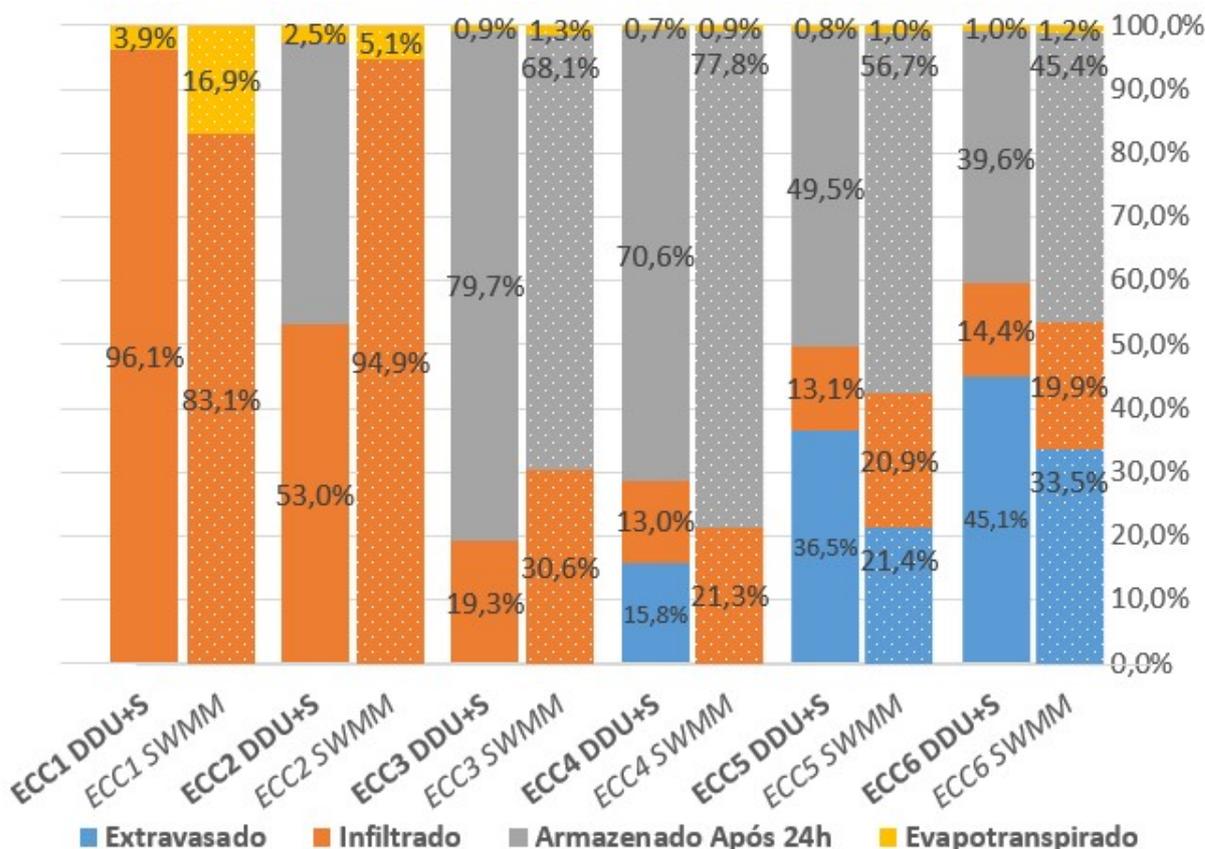


Fonte: Autor (2022)

Conforme pode ser constatado na Figura 70, o volume de escoamento superficial gerado na bacia é sempre superior na Ferramenta DDU+S. Os volumes de evapotranspiração são muito semelhantes para os dois modelos, assim como o volume armazenado no fim da simulação. As maiores diferenças estão, portanto, no cálculo da infiltração e da extravasão, que estão ligadas principalmente ao método de cálculo para as primeiras horas de escoamento superficial e a estimativa mais refinada do SWMM quanto à infiltração, já que este modelo considera a capacidade do solo de recuperar sua taxa de infiltração em períodos secos.

A Figura 71 faz o comparativo do balanço hídrico obtido no modelo proposto da SI para a Ferramenta DDU+S e o SWMM. Ao fazer uma avaliação do gráfico, é possível observar que os modelos vão aumentando sua semelhança de acordo com o aumento da classe da chuva, ou seja, com o aumento do volume total precipitado. A Ferramenta DDU+S desconsidera perdas iniciais do escoamento superficial, o que aumenta, portanto, a diferença em eventos de baixo volume total.

Figura 71 – Balanço Hídrico da superfície de infiltração para os diversos ECC



Fonte: Autor (2022)

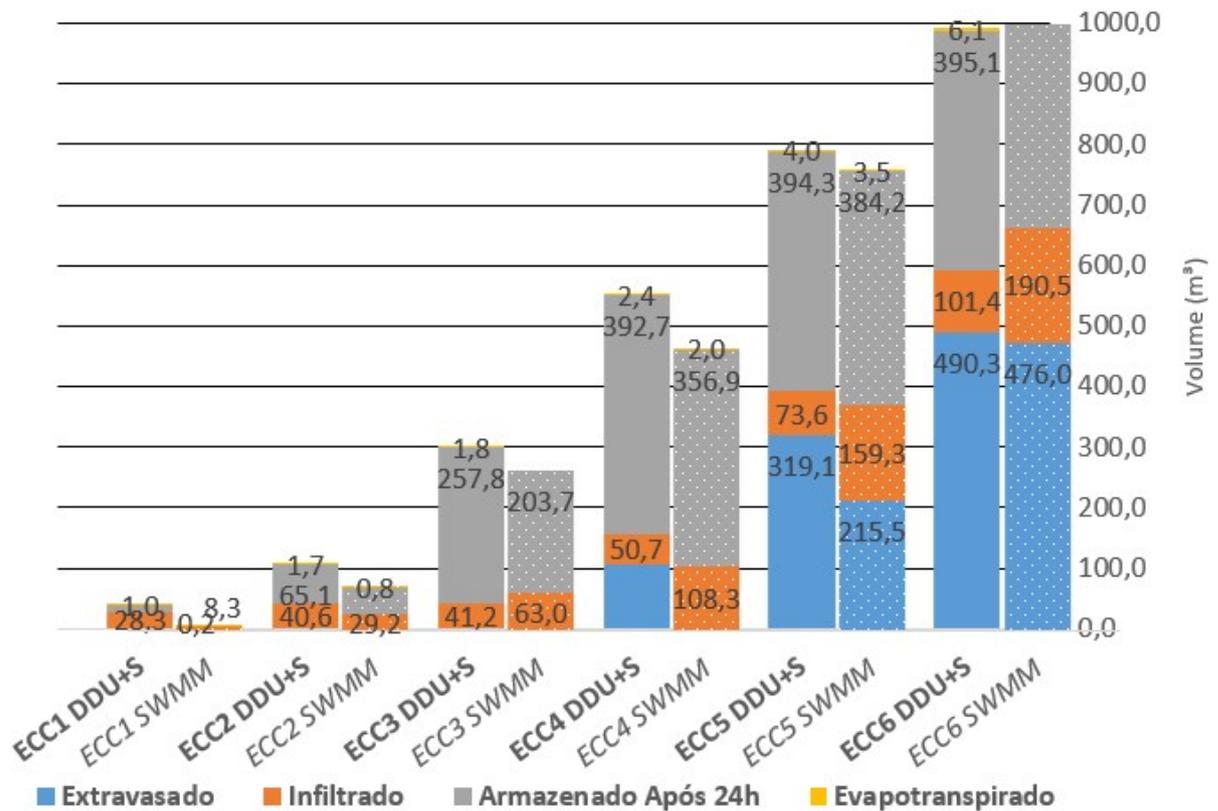
Com exceção do ECC1, a Ferramenta DDU+S simulou cenários mais críticos para a bacia, já que foi calculada uma menor porcentagem total de infiltração e evapotranspiração,

maior porcentagem de extravasão do dispositivo. Para o ECC2, houve grande diferença entre o balanço obtido com o SWMM e a Ferramenta DDU+S, ocasionada principalmente pelo maior volume de escoamento superficial calculado na Ferramenta DDU+S.

4.6.2 Avaliação da Ferramenta DDU+S vs. SWMM para a Vala de Infiltração

A Figura 72 mostra os dados do balanço hídrico em termos de volumes totais. É possível observar novamente que os volumes totais calculados entre os dois modelos apresentam similaridade, com exceção do ECC1. Nos ECC4, ECC5 e ECC6 o volume armazenado após 24h do fim do evento é aproximadamente o mesmo. No SWMM foi calculado volume de infiltração aproximadamente o dobro do calculado pela Ferramenta DDU+S nestes mesmos eventos. O volume não infiltrado no cálculo da Ferramenta DDU+S se transforma em armazenamento ou extravasão, o que explica os maiores índices de extravasão desta ferramenta.

Figura 72 - Comparativo do Balanço Hídrico obtido com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para a vala de infiltração

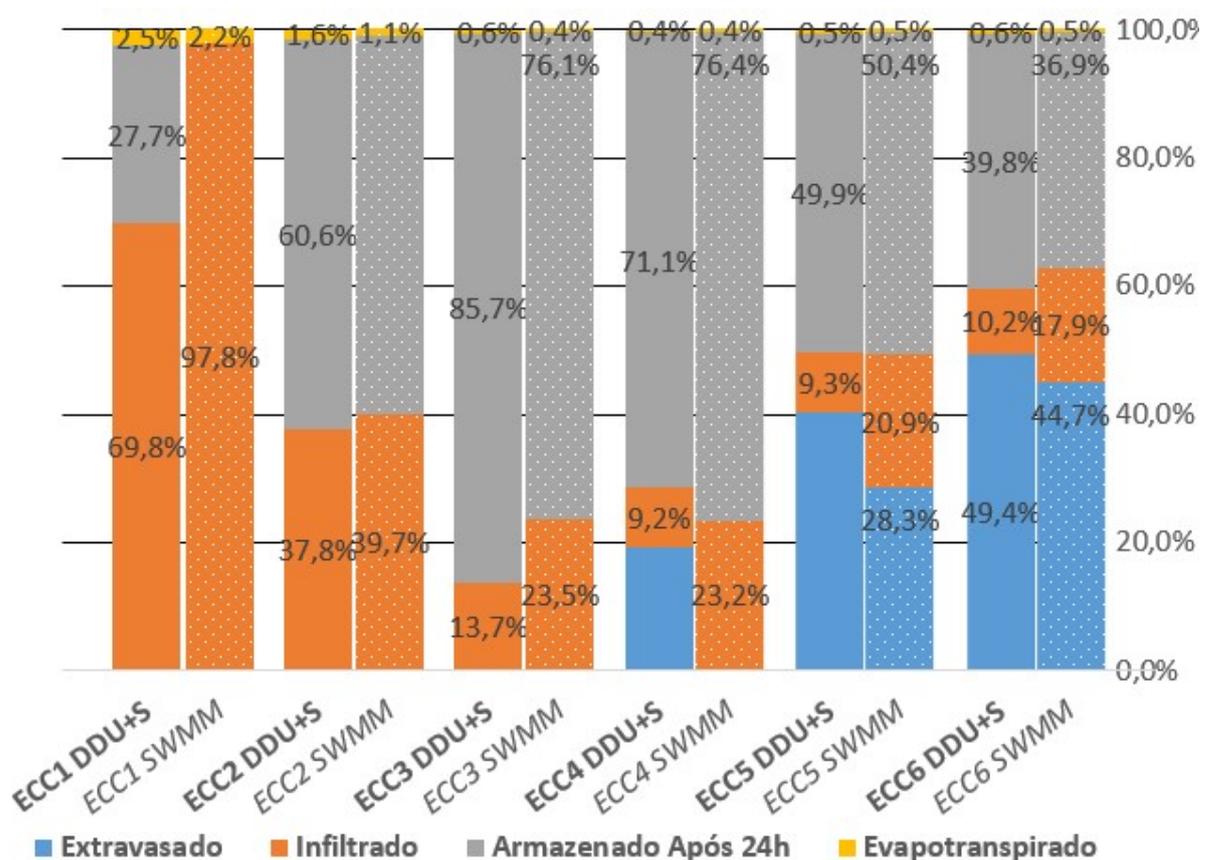


Fonte: Autor (2022)

Através da Figura 72 é possível constatar ainda que em termos de volume, a evapotranspiração calculada pela Ferramenta DDU+S está ligeiramente superior ao do SWMM, no entanto esses valores representam menos de 1% do escoado superficialmente pela bacia, conforme pode ser visto na Figura 73, que mostra o balanço hídrico da VI em porcentagem do volume de escoamento superficial gerado na bacia, obtidos com o SWMM e com a Ferramenta DDU+S.

Graficamente os modelos apresentam proximidade das proporções dos elementos do balanço hídrico calculado. Assim como ocorreu para a SI, na VI apresentou grande diferença para a simulação do ECC1, devido as perdas iniciais ignoradas pela Ferramenta DDU+S, que são de grande relevância para eventos de baixo volume total precipitado.

Figura 73 – Balanço Hídrico da vala de infiltração para os diversos ECC



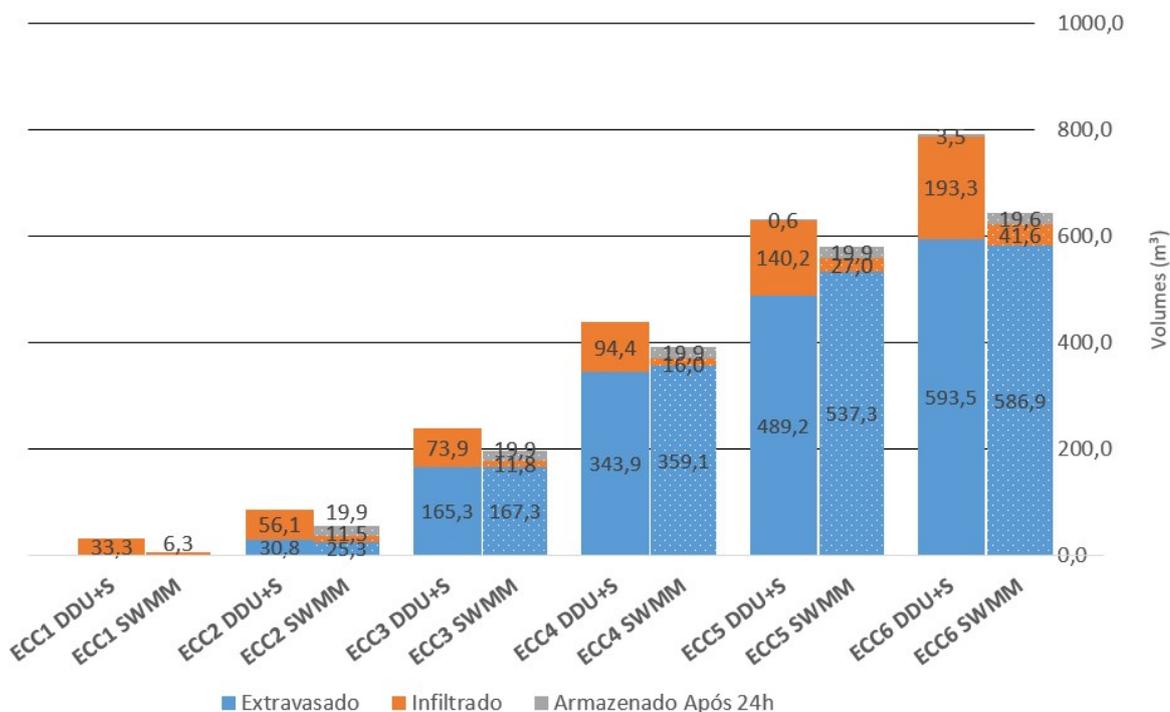
Fonte: Autor (2022)

É análoga ainda a observação de que a Ferramenta DDU+S está simulando um cenário mais crítico para a bacia, com menores proporções de água infiltrada e maiores porcentagens de água extravasada. As porcentagens evapotranspiradas são similares nos dois modelos.

4.6.3 Avaliação da Ferramenta DDU+S vs. SWMM para a Trincheira de Infiltração

A TI foi simulada até 24h após o fim do evento para o estudo de caso do estacionamento utilizando os dois modelos computacionais. A Figura 74 ilustra o balanço hídrico calculado para cada ECC utilizando a Ferramenta DDU+S em comparação ao mesmo cenário modelo com o SWMM em termos de volume. Como pode ser visto, neste modelo a Ferramenta DDU+S calculou volumes significativamente maiores de escoamento superficial e infiltração do que o SWMM.

Figura 74 - Comparativo do Balanço Hídrico obtido com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para a trincheira de infiltração

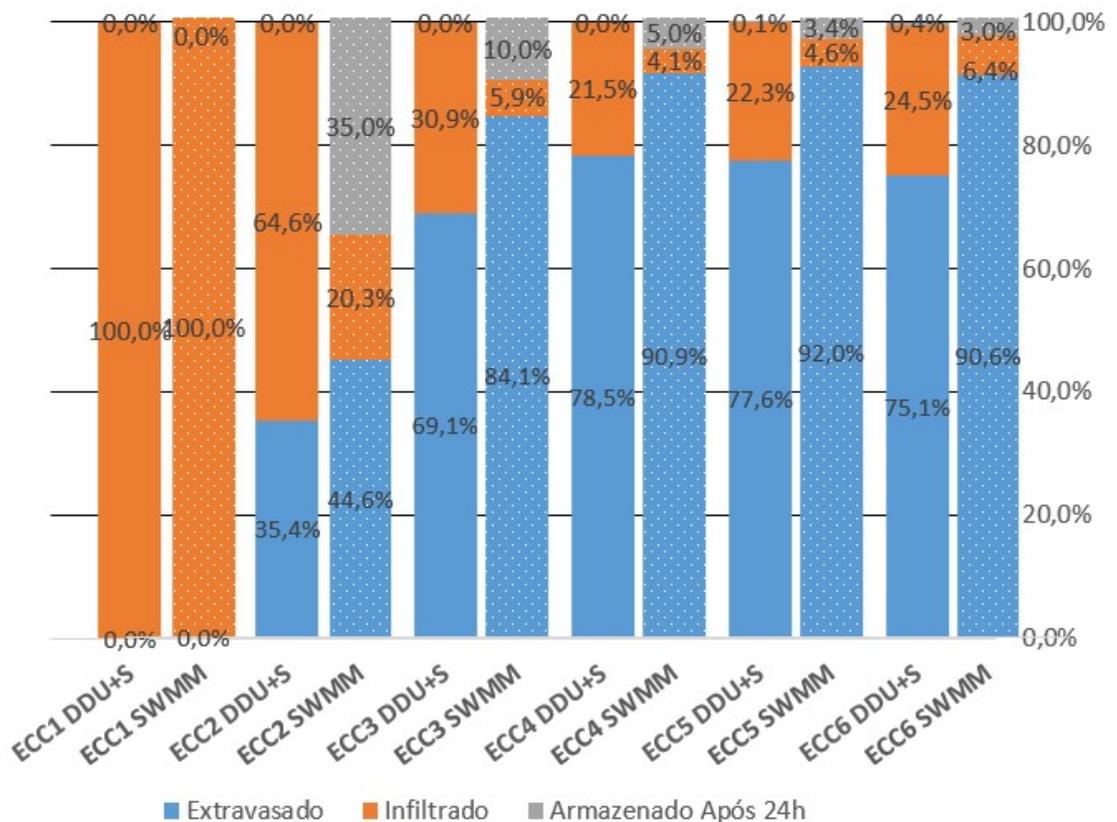


Fonte: Autor (2022)

Neste caso, as diferenças observadas não podem ser atribuídas totalmente ao funcionamento do dispositivo, já que o volume de escoamento superficial calculado pela Ferramenta DDU+S está generosamente maior para a bacia de contribuição do estacionamento, especialmente para os eventos de menor volume total precipitado. Essa diferença deve-se principalmente às formulações diferentes e a desconsideração das perdas iniciais feita pela Ferramenta DDU+S

A Figura 75 mostra o balanço hídrico deste dispositivo para cada um dos eventos de chuva característicos definidos neste trabalho. Neste dispositivo houve uma inversão da tendência observada na SI e na VI, sendo que agora a Ferramenta DDU+S calculou um volume maior de infiltração e, portanto, menor de extravasão para o cenário simulado. O SWMM utiliza o valor nominal da condutividade hidráulica do solo para cálculo da infiltração das trincheiras, não sendo calculada, portanto, a infiltração pelo modelo Green-Ampt. Dessa forma, o SWMM desconsidera fenômenos como a frente de molhamento, saturação do solo e a carga hidráulica que são representados por este modelo de infiltração. Rossman, (2022) sugeriu que o SWMM pode fornecer valores mais precisos utilizando o modelo de infiltração de Green-Ampt, porém para isso a TI deveria ser substituída por um nó genérico de armazenamento que recebesse as informações do solo e de área e volume da trincheira, que devem ser calculados manualmente. Por ser uma configuração que exige conhecimentos profundos do programa, optou-se por manter os resultados obtidos utilizando a plataforma LID padrão do SWMM nesta tese.

Figura 75 – Balanço Hídrico da trincheira de infiltração para os diversos ECC

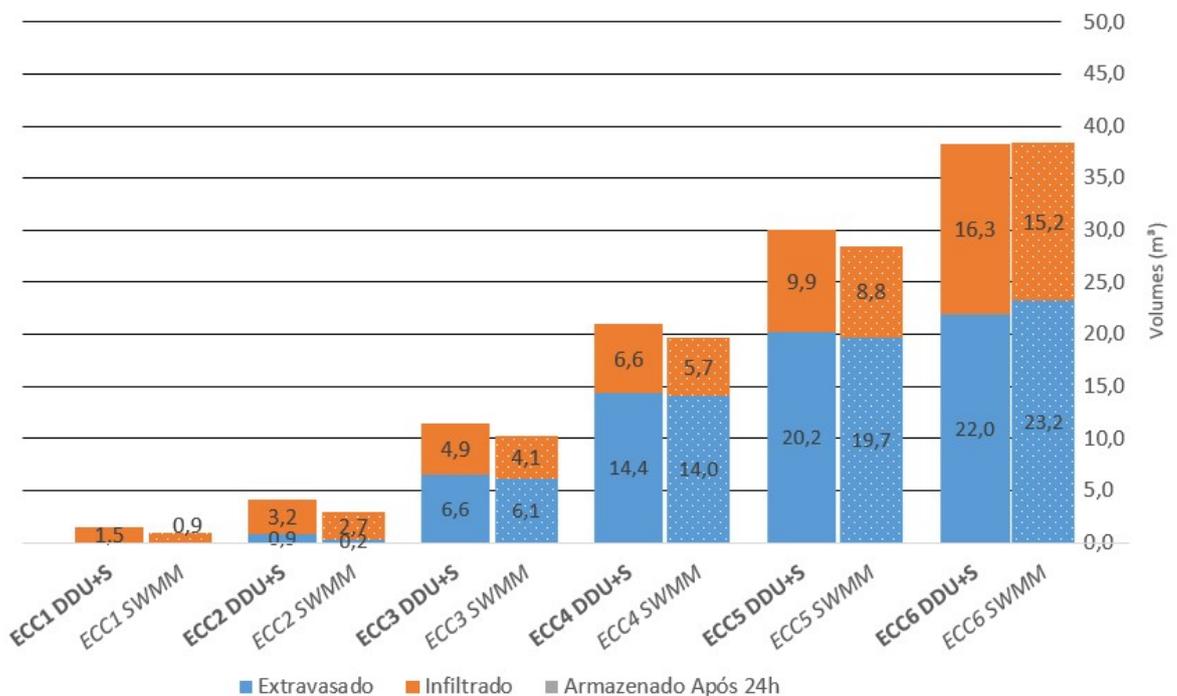


Fonte: Autor (2022)

4.6.4 Avaliação da Ferramenta DDU+S vs. SWMM para o Poço de Infiltração

O PI foi simulado até 24h após o fim do evento nos dois modelos. A Figura 76 ilustra o balanço hídrico calculado para os dois modelos comparados em termos de volume total em m³. Assim como nos cenários anteriores, os eventos de menor volume total precipitado apresentam maior diferença do que aqueles de maior volume. De maneira geral os volumes calculados são semelhantes entre os dois modelos.

Figura 76 - Comparativo do Balanço Hídrico em volumes acumulados obtidos com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para o poço de infiltração



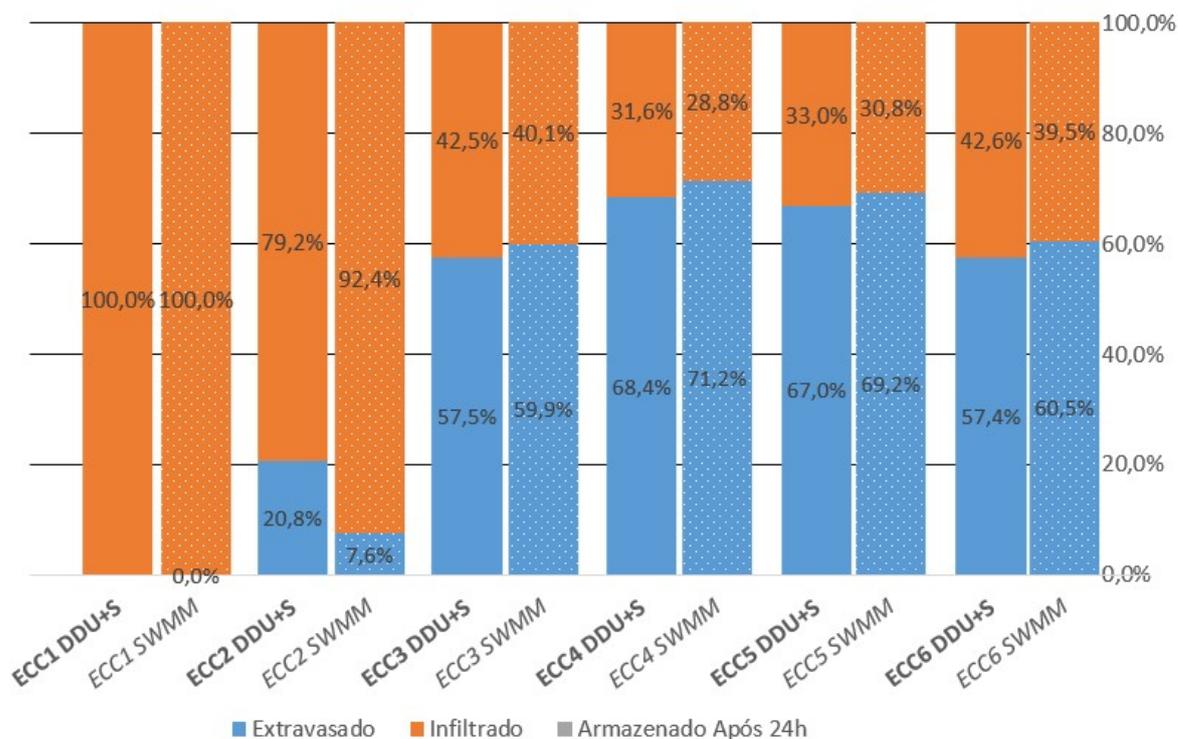
Fonte: Autor (2022)

Neste caso, a Ferramenta DDU+S simulou um valor de infiltração ligeiramente maior que o SWMM, o que compensou o maior volume de escoamento superficial calculado para equiparação dos valores de extravasão.

A Figura 77 mostra o balanço hídrico deste dispositivo para cada um dos eventos de chuva característicos definidos neste trabalho. Com exceção do primeiro evento, houve extravasão do PI em todos os casos nas duas ferramentas computacionais. O ECC2 apresentou

a maior diferença do balanço hídrico em porcentagens do escoamento superficial para este cenário, sendo que os demais eventos de chuva foram calculados com proporções semelhantes

Figura 77 – Balanço Hídrico do poço de infiltração em porcentagens para os diversos ECC com uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para o poço de infiltração

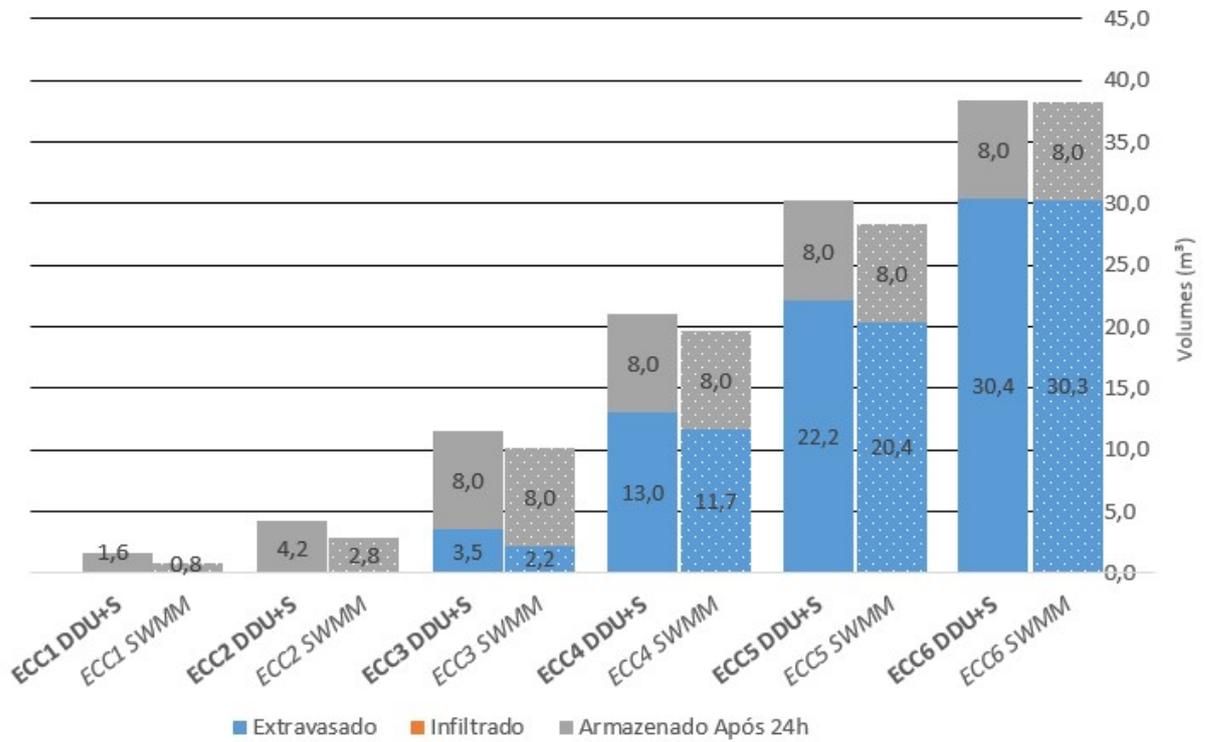


Fonte: Autor (2022)

4.6.5 Avaliação da Ferramenta DDU+S vs. SWMM para o Reservatório de Água de Chuva

A Figura 78 ilustra o balanço hídrico obtido com a Ferramenta DDU+S e com o SWMM em termos de volumes totais em metros cúbicos. É possível observar grande aderência entre os modelos a partir do ECC4.

Figura 78 - Comparativo do Balanço Hídrico obtido com o uso da Ferramenta DDU+S e SWMM para o reservatório de chuva

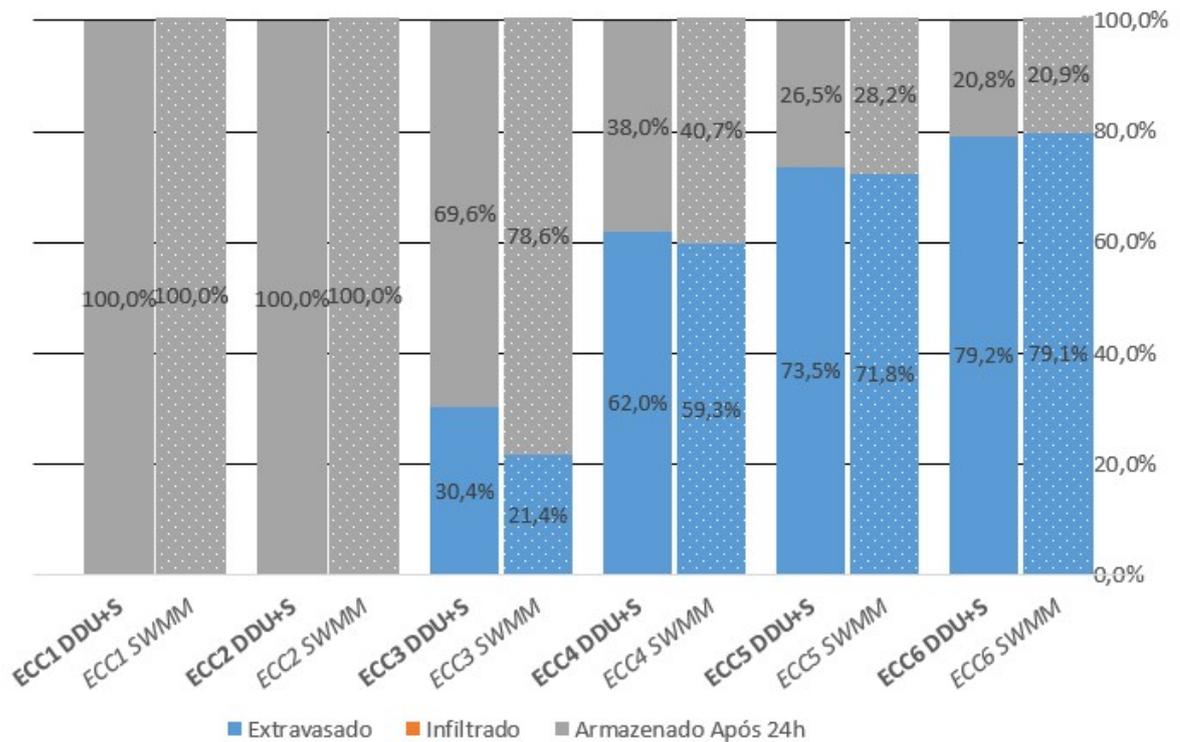


Fonte: Autor (2022)

Como a Ferramenta DDU+S está calculando um maior volume de escoamento superficial na bacia, o volume extravasado simulado é obviamente maior neste dispositivo onde não há saídas a não ser a extravasão.

A Figura 79 mostra o balanço hídrico do RC para cada um dos eventos de chuva característicos definidos neste trabalho, obtidos com o SWMM e com a Ferramenta DDU+S. Nesta simulação é possível observar que o RC é capaz de armazenar 100% do volume do escoamento superficial gerado pelos ECC1 e 2, apresentando ainda retenção de 70% do volume precipitado para o ECC3. De maneira geral, os resultados do SWMM e da Ferramenta DDU+S foram similares.

Figura 79 – Balanço Hídrico do reservatório de água de chuva para os diversos ECC

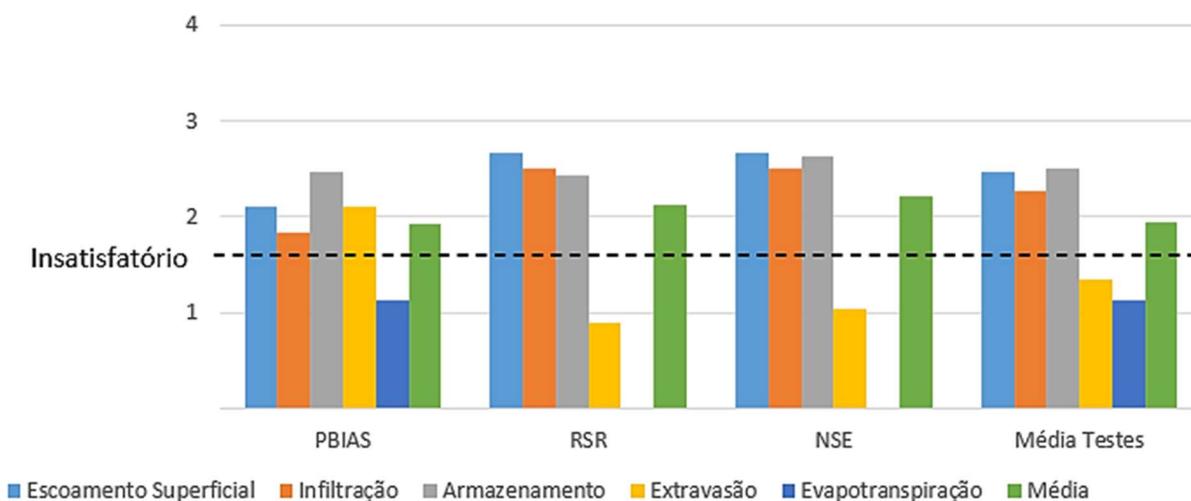


Fonte: Autor (2022)

4.6.6 Testes Estatísticos PBIAS, RSR e NSE

A partir dos critérios estabelecidos em 3.8, a Ferramenta DDU+S foi avaliada para os testes estatísticos da análise percentual dos desvios (PBIAS), razão dos desvios (RSR) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), e na sequência foram atribuídas pontuações para cada elemento do balanço hídrico em cada um dos eventos e dispositivos utilizados neste trabalho, e no final foi calculada a pontuação geral da ferramenta. O Apêndice C deste trabalho apresenta os resultados dos testes estatísticos para cada dispositivo e cada ECC em forma de gráfico e tabelas analíticas. A Figura 80 mostra gráfico comparativo entre os 3 testes estatísticos como uma média de pontuação para todos os dispositivos e ECC utilizados na aplicação da Ferramenta DDU+S.

Figura 80 – Resumo dos testes estatísticos aplicados à Ferramenta DDU+S considerando os componentes do balanço hídrico.

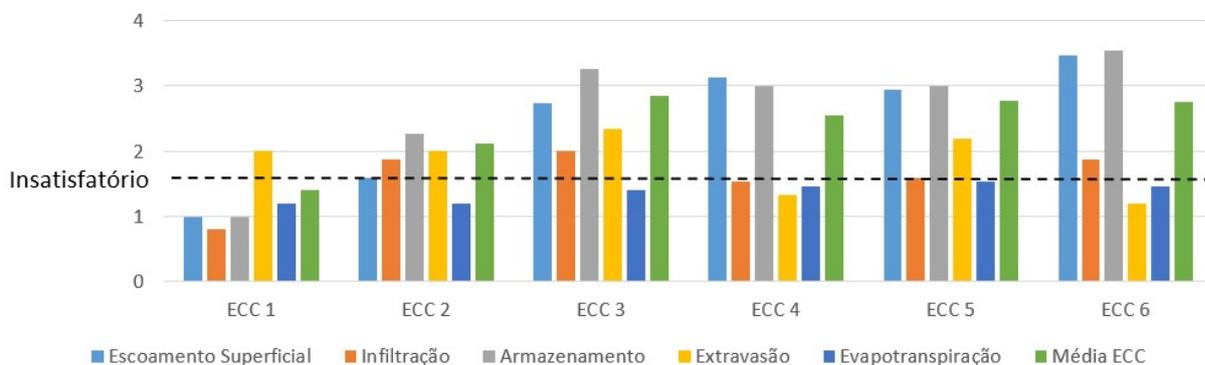


Fonte: Autor (2022)

As pontuações gerais obtidas para os testes estatísticos PBIAS, RSR e NSE indicam que a Ferramenta DDU+S apresenta resultados satisfatórios quando comparado ao SWMM para as aplicações realizadas neste trabalho. Considerando todos os dispositivos e ECC, a avaliação da Ferramenta DDU+S para o teste PBIAS é de 1,93 pontos, para o teste RSR é de 2,12 pontos e o teste NSE é de 2,21 pontos, apresentando, portanto, pontuação global de 1,94 pontos, o que classifica a Ferramenta DDU+S com comportamento satisfatório perante o SWMM.

Ao avaliar a Ferramenta DDU+S com ênfase nos ECC é possível identificar se há tendência de representação inadequada de alguns eventos em comparação ao SWMM. A Figura 81 ilustra o resumo da avaliação estatística considerando a média de cada ECC em todos os dispositivos e testes estatísticos realizados. A barra verde mostra a média da avaliação dos elementos do balanço hídrico para cada ECC. Com exceção do ECC1, que apresentou simulação insatisfatória, todos os demais ECC apresentaram média calculada acima de 1,66 pontos, o que indica simulação satisfatória em comparação ao SWMM. O escoamento superficial e os níveis de armazenamento ao longo do tempo foram os elementos que possuíram a melhor representação.

Figura 81 - Resumo dos testes estatísticos aplicados à Ferramenta DDU+S considerando os cada ECC.



Fonte: Autor (2022)

4.6.6.1 Discussões sobre o estudo comparativo da Ferramenta DDU+S vs. SWMM

A Ferramenta DDU+S foi capaz de simular superfícies, valas, trincheiras e poços de infiltração, além de reservatórios de água de chuva, quando sujeitos a eventos de chuva com valores de balanço hídrico similares aos obtidos no SWMM. De forma geral, a Ferramenta DDU+S apresentou dificuldades na simulação da evapotranspiração e da extravasão dos dispositivos, sendo que a dinâmica do escoamento superficial gerado, infiltração e armazenamento foram bem representadas quando comparados ao SWMM.

Considerando os testes estatísticos, a Ferramenta DDU+S apresenta na média desempenho satisfatório em comparação ao SWMM, tanto para os elementos do balanço hídrico, quanto para os eventos de chuva característicos distintos. Os pontos de atenção são para o cálculo da extravasão que apresentou média das avaliações classificadas como insatisfatórias, assim como para as simulações com o ECC1, com média de simulações dos elementos do balanço hídrico próximos do limite do considerado satisfatório. Por fim, é possível pontuar algumas características da Ferramenta DDU+S em comparação ao SWMM, ilustradas no Quadro 2.

Quadro 2 – Comparação das características da Ferramenta DDU+S e SWMM (continua)

		Ferramenta DDU+S	SWMM
Dados de Entrada	Identificação de áreas permeáveis e impermeáveis da bacia	Possui mapa integrado que permite estimativas de áreas através da introdução do endereço do projeto.	Necessita que seja informado áreas previamente determinadas em outro programa.
	Dados do Solo	Necessita da informação da classe textural do solo. Permite alterar a condutividade hidráulica do solo (k).	Necessita de informações complexas do solo, sendo: condutividade hidráulica (k), porosidade, água higroscópica, capacidade de campo, e inclinação da curva log condutividade vs. déficit de umidade
	Dados Pluviométricos	Utiliza dados pluviométricos fornecidos pelo INMET sem necessidade de intervenção do usuário no arquivo	Utiliza dados pluviométricos fornecidos por agências norte americanas e canadenses de registros climáticos; ou arquivo com dados fornecidos pelo usuário em padrão SWMM.
	Dados de evapotranspiração	Possui embutido na ferramenta dados de evapotranspiração de cerca de 300 municípios brasileiros. Permite também a inserção direta dos dados de evapotranspiração.	Necessita que seja informado pelo usuário os dados de evapotranspiração.
	DDUS	Contempla 5 dispositivos (superfícies, valas, trincheiras e poços de infiltração; e reservatórios de água de chuva) com as características construtivas tipicamente utilizadas no Brasil	Contempla 8 dispositivos (jardins de chuva, células de bioretenção, valas gramadas, trincheiras de infiltração, telhados verdes, desconexão pluvial, reservatórios de água de chuva e pavimentos permeáveis) com características construtivas tipicamente utilizadas nos EUA.

Características da Simulação	Eventos Utilizados para Simulação Hidrológica	Determina a partir dos dados históricos de chuva 6 eventos de chuvas característicos que são simulados em uma só operação.	Necessita ser informado qual evento dentro dos dados históricos deve ser simulado individualmente. Realiza simulações contínuas dos dados históricos.
	Cálculo da Infiltração	Utiliza a equação de Green-ampt.	Permite a seleção de cinco modelos de infiltração (Horton, Horton modificado, Green-ampt, Green-ampt modificado, Curve number)
	Cálculo do Curve Number de áreas mistas (permeável e impermeável)	Adota curve number em função do tipo de solo. Realiza média ponderada entre o curve number da área permeável e impermeável para definição do curve number.	Deve ser cadastrado na ferramenta o curve number do local, sendo que o cálculo deste índice deve ser manual.
	Erros de simulação	Em cada formulário da ferramenta o usuário é informado se houver informações que vão causar falha na simulação na própria tela, dando destaque ao campo com problema.	Emite relatório de erros ao final da simulação.
	Simulação da qualidade da água.	Não realiza simulação da qualidade da água.	Permite simular os benefícios dos DDUS para a qualidade da água pluvial.
	Velocidade de processamento da simulação para bacias simples.	Cerca de 1 minuto em computadores domésticos para 6 eventos de chuva.	Instantâneo.
	Associação de áreas de contribuição	Não permite a associação de áreas de contribuição.	Permite que uma área de contribuição seja o exutório de outra. Permite associações diversas entre bacias.
	Integração com simulação de drenagem tradicional	Não possui módulo de simulação de drenagem tradicional.	Permite a inclusão dos mais variados elementos da drenagem convencional na simulação.
	Precisão do intervalo de tempo	Exatamente 1 hora.	Permite seleção entre 1 minuto e 1 dia.

	Água subterrânea	Não considera água subterrânea.	Realiza simulação da qualidade e fluxo da água subterrânea
	Associação de dispositivos	Não permite a associação de dispositivos de drenagem sustentável.	Permite a associação de diversos dispositivos em cascata e em paralelo.
Outras Características	Apresentação dos Resultados	Apresenta o balanço hídrico em termos de porcentagem do escoamento superficial da área de contribuição para o dispositivo simulado para o 6 eventos de chuva, permitindo a comparação de desempenho em cada cenário. Permite visualizar as curvas do funcionamento do dispositivo para cada elemento do balanço hídrico.	Não apresenta o balanço hídrico em termos de porcentagem, que deve ser calculado manualmente pelo usuário. Apresenta os resultados preferencialmente através de tabelas de dados e opcionalmente através de gráficos que ilustra cada elemento do balanço hídrico de forma independente e sem a possibilidade de visualizar o volume armazenado no dispositivo
	Alterações no código computacional	Possui código em linguagem VBA, linguagem simples para leitura e edição, com comentários do código em português.	Possui código para cálculos em C e interface do usuário em Delphi XE7, dividido em diversos arquivos independentes.
	Licença para uso	Gratuita, porém é necessário possuir licença ativa do Microsoft Office	Gratuita
	Testes e reconhecimento	Ferramenta nova, testada apenas pelo seu criador.	Em desenvolvimento desde 1969, sendo largamente utilizada em projetos e pesquisas em todo o mundo.

Fonte: Autor (2022)

Não é adequado definir uma certa característica de um modelo computacional como melhor ou pior do que o outro, uma vez que estão sujeitos a critérios subjetivos difíceis de serem generalizados. A Ferramenta DDU+S buscou ter a máxima simplicidade tanto na aquisição dos dados, quanto na apresentação dos resultados, como forma de atingir o maior público possível, porém pode ter como revés a perda da fidelidade com a realidade.

É intrínseco dos modelos matemáticos aplicados em águas pluviais a existência de incertezas, já que o escoamento superficial, a infiltração e a evapotranspiração são fenômenos complexos e difícil de representação numérica. Porém, por calcular balanço hídrico compatível ao obtido com o SWMM, que é um modelo com mais de 50 anos de desenvolvimento e de grande aceitação no meio técnico e científico, pode se esperar que a Ferramenta DDU+S tenha confiabilidade reconhecida no futuro, à medida que seja cada vez mais testada em diversos casos por diferentes usuários.

CAPÍTULO V

Conclusão

A simulação de dispositivos de drenagem sustentável através do método de eventos é simples e de grande aplicabilidade para fins técnicos, científicos e educacionais. De maneira geral, a escolha de um evento de chuva representativo é de grande importância para a construção de modelos computacionais confiáveis, uma vez que uma má seleção de cenário pluviométrico pode levar a conclusões equivocadas quanto ao desempenho das estruturas hidráulicas em situações reais de chuva.

Esta tese contribui com a adaptação e análise do método dos eventos de chuva característicos. A metodologia utilizada é capaz de eleger entre os dados pluviométricos históricos, eventos que sejam estatisticamente relevantes para simulação hidrológica em função de classes de percentis da amostra. Este trabalho apresentou ainda o desenvolvimento de programa computacional denominado Ferramenta DDU+S, para simulação hidrológica de seis tipos de dispositivos de drenagem urbana sustentável. O programa possui interface amigável e permite a customização dos principais parâmetros para determinação de eventos de chuva, além de realizar o cálculo do balanço hídrico de alguns dos principais dispositivos de drenagem urbana sustentável utilizados no Brasil. Os resultados obtidos na simulação de cenários simulados com a ferramenta implementada são satisfatórios em relação aos obtidos com o prestigiado SWMM.

Quanto as limitações deste trabalho, os resultados obtidos com o estudo dos fatores intervenientes nos ECC e o comparativo com o hietograma de Huff se limitam à amostra utilizada. O método ECC possui ainda outras variáveis além da intensidade mínima e intervalo entre eventos que podem influenciar na determinação dos eventos, como os percentis da amostra e a medida de tendência central (média, mediana e moda). Ressalta-se ainda que ao

utilizar um método estatístico baseado em medidas de tendência centrais, os valores extremos como a maior intensidade pluviométrica registrada, a maior altura total precipitada ou o evento mais longo não serão selecionados para simulação.

É oportuno comentar que a Ferramenta DDU+S apresenta ainda como limitação o fato de trabalhar com apenas um *Curve Number* de área permeável e outro de área impermeável para toda a bacia, restringindo seu uso para bacias de menores dimensões que possuam *Curve Number* único.

Houve tentativa de correlação das classes de eventos de chuva característicos com tempos de retorno de chuva, que são tradicionalmente utilizados em projetos de drenagem, porém não foi encontrado modelo matemático que permitisse essa comparação.

Já quanto aos métodos utilizados para cálculo das taxas de infiltração e evapotranspiração neste trabalho, eles possuem as limitações típicas de métodos empíricos além das limitações próprias de cada método. O cálculo do escoamento superficial pela metodologia *Curve Number*, implica na adoção de um valor de número de curva com base nas informações do solo e de ocupação, e na estimativa do valor de potencial máximo de retenção do solo local, o que dificilmente possui grande precisão. Já o método *Green-Ampt* utilizado para cálculo da infiltração nos dispositivos necessita de uma série de parâmetros que exigem extensos estudos de laboratório para sua determinação, e que neste trabalho foram considerados valores médios relatados na literatura.

Ainda sobre o modelo de infiltração, o método *Green-Ampt* necessita de parâmetros hidráulicos do solo que não são bem documentados para os solos brasileiros. A adoção de parâmetros hidráulicos de solos americanos altera a real capacidade dos solos nacionais de infiltrar a água da chuva. É importante ressaltar ainda que a ferramenta foi desenvolvida para dados de chuva com intervalo de uma hora, que são tipicamente fornecidos pelo INMET para estações meteorológicas automáticas, porém esse intervalo de tempo pode ser longo demais para a representação precisa do comportamento dinâmico de dispositivos de drenagem sustentáveis.

Do mesmo modo, modelos computacionais são representações da realidade, com grau de precisão variável. Os elementos do balanço hídrico são de alta complexidade e de difícil reprodução. Nesta tese a ferramenta computacional proposta foi comparada com outro modelo, o SWMM, que apesar de ser largamente aceito no meio técnico e científico, também possui diversas limitações e simplificações da realidade. Por fim, a base VBA em que a ferramenta foi construída, demanda tempo de processamento maior do que outras linguagens.

Quanto as recomendações de trabalhos futuros, apesar de apresentar boa funcionalidade e cinco opções distintas de dispositivos de drenagem sustentável para simulação ao usuário, a Ferramenta DDU+S pode receber diversas melhorias. Não foi previsto que dispositivos distintos possam trabalhar conjugados ou em cascata, sendo necessário implementar essa função no código. Além disso, existem dispositivos não contemplados nesta versão da ferramenta, como os telhados verdes e os pavimentos permeáveis.

Deve-se considerar também que podem ser realizadas melhorias nos modelos de cálculo de geração do escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração. Alguns programas existentes permitem que o usuário faça a escolha entre diversas equações, o que pode ser implementado no código da ferramenta. É possível ainda elaborar, no futuro, código que permita a calibração da ferramenta com dados de campo das variáveis do balanço hídrico.

Quanto aos ECC, a ferramenta pode receber melhorias quanto à determinação de eventos significativos para simulação diferentes da metodologia adotada nesta pesquisa. Podem ser utilizados eventos de maior intensidade horária, maior volume total ou maior duração. Pode-se ainda considerar chuvas com precisão de dados maior do que uma hora. Por fim, o código da Ferramenta DDU+S pode ser reescrito em linguagem de programação mais robusta, como o Python ou Java. Outra melhoria significativa, que pode ampliar a disseminação da ferramenta seria o desenvolvimento de aplicação *web* ou *mobile*.

A ferramenta computacional desenvolvida nesta tese pode ser utilizada em duas linhas principais, sendo na geração de eventos de chuvas característicos reais para concepção, estudo e projeto de diversas estruturas de drenagem, convencionais ou sustentáveis, como na simulação de dispositivos de drenagem sustentável de forma simplificada desde a escala de lote até microbacias, para verificação da contribuição destes instrumentos para melhoria do balanço hídrico urbano.

Visto que o correto entendimento da cronologia da chuva pode refletir em custos menores, funcionamento hidráulico aprimorado e aumentar as opções de desenho arquitetônico e urbanístico, os estudos hidrológicos para simulação de dispositivos sustentáveis devem ser intensificados. O problema do escoamento superficial da água de chuva no meio urbano exige soluções multidisciplinares e a Ferramenta DDU+S associada ao método dos eventos de chuva característicos podem ser um instrumento de apoio aos diversos profissionais de drenagem e para a comunidade.

REFERÊNCIAS

- ABENAYAKE, C. *et al.* **A GIS-Based Simulation Application to Model Surface Runoff Level in Urban Blocks**. FARU 2020 13th International Research Conference: FARU Journal. Moratuwa: University of Moratuwa. 2020. p. 56-64.
- ABREU, F. G. D.; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 239-250, 2017. ISSN DOI: 10.1590/S1413-41522016146750.
- AHAMMED, F. A review of water-sensitive urban design technologies and practices for sustainable stormwater management. **Sustainable Water Resources Management**, v. 3, p. 269–282, 2017. ISSN DOI 10.1007/s40899-017-0093-8.
- AHN, J. *et al.* Flood Frequency Analysis for the Annual Peak Flows Simulated by an Event-Based Rainfall-Runoff Model in an Urban Drainage Basin. **Water**, v. 6, p. 3841-3863, 2014. ISSN 10.3390/w6123841.
- ALAMY, J. E. *et al.* Eficiência hidrológica de telhados verdes para escala de loteamentos residenciais. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 28, 2016. ISSN 10.1590/1982-451320160206.
- ALIKHANI, J. *et al.* Modeling and Design Scenario Analysis of Long-Term Monitored Bioretention System for Rainfall-Runoff Reduction to Combined Sewer in Cincinnati, OH. **Journal of Sustainable Water Built Environment**, 30 Dezembro 2019. 17.
- ALVES, P. B. R. *et al.* Land-Use and Legislation-Based Methodology for the Implementation of Sustainable Drainage Systems in the Semi-Arid Region of Brazil. **Sustainability** , v. 12, 2020. ISSN DOI: 10.3390/su12020661.
- ANDERSEN, J. S. *et al.* Characteristic Rain Events: A Methodology for Improving the Amenity Value of Stormwater Control Measures. **Sustainability**, v. 9, n. 1793, 2017. doi:10.3390/su9101793.

- ASCE (American Society of Civil Engineers). Criteria for evaluation of watershed models. **J. Irrigation Drainage Eng.** n. 119, p.429-442, 1993.
- ASHLEY, R. M. et al. UK Sustainable Drainage Systems: past, present and future. **Proceedings of ICE - Civil Engineering**, v. 168, p. 125-130, 2015.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro. 1995.
- AZZOUT, Y., BARRAUD, S., CRES, F. N., ALFAKIH, E. Techniques alternatives en assainissement pluvial. **Paris: Technique et Documentation**, Lavoisier, p. 372, 1994
- BACKHAUS, A.; DAM, T.; JENSEN, M. B. Stormwater management challenges as revealed through a design experiment with professional landscape architects. **Urban Water Journal**, v. 09, n. 1, 2012. ISSN 10.1080/1573062X.2011.633613.
- BACKHAUS, A.; FRYD, O. The aesthetic performance of urban landscape-based stormwater management systems: a review of twenty projects in Northern Europe. **Journal of Landscape Architecture**, 2013. ISSN 10.1080/18626033.2013.864130.
- BALBASTRE-SOLDEVILA, R.; GARCÍA-BARTUAL, R.; ANDRÉS-DOMÉNECH, I. A Comparison of Design Storms for Urban Drainage. **Water**, 2019.
- BALLARD, B. W. et al. **The SuDS Manual**. Londres: CIRIA, 2015.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2ª. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.
- BARBASSA, A. P.; SOBRINHA, L. A.; MORUZZI, R. B. Poço de infiltração para controle de enchentes na fonte: avaliação das condições de operação e manutenção. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 91-107, abr/jun 2014.
- BATENI, N. et al. Hydrological Impact Assessment on Permeable Road Pavement with Subsurface Precast Micro-Detention Pond. **Water and Environment Journal**, v. 1, 2020. ISSN DOI: 10.1111/wej.12613.
- BEECHAM, S.; CHOWDHURY, R. Effects of changing rainfall patterns on WSUD in Australia. **Water Management**, v. 165, 2012.
- BEMFICA, D. D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. D. Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 05, n. 04, p. 5-16, Out/Dez 2000.

BENEDINI, M.; TSAKIRIS, G. **Water Quality Modelling for Rivers and Streams**. New York: Springer, 2013. 283 p.

BRAKENSIEK, D. L.; RAWLS., W. J. Green-Ampt infiltration model parameters for hydrologic classification of soils. **Advances in irrigation and drainage surviving external pressures.**, New York, p. 226-233, 1983.

BRASIL. **Águas pluviais: técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas : guia do profissional em treinamento nível 2 e 3**. Belo Horizonte: Ministério das Cidades , 2007. 52 p.

BURN, D. H. A framework for regional estimation of intensity–duration–frequency (IDF) curves. **Hydrological Processes**, Maio 2014.

CAO, R.; LI, F.; FENG, P. Impact of Urbanization on Precipitation in North Haihe Basin, China. **Atmosphere**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 16, 22 dez. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos11010016>.

CARVALHO, T. M. N.; FILHO, F. D. A. D. S.; SABÓIA, M. A. M. D. Performance of rainwater tanks for runoff reduction under climate change scenarios:a case study in Brazil. **Urban Water Journal**, v. 17, p. 912-922, 2020. ISSN <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1846063>.

COUTINHO, J. V. et al. Characterization of sub-daily rainfall properties in three raingauges located in northeast Brazil. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences** , v. 364, p. 345-350, 2014. ISSN 10.5194/piahs-364-345-2014.

CUDWORTH JUNIOR, A. G. **Flood Hidrology Manual**. 1^a. ed. Denver: UNITED STATES GOVERNMENT PRINTING OFFICE, 1989.

DHAKAL, K. P.; CHEVALIER, L. R. Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application. **Journal of Environmental Management**, 2017. 171-181.

DIGIOVANNI, K. Sustainability. **Water Environment Research**, v. 90, p. 1596-1619, 2018. doi:10.2175/106143018X15289915807326.

DUNKERLEY, D. Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. **Hydrological Processes**, v. 22, Setembro 2008. ISSN 10.1002/hyp.7122.

DUNKERLEY, D. Intra-event intermittency of rainfall: an analysis of the metrics of rain and no-rain periods. **Hydrological Processes**, v. 29, p. 3294-3305, Fevereiro 2015. ISSN 10.1002/hyp.10454.

EBRAHIMIAN, A.; SOKOLOVSKAYA, N.; WADZUK, B. Modeling dynamic performance of urban infiltration trench systems: Methodology and a case study in Philadelphia. **Journal of Hydrology**, v. 594, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125938>.

ELLIOTT, A. H.; TROWSDALE, S. A. A review of models for low impact urban stormwater drainage. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, p. 394-405, 2007. doi:10.1016/j.envsoft.2005.12.005.

EPA (U. S. ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY). **Handbook for Developing Watershed Plans to Restore and Protect Our Waters**. Washington: [s.n.], 2008.

EPA (U. S. ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY). SWMM Knowledge Base. **Open SWMM**, 2021. Disponível em: <<https://www.openswmm.org/Forum>>. Acesso em: 28 março 2021.

FEN, M. et al. Evaluation of the Main Function of Low Impact Development Based on Rainfall Events. **Water**, v. 12, 2020. doi: 10.3390/w12082231.

FERNANDES, A. L. T.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; TAKAY, B. Y. Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 270-276, 2011.

FERNANDES, D. S. et al. **Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, v. 1, 2010. ISBN ISSN 1678-9644.

FERREIRA, T. S. **Avaliação do comportamento hidrológico de poços de infiltração de águas pluviais sob diferentes concepções**. São Carlos, p. 157. 2016.

FERREIRA, T. S.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R. B. Controle de enchentes no lote por poço de infiltração de água pluvial sob nova concepção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 437-446, maio/jun 2018. ISSN DOI: 10.1590/S1413-41522018161116.

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, 2014.

FOXHALL, J. D. **Practical Standards for Microsoft® Visual Basic®.NET (Pro-Developer)**. 1ª. ed. [S.l.]: Microsoft Press, v. 1, 2002. ISBN: 9780735613560.

FRY, T. J.; MAXWELL, R. Evaluation of distributed BMPs in an Urban Watershed – High resolution modeling for Stormwater Management. **Hydrological Processes**, v. 31, 2017. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.11177>.

GAÁL, L.; MOLNAR, P.; SZOLGAY, J. Selection of intense rainfall events based on intensity thresholds and lightning data in Switzerland. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 1561-1573, 2014. ISSN 10.5194/hess-18-1561-2014.

GARRETT, J. J. **The Elements of User Experience**. 2ª. ed. Berkeley: New Riders, 2011. ISBN 0-321-68368-4.

GONÇALVES, L. S. M.; TEIXEIRA, B. A. N. Identificação de publicações sobre dispositivos de drenagem sustentável e chuvas de projeto. In: III Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana: SINGEURB, 2021, Maceió. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2021.No prelo.

GONÇALVES, M. L. R. et al. Modeling the Effects of Introducing Low Impact Development in a Tropical City: A Case Study from Joinville, Brazil. **Sustainability**, v. 10, 2018. doi:10.3390/su10030728.

GOULDEN, S. et al. From conventional drainage to sustainable stormwater management:Beyond the technical challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 219, p. 37-45, 2018.

GUO, Y. Updating Rainfall IDF Relationships to Maintain Urban Drainage Design Standards. **Journal of Hydrologic Engineering**, p. 506-509, Set/Out 2006.

GUTIÉRREZ-LÓPEZ, A.; BARRAGÁN-REGALADO, R. Ajuste de curvas IDF a partir de tormentas de corta duración. **Tecnología y Ciencias del Agua**, 2019. 1-24.

GUTIERREZ-LOPEZ, A.; HERNANDEZ, S. B. J.; SANDOVAL, C. E. Physical Parameterization of IDF Curves Based on. **Water**, 2019.

HE, Z.; DAVIS, A. P. Process Modeling of Storm-Water Flow in a Bioretention Cell. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, p. 121-131, 2011.

HOSSAIN, S.; HEWA, G. A.; WELLA-HEWAGE, S. A Comparison of Continuous and Event-Based Rainfall–Runoff (RR) Modelling Using EPA-SWMM. **Water**, v. 11, 2019. doi:10.3390/w11030611.

HUFF, F. A. Time Distribution Rainfall in Heavy Storms. **Water Resources Research**, v. 3, p. 1007-1019, 1967.

HUFF, F. A. **Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois**. Champaign. 1990. (ISWS/CIR-173/90).

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Tendências Demográficas**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, p. 63. 2001.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Projeção Populacional 2018**. [S.l.]. 2018.

INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA). **Nota Técnica: Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET**. INMET. [S.l.], p. 11. 2011. (No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET).

INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA), I. N. D. M. **Normais Climatológicas do Brasil**. 1ª. ed. Brasília: [s.n.], 2018.

INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA), I. N. D. M. Sobre meteorologia. **Instituto Nacional de Meteorologia**, 2020. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia>>. Acesso em: 12 jun. 2020.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems**. Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, p. 1542. 2019.

JOSHI, P. et al. Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows. **Water Research**, v. 191, 2021. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116780>.

JUSTINO, E. A. **Comportamento Hidrodinâmico do solo e da recarga potencial do aquífero a partir de poços de infiltração de águas pluviais**. São Carlos: UFSCAR, 2019. Tese de Doutorado.

- KARAMOUZ, M.; MORIDI, A.; NAZIF, S. **Water Engineering and management**. 1^a. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- KHAN, S. T.; CHAPA, F.; HACK, J. Highly Resolved Rainfall-Runoff Simulation of Retrofitted Green Stormwater Infrastructure at the Micro-Watershed Scale. **Land**, v. 9, 2020. ISSN doi:10.3390/land9090339.
- KIM, J.-H.; KIM, H. Y.; DEMARIE, F. Facilitators and Barriers of Applying Low Impact Development Practices in Urban Development. **Water Resources Management**, 2017. 3795–3808.
- KNAPP, H. V.; DURGUNOĞLU, A.; ORTEL, T. W. **A review of rainfall-runoff modeling for stormwater management**. U.S. Geologic Survey. Champaign, Illinois, p. 96. 1991.
- KOURTIS, I. M.; TSIHRINTZIS, V. A.; BALTAS, E. A robust approach for comparing conventional and sustainable flood mitigation measures in urban basins. **Journal of Environmental Management**, v. 268, 2020. ISSN 10.1016/j.jenvman.2020.110822.
- KRVAVICA, N.; RUBINIĆ, J. Evaluation of Design Storms and Critical Rainfall Durations for Flood Prediction in Partially Urbanized Catchments. **Water**, 2020.
- LAMB, R. et al. Have applications of continuous rainfall–runoff simulation realized the vision for process-based flood frequency analysis? **Hydrological processes**, n. Wiley Online Library, 2016. doi: 10.1002/hyp.10882.
- LE, S. H. et al. Modeling washoff of total suspended solids in the tropics. **Journal of Environmental Management**, v. 200, p. 263-274, 2017.
- LEE, E. H.; KIM, J. H. Development of a Flood-Damage-Based Flood Forecasting Technique. **Journal of Hydrology**, v. 18, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.003>.
- LEE, J. G.; NIETCH, C. T.; PANGULURI, S. **SWMM Modeling Methods for Simulating Green Infrastructure at a Suburban Headwatershed: User’s Guide**. Cincinnati: [s.n.], 2017.
- LENG, L. et al. Performance assessment of coupled green-grey-blue systems for Sponge City construction. **Science of The Total Environment**, v. 728, 2020. ISSN DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138608.

LERER, S. M. **Tools and Methods to inform Planning and Design of Nature Based Stormwater Control Measures**. [S.l.]: Technical University of Denmark, 2019. 73 p. Tese de Doutorado.

LI, Y. et al. Design of low impact development in the urban context considering hydrological performance and life-cycle cost. **Journal of Flood Risk Management**, v. 13, 2020. doi: 10.1111/jfr3.12625.

LIU, W. et al. Experimental Study on the Rainfall-Runoff Responses of Typical Urban Surfaces and Two Green Infrastructures Using Scale-Based Models. **Environmental Management**, v. 66, p. 683-693, 2020. doi: 10.1007/s00267-020-01339-9.

LUCAS, A. H. et al. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 20, p. 17-28, jan/mar 2015. doi: 10.1590/S1413-41522015020000079923.

MADSEN, H. M. et al. Definitions of event magnitudes, spatial scales, and goals for climate change adaptation and their importance for innovation and implementation. **Water Research**, v. 144, n. 1, p. 192-203, Julho 2018. doi: 10.1016/j.watres.2018.07.026.

MARSALEK, J. et al. **Urban Water Cycle Processes**. Leiden: Taylor & Francis, v. 2, 2008.

MARSALEK, J.; WATT, E. Critical review of the evolution of the design storm event concept. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 5 Fevereiro 2013. 105-113.

MARSALEK, J.; WATT, W. E. **Design Storms for Urban Drainage Design**. 6th Hydrotechnical Conferenc. Ottawa, Ontario: [s.n.]. 1983. p. 12.

MARTIN, R. C. **Código Limpo: Habilidades Práticas do Agile Software**. 1ª. ed. [S.l.]: Alta Books, 2009. ISSN 8576082675.

MICROSOFT. Microsoft by the numbers. **Site oficial da Microsoft**, 2020. Disponível em: <<https://news.microsoft.com/bythenumbers/planet-office>>. Acesso em: 17 março 2020.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem Urbana: Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade**. 1ª. ed. [S.l.]: Elsevier, 2015.

MINUZZI, R. B.; TRIDAPALLI, I. R. Evapotranspiração de referência pelo método de penman-piche em diferentes condições de nebulosidade para florianópolis, santa catarina.

Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa, v. 27, p. 61-67, 2019. doi: 10.13083/reveng.v27i1.897.

MOLINA JUNIOR, W. F. **Comportamento Mecânico do Solo em Operações Agrícolas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2017. 223 p.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L.. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions Of The Asabe**, [S.L.], v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>.

MORUZZI, R. B.; MOURA, C. C. D.; BARBASSA, A. P. Avaliação do efeito da inclinação e umidade antecedente na qualidade e quantidade das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas em telhado verde extensivo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 59-73, jul/set 2014. ISSN 1678-8621.

MYERS, B. A. Graphical User Interface Programming. In: TUCKER, A. B. **Computer Science Handbook**. 2ª. ed. [S.l.]: Chapman and Hall, 2003. p. 64. ISBN 158488360X.

NAS (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES). **Evaluation of Best Management Practices for Highway Runoff Control**. WASHINGTON, D.C: The National Academies Press, 2006.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia Estatística**. 1. ed. Belo Horizonte: CPRM, v. 1, 2007.

NIAZKAR, M.; AFZALI, S. H. Streamline Performance of Excel in Stepwise Implementation of Numerical Solution. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 24, p. 555-566, 2016. doi:10.1002/cae.21731.

NJDEP, NEW JERSEY DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. **New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual**. [S.l.]: [s.n.], v. 1ª, 2004.

OLIVEIRA, A. P. D.; BARBASSA, A. P.; GONÇALVES, L. M. Aplicação de técnicas compensatórias de drenagem na requalificação de áreas verdes urbanas em Guarulhos - SP. **Cidades Verdes**, v. 04, n. 09, p. 87-101, 2016.

OLIVEIRA, A. P.; GONÇALVES, L. M. A relevância da percepção do usuário na implantação e uso de técnicas compensatórias de drenagem nas áreas urbanas. **Cadernos Zygmunt Bauman**, São Luís, 8, n. 18, 2018.

OLIVEIRA, V. D. P. S. D. **Modelo para geração de séries sintéticas de precipitação**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 166. 2003. (CDD 20.ed. 551.577011). Tese de Doutorado.

ONU. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). New York. 2018.

PALYNCHUK, B.; GUO, Y. Threshold analysis of rainstorm depth and duration statistics at Toronto, Canada. **Journal of Hydrology**, v. 348, p. 535-545, 2007. ISSN 10.1016/j.jhydrol.2007.10.023.

PANOS, C.; WOLFAND, J.; HOGUE, T. S. SWMM Sensitivity to LID Siting and Routing Parameters: Implications for Stormwater Regulatory Compliance. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 56, 2020. ISSN DOI: 10.1111/1752-1688.12867.

PERES, R. B. Uso e ocupação do solo e impactos ambientais urbanos. **Cadernos do Cescar – Educação Ambiental**, São Carlos, 2011.

PERONI, C. S. L.; TEIXEIRA, B. A. D. N. AVALIAÇÃO DA INSERÇÃO URBANA DE BACIAS DE DETENÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS EM DOIS CONDOMÍNIOS RESIDENCIAIS NOS MUNICÍPIOS DE ARARAQUARA E SÃO CARLOS, SÃO PAULO – BRASIL. **Cidades Verdes**, v. 04, n. 10, p. 16, 2016. ISSN 2317-8604.

PERONI, C. S. L.; TEIXEIRA, B. A. D. N. **Evaluation of rainwater detention basins in the urban area of a middle sized city in Brazil**. NOVATECH 2019. [S.l.]: [s.n.]. 2019.

PETIT-BOIX, A. et al. Floods and consequential life cycle assessment: Integrating flood damage into the environmental assessment of stormwater Best Management Practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, 2017. ISSN 10.1016/j.jclepro.2017.06.047.

POMPÊO, C. A. DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 15-23, Jan/Mar 2000.

PRODANOVIC, P.; SIMONOVIC, S. P. **Generation of synthetic design storms for the Upper Thames River basin**. University of Western Ontario. [S.l.], p. 21. 2004. (1913-3200).

- QIN, H.-P.; LI, Z.-X.; FU, G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 577-585, 2013.
- RANDALL, M. et al. Comparison of SWMM evaporation and discharge to in-field observations from lined permeable. **Urban Water Journal**, 2020.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; MILLER, N. GREEN-AMPT INFILTRATION PARAMETERS FROM SOILS DATA. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 109, 1983. ISSN [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62)).
- REN, X. et al. Effect of infiltration rate changes in urban soils on stormwater runoff process. **Geoderma**, v. 363, 2020. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114158.
- RICH, B. R. **Clarence Leonard (Kelly) Johnson 1910-1990 (Biographical Memoir)**. Washington: National Academies Press, 1995.
- ROGGER, M. et al. Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation. Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation. **Journal of Hydrology**, n. Elsevier B.V. , p. 456-467, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.068>.
- ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1**. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, v. 1, 2015.
- ROSSMAN, L. A. **Seepage rate - Infiltration Trenches**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <luansmg@hotmail.com>. em: 15 abr. 2022.
- ROSSMAN, L. A.; BERNAGROS, J. T. **National Stormwater Calculator User's Guide – Version 2.0.0.1**. CINCINNATI: [s.n.], 2019.
- ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model Reference Manual**. 1ª. ed. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency , v. Volume I – Hydrology, 2016.
- RUANGPAN, L. et al. Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review of the research area. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 20, p. 243-270, 2020. doi: 10.5194/nhess-20-243-2020.
- SAMOUEI, S.; ÖZGER, M. A Rainfall-Runoff model for highly urbanized areas: A case study at Istanbul Technical University main campus A Rainfall-Runoff model for highly urbanized

areas: A case study at Istanbul Technical University main campus. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**, v. 737, 2020. doi:10.1088/1757-899X/737/1/012163.

SANA, A. **Enhancing Water Resources and Coastal Engineering Curricula Using Visual Basic Programs in MS-Excel**. In CIEC 2013: Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference. [S.l.]: [s.n.], 2013.

SANTOS, M. F. N. D. **Diferentes abordagens para o manejo das águas pluviais e seus impactos no ciclo de vida em loteamento de interesse social**. UFSCAR: [s.n.], 2017. Tese de Doutorado.

SANTOS, R. D. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5^a. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SÃO CARLOS (cidade). **Lei nº 15.958 de 29 de dezembro de 2011**. São Carlos: [s.n.], 2011.

SÃO JOSÉ DO RIO PRETO (cidade). **LEI Nº 10.290 de 24 de dezembro de 2008**. São José do Rio Preto: [s.n.], 2008.

SÃO PAULO (estado). **Lei nº 12.526, de 02 de janeiro de 2007**. São Paulo: [s.n.], 2007. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2007/lei-12526-02.01.2007.html>>.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 10, p. 1569–1578, 2006. ISSN doi:10.2136/sssaj2005.0117.

SCS, SOIL CONSERVATION SERVICE. **National engineering handbook. Section 4 - Hydrology**. Washington, DC: [s.n.], 1985.

SEONG, K.-W. Deriving a practical form of IDF formula using transformed. **Hydrological Processes**, 7 Maio 2014. 2881–2896.

SIANG, T. Y. **User Experience (UX) Design**. 2020. Disponível em: <https://www.interaction-design.org/literature/topics/ux-design>. Acesso em: 23 mar. 2021.

SILVEIRA, A. L. L. D. Cumulative equations for continuous time Chicago hyetograph method. **Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, v. 21, p. 646-651, jul/set 2016. ISSN 2318-0331.

SILVEIRA, A. L. L. D.; GOLDENFUM, J. A. Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 157-168, Abr/Jun 2007.

SIMONYI, C. **Microsoft Docs**. 1999. Disponível em: [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/visualstudio/visual-studio-6.0/aa260976\(v=vs.60\)](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/visualstudio/visual-studio-6.0/aa260976(v=vs.60)). Acesso em: 20 mar. 2021.

SØRUP, H. J. D. et al. Efficiency of stormwater control measures for combined sewer retrofitting under varying rain conditions: Quantifying the Three Points Approach (3PA). **Environmental Science & Policy**, v. 63, p. 19-26, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2016.05.010>.

SØRUP, H. J. D.; LERER, S. M. Principles for Distributing Infiltration-Based Stormwater Control Measures in Series. **Water**, v. 13, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/w13081029>.

TECEDOR, N. et al. **Projeto e construção de um plano de infiltração em escala real**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves: [s.n.]. 2013.

TECEDOR, N. et al. Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de infiltração construído em escala real. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, jul/set 2015. ISSN 2318-0331.

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. In: REBOUÇAS, A. D. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 1ª. ed. São Paulo: Escrituras, 1997. Cap. 14, p. 475-508.

TUCCI, C. E. M. Inundações e Drenagem Urbana. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. Cap. 3.

TUCCI, C. E. M. A urbanização e o aquecimento. **Rhama**, 2012. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/index.php/aguas-urbanas/a-urbanizacao-e-o-aquecimento/>. Acesso em: 06 setembro 2019.

USDA, U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Field book for describing and sampling soils**. [S.l.]: [s.n.], v. 03, 2012.

- VASCONCELOS, A. F. et al. Modeling Infiltration Wells in SWMM and Comparing Its Performance with a Real-Scale Well. In: G., M. **New Trends in Urban Drainage Modelling**. [S.l.]: UDM 2018, 2019. p. 424-428. Disponivel em: <978-3-319-99867-1>.
- VENEZIANO, D.; VILLANI, P. Best linear unbiased design hyetograph. **Water Resources Research**, v. 35, p. 2725-2738, 1999. doi: 0043-1397/99/1999WR900156509.00.
- WANG, A. et al. A 60-Minute Design Rainstorm for the Urban Area of Yangpu District, Shanghai, China. **Water**, v. 10, 2018. ISSN doi:10.3390/w10030312.
- WARTALSKA, K. et al. Analysis of Hyetographs for Drainage System Modeling. **Water**, 2020a.
- WARTALSKA, K. et al. Verification of Euler Type II Reference Hyetograph for Modeling the Sewage Systems in Wroclaw (Poland). **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 11, n. 5, Maio 2020b. doi: 10.18178/ijesd.2020.11.5.1256.
- WAYAL, A. S.; MENON, K. Intensity-Duration-Frequency Curves and Regionalisation. **International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering**, Julho 2014.
- XIONG, Y.; MELCHING, C. S. Comparison of Kinematic-Wave and Nonlinear Reservoir Routing of Urban Watershed Runoff. **Journal of Hydrologic Engineering**, Jan/Fev 2005.
- YAO, L. et al. Does the spatial location of green roofs affects runoff mitigation in small urbanized catchments? **Journal of Environmental Management** , v. 268, 2020. ISSN DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110707.
- ZHANG, L.; YE, Z.; SHIBATA, S. Assessment of Rain Garden Effects for the Management of Urban Storm Runoff in Japan. **Sustainability**, v. 12, 2020. doi: 10.3390/su12239982.
- ZHANG, Y. et al. Assessment on the Effectiveness of Urban Stormwater Management. **Water**, v. 13, 2021. doi: 10.3390/w13010004.

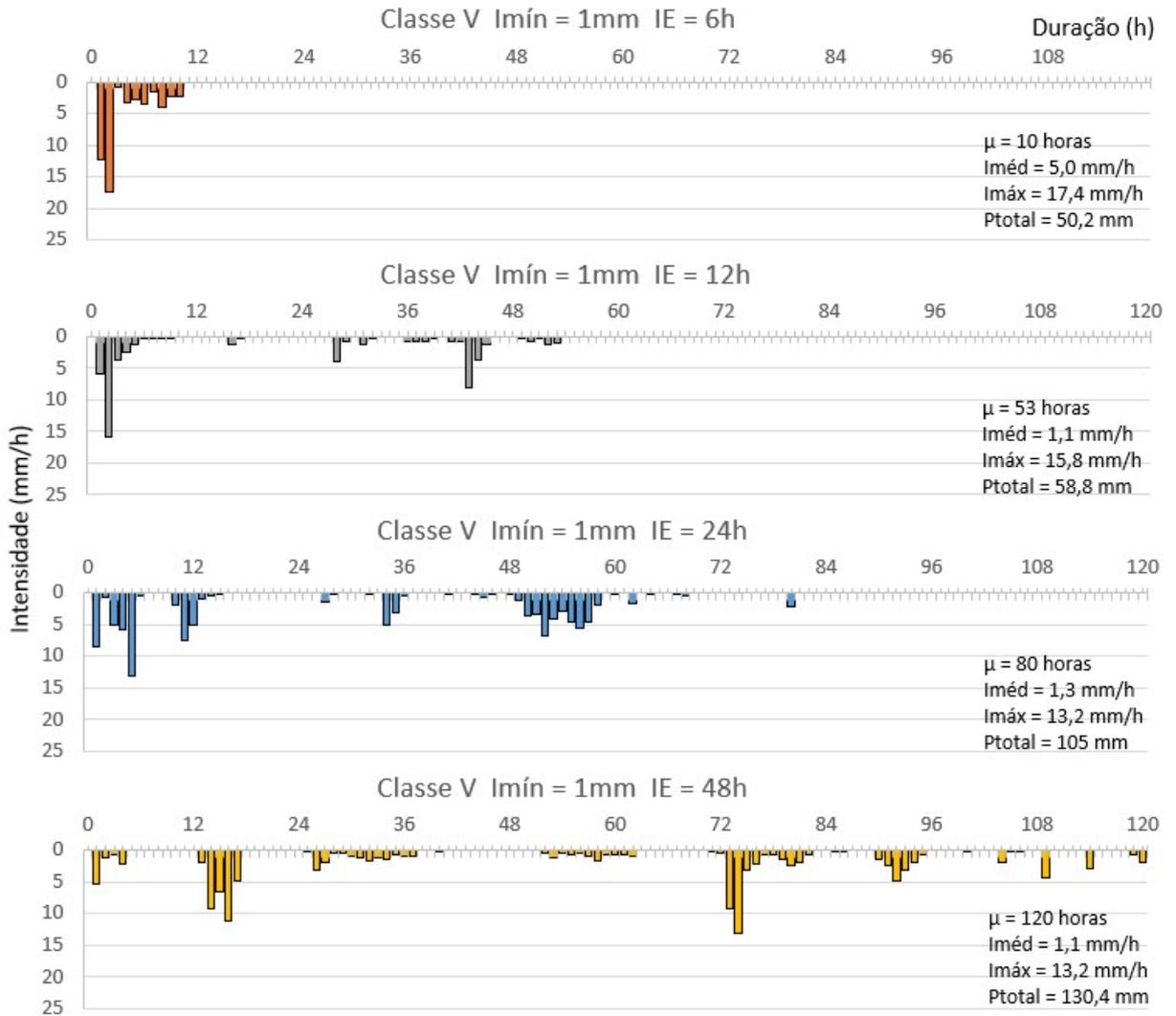
APÊNDICE A

Efeito das variações dos fatores intervenientes nos ECC

A.1 ECC em função da variação do intervalo entre eventos

A Figura A.1 ilustra a classe V, que representa o percentil entre 95 e 98 da amostra. Para esta classe, a intensidade máxima registrada para os eventos com IE de 24 e 48 horas é o mesmo, sendo 13,2 mm/h, porém são eventos distintos. Não há a mesma similaridade de duração dos eventos entre o primeiro e o segundo par de intervalo de eventos, havendo agora diferenças significativas de duração.

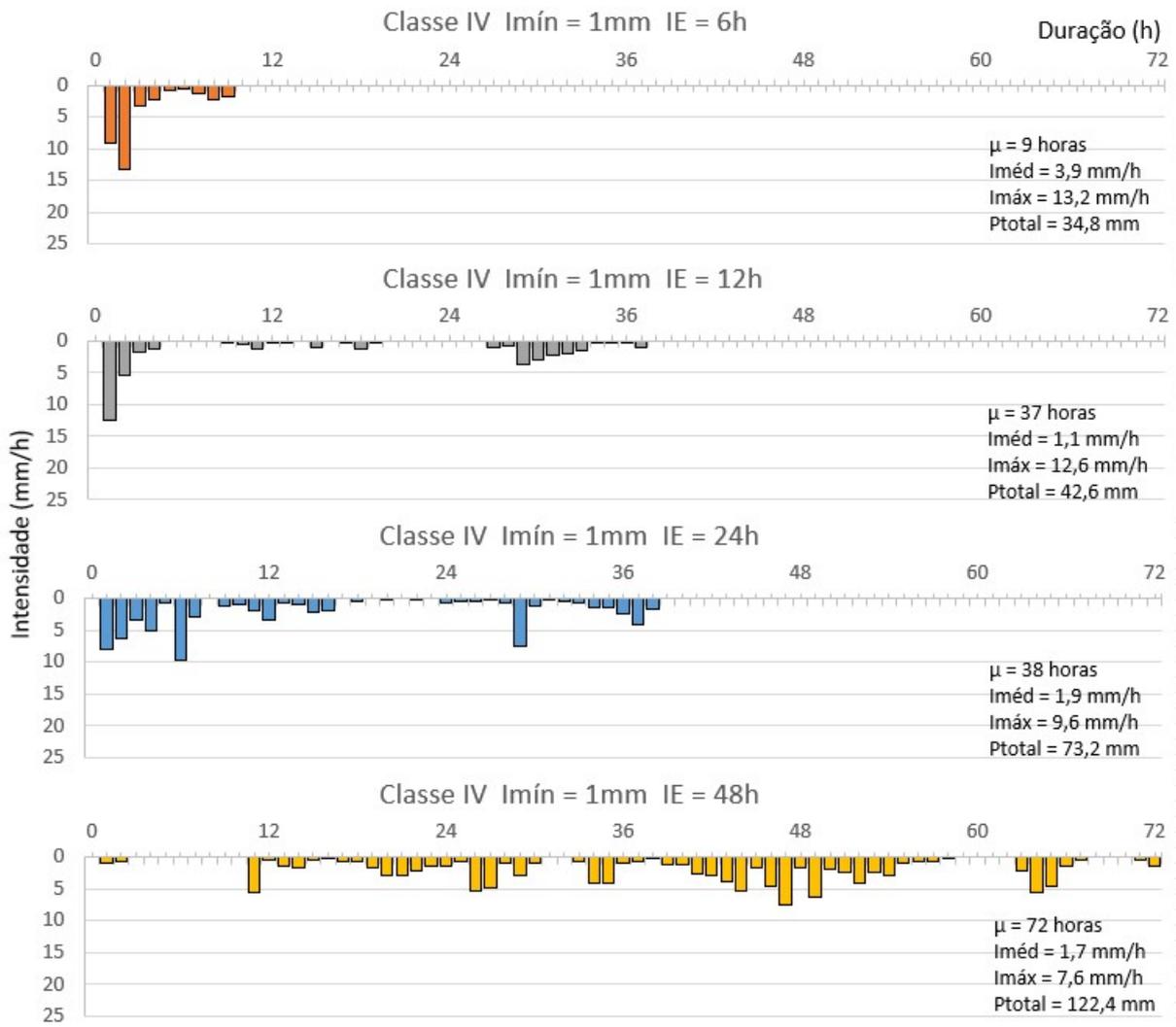
Figura A.1 – Eventos de chuva característicos em função do intervalo entre eventos para a classe V



Fonte: Autor (2022)

Assim como ocorreu na classe VI, apresentada no Figura 34 do item 4.3.1, nesta quinta classe a intensidade máxima foi registrada no IE = 6 horas, que apresentou novamente um forte pico concentrado de chuva, sem intensidades menores adjacentes. Os eventos com intervalo de 12, 24 e 48 horas apresentaram características semelhantes, com pequenos picos de chuva associados a períodos secos curtos, sendo as intensidades médias próximas de 1 mm/h e totalmente distinta da intensidade média de 5 mm/h definida para o IE de 6 horas. Para a classe IV foi traçado o diagrama de chuva ilustrado na Figura A.2.

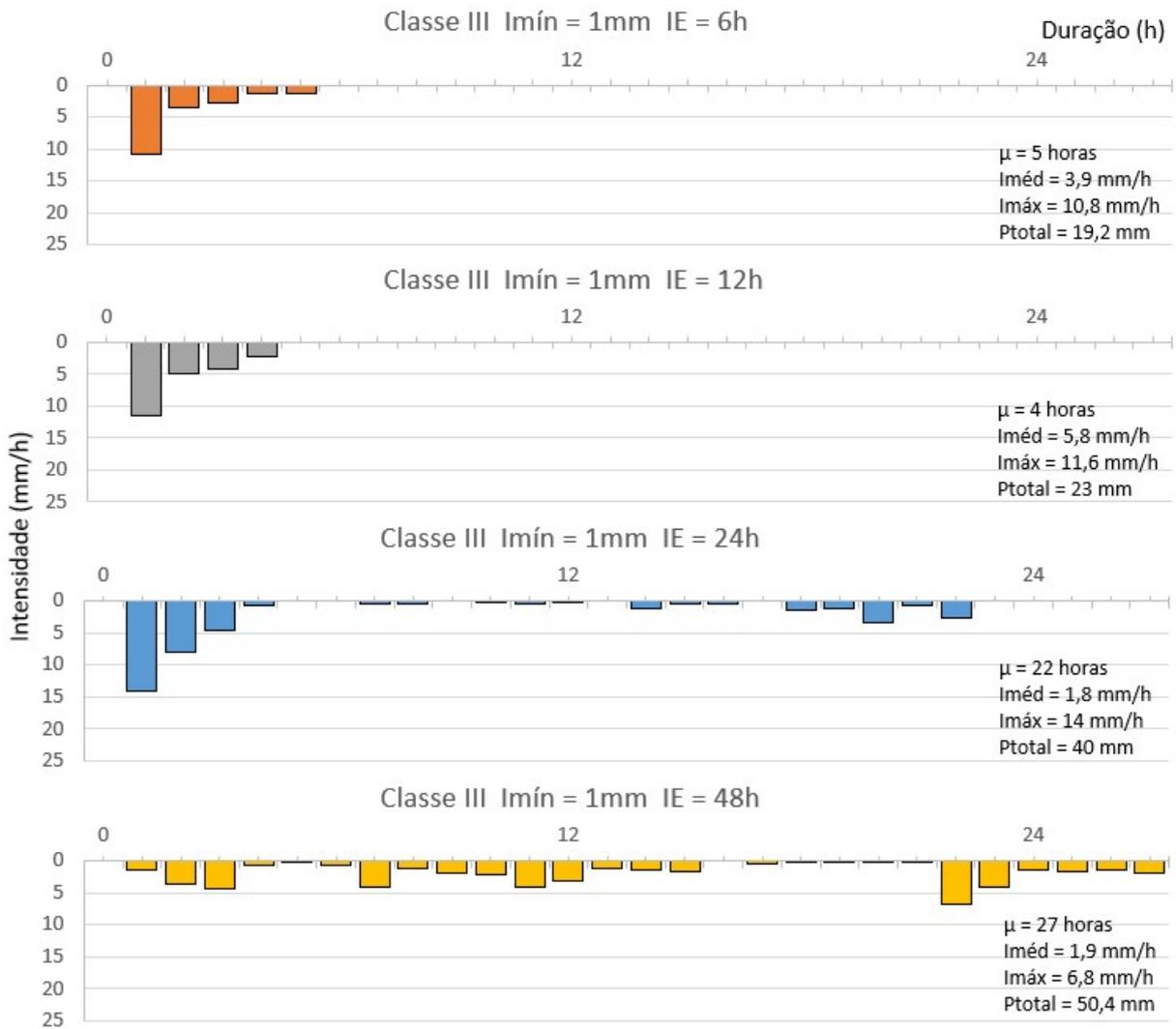
Figura A.2 - Eventos de chuva característicos em função do intervalo entre eventos para a classe IV



Fonte: Autor (2022)

Nesta classe o ECC determinado para o IE = 6 horas é uma fração do ECC calculado para a classe V com IE = 48 horas, o que mostra que essa parcela de chuva é de fato uma associação crítica de intensidades. As características gerais dos eventos nesta classe são similares entre si e diferentes das classes V e VI, possuindo agora tempos secos menores. Novamente o intervalo entre eventos de 6 horas apresentou a maior intensidade máxima e média do grupo. Para a classe III, foi traçado o diagrama de chuva na Figura A.3.

Figura A.3 - Eventos de chuva característicos em função do intervalo entre eventos para a classe III

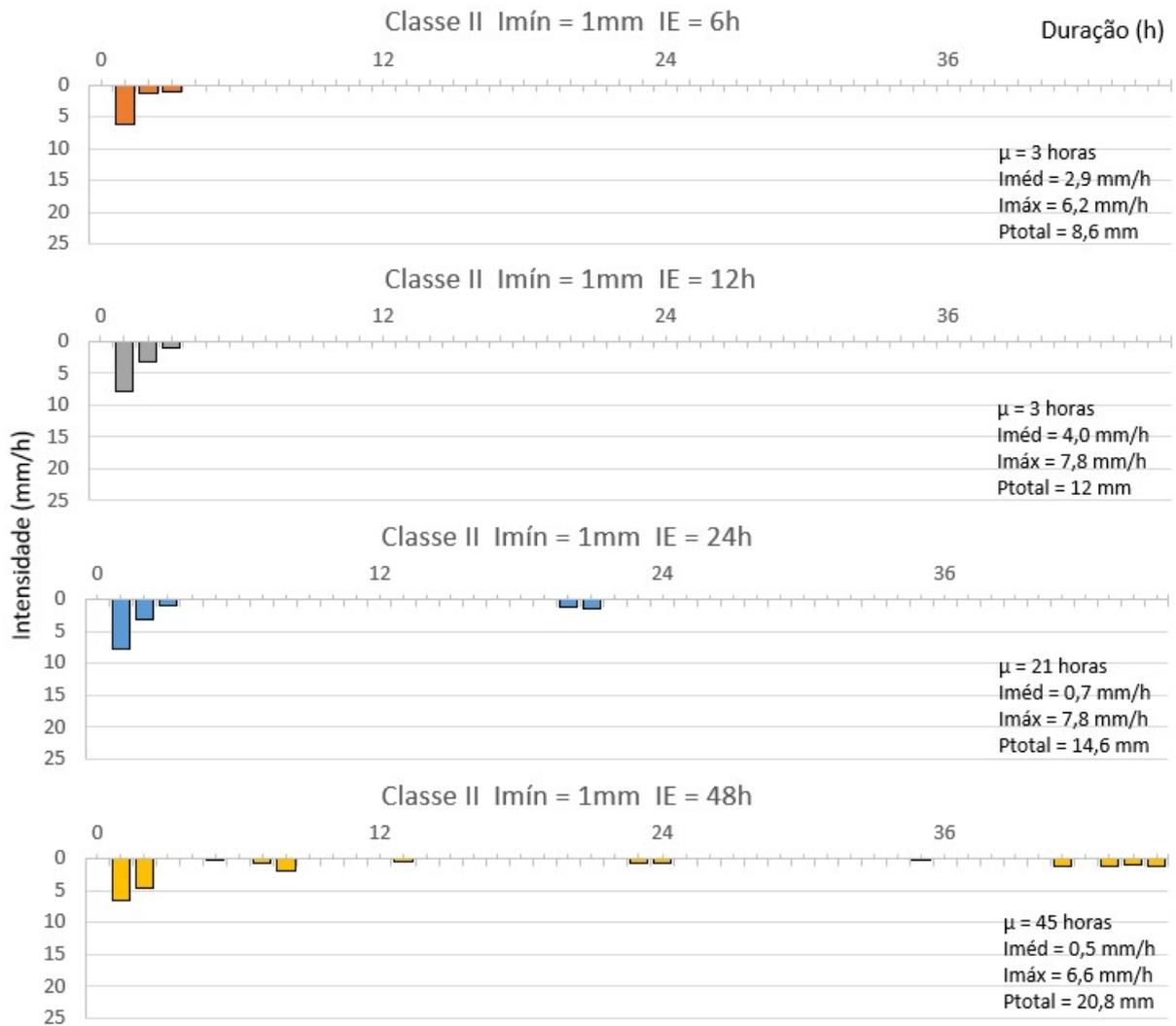


Fonte: Autor (2022)

Para os ECC determinados para a classe III, nos intervalos de 6 e 12 horas não há valores de chuva com intensidade nula. De maneira geral os ECC para intervalos de 6, 12 e 24 horas apresentam características similares com um pico no início do evento e uma cauda posterior com intensidades menores. Nesta classe foi também obtido pares similares quando a duração e altura de chuva total para os dois primeiros e últimos intervalos.

A Figura A.4 mostra os ECC determinados para a classe II, que representam os eventos entre o 50 e 75º percentil da amostra.

Figura A.4 - Eventos de chuva característicos em função do intervalo entre eventos para a classe II

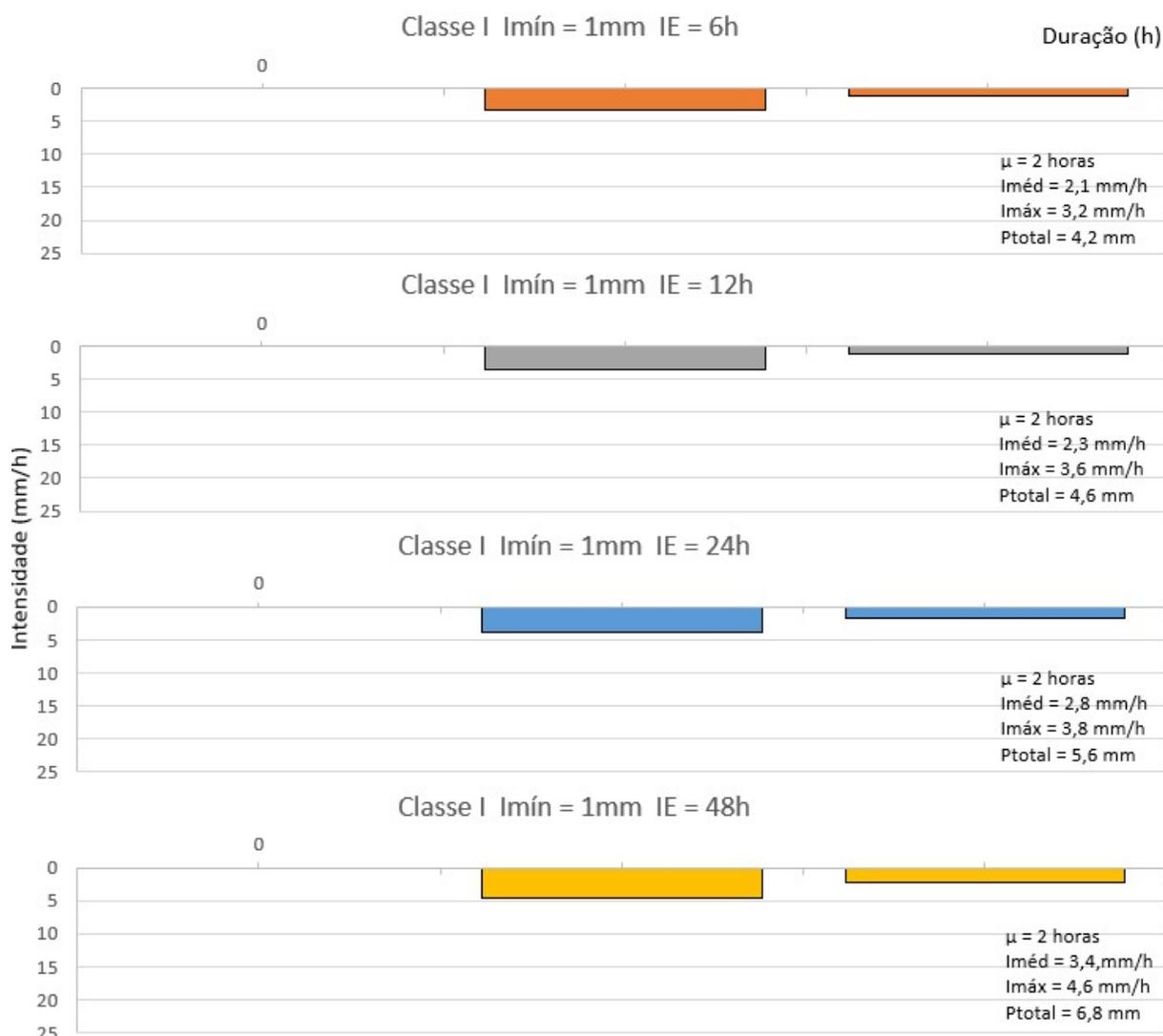


Fonte: Autor (2022)

Nesta classe todos os ECC possuem um pico no início do evento, sendo que para os intervalos maiores este pico está associado a pequenos registros, porém com grandes intervalos secos. O ECC para intervalo de 12 e 24 horas é inicialmente o mesmo, apresentando uma diferença na cauda obtida para o IE de 24 horas. Todos esses eventos possuem picos abaixo de 8 mm/h com as intensidades adjacentes abaixo de 5mm/h.

A classe I, que representa os eventos abaixo do 50º percentil possui seus ECC ilustrados na Figura A.5.

Figura A.5 – Eventos de chuva característicos em função do intervalo entre eventos para a classe I



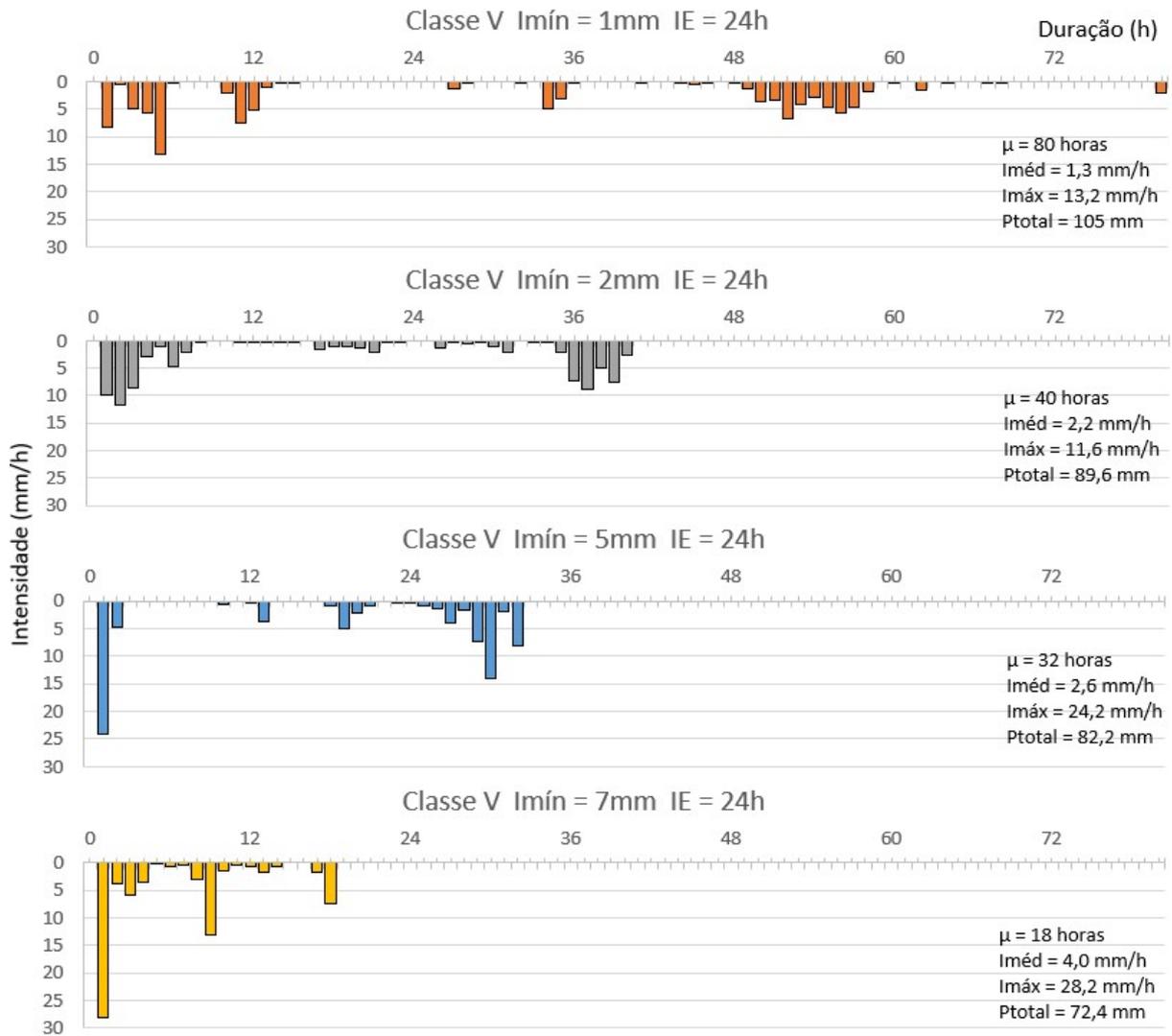
Fonte: Autor (2022)

Para esta última classe, todos os eventos, independente do intervalo entre eventos, possuem duração de 2h com intensidade na primeira hora próximos de 4 mm/h e, com volume total entre 4 e 7 mm.

A.2 ECC em função da variação da intensidade mínima de chuva

A Figura A.6 ilustra os eventos de chuva característicos determinados para a classe V deste estudo, que representa o intervalo de percentil da amostra de 95 a 98, quanto a variação da intensidade mínima para determinação do evento.

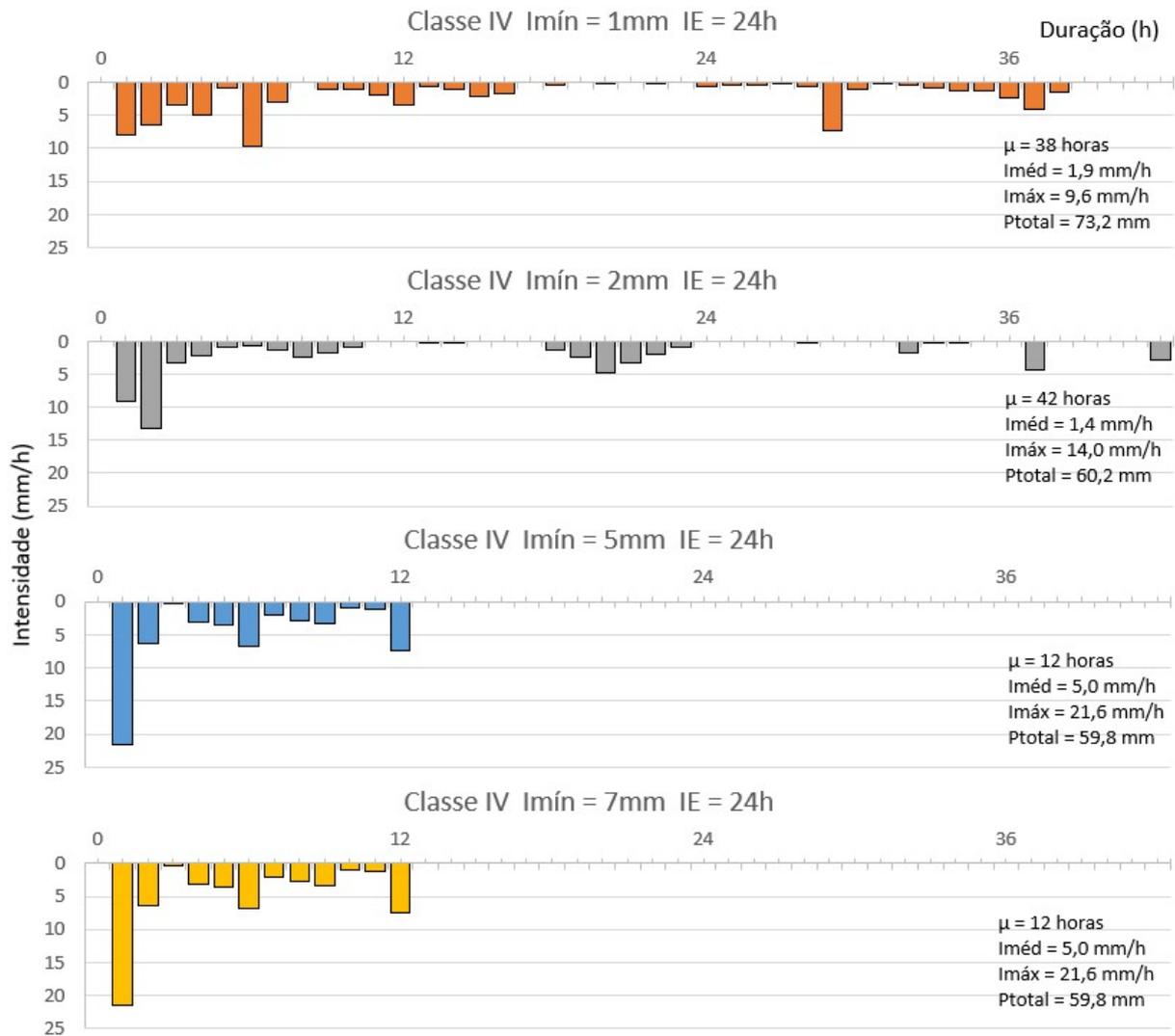
Figura A.6 - Eventos de chuva característicos para a classe V variando a intensidade mínima



Fonte: Autor (2022)

Para a classe V, assim como na VI que foi exibida na Figura 37 do item 4.3.2, houve redução na duração e altura total precipitada dos eventos considerando a evolução da menor para a maior intensidade mínima desta avaliação. Os ECC determinados para os $Imín = 1$ mm/h e 2 mm/h possuem intensidade máximas próximas a 10 mm/h, enquanto para os $Imín = 5$ mm/h e 7 mm/h as intensidades máximas estão próximas a 25 mm/h. Para a quarta classe foi traçado o diagrama de chuva ilustrado na Figura A.7.

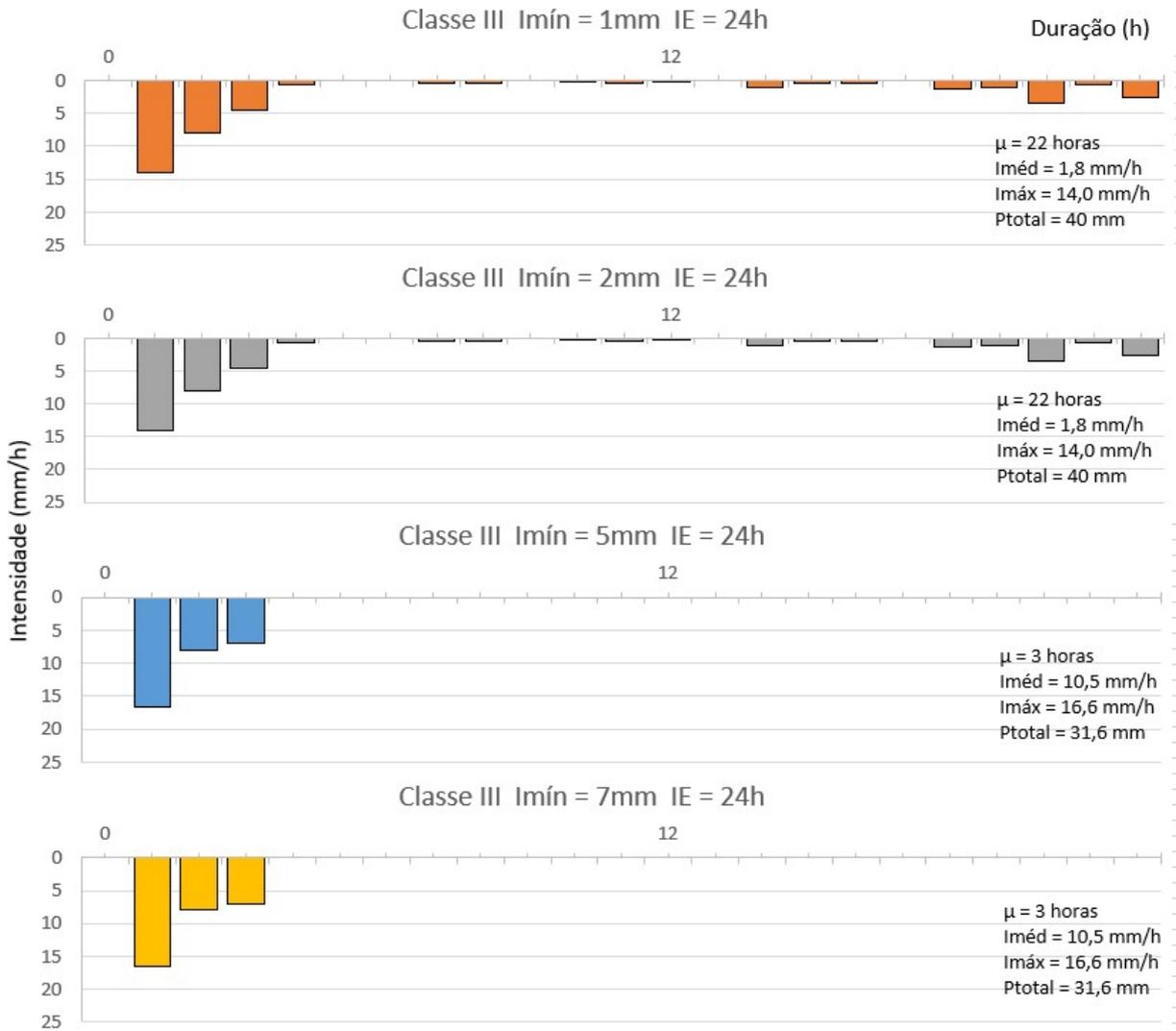
Figura A.7 - Eventos de chuva característicos para a classe IV variando a intensidade mínima



Fonte: Autor (2022)

Nesta quarta classe, o ECC determinado para o $I_{mín} = 5 \text{ mm/h}$ é o mesmo determinado para $I_{mín} = 7 \text{ mm/h}$, que por sua vez é uma fração do evento encontrado para a classe VI com $I_{mín} = 1 \text{ mm/h}$ e $IE = 6$ horas do estudo anterior. Nesta classe não foi encontrada uma redução gradativa para a duração do evento de acordo com o incremento da intensidade mínima, uma vez que para a $I_{mín} = 2 \text{ mm/h}$ o evento possui duração ligeiramente maior do que o ECC determinado para $I_{mín} = 1 \text{ mm/h}$. No entanto, para a altura precipitada total ainda ocorreu a redução dos valores de acordo com o aumento da intensidade mínima. Para a terceira classe de eventos, foi determinado o diagrama de chuva na Figura A.8.

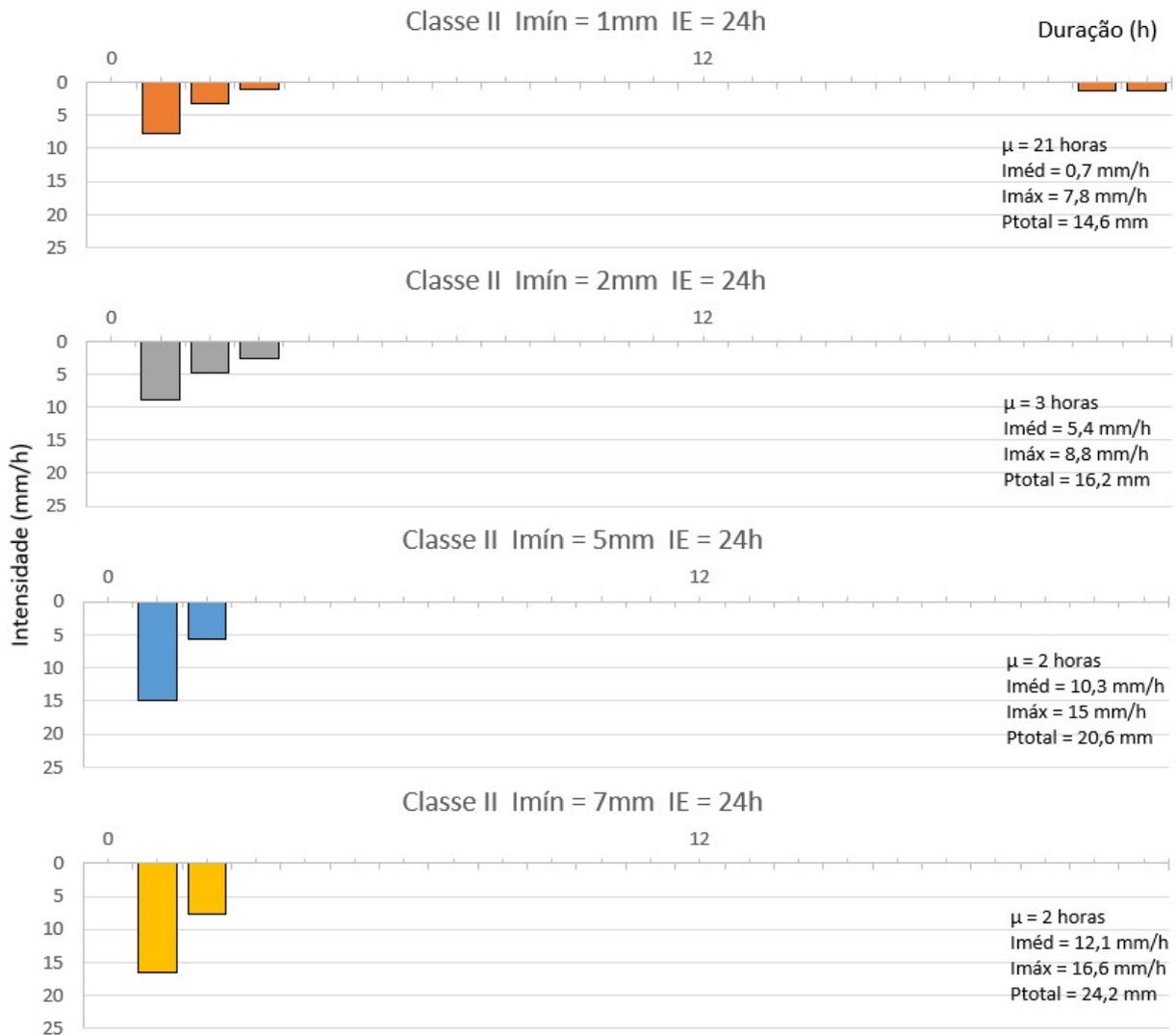
Figura A.8 - Eventos de chuva característicos para a classe III variando a intensidade mínima



Fonte: Autor (2022)

Para a terceira classe nas intensidades mínimas de 5 e 7mm/h não ocorreram registros de horas secas. Ocorreram ainda a seleção de eventos idênticos para o par e $I_{mín} = 1$ mm/h e 2 mm/h e ainda para par $I_{mín} = 5$ mm/h e 7 mm/h. As intensidades máximas são similares em todos os casos e próximas a 15 mm/h. A Figura A.9 apresenta o diagrama de chuva para a segunda classe.

Figura A.9 - Eventos de chuva característicos para a classe II variando a intensidade mínima



Fonte: Autor (2022)

Nesta segunda classe o ECC determinado para $I_{mín} = 1$ mm/h é o único que possui períodos secos, apresentando dois pequenos blocos de chuva, enquanto os demais estão consolidados em bloco único. Em tendência contrária ao visualizado nas outras classes, há um aumento na altura precipitada total com o aumento da intensidade mínima. No entanto a duração do evento segue a tendência de redução com o incremento da intensidade mínima.

A primeira classe, que contempla o 50º percentil possui seus ECC ilustrados na Figura A.10.

Figura A.10 - Eventos de chuva característicos para a classe I variando a intensidade mínima



Fonte: Autor (2022)

Nesta classe apenas o ECC de $I_{mín} = 1$ mm/h possui 2 horas de duração, sendo os demais com apenas um registro horário. Assim como ocorreu na segunda classe, há aumento da altura precipitada total com o aumento da intensidade mínima, já que são eventos de curta duração e baixa altura total precipitada.

APÊNDICE B

Gráficos comparativos dos elementos do balanço hídrico calculados pela FERRAMENTA DDU+S e SWMM

Estão apresentados neste apêndice os gráficos de escoamento superficial, infiltração, extravasão e armazenamento dos dispositivos de drenagem sustentável simulados nesta tese. Os métodos utilizados estão descritos na etapa 6 da metodologia, item 3.7 deste trabalho, enquanto os casos em estudo são apresentados no item 4.5. Por sua vez, os eventos de chuva característicos determinados para estas simulações hidrológicas têm sua metodologia de obtenção descrita na etapa 2 da metodologia, item 3.3, e são apresentados no item 4.1 e discutidos nos itens 4.2 e 4.3 desta tese. Os resultados do SWMM foram compatibilizados ao longo do tempo para adequação aos resultados da Ferramenta DDU+S, pois o modelo americano calcula para o tempo $t+1$ o escoamento superficial e $t+2$ a infiltração, o que não faria sentido em uma discretização temporal de 1 hora para bacias de pequenas dimensões.

B.1 Superfície de Infiltração

A Figura B.1 mostra o comparativo do escoamento superficial gerado na microbacia pelos modelos, havendo diferença na primeira hora de chuva e mantendo a sobreposição das curvas após esse período em todos os eventos para o estudo da SI. Observa-se que sempre que há períodos secos, o retorno do período chuva gera maior escoamento na Ferramenta DDU+S do que no SWMM.

Figura B.1 – Escoamento Superficial gerado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para a superfície de infiltração (continua)

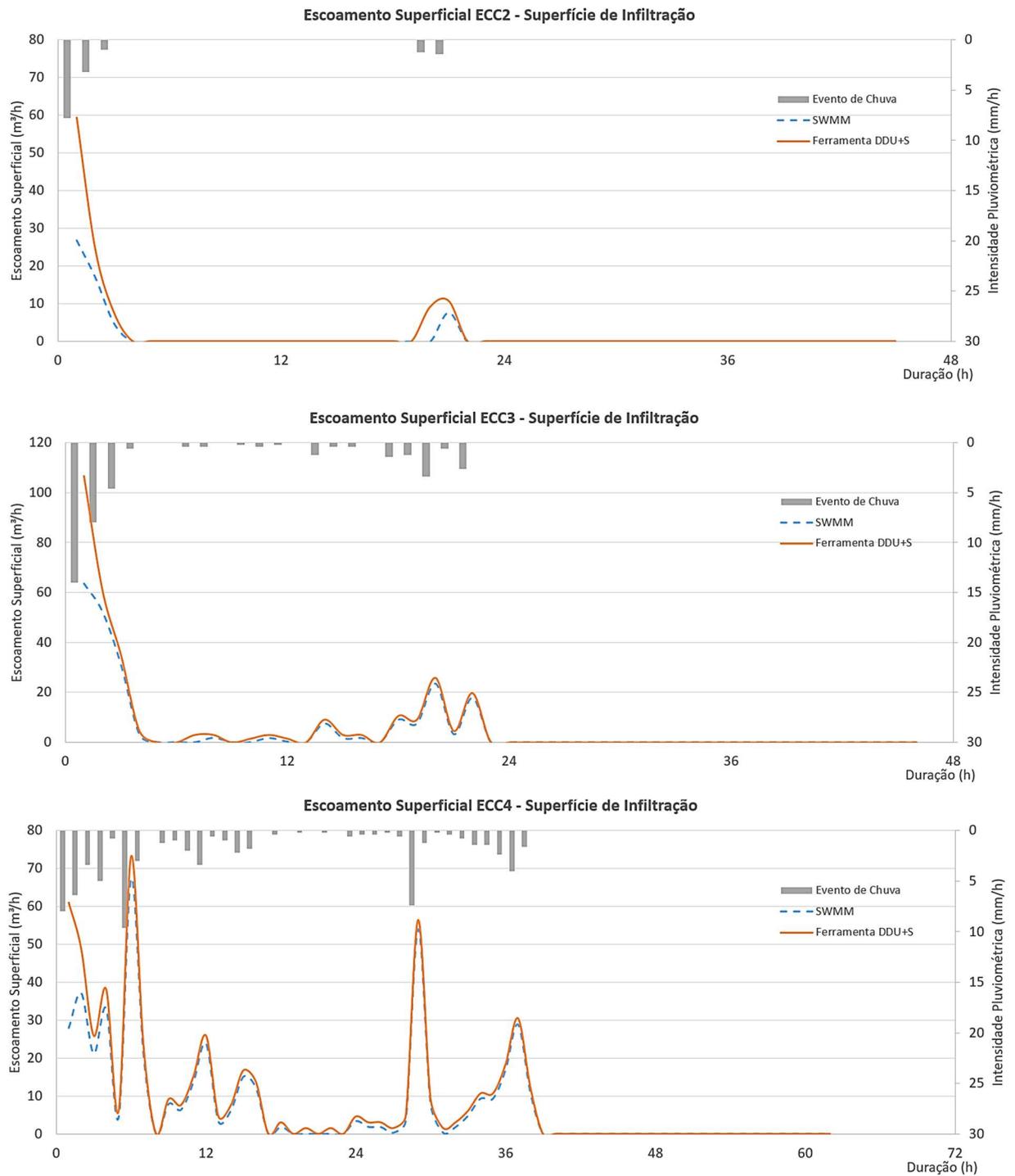
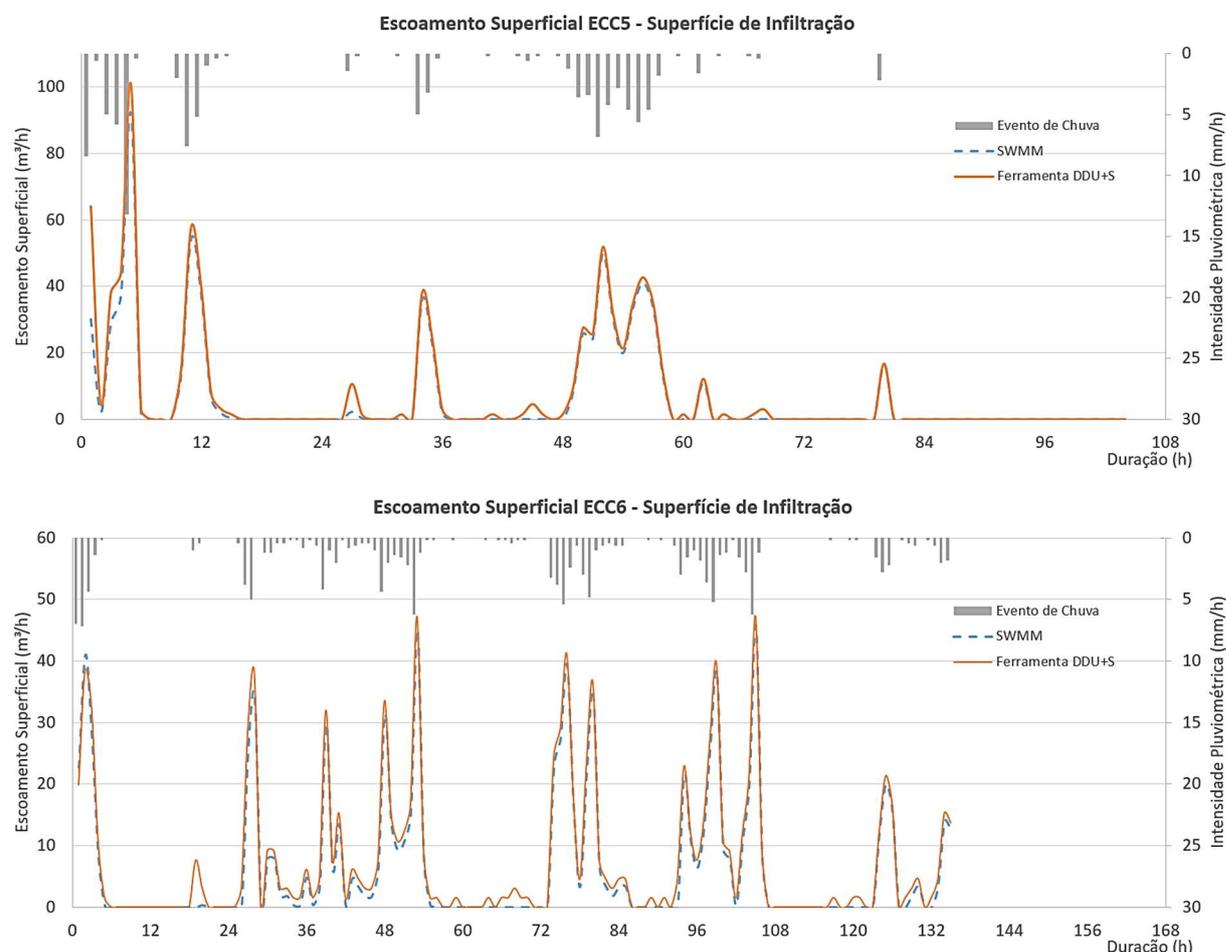


Figura B.1 – Escoamento Superficial gerado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para a superfície de infiltração (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

A Figura B.2 ilustra a infiltração ocorrida no dispositivo. Apesar dos modelos calcularem valores muito próximos, é possível visualizar a maior complexidade do modelo SWMM, com taxas de infiltração variáveis em função do tempo e nível de armazenamento. Para intervalos de tempo menores, a Ferramenta DDU+S calcula volumes de infiltração maiores que o SWMM, porém em eventos longos o SWMM é capaz de determinar um volume de infiltração maior pois é capaz de avaliar a capacidade do solo de aumentar a taxa de infiltração após períodos secos. Para o ECC6, a maior infiltração determinada a partir de 36 horas do evento pelo SWMM garantiu a não ocorrência de extravasão apontada pela Ferramenta DDU+S, tendo impacto direto no balanço hídrico. Os dois modelos apresentam grande redução da capacidade de infiltração a partir da primeira hora do evento. Apesar da simplicidade da ferramenta desenvolvida neste trabalho, entende-se que não há diferença significativa que justifique a adoção de equações mais complexas para cálculo da infiltração.

Figura B.2 – Infiltração calculada pela Ferramenta DDU+S e SWMM para a superfície de infiltração (continua)

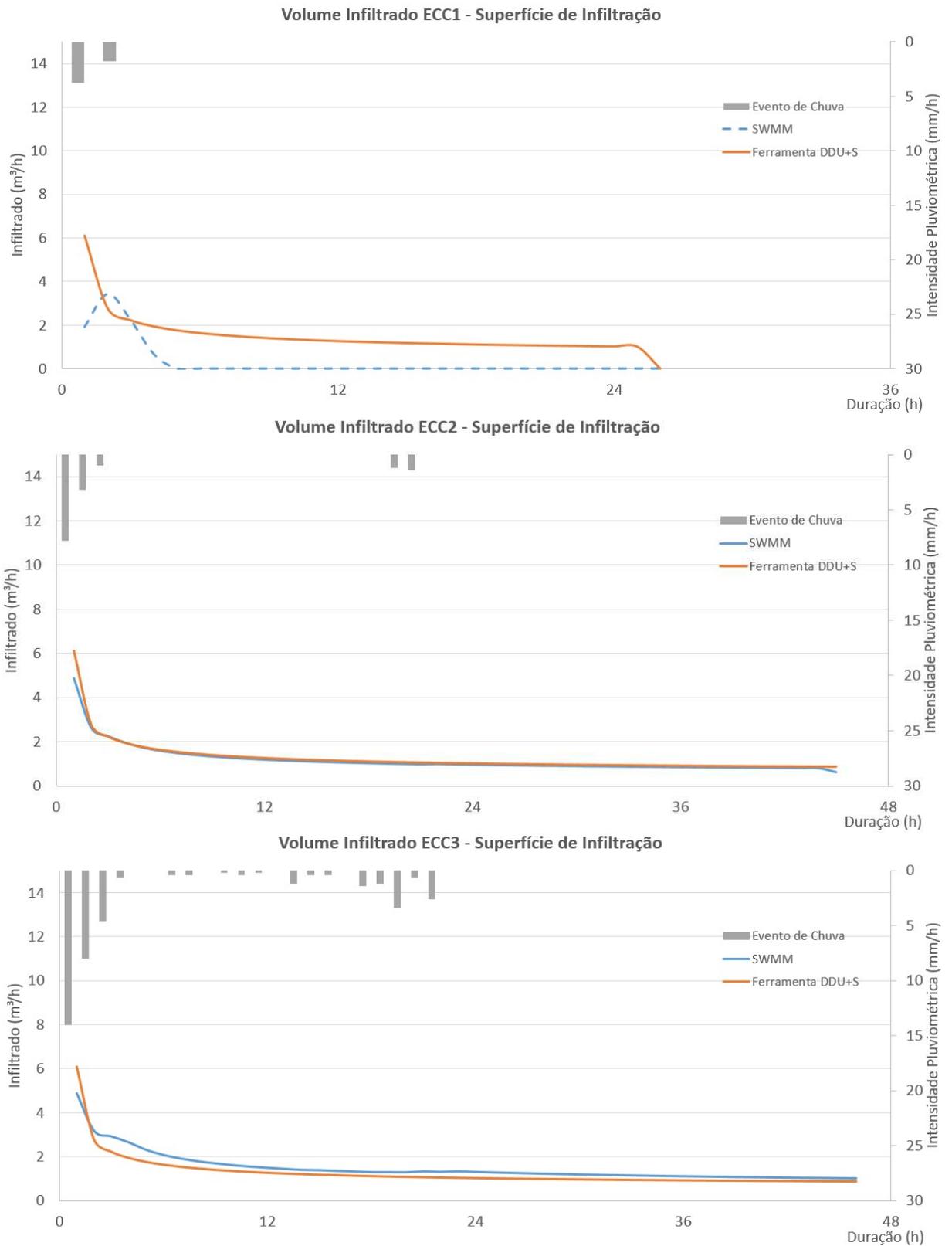
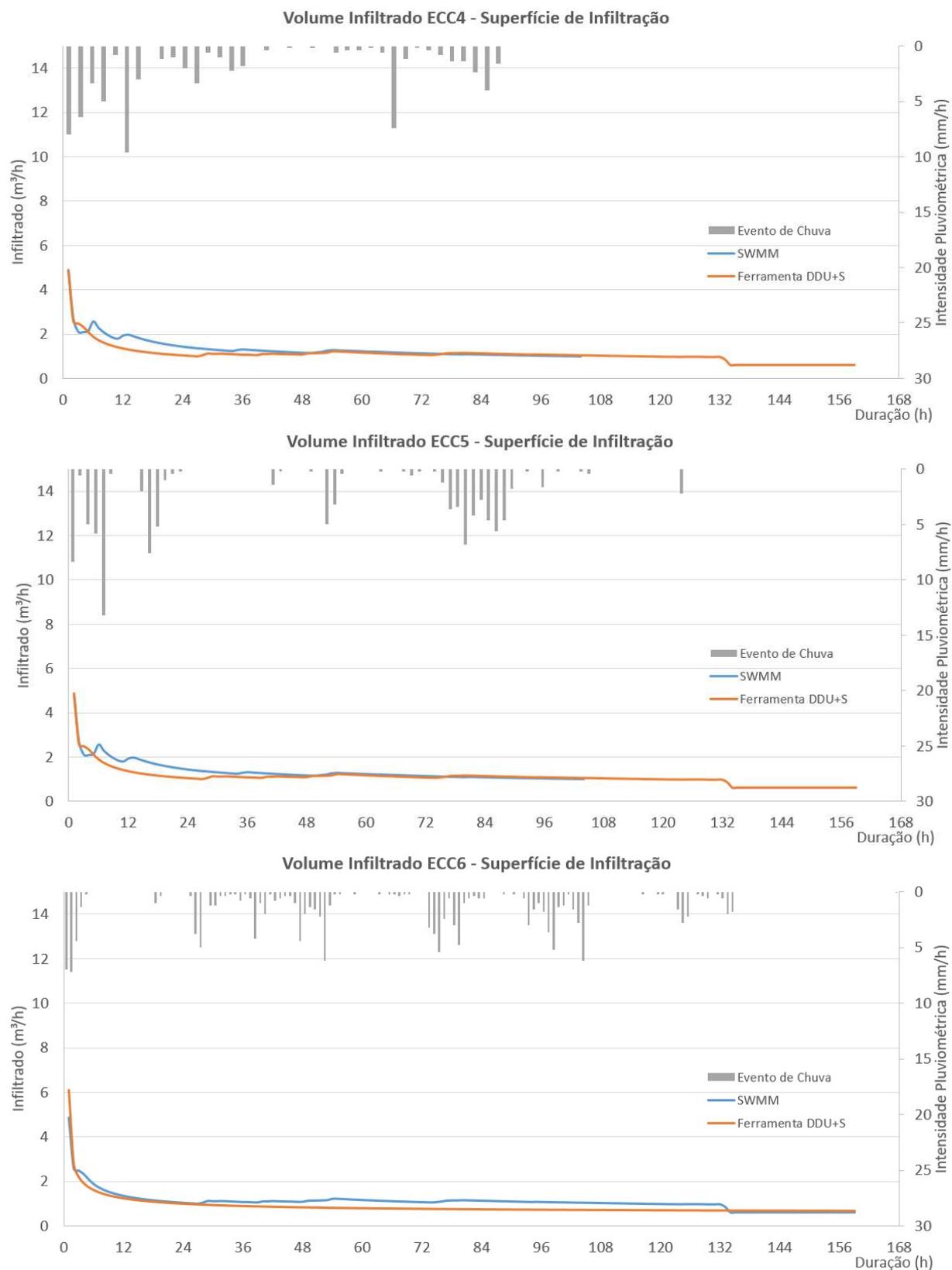


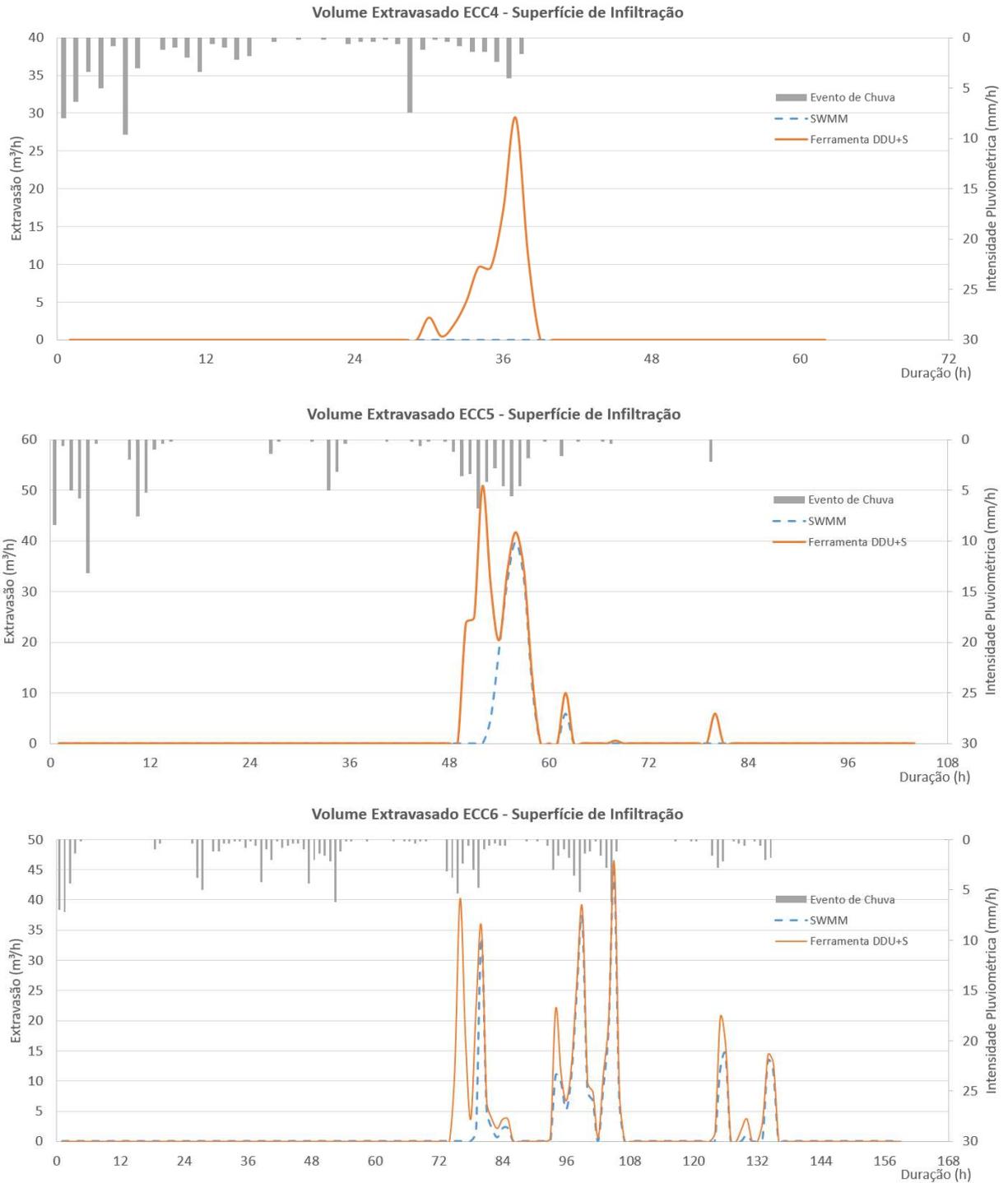
Figura B.2 – Infiltração calculada pela Ferramenta DDU+S e SWMM para a superfície de infiltração (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

A Figura B.3 ilustra a extravasão ocorrida durante os ECC4, ECC5 e ECC6, onde volume de escoamento superficial foi maior que a capacidade da superfície de infiltração.

Figura B.3 – Extravasão calculada pela Ferramenta DDU+S e SWMM



Fonte: Autor (2022)

Por fim, a Figura B.4 ilustra os volumes de armazenamento ao longo do tempo para todos os eventos de chuva característicos. Quando utilizada a Ferramenta DDU+S os volumes armazenados são maiores principalmente devido ao maior volume de escoamento superficial calculado na primeira hora do evento e as menores taxas de infiltração em eventos de longa duração.

Figura B.4 – Volume de armazenamento da superfície de infiltração para cada ECC (continua)

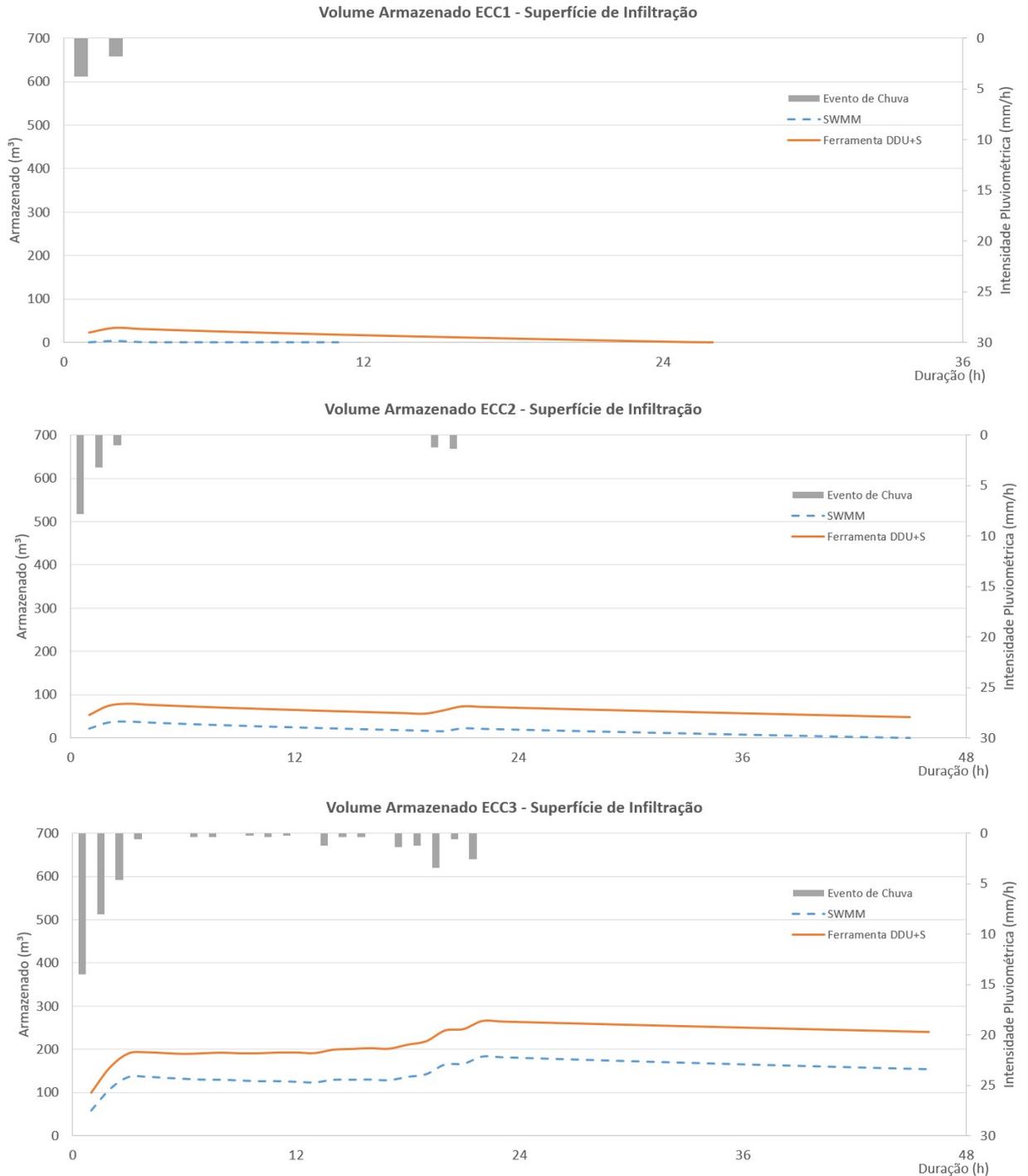
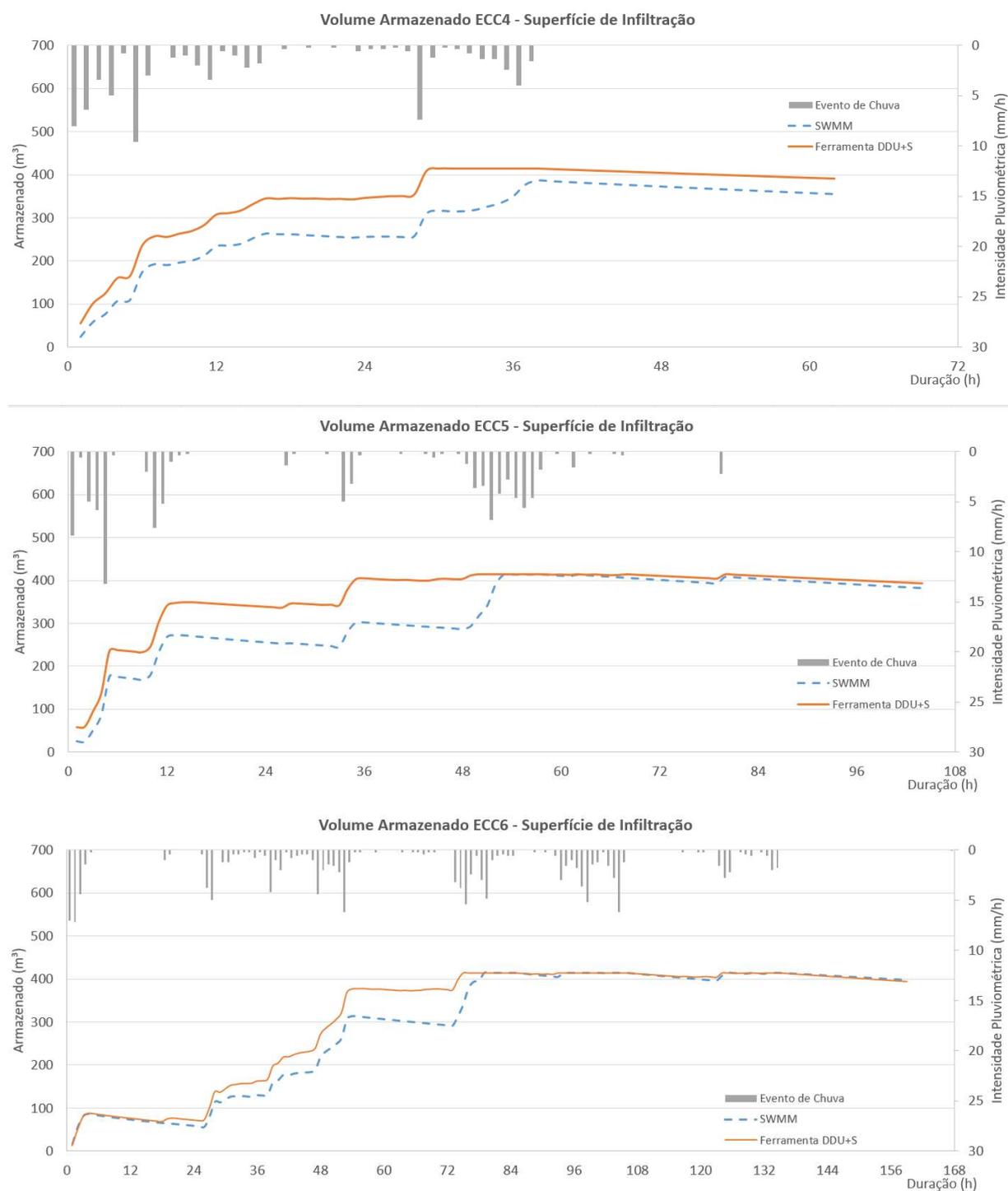


Figura B.4 – Volume de armazenamento da superfície de infiltração para cada ECC (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

O modelo simples da Ferramenta DDU+S é capaz de simular dispositivos sustentáveis com valores próximos ao determinado pelo confiável SWMM. Em situações onde a duração da chuva é maior, os modelos apresentam dados de balanço hídrico muito similares.

B.2 Vala de Infiltração

A microbacia de estudo da VI é a mesma da utilizada para a SI, assim, o escoamento superficial não apresenta diferença do que foi apresentado na Figura B1. A Figura B5 ilustra a infiltração calculada pela Ferramenta DDU+S e SWMM para a VI.

Figura B.5 – Infiltração determinado pelo SWMM vs. Ferramenta DDU+S para a vala de infiltração (continua)

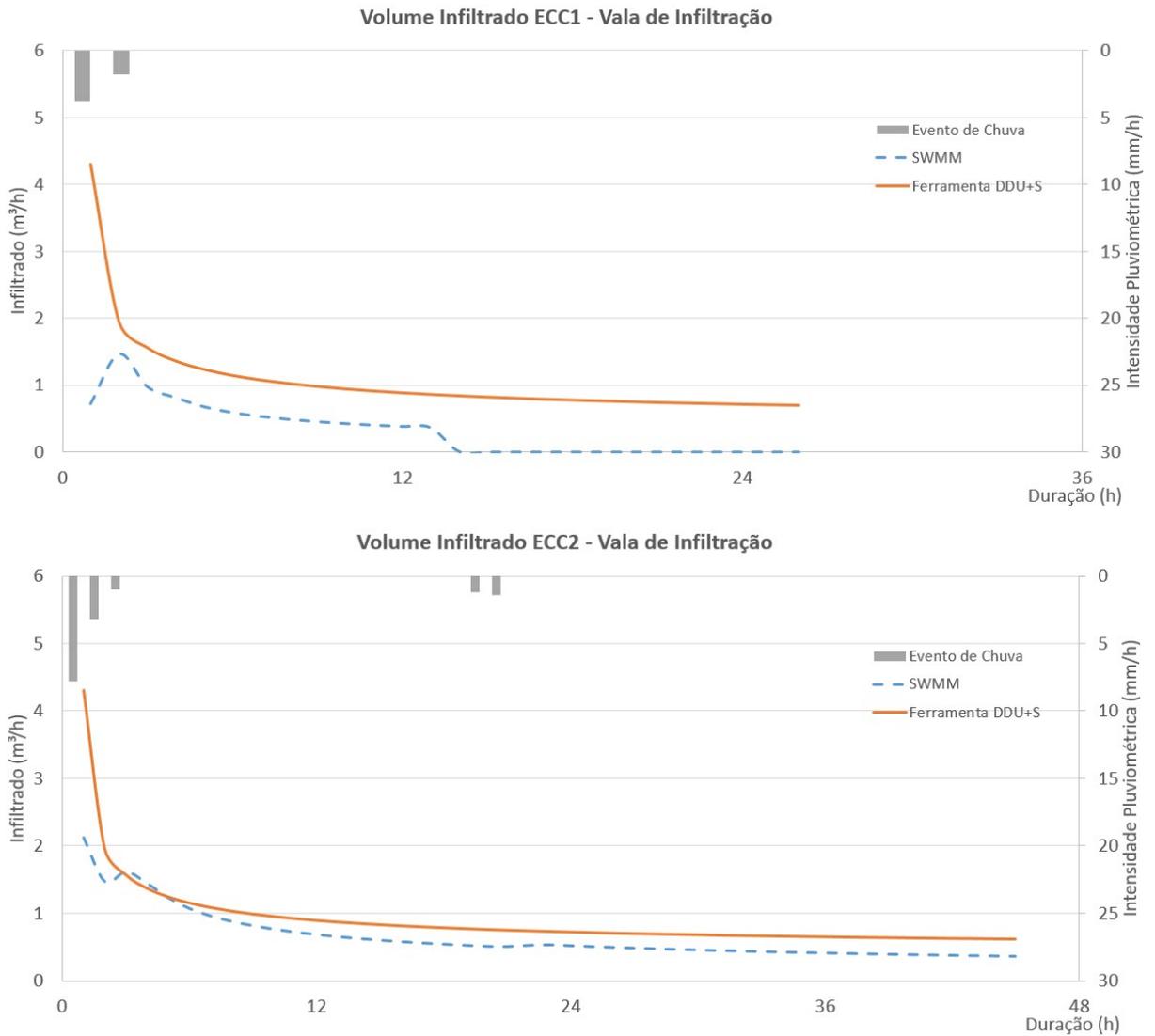


Figura B.5 – Infiltração determinado pelo SWMM vs. Ferramenta DDU+S para a vala de infiltração (continua)

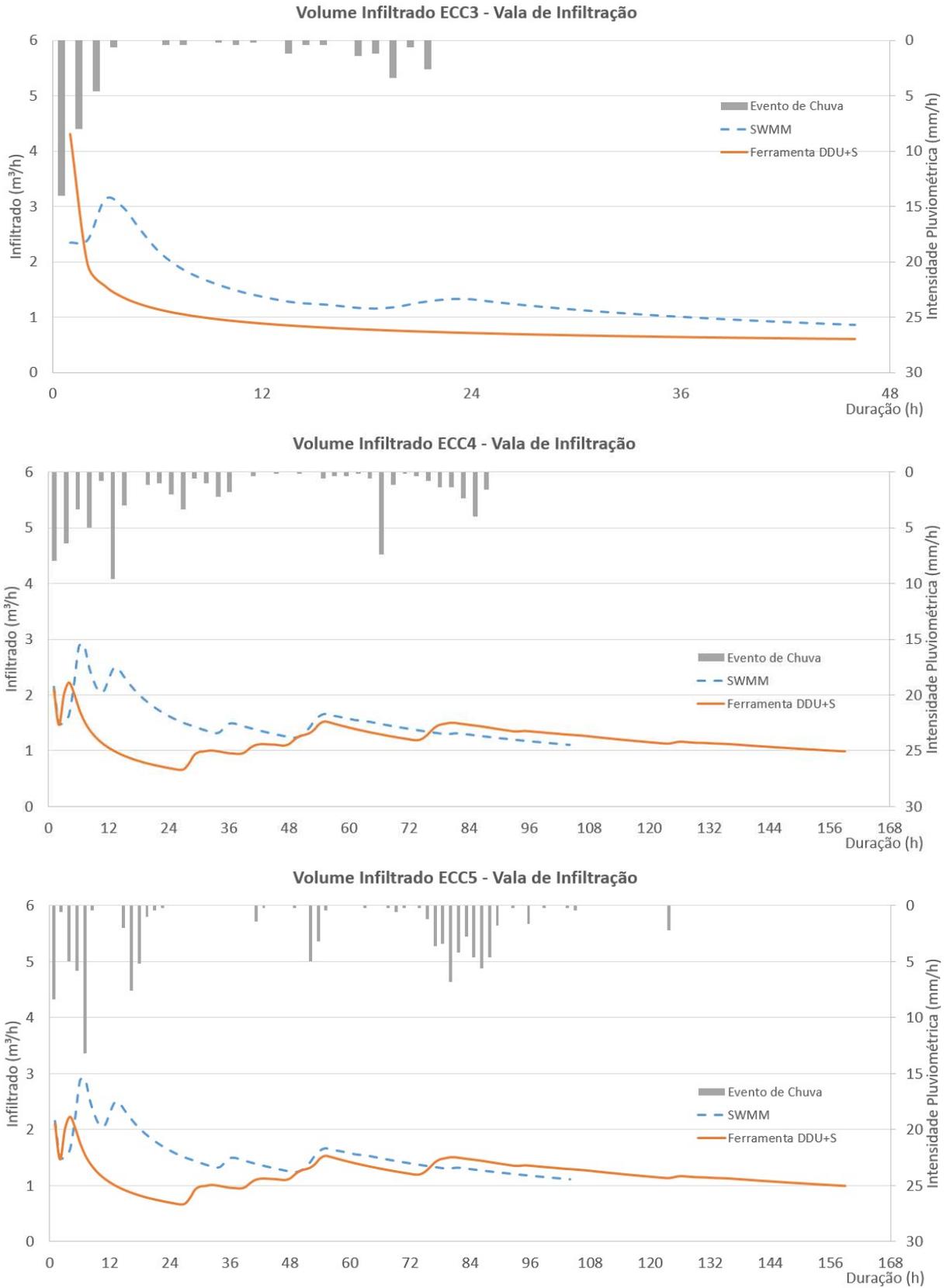
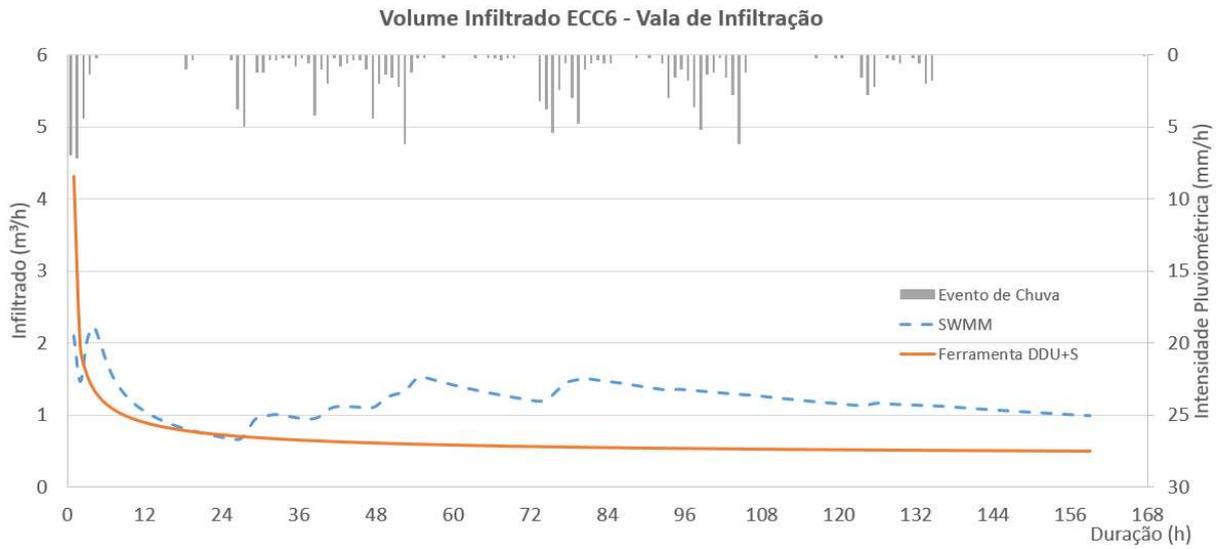


Figura B.5 – Infiltração determinado pelo SWMM vs. Ferramenta DDU+S para a vala de infiltração (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

A Figura B.6 ilustra a extravasão ocorrida durante os ECC4, ECC5 e ECC6, onde volume de escoamento superficial foi maior que a capacidade da VI.

Figura B.6 – Extravasão determinado pelo SWMM vs. Ferramenta DDU+S para a vala de infiltração (continua)

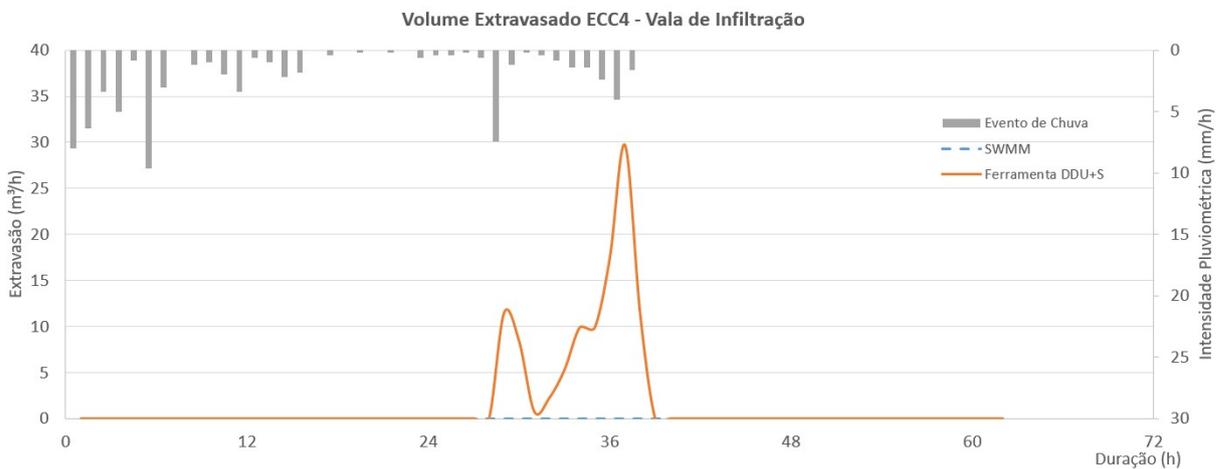
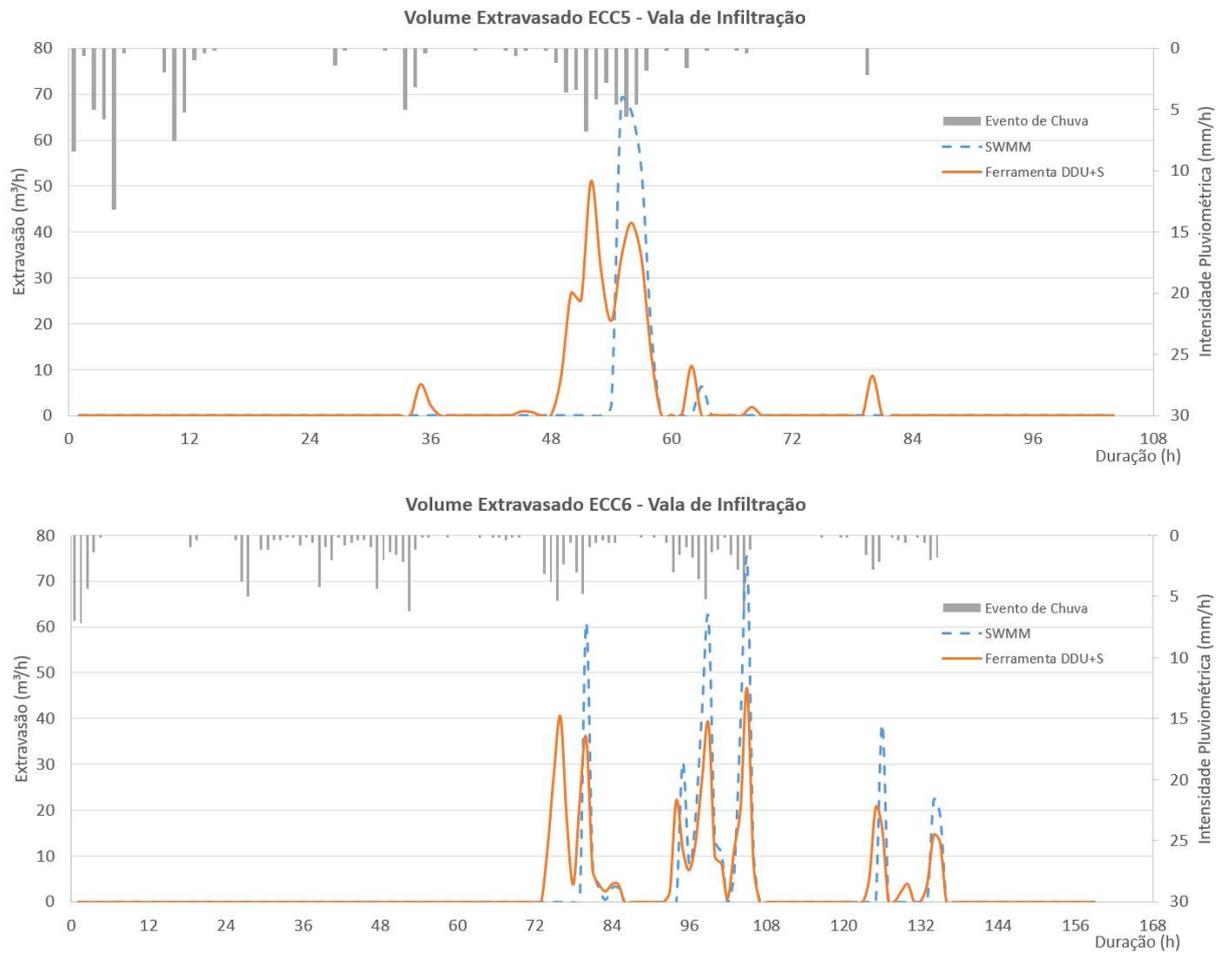


Figura B.6 – Extravasão determinado pelo SWMM vs. Ferramenta DDU+S para a vala de infiltração (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

Por fim, a Figura B.7 ilustra os volumes de armazenamento ao longo do tempo para todos os eventos de chuva característicos para a VI.

Figura B.7 – Armazenamento determinado pelo SWMM vs. Ferramenta DDU+S para a vala de infiltração (contínua)

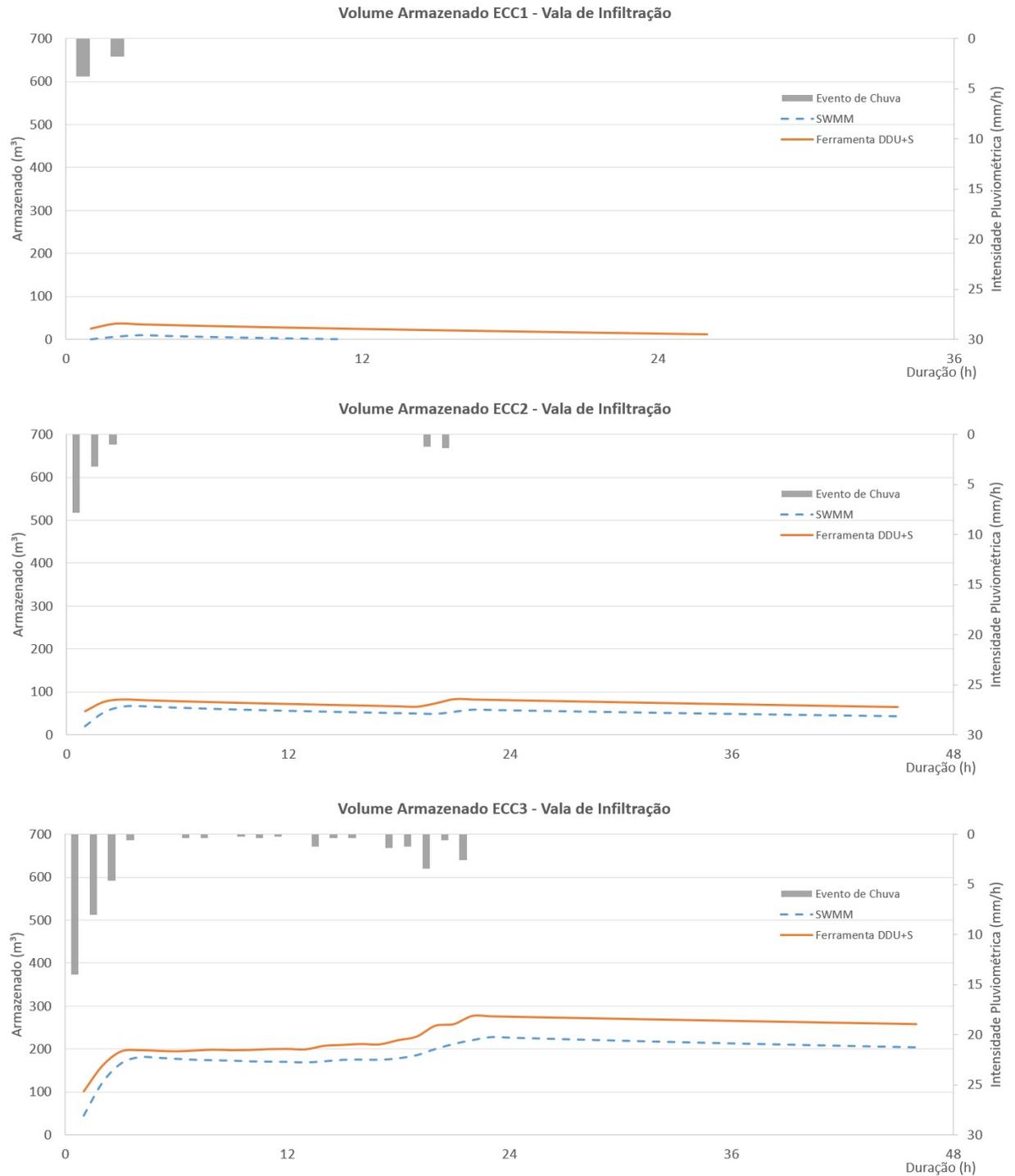
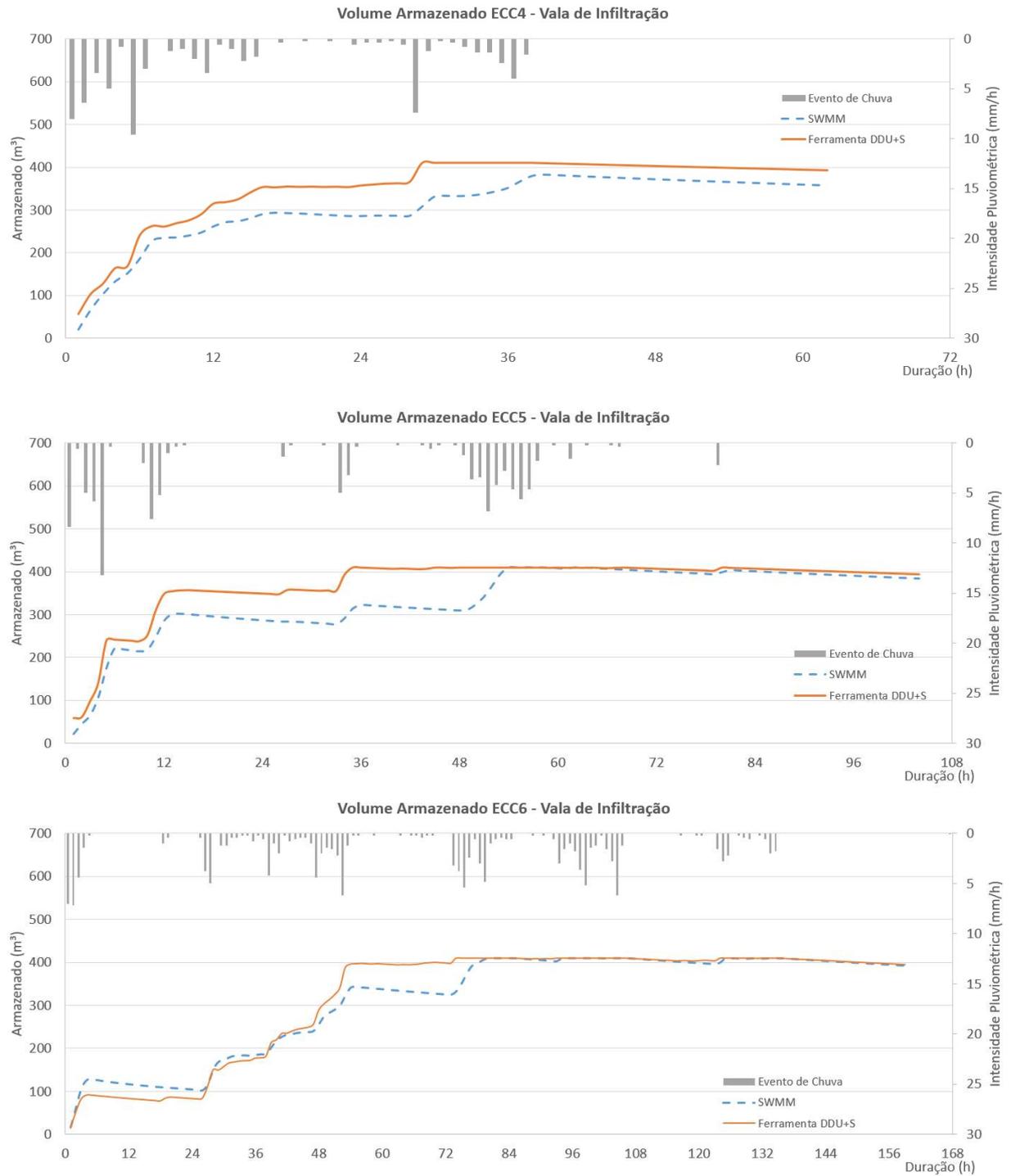


Figura B.7 – Armazenamento determinado pelo SWMM vs. Ferramenta DDU+S para a vala de infiltração (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

B.3 Trincheira de Infiltração

As diferenças entre os resultados obtidos pelo modelo SWMM e o modelo simplificado da Ferramenta DDU+S quanto ao escoamento superficial do caso da TI podem ser avaliadas através da Figura B.8.

Figura B.8 – Escoamento superficial determinado pelo SWMM vs. Ferramenta DDU+S para a trincheira de infiltração (continua)

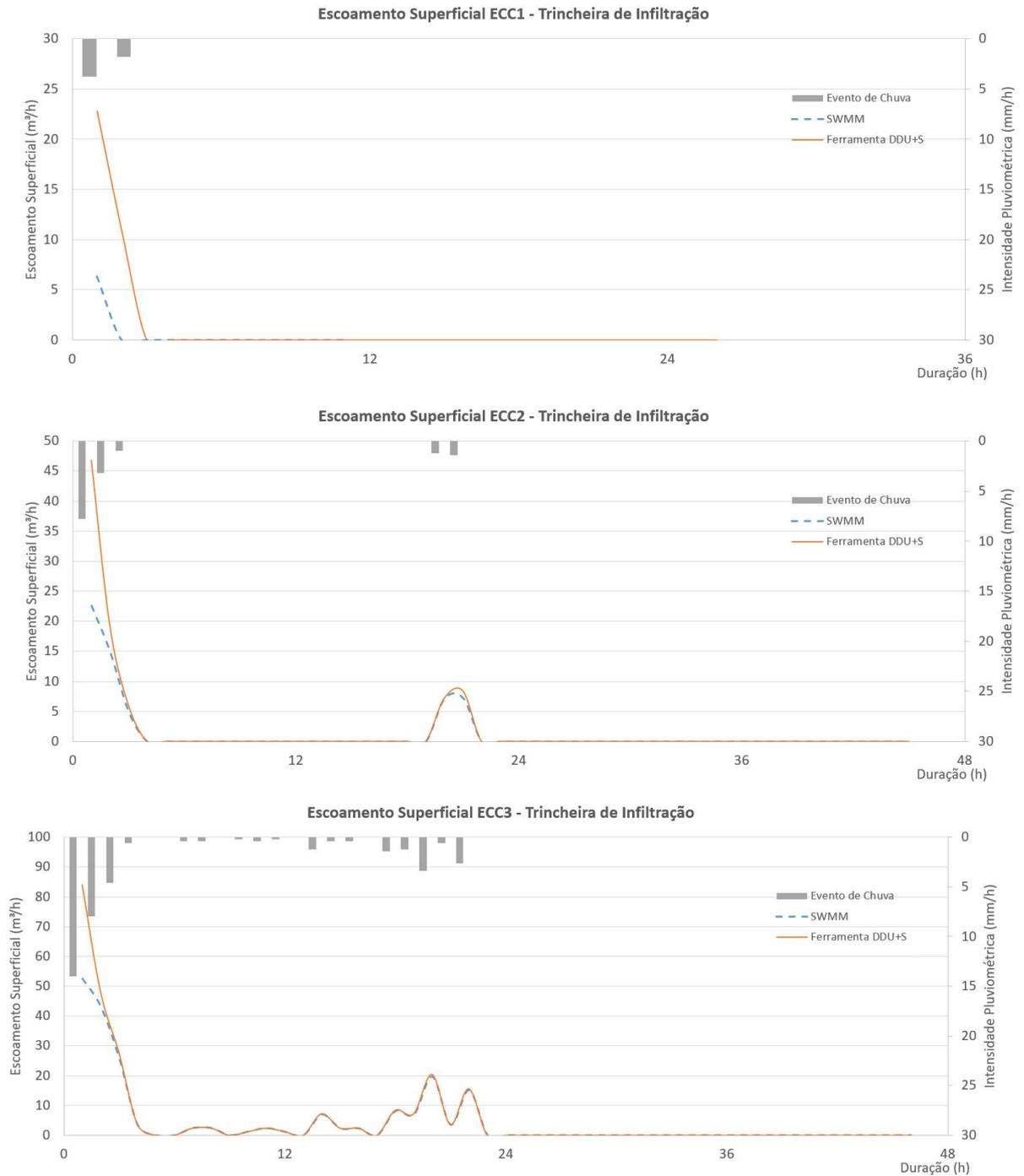
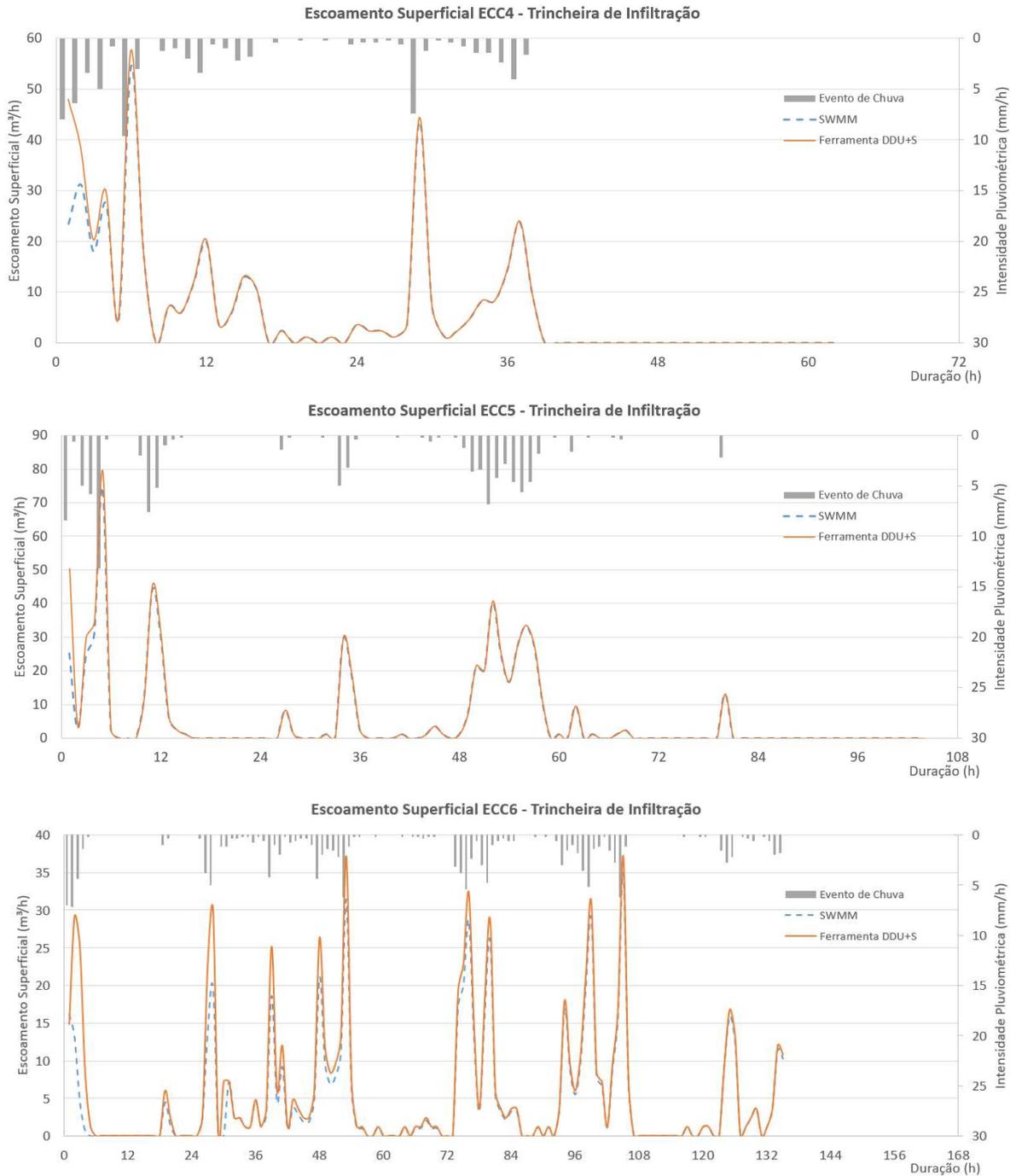


Figura B.8 – Escoamento superficial determinado pelo SWMM vs. Ferramenta DDU+S para a trincheira de infiltração (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

Observa-se que há uma pequena diferença na primeira hora do evento, com a Ferramenta DDU+S retornando um valor de escoamento superficial gerado na área maior que o modelo SWMM. Essa diferença pode ser atribuída principalmente a formulação e possível simplificação demasiada dos parâmetros de rugosidade e depressões da área necessárias ao SWMM. A partir da segunda hora as curvas se sobrepõem. A Figura B.9 ilustra os volumes

extravasados pela trincheira de infiltração para os 6 cenários de chuva, utilizando o modelo SWMM e a Ferramenta DDU+S.

Figura B.9 – Volume extravasado pela trincheira de infiltração utilizando o SWMM e a Ferramenta DDU+S (continua)

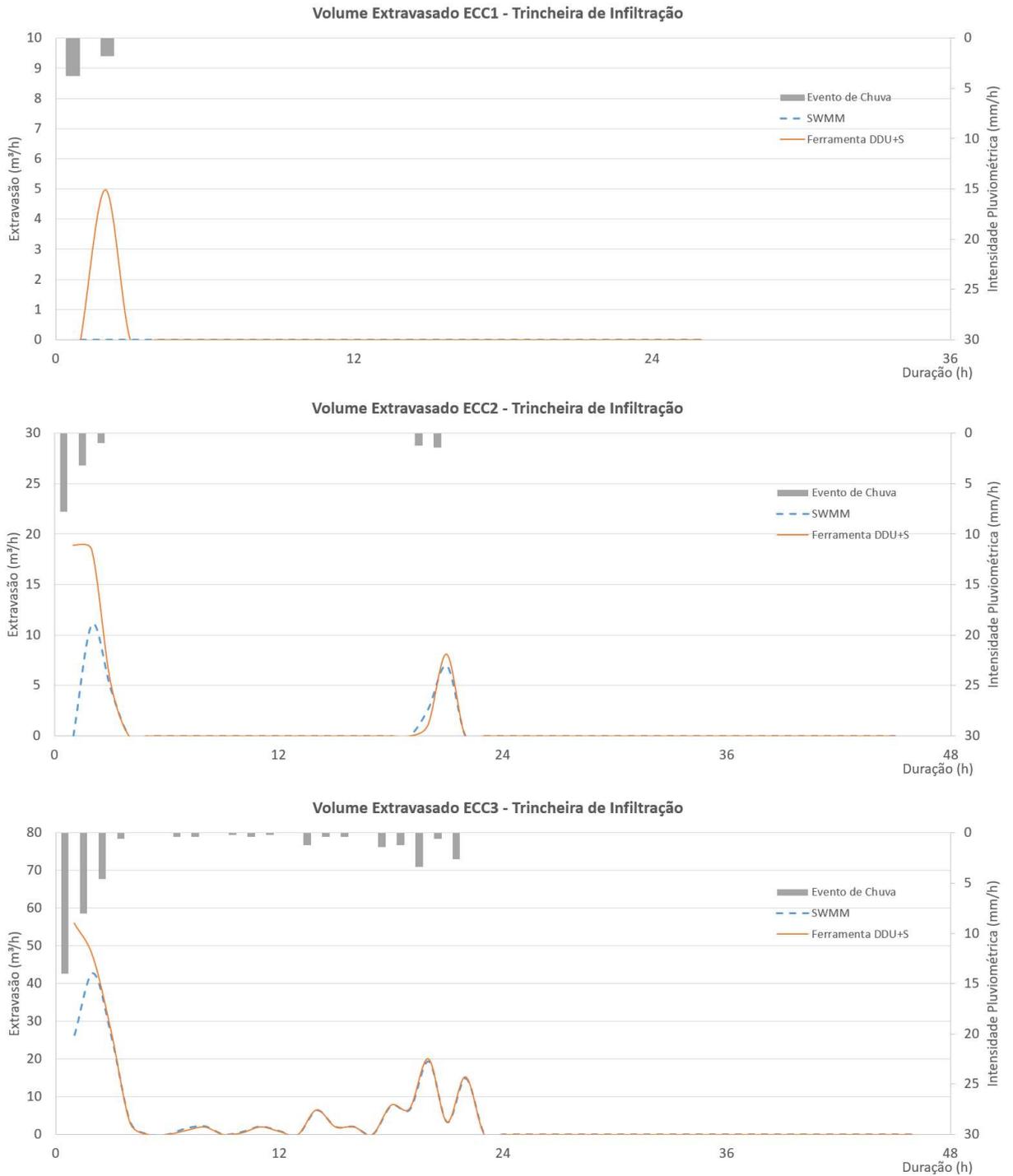
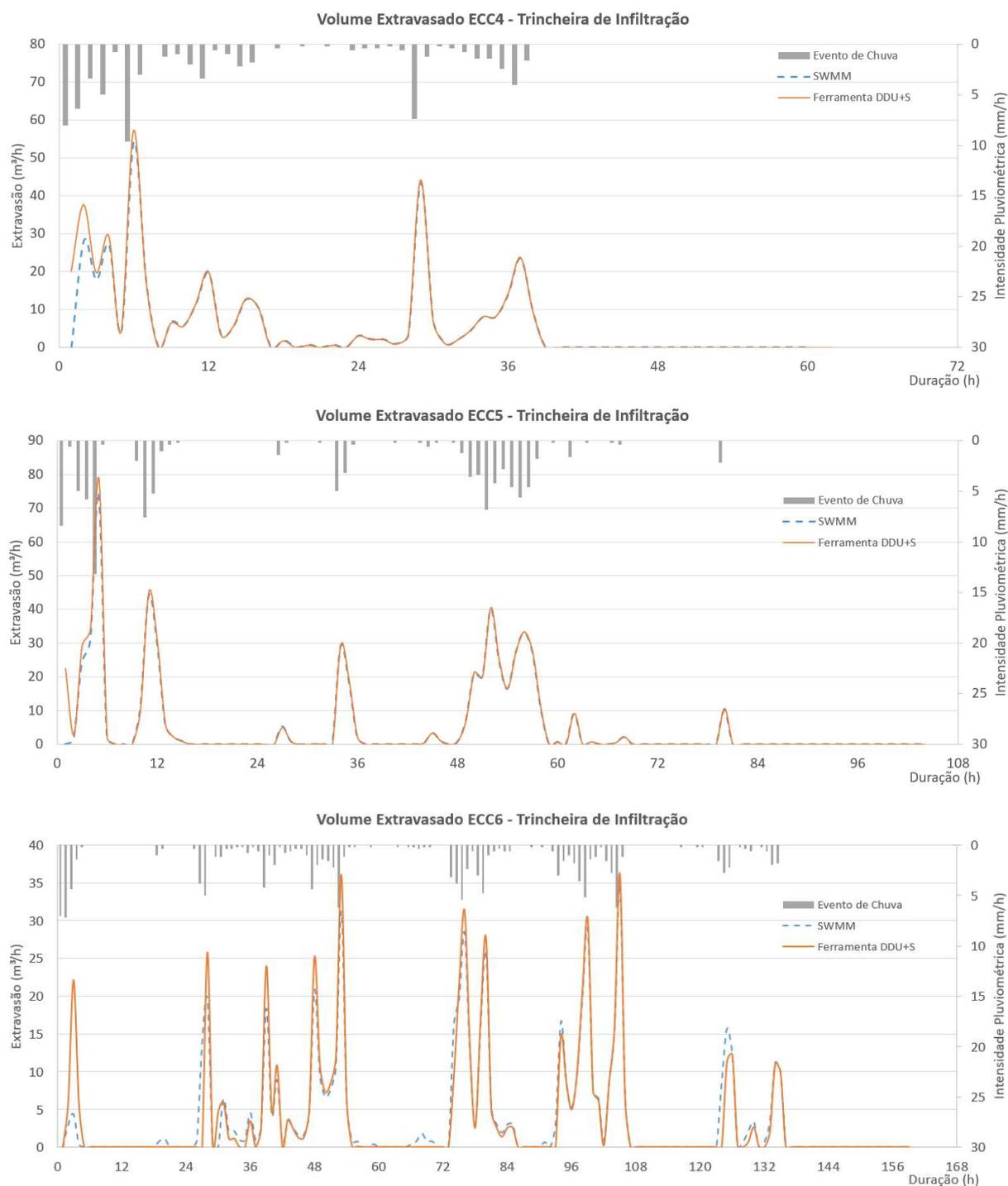


Figura B.9 – Volume extravasado pela trincheira de infiltração utilizando o SWMM e a Ferramenta DDU+S (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

Observando a evolução da extravasão da trincheira, que é a diferença entre a vazão admitida e a infiltração ocorrida ao longo do tempo, pode-se constatar novamente com exceção da primeira hora, que as curvas possuem características similares, porém a Ferramenta DDU+S não registrou pequenas extravasões que ocorreram próximo ao centro do evento, principalmente

por considerar um volume inicial de escoamento superficial menor do que o SWMM e taxas de infiltração maiores. A Figura B.10 ilustra a infiltração que ocorre na trincheira.

Figura B.10 – Volume infiltrado pela trincheira de infiltração utilizando o SWMM e a Ferramenta DDU+S (continua)

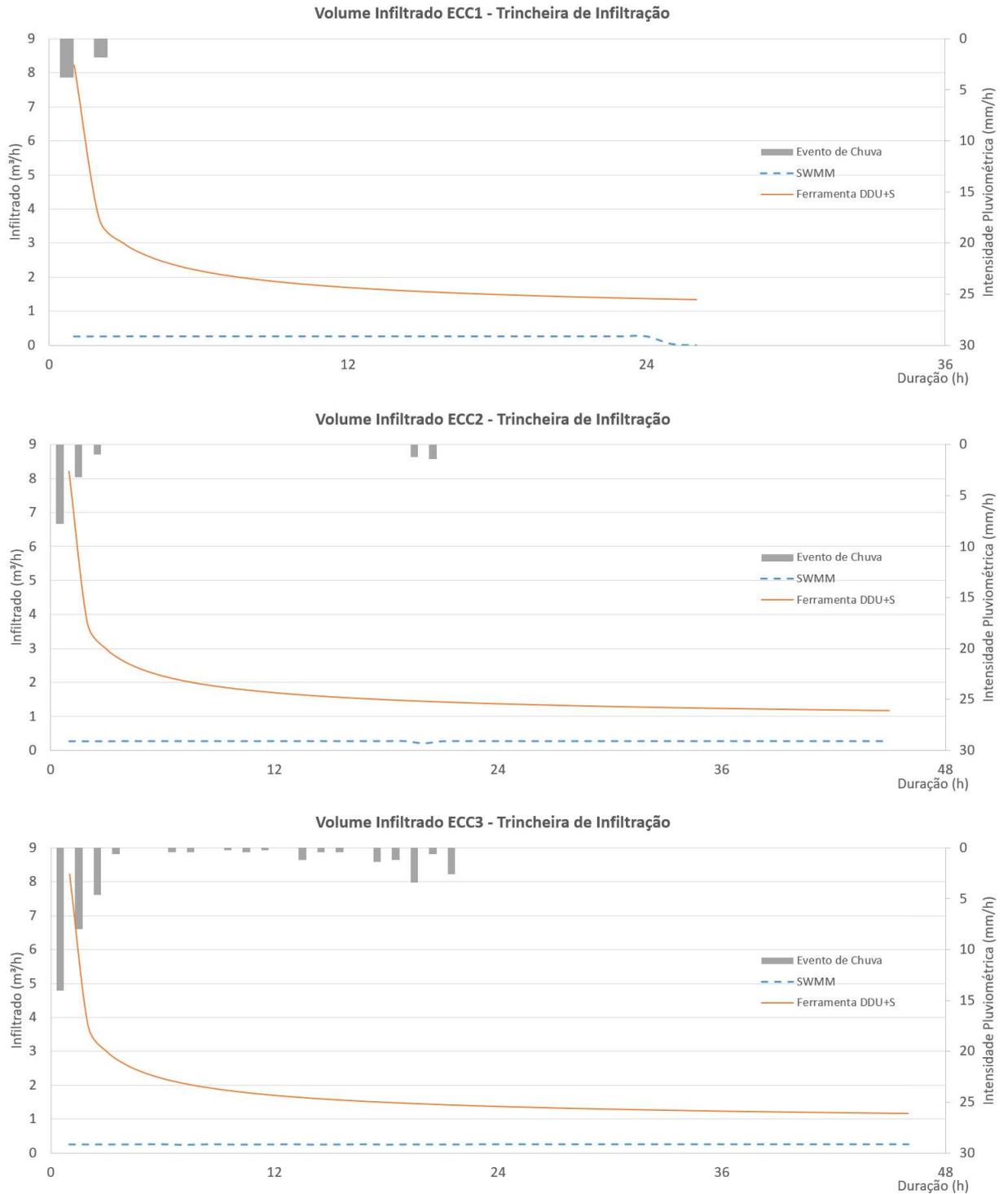
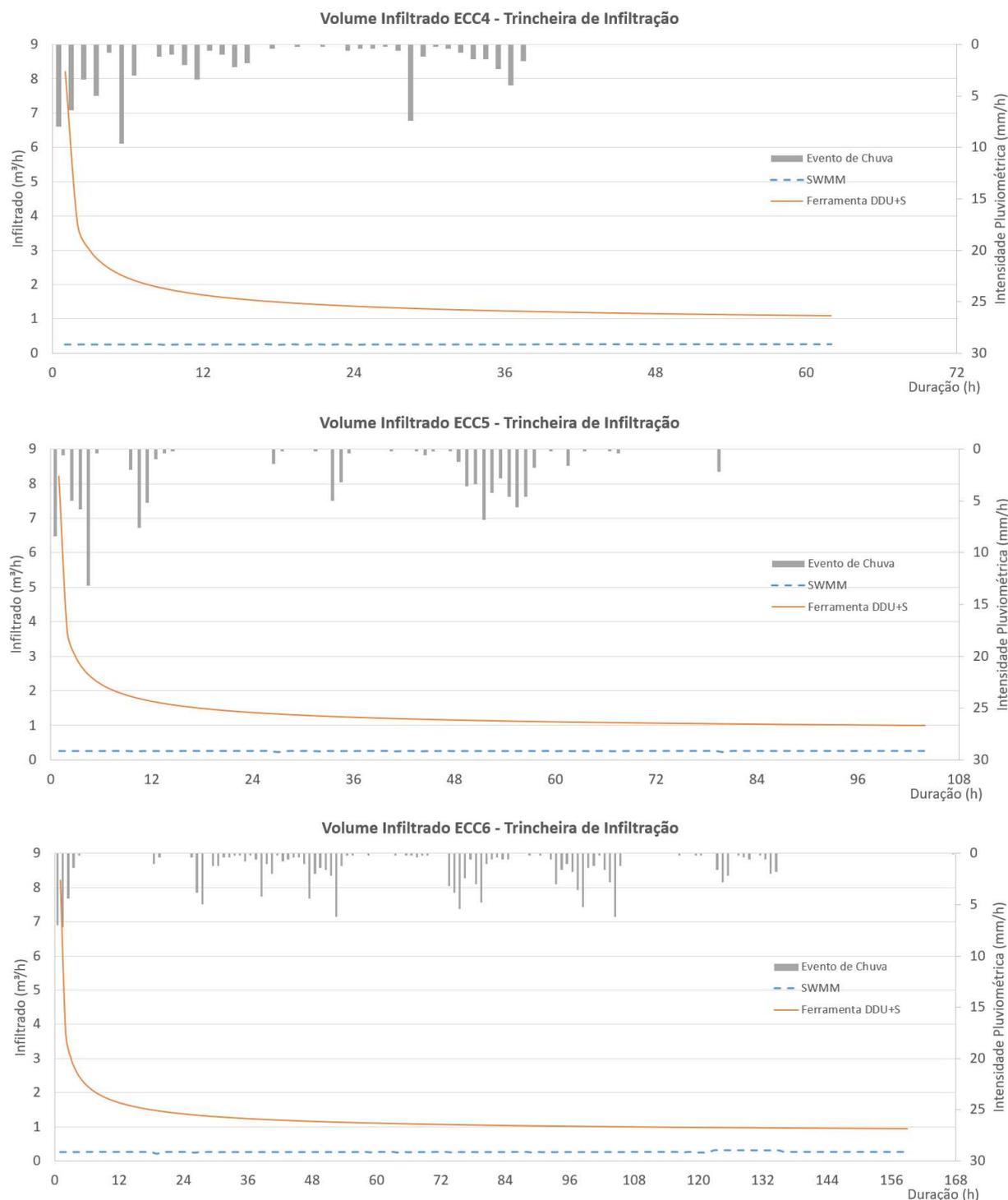


Figura B.10 – Volume infiltrado pela trincheira de infiltração utilizando o SWMM e a Ferramenta DDU+S (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

O SWMM é um modelo mais complexo que leva em consideração a capacidade do solo recuperar a capacidade de infiltração nos períodos de intensidade nula, enquanto o equacionamento mais simples da Ferramenta DDU+S ignora esta capacidade, no entanto, para

o a simulação de trincheiras de infiltração o modelo SWMM calculou infiltração demasiadamente pequena para o dispositivo, provavelmente por considerar apenas a área de fundo para ocorrência da infiltração, no entanto o SWMM parte de um alto valor de infiltração para valores menores depois da primeira hora em comparação a Ferramenta DDU+S. Por fim, A Figura B.11 ilustra os volumes armazenados no dispositivo nos cenários avaliados.

Figura B.11 – Volume armazenado pela trincheira de infiltração utilizando o SWMM e a Ferramenta DDU+S (continua)

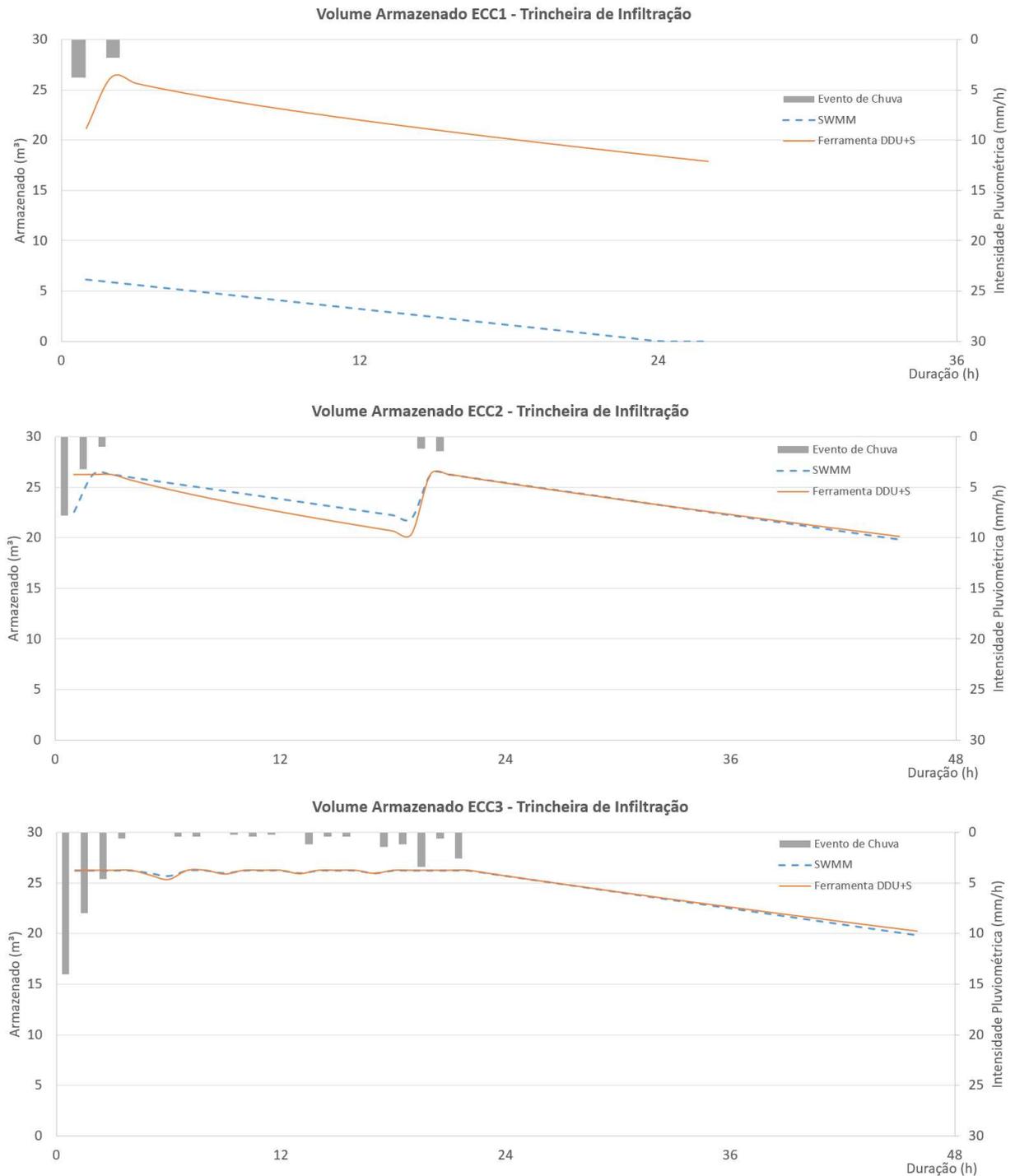
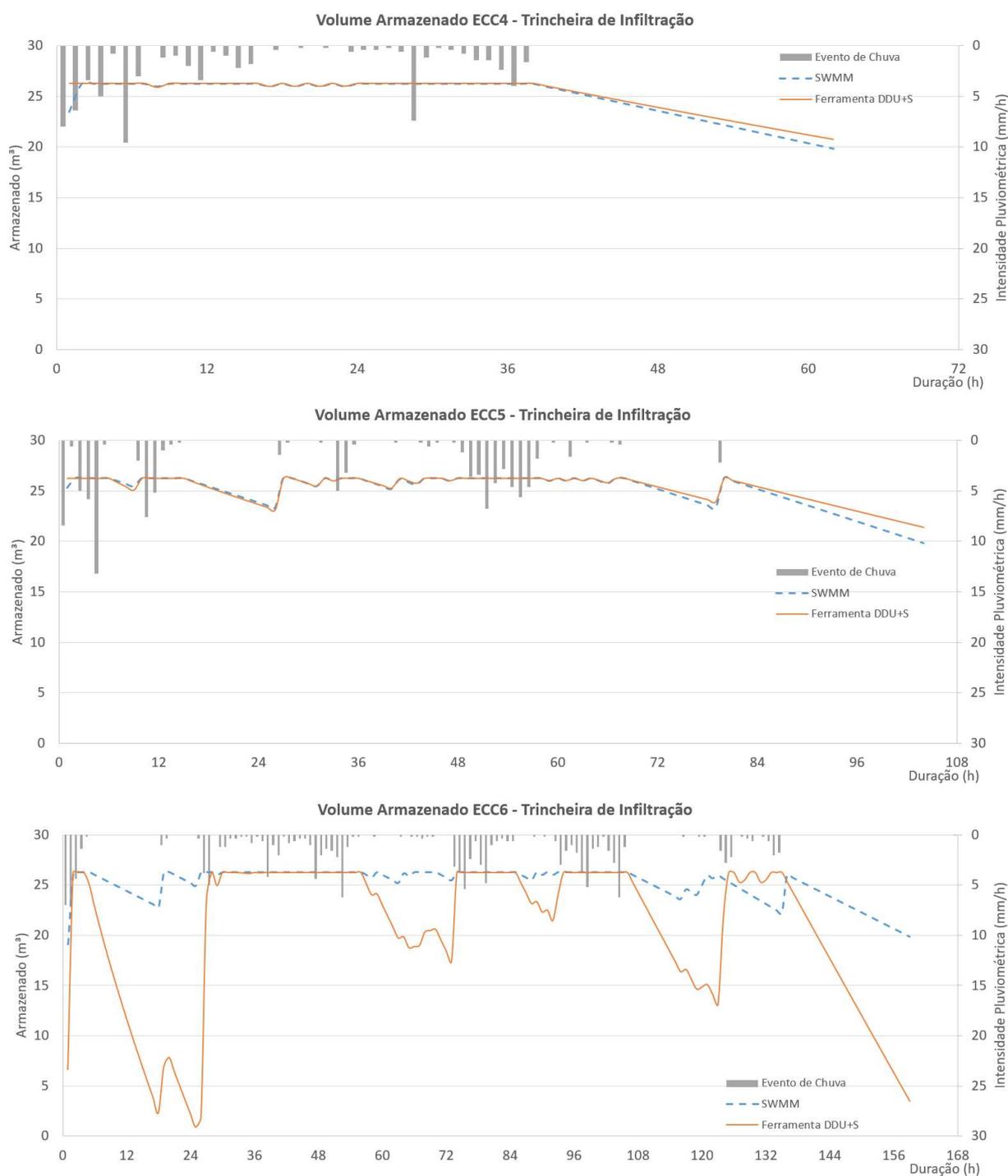


Figura B.11 – Volume armazenado pela trincheira de infiltração utilizando o SWMM e a Ferramenta DDU+S (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

Como a simulação está programada para simulação até 24 horas após o fim do período chuvoso, é possível a ocorrência de volume armazenado após este ciclo. Neste caso, o SWMM registrou um volume armazenado após o fim do período de simulação maior do que a

Ferramenta DDU+S. A indicação de água armazenada após 24h de tempo seco indica a possibilidade de proliferação de vetores de doenças.

B.4 Poço de Infiltração

O escoamento superficial ilustrado na Figura B.12, mostra que na primeira hora do evento existe uma pequena diferença entre os modelos que pode ser atribuída às formulações matemáticas distintas. Após a primeira hora as curvas são coincidentes, porém o volume maior calculado pelo SWMM neste instante irá refletir no comportamento do poço em todo o evento, já que o volume total de armazenamento é pequeno em relação a outros dispositivos.

Figura B.12 – Escoamento Superficial gerado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para o poço de infiltração (continua)

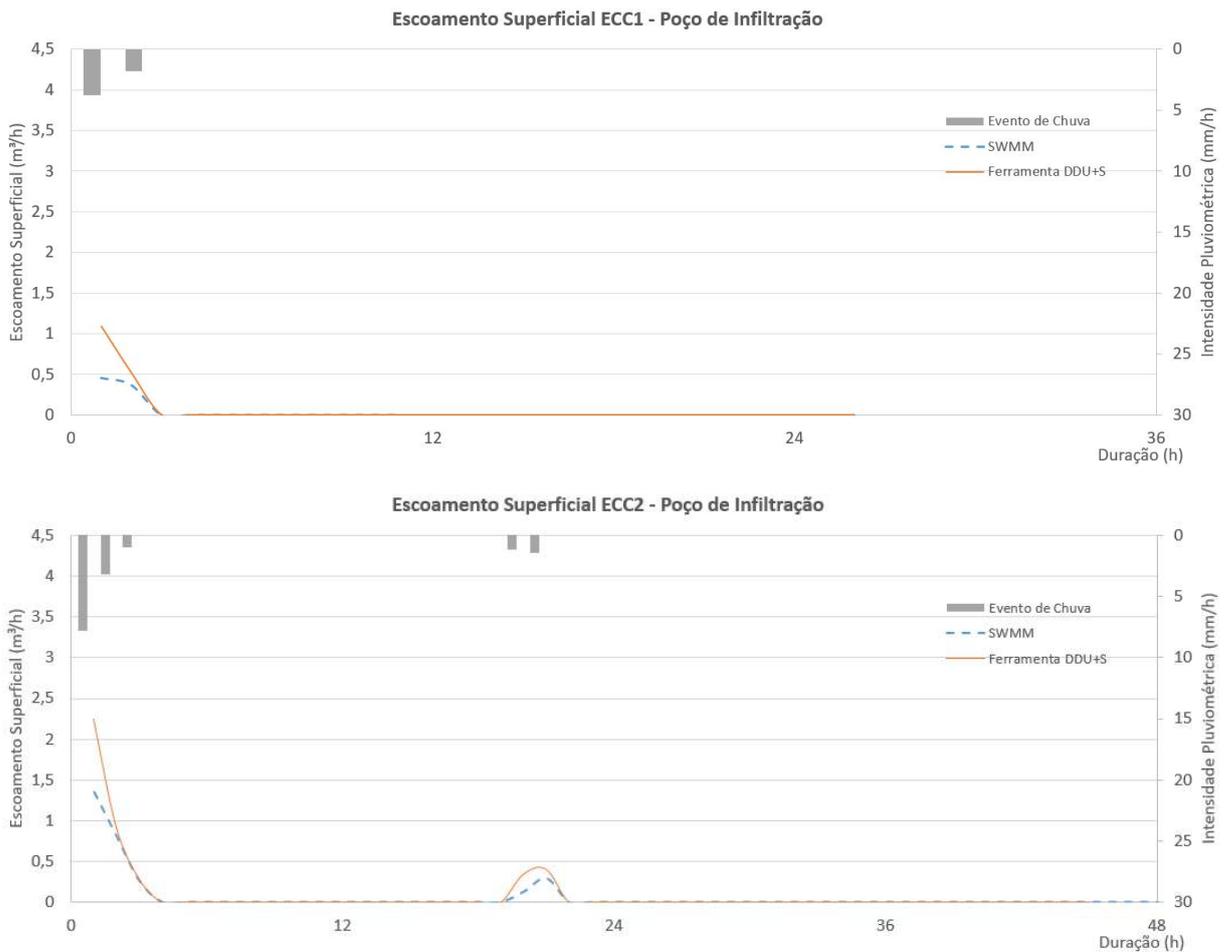


Figura B.12 – Escoamento Superficial gerado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para o poço de infiltração (continua)

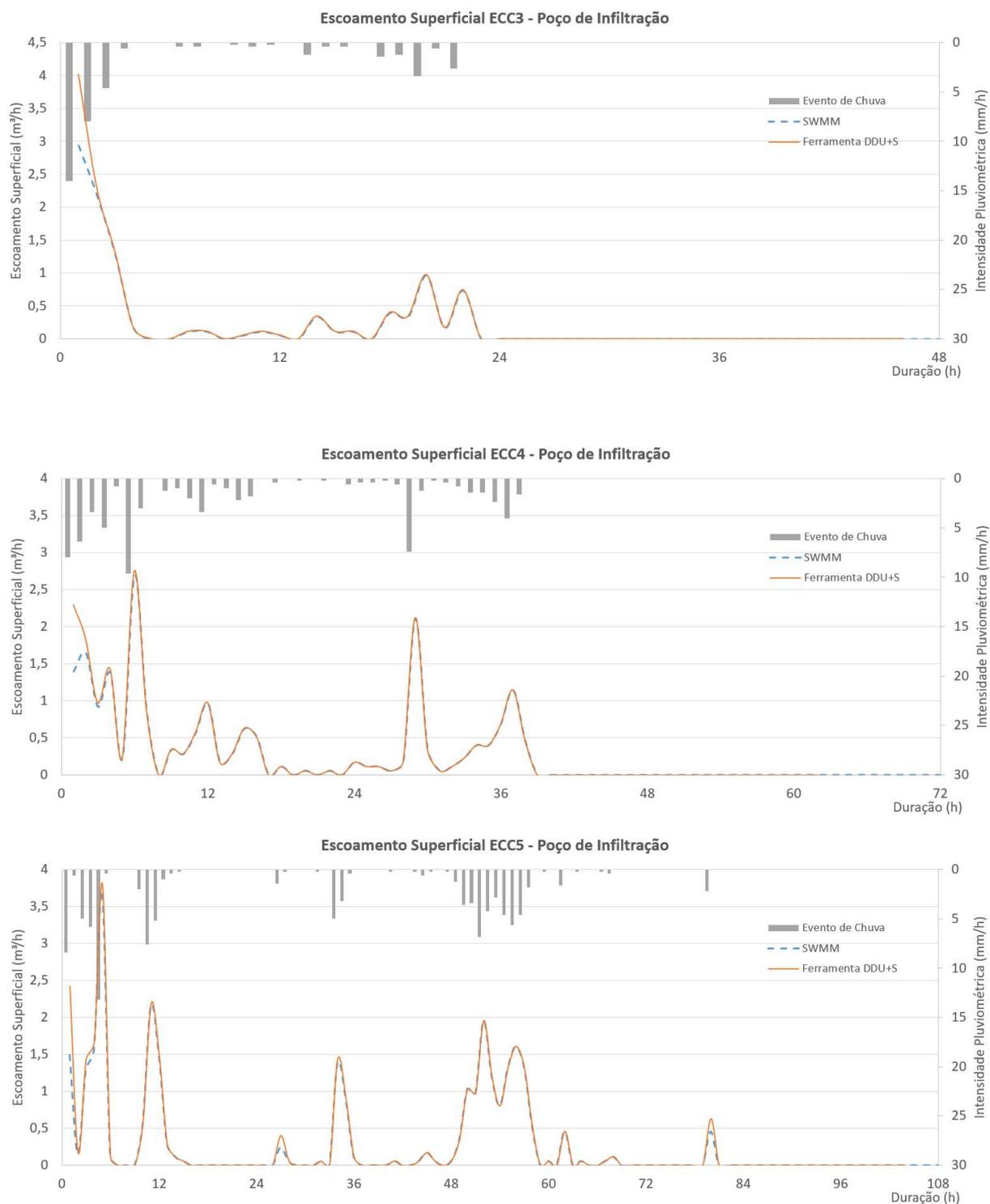
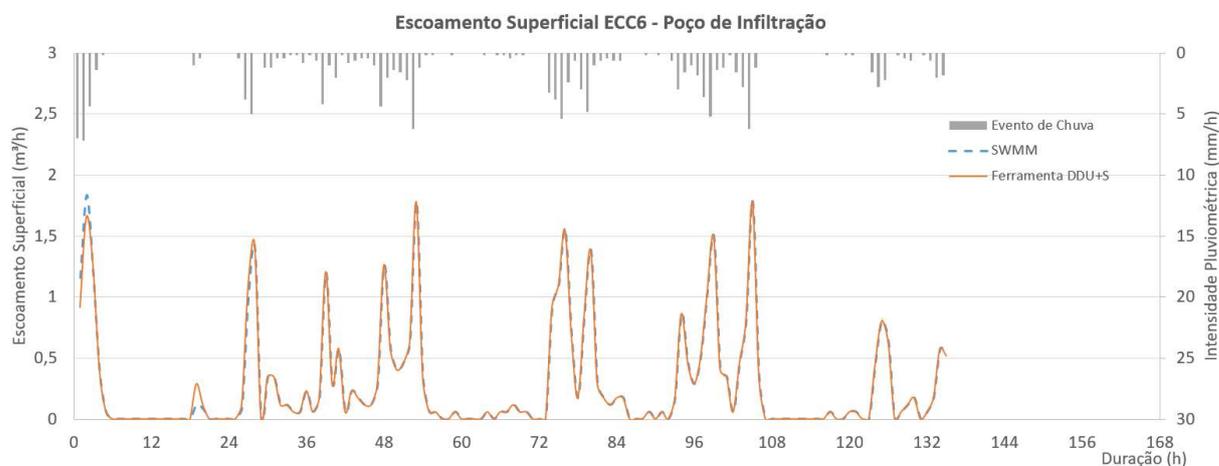


Figura B.12 – Escoamento Superficial gerado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para o poço de infiltração (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

A Figura B.13 ilustra o volume armazenado ao longo do tempo para os dois modelos. Por ser dispositivo de baixo volume útil, a partir do ECC3 é possível ver que o mesmo é rapidamente enchido com a água da chuva.

Figura B.13 – Volume armazenado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para ao Poço de Infiltração (continua)

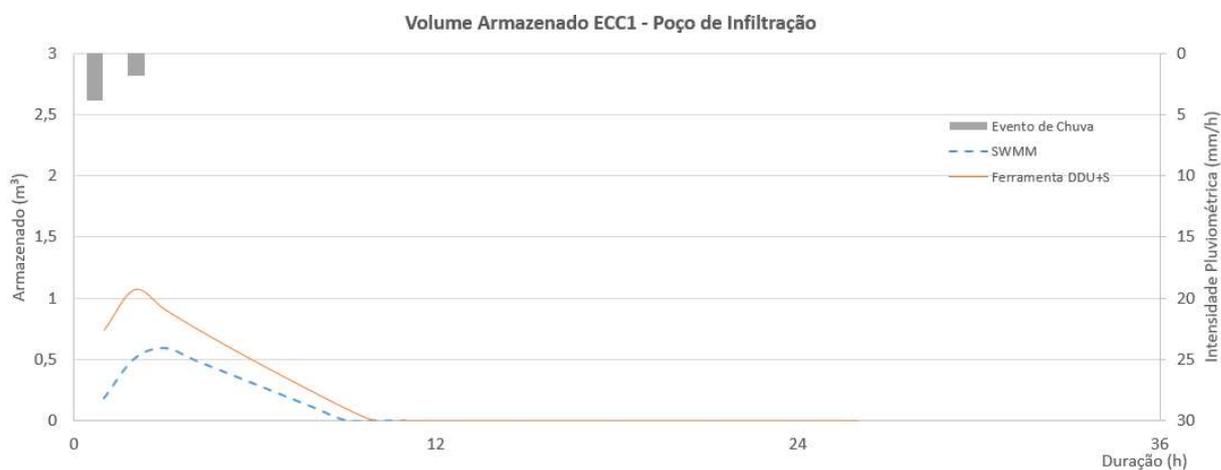


Figura B.13 –Volume armazenado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para ao Poço de Infiltração (continua)

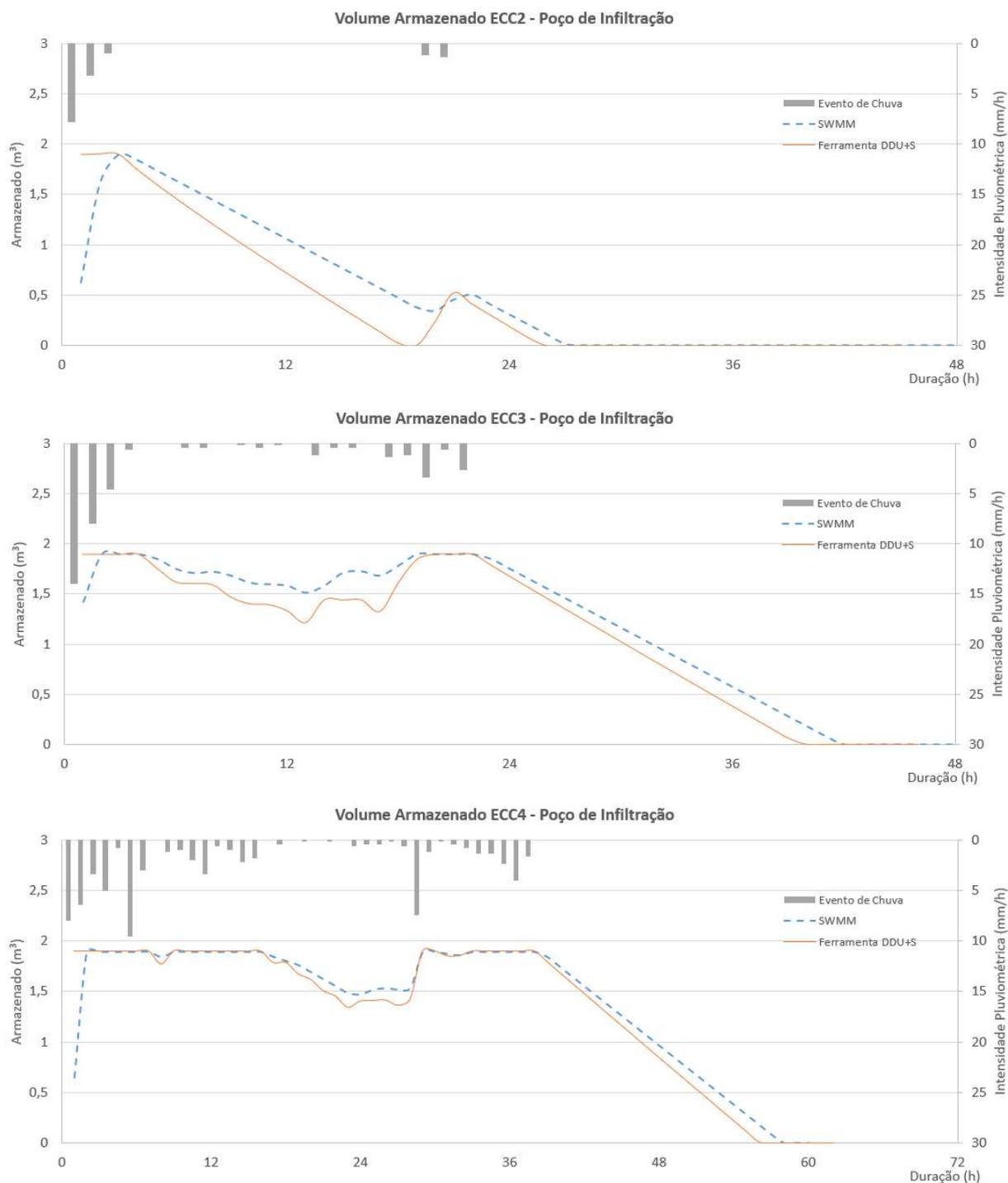
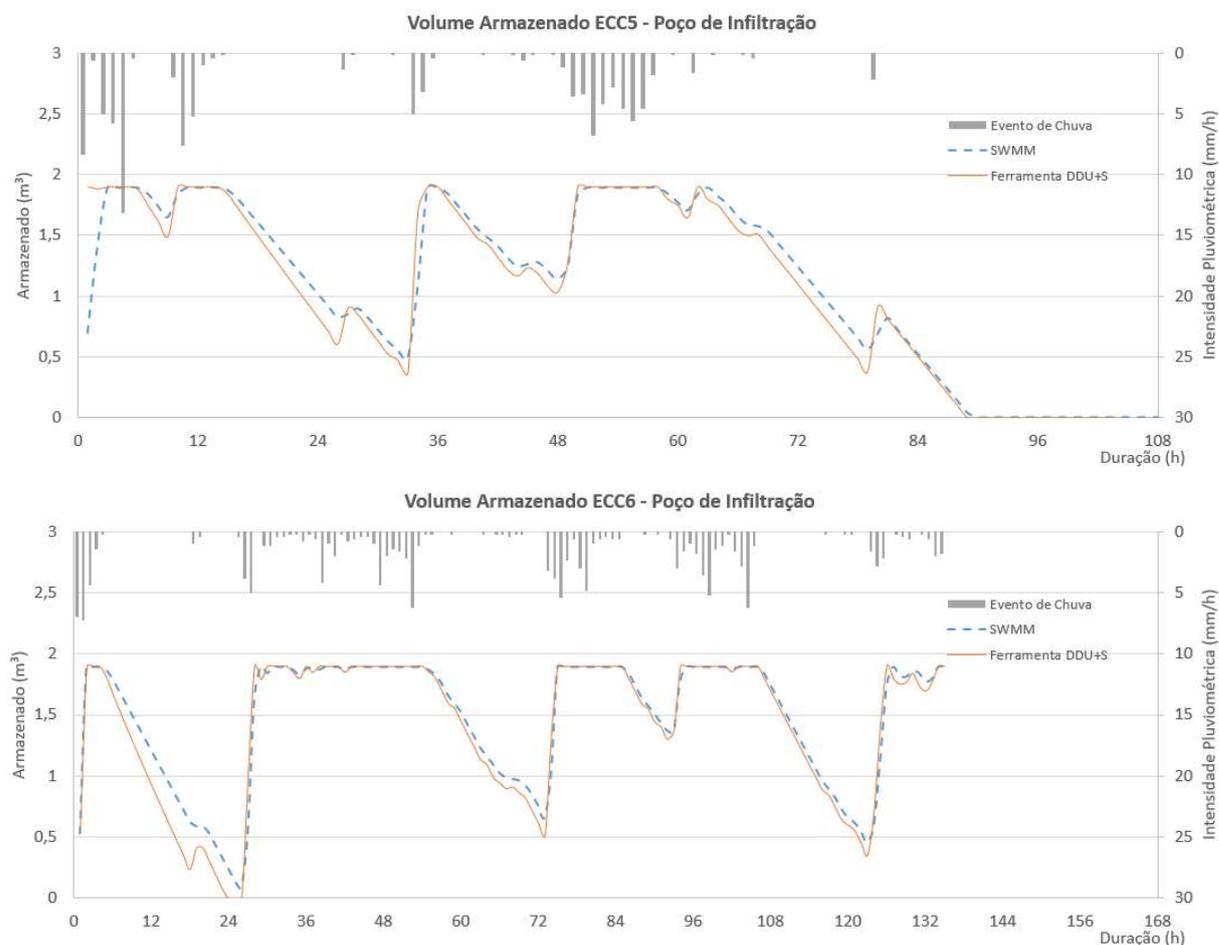


Figura B.13 –Volume armazenado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para ao Poço de Infiltração (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

O poço simulado só possui saída da água retida através da infiltração. O SWMM determina taxas de infiltração ligeiramente superiores à Ferramenta DDU+S o que reflete em pequena melhoria na capacidade de armazenamento e redução dos volumes extravasados. A Figura B.14 ilustra os extravasamentos ocorridos no poço de infiltração quando submetido aos seis eventos de chuva característicos. No ECC2 foi determinado extravasamento muito superior através da Ferramenta DDU+S que está diretamente ligada ao maior volume de escoamento superficial calculada na primeira hora do evento.

Figura B.14 –Volume extravasado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para ao Poço de Infiltração (continua)

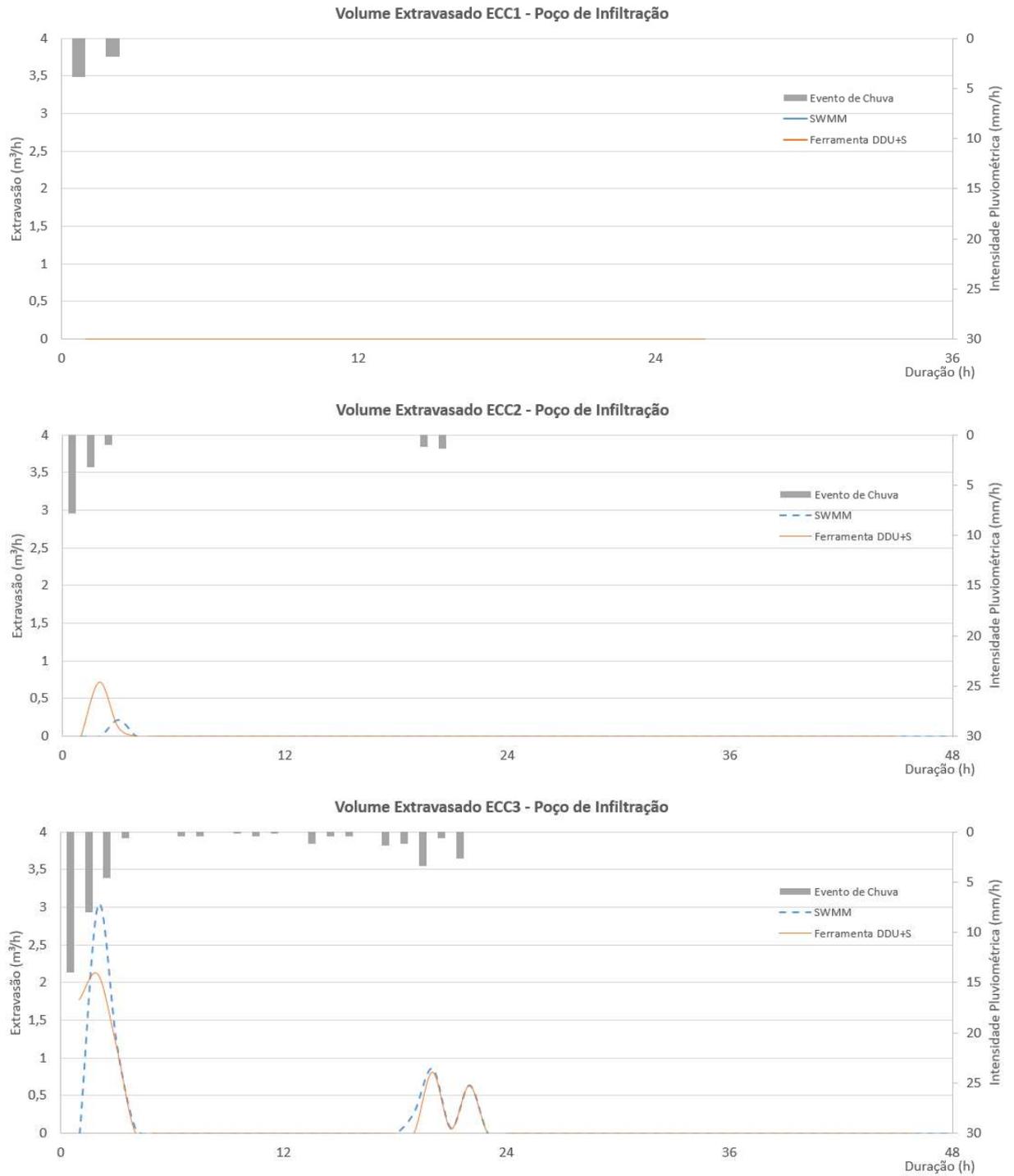
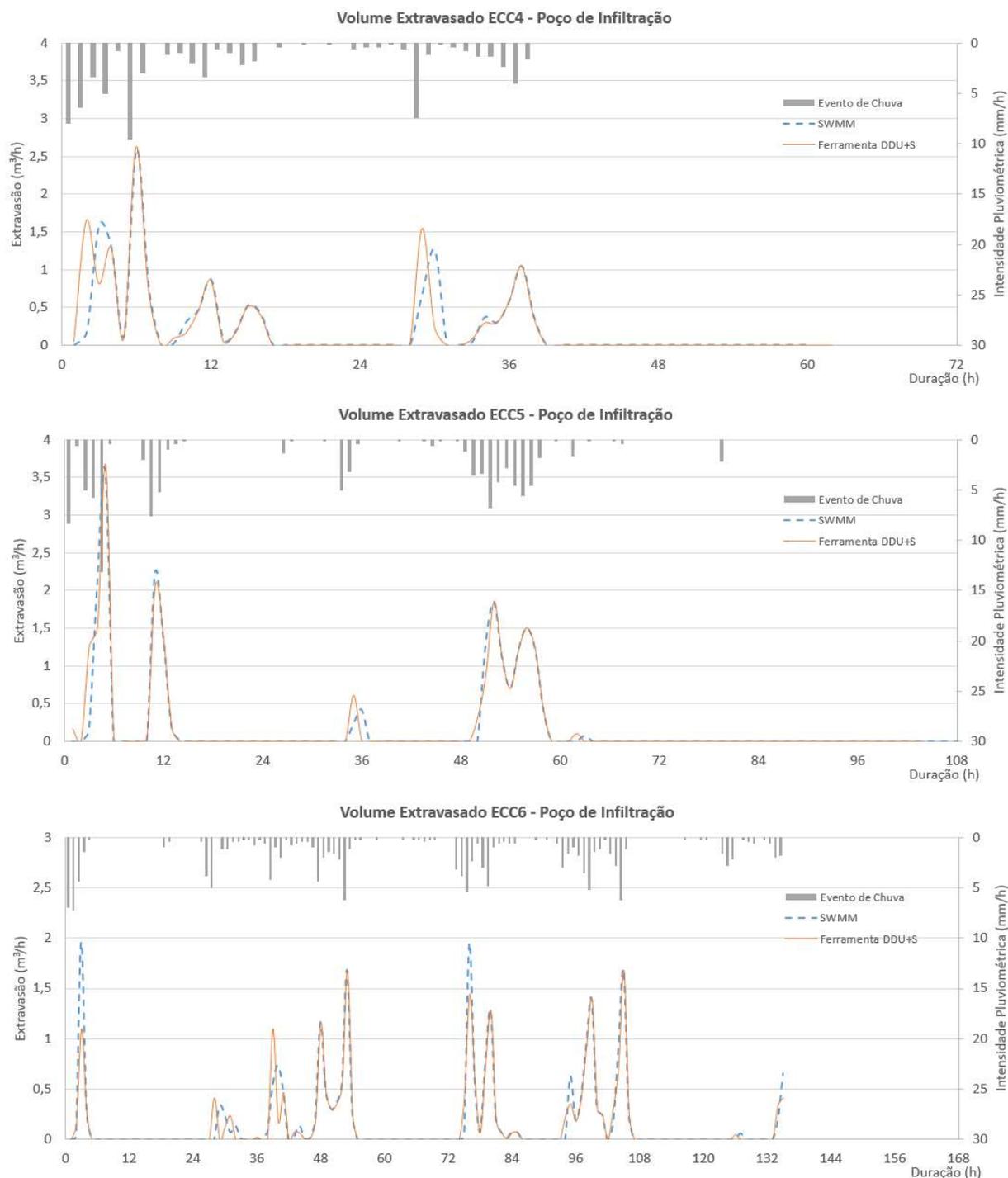


Figura B.14 –Volume extravasado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para ao Poço de Infiltração (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

De forma geral, o SWMM e a Ferramenta DDU+S geraram resultados similares com exceção da primeira hora, onde a Ferramenta DDU+S gerou um volume maior de escoamento superficial. Assim como ocorreu na simulação da TI, os programas tiveram boa aderência,

porém neste caso o baixo volume do poço de infiltração tem grande influência para uma maior similaridade entre os programas.

B.5 Reservatório de Água de Chuva

Os volumes de armazenamento calculado para o reservatório de chuva para o caso em estudo, mostra pequenas diferenças entre o SWMM e a Ferramenta DDU+S que novamente é explicada pela discrepância no cálculo da primeira hora de escoamento superficial entre os modelos. A Figura B.15 ilustra os volumes calculados.

Figura B.15 –Volume armazenado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para o Reservatório de Chuva (continua)

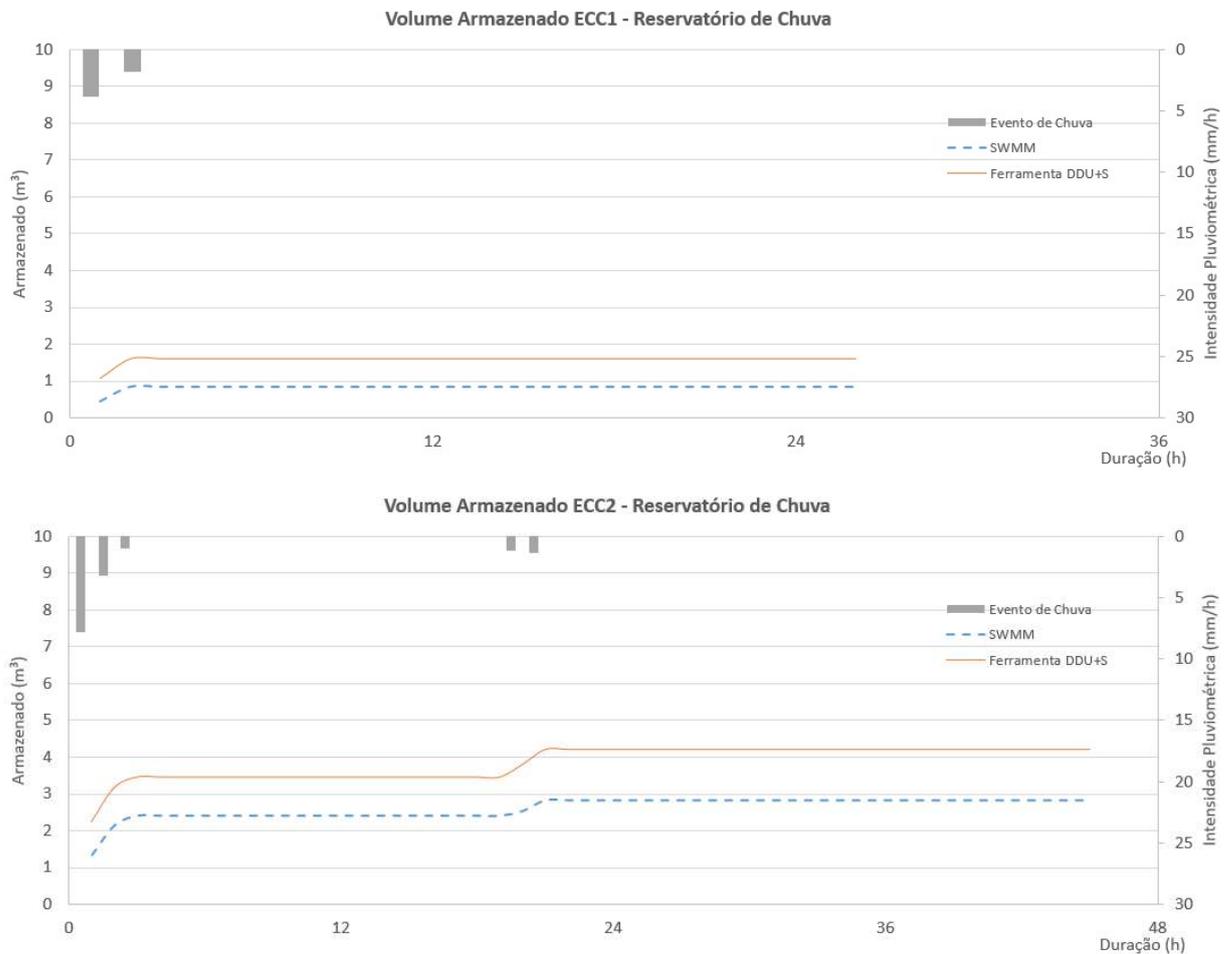


Figura B.15 –Volume armazenado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para o Reservatório de Chuva (continua)

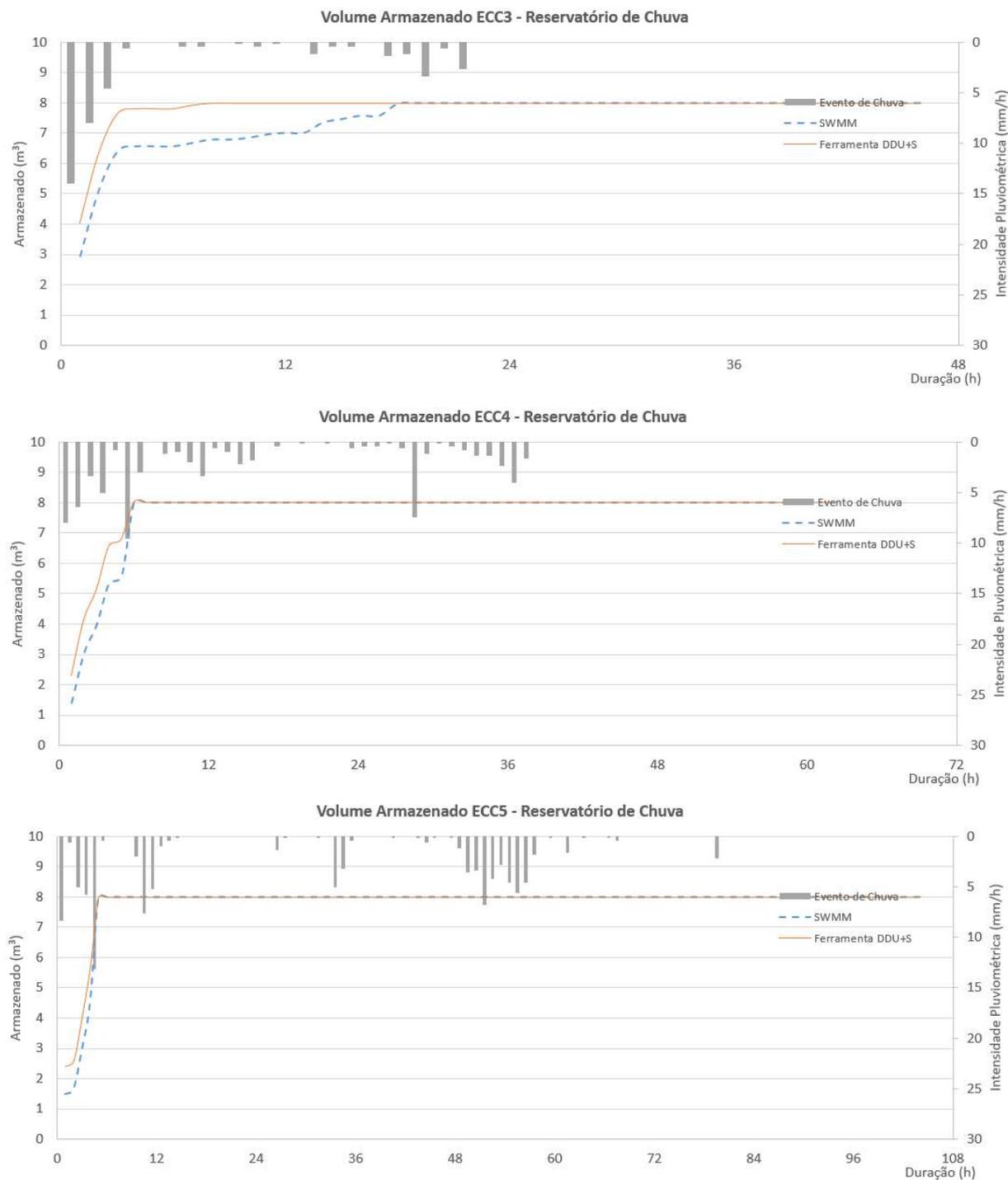
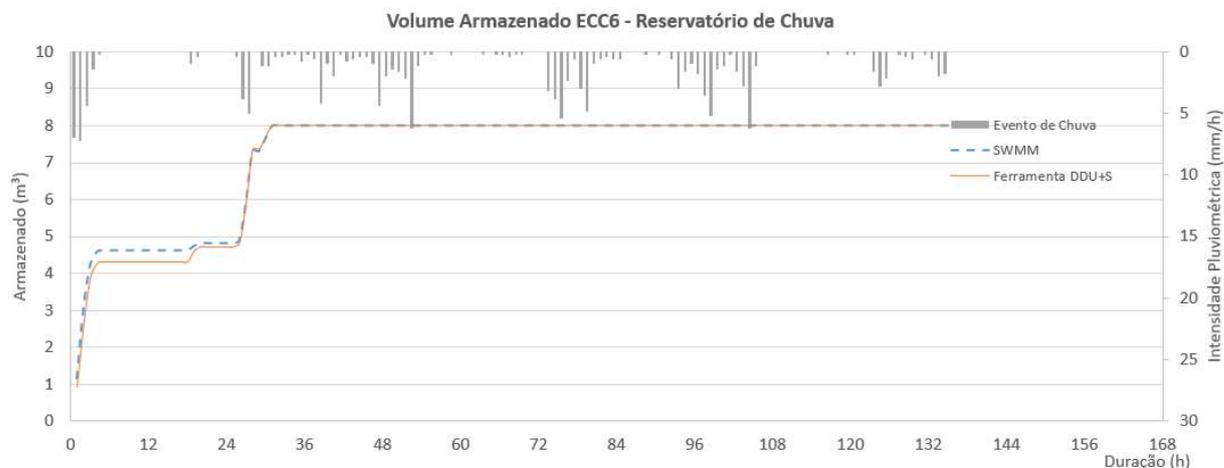


Figura B.15 –Volume armazenado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para o Reservatório de Chuva (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

A Figura B.16 permite visualizar os volumes extravasados pelo RC na simulação realizada neste trabalho. O escoamento superficial total da área é o mesmo determinado para o poço de infiltração, já ilustrado na Figura B.16. Assim como nos casos anteriores, os resultados do SWMM foram compatibilizados ao longo do tempo para comparação direta aos resultados da Ferramenta DDU+S.

Figura B.16 –Volume extravasado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para o Reservatório de Chuva (continua)

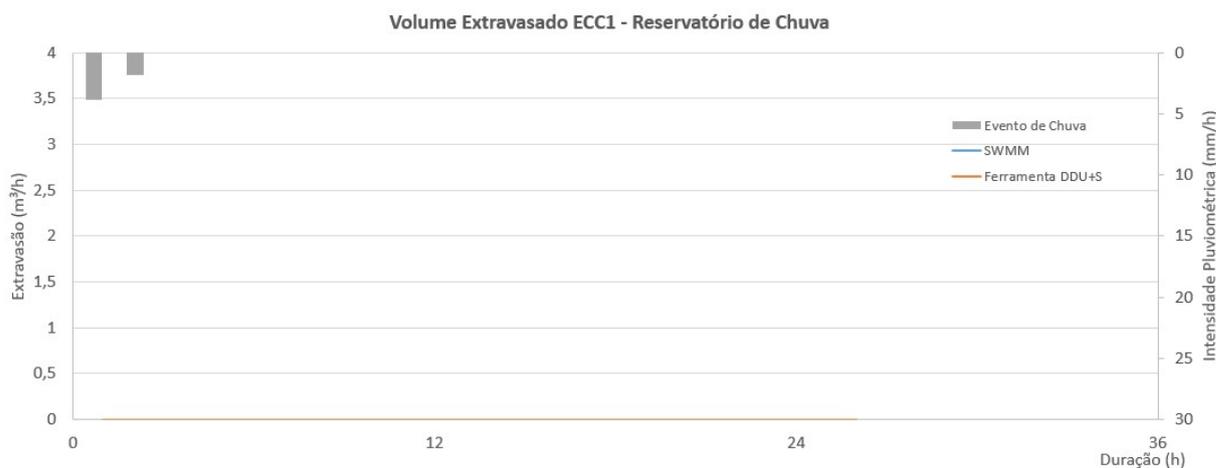


Figura B.16 –Volume extravasado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para o Reservatório de Chuva (continua)

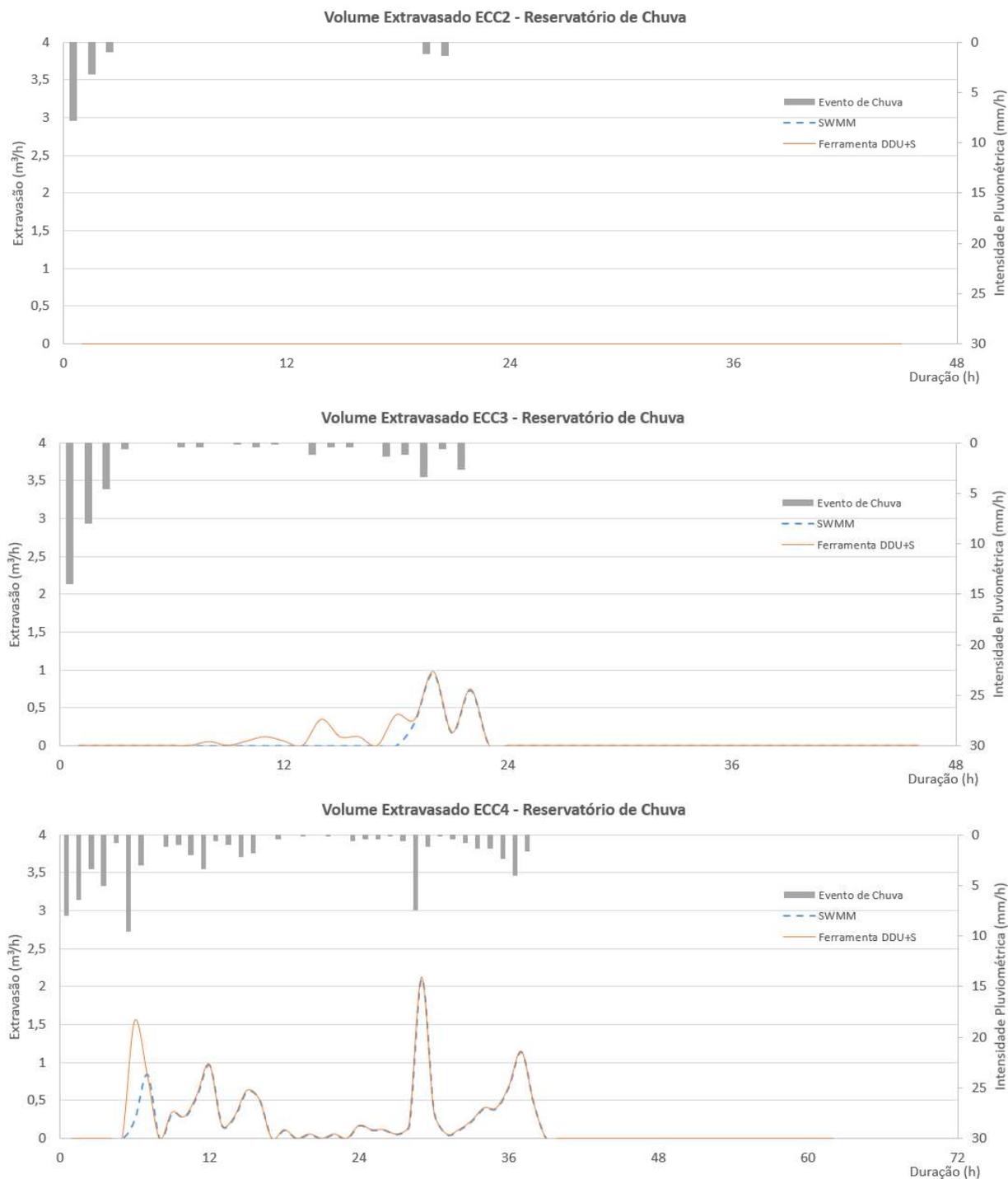
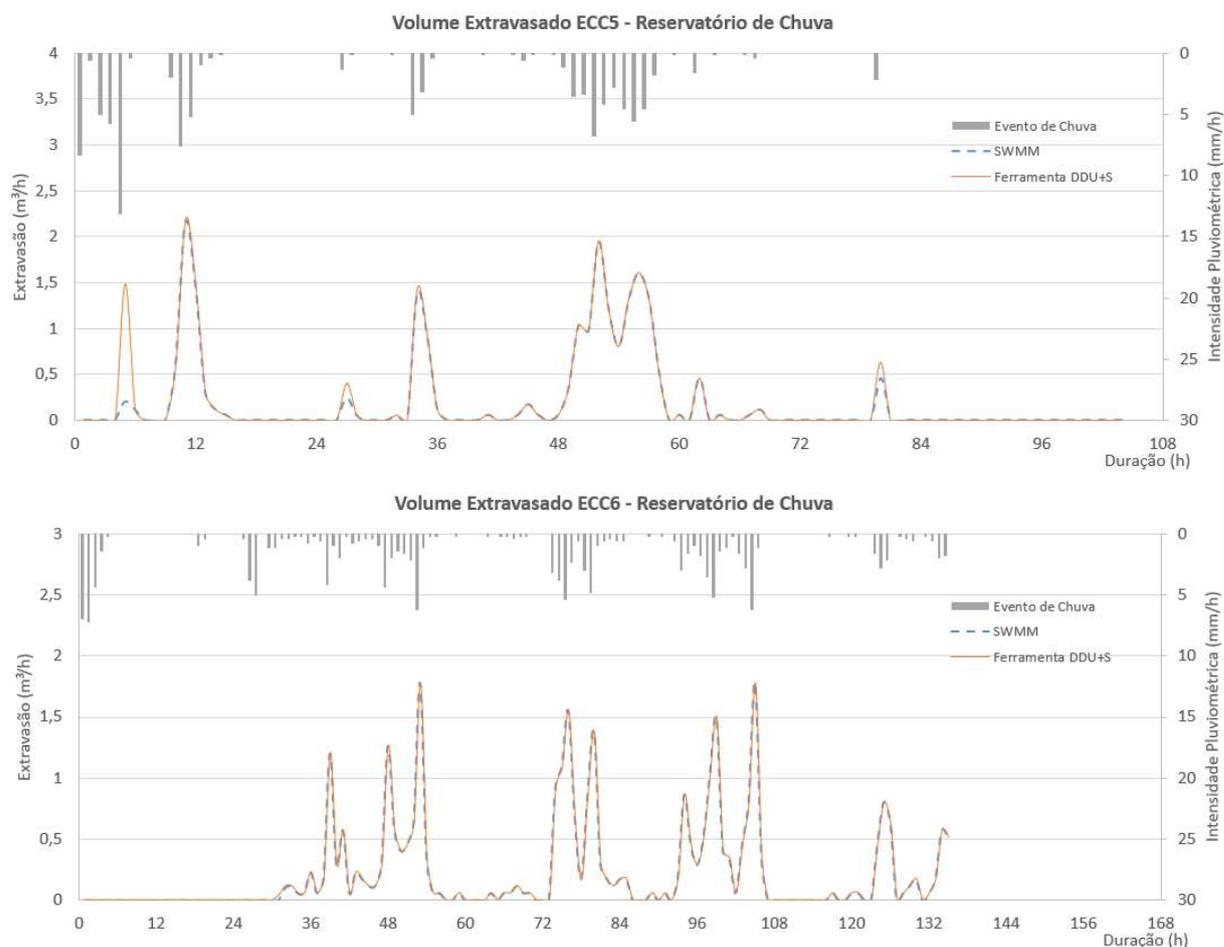


Figura B.16 –Volume extravasado calculado pela Ferramenta DDU+S e SWMM para o Reservatório de Chuva (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

Analisando a extravasão do dispositivo calculada pelos dois modelos, verifica-se que as curvas são muito próximas. Há pequena diferença é devida ao volume de escoamento da primeira hora distinto entre os dois programas, conforme já observado anteriormente.

Neste caso em estudo também houve grande aderência entre os modelos para dispositivos de médio volume de armazenamento onde não ocorre infiltração e evapotranspiração.

APÊNDICE C

Testes estatísticos PBIAS, RSR E NSE

A Figura C.1 ilustra os gráficos dos testes estatísticos para cada um dos dispositivos simulados. O dispositivo que apresentou a maior discrepância foi a TI, com resultados em sua maioria classificados como apenas satisfatórios ou insatisfatórios. Já as simulações do poço de infiltração e do reservatório apresentaram desempenho satisfatório ou bom. A VI foi o dispositivo que apresentou maior diferença de avaliação de desempenho entre os três critérios estatísticos. Por fim, para a SI não foi possível determinar o valor dos testes RSR e NES para a evapotranspiração, no entanto a avaliação geral para este dispositivo é superior a satisfatório para a maioria dos casos.

Figura C.1 - Testes estatísticos aplicados à Ferramenta DDU+S em cada um dos dispositivos simulados considerando os componentes do balanço hídrico (continua)

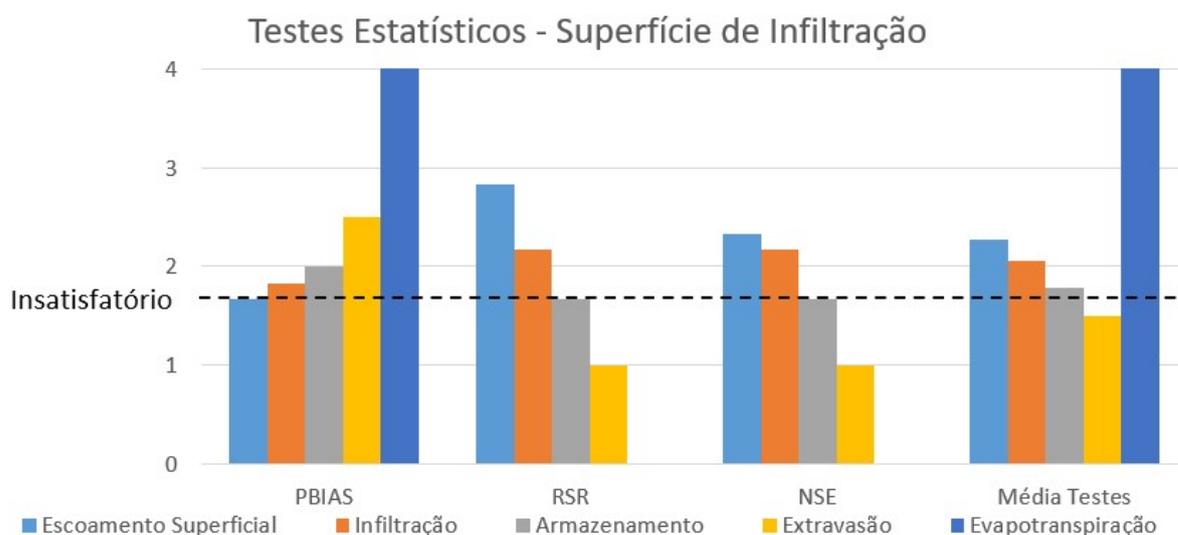


Figura C.1 - Testes estatísticos aplicados à Ferramenta DDU+S em cada um dos dispositivos simulados considerando os componentes do balanço hídrico (continua)

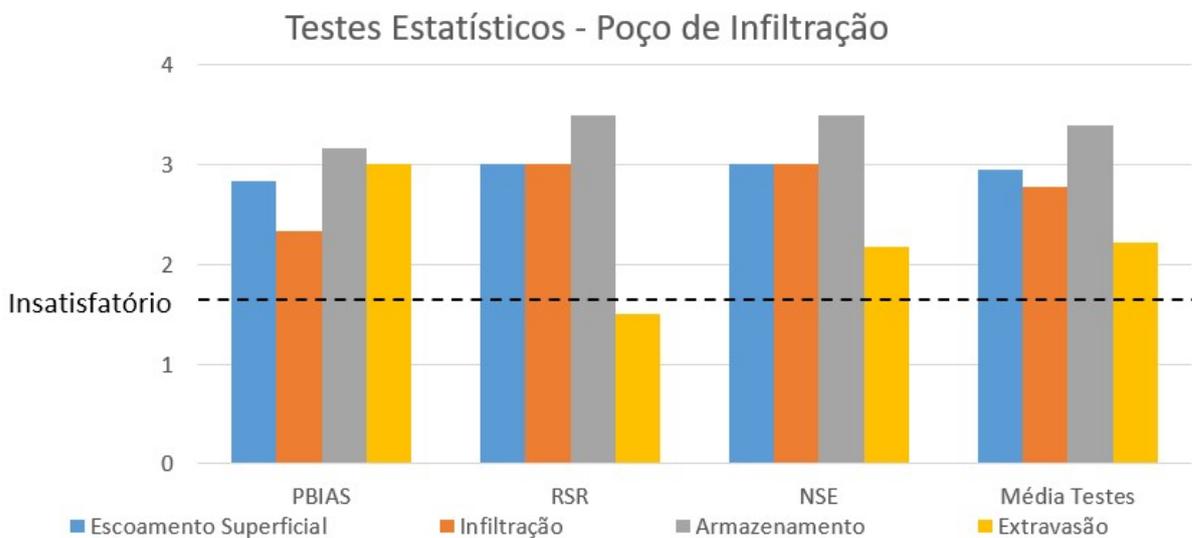
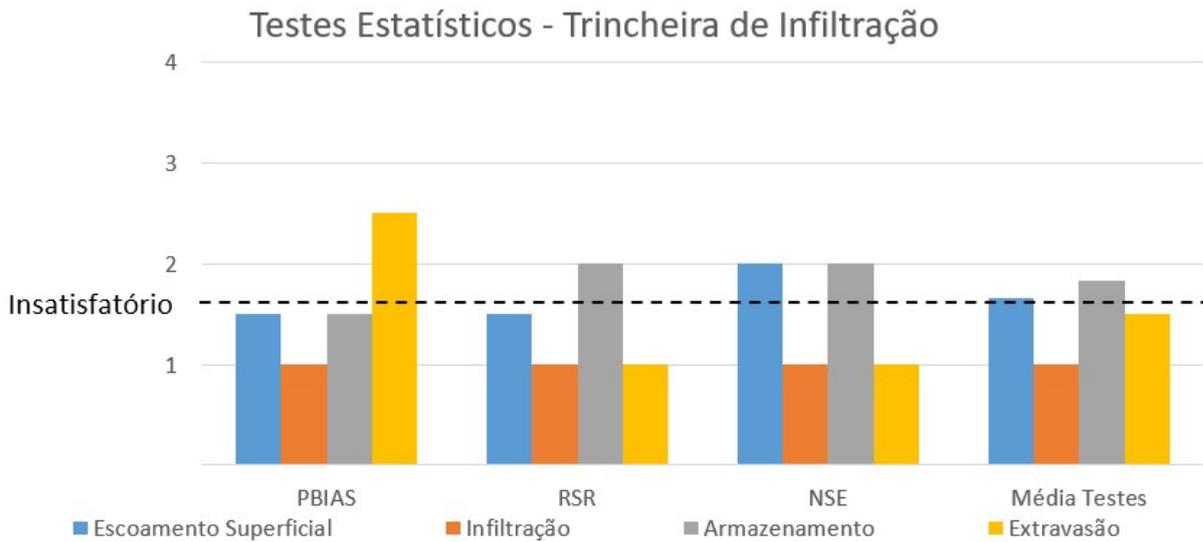
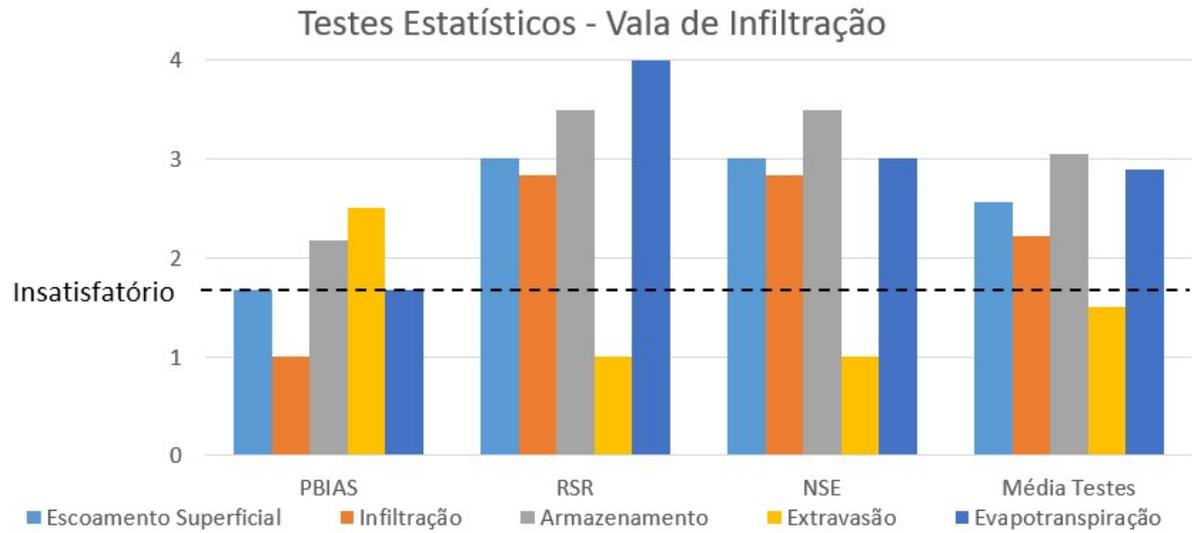
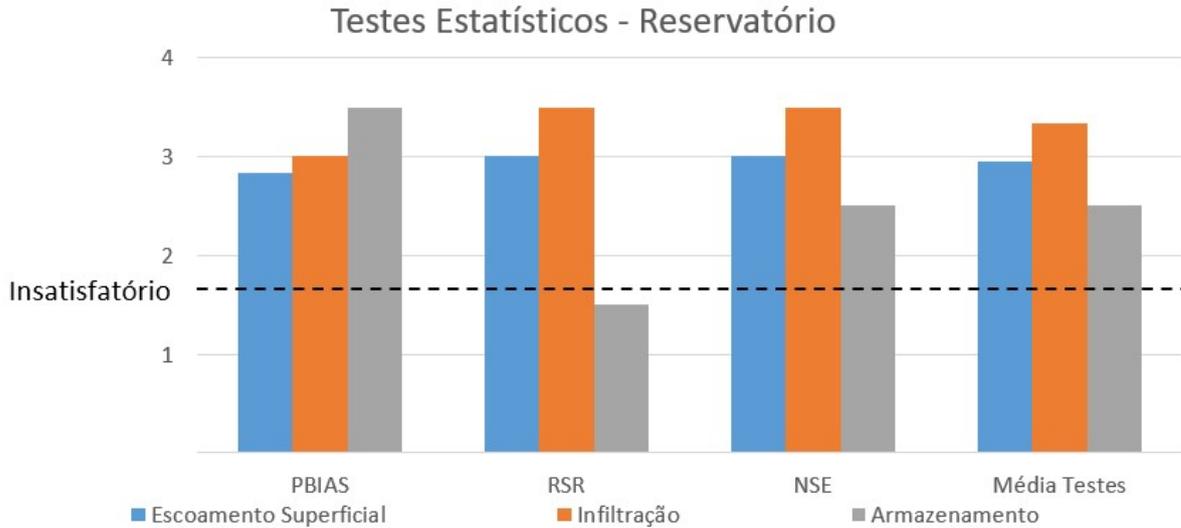


Figura C.1 - Testes estatísticos aplicados à Ferramenta DDU+S em cada um dos dispositivos simulados considerando os componentes do balanço hídrico (conclusão)



Fonte: Autor (2022)

É importante observar que para a evapotranspiração não foi possível determinar o valor do RSR e do NSE pois o SWMM não calculou variação da evapotranspiração na estratégia de simulação adotada, apresentando, portanto, média igual aos valores referência em cada tempo da simulação, zerando o denominador da equação RSR e do NSE.

A Figura C.2 ilustra a avaliação dos ECC em cada um dos dispositivos. Na TI houve grande discrepância de simulação entre a Ferramenta DDU+S e o SWMM, independente de qual ECC estava sendo utilizado. O poço de infiltração e o reservatório de água pluvial apresentam maior similaridade de simulação a partir do ECC 3, enquanto as valas e superfícies de infiltração apresentam grau de representação similar para os eventos a partir do ECC 2.

Figura C.2 - Testes estatísticos aplicados à Ferramenta DDU+S em cada um dos dispositivos simulados considerando cada ECC (continua)

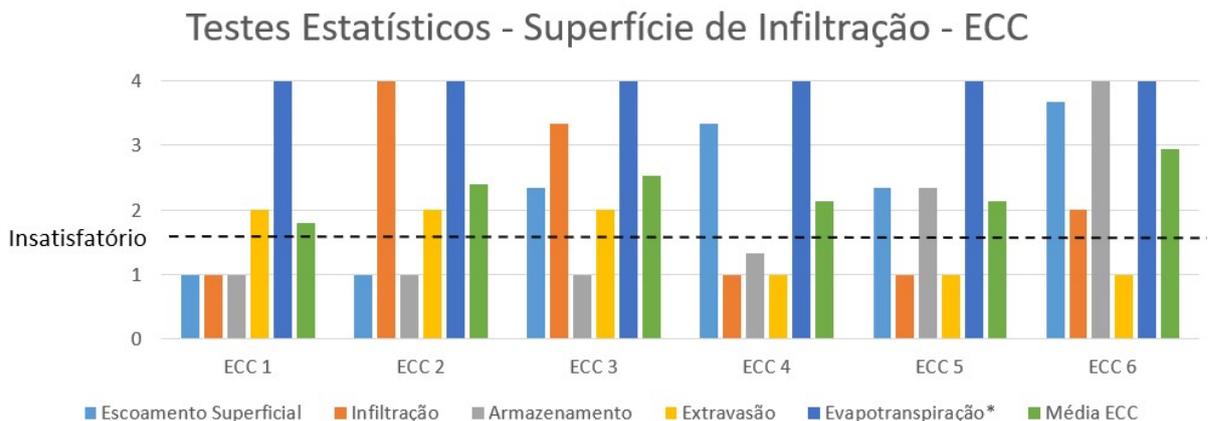
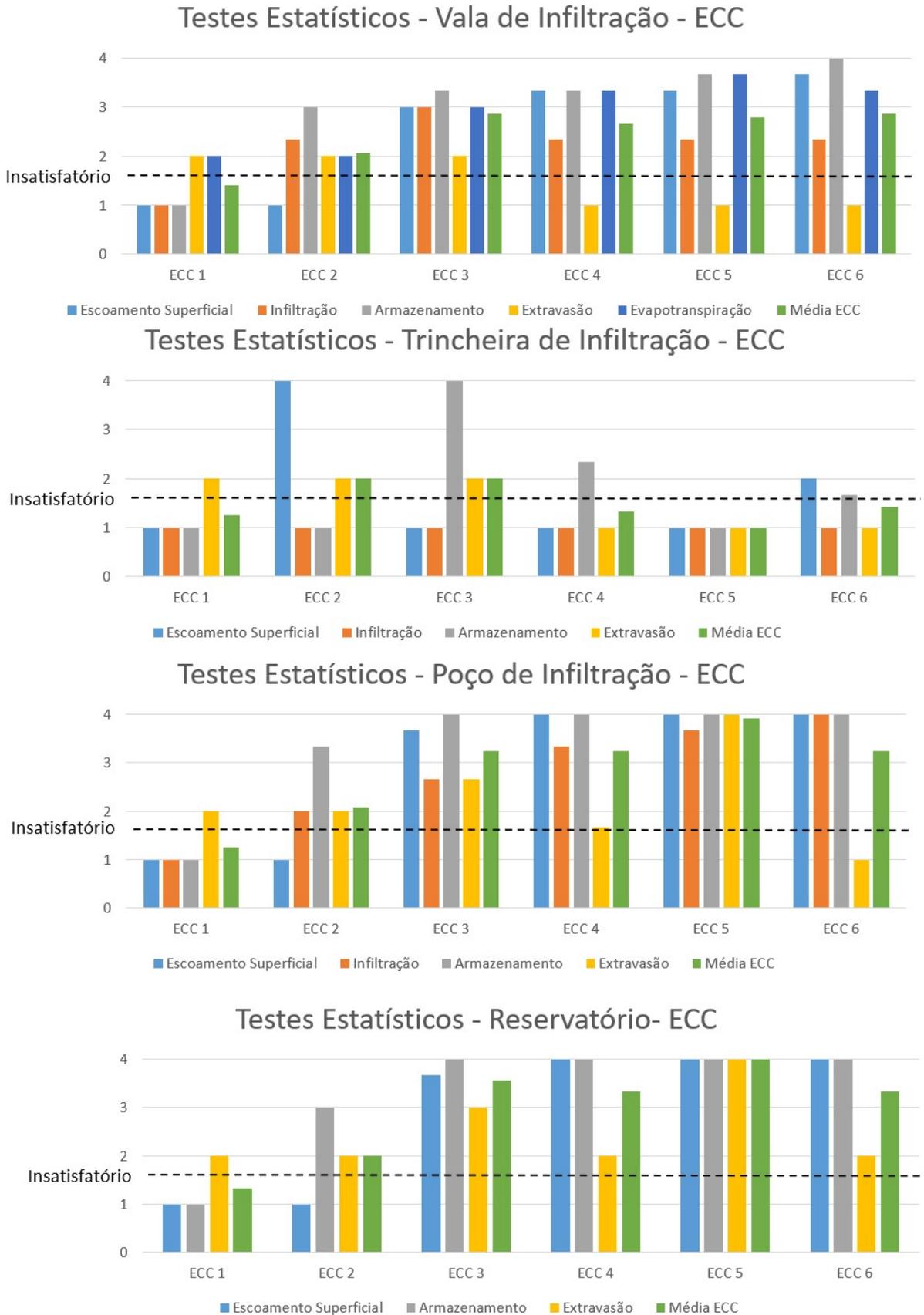


Figura C.2 - Testes estatísticos aplicados à Ferramenta DDU+S em cada um dos dispositivos simulados considerando cada ECC (continua)



Fonte: Autor (2022)

C.1 Teste Estatístico PBIAS

Os resultados do teste estatístico PBIAS estão apresentados de forma analítica na Tabela .

Tabela C.1 – Classificação PBIAS da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Dispositivo	Balço Hídrico	ECC	PBIAS	Classificação	Pontuação	GPA	GPF
Superfície de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	-414,24%	Insatisfatório	1	1,67	2,4
		ECC2	-60,07%	Insatisfatório	1		
		ECC3	-34,93%	Insatisfatório	1		
		ECC4	-22,21%	Satisfatório	2		
		ECC5	-18,44%	Satisfatório	2		
		ECC6	-14,95%	Bom	3		
	Infiltração	ECC1	-374,17%	Insatisfatório	1	1,83	
		ECC2	-7,14%	Muito Bom	4		
		ECC3	15,46%	Satisfatório	2		
		ECC4	26,18%	Insatisfatório	1		
		ECC5	26,19%	Insatisfatório	1		
		ECC6	17,44%	Satisfatório	2		
	Armazenamento	ECC1	-10636,71%	Insatisfatório	1	2	
		ECC2	-255,65%	Insatisfatório	1		
		ECC3	-50,79%	Insatisfatório	1		
		ECC4	-20,17%	Satisfatório	2		
		ECC5	-13,86%	Bom	3		
		ECC6	-6,26%	Muito Bom	4		
	Extravasão	ECC1	0,00%	Muito Bom	4	2,5	
		ECC2	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC3	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC4	-8745,30%	Insatisfatório	1		
		ECC5	-100,13%	Insatisfatório	1		
		ECC6	-15546,1%	Insatisfatório	1		
Evapotranspiração	ECC1	5,78%	Muito Bom	4	4		
	ECC2	5,78%	Muito Bom	4			
	ECC3	5,78%	Muito Bom	4			
	ECC4	5,78%	Muito Bom	4			
	ECC5	5,78%	Muito Bom	4			
	ECC6	5,78%	Muito Bom	4			

Tabela C.1 – Classificação PBIAS da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Vala de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	-414,24%	Insatisfatório	1	1,67	1,8
		ECC2	-60,07%	Insatisfatório	1		
		ECC3	-34,93%	Insatisfatório	1		
		ECC4	-22,21%	Satisfatório	2		
		ECC5	-18,44%	Satisfatório	2		
		ECC6	-14,95%	Bom	3		
	Infiltração	ECC1	-240,59%	Insatisfatório	1	1,00	
		ECC2	-39,00%	Insatisfatório	1		
		ECC3	34,52%	Insatisfatório	1		
		ECC4	53,23%	Insatisfatório	1		
		ECC5	53,84%	Insatisfatório	1		
		ECC6	46,76%	Insatisfatório	1		
	Armazenamento	ECC1	-987,10%	Insatisfatório	1	2,17	
		ECC2	-39,89%	Insatisfatório	1		
		ECC3	-22,32%	Satisfatório	2		
		ECC4	-15,38%	Satisfatório	2		
		ECC5	-10,84%	Bom	3		
		ECC6	-2,16%	Muito Bom	4		
	Extravasão	ECC1	0,00%	Muito Bom	4	2,5	
		ECC2	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC3	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC4	-10653,45%	Insatisfatório	1		
		ECC5	-48,10%	Insatisfatório	1		
		ECC6	-1420,58%	Insatisfatório	1		
Evapotranspiração	ECC1	-433,18%	Insatisfatório	1	1,67		
	ECC2	-119,64%	Insatisfatório	1			
	ECC3	-49,17%	Insatisfatório	1			
	ECC4	-18,92%	Satisfatório	2			
	ECC5	-12,74%	Bom	3			
	ECC6	-17,05%	Satisfatório	2			

Tabela C.1 – Classificação PBIAS da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Trincheira de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	-633,96%	Insatisfatório	1	1,5	1,63
		ECC2	-0,35%	Muito Bom	4		
		ECC3	-127,10%	Insatisfatório	1		
		ECC4	-64,55%	Insatisfatório	1		
		ECC5	-33,02%	Insatisfatório	1		
		ECC6	-25,10%	Insatisfatório	1		
	Infiltração	ECC1	-642,27%	Insatisfatório	1	1,00	
		ECC2	77,90%	Insatisfatório	1		
		ECC3	84,29%	Insatisfatório	1		
		ECC4	79,18%	Insatisfatório	1		
		ECC5	71,64%	Insatisfatório	1		
		ECC6	69,69%	Insatisfatório	1		
	Armazenamento	ECC1	-7444,93%	Insatisfatório	1	1,5	
		ECC2	-89,50%	Insatisfatório	1		
		ECC3	-7,37%	Muito Bom	4		
		ECC4	-36,90%	Insatisfatório	1		
		ECC5	-67,41%	Insatisfatório	1		
		ECC6	-52,28%	Insatisfatório	1		
	Extravasão	ECC1	0,00%	Muito Bom	4	2,5	
		ECC2	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC3	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC4	-15499,79%	Insatisfatório	1		
		ECC5	-34,63%	Insatisfatório	1		
		ECC6	-7583,27%	Insatisfatório	1		

Tabela C.1 – Classificação PBIAS da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Poço de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	-92,57%	Insatisfatório	1	2,83	2,83
		ECC2	-114,99%	Insatisfatório	1		
		ECC3	-12,96%	Bom	3		
		ECC4	-7,08%	Muito Bom	4		
		ECC5	-6,29%	Muito Bom	4		
		ECC6	-0,25%	Muito Bom	4		
	Infiltração	ECC1	-70,58%	Insatisfatório	1	2,33	
		ECC2	-21,82%	Satisfatório	2		
		ECC3	-18,46%	Satisfatório	2		
		ECC4	-17,16%	Satisfatório	2		
		ECC5	-13,43%	Bom	3		
		ECC6	-7,29%	Muito Bom	4		
	Armazenamento	ECC1	-90,47%	Insatisfatório	1	3,17	
		ECC2	16,08%	Satisfatório	2		
		ECC3	8,95%	Muito Bom	4		
		ECC4	2,47%	Muito Bom	4		
		ECC5	2,85%	Muito Bom	4		
		ECC6	3,81%	Muito Bom	4		
	Extravasão	ECC1	0,00%	Muito Bom	4	3,0	
		ECC2	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC3	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC4	-35,91%	Insatisfatório	1		
		ECC5	-2,36%	Muito Bom	4		
		ECC6	123,05%	Insatisfatório	1		

Tabela C.1 – Classificação PBIAS da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (conclusão)

Reservatório	Escoamento Superficial	ECC1	-92,57%	Insatisfatório	1	2,83	3,11
		ECC2	-114,99%	Insatisfatório	1		
		ECC3	-12,96%	Bom	3		
		ECC4	-7,08%	Muito Bom	4		
		ECC5	-6,29%	Muito Bom	4		
		ECC6	-0,25%	Muito Bom	4		
	Armazenamento	ECC1	-93,51%	Insatisfatório	1	3,00	
		ECC2	-46,86%	Insatisfatório	1		
		ECC3	-4,99%	Muito Bom	4		
		ECC4	-1,18%	Muito Bom	4		
		ECC5	-0,51%	Muito Bom	4		
		ECC6	0,55%	Muito Bom	4		
	Extravasão	ECC1	0,00%	Muito Bom	4	3,5	
		ECC2	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC3	0,00%	Muito Bom	4		
		ECC4	-139,18%	Insatisfatório	1		
		ECC5	-8,75%	Muito Bom	4		
		ECC6	-9,66%	Muito Bom	4		

Fonte: Autor (2022)

C.2 Teste Estatístico RSR

Os resultados do teste estatístico RSR estão apresentados de forma analítica na Tabela .

Tabela C.2 - Classificação RSR da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Dispositivo	Balço Hídrico	ECC	RSR	Classificação	Pontuação	GPA	GPF
Superfície de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	-17,79	Insatisfatório	1,00	2,83	192
		ECC2	-0,04	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,74	Bom	3,00		
		ECC4	0,90	Muito Bom	4,00		
		ECC5	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,98	Muito Bom	4,00		
	Infiltração	ECC1	-1,90	Insatisfatório	1,00	2,17	
		ECC2	0,92	Muito Bom	4,00		
		ECC3	0,76	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,26	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	0,30	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,59	Satisfatório	2,00		
	Armazenamento	ECC1	-931,27	Insatisfatório	1,00	1,67	
		ECC2	-18,38	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	-9,17	Insatisfatório	1,00		
		ECC4	0,49	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	0,55	Satisfatório	2,00		
		ECC6	0,94	Muito Bom	4,00		
	Extravasão	ECC1	0,00	Insatisfatório	1,00	1,00	
		ECC2	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC4	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,00	Insatisfatório	1,00		
Evapotranspiração	ECC1	ND	ND	ND	ND		
	ECC2	ND	ND	ND			
	ECC3	ND	ND	ND			
	ECC4	ND	ND	ND			
	ECC5	ND	ND	ND			
	ECC6	ND	ND	ND			

Tabela C.2 - Classificação RSR da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Vala de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	4,20	Insatisfatório	1	3,00	2,87
		ECC2	0,981	Insatisfatório	1		
		ECC3	0,471	Muito Bom	4		
		ECC4	0,31	Muito Bom	4		
		ECC5	0,24	Muito Bom	4		
		ECC6	0,12	Muito Bom	4		
	Infiltração	ECC1	1,93	Insatisfatório	1	2,83	
		ECC2	0,53	Bom	3		
		ECC3	0,45	Muito Bom	4		
		ECC4	0,59	Bom	3		
		ECC5	0,59	Bom	3		
		ECC6	0,54	Bom	3		
	Armazenamento	ECC1	5,83	Insatisfatório	1	3,50	
		ECC2	0,40	Muito Bom	4		
		ECC3	0,23	Muito Bom	4		
		ECC4	0,16	Muito Bom	4		
		ECC5	0,15	Muito Bom	4		
		ECC6	0,08	Muito Bom	4		
	Extravasão	ECC1	1	Insatisfatório	1	1,00	
		ECC2	1	Insatisfatório	1		
		ECC3	1	Insatisfatório	1		
		ECC4	1	Insatisfatório	1		
		ECC5	0,79	Insatisfatório	1		
		ECC6	1	Insatisfatório	1		
Evapotranspiração	ECC1	0,03	Muito Bom	4	4,00		
	ECC2	0,02	Muito Bom	4			
	ECC3	0,01	Muito Bom	4			
	ECC4	0,00	Muito Bom	4			
	ECC5	0,00	Muito Bom	4			
	ECC6	0,01	Muito Bom	4			

Tabela C.2 - Classificação RSR da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Trincheira de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	40,19	Insatisfatório	1	1,50	1,38
		ECC2	0,02	Muito Bom	4		
		ECC3	0,77	Insatisfatório	1		
		ECC4	1,05	Insatisfatório	1		
		ECC5	1,29	Insatisfatório	1		
		ECC6	1,11	Insatisfatório	1		
	Infiltração	ECC1	1,70	Insatisfatório	1	1,00	
		ECC2	0,92	Insatisfatório	1		
		ECC3	0,89	Insatisfatório	1		
		ECC4	0,90	Insatisfatório	1		
		ECC5	0,89	Insatisfatório	1		
		ECC6	0,87	Insatisfatório	1		
	Armazenamento	ECC1	312,47	Insatisfatório	1	2,00	
		ECC2	0,90	Insatisfatório	1		
		ECC3	0,16	Muito Bom	4		
		ECC4	0,53	Bom	3		
		ECC5	0,79	Insatisfatório	1		
		ECC6	0,69	Satisfatório	2		
	Extravasão	ECC1	1	Insatisfatório	1	1,00	
		ECC2	1	Insatisfatório	1		
		ECC3	1	Insatisfatório	1		
		ECC4	1	Insatisfatório	1		
		ECC5	1,41	Insatisfatório	1		
		ECC6	1	Insatisfatório	1		

Tabela C.2 - Classificação RSR da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Poço de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	1,09	Insatisfatório	1	3,00	2,75
		ECC2	1,22	Insatisfatório	1		
		ECC3	0,27	Muito Bom	4		
		ECC4	0,19	Muito Bom	4		
		ECC5	0,15	Muito Bom	4		
		ECC6	0,06	Muito Bom	4		
	Infiltração	ECC1	0,99	Insatisfatório	1	3,00	
		ECC2	0,67	Satisfatório	2		
		ECC3	0,54	Bom	3		
		ECC4	0,44	Muito Bom	4		
		ECC5	0,35	Muito Bom	4		
		ECC6	0,29	Muito Bom	4		
	Armazenamento	ECC1	0,90	Insatisfatório	1	3,50	
		ECC2	0,34	Muito Bom	4		
		ECC3	0,12	Muito Bom	4		
		ECC4	0,12	Muito Bom	4		
		ECC5	0,13	Muito Bom	4		
		ECC6	0,08	Muito Bom	4		
	Extravasão	ECC1	1	Insatisfatório	1	1,50	
		ECC2	1	Insatisfatório	1		
		ECC3	1	Insatisfatório	1		
		ECC4	1	Insatisfatório	1		
		ECC5	0,25	Muito Bom	4		
		ECC6	1	Insatisfatório	1		

Tabela C.2 - Classificação RSR da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (conclusão)

Reservatório	Escoamento Superficial	ECC1	1,09	Insatisfatório	1	3,00	2,86
		ECC2	1,22	Insatisfatório	1		
		ECC3	0,27	Muito Bom	4		
		ECC4	0,19	Muito Bom	4		
		ECC5	0,14	Muito Bom	4		
		ECC6	0,06	Muito Bom	4		
	Armazenamento	ECC1	0,933	Insatisfatório	1	3,50	
		ECC2	0,473	Muito Bom	4		
		ECC3	0,083	Muito Bom	4		
		ECC4	0,043	Muito Bom	4		
		ECC5	0,03	Muito Bom	4		
		ECC6	0,02	Muito Bom	4		
	Extravasão	ECC1	1	Insatisfatório	1	1,50	
		ECC2	1	Insatisfatório	1		
		ECC3	1	Insatisfatório	1		
		ECC4	1	Insatisfatório	1		
		ECC5	0,262349	Muito Bom	4		
		ECC6	1	Insatisfatório	1		

Fonte: Autor (2022)

C.3 Teste Estatístico NSE

Os resultados do teste estatístico NSE estão apresentados de forma analítica na Tabela .

Tabela C.3 - Classificação NSE da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Dispositivo	Balanço Hídrico	ECC	NSE	Classificação	Pontuação	GPA	GPF
Superfície de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	-17,79	Insatisfatório	1,00	2,33	1,79
		ECC2	-0,04	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,74	Bom	3,00		
		ECC4	0,90	Muito Bom	4,00		
		ECC5	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,98	Muito Bom	4,00		
	Infiltração	ECC1	-1,90	Insatisfatório	1,00	2,17	
		ECC2	0,92	Muito Bom	4,00		
		ECC3	0,76	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,26	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	0,30	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,59	Satisfatório	2,00		
	Armazenamento	ECC1	-931,27	Insatisfatório	1,00	1,67	
		ECC2	-18,38	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	-9,17	Insatisfatório	1,00		
		ECC4	0,49	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	0,55	Satisfatório	2,00		
		ECC6	0,94	Muito Bom	4,00		
	Extravasão	ECC1	0,00	Insatisfatório	1,00	1,00	
		ECC2	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC4	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	-0,13	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,00	Insatisfatório	1,00		
Evapotranspiração	ECC1	ND	ND	ND	ND		
	ECC2	ND	ND	ND			
	ECC3	ND	ND	ND			
	ECC4	ND	ND	ND			
	ECC5	ND	ND	ND			
	ECC6	ND	ND	ND			

Tabela C.3 - Classificação NSE da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Vala de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	-16,67	Insatisfatório	1,00	3,00	3,00
		ECC2	0,03	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,78	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,90	Muito Bom	4,00		
		ECC5	0,94	Muito Bom	4,00		
		ECC6	0,98	Muito Bom	4,00		
	Infiltração	ECC1	-2,73	Insatisfatório	1,00	2,83	
		ECC2	0,72	Bom	3,00		
		ECC3	0,79	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,65	Bom	3,00		
		ECC5	0,65	Bom	3,00		
		ECC6	0,71	Bom	3,00		
	Armazenamento	ECC1	-32,97	Insatisfatório	1,00	3,50	
		ECC2	0,84	Muito Bom	4,00		
		ECC3	0,95	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,97	Muito Bom	4,00		
		ECC5	0,98	Muito Bom	4,00		
		ECC6	0,99	Muito Bom	4,00		
	Extravasão	ECC1	0,00	Insatisfatório	1,00	1,00	
		ECC2	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC4	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	0,37	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,00	Insatisfatório	1,00		
Evapotranspiração	ECC1	-9,01	Insatisfatório	1,00	3,00		
	ECC2	-0,43	Insatisfatório	1,00			
	ECC3	0,75	Muito Bom	4,00			
	ECC4	0,94	Muito Bom	4,00			
	ECC5	0,97	Muito Bom	4,00			
	ECC6	0,93	Muito Bom	4,00			

Tabela C.3 - Classificação NSE da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Trincheira de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	0,00	Insatisfatório	1,00	2,00	1,50
		ECC2	1,00	Muito Bom	4,00		
		ECC3	0,41	Insatisfatório	1,00		
		ECC4	-0,11	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	-0,67	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,98	Muito Bom	4,00		
	Infiltração	ECC1	0,00	Insatisfatório	1,00	1,00	
		ECC2	0,16	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,20	Insatisfatório	1,00		
		ECC4	0,20	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	0,21	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,24	Insatisfatório	1,00		
	Armazenamento	ECC1	0,00	Insatisfatório	1,00	2,00	
		ECC2	0,19	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,98	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,72	Bom	3,00		
		ECC5	0,38	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	0,52	Satisfatório	2,00		
	Extravasão	ECC1	0,00	Insatisfatório	1,00	1,00	
		ECC2	-3,62	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	-1,27	Insatisfatório	1,00		
		ECC4	-0,69	Insatisfatório	1,00		
		ECC5	-0,98	Insatisfatório	1,00		
		ECC6	-1,25	Insatisfatório	1,00		

Tabela C.3 - Classificação NSE da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (continua)

Poço de Infiltração	Escoamento Superficial	ECC1	-0,18	Insatisfatório	1,00	3,00	2,92
		ECC2	-0,49	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,93	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,96	Muito Bom	4,00		
		ECC5	0,98	Muito Bom	4,00		
		ECC6	0,98	Muito Bom	4,00		
	Infiltração	ECC1	0,02	Insatisfatório	1,00	3,00	
		ECC2	0,54	Satisfatório	2,00		
		ECC3	0,71	Bom	3,00		
		ECC4	0,80	Muito Bom	4,00		
		ECC5	0,88	Muito Bom	4,00		
		ECC6	0,91	Muito Bom	4,00		
	Armazenamento	ECC1	0,19	Insatisfatório	1,00	3,50	
		ECC2	0,89	Muito Bom	4,00		
		ECC3	0,99	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,99	Muito Bom	4,00		
		ECC5	0,98	Muito Bom	4,00		
		ECC6	0,99	Muito Bom	4,00		
	Extravasão	ECC1	0,00	Insatisfatório	1,00	2,17	
		ECC2	-10,10	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,66	Bom	3,00		
		ECC4	0,73	Bom	3,00		
		ECC5	0,94	Muito Bom	4,00		
		ECC6	0,00	Insatisfatório	1,00		

Tabela C.3 - Classificação NSE da Ferramenta DDU+S em relação ao SWMM (conclusão)

Reservatório	Escoamento Superficial	ECC1	-0,18	Insatisfatório	1,00	3,00	3,00
		ECC2	-0,49	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,93	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,96	Muito Bom	4,00		
		ECC5	0,98	Muito Bom	4,00		
		ECC6	0,98	Muito Bom	4,00		
	Armazenamento	ECC1	0,13	Insatisfatório	1,00	3,50	
		ECC2	0,78	Muito Bom	4,00		
		ECC3	0,99	Muito Bom	4,00		
		ECC4	1,00	Muito Bom	4,00		
		ECC5	1,00	Muito Bom	4,00		
		ECC6	1,00	Muito Bom	4,00		
	Extravasão	ECC1	0,00	Insatisfatório	1,00	2,50	
		ECC2	0,00	Insatisfatório	1,00		
		ECC3	0,79	Muito Bom	4,00		
		ECC4	0,83	Muito Bom	4,00		
		ECC5	0,93	Muito Bom	4,00		
		ECC6	0,00	Insatisfatório	1,00		

Fonte: Autor (2022)

APÊNDICE D

Dados de Entrada dos Modelos

D.1 Superfície de Infiltração

Os dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Superfície de Infiltração estão apresentados na Tabela D.1.

Tabela D.1 - Dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Superfície de Infiltração (continua)

	Lid Type	Rain Garden
	Surface - Berm Height	800 mm
	Surface - Vegetation Volume Fraction	0
LID EDITOR	Surface - Surface Roughness	1000000
	Surface - Surface Slope	0
	Soil - Thickness	10000
	Soil - Porosity	0,398
	Soil - Field Capacity	0,38
	Soil - Wilting Point	0,22
	Soil - Conductivity	1,5 mm/h
	Soil - Conductivity Slope	55,59
	Soil - Suction Head	218,5 mm
	LID USAGE EDITOR	Area of each unit
Number of Units		1
% of Subcatchment Occupied		100
Surface width per unit		0
% Initially Saturated		0
% of Impervious Area Treated		0
% of Iervious Area Treated		0
	Send Drain Flow to	

Tabela D.1 - Dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Superfície de Infiltração (continua)

Climatology Editor	Source Evaporation Rates	Constant Value
	Daily Evaporation	3,14 mm/day
Rain Gage São Carlos	Tag	SãoCarlos
	Rain Format	Intensity
	Time Interval	1:00:00
	Snow Catch Factor	1
	Data Source	File
	Station ID	Várias
	Rain Units	mm
Rain Gage Apoio	Tag	Apoio0
	Rain Format	Intensity
	Time Interval	1:00:00
	Snow Catch Factor	1
	Data Source	TIMESERIES
	Series Name	Chuva0
	Rain Units	mm
Subcatchment Estacionamento	Rain Gage	São Carlos
	Outlet	SuperfícieInfiltração
	Area	0,6 ha
	Width	60 m
	%Slope	5 %
	%Imperv	0
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	1,4
	%Zero-Imperv	0
	Subarea Routing	Impervious
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	CurveNumber
	Curve Number	96,3
	Conductivity	0,5
	Drying Time	60
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	0
	Lad Uses	0
Inicial Buildup	None	

Curb Lenght

0

Tabela D.1 - Dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Superfície de Infiltração (continua)

Subcatchment Dep. Medicina 2	Rain Gage	São Carlos
	Outlet	SuperfícieInfiltração
	Area	0,14267 ha
	Width	10 m
	%Slope	5%
	%Imperv	0
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	1,036
	%Zero-Imperv	0
	Subarea Routing	Impervious
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	CurveNumber
	Curve Number	96,8
	Conductivity	0,5
	Drying Time	15
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	0
Lad Uses	0	
Inicial Buildup	None	
Curb Lenght	0	

Tabela D.1 - Dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Superfície de Infiltração (continua)

Subcatchment Dep. Gerontologia	Rain Gage	São Carlos
	Outlet	Superfície Infiltração
	Area	0,0188 ha
	Width	10 m
	%Slope	5%
	%Imperv	0
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	1,036
	%Zero-Imperv	0
	Subarea Routing	Impervious
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	Curve Number
	Curve Number	96,8
	Conductivity	0,5
	Drying Time	15
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	0
Lad Uses	0	
Inicial Buildup	None	
Curb Length	0	

Tabela D.1- Dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Superfície de Infiltração (conclusão)

Subcatchment Superfície Infiltração	Rain Gage	Apoio0
	Outlet	1
	Area	0,0655 ha
	Width	32
	%Slope	0
	%Imperv	0
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	1,036
	%Zero-Imperv	0
	Subarea Routing	Impervious
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	GreenAmpt
	Suction Head	218,5 mm
	Conductivity	1,5 mm/h
	Initial Deficit	0,635
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	1
Lad Uses	0	
Inicial Buildup	None	
Curb Lenght	0	

Fonte: Autor (2022)

Na Tabela D.2 estão os dados de entrada utilizados no modelo Ferramenta DDU+S para Superfície de Infiltração.

Tabela D.2 – Dados de Entrada Modelo Ferramenta DDU+S para Superfície de Infiltração

Local	Área Permeável	7614,7 m ²
	Área Impermeável	350 m ²
Solo	Franco Argilo Arenoso	
	Coefficiente de Permeabilidade	Default mm/h
Dados Pluviométricos	Planilha INMET A711 - São Carlos	
Dados Evapotranspiração	SP-São Carlos	
	Evapotranspiração Média	Default mm/dia
DDU+S	Volume Geométrico	TP
	Comp. Superficial	32 m
	Com. Fundo	26 m
	Larg. Superficial	20,5 m
	Larg. Fundo	15 m
	Altura	0,8 m
	Área de infiltração a ser considerada	100%

Fonte: Autor (2022)

D.2 Vala de Infiltração

Os dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Vala de Infiltração estão apresentados na Tabela D.3.

Tabela D.3 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Vala de Infiltração (continua)

LID EDITOR	Lid Type	Vegetative Swale
	Surface - Berm Height	2500 mm
	Surface - Vegetation Volume Fraction	0
	Surface - Surface Roughness	1000000
	Surface - Surface Slope	0,0000001
	Surface - Swale Slide Slope	1,5
LID USAGE EDITOR	Area of each unit	246 m ²
	Number of Units	1
	% of Subcatchment Occupied	100
	Surface width per unit	12 m
	% Initially Saturated	0
	% of Impervious Area Treated	0
	% of Iervious Area Treated	0
	Send Drain Flow to	

Tabela D.3 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Vala de Infiltração (continua)

Climatology Editor	Source Evaporation Rates	Constant Value	
	Daily Evaporation	3,14	mm/day
Rain Gage São Carlos	Tag	SãoCarlos	
	Rain Format	Intensity	
	Time Interval	1:00:00	
	Snow Catch Factor	1	
	Data Source	File	
	Station ID	Várias	
	Rain Units	mm	
	Tag	Apoio0	
	Rain Format	Intensity	
	Time Interval	1:00:00	
	Snow Catch Factor	1	
	Data Source	TIMESERIES	
	Series Name	Chuva0	
	Rain Units	mm	
	Subcatchment Estacionamento	Rain Gage	São Carlos
Outlet		ValaInfiltração	
Area		0,6	ha
Width		60	m
%Slope		5	%
%Imperv		0	
N-Imperv		0	
N-Perv		0	
Dstore-Imperv		0	
Dstore-Perv		1,4	
%Zero-Imperv		0	
Subarea Routing		Impervious	
Percent Routed		100	
Infiltration Data		CurveNumber	
Curve Number		96,3	
Conductivity		0,5	
Drying Time		60	
Ground Water		No	
Snow Pack	No		
Lid Controls	0		
Lad Uses	0		

Initial Buildup	None
Curb Lenght	0

Tabela D.3 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Vala de Infiltração (continua)

Subcatchment Dep. Medicina 2	Rain Gage	São Carlos	
	Outlet	ValaInfiltração	
	Area	0,14267	ha
	Width	10	m
	%Slope	5	%
	%Imperv	0	
	N-Imperv	0	
	N-Perv	0	
	Dstore-Imperv	0	
	Dstore-Perv	1,036	
	%Zero-Imperv	0	
	Subarea Routing	Impervious	
	Percent Routed	100	
	Infiltration Data	CurveNumber	
	Curve Number	96,8	
	Conductivity	0,5	
	Drying Time	15	
	Ground Water	No	
	Snow Pack	No	
	Lid Controls	0	
Lad Uses	0		
Initial Buildup	None		
Curb Lenght	0		

Tabela D.3 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Vala de Infiltração (continua)

Subcatchment Dep. Gerontologia	Rain Gage	São Carlos	
	Outlet	ValaInfiltração	
	Area	0,0188	ha
	Width	10	m
	%Slope	5	%
	%Imperv	0	
	N-Imperv	0	
	N-Perv	0	
	Dstore-Imperv	0	
	Dstore-Perv	1,036	
	%Zero-Imperv	0	
	Subarea Routing	Impervious	
	Percent Routed	100	
	Infiltration Data	CurveNumber	
	Curve Number	96,8	
	Conductivity	0,5	
	Drying Time	15	
	Ground Water	No	
	Snow Pack	No	
	Lid Controls	0	
Lad Uses	0		
Inicial Buildup	None		
Curb Lenght	0		

Tabela D.3 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Vala de Infiltração (conclusão)

Subcatchment ValaInfiltração	Rain Gage	Apoio0	
	Outlet	1	
	Area	0,0246	ha
	Width	20,5	
	%Slope	0	
	%Imperv	0	
	N-Imperv	0	
	N-Perv	0	
	Dstore-Imperv	0	
	Dstore-Perv	1,036	
	%Zero-Imperv	0	
	Subarea Routing	Impervious	
	Percent Routed	100	
	Infiltration Data	GreenAmpt	
	Suction Head	218,5	mm
	Conductivity	1,5	mm/h
	Initial Deficit	0,635	
	Ground Water	No	
	Snow Pack	No	
	Lid Controls	1	
Lad Uses	0		
Inicial Buildup	None		
Curb Lenght	0		

Fonte: Autor (2022)

Na Tabela D.4 estão os dados de entrada utilizados no modelo Ferramenta DDU+S para Vala de Infiltração.

Tabela D.4 – Dados de Entrada Modelo Ferramenta DDU+S para Vala de Infiltração

Local	Área Permeável	7614,7 m ²
	Área Impermeável	350 m ²
Solo	Franco Argilo Arenoso	
	Coefficiente de Permeabilidade	Default mm/h
Dados Pluviométricos	Planilha INMET A711 - São Carlos	
Dados Evapotranspiração	SP-São Carlos	
	Evapotranspiração Média	Default mm/dia
DDU+S	Formato	Trap.
	Comp. Superficial	20,5 m
	Larg. Superficial	12 m
	Larg. Fundo	4 m
	Altura	2,5 m
	Área de infiltração a ser considerada	100 %

Fonte: Autor (2022)

D.3 Trincheira de Infiltração – Dados de Entrada dos Modelos

Os dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Trincheira de Infiltração estão apresentados na Tabela D.5.

Tabela D.5 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Trincheira de Infiltração (continua)

	Lid Type	Infiltration Trench
LID EDITOR	Surface - Berm Height	0 mm
	Surface - Vegetation Volume Fraction	0
	Surface - Surface Roughness	0
	Surface - Surface Slope	0
	Surface - Swale Slide Slope	1,5
	Storage - Thickness	500 mm
	Storage - Void Ratio	0,42
	Storage - Seepage Rate	1,5 mm/h
	Storage - Clogging Factor	0

Tabela D.5 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Trincheira de Infiltração (continua)

LID USAGE EDITOR	Area of each unit	25 m ²
	Number of Units	7
	% of Subcatchment Occupied	100
	Surface width per unit	0,5 m
	% Initially Saturated	0
	% of Impervious Area Treated	100
	% of Iervious Area Treated	100
	Send Drain Flow to	
Climatology Editor	Source Evaporation Rates	Constant Value
	Daily Evaporation	3,14 mm/day
Rain Gage São Carlos	Tag	SãoCarlos
	Rain Format	Intensity
	Time Interval	1:00:00
	Snow Catch Factor	1
	Data Source	File
	Station ID	Várias
	Rain Units	mm
Rain Gage Apoio	Tag	Apoio0
	Rain Format	Intensity
	Time Interval	1:00:00
	Snow Catch Factor	1
	Data Source	TIMESERIES
	Series Name	Chuva0
	Rain Units	mm

Tabela D.5 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Trincheira de Infiltração (continua)

	Rain Gage	São Carlos
	Outlet	TrincheiraInfiltração
	Area	0,6 ha
	Width	60 m
	%Slope	5 %
	%Imperv	0
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	1,4
	%Zero-Imperv	0
	Subarea Routing	Impervious
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	CurveNumber
	Curve Number	96,3
	Conductivity	0,5
	Drying Time	60
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	0
	Lad Uses	0
	Inicial Buildup	None
	Curb Lenght	0

Subcatchment Estacionamento

Tabela D.5 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Trincheira de Infiltração (conclusão)

Subcatchment TrincheiraInfiltração	Rain Gage	Apoio0
	Outlet	1
	Area	0,0175 ha
	Width	50
	%Slope	0,0001
	%Imperv	0
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	0
	%Zero-Imperv	100
	Subarea Routing	Outlet
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	GreenAmpt
	Suction Head	218,5 mm
	Conductivity	1,5 mm/h
	Initial Deficit	0,635
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	1
Lad Uses	0	
Inicial Buildup	None	
Curb Lenght	0	

Fonte: Autor (2022)

Na Tabela D.6 estão os dados de entrada utilizados no modelo Ferramenta DDU+S para Trincheira de Infiltração.

Tabela D.6 – Dados de Entrada Modelo Ferramenta DDU+S para Trincheira de Infiltração (continua)

Local	Área Permeável	5650 m ²
	Área Impermeável	350 m ²
Solo	Franco Argilo Arenoso	
	Coefficiente de Permeabilidade	Default mm/h
Dados Pluviométricos	Planilha INMET A711 - São Carlos	
Dados Evapotranspiração	SP-São Carlos	
	Evapotranspiração Média	Default mm/dia
DDU+S	Largura	0,5 m
	Altura	0,5 m
	Comprimento	50 m
	Porosidade do Material de Enchimento	30 %
	Área de infiltração das paredes a ser considerada	100 %
	Área de infiltração ddo fundo a ser considerada	100 %
	Quantidade de trincheira	7

Fonte: Autor (2022)

D.4 Poço de Infiltração – Dados de Entrada dos Modelos

Os dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Poço de Infiltração estão apresentados na Tabela D.7.

Tabela D.7 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Poço de Infiltração (continua)

LID EDITOR	Lid Type	Vegetative Swale
	Surface - Berm Height	335 mm
	Surface - Vegetation Volume Fraction	0
	Surface - Surface Roughness	100
	Surface - Surface Slope	1E-10
	Surface - Swale Slide Slope	1E-10
LID USAGE EDITOR	Area of each unit	5,66 m ²
	Number of Units	1
	% of Subcatchment Occupied	100
	Surface width per unit	1,1 m
	% Initially Saturated	0
	% of Impervious Area Treated	0
	% of Iervious Area Treated	0
	Send Drain Flow to	

Tabela D.7 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Poço de Infiltração (continua)

Climatology Editor	Source Evaporation Rates	Constant Value
	Daily Evaporation	3,14 mm/day
Rain Gage São Carlos	Tag	São Carlos
	Rain Format	Intensity
	Time Interval	1:00:00
	Snow Catch Factor	1
	Data Source	File
	Station ID	Várias
	Rain Units	mm
Rain Gage Apoio	Tag	Apoio0
	Rain Format	Intensity
	Time Interval	1:00:00
	Snow Catch Factor	1
	Data Source	TIMESERIES
	Series Name	Chuva0
	Rain Units	mm
Subcatchment Laboratório	Rain Gage	São Carlos
	Outlet	Poço
	Area	0,000566 ha
	Width	1,1 m
	%Slope	5%
	%Imperv	0
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	1,4
	%Zero-Imperv	0
	Subarea Routing	Impervious
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	CurveNumber
	Curve Number	98
	Conductivity	0,5
	Drying Time	60
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	0
	Lad Uses	0
Inicial Buildup	None	
Curb Lenght	0	

Tabela D.7 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Poço de Infiltração (conclusão)

Subcatchment Poço	Rain Gage	Apoio0
	Outlet	1
	Area	0,0175 ha
	Width	50
	%Slope	0,0001
	%Imperv	0
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	0
	%Zero-Imperv	100
	Subarea Routing	Outlet
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	GreenAmpt
	Suction Head	218,5 mm
	Conductivity	17,3 mm/h
	Initial Deficit	0
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	1
Lad Uses	0	
Inicial Buildup	None	
Curb Lenght	0	

Fonte: Autor (2022)

Na Tabela D.8 estão os dados de entrada utilizados no modelo Ferramenta DDU+S para Poço de Infiltração.

Tabela D.8 – Dados de Entrada Modelo Ferramenta DDU+S para Poço de Infiltração

Local	Área Permeável	0 m ²
	Área Impermeável	287,5 m ²
Solo	Franco Argilo Arenoso	
	Coefficiente de Permeabilidade	17,3 mm/h
Dados Pluviométricos	Planilha INMET A711 - São Carlos	
Dados Evapotranspiração	SP-São Carlos	
	Evapotranspiração Média	Default mm/dia
DDU+S	Altura	2 m
	Diâmetro	1,1 m
	Porosidade do Material de Enchimento	30%
	Área de infiltração das paredes a ser considerada	75%
	Área de infiltração do fundo a ser considerada	50%
	Quantidade de trincheira	1

Fonte: Autor (2022)

D.5 Reservatório de Água de Chuva – Dados de Entrada dos Modelos

Os dados de entrada utilizados no modelo SWMM para Reservatório de Água de Chuva estão apresentados na Tabela D.9.

Tabela D.9 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Reservatório de Água de Chuva (continua)

LID EDITOR	Lid Type	Rain Barrel
	Barrel Height	2000 mm
	Drain - Flow Coefficient	0
LID USAGE EDITOR	Area of each unit	4 m ²
	Number of Units	1
	% of Subcatchment Occupied	100
	Surface width per unit	2 m
	% Initially Saturated	0
	% of Impervious Area Treated	0
	% of pervious Area Treated	0
	Send Drain Flow to	

Tabela D.9 – Dados de Entrada Modelo SWMM para Reservatório de Água de Chuva (continua)

Climatology Editor	Source Evaporation Rates	Constant Value
	Daily Evaporation	3,14 mm/day
Rain Gage São Carlos	Tag	São Carlos
	Rain Format	Intensity
	Time Interval	1:00:00
	Snow Catch Factor	1
	Data Source	File
	Station ID	Várias
	Rain Units	mm
Rain Gage Apoio	Tag	Apoio0
	Rain Format	Intensity
	Time Interval	1:00:00
	Snow Catch Factor	1
	Data Source	TIMESERIES
	Series Name	Chuva0
	Rain Units	mm
Subcatchment Laboratório	Rain Gage	São Carlos
	Outlet	Reservatório
	Area	0,000566 ha
	Width	1,1 m
	%Slope	5%
	%Imperv	0
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	1,4
	%Zero-Imperv	0
	Subarea Routing	Impervious
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	CurveNumber
	Curve Number	98
	Conductivity	0,5
	Drying Time	60
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	0
	Lad Uses	0
	Inicial Buildup	None
	Curb Lenght	0

Tabela D.9– Dados de Entrada Modelo SWMM para Reservatório de Água de Chuva (conclusão)

Subcatchment Reservatório	Rain Gage	Apoio0
	Outlet	1
	Area	0,0004 ha
	Width	2
	%Slope	0,0001
	%Imperv	100
	N-Imperv	0
	N-Perv	0
	Dstore-Imperv	0
	Dstore-Perv	0
	%Zero-Imperv	100
	Subarea Routing	Outlet
	Percent Routed	100
	Infiltration Data	CurveNumber
	Curve Number	96,3 mm
	Conductivity	0,5 mm/h
	Drying Time	60
	Ground Water	No
	Snow Pack	No
	Lid Controls	1
Lad Uses	0	
Inicial Buildup	None	
Curb Lenght	0	

Fonte: Autor (2022)

Na Tabela D.10 estão os dados de entrada utilizados no modelo Ferramenta DDU+S para Reservatório de Água de Chuva.

Tabela D.10 – Dados de Entrada Modelo Ferramenta DDU+S para Reservatório de Água de Chuva

Local	Área Permeável	0 m ²
	Área Impermeável	287,5 m ²
Solo	Franco Argilo Arenoso	
	Coeficiente de Permeabilidade	Default mm/h
Dados Pluviométricos	Planilha INMET A711 - São Carlos	
Dados Evapotranspiração	SP-São Carlos	
	Evapotranspiração Média	Default mm/dia
DDU+S	Formato	Cúbico
	Largura	2 m
	Altura	2 m
	Comprimento	2 m

Fonte: Autor (2022)