# UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS CENTRO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO



# VALÉRIA CARNEIRO DOS SANTOS

# AVALIAÇÃO DE SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS DE TELHADO VIA SIMULAÇÃO CONTÍNUA COM DADOS SUBDIÁRIOS

MACEIÓ 2021 VALÉRIA CARNEIRO DOS SANTOS

# AVALIAÇÃO DE SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS DE TELHADO VIA SIMULAÇÃO CONTÍNUA COM DADOS SUBDIÁRIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves

# Catalogação na Fonte Universidade Federal de Alagoas Biblioteca Central Divisão de Tratamento Técnico

**Divisão de Tratamento Técnico** Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S237a	Santos, Valéria Carneiro dos. Avaliação de sistema de aproveitamento de águas pluviais de telhado via simulação contínua com dados subsidiados / Valéria Carneiro dos Santos. – 2021. 114 f. : il. color.
	Orientador: Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.
	Bibliografia: f. 99-104. Apêndices: f. 105-110. Anexos: f. 111-114.
	1. Escoamento superficial. 2. Águas pluviais - Reaproveitamento. 3. Storm Water Managment Model 5.1 - Simulação contínua. I. Título.
	CDU: 628 1/ 3



# Universidade Federal de Alagoas PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO

#### ATA Nº 137

Aos vinte e quatro dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e um, às quatorze horas, por meio de videoconferência, realizou-se a defesa de dissertação de mestrado, intitulada Avaliação de sistema de aproveitamento de águas pluviais de telhado via simulação contínua com dados subdiários, de autoria do(a) candidato(a) VALÉRIA CARNEIRO DOS SANTOS, como requisito parcial para o título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento, na área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento. A banca examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves (Orientador - PPGRHS/CTEC/UFAL), Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cleuda Custódio Freire (Avaliadora Interna - PPGRHS/CTEC/UFAL), Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza (Avaliador Interno - PPGRHS/CTEC/UFAL) e Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Júnior (Avaliador Externo - UERJ). Após o encerramento da defesa, em reunião confidencial, a banca examinadora, com base no regimento interno do PPGRHS, decidiu por:

() Aprovação integral da dissertação;

(x) Aprovação da dissertação, condicionada às correções indicadas pela banca, sendo concedido o prazo de 45 dias para o(a) candidato(a) efetuar as correções sugeridas pela banca examinadora e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição de diploma;

() Reprovação da dissertação, com indicação de nova defesa, sendo concedido o prazo de 30 dias para o(a) candidato(a) realizar nova defesa;

() Reprovação da dissertação.

As atividades descritas nesta ata são requisitos parciais para a expedição do Diploma.

E, para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da banca examinadora:

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves (Orientador PPGRHS/CTEC/UFAL)

Profa. Dra. Cleuda Custódio Freire (Avaliadora Interna - PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza (Avaliador Interno - PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Júnior (Avaliador Externo - UERJ)

aface



Universidade Federal de Alagoas

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO

œ kacce

Dr. ALFREDO AKIRA OHNUMA JÚNIOR, UERJ

Examinador Externo à Instituição

Dra. CLEUDA CUSTODIO FREIRE, UFAL

Examinadora Interna

Dr. VLADIMIR CARAMORI BORGES DE SOUZA, UFAL

Examinador Interno

Mailly Gustavo F.P. dos Neves, UFAL Dr. MARLLUS GUSTAVO FERREIRA PASSOS DAS NEVES, UFAL

Presidente

### VALÉRIA CARNEIRO DOS SANTOS

Mestranda



Universidade Federal de Alagoas

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO

#### FOLHA DE CORREÇÕES

ATA Nº 137

### Autor: VALÉRIA CARNEIRO DOS SANTOS

 Título:
 Avaliação de sistema de aproveitamento de águas pluviais de telhado via simulação contínua com dados subdiários

Banca examinadora:

Prof. ALFREDO AKIRA OHNUMA JÚNIOR

Examinador Externo à Instituição afaco

Prof. CLEUDA CUSTODIO FREIRE

Examinadora Interna

Prof. VLADIMIR CARAMORI BORGES DE SOUZAExaminador Interno

Prof. MARLLUS GUSTAVO FERREIRA PASSOS Presidente DAS NEVES

Os itens abaixo deverão ser modificados, conforme sugestão da banca

- 1. [] INTRODUÇÃO
- 2. [] REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
- 3. [] METODOLOGIA
- 4. [X] RESULTADOS OBTIDOS
- 5. [] CONCLUSÕES

### COMENTÁRIOS GERAIS:

Revisar a discussão dos resultados.

Declaro, para fins de homologação, que as modificações, sugeridas pela banca examinadora, acima mencionada, foram cumpridas integralmente.

### Prof. MARLLUS GUSTAVO FERREIRA PASSOS DAS NEVES

Orientador(a)

Dedico este trabalho com carinho aos meus pais, à minha irmã e à minha avó.

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus em primeiro lugar, por ter me concedido tantas bençãos e a força necessária para conquistar meus objetivos.

Aos meus pais, Jociene e Valdinei, por sempre estarem presentes, por acreditarem em mim e por serem meu exemplo e motivação.

À minha irmã, Vanessa, pela parceria e cumplicidade na vida e nas atividades acadêmicas.

Ao meu orientador, professor Marllus das Neves, pela paciência, dedicação e disponibilidade para que este trabalho fosse conduzido da melhor forma possível.

Aos membros avaliadores da banca, Prof. Dr. Alfredo Akira, Profa. Dra. Cleuda Freire e Prof. Dr. Vladimir Caramori, pelas valiosas contribuições.

Às amigas que fiz durante o mestrado, Amanda Moraes, Ana Luiza Castro, Janiara Alves e Wanessa Ribeiro, pela colaboração nas atividades e companhia na sala de permanência do PPGRHS.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, e da Universidade Federal de Alagoas, pelo conhecimento compartilhado.

À Capes pela bolsa concedida.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus agradecimentos.

"We deserve a safe future. And we demand a safe future.

Is that really too much to ask?"

Greta Thunberg

(Global Climate Strike, 2019)

#### **RESUMO**

O desenvolvimento urbano de baixo impacto (LID) propõe técnicas compensatórias que promovam regimes de vazões mais próximos do natural. Neste aspecto, o aproveitamento de águas pluviais pode promover a atenuação de vazões máximas além de suprir parcela não potável da demanda de água. Assim, neste trabalho, objetivou-se avaliar o comportamento de um sistema de aproveitamento de água de chuva quanto ao impacto na geração do escoamento superficial e o método de simulação com dados diários, utilizado comumente no dimensionamento de reservatórios de aproveitamento de águas pluviais. Para isso, dados de monitoramento de precipitação e vazão, constituintes de uma série contínua de pouco menos de um ano, com discretização em intervalos de tempo de 1 minuto, foram utilizados para calibração e validação do modelo SWMM. Em seguida, uma série contínua de precipitação de aproximadamente sete anos, com mesma discretização, foi utilizada para simular o sistema telhadoreservatório de descarte-reservatório principal para diferentes series de demanda, as quais representavam o comportamento dos usuários, avaliando-se com indicadores de eficiência de economia de água, taxa de desperdício de água de chuva, confiabilidade plena do sistema (nível de atendimento), redução de volume e redução de vazões de pico. Na etapa de calibração, foi verificado um bom ajuste do modelo, com coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe acima de 0,94 na simulação contínua do sistema completo. Na avaliação do sistema no período de monitoramento, de julho de 2018 a março de 2019, as reduções de volume e vazões máximas foram de 34% e 98%, respectivamente, sendo usados os volumes de água de chuva pelos moradores equivalentes a 1,2% do consumo total médio de janeiro. No período simulado, de 2014 a 2020, as reduções foram de 45% a 48% (volume) e de 98% (vazão máxima) nos seis cenários simulados. O melhor cenário, em termos de atendimento à demanda, foi o cenário 1 em que a eficiência de economia de água foi de 0,38 e a confiabilidade plena foi 37%. Quanto ao método da simulação com dados diários, obteve-se para uma confiabilidade plena de 90% uma demanda diária de 4,3 litros/dia, ao passo que na simulação contínua com o modelo SWMM a demanda foi de 2,4 litros/dia, uma diferença de aproximadamente 40%. Para esse cenário de 90% de confiabilidade plena, as reduções de volume e vazões máximas foram de 13% e 95%, respectivamente. Observaram-se ainda a importância do monitoramento do reservatório de descarte, pois ele capta boa parte das precipitações menos intensas, e a importância de se simular séries contínuas com discretização mais refinada, quando comparada com métodos mais simplificados que utilizam dados diários sem dados de evaporação, por exemplo. Ao final do trabalho, foi possível concluir que embora existam desafios para conciliar os usos de sistemas de aproveitamento de águas pluviais, a adoção dessa técnica pode ser vantajosa na atenuação de escoamento superficial.

Palavras-chave: Escoamento superficial; Aproveitamento de água de chuva; SWMM; Simulação contínua.

### ABSTRACT

Low impact development proposes alternative techniques that promotes hydrological regimes closer to their natural states. Hence, rainwater harvesting supplement water for non-potable uses and, at the same time, contributes to control storm water runoff at the source. Therefore, the aim of this study was to assess the performance of a rainwater harvesting system (RHS) in storm water runoff control and also the simulation method with daily data, commonly used in design of rainwater harvesting reservoirs. For this, 1 minute time interval rainfall and flow rate continuous series were used for SWMM 5.1 calibration. Then, a continuous series of seven years of gauged precipitation was used to simulate the whole system (roof - "first-flush" tank - main tank) for different non-potable water demand scenarios and this serie also used data with 1 minute time interval. The assessment was based in terms of water saving efficiency, rainwater waste ratio, reliability and peak and volume reduction rates. At calibration phase, the Nash-Sutcliffe coefficient values obtained at continuous simulation of RHS were high (>0.94). At the assessment of the RHS at monitoring months, from July 2018 to March 2019, the volume and peak reductions were equal to 34% and 98%, respectively, being used rainwater volume by residents equivalents to 1.2% of average total consumption on January. At simulated period, from 2014 to 2020, the reduction rates were 45% to 48% (volume) and 98% (peak) in the six simulated scenarios. The best scenario, in terms of demand, was scenario  $50\% \times CR$  where the water saving efficiency was 0.38 and the reliability was 37%. As for the simulation method, with daily interval, for a full reliability of 90%, a daily demand of 4.3 liters/day was obtained, whereas in the continuous simulation, using SWMM, the demand was 2.4 liters/day, difference of approximately 40%. For the 90% reliability scenario, the volume and peak reductions were 13% and 95%, respectively. The relevance of monitoring the "first discharge" tank and also of the continuous simulations series with appropriate resolution was observed. The "first discharge" tank captures a part of the low intensity events and the used way of continuous simulation can represent hidden aspects at more simplified methods using daily data series without evaporation data for example. At the end of this study, it was possible to conclude that although there are challenges to reconcile the uses of rainwater harvesting, the adoption of this technique can be advantageous in storm water runoff mitigation and that, from continuous simulation with SWMM as reference, the simulation method with daily data can overestimate the volumes.

Keywords: Runoff; Rainwater harvesting; SWMM; Continuous simulation.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização do lote estudado	32
Figura 2 – Ilustração do lote estudado	33
Figura 3 - Ilustração do aparato de monitoramento	34
Figura 4 - a) Calha; b) Vertedor 1, sensor de nível e tranquilizadores de fluxo; c)	
Reservatórios principal (incluso sensor de nível) e reservatório de descarte; d) Verte	edor 2,
cujo os dados foram descartados	35
Figura 5 – Fluxograma que representa a estrutura geral da dissertação	36
Figura 6 – Detalhamento do procedimento metodológico	37
Figura 7 – Margem de erro das curvas dos vertedores 1 (a) e 2 (b)	39
Figura 8 - Evaporação média diária para cada mês	40
Figura 9 - Fluxos de água no sistema de aproveitamento de água de chuva	43
Figura 10 - Representação de uma sub-bacia pelo modelo SWMM	45
Figura 11- Configuração do modelo SWMM para simulação contínua do sistema comp	leto 48
Figura 12 - Critérios de separação de eventos no modelo SWMM 5.1	49
Figura 13 – Entradas e saídas do SAAP no evento 2 (02/07/2018)	55
Figura 14 - Reservatório principal ao longo do evento 2 (02/07/2018)	56
<b>Figura 15</b> - Volumes dos eventos 3, 6, 13 e 14	56
<b>Figura 16</b> - Evento 9: 08/11/2018	59
<b>Figura 17</b> - Evento 11: 10/12/2018	59
<b>Figura 18</b> - Evento 15: 18/10/2019	59
<b>Figura 19</b> - Evento 16: 21/11/2019	59
Figura 20 - Evento 17: 15/12/2019	59
Figura 21 - Evento 18: 19/12/2019	59
Figura 22 - Evento 19: 31/12/2019	60
Figura 23 - Evento 20: 20/01/2020	60
<b>Figura 24</b> - Evento 21: 23/01/2020	60
Figura 25 - Evento 1: 29/06/2018	63
Figura 26 - Evento 2: 02/07/2018	63
Figura 27 - Evento 4: 30/07/2018	64
Figura 28 - Evento 5: 31/07/2018	64
Figura 29 - Evento 7: 09/09/2018	64
Figura 30 - Evento 8: 08/11/2018	64
Figura 31 - Evento 10: 27/11/2018	64
Figura 32 - Evento 12: 15/12/2018	64
Figura 33 - Evento 05: 31/07/2018	65
Figura 34 - Evento 09: 08/11/2018	65
Figura 35 - Evento 11: 10/12/2018	65
Figura 36 - Evento 12: 15/12/2018	65
Figura 37 - Evento 21: 23/01/2020	66
Figura 38 - Evento 1 - 29/06/2018: (a) precipitação e vazões; (b) preenchimento dos	
reservatórios	67
Figura 39 - Evento 2 - 02/07/2018: (a) precipitação e vazões; (b) preenchimento dos	
reservatórios	68

Figura 40 - Evento 7 - 09/09/2018: (a) precipitação e vazões; (b) preenchimento dos	
reservatórios	.69
Figura 41 - Evento 12 - 15/12/2018: (a) precipitação e vazões; (b) preenchimento dos	
reservatórios	.70
Figura 42 - Calibração e validação do sistema completo por simulação contínua	.73
Figura 43 - Hidrogramas no SAAP, no período de monitoramento e com o modelo calibrad	do
	.74
Figura 44 - Comportamento do SAAP de julho/2018 a março/2019	.75
Figura 45 - Usos do SAAP e consumo de água na residência	.75
Figura 46 - Redução de volumes e vazões máximas de julho/2018 a março/2019	.75
Figura 47 - Redução de volumes e vazões máximas de julho/2018 a março/2019, em funçã	ίο
das classes de precipitação total (mm)	.76
Figura 48 - Redução de volumes e vazões máximas de julho/2018 a março/2019, em funçã	ίο
das classes de intensidade média (mm/hora)	.77
Figura 49 - Redução de volumes e vazões máximas de julho/2018 a março/2019, em funçã	ίο
das classes de intensidade máxima (mm/hora)	.78
Figura 50 - Boxplots de ER <sub>volume</sub> e ER <sub>Qmáx</sub> para: a) análise por eventos e b) simulação	
contínua	.79
Figura 51 – Simulação do evento 09/09/2018 (EV1)	.80
Figura 52 – Simulação contínua do evento 09/09/2018 (SC)	.80
Figura 53 – Simulação do evento 15/12/2018 (EV1)	.81
Figura 54 – Simulação contínua do evento 15/12/2018 (SC)	.81
Figura 55 - Desagregação do consumo de água não potável da residência substituível por	
água de chuva	.82
Figura 56 - Eficiência de economia de água e taxa de desperdício de água de chuva	.83
Figura 57 – Confiabilidade plena do SAAP	.84
Figura 58 - Demanda requerida e suprida pelo SAAP	.84
Figura 59 – Boxplots de ER <sub>volume</sub> e ER <sub>Qmáx</sub> referente aos cenários de demanda	.85
Figura 60 - Redução de volumes e vazões máximas na simulação de 2014 a 2020, em funç	ão
das classes de precipitação total (mm)	.86
Figura 61 - Distribuição de frequência dos eventos por intensidade média (mm/hora) e	
boxplots para as classes de intensidade média	.87
Figura 62 - Distribuição de frequência dos eventos por intensidade máxima (mm/hora) e	
boxplots para as classes	.88
Figura 63 - V <sub>descarte</sub> /V <sub>entrada</sub> em classes de precipitação total	.89
<b>Figura 64</b> - V <sub>descarte</sub> /V <sub>entrada</sub> em classes de intensidade máxima	.89
<b>Figura 65</b> - Distribuição de frequência das classes de precipitação total	.90
<b>Figura 66</b> - Distribuição de frequência das classes de intensidade máxima	.91
<b>Figura 67</b> - Boxplots de ER <sub>volume</sub> e ER <sub>Qmáx</sub> entre 2014 a 2020	.92
<b>Figura 68</b> - Eficiência de economia de água e taxa de desperdício de água da chuva nos sei	is
anos de simulação	.92
Figura 69 - Relação entre demanda e confiabilidade plena	.93
<b>Figura</b> 70 - ER <sub>volume</sub> e ER <sub>Qmáx</sub> para cenário com 90% de confiabilidade plena	.94
<b>Figura</b> 71 - Eficiência de economia de água e taxa de desperdício de água de chuva para	<b>c f</b>
С90%	.94

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros estimados inicialmente	45
Tabela 2 - Volumes e frequência dos usos de água de chuva na residência	51
Tabela 3 - Eventos separados	54
Tabela 4 - Resultados da calibração do modelo SWMM	57
Tabela 5 - Parâmetros calibrados	61
Tabela 6 - Parâmetros calibrados dos eventos selecionados	62
Tabela 7 - Resultados da validação	62
Tabela 8 - Valores calibrados do diâmetro do orifício do reservatório de descarte	66
Tabela 9 - Resumo dos eventos	71
Tabela 10 - Parâmetros do sistema completo	72
Tabela 11 - Parâmetros calibrados para o sistema completo e índices	72
Tabela 12- Demandas para 90% de confiabilidade plena	93
- •	

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Áreas Impermeáveis
AS/A	Áreas impermeáveis sem armazenamento em depressões
BMP	Do inglês Best Management Practice
СР	Confiabilidade Plena
CN	Curva-Número
CR	Cenário de Referência
EEA	Eficiência de economia de água
EPA	Do inglês U.S. The Environmental Protection Agency
ER <sub>Qmáx</sub>	Eficiência do sistema na retenção de vazão máxima
ER <sub>VOLUME</sub>	Eficiência do sistema na retenção de volume
EV1	Análise por eventos
IUWM	Do inglês Integrated Urban Water Management
LID	Do inglês Low Impact Development
NBR	Normas Brasileiras
ի <i>imp</i>	Coeficiente de rugosidade de Manning (superfícies impermeáveis)
<i>Ъperm</i>	Coeficiente de rugosidade de Manning (superfícies permeáveis)
NSE	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
O <sub>F</sub>	Taxa de desperdício de água de chuva
Р	Precipitação
P1MC	Programa 1 Milhão de Cisternas
PAimp	Capacidade de armazenamento em depressões (superfícies impermeáveis)

PAperm	Capacidade de armazenamento em depressões (superfícies permeáveis)
P1MC	Programa 1 Milhão de Cisternas
PVC	Policloreto de Vinila
Qdemanda	Demanda para uso da água do reservatório
Qdescarte	Vazão de saída pelo reservatório de descarte
Q <sub>ext</sub>	Vazão de transbordamento do reservatório principal
Q <sub>RP</sub>	Vazão que entra no reservatório principal
QT	Vazão do telhado que entra no vertedor 1
Qv1	Vazão que sai do vertedor 1 e entra no reservatório de descarte
RHS	Rainwater Harvesting System
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
RPD <sub>Qmáx</sub>	Diferença relativa percentual entre vazões máximas
RPD <sub>VOLUME</sub>	Diferença relativa percentual entre os volumes
SAAP	Sistema de Aproveitamento de Águas Pluviais
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SUDS	Do inglês Sustainable Urban Drainage Systems
SWMM 5.1	Do inglês Storm Water Management Model 5.1
Wc	Largura característica
WSUD	Do inglês Water-Sensitive Urban Design

			SUMÁRIO
1		INTRO	DUÇÃO 17
2		OBJET	IVOS 19
	2.1	Obje	etivo Geral 19
	2.2	Obje	etivos Específicos19
3		REVIS	ÃO BIBLIOGRÁFICA 20
	3.1	Drer	nagem Urbana Sustentável 20
	3.2	Apro	oveitamento de Águas Pluviais 21
		3.2.1	Visão geral
		3.2.2	Aproveitamento de águas pluviais no Brasil
	3.3	Siste	ema de Aproveitamento de Águas Pluviais
		3.3.1	Descrição geral
		3.3.2	Área de captação
		3.3.3	Pré-tratamento
		3.3.4	Armazenamento de água de chuva25
		3.3.5	Usos e demandas27
		3.3.6	Aspectos qualitativos27
	3.4	Efeit	tos de Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais na Retenção de
Esc	oame	ento 28	
4		MATE	RIAIS E MÉTODOS
	4.1	Siste	ema de Aproveitamento de Águas Pluviais
		4.1.1	Aparato experimental 33
	4.2	Etap	as Metodológicas
	4.3	Obte	enção de Dados
		4.3.1	Precipitação
		4.3.2	Vazões de entrada e saída do sistema
		4.3.3	Nível de água no interior do reservatório
		4.3.4	Evaporação 39
		4.3.5	Demanda de água 40
		4.3.5.1 4.3.5.2	Consumo de água da residência por meio de leituras no hidrômetro41 Consumo mensal de água41

		4.3.5.3 <b>4.3.6</b>	Acompanhamento dos usos do sistema
	4.4	Avali	ação do SAAP para o Período Monitorado 42
		4.4.1	Análise por eventos
		4.4.1.1 4.4.1.2 4.4.1.3 4.4.1.4 máximas <b>4.4.2</b>	Seleção dos eventos
	4.5	4.4.2.1 demanda <b>Avali</b>	Avaliação do desempenho na detenção de escoamento e atendimento à 48 <b>ação do SAAP para o Período Simulado de 2014 a 2020 50</b>
	4.6	Análi	se do Método da Simulação com Intervalos Diários 52
5		RESULT	TADOS E DISCUSSÃO 53
	5.1	Avali	ação do SAAP para o Período Monitorado 53
		5.1.1	Análise por eventos
		5.1.1.1 5.1.1.2 5.1.1.3 5.1.1.4 pluviais r <b>5.1.2</b>	Seleção dos eventos53Calibração e validação do modelo chuva-vazão do SWMM no telhado .56Calibração e validação do modelo SWMM no SAAP64Avaliação do desempenho do sistema de aproveitamento de águasna retenção de volume e vazões máximas.66Simulação contínua71
	5.2	5.1.2.1 5.1.2.2 escoamer 5.1.2.3 período r <b>Avali</b>	Calibração e validação do modelo SWMM no SAAP
	5.3	Análi	se do Método da Simulação para o Período de 2014 a 2020 93
	6. (	CONCLU	SÕES E RECOMENDAÇÕES 95
REF	ERÍ	ÈNCIAS .	
APÊ	NDI	CEA-I	eituras semanais do hidrômetro da unidade residencial 105.
APÊ	NDI	ICE B – L	inha do tempo do procedimento metodológico 106
APÊ	NDI	CE C – C	Comportamento do SAAP nos eventos monitorados 107
ANE	XO	A – N	Aétodos de cálculo para dimensionamento de reservatórios de
apro	veita	amento d	e águas pluviais 111

ANEXO B – Leituras de hidrômetro da unidade residencial	. 113
ANEXO C – Acompanhamento dos usos de água de chuva no SAAP	. 114

### 1 INTRODUÇÃO

Por séculos, a gestão das águas pluvias seguiu os princípios de controle, em que os sistemas de drenagem, compostos basicamente por tubulações e calhas, possuíam a função de encaminhar o escoamento de águas pluviais o mais rápido possível para fora das áreas urbanas, descarregando em grandes corpos d'água, frequentemente transportando contaminantes e com pouca ou nenhuma atenuação (BELL, 2015; BURNS et al., 2012; DELLEUR, 2003). Desse modo, observou-se nas últimas décadas, o surgimento de abordagens propondo uma mudança de paradigma, onde as águas pluviais passam de um incômodo a ser resolvido para um recurso multifuncional, sendo, portanto, reconhecido que a restauração da qualidade da água e de um regime de vazões o mais próximo possível do natural não beneficia somente o meio ambiente, mas também é capaz de promover uma melhor habitação da paisagem urbana (FLETCHER, ANDRIEU E HAMEL, 2013).

Dentro deste enfoque, alguns do termos utilizados são: medidas compensatórias, *Best Management Practices* (BMP), *Low impact development* (LID), *Water sensitive urban design* WSUD e *Sustainable urban drainage systems* (SUDS) (FLETCHER et al., 2015). O aproveitamento de águas pluviais é umas das técnicas do desenvolvimento de baixo impacto (LID) para a promoção de uma paisagem ambientalmente funcional (COFFMAN, 2000). O volume de água de chuva armazenado é capaz de atender uma parcela do consumo correspondente à água não potável, reduzindo, portanto, os volumes captados das fontes tradicionais de abastecimento (ABU-ZREIG, ABABNEH E ABDULLAH, 2019; CUSTÓDIO E GHISI, 2019; GHAFFARIANHOSEINI et al., 2016). Além disso, os sistemas de aproveitamento de água de chuva contribuem como medida para redução da magnitude e frequência das vazões máximas (CAMPISANO et al., 2017).

Os efeitos do aproveitamento de águas pluviais na redução do escoamento superficial têm sido verficados por diversos autores (AKTER, TANIM E ISLAM, 2020; DEITCH E FEIRER, 2019; FRENI E LIUZZO, 2019; TAMAGNONE, COMINO E ROSSO, 2020; TESTON et al., 2018), de modo que se observa uma dificuldade de compatibilizar as funções do sistema, já que para o atendimento à demanda, os reservatórios devem manter um volume disponível, enquanto que para que contribuam como medida de controle de alagamentos são necessários volumes de espera suficientes para o armazenamento da próxima chuva (DORNELLES, 2012; HENTGES, 2013; JENSEN et al., 2010; PALLA, GNECCO E BARBERA, 2017; PETRUCCI et al., 2012).

Outro fator apontado por autores é a variedade de métodos de dimensionamento de

reservatórios tais como método de Rippl, método da simulação, método Azevedo Neto, método prático alemão, prático inglês e prático australiano que resultam em volumes discrepantes entre si, ainda que sejam consideradas as mesmas premissas, como observado por Fonseca e Menezes Filho (2019), de modo que o estudo dos métodos de dimensionamento faz-se necessário para o aprimoramento destes em função dos seus objetivos.

Nessa perspectiva, Campisano e Modica (2015) apontaram que a escala de tempo utilizada na simulação pode influenciar de maneira significativa a estimativa do volume do reservatório e a confiabilidade do sistema, de modo que simulações com dados mensais fornecem uma avaliação imprecisa da eficiência de economia de água, sendo recomendada a adoção de escala diária quando busca-se apenas atender a demanda. Já para a identificação do efeito desses sistemas na redução de escoamento, a resolução diária torna-se insuficiente, sendo necessário um intervalo de tempo inferior a um dia.

À vista disso, o presente estudo busca contribuir tanto na avaliação de desempenho de sistemas de aproveitamento de águas pluviais na redução do escoamento superficial e atendimento à demanda, a partir de dados gerados em um aparato experimental e também em simulações, quanto na investigação do aprimoramento do método de simulação a partir da utilização de dados de precipitação com resolução temporal compatível com o objetivo do dimensionamento.

### **2 OBJETIVOS**

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliação do comportamento de um sistema de aproveitamento de águas pluviais em uma edificação unifamiliar no município de Maceió-AL para fins não potáveis quanto ao impacto na geração de escoamento superficial.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a calibração e a validação do modelo SWMM para a simulação de sistemas de aproveitamento de águas pluviais para fins não potáveis com séries contínuas;

- Avaliar o desempenho do sistema de aproveitamento de águas pluviais em termos de eficiência de economia de água frente à demandas de uso da água diferentes;

- Avaliar os efeitos da adoção de sistemas desta natureza na atenuação da vazão de pico e do volume de escoamento superficial frente às demandas de uso da água diferentes;

- Analisar o método da simulação a partir de dados diários para representar o comportamento de sistema de aprovetamento de água de chuva.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### 3.1 Drenagem Urbana Sustentável

Embora tenha proporcionado benefícios socioeconômicos, a aceleração do desenvolvimento urbano desencadeada na segunda metade do século XX resultou numa pressão sobre os ecossistemas terrestres e aquáticos, onde se destacam a perda da biodiversidade e a alteração do ciclo hidrológico. A alteração no ciclo hidrológico é causada pela remoção da vegetação e impermeabilização do solo, pois reduzem a interceptação, evapotranspiração e infiltração, o que acarreta em um aumento do volume de escoamento, da vazão de pico e, assim, na frequência de alagamentos (CHOW, 1965). Dentre os prejuízos provocados pelos alagamentos, verifica-se tanto perdas econômicas, devido à pausa das atividades e a perda de bens, quanto perdas de vidas humanas, e ainda o risco de contaminação por doenças de veiculação hídrica (TUCCI, 2005).

A fim de gerenciar o risco de alagamentos foram implementados, a partir de um conceito higienista, sistemas de drenagem compostos basicamente por tubulações e calhas, capazes de encaminhar o escoamento de águas pluviais para o corpo hídrico receptor, ou seja, buscou-se transferir a água o mais rápido possível para fora das áreas urbanas (DELLEUR, 2003; GOLDENFUM et al., 2007). Esta abordagem convencional é fundamentada na eficiência da drenagem, já que, os volumes escoados das superfícies impermeáveis são encaminhados diretamente às águas receptoras, tendo, portanto, pouca ou nenhuma atenuação e tratamento (BURNS et al., 2012).

No que se refere à abordagem tradicional brasileira, Souza, Moraes e Borja (2013) apontam que os sistemas convencionais foram planejados e dimensionados para falhar, já que são utilizados elementos com considerável grau de incerteza, como: tempos de retorno (possível falha na ocorrência de eventos com tempo de recorrência superior ao adotado no projeto), curvas de intensidade-duração-frequência datadas e coeficientes de escoamento não condizentes com as condições atuais da bacia. Além dessas variáveis, há ainda a interferência de resíduos sólidos e efluentes domésticos, situação que torna evidente a necessidade de uma gestão sustentável, onde as águas pluviais passariam de um incômodo a ser removido para um recurso multifuncional com potenciais benefícios para a sociedade e meio ambiente (MITCHELL, 2006).

A transição de perspectiva sobre as águas urbanas é abordada por Brown, Keath e Wong (2009), que propõe uma sequência de estágios baseados em contratos hidrossociais para o alcance de uma gestão sustentável, a partir do conceito de cidade abastecida ("*Water Supply* 

*City*"), em que há basicamente a garantia de água potável até atingir o conceito de cidade sensível à água (*"Water Sensitive City*"), em que o contrato hidrossocial inclui proteção ambiental, abastecimento de água, controle contra enchentes, esgotamento sanitário, saúde pública e sustentabilidade econômica, amparado por um regime institucional flexível.

As terminologias variam: Desenho Urbano Sensível à Água (*Water-Sensitive Urban Design* - WSUD) na Austrália, Sistemas de Drenagem Sustentável (*Sustainable Urban Drainage Systems* - SUDS), na Grã-Bretanha, e Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (*Low Impact Development* - LID), na América do Norte e Nova Zelândia, conforme Fletcher et al., 2015). Segundo estes autores, há uma sobreposição significativa entre os diversos termos, uma vez que geralmente são amparados por dois princípios gerais: i) mitigação de alterações na hidrologia local e evolução para um regime de vazões o mais próximo possível do natural e ii) melhoria da qualidade da água e redução de poluentes.

Os termos refletem o engajamento de diferentes áreas e carregam particularidades, de forma que se diferem entre aqueles que descrevem técnicas (medidas de controle e técnicas alternativas), os que descrevem princípios gerais (LID), *Water Sensitive Cities* e *Integrated Urban Water Management* (IUWM) e os que evoluíram a partir de técnicas e práticas (*Best Management Practice* (BMP), medidas de controle na fonte, SUDS e técnicas alternativas). Além disso, foi apontado por Fletcher et al., (2015) em um estudo a respeito das terminologias que entre 2005 e 2012 o termo mais citado foi LID, sendo que 25% das citações incluíam referência à arquitetura, enquanto 58% das citações ao WSUD incluíam o termo "social" ou "econômico".

O desenvolvimento de baixo impacto (LID) promove a criação de uma paisagem ambientalmente funcional que imita o regime hidrológico natural da bacia hidrográfica a partir de quatro princípios básicos: i) minimização dos impactos através da redução da utilização de canalizações e impermeabilização do solo; ii) adoção de técnicas de armazenamento de pequeno porte dispersas em toda a bacia; iii) manutenção do tempo de concentração do período prédesenvolvimento; e iv) implementação de programas de educação ambiental incentivando o uso de medidas de prevenção da poluição. Dentre as técnicas do LID, têm-se: biorretenção, trincheiras de infiltração, telhado-verde, valas vegetadas e reservatórios de água de chuva (COFFMAN, 2000).

### 3.2 Aproveitamento de Águas Pluviais

3.2.1 Visão geral

O aproveitamento de água de chuva é uma prática realizada há milhares de anos. Na Jordânia, por exemplo, as primeiras cisternas foram escavadas na Idade do Bronze, onde a água era coletada durante a estação chuvosa para suprir as necessidades da temporada seca. Na Palestina, os sistemas de armazenamento de água de chuva eram a principal ou até a única fonte de água potável tanto em épocas pacíficas quanto nas guerras (ABDELKHALEQ E ALHAJ AHMED, 2007). Na América pré-colombiana, o povo inca já utilizava reservatórios e sistemas de banho, onde a água era direcionada através de condutos perfurados em rochas (HELLER E PÁDUA, 2006). Apesar de sua ampla utilização nas civilizações antigas, com o aumento da demanda e a adoção de critérios de potabilidade, a captação de água da chuva se tornou uma técnica alternativa de abastecimento, sendo priorizados mananciais superficiais e fontes subterrâneas, de forma que a técnica passou a ser mais utilizada apenas no meio rural e em locais isolados (AZEVEDO NETTO et al., 1973).

Nas últimas décadas, a partir da crescente preocupação com a segurança hídrica, o aproveitamento de águas pluviais passou a ser incentivado a fim de aliviar os sistemas de abastecimento de água a partir da redução do consumo de água potável já que, conforme Ghaffarianhoseini et al., (2016), usos não potáveis como: descarga do vaso sanitário, lavanderia e irrigação representam cerca de 80% do consumo geral de água das famílias. Assim, essa parcela pode ser provida por reservatórios de água de chuva para fins não potáveis. Campisano e Lupia (2017) verificaram uma economia de água de 38 a 65% na área urbana de Roma a partir do uso de águas pluviais na descarga de vasos sanitários em residências considerando reservatórios de 1 m³ até 50 m³, e, além disso, uma economia superior a 20% em um terço dos sistemas utilizados para hortas domésticas.

Na Alemanha, em razão das políticas de incentivo e subsídios financeiros aplicados nas últimas décadas, aproximadamente dois terços das novas edificações unifamiliares possuem sistemas de aproveitamento, com destaque na promoção dessa técnica para uso doméstico (SCHUETZE, 2013). No Japão, foi observado um aumento de 10 vezes no número de instalações de 1990 a 2012 após a introdução do apoio financeiro governamental (CAMPISANO et al., 2017).

Na Austrália, país onde os conceitos de "Desenho Urbano Sensível à Água" e "Cidade Sensível à Água" foram apresentados ao mundo em 2004, cerca de 1,7 milhão de famílias instalaram reservatórios de água de chuva, volume aproximadamente equivalente a 8% do uso doméstico entre 2013 e 2014, o aumento na implementação destes sistemas é atribuído a regulamentos e descontos concedidos por autoridades governamentais (CAMPISANO et al., 2017; FLOYD et al., 2014).

Sabendo, como já visto anteriormente, que o "Desenho Urbano Sensível à Água" tem implicações no manejo de águas pluviais, e consequentemente no combate aos alagamentos, pode-se pensar no uso multifuncional dos dispositivos de aproveitamento de águas de chuva, ou pelo menos o efeito deles, pensados primariamente para o uso da água para fins não potáveis, no controle da geração do escoamento superficial. As pesquisas no Brasil já avançam nesse entendimento. O Brasil, conforme Davidovitsch (2020), aparece entre os dez países que mais publicam sobre técnicas LID. No entanto, mais da metade das publicações sobre coleta de água da chuva não abordam, necessariamente, o potencial de controle de cheias.

#### 3.2.2 Aproveitamento de águas pluviais no Brasil

Quanto às experiências e estudos no Brasil, o potencial de economia de água potável pelo uso de água da chuva é bastante variável devido às diferenças entre as regiões geográficas: norte (100%), nordeste (61%), sudeste (48%), sul (82%) e centro-oeste (74%) (GHISI, 2006). Custódio e Ghisi (2019) avaliaram o potencial de economia de água potável a partir de mais de 33 mil simulações em uma área residencial de Joinville-SC. Os autores concluíram que o potencial médio foi de 18,5% quando considerado uso da água de chuva apenas em vasos sanitários e atingiu 40,8% em cenários onde a água também fosse utilizada em máquinas de lavar roupas.

Na região semiárida do nordeste brasileiro, Santos e Farias (2017) avaliaram o potencial de economia de água potável nas áreas urbanas de 71 municípios da região agreste do estado do Pernambuco. Os resultados indicaram que a economia de água fornecida pela rede pública poderia atingir 25% caso os sistemas de captação de água de chuva fossem incorporados nas práticas locais, com possível redução no número de dias de racionamento de abastecimento de água potável ou, alternadamente, redução na pressão sob o abastecimento público.

No que se refere ao papel do poder público, Gomes, Pena e Heller (2012) faz uma discussão a respeito da distribuição de responsabilidades por parte dos beneficiários e do governo baseado no Programa 1 Milhão de Cisternas (P1MC). A partir de uma pesquisa com 623 beneficiários em 68 municípios os resultados indicaram que a operação e manutenção desta tecnologia depende muito do nível de responsabilidade individual das famílias. No entanto, a responsabilidade do poder público na melhoria dos telhados das residências, no aumento dos volumes das cisternas e na instalação de dispositivos para descarte das primeiras águas são essenciais para o funcionamento do programa.

Nesta perspectiva, quanto à normatização e legislação, o país conta com a ABNT NBR 15527/2019 que possui caráter normativo e trata do aproveitamento de água de chuva em

coberturas para fins não potáveis (ABNT, 2019), a Lei nº 13.501/2017 que incluiu o aproveitamento de águas pluviais como um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997) (BRASIL, 1997; BRASIL, 2017) e a Lei nº11.445/2007 (alterada pela Lei nº 14.026/2020) que estabelece como um dos princípios fundamentais o estímulo ao aproveitamento de águas de chuva (BRASIL, 2007; BRASIL, 2020).

Segundo Pacheco et al. (2017), dos 26 estados e o Distrito Federal, apenas 26% apresentam legislação a respeito do uso de água de chuva, o que corresponde a sete estados (Distrito Federal, Goiás, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro e São Paulo). Já com relação às capitais, essa porcentagem sobe para 68%, com um total de dezessete capitais (Belo-Horizonte (MG), Cuiabá (MT), Curitiba (PR), Florianópolis (SC), Fortaleza (CE), Goiânia (GO), João Pessoa (PB), Manaus (AM), Porto Alegre (RS), Recife (PE), Rio Branco (AC), Rio de Janeiro (RJ), Salvador (BA), São Paulo (SP), Teresina (PI) e Vitoria (ES)). Logo, nota-se que as políticas que abordam essa temática no país são dispersas e as legislações locais são mais comuns.

O principal objetivo das legislações é o atendimento à demanda de água não potável. No entanto, metade dos regulamentos das capitais menciona a redução do escoamento como uma motivação importante para a instalação dos sistemas de aproveitamento. A cidade pioneira a tornar obrigatória a execução de reservatórios a partir de uma determinada área impermeável foi São Paulo - SP, por meio da Lei nº 13.276/2002. A partir desta, outras cidades adotaram critérios semelhantes (PACHECO et al., 2017).

### 3.3 Sistema de Aproveitamento de Águas Pluviais

#### 3.3.1 Descrição geral

O sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP) ocorre basicamente da seguinte forma: a água da chuva é coletada por meio de superfícies impermeáveis como telhados, coberturas e pisos. Posteriormente, é conduzida por meio de condutores (tubulações e calhas) a um sistema de pré-tratamento. Em seguida, é armazenada em reservatórios que podem ser construídos de diversos materiais, tais como concreto armado, alvenaria de tijolos, plástico, aço e outros.

### 3.3.2 Área de captação

Conforme a definição da ABNT (2019), a área de captação é a superfície impermeável de cobertura, projetada na horizontal, onde a água é captada. A utilização de telhados para a captação de água da chuva tem sido muito comum, uma vez que, a água escoada é menos

poluída que a proveniente de outras superfícies impermeáveis como estradas, estacionamentos e pisos (GHAFFARIANHOSEINI et al., 2016). Nos telhados, podem ser utilizando diversos materiais, como: telhas cerâmicas, telhas de fibrocimento, de zinco, de ferro galvanizado, de concreto armado, de plásticos, telhado plano revestido com asfalto e outros (TOMAZ, 2009).

As áreas de captação possuem influência sob o desempenho de SAAPs em termos qualitativos e quantitativos. A qualidade da água escoada está sujeita às condições ambientais e ao tipo de material do telhado (FARRENY et al., 2011). De maneira similar, as características da cobertura (tamanho, material e inclinação) também influenciam na quantidade de água a ser armazenada, tendo em vista que quanto maior a área de captação mais água precipitada será coletada e, portanto, maior possibilidade de suprir a demanda (FARRENY et al., 2011; YANG, CHOW E BURNETT, 2002).

#### 3.3.3 Pré-tratamento

Em sistemas de aproveitamento de águas pluviais a qualidade da água escoada pelos telhados pode ser afetada por materiais que se acumulam nas áreas de captação durante a temporada seca, como: sólidos inertes, poeira e fezes de pássaros e ratos. Desta forma, é recomendada a adoção de um sistema de pré-tratamento, como: grades, telas, peneiras, filtros e principalmente o descarte das primeiras águas ("*First flush*") que promovem a lavagem do telhado (AHMED et al., 2008; TOMAZ, 2009).

A NBR 15.527/2019 (ABNT, 2019) impõe a utilização de dispositivos para remoção de detritos e recomenda dispositivos automáticos de descarte do escoamento inicial, sendo considerado 2 mm de precipitação, em caso de ausência de dados. Alves et al. (2021) verificaram a partir de dois sistemas de aproveitamento de água de chuva com first-flush de 0,5 e 0,3 mm que as águas nos pontos de aproveitamento apresentavam resultados de turbidez, sólidos totais dissolvidos e cloreto em conformidade com a NBR 15.527/2019 (ABNT, 2019).

#### 3.3.4 Armazenamento de água de chuva

A água de chuva coletada dos telhados é conduzida para um reservatório, o tamanho deste depende de diversos fatores, dentre eles: regime de chuvas local, área de captação, demanda e nível de risco aceitável (COHIM, GARCIA E KIPERSTOK, 2008). Segundo Abu-Zreig, Ababneh e Abdullah (2019), este componente corresponde ao item mais caro do sistema, representando 95% dos custos totais da instalação. Logo, um dimensionamento que proporcione o menor tamanho de tanque possível e que satisfaça as necessidades dos usuários é extremamente valioso.

No dimensionamento do volume do reservatório pode ser levado em consideração: i)

apenas o suprimento de água, ou seja, o volume máximo de água de chuva potencialmente coletado pela área de cobertura; ii) a demanda, em que considera a quantia de água necessária para atender os usuários durante determinado período de tempo; iii) e a integração das duas abordagens, buscando-se o armazenamento mínimo necessário para satisfazer demanda e oferta durante um período específico (ABU-ZREIG, ABABNEH E ABDULLAH, 2019). A última lógica é recomendada para o dimensionamento de sistemas em meios urbanos, pois nestes locais frequentemente existem sistemas públicos de abastecimento de água e não há áreas livres para a instalação de grandes volumes e, assim, os SAAPs funcionam como fonte complementar (COHIM, GARCIA E KIPERSTOK, 2008).

Uma tabela no Anexo A descreve os métodos de cálculo para dimensionamento de reservatórios de águas pluviais apresentados na NBR 15527/2007. A revisão desta norma, realizada em 2019, não apresenta nenhum método de cálculo, logo, fica a critério do projetista (ABNT, 2019).

Diversos trabalhos realizaram a comparação dos volumes de reservatórios dimensionados pelos métodos apresentados no Anexo A. Um deles é o estudo comparativo realizado por Amorim (2008), em que verificou-se uma dispersão entre os métodos, variando de 23 m<sup>3</sup>, pelo método de dias consecutivos sem chuvas, até 127 m<sup>3</sup>, pelo método prático de Azevedo Neto. Logo, o autor concluiu que a adoção do método deve estar condicionada aos interesses finais de implantação e à região de estudo. À vista disso, Dornelles (2012) propôs uma metodologia de dimensionamento a partir de ábacos e tabelas obtidos a partir da técnica de Monte Carlo para construção de séries sintéticas utilizadas na simulação, de modo a obter índices de desempenho em função do volume e da demanda estimada. Estes ábacos foram confeccionados a partir dos diferentes regimes pluviométricos brasileiros para todas as capitais brasileiras e o distrito federal.

Um estudo mais recente, realizado por Fonseca e Menezes Filho (2019), compara os volumes de reservatórios obtidos pelos métodos da NBR 15527/2007 e de Dornelles (2012) para uma residência unifamiliar hipotética nas três capitais brasileiras: Belo Horizonte, Goiânia e Porto Alegre. Os autores observaram que entre os métodos de Azevedo Neto, prático alemão, prático inglês e prático australiano os valores eram muito discrepantes, variando entre 4,89 m<sup>3</sup> até 39 m<sup>3</sup> para Belo Horizonte, enquanto, o método da simulação e o de Dornelles ofereceram o mesmo volume, mas com valores distintos de eficiência. Logo, os autores concluíram que esses dois últimos métodos propiciam resultados mais seguros, possibilitando a análise dos índices de desempenho no passar do tempo.

### 3.3.5 Usos e demandas

A água de chuva pode ser utilizada para diversos fins, os quais variam desde consumo humano até a lavagem de superfícies. Contudo, dado o baixo custo da água fornecida pelos sistemas de abastecimento público para uso residencial, o uso para fins potáveis se torna economicamente inviável no meio urbano e tem sido mais utilizado em ambientes rurais (GOLDENFUM, 2006).

Na construção de sistemas de aproveitamento de águas pluviais é fundamental o conhecimento da parcela do consumo que pode ser substituída por água de chuva. A NBR 15527/2019 estabelece os usos não potáveis: sistemas de resfriamento a água; descargas de bacias sanitárias e mictórios; lavagem de veículos; lavagem de pisos; reserva técnica de incêndio; uso ornamental e irrigação paisagística (ABNT, 2019).

Uma estimativa dos volumes de cada uso, assim como tabelas de desagregação dos usos, foram realizadas por diversos autores a fim de contribuir para a definição do perfil de consumo e usos finais da água em residências em diferentes localidades, a partir de diferentes metodologias como: instalação de data loggers junto com hidrômetros em pontos de utilização, aplicação de questionários e leituras diárias de hidrômetros (BARRETO, 2008; LEITE E MOURA, 2019; SANTOS E CESAR, 2016; SILVA, 2013).

Os principais usos de água não potável em residências são: descargas em bacias sanitárias e mictórios; irrigação de jardim; lavagem de pisos e veículos. Dentre estes, o uso para descargas sanitárias demanda instalações hidráulicas mais robustas no sistema de aproveitamento de águas pluviais, ao passo que os outros podem ser efetuados com baldes e mangueiras. Os usos como irrigação de jardim, lavagem de pisos e veículos dependem de informações particulares, seja sobre a vegetação, questões climáticas ou comportamento do usuário.

#### 3.3.6 Aspectos qualitativos

A qualidade da água em um sistema de aproveitamento de água de chuva engloba quatro etapas: a) antes de atingir o solo; b) após o escoamento sobre a área de cobertura; c) a água armazenada no reservatório e d) no ponto de consumo. A qualidade da água que cai sobre o telhado está relacionada às características ambientais, que incluem localização geográfica, condições meteorológicas (intensidade, duração e tipo de chuva, regime de ventos, estação do ano e outros), presença ou não de vegetação e poluição atmosférica (GHAFFARIANHOSEINI et al., 2016; SILVA et al., 2020; TOMAZ, 2009). No que concerne à qualidade no ponto de consumo, a NBR 15527/2019 apresenta os parâmetros de qualidade da água de chuva para usos

mais restritivos não potáveis, são eles: Escherichia coli, turbidez e pH (ABNT, 2019).

# 3.4 Efeitos de Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais na Retenção de Escoamento

Os estudos a respeito dos sistemas de aproveitamento de águas pluviais tratam, em sua maioria, do dimensionamento dos reservatórios, do potencial de economia de água potável e da viabilidade econômica de implantação. Neste sentido, nota-se a necessidade de ainda mais pesquisas que abordem suas consequências na drenagem urbana (DAVIDOVITSCH, 2020; TESTON et al., 2018b). Diversos trabalhos já apontam impactos positivos na drenagem de águas pluviais, tais como: atenuação das vazões de pico e retenção do escoamento, assim como variáveis que possuem influência sobre a eficiência desses sistemas (AKTER, TANIM E ISLAM, 2020; CAMPISANO E MODICA, 2015; QUINN, ROUGÉ E STOVIN, 2021).

Um exemplo de estudo de caso experimental foi realizado por Petrucci et al. (2012) na região leste de Paris, onde foram implantados reservatórios de água de chuva em um terço das propriedades privadas a fim de evitar o transbordamento das redes de drenagem. A análise utilizou o modelo SWMM 5.1 e foram realizadas duas campanhas de medição, antes e após a instalação do sistema. Os autores verificaram alterações no uso do solo da bacia hidrográfica entre as medições (2005 e 2008) e que, embora tenham efeito sob eventos casuais de chuva, os reservatórios foram insuficientes e pequenos demais para evitar o transbordamento das redes de drenagem na ocorrência de chuvas fortes. Burns et al. (2015) avaliaram o desempenho de doze reservatórios de água de chuva instalados em residências individuais quanto à redução de consumo de água da rede de abastecimento e quanto à retenção de escoamento. Os autores verificaram uma dificuldade na retenção de águas pluviais por esses sistemas e apontou para a necessidade de projetar sistemas de aproveitamento de água de chuva com múltiplos objetivos.

A maioria dos estudos a respeito de sistemas de aproveitamento de águas pluviais e retenção de escoamento são realizados a partir de simulação hidrológica-hidráulica, alguns a partir da análise baseada em eventos e hidrogramas de projeto (DORNELLES, 2012; SILVA, 2016) e outros a partir de simulação contínua (CAMPISANO E MODICA, 2015; HENTGES, 2013; JAMALI, BACH E DELETIC, 2020; PALLA, GNECCO E BARBERA, 2017; PALLA, GNECCO E LANZA, 2011).

A simulação de eventos de projeto embora possua maior praticidade acarreta na simplificação de processos hidrológicos e, por essa razão, a simulação contínua vem sendo adotada a fim de considerar os balanços de umidade do solo da bacia (perdas por evaporação e infiltração) e representar a dinâmica dos reservatórios de água de chuva de forma direta, ou

seja, sem a necessidade de suposições ou variações das condições iniciais do SAAP (BOUGHTON E DROOP, 2003; FLEISCHMANN et al., 2019; QUINN, ROUGÉ E STOVIN, 2021). Quanto aos intervalos de tempo considerados na simulação contínua, Campisano e Modica (2015) afirmam que a escala diária é suficiente apenas para avaliar a eficiência da economia de água do reservatório mas para o estudo da retenção do volume e redução de vazão de pico de água de chuva recomenda-se, no mínimo, uma escala horária.

O principal desafio apontado nos estudos sobre as possibilidades de redução de volume ou de cheias a partir da implantação de sistemas de aproveitamento de água de chuva é a dificuldade em conciliar o atendimento à demanda e a atenuação de cheias, já que para o atendimento aos usos é necessário uma quantidade de água disponível no reservatório e para que haja redução de pico necessita-se de volumes de espera suficientes para retenção de eventos de diferentes magnitudes (AKTER, TANIM E ISLAM, 2020; CAMPISANO E MODICA, 2015; DORNELLES, 2012; PALLA, GNECCO E BARBERA, 2017; PALLA, GNECCO E LANZA, 2011; QUINN, ROUGÉ E STOVIN, 2021).

Neste sentido, Deitch e Feirer (2019) avaliaram o potencial de armazenamento de água da chuva na atenuação do escoamento superficial sob quatro cenários por meio da soma das áreas dos potenciais locais de captação de água de chuva considerando tanques de diferentes volumes. Os resultados do estudo mostraram uma mitigação significativa em locais de densa habitação, mas somente se houver participação significativa das residências e os tanques armazenarem volumes de água suficientes. No estudo realizado por Dornelles (2012), a simulação matemática para dois padrões de habitação residencial (padrão classe alta e popular) realizada em bacias hipotéticas na cidade de Porto Alegre - RS indicou uma pequena redução no volume do hidrograma, cerca de 6% para casas populares, assim, a ineficácia na redução do pico de vazão na rede pluvial, nem mesmo em termos temporais (atrasando ou adiantando o momento de ocorrência do pico). O autor aponta que este resultado pode ser explicado pelo próprio objetivo do aproveitamento de água de chuva que foi apenas de atender à demanda de água. Logo, não garantiu volumes de espera suficientes para causar efeito no pico de vazão. De forma similar, Hentges (2013) aponta que a simulação realizada indicou que os volumes dimensionados conforme a demanda residencial não asseguram volumes de espera suficientes para o amortecimento, além de gerar extravasamentos que excedem a vazão de restrição na saída do lote permitida pelo município de Porto Alegre - RS.

Jensen et al. (2010) concluíram que a economia de água e o controle de águas pluviais não são objetivos conflitantes dos SAAP embora tamanhos de reservatórios diferentes geralmente são necessários para obter o benefício ideal para cada objetivo. Palla, Gnecco e Barbera (2017) avaliaram o desempenho de SAAPs em termos de eficiência de economia de água e redução de volume e vazão de pico a partir de modelagem hidrológico-hidráulica, utilizando EPA SWMM, em um lote residencial de Gênova, Itália.

A fim de obter discussões mais objetivas a respeito do desempenho de SAAP, indicadores adimensionais que relacionam parâmetros pluviométricos e parâmetros de dimensionamento foram definidos por Dixon, Butler e Fewkes (1999), e adotados por Palla, Gnecco e Barbera (2017); Palla, Gnecco e Lanza (2011) e Sampaio e Alves (2017). São eles: eficiência de economia de água, definida como a relação entre a somatória do volume de água que poderia ser substituída por água de chuva, e taxa de desperdício de água de chuva, definida como a relação entre a somatória do volume, definida como a relação entre a somatória do como a relação entre a somatória de chuva, definida como a relação entre a somatória do volume de água que poderia ser substituída por água de chuva, e taxa de desperdício de água de chuva, definida como a relação entre a somatória do volume de água de chuva extravasado do reservatório, quando ele está completamente preenchido e a somatória do volume de água de chuva captado.

A avaliação de Palla, Gnecco e Barbera (2017) foi realizada a partir da comparação de dois cenários: a) sem armazenamento de água de chuva e b) instalação de quatro reservatórios para abastecimento das descargas das bacias sanitárias e dimensionados com profundidade de água efetiva de 2 metros. A partir dos dados de precipitação com intervalos de 1 minuto e uma série histórica de 26 anos, os autores verificaram que para os 2.125 eventos de chuva analisados as taxas médias de redução de pico e volume foram de 33% e 25%, respectivamente. Observouse ainda, uma possível influência da precipitação no desempenho hidrológico, sobretudo em eventos com mais 20 mm.

A influência da magnitude dos eventos de chuva na retenção do escoamento também foi observada por Freni e Liuzzo (2019). Nesse trabalho foi considerada como demanda apenas a descarga de vasos sanitários em uma área residencial composta por 400 casas na Sicília, Itália. Verificou-se que apesar da evidente redução dos volumes de alagamentos, as simulações hidráulicas mostraram que para precipitações acima de 50 mm a redução do volume de alagamentos é baixa devido à dificuldade de armazenar picos de chuva. Jing et al. (2018) concluíram que além da variação anual de precipitação, o número de dias chuvosos, a distribuição temporal das chuvas e a precipitação diária máxima podem influenciar no desempenho de sistemas de aproveitamento de chuva, tanto na fração de demanda e armazenamento quanto na eficiência de retenção de volumes.

Nesta perspectiva, devido à influência da variabilidade climática, assim como a dificuldade de garantia de volume de espera que promovam o amortecimento de picos de vazão, pesquisadores desenvolveram um modelo que simula três tipos de captação de água de chuva em escala de lote: um sistema convencional, um sistema de liberação passiva e um sistema de

liberação ativa que inclui o controle em tempo real. Foi verificado que os sistemas com controle em tempo real apresentaram um melhor desempenho em fornecer simultaneamente os benefícios de suprimento de água, retenção de águas pluviais e restauração da vazão de base, tendo em vista que este sistema possui a capacidade de receber previsões de chuva em tempo real e assim liberar o volume previsto de extravasamento antes do evento de tempestade (XU et al., 2018).

Tendo em vista os desafios já pontuados por diversos autores, tais como: dificuldade de conciliar atendimento à demanda e retenção de volume/vazão de pico, influência do tamanho do reservatório principal e das demandas na eficiência dos sistemas e provável relação com os regimes de precipitação, o presente trabalho visa contribuir para o estudo de SAAPs e seus efeitos na redução do escoamento superficial, a partir de resultados obtidos por meio de aparato experimental e simulações hidrológicas contínuas.

# 4 MATERIAIS E MÉTODOS

# 4.1 Sistema de Aproveitamento de Águas Pluviais

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir do monitoramento do sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP) instalado em um lote situado em um conjunto residencial no bairro Feitosa, cidade de Maceió-AL, conforme está apresentado na Figura 1.





Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O lote é composto por uma residência com área de jardim e terraço com lajotas de concreto. Na Figura 2 tem-se a representação da área considerada no estudo.

#### Figura 2 - Ilustração do lote estudado



Fonte: A autora

#### 4.1.1 Aparato experimental

O SAAP estudado foi concebido para receber o escoamento proveniente de uma parcela do telhado de 3,43 m<sup>2</sup>, e com os itens: a) uma calha, de modelo colonial, com comprimento de 1 metro, acompanhada do condutor vertical e das conexões; b) dois vertedores triangulares, instalados com tubos de PVC na lateral de cada um, sensores de nível e tranquilizadores de fluxo; c) reservatório para descarte das primeiras águas, composto por um tubo de PVC com 80 cm de comprimento e diâmetro de 75 mm, com um orifício no fundo, e capacidade aproximada de 3,5 litros, correspondente a 1 mm de precipitação; d) reservatório principal com capacidade de aproximadamente 200 litros, correspondente a 58 mm de precipitação; e) torneira para demanda e d) tubo de PVC para o extravasamento do reservatório principal. Este sistema foi confeccionado a partir de resultados obtidos por Cunha e Neves (2017), onde a relação entre volume do reservatório e área de captação foi de cerca de 93 litros/m<sup>2</sup>, pelo método da simulação da NBR 15.527/2007, com uma eficiência no atendimento à demanda de 89%.

Devido às diversas dificuldades operacionais, os dados do vertedor instalado no solo
apresentaram falhas e valores incoerentes, de forma que eles foram desconsiderados após uma análise a ser descrita mais adiante.

Sendo assim, na Figura 3 é apresentada uma ilustração do aparato de monitoramento, onde, P é a precipitação,  $Q_T$  é a vazão do telhado que entra no vertedor 1,  $Q_{V1}$  é a vazão que sai do vertedor 1 e entra no reservatório de descarte,  $Q_{descarte}$  é a vazão de saída pelo reservatório de descarte,  $Q_{RP}$  é a vazão que entra no reservatório principal,  $Q_{demanda}$  é a demanda para uso da água armazenada e  $Q_{ext}$  é a vazão de transbordamento do reservatório principal, em que, tanto  $Q_{descarte}$  quanto  $Q_{ext}$  são direcionadas para o solo do lote. Na Figura 4 estão apresentadas as fotos dos detalhes do aparato de monitoramento. Nela ainda está o vertedor 2, cujos dados foram analisados e descartados.





Fonte: Adaptado de SempreSustentável (2021)



```
Figura 4 - a) Calha; b) Vertedor 1, sensor de nível e tranquilizadores de fluxo; c)
Reservatórios principal (incluso sensor de nível) e reservatório de descarte; d) Vertedor 2,
cujo os dados foram descartados.
```

Fonte: A autora (2021)

# 4.2 Etapas Metodológicas

A estrutura geral deste trabalho está apresentada no fluxograma da Figura 5 e na Figura 6 está apresentado o detalhamento do procedimento metodológico deste trabalho.



Figura 5 – Fluxograma que representa a estrutura geral da dissertação

Fonte: A autora (2021)



Figura 6 – Detalhamento do procedimento metodológico

Fonte: A autora (2021)

# 4.3 Obtenção de Dados

O trabalho foi realizado a partir dos dados: precipitação, vazões de entrada do sistema de aproveitamento de águas pluviais, níveis de água no interior do reservatório principal, evaporação e demanda de água. Estes dados possuíam extensões diferentes entre eles, como será detalhado, dificultando uma análise direta, de modo que algumas etapas foram necessárias para a compatibilização destes.

## 4.3.1 Precipitação

O presente trabalho obteve informações sobre a influência do aproveitamento de água da chuva no escoamento em lotes urbanos, de modo que, os dados de precipitação utilizados foram provenientes de um pluviômetro de báscula com registrador automático (datalogger), instalado no lote estudado em 2014 da marca Hydrological Services Pty Ltd, modelo TB6, basculada de 0,2 mm.

O pluviômetro fornece os dados por basculada, de modo ser necessário discretizar os dados de acordo com o interesse do estudo. Neste estudo, foi construída uma série de precipitação de aproximadamente 7 anos (2014 a 2020) discretizada em intervalos de tempo de 1 minuto, ou seja, quase 3 milhões e 700 mil valores.

## 4.3.2 Vazões de entrada e saída do sistema

O escoamento proveniente do telhado foi medido pelo vertedor 1, de modo que os hidrogramas correspondentes à QT, conforme Figura 3, foram aqueles que iriam para o solo diretamente caso não houvesse a presença do sistema. O vertedor 2 (V2) realizou a medição da vazão de saída do reservatório principal e do descarte das primeiras águas ( $Q_{ext} + Q_{descarte}$ ), no entanto, seus dados foram descartados posteriormente.

A medição das vazões ocorreu entre junho de 2018 e janeiro de 2020 e foi realizada por vertedores triangulares, com sensores de nível acoplados com um sistema de vaso comunicante, de modo que a cada visita para a obtenção dos dados foram verificadas as condições para a definição do valor de nível referente à crista do vertedor. A carga hidráulica então foi calculada como a diferença entre a profundidade registrada no sensor e a altura da crista utilizada como referência. A determinação dessa referência é um dos pontos mais sensíveis na aplicação das curvas de calibração dos vertedores (Equação 1 e Equação 2).

$$Q_{V1} = 13, 15 \times \mathrm{H}^{2,53}$$
 (1)

(Equação 1)

$$Q_{V2} = 8,82 \times \mathrm{H}^{2,86}$$
 (2)

(Equação 2)

Onde:  $Q_{V1}$  e  $Q_{V2}$  é a vazão (mL/s) e H é a carga hidráulica (cm).

Essas curvas foram geradas a partir de uma análise de regressão realizada com os pares de dados Q x H vindos do laboratório de hidráulica do Centro de Tecnologia (Ctec) da Ufal. Foi possível estabelecer também as curvas das margens de erro, representadas nas Figuras 7a) e b), para um nível de confiança de 95% determinadas por Almeida Júnior (2018) e Neves (2019).

Figura 7 – Margem de erro das curvas dos vertedores 1 (a) e 2 (b)



Fonte: ALMEIDA JÚNIOR (2018) E NEVES (2019)

Nota-se que as margens de erro de predição com as curvas dos vertedores, Figura 7a e b, tornam-se grandes para pequenos valores de carga hidráulica, de modo que para 95% de nível de confiança, a margem de erro dos vertedores cresce até valores maiores que 9% para cargas hidráulicas próximas de 1 cm, que equivale a vazões próximas de 13 ml/s. Saber esta ordem de grandeza é importante no momento de calibração do modelo SWMM para o escoamento superficial do telhado, tanto para eventos, quanto para simulação contínua.

## 4.3.3 Nível de água no interior do reservatório

Para o estudo do comportamento do sistema em intervalos de tempo compatíveis com a precipitação, a profundidade da água no interior do reservatório principal foi medida por meio de um sensor de nível nos intervalos de um minuto. Os dados de profundidade de água no reservatório principal são de junho de 2018 a fevereiro de 2019. A partir das dimensões do reservatório principal foi possível a definição dos volumes de água armazenados. Estes dados foram a base para a calibração do sistema telhado - reservatório de descarte - reservatório principal, na simulação contínua via SWMM.

# 4.3.4 Evaporação

Para a realização da simulação contínua, fez-se necessário a consideração da perda por evaporação da água no telhado, sendo utilizado um conjunto de valores médios mensais como base para estimar os valores discretizados em intervalos de tempo de 1 minuto, sendo a discretização feita no próprio SWMM 5.1. A série de evaporação média diária de cada mês, Figura 8, foi proveniente da estação climatológica Maceió (Tabuleiro), código 935004, no período de 1922 a 1978, dados de tanque classe A disponibilizados na plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.





Fonte: A autora (2021)

## 4.3.5 Demanda de água

Para o estudo do desempenho do sistema de aproveitamento de água de chuva tanto em termos de eficiência de atendimento à demanda, quanto de retenção de escoamento, foi fundamental conhecer as características da unidade residencial (Quadro 1), assim como o consumo de água não-potável substituível por água de chuva.

Tino de edificação: Residência Unifamiliar				
Usos	Lavagem de automóveis, lavagem de piso e rega de jardim			
Quantidade de pessoas na residência	3			
Quantidade de automóveis	1 carro			

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Logo, foram utilizados dados da residência: a) leituras diárias e semanais do hidrômetro da residência, em 2017 e 2021, respectivamente; b) Consumo mensal entre 2017 e 2020 e c) acompanhamento dos usos do reservatório nos primeiros meses de implantação.

#### 4.3.5.1 Consumo de água da residência por meio de leituras no hidrômetro

No âmbito do projeto de pesquisa "Aproveitamento de água de precipitação no telhado em lote urbano e sua influência na geração do escoamento superficial" foi realizado um estudo do consumo de água por meio dos números registrados no hidrômetro da residência, no qual, a moradora foi orientada a anotar a leitura do hidrômetro duas vezes ao dia, através da identificação dos algarismos pretos e vermelhos durante 18 dias (NEVES, 2019), essas leituras estão apresentadas no Anexo B. Um segundo monitoramento foi realizado entre os meses de janeiro e fevereiro de 2021, com leituras realizadas semanalmente. As planilhas contendo as leituras do hidrômetro são apresentadas no Apêndice A.

## 4.3.5.2 Consumo mensal de água

Além dos monitoramentos realizados por meio de leituras no hidrômetro, foram ainda, considerados os consumos mensais de água entre os anos de 2017 e 2020, esses dados foram obtidos a partir de consulta sobre a unidade consumidora no site da Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) e antigas contas de água.

#### 4.3.5.3 Acompanhamento dos usos do sistema

No projeto de pesquisa "Aproveitamento de água de precipitação no telhado em lote urbano e sua influência na geração do escoamento superficial" foi realizado um monitoramento durante os meses de julho de 2018 a maio de 2019. Neste monitoramento, foram descritos os usos da água de chuva a partir da utilização de baldes graduados (NEVES, 2019), sendo eles: lavagem superficial da parte externa de veículo, preenchimento da água dos vertedores como medida de manutenção do sistema e de limpeza, rega de uma pequena parcela do jardim e lavagem superficial do piso da pequena área onde o aparato experimental esteve instalado.

A tabela com os usos monitorados estão apresentadas no Anexo C. Importa detalhar que esse uso da água ocorreu sobretudo nas visitas ao local, no momento de baixar os dados e realizar manutenção. Poucas vezes os moradores da residência utilizaram a água do reservatório, o que era desejável, mas foi pouco observado.

#### 4.3.6 Resumo das informações utilizadas no trabalho

Um resumo das informações utilizadas para o desenvolvimento do trabalho, assim como, os métodos de obtenção desses dados estão indicados no Quadro 2, o Apêndice B apresenta uma linha do tempo com o período dos dados e o procedimento metodológico.

Dado utilizado		Período	Intervalo	Método de medição/obtenção	
Precipitação		o 2014 a 2020 1 m		Pluviômetro de báscula	
Vazões de entrada e saída do sistema		06/2018 a 01/2020 (com falhas) 1 min		Vertedores triangulares calibrados e sensores de nível	
Nível de água no reservatório principal.		06/2018 a 02/2019	1 min	Sensor de nível no interior do reservatório principal	
Evapo	oração	1922 a 1978	Média diária mensal	Estação climatológica Maceió (Tabuleiro)	
	Consumo diário	17/12/2017 a 31/12/2017	Diário	Leituras no hidrômetro (NEVES, 2019)	
Demanda de água	Consumo semanal	04/01/2021 a 23/02/2021	Semanal	Monitoramento através de leituras no hidrômetro	
	Consumo mensal	2017 a 2020	Mensal	Série histórica de consumo	
	Usos do sistema	26/07/2018 a 05/05/2019	Por uso	NEVES (2019)	

Quadro 2 - Informações utilizadas no trabalho

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

# 4.4 Avaliação do SAAP para o Período Monitorado

A avaliação do desempenho do sistema de aproveitamento de água de chuva entre julho de 2018 e março de 2019, período em que os usos foram monitorados, decorreu por meio de: a) análise dos eventos monitorados; e b) simulação contínua, como descrito na seção 4.4.1.

# 4.4.1 Análise por eventos

#### 4.4.1.1 Seleção dos eventos

Conforme Neves (2019), os eventos foram identificados inicialmente a partir da precipitação, discretizada em intervalos de 1 minuto, de modo que dois eventos de chuva foram considerados separados quando o período entre eles fosse de no mínimo 1 hora, em seguida esses foram compatibilizados com a série de vazão, a partir da identificação de momentos de ascensão e recessão da carga hidráulica dos vertedores, de modo a se configurar eventos chuva-vazão completos. Os eventos separados foram analisados a partir dos volumes de entrada e saída do sistema medidos pelos vertedores. A Figura 9 ilustra os caminhos possíveis de fluxo

da água de chuva no sistema.



Figura 9 - Fluxos de água no sistema de aproveitamento de água de chuva

Fonte: Adaptado de SempreSustentável (2021)

A Figura 9a ilustra o fluxo quando o volume escoado do telhado é totalmente retido pelo reservatório de descarte e a Figura 9b quando o volume passa pelo reservatório de descarte e é extravasado para o principal. Há ainda a possibilidade de o reservatório principal não ser capaz de reter todo o volume e parte dele ser liberado pelo extravasor.

O volume de água direcionado para o vertedor 2 corresponde a soma do extravasamento do reservatório principal e da saída pelo orifício do reservatório de descarte, o qual deve permanecer constantemente aberto. Desse modo, o sistema estudado possui as seguintes condições iniciais possíveis para os eventos: profundidade inicial variável da água no reservatório principal, residual de volume no reservatório de descarte (proveniente de eventos anteriores) e estado de obstrução do orifício do reservatório de descarte.

A partir dos dados de profundidade do reservatório principal foi possível determinar as condições iniciais e assim identificar possíveis inconsistências entre os volumes escoados medidos (relação entre entrada e saída) e comparação com o volume incrementado no reservatório principal.

## 4.4.1.2 Calibração e validação do modelo chuva-vazão do SWMM no telhado

A simulação do sistema de aproveitamento de água de chuva foi realizada com o uso do programa computacional *Storm Water Management Model 5.1* (SWMM 5.1) que se trata de um modelo amplamente adotado na hidrologia urbana e que pode ser utilizado para a simulação de eventos chuvosos ou simulação contínua a longo prazo, além de possuir ferramentas capazes de modelar elementos como: unidades de armazenamento, vertedores, orifícios e outros (ROSSMAN, 2012).

Na simulação chuva-vazão foi utilizado o modelo SCS no algoritmo de separação do

escoamento e o reservatório não linear para a propagação no telhado. Inicialmente, utilizou-se os eventos selecionados para obtenção dos parâmetros da sub-bacia (telhado) através de calibração, via tentativa e erro. No SWMM 5.1 são requeridos parâmetros que representam características físicas, de solo, tipo de cobertura e armazenamento. Estes parâmetros estão no Quadro 3, bem como a metodologia comumente utilizada para obtenção dos valores iniciais de cada um deles.

Parâmetro	Metodologia adotada
Área (ha)	AutoCAD 2010
Largura característica (W <sub>C</sub> )	AutoCAD 2010
Declividade (%)	AutoCAD 2010
Coeficiente de rugosidade de Manning (superfícies impermeáveis) ( <i>Nimp</i> )	Manual do Usuário do SWMM 5.0 (ROSSMAN, 2012)
Coeficiente de rugosidade de Manning (superfícies permeáveis) ( <i>Dperm</i> )	Manual do Usuário do SWMM 5.0 (ROSSMAN, 2012)
Capacidade de armazenamento em depressões (superfícies impermeáveis) ( <i>PAimp</i> )	Manual do Usuário do SWMM 5.0 (ROSSMAN, 2012)
Capacidade de armazenamento em depressões (superfícies permeáveis) ( <i>PAperm</i> )	Manual do Usuário do SWMM 5.0 (ROSSMAN, 2012)
Áreas Impermeáveis (AI)	Estimativa
Áreas impermeáveis sem armazenamento em depressões ( <i>AS/A</i> )	Recomendações de (GIRONÁS et al., 2009)
Curva-número (CN)	Manual do Usuário do SWMM 5.0 (ROSSMAN, 2012)

Quadro 3 - Parâmetros da sub-bacia "telhado"

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A área de captação estudada é uma parcela do telhado, sendo assim, foi adotado inicialmente o valor de 100% no parâmetro de áreas impermeáveis, já com relação ao parâmetro de área impermeável que não há armazenamento em depressões (*AS/A*), o Manual do SWMM recomenda o valor de 25% quando não há informações específicas (GIRONÁS et al., 2009).

Os parâmetros que se referem as características físicas do telhado (área, largura e declividade) foram obtidos a partir da planta em AutoCAD da parcela do lote estudada. Conforme o Manual do Usuário do SWMM, a largura característica é a relação entre a área da bacia e o comprimento do caminho de escoamento mais longo percorrido pela água, como apresentado na Figura 10, em que a largura é representada por W (GIRONÁS et al., 2009). Desse modo, tendo em vista que no caso estudado a sub-bacia é um telhado, a largura considerada inicialmente foi o comprimento perpendicular à direção do escoamento da água de chuva para a calha.



#### Figura 10 - Representação de uma sub-bacia pelo modelo SWMM

Fonte: HUBER, DICKINSON E BARNWELL (1992)

Os coeficientes de rugosidade de Manning para as superfícies permeáveis e impermeáveis (*Iperm* e *flimp*), assim como suas respectivas capacidades de armazenamento (*PAperm* e *PAimp*) foram estimados a partir dos intervalos de valores sugeridos no Manual do Usuário do SWMM 5.0 (ROSSMAN, 2012) para as superfícies que possuem maior semelhança com o material do telhado. Na Tabela 1 são apresentados os valores estimados inicialmente para a calibração do modelo SWMM na parcela de telhado estudado.

Parâmetro	Valores
W(m)	1,0
Літр	0,015
<b>N</b> perm	0,1
PAimp (mm)	1,9
PAperm (mm)	2,54
AI (%)	100
AS/A (%)	25
CN	98

Tabela 1 - Parâmetros estimados inicialmente

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

A avaliação da qualidade do ajuste foi realizada pelo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH E SUTCLIFFE, 1970), também utilizado em outros trabalhos na calibração do modelo SWMM (BARROS, 2015; COLLODEL, 2009; JOHANNESSEN et al., 2019; PEPLAU, 2013; PETRUCCI et al., 2012), expresso pela Equação 3.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{Nt} (Q_{obs_i} - Q_{c_i})^2}{\sum_{i=1}^{Nt} (Q_{obs_i} - Q_{o,m})^2} \quad (3)$$

## (Equação 3)

Onde: Qobs<sub>i</sub>: vazão observada no final do intervalo de tempo i  $(m^3/s)$ , Qc<sub>i</sub>: vazão calculada no final do intervalo de tempo i  $(m^3/s)$ , Q<sub>0, m</sub>: médias das vazões observadas  $(m^3/s)$  e N<sub>t</sub>: número de intervalos de tempo do evento analisado.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH E SUTCLIFFE 1970) tem valor máximo 1, ocorrendo quando há o ajuste perfeito entre vazões observadas e calculadas. O desempenho do

modelo SWMM 5.1 foi considerado aceitável para valores de NSE acima de 0,5 (JOHANNESSEN et al., 2019; Rosa, Clausen e Dietz, 2015).

Assim como realizado por Johannessen et al. (2019), além do coeficiente de Nash-Sutcliffe, foram utilizadas as diferenças relativas percentuais entre os volumes e vazões máximas observados e simulados (Equação 4 e 5), adotando-se como aceitável um valor inferior a 25% (|RPD| < 25%).

 $|RPD_{VOLUME}| = \frac{V_{obs} - V_{sim}}{V_{obs}} \times 100 \quad (4)$ 

Equação 4

$$\left| RPD_{Qmax} \right| = \frac{Q_{obs} - Q_{sim}}{Q_{obs}} \times 100 \quad (5)$$

## Equação 5

Onde:  $V_{obs}$ : volume observado no final do intervalo de tempo (m<sup>3</sup>),  $V_{sim}$ : volume simulado no final do intervalo de tempo i (m<sup>3</sup>),  $Q_{obs}$ : vazão máxima observada no final do intervalo de tempo (m<sup>3</sup>/s) e  $Q_{sim}$ : vazão máxima simulada no final do intervalo de tempo (m<sup>3</sup>/s).

A análise dos parâmetros obtidos via calibração de eventos chuva-vazão no telhado foi realizada a partir de estatística descritiva, de modo a definir os valores adotados para a validação. Na verificação do modelo SWMM, foram utilizados outros eventos e calculado o coeficiente Nash-Sutcliffe e as diferenças relativas percentuais a fim de avaliar a calibração do modelo na parcela de telhado. Os resultados da simulação chuva-vazão a partir dos eventos monitorados foi utilizado como ponto de partida na etapa de simulação contínua.

A calibração do SWMM 5.1 para eventos de escoamento no telhado foi importante para avaliar este tipo de calibração em uma escala não tão comum, mas sobretudo para se ter uma base para a calibração do sistema telhado - reservatório de descarte - reservatório principal, de modo que fosse possível a simulação com a série contínua de aproximadamente 7 anos com intervalo de discretização de 1 minuto.

# 4.4.1.3 Calibração e validação do modelo SWMM 5.1 no SAAP

A fim de analisar os efeitos do sistema na geração de escoamento no lote, o aparato de monitoramento foi configurado no modelo SWMM 5.1, de modo que, foi utilizado o método da onda cinemática como método de propagação de vazão, sendo adicionados os hidrogramas monitorados como afluência às unidades de armazenamento (presentes no modelo para representar os reservatórios de descarte e principal). A fim de que os erros da calibração da simulação chuva-vazão não fossem propagados para esta etapa, utilizou-se a vazão monitorada pelo vertedor 1 como afluente no reservatório de descarte.

Os parâmetros adicionados no sistema, tais como profundidade, diâmetro, comprimentos de condutos e cota de fundo foram definidos a partir das dimensões do sistema, além disso, foi utilizado o coeficiente de rugosidade de Manning recomendado pelo Manual do Usuário do SWMM (ROSSMAN, 2012) para os condutos de PVC. Embora a maior parte das dimensões do sistema já fossem conhecidas, observou-se a necessidade de calibração do orifício presente no reservatório de descarte, já que sua dimensão possui grande influência na vazão direcionada ao reservatório principal. Foi verificado que, em virtude de a manutenção do sistema não ocorrer diariamente, o orifício por vezes esteve parcialmente obstruído pelos sedimentos carreados do telhado, e que ultrapassaram o vertedor 1.

A calibração e validação foram realizadas por meio da comparação entre as profundidades da água no interior do reservatório principal medidas pelo sensor de nível e as profundidades simuladas nele. A avaliação da calibração decorreu do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH E SUTCLIFFE, 1970).

#### 4.4.1.4 Avaliação do desempenho do SAAP na detenção de volume e vazões máximas

Realizar a comparação entre os hidrogramas de entrada e saída do sistema, medidos pelos vertedores, seria o modo de demonstrar mais diretamente o efeito do sistema de aproveitamento na detenção do escoamento. No entanto, devido ao vertedor 2 ter sido desconsiderado em virtude da baixa qualidade dos dados, a análise eventos foi realizada a partir da entrada, medida pelo vertedor 1, e a saída, simulada pelo modelo SWMM 5.1.

Os hidrogramas medidos pelo vertedor 1 foram utilizados para a propagação dessas vazões no sistema, assim, de modo semelhante a Palla, Gnecco e Barbera (2017) e Tamagnone, Comino e Rosso (2020), o efeito do sistema foi avaliado a partir das taxas de redução da vazão de pico e de volume, sendo esses calculados por evento. A eficiência do sistema na retenção de vazão máxima foi calculada pela diferença relativa percentual entre o picos de vazão do hidrograma de entrada e de saída, os quais correspondem respectivamente às situações de: não haver nenhum sistema, nesse caso o escoamento segue direto para o terreno do lote, e de haver o aproveitamento de água de chuva. A eficiência do sistema na retenção de volume foi calculada de maneira análoga, como observado nas Equações 6 e 7.

$$ER_{VOLUME} = \frac{V_{entrada} - V_{saida}}{V_{entrada}} \times 100 \quad (6)$$

Equação 6

$$ER_{Qmax} = \frac{Q_{entrada} - Q_{saida}}{Q_{entrada}} \times 100 \quad (7)$$

# Equação 7

Além da discussão quanto à redução da vazão máxima e do volume, foi observado o comportamento do sistema como um todo, no que diz respeito à profundidade inicial de água no reservatório principal e a influência do orifício do reservatório de descarte.

# 4.4.2 Simulação Contínua para o período de monitoramento

# 4.4.2.1 Avaliação do desempenho na detenção de escoamento e atendimento à demanda

A fim de se avaliar o sistema por completo desde a transformação chuva-vazão até os níveis de profundidade do reservatório principal, foi realizada uma simulação contínua com intervalos de 1 minuto, em que todo o sistema foi configurado no modelo SWMM 5.1, como observado na Figura 11. Foi adotado um período entre eventos de sete horas, Figura 12, conforme os resultados obtidos por Uchôa e Neves (2020), foi utilizada a mesma série de precipitação adotada no presente trabalho.

Figura 11- Configuração do modelo SWMM para simulação contínua do sistema completo



Fonte: A autora (2021)

SWMM 5.1 - Sistema completo (calibração e Sistema completo (calibração e Sistema completo (calibração e Sistema completo e Sist	da simulação contínua) cer Vindow Heln	nario1_2014.inp	
🗅 😅 🖬 🔿   🖻 🐴 ?(] 🌚   🞸   🗉	🛰 🐖 📖 Σ   😭	' <b>=  <u> </u></b>	(IA: 🕈 🛛
Project Map	Statistics Report Selection	n X	
Title/Notes	Object Category	System ~	
	Object Name		
> Hydraulics	Variable Analyzed	Precipitation ~	
> Curves	Event Time Period	Event-Dependent ~	
Time Patterns	Statistic	Peak ~	
I Map Labels	Event Thresholds		
	Precipitation	0	
+ - <b>∕</b> a ↔ ∳2↓	Event Volume		
Title/Notes	Separation Time	7	
atividade Swimm Tutorial T			
	ОК	Cancel Help	

Figura 12 - Critérios de separação de eventos no modelo SWMM 5.1

Fonte: A autora (2021)

Para a simulação contínua, a evaporação foi considerada, sendo adotadas as médias mensais diárias no período de 1922 a 1978, como apresentado na seção 4.3.4. Nesta etapa, inicialmente foram adotados os parâmetros obtidos nas etapas anteriores, como: parâmetros da sub-bacia de captação e diâmetro do orifício do reservatório de descarte, além disso, foram considerados os consumos monitorados entre 2018 e 2019. Posteriormente, esses parâmetros sofreram reajustes.

A demanda foi adicionada na simulação como uma afluência negativa ao reservatório principal, de modo que, foi criada uma série de vazão com intervalos de 1 min para todo o período de simulação. Essa série de vazão foi criada a partir dos volumes monitorados (ANEXO B) e da média das vazões da mangueira utilizada na área de estudo, medidas por Ferreira (2017), sendo definida uma vazão média por minuto com variações do tempo em que a torneira do reservatório principal permanece aberta, como observado na Equação 8.

$$T_{torneira} = \frac{Volume}{\mathbf{Q}_{média,adotada}} \quad (8)$$

#### Equação 8

Onde: *Volume*: é o volume medido no monitoramento para cada uso (m<sup>3</sup>),  $Q_{média,adotada}$ : a média das vazões medidas por Ferreira (2017) (m<sup>3</sup>/s) e  $T_{torneira}$ : o tempo que a torneira permaneceu aberta para cada uso (segundos).

Os períodos utilizados para a calibração e validação do modelo foram: de julho a

outubro de 2018 (calibração) e de novembro/2018 a março/2019 (validação). Para a avaliação do ajuste, utilizou-se novamente o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH E SUTCLIFFE, 1970), Equação 3, e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), também utilizado por Jamali, Bach e Deletic (2019), apresentado na Equação 9.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (V_{obs_i} - V_{c_i})^2\right]^{\frac{1}{2}} (9)$$

# Equação 9

Onde: Vobs<sub>i</sub>: volume observado no final do intervalo de tempo i (cm), Vc<sub>i</sub>: volume calculado no final do intervalo de tempo i (cm) e N: número de intervalos de tempo do evento analisado.

O comportamento do sistema no período de julho/2018 a março/2019 foi avaliado em termos de eficiência de retenção de escoamento a partir da redução de volumes e vazões de pico da entrada e saída do sistema, como apresentado na seção 4.4.1.4. No entanto, nessa etapa, a simulação ocorreu a partir de series contínuas de precipitação com intervalo de 1 minuto e taxas de evaporação, de modo a simular diferentes condições iniciais do SAAP (água empoçada no telhado e profundidade do reservatório principal) e assim analisar a influência da precipitação e o atendimento do sistema à demanda monitorada.

## 4.5 Avaliação do SAAP para o Período Simulado de 2014 a 2020

Nos itens anteriores, foram descritos procedimentos que envolveram o período de monitoramento, de modo que foi possível calibrar o SWMM 5.1 ao sistema telhado-reservatório de descarte-reservatório principal, denominado de SAAP. O passo que se inicia agora mostram os procedimentos para a simulação de uma série mais longa, com 7 anos de dados de precipitação, o que justifica o uso do modelo desde o escoamento do telhado.

A partir dos parâmetros do telhado e do SAAP obtidos na calibração do modelo SWMM 5.1 nas etapas anteriores, foi realizada a análise do comportamento do sistema no período de sete anos de simulação, sendo considerados seis cenários de demanda, nas quais foram adotados apenas usos que não demandam adição de instalações hidrossanitárias.

Inicialmente, um cenário de referência (CR) foi criado, no qual, foi confeccionada uma série de vazão (demanda), com intervalos de 1 min para os sete anos, inserida no modelo SWMM 5.1 como uma afluência negativa no reservatório principal. A frequência dos usos foi definida pelo comportamento dos moradores da residência e os volumes considerados para lavagem do automóvel e rega de jardim foram provenientes do monitoramento realizado por

Neves (2019), já a estimativa da lavagem de pisos foi realizada considerando um consumo médio de 1,5 L/m<sup>2</sup> para uma área de 48 m<sup>2</sup> de terraço (MELO E AZEVEDO NETTO, 1988). Os volumes utilizados para a criação do cenário de referência são observados na Tabela 2.

Usos	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (L)	Frequência
Rega de jardim	11	22	Diariamente
Lavagem do veículo	-	29	Semanalmente
Lavagem de pisos	48	72	Quinzenalmente

Tabela 2 - Volumes e frequência dos usos de água de chuva na residência

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Além disso, foram considerados: uma limpeza anual do reservatório principal, conforme recomenda a NBR 15.527/2019 (ABNT, 2019) e não haver rega do jardim nos dias em que a precipitação diária fosse acima de 7 mm, , com base na observação do comportamento dos usuários da residência e dos dados do pluviômetro. Logo, a partir do cenário de referência (CR), foram elaborados mais cinco cenários (Quadro 4) considerando possíveis variações de comportamento dos usuários do sistema.

	Cenários
50% × CR	Decréscimo de 50% na demanda do cenário de referência
$80\% \times CR$	Decréscimo de 20% na demanda do cenário de referência
CR	Demanda do cenário de referência
$120\% \times CR$	Acréscimo de 20% na demanda do cenário de referência
$150\% \times CR$	Acréscimo de 50% na demanda do cenário de referência
200% × CR	Acréscimo de 100% na demanda do cenário de referência

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O desempenho do sistema de aproveitamento de água de chuva na retenção de volume e vazões máximas foi avaliado por meio de estatística descritiva das taxas  $ER_{volume}$  e  $ER_{Qmax}$  dos diferentes cenários, semelhante ao realizado por Palla; Gnecco; Barbera (2017) e Tamagnone, Comino e Rosso (2020). Quanto ao atendimento à demanda, o SAAP foi avaliado a partir dos dois indicadores adimensionais definidos por Dixon, Butler e Fewkes (1999), e adotados por Palla, Gnecco e Barbera (2017) e Sampaio e Alves (2017): eficiência de economia de água e taxa de desperdício de água de chuva.

A eficiência de economia de água (EEA) foi calculada como a relação entre a somatória do volume de água de chuva efetivamente utilizado pela residência e a somatória da demanda requerida que foi estimada nos diferentes cenários, já a taxa de desperdício de água de chuva (O<sub>F</sub>) foi calculada como a relação entre a somatória do volume de água de chuva que excede a capacidade do reservatório e a somatória do volume de água de chuva que entra no reservatório principal. Como apresentado nas Equações 10 e 11:

$$\boldsymbol{EEA} = \frac{\sum_{t=1}^{N} \boldsymbol{Y}_t}{\sum_{t=1}^{N} \boldsymbol{D}_t} \quad (10)$$

Equação 10

$$\boldsymbol{O}_F = \frac{\sum_{t=1}^N \boldsymbol{O}_t}{\sum_{t=1}^N \boldsymbol{Q}_t} \quad (11)$$

### Equação 11

onde: Yt (m<sup>3</sup>): representa a demanda suprida por água de chuva no reservatório em cada etapa t; Dt (m<sup>3</sup>): demanda requerida de água de chuva em cada etapa t; Ot (m<sup>3</sup>): volume extravasado em cada etapa t; Qt (m<sup>3</sup>): entrada de água no reservatório principal em cada etapa t e N: número total de etapas da simulação.

Além dos indicadores adimensionais, foi utilizada a confiabilidade plena (CP), utilizada por Sampaio e Alves (2017) como a relação entre o dias em que o reservatório atendeu totalmente a demanda e a quantidade de dias totais da simulação. Neste trabalho, a confiabilidade plena foi calculada para uma simulação com intervalos de 1 minuto, como dada pela Equação 12.

$$\mathbf{CP} = \frac{\mathbf{N}_{\text{atend}}}{\mathbf{N}_{\text{dr}}} \times \mathbf{100} \quad (12)$$

## Equação 12

Onde: N<sub>atend</sub> representa o número de intervalos em que a demanda é atendida em sua totalidade; N<sub>dr</sub> : quantidade de intervalos em que há uma demanda requerida.

A influência da precipitação no desempenho do SAAP, tanto na detenção de escoamento, quanto no atendimento à demanda foi discutida a partir de estatística descritiva.

#### 4.6 Análise do Método da Simulação com Intervalos Diários

Por meio da simulação contínua de 2014 a 2020 foram obtidas a eficiência de economia de água (EEA), confiabilidade plena (CP) e a taxa de desperdício de água de chuva (O<sub>F</sub>) para diferentes cenários de demanda, de modo a avaliar o desempenho do SAAP. Por conseguinte, verificou-se se um método de dimensionamento mais simples, ou seja, com uma menor quantidade de dados de entrada, seria capaz de representar o SAAP, assumindo os resultados da simulação contínua com o modelo SWMM 5.1 como referência.

Para isso, optou-se pelo método da simulação, apresentado na norma ABNT NBR 15.527/2007 e removido na revisão de 2019, uma vez que esse permite fixar o volume do

reservatório e obter os níveis de atendimento à demanda. As equações do método de simulação estão apresentadas no Anexo A.

Desse modo, no presente estudo, foi fixado o volume do reservatório principal, de 200 litros, e o nível de atendimento usualmente utilizado de 90%, sendo obtido, portanto, a demanda diária que o SAAP seria capaz de atender com 90% de confiabilidade. Esse valor foi comparado ao observado na simulação contínua realizada no SWMM para o mesmo valor de confiabilidade plena. Além disso, comparou-se para os mesmos valores de demanda diária, estimados a partir da confecção dos cenários, os valores de confiabilidade plena resultantes da simulação contínua com o modelo SWMM e pelo método da simulação.

A confiabilidade plena do sistema foi calculada no método da simulação, de modo semelhante ao realizado por Amorim (2008) e Sampaio e Alves (2017) na Equação 13:

$$C_{MS} = \frac{N_{d\_atend}}{N} \times 100 \quad (13)$$

## Equação 13

onde:  $N_{d_{atend}}$  representa o número de dias em que a demanda é atendida em sua totalidade e N: número total de dias da simulação.

Assim como realizada na simulação contínua, no método da simulação também foi considerada as mesmas demandas e a limpeza anual do reservatório principal, sendo calculados as taxas ER<sub>volume</sub> e ER<sub>Qmáx</sub> e os indicadores adimensionais de eficiência de economia de água (EEA) e taxa de desperdício de água de chuva (O<sub>F</sub>) para um cenário de 90% de confiabilidade plena.

# **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este capítulo apresenta o desempenho do sistema de aproveitamento de águas pluviais para: período de monitoramento (julho de 2018 a março de 2019) a partir de análises dos eventos monitorados e de simulação contínua, e um período de simulação contínua de 2014 a 2020.

## 5.1 Avaliação do SAAP para o Período Monitorado

## 5.1.1 Análise por eventos

5.1.1.1 Seleção dos eventos

Os eventos separados estão apresentados na Tabela 3, na qual são observados os volumes medidos pelos vertedores 1 e 2, além da condição inicial (preenchimento do reservatório principal).

Event	o Data	P (mm)	Duração (min)	<b>C</b> <sub>i</sub> (%)	<b>V</b> <sub>V1</sub> (L)	L <sub>V1</sub> (mm)	$V_{V2}\left(L\right)$	L <sub>V2</sub> (mm)
1	29/06/2018	9,60	132,00	63	7,59	2,21	-	
2	02/07/2018	45,20	188,00	99	63,42	18,49	1,89	0,55
3	27/07/2018	8,00	60,00	73	11,41	3,33	6,33	1,85
4	30/07/2018	7,00	17,00	72	5,06	1,48	-	
5	31/07/2018	10,80	10,80	85	10,72	3,13	-	
6	02/09/2018	6,80	73,00	29	6,34	1,85	1,86	0,54
7	09/09/2018	5,80	83,00	40	6,74	1,97	-	
8	08/11/2018	7,20	67,00	39	23,83	6,95	0,60	0,17
9	08/11/2018	6,60	29,00	48	23,23	6,77	1,40	0,41
10	27/11/2018	7,40	72,00	67	22,18	6,47	-	
11	10/12/2018	5,00	9,00	69	15,43	4,50	1,01	0,29
12	15/12/2018	6,00	14,00	75	17,84	5,20	-	
13	17/12/2018	16,40	106,00	71	16,34	4,76	8,40	2,45
14	07/01/2019	13,80	242,00	80	37,09	10,81	6,16	1,80
15	18/10/2019	6,60	13,00	52	4,72	1,38	0,76	0,22
16	21/11/2019	4,00	58,00	19	4,73	1,38	1,70	0,50
17	15/12/2019	3,20	9,00	29	6,81	1,99	-	
18	19/12/2019	8,00	28,00	100	18,60	5,42	5,46	1,59
19	31/12/2019	7,40	33,00	91	6,10	1,78	-	
20	20/01/2020	3,60	13,00	88	6,06	1,77	1,64	0,48
21	23/01/2020	3,80	28,00	97	4,50	1,31	1,61	0,47

Tabela 3 - Eventos separados

P: Precipitação total do evento (mm)

V<sub>i</sub>: Condição inicial do reservatório principal (%)

 $V_{V1}$ :Volume medido pelo vertedor 1 (L)

 $V_{V2}$ :Volume medido pelo vertedor 2 (L)

 $L_{V1}$ : Lâmina de escoamento medida pelo vertedor 1 (mm)

Lv2: Lâmina de escoamento medida pelo vertedor 2 (mm)

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Na Tabela 3, tem-se que apenas treze eventos foram monitorados pelos dois vertedores, porque ao longo do período de monitoramento houve problemas no vertedor 2, como vazamentos no tubo de PVC (que acomoda o sensor de nível) impossibilitando o registro da profundidade da água de forma correta em vários eventos.

Após a separação dos eventos, houve a análise dos volumes de entrada e saída do SAAP, na qual se observou que os hidrogramas medidos pelo vertedor 2 apresentaram inconsistências em grande parte dos eventos. Um exemplo disso é ilustrado na Figura 13 e Figura 14 (Evento 2) onde a capacidade máxima do reservatório principal foi atingida no início do evento, de modo que, todo o hidrograma medido pelo vertedor 1 seria direcionado para o vertedor 2 tanto por meio do extravasamento do reservatório principal quanto pelo orifício do reservatório de descarte. Logo, dado que o volume total do hidrograma medido pelo vertedor 1 foi de 63 litros e o volume disponível do reservatório principal era de aproximadamente 2 litros, esperava-se que o volume total do hidrograma do vertedor 2 fosse, no mínimo, da ordem de 60 litros. No entanto, o volume medido pelo vertedor 2 foi de aproximadamente 2 litros. Mesmo havendo uma margem de erro proveniente da equação calibrada do vertedor, esperava-se um hidrograma com valores mais altos de vazão de saída. Sendo assim, em razão de terem sido observadas inconsistências semelhantes em outros eventos, os dados provenientes do vertedor 2 foram descartados.

Além disso, nos eventos 3 (27/07/2018), 6 (02/09/2018), 13 (17/12/2018) e 14 (07/01/2019) os volumes dos hidrogramas medidos pelo vertedor 1 foram menores que os volumes acrescentados no reservatório principal, conforme Figura 15. . Devido a essas inconsistências, esses eventos foram descartados.Verificou-se também que a lâmina de escoamento medida pelo vertedor 1 no evento 9 é superior a precipitação, no entanto, essa diferença se deve a carga hidráulica se manter abaixo de 1 cm em 87% do tempo do evento, como apontado na seção 4.3.2, para valores de carga hidráulica próximos de 1 cm, a margem de erro pode chegar a vazões próximas de 13 ml/s.



Figura 13 – Entradas e saídas do SAAP no evento 2 (02/07/2018)

Fonte: A autora (2021)



Figura 14 - Reservatório principal ao longo do evento 2 (02/07/2018)

Fonte: A autora (2021)





Fonte: A autora (2021)

# 5.1.1.2 Calibração e validação do modelo chuva-vazão do SWMM no telhado

No Quadro 5 estão apresentados os eventos utilizados para as etapas de calibração e validação do modelo SWMM 5.1 no telhado estudado. A avaliação do procedimento foi a partir do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), e das diferenças relativas percentuais dos volumes e das vazões máximas ( $|RPD_{Volume}| e |RPD_{Qmáx}|$ ).

Eventos	Data	Etapa	Eventos	Data	Etapa
9	08/11/2018	Calibração	1	29/06/2018	Validação
11	10/12/2018	Calibração	2	02/07/2018	Validação
15	18/10/2019	Calibração	4	30/07/2018	Validação
16	21/11/2019	Calibração	5	31/07/2018	Validação
17	15/12/2019	Calibração	7	09/09/2018	Validação
18	19/12/2019	Calibração	8	08/11/2018	Validação
19	31/12/2019	Calibração	10	27/11/2018	Validação
20	20/01/2020	Calibração	12	15/12/2018	Validação
21	23/01/2020	Calibração			

Quadro 5 - Eventos utilizados na calibração e validação do modelo SWMM no telhado

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da calibração, em que os melhores resultados estão destacados em cinza. Os coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe encontrados foram aceitáveis para a maioria dos eventos calibrados, com valores iguais ou superiores a 0,50, com uma média de 0,56 e um coeficiente de variação de 71%.

Evento	NSE	RPD <sub>Volume</sub>	
9	0,8	2,0	3,5
11	0,8	21,7	3,8
15	0,5	108,8	4,1
16	-0,3	123,3	11,3
17	0,7	24	19,9
18	0,95	11,2	5
19	0,7	49,3	5,4
20	0,8	25,1	14,5
21	0,1	181,9	1,6
Média	0,56	60,8	7,7
CV (%)	71%	103%	80%

Tabela 4- Resultados da calibração do modelo SWMM

CV: Coeficiente de Variação

RPD: Diferenças relativas percentuais

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Com relação as diferenças relativas percentuais, observou-se uma boa capacidade do modelo na representação de vazões máximas, já que, foram observadas  $| \text{RPD}_{\text{Qmáx}} | < 25\%$  em todos os eventos. Enquanto nos volumes, houve uma média acima de 50%, inclusive com a

presença de diferenças relativas percentuais acima de 100%.

O evento 18 apresentou o melhor valor de NSE, seguido dos eventos 9, 11 e 20. O evento 9 teve o melhor valor de  $|\text{RPD}_{\text{Volume}}|$ , seguido do evento 18 e do evento 11. O evento 21 teve o melhor valor de  $|\text{RPD}_{\text{Qmáx}}|$ , seguido dos eventos 9, 11 e 18. Pode-se afirmar que nos eventos 9, 11 e 18 houve os melhores desempenhos e nos eventos 16 e 21 os piores. A seguir são observados os gráficos dos eventos calibrados, nas Figuras de 16 a 24.

Conforme Figuras 16 (evento 9), 17 (evento 11) e 22 (evento 19), houve uma dificuldade do modelo na representação da recessão do hidrograma e no segundo pico de vazão. A mesma dificuldade aparece nas Figuras 19 (evento 16), 24 (evento 21). No evento 16, foi observada ainda uma defasagem do hidrograma simulado, o que influencia diretamente no cálculo de NSE. Apesar disso, o modelo representa satisfatoriamente a vazão máxima.

Na Figura 24 (evento 21), a vazão máxima foi bem representada com uma diferença relativa percentual de 1,6%, apesar disso, devido à dificuldade do modelo para representar a recessão do hidrograma, a diferença relativa percentual do volume foi acima de 180%. Na Figura 23 (evento 20) as vazões simuladas se diferem das observadas tanto na quantidade quanto na sincronicidade dos picos do hidrograma, indicando uma possível dificuldade de representar uma maior quantidade de picos. Apesar disso, o coeficiente de eficiência e as diferenças relativas percentuais indicam um bom ajuste do modelo.

Importa observar que os eventos com melhores resultados tiveram maiores vazões do que aqueles que obtiveram resultados piores. Nestes, a maior parte dos valores de vazão foram mais baixos, com exceção do evento 15. Como já demonstrado, valores baixos de vazão trazem mais incerteza nos valores observados devido à margem de erro de predição da curva do vertedor, obtida a partir da análise de regressão entre Q e H (Equação 1). Em todas as figuras mostradas, a margem de erro está ilustrada nas linhas tracejadas.



Figura 16 - Evento 9: 08/11/2018

Figura 18 - Evento 15: 18/10/2019







Figura 17 - Evento 11: 10/12/2018



Figura 19 - Evento 16: 21/11/2019



Figura 21 - Evento 18: 19/12/2019





Figura 24 - Evento 21: 23/01/2020



— Vazão observada — Vazão simulada …… Intervalo de confiança Fonte: A autora (2021)

Nas etapas de calibração e validação objetivou-se tornar o modelo mais ajustado ao telhado cerâmico para a realização de simulações que contemplassem desde a precipitação e transformação chuva-vazão até os hidrogramas de saída do SAAP. Para isso, os parâmetros que caracterizam sub-bacia no modelo foram calibrados, como apresentado na Tabela 5, em que a área impermeável sem armazenamento em depressão (AS/A), a largura característica ( $W_C$ ) e a porcentagem de área impermeável (AI) são os mais sensíveis. Os menos sensiveis foram o coeficiente de Manning (flimp) e a capacidade de armazenamento em depressões em áreas impermeáveis (PAimp). Os parâmetros coeficiente de Manning de áreas permeáveis, capacidade de armazenamento em depressões em áreas permeáveis e curva-número não foram

Figura 23 - Evento 20: 20/01/2020

Eventos Parâmetros	W(m)	AI (%)	AS/A (%)	PAimp (mm)	ſlimp
9	1,00	100	100	1,00	0,01
11	1,00	70	100	3,00	0,01
15	0,75	60	10	2,60	0,05
16	1,00	100	25	2,00	0,015
17	0,80	70	20	1,27	0,04
18	0,80	80	25	1,27	0,02
19	0,70	50	0	3,00	0,04
20	0,70	65	0	1,50	0,015
21	0,80	80	0	1,50	0,04
CV (%)	15	23	130	41	59
Média	0,84	75	31,11	1,90	0,030
Valores adotados inicialmente	1,0	100	25	1,9	0,015
aixa de valores encontrados	0,7 - 1,0	60 - 100	0 - 100	1,0 - 3,0	0,01 - 0,0
Valores sugeridos pelo manual *	-	-	25	1,27 - 2,54	0,014-0,01

calibrados, uma vez que não apresentaram influência na calibração.

Tabela 5 - Parâmetros calibrados

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

A largura característica ( $W_C$ ) apresentou o menor coeficiente de variação, resultando em uma média próxima do valor adotado inicialmente, de 1 metro. A área de captação considerada inicialmente completamente impermeável apresentou uma média de 75%.

Embora seja sugerido pelo manual do modelo a utilização de 25% de área impermeável sem armazenamento (*AS/A*) (GIRONÁS et al., 2009), foi necessária a calibração deste parâmetro já que há sensibilidade tanto na magnitude das vazões quanto na posição das vazões máximas, resultando em um coeficiente de variação de 130%.

O coeficiente de variação do parâmetro capacidade de armazenamento em depressões em áreas impermeáveis (*PAimp*) apresentou uma média próxima ao valor adotado inicialmente, no entanto, a faixa de valores encontrados na calibração não se situa dentro da faixa indicada no Manual do Usuário do SWMM (ROSSMAN, 2012). Com relação ao coeficiente de Manning, o manual recomenda a utilização de  $\eta$ = 0,014 e  $\eta$ = 0,015 para cerâmica e tijolos cerâmicos. Entretanto, valores superiores foram encontrados na calibração, resultando numa média de 0,03 e coeficiente de variação de 59%, chegando a  $\eta$ = 0,06 no evento 15.

Para a etapa de validação, os eventos 16 e 21 foram excluídos, de modo que foi

Tablia 0 - Tarancii os canbrados dos eventos selecionados										
Evento Parâmetro	9	11	15	17	18	19	20	Média		
W(m)	1,00	1,00	0,75	0,80	0,80	0,70	0,70	0,82		
AI (%)	100,00	70,00	60,00	70,00	80,00	50,00	65,00	70,71		
AS/A (%)	100,00	100,00	10,00	20,00	25,00	0,00	0,00	36,43		
PAimp (mm)	1,00	3,00	2,60	1,27	1,27	3,00	1,50	1,94		
ſlimp	0,010	0,010	0,050	0,040	0,020	0,040	0,015	0,026		

utilizada a média dos parâmetros calibrados em 7 eventos, como observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros calibrados dos eventos selecionados

Fonte: Elaborada por autora (2021)

As médias dos parâmetros utilizados na validação apresentaram divergências das faixas recomendadas pelo Manual do Usuário (ROSSMAN, 2012) no coeficiente de rugosidade de Manning para áreas impermeáveis (*flimp*) e na área impermeável sem armazenamento em depressões (*AS/A*). Na Tabela 7 observa-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe e as diferenças relativas percentuais do volume e da vazão máxima.

		3	
Evento	NSE	RPDVolume	<b>RPDQmáx</b>
1	-6,91	200,88	73,11
2	-0,74	127,32	3,02
4	-3,39	182,45	90,98
5	-2,92	112,28	84,41
7	0,40	52,23	14,56
8	0,50	32,91	37,42
10	0,82	21,81	31,16
12	0,22	34,01	41,81
Média	-1,50	95,49	47,06
CV (%)	-1,80	0,74	0,69

Tabela 7 - Resultados da validação

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Na etapa de validação, foi observado que tanto os coeficientes de Nash-Sutcliffe, quanto as diferenças relativas percentuais apresentaram médias fora das faixas consideradas aceitáveis, sendo observado um melhor resultado na representação das vazões máximas. Os eventos com resultados melhores foram os de número 7 ao 12. Nas Figuras 25 a 32 são observados os gráficos da validação do modelo.



Fonte: A autora (2021)

Quanto aos eventos 1, 2 e 8, como já observado na etapa de calibração, o modelo não representou os eventos com maior quantidade de picos de vazão. Nos eventos 4, 5, 7 e 12 há uma defasagem do hidrograma simulado. Estas defasagens no tempo de escoamento podem estar relacionadas com a vazão observada, uma vez que, este é um problema que vem desde a concepção dos eventos quando é realizada a compatibilização dos dados do pluviômetro com os dados do sensor de nível no vertedor 1. Foi verificado que há um adiantamento médio de 6 a 7 segundos por dia no relógio do pluviômetro, em relação ao relógio do notebook utilizado para baixar os dados, procurou-se retirar a influência disso no momento da montagem de cada evento, mas pode haver ainda alguma interferência nas etapas posteriores.



— Vazão observada — Vazão simulada …… Intervalo de confiança Fonte: A autora (2021)

# 5.1.1.3 Calibração e validação do modelo SWMM no SAAP

Os parâmetros definidos no SAAP foram o coeficiente de rugosidade de Manning para

os condutos e a dimensão do orifício do reservatório de descarga. O primeiro não apresentou influência significativa, de modo que se optou por fixar o valor de  $\Omega$ = 0,013, pois a sensibilidade desse parâmetro é menor, já o orifício, em virtude de a manutenção do sistema não acontecer diariamente, este por vezes esteve parcialmente obstruído pelos sedimentos carreados do telhado, e que ultrapassaram o vertedor 1, de maneira que foi necessária a calibração do diâmetro do orifício a partir dos eventos monitorados.

Para que os erros da calibração do modelo no telhado não fossem propagados para esta etapa, foram utilizados os hidrogramas monitorados pelo vertedor 1 como afluente no reservatório de descarte, sendo utilizados cinco eventos. Além disso, o processo de calibração se deu pela comparação entre as cotas do reservatório principal simuladas e as monitoradas pelo sensor de nível a cada um minuto. Nas Figuras a seguir são observados os resultados dessa calibração.





Fonte: A autora (2021)

Foi considerado um outro parâmetro a ser calibrado, a dimensão do orifício do reservatório de descarte, que foi calibrada utilizando eventos com intensidades médias variadas, como verificado na Tabela 8, a partir do valor estimado incialmente de 3 mm. A maior dimensão encontrada foi diâmetro de 2,5 mm, no evento 11, e o menor foi 0 mm, no evento 5. Os melhores ajustes foram observados nos eventos 9 (08/11/2018), 12 (15/12/2018) e 21 (23/01/2020), para os diâmetros 1 e 0,7 mm. Para a configuração do SAAP no modelo adotou-se a média das dimensões calibradas, como apontado na Tabela 8.

Evento	Intensidade média (mm/h)	Dimensão do orifício (mm)	NSE
5	8,88	0,0	- 1,03
9	8,43	1,0	0,98
11	33,33	2,5	0,53
12	25,71	1,0	1,00
21	8,14	0,7	1,00
Média		1,0	

Tabela 8 - Valores calibrados do diâmetro do orifício do reservatório de descarte

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

# 5.1.1.4 Avaliação do desempenho do sistema de aproveitamento de águas pluviais na retenção de volume e vazões máximas

A partir dos resultados da etapa de calibração do modelo no SAAP, os hidrogramas de entrada (dados do monitoramento) e os de saída (simulação no modelo SWMM 5.1) foram analisados em termos de retenção de volume e picos de vazão. Para isso, as condições iniciais do reservatório principal foram consideradas nas análises, ou seja, no início de cada evento foi

considerado o volume inicial de água dentro do reservatório principal, conforme Figuras 38 a 41.

Na Figura 38 observa-se que a precipitação durante o evento 1 (29/06/2018) apresentou valores entre 0 e 0,4 mm em diversos picos, gerando uma grande quantidade de picos de vazão. O volume escoado do telhado foi totalmente drenado pelo orifício do reservatório de descarte, sem ser retido pelo reservatório principal, o que resultou numa atenuação de 82,8% na vazão máxima e de 2,5% no volume. Na Figura 38 b, verifica-se que o reservatório de descarte foi completamente esvaziado duas vezes durante o evento, atingindo no máximo 39% de sua capacidade.

Figura 38 - Evento 1 - 29/06/2018: (a) precipitação e vazões; (b) preenchimento dos reservatórios





Na Figura 39 tem-se os hidrogramas de entrada e saída do SAAP no evento 2 (02/07/2018). No início dele, o reservatório principal estava com cerca de 99% de sua capacidade total preenchida, de forma que, nos primeiros quinze minutos o volume é

acomodado pelos reservatórios e quando ambos atingem suas capacidades máximas o hidrograma de saída passa a ser muito semelhante ao de entrada, já que aproximadamente todo volume escoado do telhado é direcionado para o sistema de drenagem de águas pluviais.

Nos últimos instantes do evento, a vazão de saída é maior que a de entrada devido ao lento esvaziamento do reservatório de descarte. Devido ao baixo volume de espera do reservatório principal, a redução do volume foi de 4,24%, e da vazão máxima de 2,9%. Verificase ainda que o volume escoado nos primeiros instantes do evento é retido no reservatório de descarte, havendo uma diferença de 17 minutos entre o hidrograma de saída e o hidrograma de entrada.





Fonte: A autora (2021)

Os hidrogramas de entrada e saída do SAAP no evento 7 (09/09/2018) estão apresentados na Figura 40. O pico de vazão no início do evento é completamente retido pelo reservatório de descarte, que chega a 93% de sua capacidade preenchida, não havendo

transbordamento para o reservatório principal. Tem-se então um amortecimento de 84,3% na vazão máxima e de 3,9% no volume. Na Figura 41 tem-se o comportamento do SAAP no evento 12 (15/12/2018).



Figura 40 - Evento 7 - 09/09/2018: (a) precipitação e vazões; (b) preenchimento dos reservatórios

Fonte: A autora (2021)

No evento 12 (15/12/2018) houve rápido enchimento do reservatório de descarte e extravasamento para o principal, com o hidrograma de saída se estendendo devido ao lento esvaziamento do reservatório de descarte. A redução do volume foi de 68,04% e da vazão máxima de 97,62%.


Figura 41 - Evento 12 - 15/12/2018: (a) precipitação e vazões; (b) preenchimento dos reservatórios

Fonte: A autora (2021)

Na Tabela 9 é observado o resumo dos resultados dos eventos com relação a atenuação do volume e das vazões máximas, onde é apresentado a trajetória do escoamento, que varia entre ser direcionado somente para o reservatório de descarte ou seguir para o principal. O comportamento do SAAP em todos os eventos analisados está apresentado no Apêndice C.

Evento	Data	Precipitação total (mm)	Intensidad e média (mm/h)	Intensidade máxima (mm/hora)	Reservatório no início do evento (%)	Trajetória do escoamento	ER volume (%)	ER <sub>Qmáx</sub> (%)
1	29/06/2018	3 9,60	4,36	24	63%	Descarte	2%	83%
2	02/07/2018	45,20	14,43	48	99%	Principal	4%	3%
4	30/07/2018	3 7,00	24,71	60	72%	Principal	7%	88%
5	31/07/2018	3 10,80	8,88	48	85%	Principal	24%	84%
7	09/09/2018	3 5,80	4,19	60	39%	Descarte	4%	84%
8	08/11/2018	3 7,20	6,45	36	39%	Principal	42%	88%
9	08/11/2018	6,60	8,43	72	48%	Principal	65%	96%
10	27/11/2018	3 7,40	6,17	60	68%	Principal	58%	96%
11	10/12/2018	3 5,00	33,33	72	69%	Principal	66%	96%
12	15/12/2018	6,00	25,71	120	74%	Principal	68%	98%
					Média		34%	82%
					Desvio padrão		29%	28%
					Coeficiente d	e variação	84%	35%

Tabela 9 - Resumo dos eventos

Descarte: esvaziado pelo descarte sem passar pelo principal

Principal: após o extravasamento do reservatório de descarte o volume é direcionado para o principal.

ER volume: Eficiência do sistema na retenção de volume

ER Qmáx: Eficiência do sistema na retenção de vazão máxima

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Na Tabela 9 observa-se nos eventos 1 (29/06/2018) e 7 (09/09/2018), o volume escoado do telhado não foi direcionado para o reservatório principal, resultando em menores reduções de volume. Verificou-se também que a média da atenuação das vazões máximas foi bem superior à de volume, respectivamente, 82% e 34%.

## 5.1.2 Simulação contínua

#### 5.1.2.1 Calibração e validação do modelo SWMM no SAAP

A partir dos parâmetros calibrados por meio dos eventos, efetuou-se uma nova calibração e validação do modelo no telhado (transformação chuva-vazão) e no SAAP, nesta etapa foi utilizada uma série contínua de precipitação de julho de 2018 a março de 2019, sendo considerada a evaporação e os usos monitorados nesse período (seção 4.3.5.3), as cotas do reservatório principal simuladas foram comparadas com a cotas monitoradas. Os parâmetros adotados inicialmente estão apresentados na Tabela 10.

Na Tabela 10 observa-se uma faixa mais ampla nos parâmetros: área impermeável (*AI*), parcela da área impermeável que não há armazenamento em depressões (*AS/A*), armazenamento em depressões para áreas impermeáveis (*PAimp*), coeficiente de Manning para área impermeável (*flimp*) e diâmetro do orifício do reservatório de descarte das primeiras águas.

Tabela 10 - Parâmetros do sistema completo				
Parâmetro	Média	Faixa		
W(m)	0,82	0,70 - 1,00		
AI (%)	70,71	50 - 100		
AS/A (%)	36,43	0 - 100		
PAimp (mm)	1,94	1,00 - 3,00		
Ŋimp	0,026	0,010 - 0,050		
Diâmetro do orifício (mm)	1,0	0,7 - 2,5		

Desse modo, a série foi dividida em duas, sendo a primeira utilizada para a calibração, e a segunda para a validação, os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Parâmetro	Valor	Período	08/07/2018 a 31/10/2018	01/11/2018 a 10/03/2019	
W(m)	3,00	Etapa	Calibração	Validação	
AI (%)	90,00	NSE	0.04	0,95	
AS/A (%)	0,00	NSE	0,94		
PAimp (mm)	1,00	RMSE(L)	13 55	10 71	
ſlimp	0,015	10,022 (2)	10,00	10,71	
Tempo de secagem (dias)	15				
Diâmetro do orifício (mm)	0,5				

Tabela 11 - Parâmetros calibrados para o sistema completo e índices

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Durante o processo de calibração foram necessários valores dos parâmetros largura característica ( $W_c$ ) e diâmetro do orifício do reservatório de descarte fora das faixas estabelecidas previamente. Isto ocorreu porque o primeiro possui influência na magnitude das vazões, como já observado na calibração por eventos, e o orifício apresenta condições iniciais muito diversas, podendo estar inclusive completamente obstruído durante algum período. O valor resultante da calibração do diâmetro foi de 0,5 mm.

Outro parâmetro observado durante a simulação contínua foi o tempo de secagem, que corresponde aos dias em que um solo completamente saturado demora para secar completamente, trata-se de um parâmetro de infiltração do método Curva-Número, utilizado pelo SWMM 5.1, em que apresenta relevância nos resultados apenas quando a evaporação é considerada na simulação, sendo assim, não havia sido calibrado nas etapas anteriores.

A Tabela 11 demonstra que os resultados da calibração e validação foram considerados bons, já que o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para as duas etapas foi superior a 0,9 e a raiz do erro quadrático médio foi de apenas 10 litros na etapa de validação. Nas Figura 42 são verificadas as cotas simuladas e observadas na calibração e validação.



Figura 42 - Calibração e validação do sistema completo por simulação contínua

# 5.1.2.2 Avaliação do desempenho do SAAP em termos de retenção de escoamento e atendimento à demanda monitorada

No período em que usos foram monitorados, de julho de 2018 a março de 2019, através de simulação contínua foram obtidos 48 eventos, na Figura 43 são observados os hidrogramas de entrada e saída do SAAP.

Na Figura 43 verifica-se que ao longo do período houve uma diminuição do número de picos de vazão entre os hidrogramas de entrada e saída, além disso, nos meses de fevereiro e março de 2019, quando há uma maior precipitação, houve um aumento de picos de vazão nos dois hidrogramas. Nas Figuras 44 e 45 são observados o comportamento do sistema nesse período quanto ao atendimento à demanda e o consumo de água na residência nesse mesmo período.



Figura 43 - Hidrogramas no SAAP, no período de monitoramento e com o modelo calibrado

Na Figura 44 observa-se que os usos foram atendidos pelo SAAP durante todo o período, havendo uma taxa de desperdício de água de 0,4, o reservatório permaneceu com 50% de sua capacidade preenchida durante metade do período analisado.

Na Figura 45, verifica-se ainda que os volumes utilizados nos meses de monitoramento foram muito pequenos, sendo praticamente insignificante para economia de água. Observa-se que no mês em que a retirada foi maior, cerca de 218 litros, esse valor correspondeu a 1,2% de água do consumo médio de janeiro, de acordo com a conta de água do mês. Como apontado por NEVES (2019), os usos não foram tão intensivos quanto o esperado, já que por diversas vezes os usuários não retiraram a água para um uso, quando poderiam ter feito.

Na Figura 46 estão apresentados os boxplots das reduções do volume e de vazão máxima (ER<sub>volume</sub> e ER<sub>Qmáx</sub>) dos 48 eventos obtidos na simulação. Observa-se que há uma maior variabilidade da ER<sub>volume</sub>, com uma mediana de redução de 34%, e com cerca de 75% dos eventos com ER<sub>volume</sub> abaixo de 63%. Quanto à vazão máxima, foi observada uma variabilidade consideravelmente mais baixa, em que cerca de 75% destes tiveram uma redução superior a 96%, com uma mediana de redução de 98%. Desse modo, percebe-se que durante o período de usos monitorados, a redução de volume foi muito inferior à redução de vazões máximas, é importante destacar ainda, que estes resultados decorrem de um sistema de aproveitamento de água de chuva com uma área de captação inferior a 4 m<sup>2</sup>.



Figura 44 - Comportamento do SAAP de

Fonte: A autora (2021)

Figura 46 - Redução de volumes e vazões máximas de julho/2018 a março/2019



Fonte: A autora (2021)

À vista disso, semelhante ao realizado por Palla, Gnecco e Barbera (2017), e a fim de constatar possível influência do regime de precipitação no desempenho do sistema quanto a reduções de volume e vazão máxima, os 48 eventos foram classificados em termos de precipitação total (mm), intensidade média do evento (mm/hora) e intensidade máxima a cada um minuto (mm/hora), considerando uma distribuição de frequência constante.

Na Figura 47, é verificado um crescimento da ERvolume conforme há o aumento da precipitação total, de modo que, todos os eventos com até 3 mm apresentaram uma redução de volume inferior a 30%, quando a precipitação foi de até 6 mm observou-se um considerável aumento nas reduções de volumes que alcançaram 60%. Quanto à vazão máxima, todos os eventos com profundidade de precipitação até 14 mm apresentaram uma redução de vazão máxima acima de 80%, com pouca variabilidade. A partir de 14 mm verifica-se uma maior variabilidade de ER<sub>Qmáx</sub>, com diminuição da média para 66%, apesar de não haver grande diferença das medianas entre as cinco classes de precipitação total observadas, todas acima de 95%.





Fonte: A autora (2021)

Nas Figura 48 são apresentados os boxplots de  $ER_{volume}$  e  $ER_{Qmáx}$  quanto à intensidade média dos eventos (mm/hora). Observa-se que  $ER_{volume}$  e  $ER_{Qmáx}$  não aparentam ser influenciadas pela intensidade média dos eventos, havendo um crescimento da redução de volume até a intensidade de 2 mm/hora, a partir daí, a redução dos volumes diminui. Quanto à vazão máxima, os valores de mediana são próximos em todas as classes, observa-se ainda que nos eventos que possuem intensidade média entre 1 e 2 mm/hora há uma maior variabilidade de  $ER_{Qmáx}$ . Na Figura abaixo são apresentados os boxplots de  $ER_{Volume}$  e  $ER_{Qmáx}$  quanto à intensidade máxima em 1 minuto (mm/hora).





Fonte: A autora (2021)

Conforme Figura 49, tem-se que nos boxplots de ER<sub>volume</sub> os eventos com intensidade máxima inferior a 36 mm/hora tiveram uma redução abaixo de 20%, com pouca variabilidade, já a partir de 36 mm/hora há um aumento da variabilidade, com crescimento das médias e medianas conforme o aumento da intensidade máxima. As medianas de ER<sub>Qmax</sub> nas quatros classes são muito próximas com pouca variabilidade até a intensidade máxima de 84 mm/hora, a partir daí, tem-se ER<sub>Qmax</sub> acima de 34% para 75% dos eventos do período.



Figura 49 - Redução de volumes e vazões máximas de julho/2018 a março/2019, em função das classes de intensidade máxima (mm/hora)

De modo geral, para o período de usos monitorados, verificou-se que a redução de volume foi inferior a redução de vazão máxima. Além disso, eventos com baixa precipitação total e baixa intensidade máxima de 1 minuto apresentaram menores reduções de volumes.

# 5.1.2.3 Comparação entre a análise por eventos e por simulação contínua para o período monitorado

Na Figura 50 são observados os boxplots de ER<sub>volume</sub> e ER<sub>Qmáx</sub> para o período de julho de 2018 a março de 2019 a partir da análise de eventos medidos pelo vertedor 1 e dos eventos selecionados por simulação contínua.



Figura 50 - Boxplots de ER<sub>volume</sub> e ER<sub>Qmáx</sub> para: a) análise por eventos e b) simulação contínua

Enquanto na análise por meio dos eventos medidos pelo vertedor 1, a quantidade foi de 10 eventos, na simulação contínua foram 48 eventos. Apesar dessa diferença significativa, as medianas foram bem próximas tanto na redução de volume (33% e 34%) quanto na redução das vazões máximas (88% e 98%). Ainda que na análise por eventos tenha sido possível observar o mesmo desempenho do SAAP quanto à retenção de escoamento, esses 10 eventos selecionados não possibilitaram observar a influência da precipitação, além de não ter sido consideradas todas as condições iniciais possíveis, tais como profundidade inicial do reservatório principal e umidade do telhado.

A análise dos eventos detectados na simulação contínua permitiu ainda a visualização do comportamento do SAAP durante as retiradas dos usos monitorados e o desperdício de água de chuva. Nas Figuras 51 a 54 são observados os comportamentos do sistema e os hidrogramas de entrada e saída do SAAP para os mesmos eventos, em que "a)" se referem àqueles provenientes dos hidrogramas de entrada medidos pelo vertedor 1 e os hidrogramas de saída simulados pelo modelo SWMM 5.1 (EV1), e "b)" correspondem aos eventos obtidos pela simulação contínua (SC) realizada através do modelo SWMM 5.1.





Nas Figuras 51 e 52 verifica-se uma diferença significativa entre os hidrogramas de entrada, já que a vazão máxima medida pelo vertedor 1 foi de no máximo 13 ml/s enquanto do evento selecionado por simulação contínua foi de 44 ml/s. Verifica-se que, apesar de os coeficientes utilizados para a avaliação da calibração do modelo terem apontado um bom ajuste, nem todos os eventos foram bem representados.

No que se refere aos reservatórios, observa-se que na Figura 51 não há acréscimo de volume no reservatório principal, ao passo que na Figura 52 houve um aumento do nível de água, passando de 33% para 39% da capacidade preenchida. Além disso, houve uma diferença nos níveis do reservatório de descarte, enquanto no evento selecionado por medição o reservatório de descarte não foi totalmente preenchido, sendo esvaziado rapidamente.

No evento proveniente da simulação contínua, o reservatório de descarte passa a maior parte do evento completamente preenchido, essa diferença que reflete nos volumes retidos no

80

reservatório principal se deve provavelmente à dimensão do orifício de descarte, uma vez que, no processo de calibração por eventos o diâmetro adotado foi de 1 mm, já durante a calibração por série contínua houve a necessidade de reajuste desse parâmetro para a dimensão de 0,5 mm. Logo, as reduções de volumes e vazões máximas também apresentaram valores distintos, com  $ER_{volume}$  (EV1) = 4 % e  $ER_{Qmax}$  (EV1) =84%, enquanto  $ER_{volume}$  (SC) = 58% e  $ER_{Qmax}$  (SC) = 98%. A seguir são apresentados as Figuras 53 e 54 que exibem o evento 15 de dezembro de 2018.





Verifica-se que as vazões máximas de entrada são muito próximas, monitorada e simulada, em que os picos de vazão são aproximadamente 87%. Além disso, o comportamento do sistema simulado nos dois casos é muito semelhante, com  $ER_{volume}$  (SC) = 64% e  $ER_{Qmáx}(SC) = 100$ %, enquanto os monitorados:  $ER_{volume}$  (EV1) = 68% e  $ER_{Qmax}(EV1) = 98\%$ .

## 5.2 Avaliação do SAAP para Simulação de 2014 a 2020

O desempenho do sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP) na simulação de 2014 a 2020 foi avaliado quanto à eficiência de economia de água (EEA), desperdício de água de chuva (O<sub>F</sub>), confiabilidade plena (CP) e eficiência de retenção de volume e vazão máxima (ER<sub>volume</sub> e ER<sub>Qmáx</sub>).

No que concerne ao atendimento à demanda, as leituras do hidrômetro da residência realizadas nos anos de 2017 e 2021 apontaram um consumo total de água diário em torno de 450 l/dia. A Figura 55 indica que cerca de 5 a 27% do consumo total diário da residência poderia ser substituído por água de chuva, considerando apenas os usos estabelecidos para o SAAP, como: lavagem de veículos (6%), lavagem de pisos (16%) e rega de jardim (5%).

Figura 55 - Desagregação do consumo de água não potável da residência substituível por água de chuva



Fonte: A autora (2021)

Quanto aos valores observados na literatura, Thackray et al. (1978) estimou que a rega de jardim corresponde de 2,1 a 3,9% do consumo diário de água, já Qasim (1994) apontou um valor de 3%. Em ambos os casos, os valores são inferiores aos calculados na desagregação do consumo de água da residência estudada. No entanto, é importante destacar que esse uso está diretamente vinculado a área e vegetação a ser regada.

Com relação ao volume por uso (rega), Macintyre (1982) estimou um consumo de 1,5 L/m<sup>2</sup>, o qual é semelhante ao obtido por meio do monitoramento dos usos do SAAP, de 2 L/m<sup>2</sup>. A lavagem de pisos se assemelha a rega de jardim, já que depende das características da residência. Melo e Azevedo Netto (1988) estimaram um valor de 1 a 2 L/m<sup>2</sup>, adotado para as simulações nesse trabalho.

Quanto à lavagem de veículos, Qasim (1994) estimou que esse uso corresponde a 1% do consumo diário numa residência, um volume de 209 litros por lavagem com uma frequência mensal. Já a SABESP (2007), em seu Programa de Uso Racional da Água, recomenda o uso de baldes para a lavagem de carros, resultando em um volume de 40 litros por lavagem, valores superiores ao obtido a partir do monitoramento dos usos do SAAP que foi de 29 litros por lavagem.

A eficiência de economia de água (EEA), taxa de desperdício de água de chuva (O<sub>F</sub>), confiabilidade plena do sistema e demandas supridas pelo SAAP para os seis cenários simulados, onde a menor demanda requerida foi a do cenário 50% × CR e a maior do cenário  $200\% \times CR$  (seção 4.5) estão apresentadas nas Figuras 56 e 57.

Importa lembrar que a demanda requerida é aquela estimada conforme o monitoramento dos usos da residência e não necessariamente atendida, a demanda suprida é a parcela da demanda requerida que o SAAP foi capaz de atender, além disso, o cenário CR é aquele de referência para a criação dos demais, e que tenta reproduzir um comportamento próximo do padrão atual dos moradores da residência. Isto significa que os cenários  $50\% \times CR$  e  $80\% \times CR$  podem ser vistos como cenários de comportamento mais rigoroso que o cenário CR no uso da água do SAAP e os cenários  $120\% \times CR$ ,  $150\% \times CR$  e  $200\% \times CR$  como cenários menos rigorosos que o cenário CR.



Figura 56 - Eficiência de economia de água e taxa de desperdício de água de chuva

Fonte: A autora (2021)





Figura 58 - Demanda requerida e suprida pelo SAAP



As Figuras 56, 57 e 58 demonstram que, conforme há o aumento da demanda requerida, a eficiência de economia de água decresce, sendo verificado o mesmo comportamento para a taxa de desperdício de água de chuva e confiabilidade plena do sistema. Apesar dos cenários simularem variações de comportamento dos usuários do SAAP quanto à demanda, verificou-se que o sistema possui uma limitação no atendimento, como ilustrado na Figura 58, onde a demanda suprida nos seis cenários permanece numa faixa anual de 2200 litros, correspondente apenas a 1,3 % do consumo total anual de água da residência, atingindo uma eficiência máxima de economia de 0,38 para o cenário 50%×CR e confiabilidade plena de

37%, considerando que seja requerida apenas 50% da demanda estimada inicialmente (cenário CR).

Com relação ao desempenho do SAAP na retenção do escoamento, na Figura 59 estão apresentados os boxplots das eficiências de retenção de volumes (ER<sub>volume</sub>) e das vazões máximas (ER<sub>Qmáx</sub>) nos seis cenários simulados.





Fonte: A autora (2021)

Na Figura 59 verifica-se que apesar de haver uma grande diferença de demanda requerida entre os cenários, houve um comportamento muito semelhante de retenção de volume e vazão máxima em todos, com uma maior variabilidade de  $\text{ER}_{\text{volume}}$  comparado com  $\text{ER}_{\text{Qmáx}}$ . Tem-se ainda, um pequeno aumento na retenção de volume, passando de uma mediana de 45% (cenário 50%×CR) para 48% (cenário 200%×CR), quanto às vazões de pico, não foi observada uma diferença significativa entre os cenários. Isso porque, como já discutido anteriormente, apesar de haver um aumento da demanda requerida nos cenários, o SAAP apresentou uma limitação no atendimento.

A fim de avaliar a influência de características pluviométricas no desempenho do SAAP quanto à redução de volumes e vazões máximas, a Figura 60 mostra os boxplots de ER<sub>volume</sub> e ER<sub>Qmax</sub> quanto à precipitação total dos eventos para o Cenário CR (cenário de referência), a partir de uma distribuição de frequência constante.



Figura 60 - Redução de volumes e vazões máximas na simulação de 2014 a 2020, em função das classes de precipitação total (mm)

Fonte: A autora (2021)

Na Figura 60 percebe-se uma  $ER_{volume}$  crescente conforme há o aumento da precipitação total, de modo que, 75% dos eventos com até 3 mm tiveram redução de volume inferior a 12%, ao passo que na classe de precipitação de 3 a 5 mm cerca de 75% dos eventos apresentaram  $ER_{volume}$  superior a 12%. Os eventos com precipitação total superior a 20 mm resultaram em uma mediana de redução de volume de 74,75%, dez vezes maior que a mediana dos eventos com menos de 3 mm de precipitação.

As vazões máximas apresentaram reduções medianas acima de 96% em todas as classes, com maior variabilidade nos eventos com precipitação acima de 20 mm, nessa classe verificou-se uma maior quantidade de eventos com ER<sub>Qmax</sub> inferiores a 92%. Na Figura 61 são observados os boxplots de ER<sub>volume</sub> e ER<sub>Qmax</sub> com relação a intensidade média.



Figura 61 - Distribuição de frequência dos eventos por intensidade média (mm/hora) e boxplots para as classes de intensidade média

Na Figura 61 há um crescimento nas reduções de volume conforme há o aumento da intensidade média, esse comportamento é observado até a classe de 1 a 2 mm/hora, a partir daí há uma pequena diminuição de  $\text{ER}_{\text{volume}}$ , que passa de 64,16% para 47,04%. Os eventos com intensidade média abaixo de 0,5 mm/hora apresentaram a menor mediana entre as classes, cerca de 11%, valor três vezes menor que a segunda classe com menor redução de volume. As medianas de  $\text{ER}_{\text{omáx}}$  foram superiores a 97% em todas as classes.

Os boxplots dos eventos com relação a intensidade máxima de 1 minuto (mm/hora) são observados na Figura 62. A redução do volume é crescente conforme o aumento da

intensidade máxima, com valores muito baixos para eventos com até 30 mm/hora, em que 75% dos eventos apresentaram uma redução de volume inferior a 22% enquanto na classe de 30 a 40 mm/hora em torno de 75% do eventos a  $ER_{volume}$  foi menor que 54,52%.





Fonte: A autora (2021)

O comportamento observado foi investigado, analisando-se a relação entre os volumes escoados pelo orifício do reservatório de descarte e os volumes de entrada no SAAP ( $V_{descarte}/V_{entrada}$ ) para as diferentes classes de precipitação total e intensidade máxima, nas Figuras 63 e 64.





Figura 64 - V<sub>descarte</sub>/V<sub>entrada</sub> em classes de intensidade máxima

Fonte: A autora (2021)

Na Figura 63 tem-se que nos eventos com até 3 mm de precipitação total, cerca de 93% do volume de entrada no SAAP é drenado pelo orifício do reservatório de descarte, havendo diminuição desse valor conforme os eventos possuem precipitações maiores. Na faixa de precipitação total acima de 20 mm, apenas 25% dos eventos apresentaram uma relação de Vdescarte/Ventrada acima de 27%.

O mesmo é observado com relação à intensidade máxima (Figura 64), pois os eventos com até 30 mm/hora em torno de 92% do volume de entrada é escoado pelo reservatório de descarte, ao passo que nos eventos mais intensos, a partir de 80 mm/hora, a mediana foi de

20,57%. Nos seis anos simulados no cenário CR, aproximadamente 25% dos eventos tiveram mais de 90% do volume que entra no sistema drenado pelo orifício do reservatório de descarte, de modo que, essa quantia de água não foi retida no reservatório principal ocasionando pouca ou nenhuma atenuação entre os volumes dos hidrogramas de entrada e saída. O desempenho do SAAP tanto em termos de redução de volumes e vazões máximas quanto de eficiência de economia de água e taxa de desperdício de água de chuva está diretamente relacionado com as características pluviométricas locais, tendo em vista que a precipitação diária foi uma condicionante para a consideração ou não do uso da água armazenada para a rega do jardim.

Dessa forma, nas Figuras 65 e 66 tem-se a distribuição de frequência dos eventos de chuva em termos de precipitação total e intensidade máxima, as reduções de volume e vazões máximas, a eficiência de economia de água e a taxa de desperdício de água da chuva, ao longo dos seis anos de simulação.





Fonte: A autora (2021)



Figura 66 - Distribuição de frequência das classes de intensidade máxima

Nas Figuras 67 e 68 identifica-se que no ano de 2016 houve mais eventos com baixa precipitação total (até 3mm) e baixa intensidade máxima (até 30 mm/hora), esse também corresponde ao ano com a menor mediana de  $\text{ER}_{\text{volume}}$  (30,65%) e menor eficiencia de economia de água (0,12). Em seguida tem-se 2017 e 2014 com maior quantidade de eventos menos intensos e com baixas precipitações totais, sendo observado que 2017 foi o ano com a segunda menor mediana de  $\text{ER}_{\text{volume}}$  (40,87%) e em 2014 a segunda menor eficiência de economia de água (0,19).

Os anos com maior quantidade de eventos com intensidades máximas acima de 60 mm/hora e precipitação total superior a 10 mm foram 2018, 2019 e 2020, sendo verificado que a maior mediana de  $\text{ER}_{\text{volume}}$  foi observada no ano de 2018 (54,63%), e a maior eficiência de economia de água em 2020 (0,29).





Fonte: A autora (2021)





Dessa forma, observou-se que o desempenho do SAAP é influenciado de forma importante por características pluviométricas, sobretudo intensidade máxima e precipitação total. Outro fator relevante no comportamento do sistema foi o reservatório de descarte, que apesar de fundamental para garantir uma melhor qualidade da água para os usos propostos, dispôs de papel importante na dificuldade de redução de volumes em eventos menos intensos, evidenciando a importância de manutenção constante no sistema.

#### 5.3 Análise do Método da Simulação para o Período de 2014 a 2020

Na Figura 69 é observada a relação entre as demandas estimadas e a confiabilidade plena do sistema na simulação contínua (SC) (modelo SWMM) e no método da simulação com dados diários, enquanto na Tabela 12 estão apresentadas as demandas diárias obtidas para uma confiabilidade plena de aproximadamente 90%.





Fonte: A autora (2021)

Tussen 12 Demandus para 2070 de comfusindade prena					
	Simulação contínua (SWMM)	Método da simulação			
Confiabilidade plena	89%	90%			
Demanda diária (L/dia)	2,4	4,25			

Tabela 12- Demandas para 90% de confiabilidade plena

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

A diferença relativa percentual média entre os indicadores de confiabilidade plena calculados para as duas metodologias foi de 40%, sendo que a partir do valor de demanda diária de 23,4 l/dia, onde tem-se o mesmo valor de confiabilidade, o método da simulação apontou uma confiabilidade plena inferior à calculada por simulação contínua.

Na Tabela 12, verifica-se que, para uma confiabilidade plena de aproximadamente 90%, a diferença entre as demandas diárias estimadas foi de 44%, logo, devido as simulações realizadas possuírem diferentes intervalos de tempo (diária e 1 minuto) e diferentes dados de entrada (precipitação, evaporação e outros), as duas metodologias apontam que um SAAP com reservatório de 200 litros, atende a uma demanda diária de cerca de 4,25 litros/dia (método da simulação) e 2,4 litros/dia (simulação contínua) com uma confiabilidade de 90%. Em um raciocínio linear e inverso, o método da simulação com dados diários exige mais volume para a mesma demanda, ou seja, partindo da ideia de que a simulação contínua com o SWMM é a referência, inclusive pelo fato de ter havido calibração, o método da simulação com dados diários superestima o volume.

Para esse cenário, de confiabilidade plena de 90% (C90%), com uma demanda média diária de 2,4 l/dia, a eficiência na retenção de volume e vazão máxima e os indicadores adimensionais de eficiência de economia de água e taxa de desperdício de água de chuva estão apresentados nas Figuras 70 e 71:



🔲 Volume 🔲 Vazão máxima





Eficiência de economia de águaTaxa de desperdício de água da chuva

Fonte: A autora (2021)

Assim como observado nos cenários, a redução de volume é consideravelmente inferior à redução da vazão máxima, além disso, verifica-se uma maior variabilidade de  $ER_{Qmax}$ . Verifica-se que a diminuição da demanda suprida, que passou de cerca de 2200 litros por ano para 740 litros, acarretou numa redução significativa da eficiência de redução de volume, que passou de cerca de 45%, no cenário CR (cenário de referência), para 12,82%. De modo semelhante, a  $ER_{Qmáx}$  passou de 98% (cenário CR) para 95,24%. Na Figura 71 verifica-se que com a diminuição da demanda, a taxa de desperdício de água de chuva é de 0,72.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento de um sistema de aproveitamento de águas pluviais para fins não potáveis quanto ao impacto na geração do escoamento superficial, bem como o método de simulação com dados diários, utilizado comumente no dimensionamento de reservatórios de aproveitamento de águas pluviais. Para isso, o primeiro passo foi a configuração do sistema telhado – reservatório de descarte – reservatório principal no modelo SWMM, de forma que o modelo foi calibrado e validado por eventos monitorados e séries contínuas de precipitação. Os parâmetros largura caracterítica e diâmetro do orifício do reservatório de descarte apresentaram papel fundamental para que o ajuste do modelo fosse adequado, com coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0,95, na simulação contínua.

Com o modelo SWMM calibrado para representar o sistema de águas pluviais estudado, o desempenho do SAAP foi avaliado no período de monitoramento dos usos, entre julho de 2018 e março de 2019. Os dez eventos medidos pelo vertedor 1 e simulados no modelo SWMM indicaram reduções de volume e vazão máxima muito semelhantes aos verificados na simulação contínua, onde a evaporação foi considerada, em torno de 34% (mediana), de diminuição do volume, e 88 a 98% (medianas), de vazão máxima. De modo que a análise por eventos e por simulação contínua indicaram o mesmo comportamento do SAAP, quanto ao impacto no escoamento superficial para o período de usos monitorados. Quanto à demanda nesse período, os volumes de água utilizados pelos usuários foram insuficientes para promover uma economia de água na residência.

Na avaliação de desempenho do SAAP para diferentes cenários de demanda, o sistema foi simulado para o período de 2014 a 2020 por meio de série contínua de precipitação e confecção de cenário de referência de acordo com o padrão de consumo dos moradores. Um dos cenários, o CR, foi utilizado como referência, de modo a reproduzir o comportamento da residência no uso do sistema implantado. Os demais cenários de demanda foram obtidos ampliando ou reduzindo a demanda por fatores multiplicativos. Tudo isto resultou em séries de precipitação, evaporação e demanda, com quase 3 milhões de dados.

Os indicadores de eficiência de economia de água, taxa de desperdício de água de chuva e confiabilidade plena diminuíram conforme o aumento da demanda requerida. A demanda atendida média foi de 2.200 litros/ano, correspondente a apenas 1,3% do consumo anual da residência. O cenário 50%  $\times$  CR, que equivale a 50% da demanda estimada no cenário de referência, apresentou o melhor resultado, com uma eficiência de economia de água de 0,38 e confiabilidade plena de 37%. Quanto à retenção do escoamento superficial, devido a demanda

suprida ter sido em média de 2.200 litros anuais nos seis cenários, não houve diferenças significativas nas reduções de volume e vazão máxima entre os cenários simulados, permanecendo com medianas de 45% a 48% (ER<sub>volume</sub>) e 98% (ER<sub>Qmáx</sub>).

O comportamento do sistema de aproveitamento de água de chuva sofreu influência significativa de características pluviométricas, de forma que eventos com menores valores de precipitação total e de intensidade máxima de 1 minuto acarretaram em baixas reduções de volume, onde em eventos com precipitação total inferior a 3 mm e intensidade máxima menor que 33 mm/hora, cerca de 93% do volume escoado do telhado foi drenado pelo oríficio do reservatório de descarte, não havendo portanto amortecimento do volume do hidrograma de entrada.

Quanto ao atendimento às demandas estimadas a partir de caracteríticas da unidade residencial, foi constatado que o SAAP apresenta uma limitação de fornecimento de água proveniente possivelmente de restrições físicas do sistema já que ainda que todo o volume escoado da parcela do telhado fosse disponibilizado para o atendimento à demanda, esse valor ainda não seria suficiente para ocasionar uma economia de consumo de água na residência. Uma alternativa para aumentar o atendimento à demanda seria uma ampliação do sistema, com a aquisição de uma calha com maior comprimento a fim de captar o escoamento de uma maior parcela da cobertura, a inclusão de um segundo reservatório ou a troca do reservatório principal por outro com volume maior, dependendo da área disponível para o sistema. Uma alternativa seria repensar os usos previstos para o SAAP.

A fim de verificar se um método de dimensionamento que demandasse informações de entrada mais simplificadas seria capaz de representar o comportamento do SAAP em termos de atendimento à demanda, o método da simulação com dados diários foi analisado. Como se tinha à disposição simulações contínuas no SWMM a partir da calibração deste, considerou-se que elas eram as referências seguras para a avaliação do método da simulação com dados diários. Diferentemente da simulação contínua, as simulações com dados diários continham séries de precipitação com 2.564 dados, o que pode ser realizado em uma planilha simples.

A avaliação indicou que o sistema estudado seria capaz de atender uma demanda diária de 4,25 litros/dia com 90% de confiabilidade plena, valor 44% superior ao obtido na simulação contínua com o modelo SWMM. Neste cenário de confiabilidade plena de 90%, a retenção de escoamento foi prejudicada, principalmente de volume, que passou de 45%, no cenário de referência, para 13%.

Existem desafios na compatibilização das finalidades da implantação de sistemas de aproveitamento de águas pluviais, já que se pode optar por definir usos mais frequentes e com

maiores volumes de água. Neste caso há uma maior possibilidade de volumes de espera para retenção de eventos futuros, o que resultaria em reduções de volume e vazões máximas, mas no que diz respeito ao atendimento à demanda, a confiabilidade do sistema seria comprometida. Outra possibilidade seria definir uma demanda ou volume de reservatório principal para uma confiabilidade de 90%, usualmente utilizada, onde teria-se um melhor atendimento aos usos do usuário, mas um desempenho inferior na redução do escoamento, aumentando significativamente a taxa de desperdício de água de chuva.

Conclusivamente, é importante destacar que o aproveitamento de água de chuva é uma das técnicas de desenvolvimento de baixo impacto, sendo possível a associação de mais de uma técnica LID para resultados mais satisfatórios. Neste sentido, é possível associar captação de água de chuva para atendimento à demanda com técnicas que promovam a infilração dos hidrogramas de saída do sistema, afim de atenuar os volumes extravasados pelo reservatório principal.

#### 6.1 Recomendações

Este trabalho foi realizado a partir dos dados obtidos na operação de um aparato de monitoramento confeccionado no âmbito de um projeto de pesquisa com o título "Aproveitamento de água de precipitação no telhado em lote urbano e sua influência na geração do escoamento superficial.", aprovado no Edital Fapeal 14/2016 com período de vigência: 01/06/2017 a 31/05/2019. Não houve a instalação de bombonas a partir de um dimensionamento prévio devido aos recursos disponíveis, o que tornou imperativo a calibração do modelo SWMM em uma escala muito pequena, de modo a representar o comportamento no período de monitoramento.

Foram verificadas dificuldades ao longo da execução do trabalho, tais como: a confecção dos hidrogramas a partir da medição de vazões pelos vertedores triangulares e manutenção do sistema em geral. Assim, recomenda-se o estudo de novas metodologias de medição e monitoramento, de forma que sejam obtidas séries mais longas de dados (precipitação, vazão e consumo de água da residência) capazes de promover uma melhor caracterização do local de estudo. Além de apontar, a partir de dados medidos, o desempenho do SAAP quanto à retenção de escoamento e atendimento aos usos propostos.

Neste contexto, é importante utilizar os resultados deste trabalho para simular futuros aparatos experimentais com uma base mais firme e em uma escala maior, abrangendo parcelas de telhados maiores, possibilitando uma análise mais completa sobre a compatibilização das diferentes finalidades de sistemas dessa natureza.

Dada a importância do reservatório de descarte, constatada no trabalho, um estudo que inclua a medição do hidrograma de saída dessa estrutura pode contribuir no entendimento do balanço do sistema completo. Além disso, pode ser considerada a adoção de outros mecanismos para o descarte das primeiras águas. Recomenda-se em projetos de pesquisa futuros a instalação do monitoramento de nível da água dentro deste reservatório.

# REFERÊNCIAS

ABDELKHALEQ, R. A.; ALHAJ AHMED, I. Rainwater harvesting in ancient civilizations in Jordan. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 7, n. 1, p. 85–93, 2007.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15527: 2007** - Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - Requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15527: 2019** - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ABU-ZREIG, M.; ABABNEH, F.; ABDULLAH, F. Assessment of rooftop rainwater harvesting in northern Jordan. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 114, n. February, p. 102794, 2019.

AHMED, W. et al. Real-time PCR detection of pathogenic microorganisms in roof-harvested rainwater in Southeast Queensland, Australia. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 74, n. 17, p. 5490–5496, 2008.

AKTER, A.; TANIM, A. H.; ISLAM, M. K. Possibilities of urban flood reduction through distributed-scale rainwater harvesting. **Water Science and Engineering**, v. 13, n. 2, p. 95–105, 1 jun. 2020.

ALMEIDA JÚNIOR, H. **Estudo do efeito de medidas simplificadas de controle de geração do escoamento superficial em lote urbano.** 2018. 137p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

ALVES, L. et al. Avaliação da Qualidade da Água de Chuva do Fenômeno First Flush e de Volumes Armazenados em Reservatórios de Sistemas de Águas Pluviais na Cidade do Rio de Janeiro-RJ. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, p. 193-204, 2021.

AMORIM, S. V. DE. Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 2, p. 53–66, 2008.

ANA, Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 18 ago. 2021.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Planejamento de sistemas de abastecimento de água.** Editora Universidade Federal do Paraná, 1973.

BARRETO, D. Perfil do consumo residencial e usos finais da água. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 2, p. 23–40, 11 ago. 2008.

BARROS, A. Estudo de Medidas Descentralizadas para o Controle do Escoamento Urbano: Aplicação à Bacia Hidrográfica do Riacho do Sapo-Maceió/AL. 2015. 136f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

BELL, S. Renegotiating urban water. Progress in Planning, v. 96, p. 1–28, 1 fev. 2015.

BOUGHTON, W.; DROOP, O. Continuous simulation for design flood estimation—a review. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 4, p. 309–318, 2003.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o

inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil\_03/leis/19433.htm>. Acesso em 18 ago. 2021.

BRASIL. Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis n<sup>os</sup> 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 6 jan. 2007. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil\_03/\_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em 18 ago. 2021.

BRASIL. Lei n. 13.501, de 30 de outubro de 2017. Altera o art. 2º da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, para incluir o aproveitamento de águas pluviais como um de seus objetivos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 31 out. 2017. Disponível em: <a href="http://www.planalto.gov.br/ccivil\_03/\_ato2015-2018/2017/lei/L13501.htm">http://www.planalto.gov.br/ccivil\_03/\_ato2015-2018/2017/lei/L13501.htm</a>. Acesso em 18 ago. 2021.

BRASIL. Lei n. 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil\_03/\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em 18 ago. 2021.

BROWN, R. R.; KEATH, N.; WONG, T. H. F. Urban water management in cities: historical, current and future regimes. **Water Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 847–855, 2009.

BURNS, M. J. et al. Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform. **Landscape and Urban Planning**, v. 105, n. 3, p. 230–240, 2012.

BURNS, M. J. et al. The performance of rainwater tanks for stormwater retention and water supply at the household scale: an empirical study. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 1, p. 152–160, 2015.

CAMPISANO, A. et al. Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. **Water Research**, v. 115, p. 195–209, 2017.

CAMPISANO, A.; LUPIA, F. A dimensionless approach for the urban-scale evaluation of domestic rainwater harvesting systems for toilet flushing and garden irrigation. **Urban Water Journal**, v. 14, n. 9, p. 883–891, 2017.

CAMPISANO, A.; MODICA, C. Appropriate resolution timescale to evaluate water saving and retention potential of rainwater harvesting for toilet flushing in single houses. **Journal of Hydroinformatics**, v. 17, n. 3, p. 331–346, 2015.

CHOW, V. TE. Handbook of applied hydrology. **International Association of Scientific Hydrology.** Bulletin, v. 10, n. 1, p. 82–83, 1965.

COFFMAN, L. Low-impact development design: a new paradigm for stormwater management mimicking and restoring the natural hydrologic regime an alternative stormwater. p. 158–167, 2000.

COHIM, Eduardo; GARCIA, Ana; KIPERSTOK, Asher. Captação e aproveitamento de água de chuva: dimensionamento de reservatórios. **In: IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.** Salvador, Bahia; v. 9, 2008. COLLODEL, M. G. Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão. 2009. 225p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE ALAGOAS (CASAL). Disponível em:< https://www.casal.al.gov.br/>>. 2020

CUNHA, G. S; NEVES, M. G. Reservatório de água de chuva: dimensionamento e economia de água potável. **In: XII Encontro Nacional de Águas Urbanas.** Florianópolis-SC. 2017

CUSTÓDIO, D. A.; GHISI, E. Assessing the potential for potable water savings in the residential sector of a city: A case study of Joinville city. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 10, 2019.

DAVIDOVITSCH, L. **Estado da arte das técnicas de desenvolvimento de baixo impacto aplicadas no controle da drenagem urbana**. 2020. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

DEITCH, M. J.; FEIRER, S. T. Cumulative impacts of residential rainwater harvesting on stormwater discharge through a peri-urban drainage network. **Journal of Environmental Management**, v. 243, n. April, p. 127–136, 2019.

DELLEUR, J. W. The evolution of urban hydrology: Past, present, and future. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 8, p. 563–573, 2003.

DIXON, A.; BUTLER, D.; FEWKES, A. Computer simulation of domestic water reuse system: investigating greywater and rainwater in combination. **Water Science & Technology**, v. 38, n. 4, p. 25-32, 1999.

DORNELLES, F. Aproveitamento de Água de Chuva no Meio Urbano e seu Efeito na Drenagem Pluvial. 2012. 234f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Amabiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FARRENY, R. et al. Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. **Water Research**, v. 45, n. 10, p. 3245–3254, 2011.

FERREIRA, C.A. Modelo chuva-vazão para lotes urbanos. 2017. 53p. Monografia. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

FLEISCHMANN, A. et al. Estimating design hydrographs at the basin scale: from eventbased to continuous hydrological simulation. **RBRH** (**Revista Brasileira de Recursos Hídricos**), v. 24, 2019.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. Advances in Water Resources, v. 51, p. 261–279, 2013.

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.

FLOYD, J. et al. Managing complexity in Australian urban water governance: Transitioning Sydney to a water sensitive city. **Futures**, v. 61, p. 1–12, 2014.

FONSECA, V.; MENEZES FILHO, F. C. Estudo comparativo entre métodos de dimensionamento para reservatórios de sistemas de aproveitamento de águas pluviais. **Holos** 

Environment, v. 19, n. 2, p. 287-303, 2019.

FRENI, G.; LIUZZO, L. Effectiveness of rainwater harvesting systems for flood reduction in residential urban areas. **Water**, v. 11, n. 7, 2019.

GEROLIN, A.; KELLAGHER, R. B.; FARAM, M. G. Rainwater harvesting systems for stormwater management: Feasibility and sizing considerations for the UK. **Novatech 2010**, 2010.

GHAFFARIANHOSEINI, ALI et al. State of the art of rainwater harvesting systems towards promoting green built environments: a review. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 1, p. 95–104, 2016.

GHISI, E. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. **Building and Environment**, v. 41, n. 11, p. 1544–1550, 2006.

GIRONÁS, J. et al. Storm water management model applications manual. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. 2009.

GOLDENFUM, Joel Avruch. Reaproveitamento de águas pluviais. 2006. In: Simpósio Nacional sobre o Uso da Água na Agricultura. Passo Fundo, v. 1, p. 1-14, 2006.

GOLDENFUM, J. A. et al. Challenges for the sustainable urban stormwater management in developing countries : from basic education to technical and institutional issues Défis pour la gestion durable des eaux pluviales urbaines dans les. **Novatech 2007**, p. 357–364, 2007.

GOMES, U. A. F.; PENA, J. L.; HELLER, L. A National Program for Large Scale Rainwater Harvesting: An Individual or Public Responsibility? **Water Resources Management**, v. 26, n. 9, p. 2703–2714, 2012.

HELLER, L.; PÁDUA, V. DE. Abastecimento de água para consumo humano. Editora UFMG, 2006.

HENTGES, S. **Efeito de reservatório de aproveitamento de água de chuva sobre redes de drenagem pluvial**. 2013. 258 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

HUBER, W.; DICKINSON, R.; BARNWELL, T. Storm water management model, version 4: user's manual. U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia, 1992.

JAMALI, B.; BACH, P. M.; DELETIC, A. Rainwater harvesting for urban flood management – An integrated modelling framework. **Water Research**, v. 171, p. 115372, 15 mar. 2020.

JENSEN, M. A. et al. Do rainwater harvesting objectives of water supply and stormwater management conflict? Low Impact Development 2010: Redefining Water in the City, p. 11–20, 2010.

JING, X. et al. Analysis and Modelling of Stormwater Volume Control Performance of Rainwater Harvesting Systems in Four Climatic Zones of China. **Water Resources Management**, v. 32, n. 8, p. 2649–2664, 2018.

JOHANNESSEN, B. et al. The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar build-up. **Journal of Hydrology**, v. 569, p. 816-828, 2019.

LEITE, L.; MOURA, B. M. Caracterização do consumo percapita e do uso da água da população de Pau dos Ferros-RN. Holos Environment, v. 19, n. 4, p. 640–656, 2019.

MACINTYRE, A. J. Instalações Hidráulicas, Brasil: Guanabara Dois, 770 p.1982.

MELO, V, O.; AZEVEDO NETTO, J. M. Instalações prediais hidráulico-sanitárias. Editora Blucher, 1988.

MITCHELL, V. G. Applying integrated urban water management concepts: A review of Australian experience. **Environmental Management**, v. 37, n. 5, p. 589–605, 2006.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NEVES, M. G. F. P. Aproveitamento de água de precipitação no telhado em lote urbano e sua influência na geração do escoamento superficial: Relatório científico - FAPEAL. Maceió, 2019

PACHECO, P. R. et al. A view of the legislative scenario for rainwater harvesting in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 290–294, 2017.

PALLA, A.; GNECCO, I.; BARBERA, P. The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale. Journal of Environmental Management, v. 191, p. 297–305, 2017.

PALLA, A.; GNECCO, I.; LANZA, L. G. Non-dimensional design parameters and performance assessment of rainwater harvesting systems. **Journal of Hydrology**, v. 401, n. 1–2, p. 65–76, 2011.

PEPLAU, G. Análise de critérios para definição de vazão de restrição para o controle do escoamento superficial urbano. Estudo de caso: bacia hidrográfica do Riacho do Sapo, Maceió-AL. 2013. 126p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

PETRUCCI, G. et al. Rainwater harvesting to control stormwater runoff in suburban areas. An experimental case-study. **Urban Water Journal**, v. 9, n. 1, 2012.

QASIM, S. R. Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation. **Technomic Publishing Co.** Inc., Lancaster, PA, 1994.

QUINN, R.; ROUGÉ, C.; STOVIN, V. Quantifying the performance of dual-use rainwater harvesting systems. **Water Research X**, v. 10, p. 100081, 2021.

ROSA, D. J.; CLAUSEN, J. C.; DIETZ, M. E. Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 3, p. 746–757, 2015.

ROSSMAN, L. A. Storm Water Management Model (SWMM) User's Manual Version **5.0**, 2012.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Programa de Uso racional da água – PURA**. 2007.

SAMPAIO, F. E. DE O. V.; ALVES, C. M. A. A procedure to analyze the viability of rainwater harvesting systems in urban areas based on pre-defined diagrams. **RBRH** (**Revista Brasileira de Recursos Hídricos**), v. 22, 2017.

SANTOS, B. S.; CESAR, G. **Diagnóstico do perfil de consumo e proposta de plano de contingência para edifícios residenciais em cenários de crise hídrica**. 2016. 109p. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SANTOS, S.; FARIAS, M. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 1007-1015, 2017.

SCHUETZE, T. Rainwater harvesting and management - Policy and regulations in Germany. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 13, n. 2, p. 376–385, 2013.

SEMPRESUSTENTÁVEL. Como funciona uma minicisterna. Disponível em:<www.sempresustentavel.com.br>. Acesso em: 12 jan. 2021.

SILVA, D. F. Análise da influência de microrreservatórios em um loteamento e seus efeitos em escala de bacia. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA. L. M. Estudo da demanda de água não potável e desenvolvimento de um sistema de reuso de água cinza para habitações de interesse social. 2013. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SILVA, G. N. et al. An assessment of atmospheric deposition of metals and the physicochemical parameters of a rainwater harvesting system in Rio de Janeiro Brazil, by means of statistical multivariate analysis. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, 2020.

SOUZA, V. C. B. DE; MORAES, L. R. S.; BORJA, P. C. Déficit Na Drenagem Urbana: Buscando O Entendimento E Contribuindo Para a Definição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 162, 2013.

TAMAGNONE, P.; COMINO, E.; ROSSO, M. Rainwater harvesting techniques as an adaptation strategy for flood mitigation. **Journal of Hydrology**, v. 586, p. 124880, 2020.

TESTON, A et al. Impact of rainwater harvesting on the drainage system: Case study of a condominium of houses in Curitiba, Southern Brazil. **Water**, v. 10, n. 8, 2018a.

TESTON, A et al. Rainwater harvesting in buildings in Brazil: A literature review. **Water**, v. 10, n. 4, 2018b.

THACKRAY, J. E. et al. Discussion. the malvern and mansfield studies of domestic water usage. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 64, n. 3, p. 483-502, 1978.

TOMAZ, P. Aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas para fins não potáveis. Comercial Editora Hermano & Bugelli Ltda, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas.** Ministério das Cidades/ Global Water Partnership - Brasília: UNESCO, 2005.

UCHÔA, L. M; NEVES, M. G. Estudo dos critérios para separação de eventos chuvosos. In: XIII Encontro Nacional de Águas Urbanas. Virtual. 2020.

XU, W. D. et al. Improving the multi-objective performance of rainwater harvesting systems using Real-Time Control technology. **Water**, v. 10, n. 2, p. 1–19, 2018.

YANG, H. X.; CHOW, W. H.; BURNETT, J. Water and Energy Conservation of Rainwater Collection Systems on Building Roofs. **Advances in Building Technology**, v. 2, p. 1281–1288, 2002.

		Leitura do hidrômetro			
Dia da semana	Data	Manhã			
		Hora	Algarismos pretos	Algarismos vermelhos	
Segunda	04/01/2021	06:00	2020	97	
Terça	12/01/2021	06:00	2026	19	
Terça	19/01/2021		2030	71	
Terça	26/01/2021	06:50	2034	19	
Terça	02/02/2021	06:30	2037	7	
Segunda	08/02/2021	06:30	2039	76	
Segunda	15/02/2021	06:30	2042	95	
Terça	23/02/2021	06:30	2047	42	

APÊNDICE A – Leituras semanais do hidrômetro da unidade residencial

Fonte: Elaborado pela autora (2021)


## APÊNDICE B – Linha do tempo do procedimento metodológico



**APÊNDICE C – Comportamento do SAAP nos eventos monitorados** 





Hora

Hora



Saída (simulada) Intervalo de confiança — Reservatório principal

Método	Fórmula	Grandezas		
Rippl <sup>1</sup>	$\begin{split} S_{(t)} &= D_{(t)} - Q_{(t)} \\ Q_{(t)} &= C \ x \ precipitação \ da \\ chuva_{(t)} \ x \ área \ de \ captação \\ V &= \sum S, \ somente \ para \ valores \\ S_{(t)} &> 0 \\ Sendo \ que: \ \sum D_{(t)} < Q_{(t)} \end{split}$	<ul> <li>S<sub>(t)</sub> é o volume de água no reservatório no tempo t;</li> <li>Q<sub>(t)</sub> é o volume de chuva aproveitável no tempo t;</li> <li>D<sub>(t)</sub> é a demanda ou consumo no tempo t;</li> <li>V é o volume do reservatório;</li> <li>C é o coeficiente de escoamento superficial.</li> </ul>		
Método da Simulação <sup>1</sup>	$\begin{split} S_{(t)} &= Q_{(t)} + S_{(t-1)} \cdot D_{(t)} \\ Q_{(t)} &= C \ x \ precipitação \ da \\ chuva_{(t)} \ x \ área \ de \ captação \\ Sendo \ que: \ 0 \leq S_{(t)} \leq V \end{split}$	<ul> <li>S<sub>(t)</sub> é o volume de água no reservatório no tempo t;</li> <li>S<sub>(t-1)</sub> é o volume de água no reservatório no tempo t - 1;</li> <li>Q<sub>(t)</sub> é o volume de chuva no tempo t;</li> <li>D<sub>(t)</sub> é o consumo ou demanda no tempo t;</li> <li>V é o volume do reservatório fixado;</li> <li>C é o coeficiente de escoamento superficial.</li> </ul>		
Azevedo Neto <sup>1</sup>	V = 0,042 x P x A x T	<ul> <li>P é o valor numérico da precipitação média anual, expresso em milímetros (mm);</li> <li>T é o valor numérico do número de meses de pouca chuva ou seca;</li> <li>A é o valor numérico da área de coleta em projeção, expresso em metros quadrados (m<sup>2</sup>);</li> <li>V é o valor numérico do volume de água aproveitável e o volume de água do reservatório, expresso em litros (L).</li> </ul>		

ANEXO A – Métodos de cálculo para dimensionamento de reservatórios de aproveitamento de águas pluviais

<i>′</i> .•	~ \
(confini	iacao)
(continu	iuçuoj

Método	Fórmula	Grandezas		
Prático alemão <sup>1</sup>	V <sub>adotado</sub> = mín (V; D) x 0,06	V é o valor numérico do volume aproveitável de água de chuva anual, expresso em litros (L); D é o valor numérico da demanda anual da água não potável, expresso em litros (L) V <sub>adotado</sub> é o valor numérico do volume de água do reservatório, expresso em litros (L)		
Prático inglês <sup>1</sup>	V = 0,05 x P x A	<ul> <li>P é o valor numérico da precipitação média anual, expresso em milímetros (mm);</li> <li>A é o valor numérico da área de coleta em projeção, expresso em metros quadrados (m<sup>2</sup>);</li> <li>V é o valor numérico do volume de água aproveitável e o volume de água da cisterna, expresso em litros (L).</li> </ul>		
Prático australiano <sup>1</sup>	Volume de chuva: $Q = A \ge C \ge (P - I)$ O cálculo do volume do reservatório é realizado por tentativas, até que sejam utilizados valores otimizados de confiança e volume do reservatório. $V_t = V_{t-1} + Q_t - D_t$ Para o primeiro mês, considera- se o reservatório vazio. Quando $(V_{t-1} + Q_t - D) < 0$ , então o $V_t = 0$ O volume do tanque escolhido será T. Confiança: $P_r = N_r / N$	C é o coeficiente de escoament superficial, geralmente 0,80; P é a precipitação média mensal I é a interceptação da água qu molha as superfícies e perda por evaporação, geralmente mm; A é a área de coleta; Q é o volume mensal produzid pela chuva; Q <sub>t</sub> é o volume mensal produzid pela chuva no mês t; V <sub>t</sub> é o volume de água que est no tanque no fim do mês t $V_{t-1}$ é o volume de água que est no tanque no início do mês t; D <sub>t</sub> é a demanda mensal; P <sub>r</sub> é a falha;		
	Confiança: $P_r = N_r / N$ Confiança = (1 - $P_r$ )	P <sub>r</sub> é a falha;		

	Data	Leitura do hidrômetro					
Dia da		Manhã		Noite			
semana		Hora	Algarismos pretos	Algarismos vermelhos	Hora	Algarismos pretos	Algarismos vermelhos
Domingo	17/12/2017			8	22:32	1517	2
Quarta	20/12/2017	08:14	1517	68	21:47	1518	1
Quinta	21/12/2017	06:20	1518	10	22:40	1518	37
Sexta	22/12/2017	08:01	1518	44	23:55	1518	57
Sábado	23/12/2017	08:33	1518	60	23:40	1518	78
Domingo	24/12/2017	09:55	1518	92	23:51	1519	87
Segunda	25/12/2017	05:49	1519	95	21:39	1520	21
Terça	26/12/2017	07:11	1520	28	22:46	1521	9
Quarta	27/12/2017	07:50	1521	15	17:55	1521	67
Quinta	28/12/2017	07:10	1523	3	22:44	1523	25
Sexta	29/12/2017	06:30	1523	36	23:34	1523	74
Domingo	31/12/2017	06:26	1525	4	19:41	1525	44

## ANEXO B – Leituras de hidrômetro da unidade residencial

Fonte: NEVES (2019)

Data	Uso	Volume (L)
08/07/2018	Lavagem do carro	29
15/07/2018	Preenchimento dos vertedores e lavagem superficial do carro	14,5
26/07/2018	Preenchimento dos vertedores	14,5
26/07/2018	Rega do jardim	29
29/07/2018	Preenchimento do tudo de PVC do vertedor 2	14,5
29/07/2018	Lavagem superficial do carro	14,5
04/08/2018	Esvaziamento do reservatório para a substituição da torneira	-
30/09/2018	Lavagem superficial do carro	14,5
02/12/2018	Lavagem do carro	29
28/12/2018	Rega do jardim	14,5
29/12/2018	Preenchimento dos vertedores e lavagem superficial do carro	29
12/01/2019	Lavagem do piso, preenchimento dos vertedores e lavagem superficial do carro	72,5
20/01/2019	Lavagem do piso, preenchimento dos vertedores e lavagem superficial do carro	72,5
27/01/2019	Lavagem do piso, preenchimento dos vertedores e lavagem superficial do carro	72,5
10/02/2019	Lavagem do piso e preenchimento dos vertedores	29
17/02/2019	Preenchimento dos vertedores e lavagem superficial do carro	29
24/02/2019	Preencher os vertedores e Lavagem superficial da parte externa do carro	29
02/03/2019	Preenchimento dos vertedores	14,5
10/03/2019	Preenchimento dos vertedores e lavagem do carro	43,5
17/03/2019	Preenchimento dos vertedores e lavagem do carro	43,5
06/04/2019	Lavagem do terraço	43,5
05/05/2019	Lavagem do carro	58

## ANEXO C – Acompanhamento dos usos de água de chuva no SAAP

Fonte: NEVES (2019)