

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

Bruno Álvaro Schina

**MODELAGEM DE RESERVATÓRIOS DE USO COMPARTILHADO  
PARA O CONTROLE DE ESCOAMENTO E APROVEITAMENTO DE  
ÁGUA PLUVIAL**

Santa Maria, RS  
2022

Bruno Álvaro Schina

**MODELAGEM DE RESERVATÓRIOS DE USO COMPARTILHADO  
PARA O CONTROLE DE ESCOAMENTO E APROVEITAMENTO DE  
ÁGUA PLUVIAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Rutineia Tassi

Santa Maria, RS  
2022

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

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Schina, Bruno Álvaro  
Modelagem de reservatórios de uso compartilhado para o controle de escoamento e aproveitamento de água pluvial / Bruno Álvaro Schina.- 2022.  
100 f.; 30 cm

Orientadora: Profa. Dra. Rutineia Tassi  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, RS, 2022

1. Drenagem urbana 2. Reservatório de aproveitamento de água da chuva 3. Reservatório de contenção na fonte 4. Escoamento superficial 5. Técnica compensatória I. Tassi, Profa. Dra. Rutineia II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, BRUNO ÁLVARO SCHINA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Bruno Álvaro Schina**

**MODELAGEM DE RESERVATÓRIOS DE USO COMPARTILHADO PARA O  
CONTROLE DE ESCOAMENTO E APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL**

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

Aprovada em 20 de Junho de 2022.

---

**Rutineia Tassi, Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (UFSM)  
(Presidente/Orientadora)**

---

**Christopher Freire Souza, Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental  
(UFAL)**

---

**Vanessa Sari, Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (UFSM)**

---

**Jordana Georjin, Doutora em Engenharia Civil (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2022

## RESUMO

### MODELAGEM DE RESERVATÓRIOS DE USO COMPARTILHADO PARA O CONTROLE DE ESCOAMENTO E APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL

AUTOR: Bruno Álvaro Schina  
ORIENTADORA: Rutineia Tassi

A expansão urbana e a ocupação desordenada de territórios das cidades têm causado vários desastres associados a sistemas hídricos. Os principais exemplos são enchentes e inundações, que ocorrem especialmente, devido à impermeabilização do solo em áreas de infiltração natural. Em busca de soluções sustentáveis para o controle do escoamento superficial, as políticas públicas vêm incentivando o uso de técnicas compensatórias (TC) com o objetivo de mitigar impactos da urbanização. Uma prática já utilizada no Brasil e, em outros países, são os microrreservatórios de retenção do escoamento, que têm como premissa o armazenamento temporário dos volumes oriundos do escoamento das áreas impermeáveis, esvaziando a uma vazão inferior ou próxima da vazão de pré-urbanização. Outra vertente da utilização de reservatórios na origem do escoamento destina-se ao atendimento de demandas não potáveis, por meio do uso de Reservatórios de Aproveitamento da Água da Chuva (RAAC). Estes têm a função de induzir a diminuição do consumo de água tratada para fins menos nobres e preservar mananciais. Alguns autores sugerem a classificação dos RAAC como uma TC, já que tem como função o armazenamento de águas pluviais e por essa razão, algumas cidades brasileiras estão utilizando os RAAC em substituição aos microrreservatórios de controle do escoamento na fonte (RCF). Entretanto, ainda faltam estudos conclusivos que apontem com representatividade os reais benefícios e impactos que a captação de águas pluviais e seu aproveitamento têm sobre as redes de microdrenagem. Neste estudo foi verificada, a partir de simulação de longo prazo, a viabilidade da utilização dos RAAC como estruturas de reserva para o aproveitamento da água e o efeito deste mecanismo sobre o controle de escoamento na fonte. Para o estudo foi escolhido a cidade de Curitiba, em uma região do bairro Rebouças com 415 edificações, e uma série de precipitação horária local com 12 anos (2008 a 2019 – Estação A807) foi utilizada para as análises. Foram dimensionados os RCF, seguindo o Decreto Municipal nº 1733/2021, os quais foram submetidos a simulações da precipitação observada, com o intuito de avaliar o número de infrações dessas estruturas quando submetidos a situações reais de funcionamento, em cumprimento aos dispostos na legislação. Para as mesmas edificações e série de precipitação, foi determinado os volumes dos RAAC necessários para o atendimento das demandas de bacias sanitárias, com uma confiabilidade mínima de 80%, a partir do método da simulação, seguindo as boas práticas de engenharia como consta na NBR 15.527/2019. Em uma última análise, os RCF foram substituídos pelos RAAC, sendo avaliada a possibilidade de utilização destes como sistemas para atender a duas funções. Foi verificado que os RAAC são ineficientes como estrutura de controle de escoamento na fonte, especialmente em relação ao volume extravasado e precipitações mais frequentes; contudo, os RCF e RAAC tiveram comportamento semelhante quando submetidos a eventos de precipitação de maior intensidade.

**Palavras-chave:** Drenagem urbana. Reservatório de aproveitamento de água da chuva. Reservatório de contenção na fonte. Escoamento superficial. Técnica compensatória.

## ABSTRACT

### MODELING SHARED USE RESERVOIRS FOR THE CONTROL OF RAINWATER FLOW AND USE

AUTHOR: Bruno Álvaro Schina  
ADVISOR: Rutineia Tassi

Urban expansion and disorderly occupation of city territories have caused several disasters associated with water systems. The main examples are floods that occur especially due to soil impermeability in natural infiltration areas. In search of sustainable solutions to control runoff, public policies encourage use compensatory techniques (TC) with the aim of mitigating urbanization impacts. A practice already used in Brazil and in other countries is runoff detention microreservoirs, whose premise is temporary storage volumes originated from impermeable areas runoff and drain out at a discharge lower than or close to pre-urbanization discharge. Another aspect of use reservoirs at origin of runoff is intended to fulfillment non-potable demands, through use Rainwater Reservoirs (RAAC). These have as a role inducing a decrease in potable water consumption for less noble purposes and preserving water sources. Some authors suggest classifying RAAC as a TC, since its function is to store rainwater. For this reason, some Brazilian cities are using RAAC to replace microreservoirs to control runoff at source (RCF). However, there is still a lack of conclusive studies that indicate with representativeness real benefits and impacts rainwater catchment and its use have on microdrainage networks. This study verified, based on a long-term simulation, the viability of using RAAC as reserve structures for use water and the effect of this mechanism on flow control at source. For this, the city of Curitiba was chosen, in a region of the Rebouças neighborhood with 415 buildings, and a 12-year local hourly precipitation series (2008 to 2019 – Station A807) was used for analyses. The RCF were dimensioned following Municipal Decree nº 1733/2021, which were submitted to simulations of observed precipitation to evaluate the number of infractions of these structures when subjected to real operating situations, in compliance with provisions in legislation. For same buildings and precipitation series, RAAC volumes necessary to fulfillment sanitary bowls demands were determined, with a minimum reliability of 80%, based on the simulation method and following good engineering practices as stated in NBR 15,527/2019. Ultimately, RCF were replaced by RAAC, and the possibility of using them as systems to serve two functions was evaluated. It was verified that RAAC are inefficient as a flow control structure at source, especially in relation to overflow volume and more frequent precipitations; however, RCF and RAAC had similar behavior when subjected to greater intensity precipitation events.

**Keywords:** Urban drainage. Reservoir for the use of rainwater. Containment reservoir at source. Surface runoff. Compensatory technique.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Mapa de suscetibilidade e registros de enchentes .....	16
FIGURA 2 - Impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico .....	18
FIGURA 3 - Caminhos da água em ambiente urbanizado .....	18
FIGURA 4 - Cenário de modificação do uso do solo e hidrogramas correspondentes.....	19
FIGURA 5 - Planejamento de sistemas de drenagem urbana .....	29
FIGURA 6 - Simplificação de um sistema de aproveitamento de água pluvial.....	41
FIGURA 7 – Configuração de sistemas de informações geográficas (SIG) .....	45
FIGURA 8 - Fluxograma da Metodologia Aplicada .....	47
FIGURA 9 - Localização dos lotes da área de estudo .....	48
FIGURA 10 – Precipitações médias mensais da estação A807 para o período de estudo (2008 – 2019).....	50
FIGURA 11 - Totais anuais de precipitação para estação A807 no período estudo (2008 – 2019) .....	51
FIGURA 12 – Produto da classificação de imagem para identificação de telhados para área de estudo.....	52
FIGURA 13 – Modelo conceitual de sequência de simulação .....	56
FIGURA 14 - Relação entre área de captação e volume dos RAAC .....	60
FIGURA 15 - Histograma de eficiência dos RAAC .....	62
FIGURA 16 - Média dos volumes extravasados anuais.....	64
FIGURA 17 - Média dos volumes extravasados mensais .....	64
FIGURA 18 - Hietograma da estação A807.....	65
FIGURA 19 - Comparativo dos volumes para os reservatórios simulados em diferentes anos .....	69
FIGURA 20 – Relação dos Volumes dimensionados dos RCF e a área de lote .....	71
FIGURA 21 - BoxPlot dos volumes dos RAACs e RCFs.....	72
FIGURA 22 - Eficiência dos RCF em comparação com os RAAC.....	73
FIGURA 23 - Volumes médios anuais vertidos pelos RCF.....	74
FIGURA 24 - Vazões máximas vertidas pelos RCF .....	75
FIGURA 25 - BoxPlot dos volumes do RAAC de cada Grupo .....	77
FIGURA 26 - BoxPlot das áreas de contribuição de cada grupo .....	78
FIGURA 27 – BoxPlot das horas extravasadas entre os grupos .....	79
FIGURA 28 - BoxPlot das horas de infrações dos RAACs e RCFs .....	80

FIGURA 29 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 360 .....	83
FIGURA 30 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 08 .....	84
FIGURA 31 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 07 .....	85
FIGURA 32 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 390 .....	86
FIGURA 33 -Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 408 .....	87
FIGURA 34 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 01 .....	87

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Casos de desastres naturais no Brasil .....	15
TABELA 2 - Desastres associados a sistemas hidrológicos .....	16
TABELA 3 - Municípios que possuem órgão regulador de serviço de drenagem urbana .....	22
TABELA 4 - Instrumentos de gestão da água na bacia e na cidade.....	25
TABELA 5 - Critérios para o desenvolvimento de projetos de drenagem urbana.....	26
TABELA 6 - Principais medidas estruturais .....	30
TABELA 7 - RAAC que não demonstraram horas de infração .....	63
TABELA 8 - Acumulados de precipitação para o ano 2015 (mm).....	66
TABELA 9 - Acumulados de precipitação para o ano 2009 (mm).....	67
TABELA 10 - Comparativo dos volumes dos RAAC Dimensionados.....	69
TABELA 11 - Demonstração dos volumes totais extravasados por algumas estruturas .....	82

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
3.1 PANORAMA NACIONAL PERANTE ENCHENTES E INUNDAÇÕES.....	15
3.2 SISTEMA DE DRENAGEM URBANA .....	17
<b>3.2.1 Cenário Brasileiro acerca da gestão de Drenagem Urbana.....</b>	<b>20</b>
3.2.1.1 Exemplos nacionais de regulamentações .....	22
<b>3.2.2 Divisão de responsabilidades .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.3 Princípios de planejamento de drenagem pluvial.....</b>	<b>25</b>
3.3 MEDIDAS NÃO ESTRUTURAIS .....	26
<b>3.3.1 Plano diretor de drenagem urbana (PDDU) e Ordenamento do uso e ocupação do solo .....</b>	<b>27</b>
3.4 MEDIDAS ESTRUTURAIS .....	30
<b>3.4.1 Técnicas Compensatórias.....</b>	<b>32</b>
<b>3.4.2 Tecnologias de controle de escoamento na fonte .....</b>	<b>33</b>
3.4.2.1 Telhados Verdes .....	34
3.4.2.2 Pavimentos permeáveis e poços de infiltração.....	34
3.4.2.3 Jardins de chuva.....	35
3.4.2.4 Trincheiras de infiltração e retenção.....	35
3.5 MICRORRESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO PARA LOTES URBANOS....	36
<b>3.5.1 Exemplos de Regulamentações e critérios para o dimensionamento de Microrreservatórios.....</b>	<b>37</b>
3.6 SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL .....	40
3.7 ESTUDOS QUE AVALIARAM DIFERENTES UTILIZAÇÕES DOS RCF ....	42

3.8 UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTA SIG PARA GESTÃO DE ÁGUAS URBANAS .....	44
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>46</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO.....	47
4.2 BASE DE DADOS E PROCEDIMENTOS .....	49
4.2.1 Dados pluviométricos .....	49
4.2.2 Banco de dados de informações geográficas e processamento .....	51
4.3 DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS .....	53
4.3.1 Dimensionamento dos RAAC por meio de simulação de longo prazo.....	54
4.3.2 Dimensionamento dos RCF .....	56
4.3.3 Simulação dos RCF operando como RAAC em longo prazo .....	57
4.3.4 Simulação dos RAAC operando como RCF em longo prazo .....	58
4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE RAAC COMO RCF .....	58
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
5.1 RESERVATÓRIOS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA (RAAC) .....	60
5.1.1. Análise da variabilidade dos volumes dos RAAC .....	60
5.1.2 Análise sobre vertimentos RAAC .....	62
5.1.3 Análise sobre condições climáticas que incidiram nos volumes obtidos. ....	65
5.2 RESERVATÓRIOS DE CONTROLE NA FONTE – RCF .....	70
5.2.1 Volumes dos RCF .....	70
5.2.2 Eficiência dos RCF .....	72
5.2.3 Análise dos vertimentos dos RCF .....	73
5.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DOS RCF PELOS RAAC	75
5.3.1 Análise de agrupamento.....	75
5.3.2 Substituição dos RCF pelos RAAC .....	78
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>89</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em razão à exigência humana de água para abastecimento, houve uma clara necessidade de instalação das cidades em regiões próximas aos leitos fluviais, o que facilitava o uso da água. Segundo Baptista e Cardoso (2013), a história e desenvolvimento da civilização está intrinsicamente ligada à água, sendo a origem dela de total importância para qualquer uso, não só pela necessidade de insumos fundamentais, mas também por razões culturais e estéticas.

Dessa maneira, o grande crescimento populacional e a urbanização não planejada, provocaram, ao longo dos anos, o aumento da frequência de enchentes com impactos à população. Hentges (2013) e Tassi (2002), descrevem que a ocupação desordenada de grandes centros urbanos influencia diretamente na transformação da terra, tornando-a mais impermeável devido à construção de edificações, ruas, calçadas e outros elementos estruturais. O aumento da impermeabilização, por sua vez, gera a elevação do escoamento superficial, desencadeando problemáticas sanitárias e ambientais.

Nesse cenário, uma das estratégias tradicionalmente utilizada para a mitigação dos problemas causados pela impermeabilização dos solos e pelo aumento do escoamento superficial, é a drenagem do escoamento pluvial com utilização de estruturas como sarjetas, tubos e galerias de drenagem (Ceron, 2013, Bahiense, 2013 e Tucci; Porto; Barros, 1995). Estes mecanismos acabam destinando os volumes escoados a um corpo hídrico receptor, aumentando a velocidade de escoamento e gerando problemas de erosão, além do fato de que a transferência dos volumes pode causar problemas a jusante, visto que não são incorporadas medidas para mitigar impactos do uso do solo na origem do escoamento. Os autores ainda destacam que, no Brasil, ainda é priorizado o uso de soluções localizadas para problemas de drenagem pluvial, com a transferência do escoamento do local onde ele é gerado.

Em razão disso, tornam-se necessárias novas tecnologias e adequação das estruturas de micro e de macrodrenagem. Todavia, esses ajustamentos realizados nos sistemas de drenagem pluvial demandam cada vez mais espaços físicos adequados, investimentos de alto custo e iniciativas governamentais, sendo que o uso de normas regulamentadoras do uso e de ocupação da terra e incentivos ambientais para espaços urbanos, comumente compõem medidas menos onerosas (TASSI, 2002).

Deste modo, algumas cidades brasileiras, seguindo o exemplo de iniciativas internacionais, já estão substituindo obras de ampliação de redes de drenagem por técnicas em diferentes escalas, as quais tem por objetivo fazer a compensação dos impactos de urbanização no escoamento de águas pluviais. Essas técnicas são mais conhecidas no Brasil como Técnicas

Compensatórias (TC), que, segundo Drumond; Coelho; Moura (2011) e Batista *et al.* (2005), têm como princípio de funcionamento dos TCs como sistemas que promovem a infiltração da chuva no solo, retardam o escoamento e propiciam uma redução nos picos de vazão, como as bacias de retenção, pavimentos porosos, trincheiras, poços de infiltração, telhados armazenadores e outros dispositivos, que simulam características de bacias pré-urbanizadas em setores urbanos (BRITO, 2006).

O conceito foi inicialmente desenvolvido nos EUA, pela *Environmental Protection Agency* (EPA) na década de 1980 e, basicamente, constitui-se no planejamento de controle de águas pluviais em escala de bacia e uso de estruturas físicas para armazenamento e infiltração do escoamento na tentativa de compensar os efeitos da urbanização (MCCUEN, 1989; URBONAS; STAHR, 1993; SCHUELER, 1987). Todavia, somente na década de 1990 as TCs ganharam maior visibilidade no cenário brasileiro e tiveram seu embasamento fundamentado no princípio de não-transferência dos problemas para jusante, controlando o escoamento na sua origem.

Ao longo dos anos, revisões deste conceito levaram ao desenvolvimento de técnicas de *Low impact development* (LID), ou Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto, na tradução livre para o português. Esse tipo de prática foi inicialmente aplicado no condado de Prince George (Maryland, EUA; USEPA, 1999), e tem evoluído para a conservação de áreas verdes em meio urbano para controle das alterações dos processos hidrológicos de forma integrada às atividades locais, minimizando a sensação de ônus adicional e os custos de implantação dos mecanismos de drenagem (COOMBES *et al.*, 2002; CALARUSSE; KLOSS, 2006). As mesmas tecnologias são utilizadas em diferentes continentes, como a Europa e Oceania (URBONAS; STAHR, 1993), embora recebam diferentes designações como o *Water-sensitive urban design* (WSUD) ou *Sustainable drainage system* (SUDS). De acordo com esse paradigma, o Programa de Drenagem Urbana Sustentável brasileiro incentiva, por meio do Ministério das Cidades, a utilização de LID para implantação e ampliação de sistemas de drenagem urbana sustentáveis, perante a apresentação de proposta devidamente estruturada (BRASIL, 2007).

Nessa mudança de paradigmas, outras iniciativas do setor público, como os planos relacionados à água, esgoto e resíduo sólidos, buscam manter e efetivamente gerir a manutenção das condições naturais das bacias hidrográficas. Estes planos, a exemplos dos Planos Diretores de Drenagem Urbana (PDDU), são uma vertente do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), que foi estabelecido pela Lei de Saneamento 11.445/2007, e orientam os municípios a estruturar um PMSB adequado, com o intuito de subsidiar ações para a melhoria e a adequação de aspectos envolvendo o saneamento básico municipal.

Dentre as ações sugeridas no controle do escoamento, as estruturas de detenção, compõem medidas já utilizadas em algumas cidades brasileiras, a exemplo de Curitiba, São Paulo, Porto Alegre e Belo Horizonte. Os reservatórios de detenção, são popularmente conhecida como “piscininhas” em São Paulo tendo sido difundidas em diferentes regiões do Brasil como microrreservatórios ou simplesmente reservatórios de lote.

A utilização desse tipo de mecanismo, em muitos municípios brasileiros, é uma imposição legal, assegurada por meio de decretos, legislações e portarias, para muitos empreendimentos que cumprem determinadas características, especialmente com relação à área impermeabilizada. Assim, o reservatório de detenção é dimensionado para o armazenamento temporário do escoamento superficial originado no lote da edificação. Segundo Hentges (2013), o dimensionamento dos reservatórios de detenção inclui um dispositivo de descarregamento de fundo que garante esvaziamento de maneira gradativa, a uma taxa (vazão de restrição) que não comprometa o sistema público de drenagem. A vazão de restrição, ou a taxa de devolução de vazão, é estipulada a partir de vazões de projetos e é apresentada na maioria dos decretos municipais (PDDU ou PMSB) (HENTGES, 2013).

Aparte desta perspectiva de controle do escoamento pluvial na fonte, muitas cidades brasileiras, como Recife, Porto Alegre, São Paulo, Belo Horizonte, estão exigindo ou fornecendo subsídios para a implantação de sistemas de captação, armazenamento em reservatórios e aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis, visando a redução da pressão nos mananciais hídricos para usos menos restritivos da água. O Distrito Federal, por exemplo, possui um decreto de 2017 (Lei complementar nº 928) que sugere que o próprio reservatório de detenção utilizado para o controle do escoamento pluvial seja utilizado para aproveitamento de água da chuva na edificação.

Esta prática, no entanto, leva a funcionalidade com princípios antagônicos (CERON, 2013) para estes dois reservatórios. O Reservatório de Aproveitamento de Água da Chuva (RAAC) é dimensionado para garantir que as demandas previstas para os usos não potáveis sejam atendidas durante a maior parte do tempo, devendo permanecer cheio durante para isso, devolvendo para o sistema de drenagem apenas os eventuais excessos que seriam captados pelo sistema. O reservatório de detenção, por outro lado, deve encher durante o evento chuvoso e esvaziar, de forma a garantir que o mesmo disponha capacidade suficiente para armazenar os volumes de escoamento pluvial das novas chuvas.

Neste contexto, Hentges (2013), Drumond (2012), Amorim e Pereira (2008) e Dornelles (2012), apontam que a utilização de reservatórios de aproveitamento da água da chuva pode ter algum efeito no amortecimento do escoamento pluvial, entretanto, ainda não existem resultados

conclusivos quando os sistemas são submetidos a dados observados de eventos pluviométricos, especialmente em simulações de longo prazo. Portanto, tornam-se necessárias novas pesquisas nesse sentido, com o intuito de avaliar a efetividade da utilização de RAAC como técnicas para o controle de cheias, em substituição ou complementação aos reservatórios de detenção.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Verificar, em longo prazo, a contribuição de reservatórios de aproveitamento de água da chuva (RAAC) no controle de escoamento pluvial na fonte e identificar a viabilidade de sua utilização em substituição a reservatórios para o controle do escoamento na fonte (RCF) em uma região habitacional do município de Curitiba.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Dimensionar, por meio de simulação de longo prazo, os reservatórios para armazenamento de água da chuva (RAAC) visando sua utilização para demandas não potáveis em diferentes edificações.
- Dimensionar, utilizando legislações e decretos municipais e distritais os reservatórios para controle do escoamento na fonte (RCF), para as mesmas edificações em que os RAACs foram dimensionados.
- Verificar, em longo prazo, a contribuição dos RAAC no controle de escoamento pluvial na fonte, por meio da identificação das infrações à vazão de restrição do controle do escoamento na fonte, decorrentes dos extravasamentos.

## **3 REVISÃO DA LITERATURA**

### 3.1 PANORAMA NACIONAL PERANTE ENCHENTES INUNDAÇÕES.

Com mais da metade da população mundial vivendo em áreas urbanas, a responsabilidade de construir cidades mais seguras é um desafio de todos os gestores. No Brasil, que possui mais de 80% da população vivendo em áreas urbanas, essa realidade não é diferente (BRASIL, 2010).

De fato, no decorrer da história, diversas ocorrências de desastres têm interrompido a vida em áreas urbanas. E nesse cenário, climas extremos e alterados, terremotos e emergências desencadeadas pelas ameaças decorrentes da ação humana estão crescentemente pressionando as pessoas e ameaçando a prosperidade das cidades (COCCHIGLIA, 2012).

Neste sentido, no conjunto dos desastres citados, a suscetibilidade nacional está diretamente ligada à sua grande concentração hídrica, como fica evidente em notícias frequentes que apontam para dois cenários: escassez hídrica e volumes crescentes de precipitações intensas, como exemplo, as chuvas fortes que acometeram o estado da Bahia no ano de 2022, ou ainda, a falta de chuva que acarretou em desgastes no fornecimento de energia no país em 2021.

O Brasil possui uma ampla diversificação climática, em virtude de vários fatores, tais como a configuração geográfica, a altitude e a extensão territorial, tanto em relação à latitude quanto à longitude, além do relevo e a da dinâmica das massas de ar. Como corolário, o Brasil recebe uma abundante pluviometria, que varia sobre mais de 90% do seu território, entre 1.000 e mais de 3.000 mm/ano. O país é dotado, também, de uma vasta e densa rede de drenagem que nunca seca sobre mais de 90% do território nacional, engendrando, certamente, a ideia de abundância de água no Brasil (REBOUÇAS, 2003).

Há que se considerar, entretanto, que as mudanças climáticas aliadas aos processos de urbanização sem planejamento, vem tornando as chuvas cada vez mais vistas como vilãs. (Christofidis *et al.*, 2019). O centro de pesquisas epidemiológicas e desastres (CRED) aponta que de 221 casos de desastres naturais no Brasil registrados desde 1948, 71% são relacionados a sistemas hidrológicos (Tabela 1). Nos registros de desastres hidrológicos estão inclusos: enchentes, inundações, deslizamentos, enxurradas (

Tabela 2).

<b>Grupo de desastre</b>	<b>Registro de Desastres</b>	<b>% de casos</b>
<b>Biológico</b>	19	8%
<b>Climatológico</b>	22	9%
<b>Geofísico</b>	2	1%
<b>Hidrológico</b>	170	71%
<b>Meteorológico</b>	27	11%

Fonte: Adaptado de EM-DAT, CRED / *UCLouvain, Brussels, Belgium* (2020).

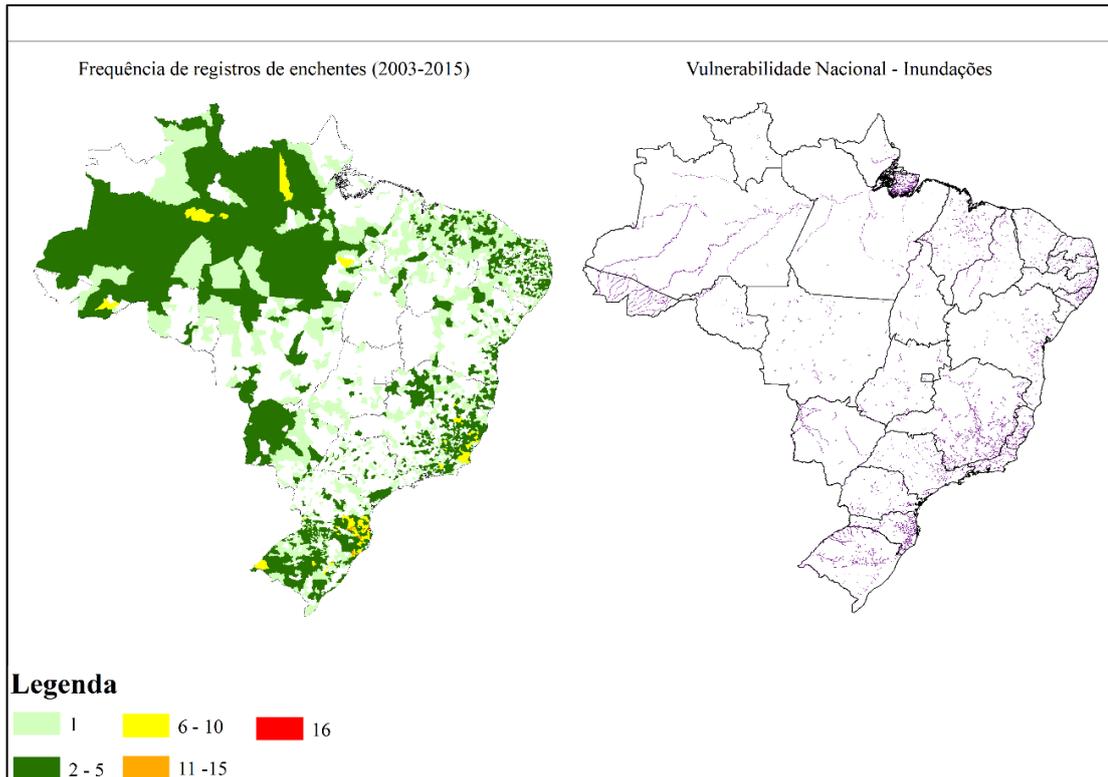
Tabela 2 - Desastres associados a sistemas hidrológicos

<b>Desastre Hidrológico</b>	
Inundações	41%
Enxurradas	6%
Movimento de Terra	15%
Enchentes	38%

Fonte: Adaptado de EM-DAT, CRED / *UCLouvain, Brussels, Belgium* (2020).

A projeção de desastres envolvendo sistemas hidrológicos, segundo o relatório do Centro de Ciências do Sistema Terrestre (CCST) do INPE, prevê que para 2030 mais de 20% da área de expansão urbana será suscetível e poderá eventualmente ser afetada por acidentes naturais provocados pelas chuvas, além do aumento de novas áreas vulneráveis a deslizamentos de terra. Ainda, segundo dados do Sistema Nacional de Informações dos Recursos Hídricos (2015) grande parte do território nacional já é vulnerável a inundações e múltiplos municípios já passaram por desastres pluviométricos (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de suscetibilidade e registros de enchentes



Fonte: Adaptado de Agência Nacional das Águas (ANA, 2020).

### 3.2 SISTEMA DE DRENAGEM URBANA

Desde as primeiras aglomerações urbanas, constata-se sua localização preferencialmente junto aos cursos d'água, tendo em vista que a disponibilidade de água favorecia o seu suprimento para o consumo e a higiene das populações, efetuando ainda a evacuação dos dejetos (BAPTISTA, 2005).

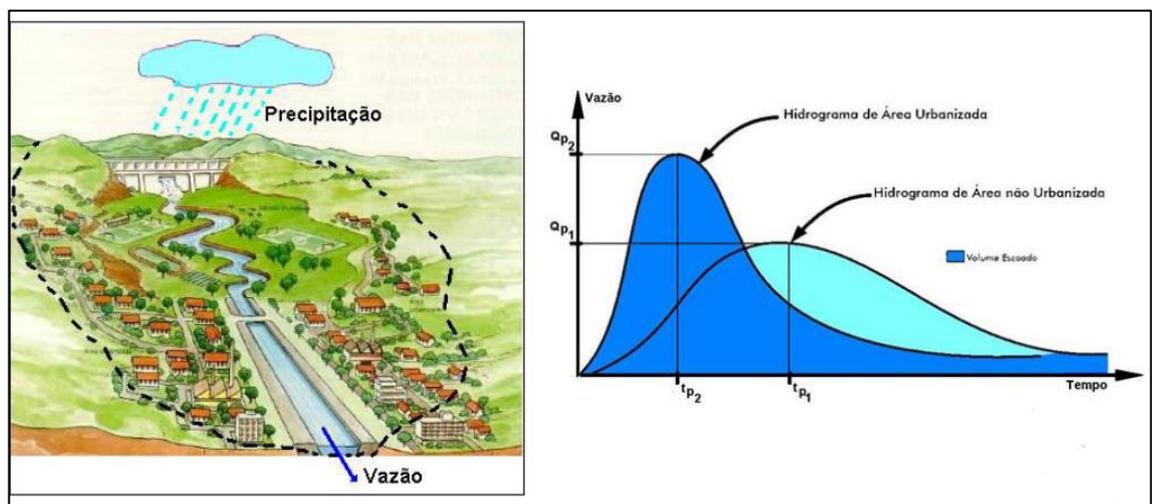
Além disso, durante muitos anos, tanto no Brasil, quanto em outros países, a drenagem urbana das grandes metrópoles foi abordada de maneira acessória, no contexto do parcelamento do solo para usos urbanos (CANHOLI 2015). Dessa forma, a estratificação social já implicava condições distintas de apropriação do espaço urbano. As áreas baixas das cidades, sujeitas aos efeitos das frequentes inundações e receptoras de resíduos diversos, foram ocupadas pelas classes menos favorecidas, que consideravam, de modo geral, que os benefícios decorrentes do acesso mais direto à água eram superiores aos danos e transtornos das cheias periódicas e das precárias condições sanitárias (BAPTISTA, 2005; BAPTISTA; NASCIMENTO, 2002).

Então, uma prática europeia, e amplamente difundido no Brasil desde fins do século XIX, conhecida como prática higienista, apontava para a construção de sistemas de esgotamento sanitário e drenagem pluvial na busca do controle de enchentes e de redução de

doenças de veiculação hídrica por meio da rápida evacuação das águas pluviais e servidas (BAPTISTA; CARDOSO, 2013). Assim, o desenvolvimento das grandes cidades resultou na canalização de rios, aterramento de córregos, drenagem de águas paradas e construção de redes de drenagem planejadas para remover as águas pluviais o mais rápido possível do ambiente urbano (ICLEI BRASIL, 2011).

Neste contexto, historicamente, gestores municipais e engenheiros responsáveis pela drenagem urbana tentaram solucionar o problema da perda do armazenamento natural, provocando o aumento da velocidade dos escoamentos com obras de canalização. A rede de drenagem era dimensionada para transportar o fluxo de água durante o pico de chuvas de um evento considerando um tempo de retorno para o dimensionamento (BRADEN; JOHNSTON, 2004), sem muita preocupação com a recuperação e/ou manutenção dos processos hidrológicos naturais, isso levou à perda progressiva do papel da água na paisagem das cidades e aumentando os picos de vazão em eventos pluviométricos, e degradando a qualidade da água escoada (Figura 2) (CANHOLI, 2015); (BAPTISTA; CARDOSO, 2013).

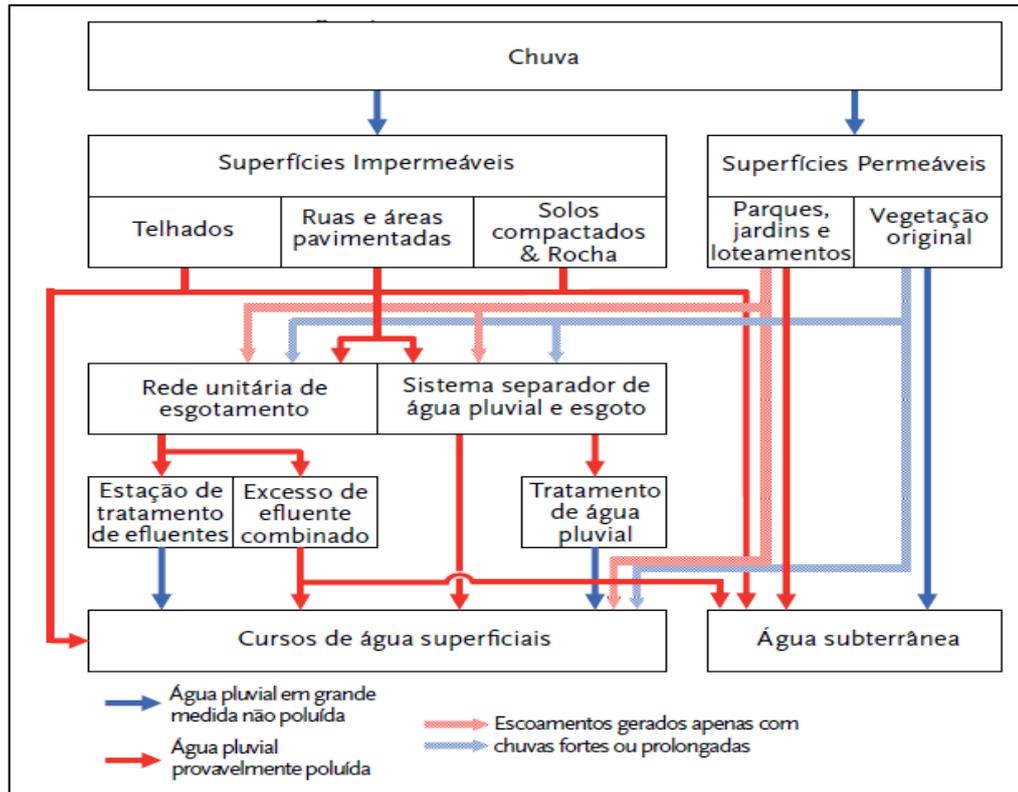
Figura 2 - Impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado de Tucci (2000)

A Figura 3 mostra os possíveis caminhos da água da chuva em um ambiente urbano, com destaque para a qualidade destas águas e representando o cenário de muitas metrópoles nacionais.

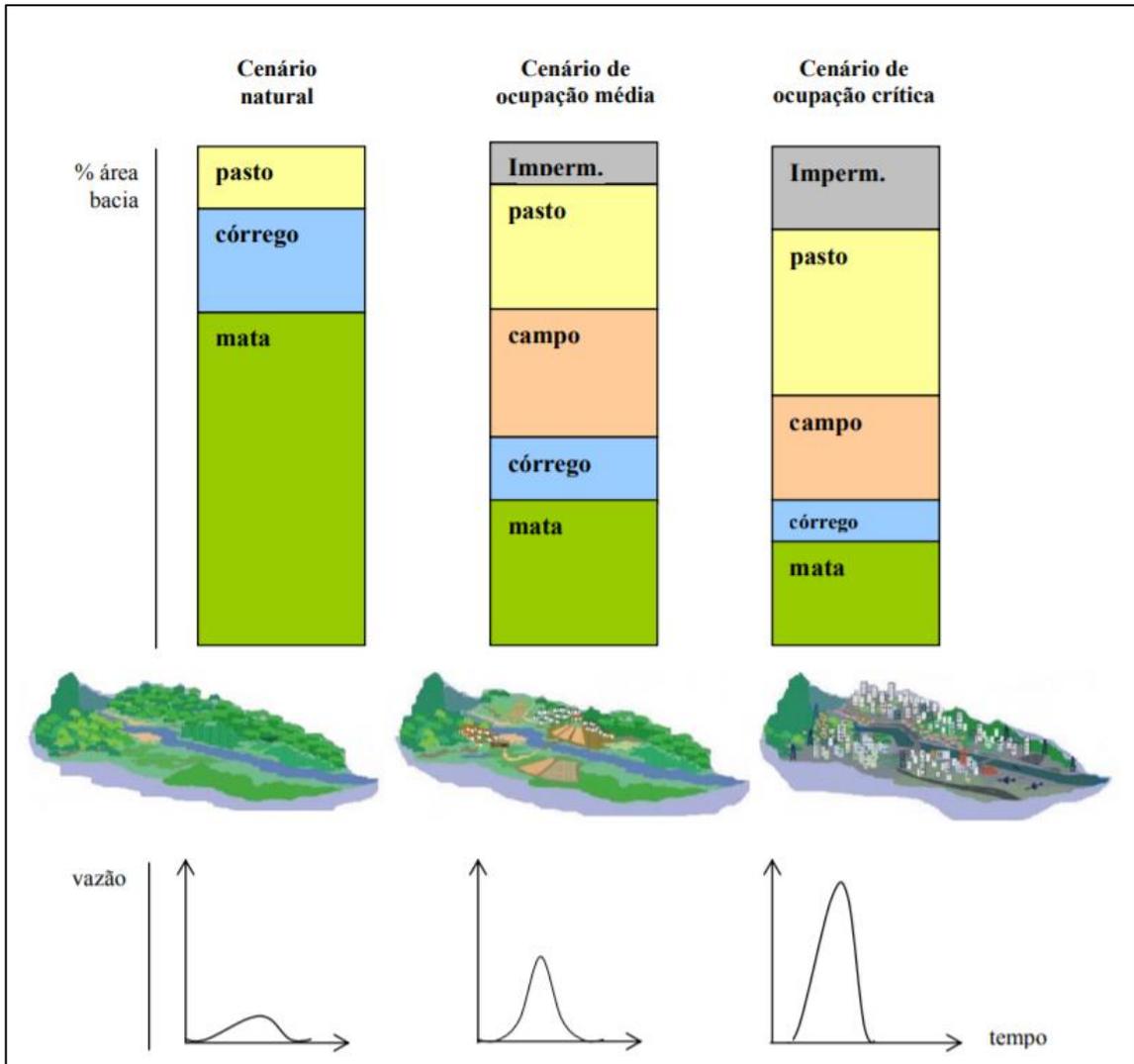
Figura 3 - Caminhos da água em ambiente urbanizado



Fonte: Adaptado de ICLE BRASIL (2011)

No Brasil, além da canalização dos córregos, a impermeabilização do solo agrava cada vez mais o cenário atual do escoamento das águas urbanas. Segundo Tucci (2004) as consequências da urbanização que mais diretamente interferem na drenagem urbana são as alterações do escoamento superficial direto (Figura 4). Além disso, a urbanização também tem efeitos no clima, alterando o regime de chuvas, aumentando o índice pluviométrico em determinadas regiões com maiores centros urbanos e industriais, com impactos, inclusive, na qualidade das águas, ocorrendo alterações na qualidade das águas da chuva, diminuição das vazões mínimas e aumento de sedimentos em rios.

Figura 4 - Cenário de modificação do uso do solo e hidrogramas correspondentes



Fonte: Adaptado de JUNIOR (2008).

A fim de alcançar uma solução abrangente para esse problema, novas abordagens para a gestão do desenvolvimento urbano são requeridas, bem como o tratamento da água pluvial no meio urbano, que buscam incentivar a sustentabilidade e a restauração do ciclo hidrológico urbano (UNEP, 2002). Por certo, o gerenciamento das águas pluviais pode trazer muitos benefícios econômicos e ambientais, tais como: redução na quantidade da área, na frequência e no impacto das inundações; diminuição do ônus da infraestrutura de drenagem pública; redução na erosão e na sedimentação; melhoria da qualidade da água, aumento na recarga de aquíferos, entre outros.

### 3.2.1 Cenário Brasileiro acerca da gestão de Drenagem Urbana

Nos Estados Unidos a EPA desenvolveu em 1970 um programa nacional que obrigava a preparação de um plano de drenagem a todas as cidades com mais de 100 mil habitantes. As BMPs envolvem dispositivos voltados para o controle da qualidade e quantidade do escoamento pluvial por parte do município, utilizando para isso medidas estruturais e não estruturais. Este processo contribui para reduzir a poluição difusa dos rios da vizinhança das cidades (TUCCI, 2016). Em uma segunda fase do programa, iniciada na década de 1990, para cidades com população inferior à mencionada anteriormente, foi dado incentivo à criação dos prestadores de serviço em drenagem urbana (*Stormwater utility*) (ROESNER; TRAINA, 1994 *apud* TUCCI, 2016).

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9433/1997) estabeleceu os planos de bacias hidrográficas. Nesses planos, são apresentados os instrumentos de outorga e de enquadramento das águas que fazem a regulamentação do uso da água, do aumento de vazão (art.12 não regulamentado) e da qualidade da água. Assim, estabelecem dentro da gestão de recursos hídricos, os instrumentos para o controle externo da bacia hidrográfica das cidades (TUCCI, 2016).

Deste modo, surgiu a necessidade de intervir e criar regulamentações que abordassem o controle interno de bacias urbanas, como por exemplo os PDDU, legislações referentes ao uso e ocupação do solo, zoneamento urbano, legislações ambientais, legislações de controle de escoamento na fonte, entre outras.

Cruz, Souza e Tucci (2017) apontam que a gestão da drenagem urbana na maioria dos municípios brasileiros ainda não é vislumbrada com a devida importância, dada a ausência de um planejamento específico para o setor, tornando, muitas vezes, a secretaria de obras responsável por ações de drenagem e que conseqüentemente apresenta-se desvinculada das ações planejadas para os demais setores relacionados, como água, esgoto e resíduos sólidos.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) acerca dos municípios brasileiros, 99,8% deles exercem o serviço de drenagem, normalmente sobre a incumbência das secretarias municipais de obras e serviços públicos e em 73,4% dos municípios não há instrumentos reguladores do sistema de drenagem urbana. Em 71,6% dos municípios brasileiros existe sistemas de drenagem e considerando municípios com população superior a 20 mil habitantes, este valor passa para 74,6%. Já em municípios com mais de 500 mil habitantes, 100% apresentam rede de drenagem (BRASIL, 2000).

Outra abordagem fundamental no gerenciamento do manejo de águas urbanas, é a gestão do espaço urbano (CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2017). Realizado por meio dos chamados planos diretores de urbanização ou de uso do solo urbano, segundo o IBGE, entre as 5507 unidades

municipais, apenas 841 possuem planos diretores de urbanização, o equivalente a 15,3% de todos os municípios brasileiros (BRASIL, 2020). Outra informação preocupante, é o escopo dos planos diretores de urbanização que, em sua maioria absoluta, concentram seu objetivo em aspectos arquitetônicos e urbanísticos, deixando questões ambientais e de drenagem urbana defasadas. Isto demonstra o preocupante atraso do cenário nacional em relação aos instrumentos legais de planejamento sustentável dos setores urbanos.

O IBGE ainda aponta que apenas 21% (Tabela 3) dos municípios brasileiros possuem instrumentos reguladores do serviço de drenagem urbana e ainda que apenas 5% (Tabela 3) contam com Plano Diretor de Drenagem Urbana (BRASIL, 2020).

Tabela 3 - Municípios que possuem órgão regulador de serviço de drenagem urbana

Regiões	Total	Possuem Instrumento regulador	PDDU	Plano urbanístico área urbana	Lei de uso ocupação do solo	Legislação municipal ou de região metropolitana
Brasil	5507	21%	5%	3%	12%	6%
Norte	449	1%	0%	0%	0%	0%
Nordeste	1787	3%	1%	0%	1%	1%
Sudeste	1666	7%	1%	1%	4%	2%
Sul	1159	9%	2%	1%	6%	2%
Centro-Oeste	446	1%	0%	0%	1%	0%

Fonte: Adaptado de IBGE Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000.

É importante destacar que apenas 6% (Tabela 3) dos municípios Brasileiros têm legislações próprias acerca da regulação de serviços e ações voltadas à drenagem urbana, sendo que essas legislações entraram em vigência através de decretos e instrumentos legais vinculados ao Plano de Desenvolvimento Urbano. A seguir são apresentadas iniciativas regulamentárias de cidades brasileiras no controle de drenagem urbana.

### 3.2.1.1 Exemplos nacionais de regulamentações acerca da drenagem urbana

O primeiro registro de iniciativas voltadas à drenagem urbana no país foi verificado em Belo Horizonte no ano de 1996, onde o Plano de Desenvolvimento Urbano antecede a possibilidade de impermeabilização total de áreas, sendo necessário a compensação com a implantação de reservatórios na proporção de 30 litros por metro quadrado de área impermeabilizada (BELO HORIZONTE, 1996)

Em Curitiba/PR, em 2003, foi elaborado o Programa de Conservação e Uso Racional de Águas nas Edificações (PURA), com intuito de incentivar o uso racional da água, a utilização de fontes alternativas e a educação ambiental. No artigo 7 da lei nº 10785/2003 que institui a PURA, há a determinação de captação de água pluvial em cisternas para usos secundários, como a rega de jardins e hortas, lavagem de roupas e veículos, lavagem de vidros e pisos. Entretanto, em 1995, a lei nº 8681 previa também a utilização de água da chuva em postos de lavagem. (CURITIBA, 2003, 1995).

Já em São Paulo, o Conselho Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (CADES), perante a Comissão Especial, propôs a alteração da Elaboração de Estudos de Políticas Públicas para o Aumento Da Permeabilidade do Solo. Em especial, foi examinado o item 10.1.5 do anexo I da lei municipal nº 11.228/1992, que corresponde ao Código de Obras e Edificações de São Paulo. Entre as alterações sugeridas estavam: A destinação de espaços para a reservação de águas pluviais, a proposta de equação para o cálculo dos volumes de controle, a manutenção de parcelas permeáveis nos lotes urbanos (15%), a sugestão de aderência a novas medidas de controle de escoamento como pavimentos porosos e de aumento da infiltração além do princípio poluidor pagador com relação as áreas impermeáveis dos lotes (SÃO PAULO, 2002). Já em 2002 foi promulgada a lei nº13.276, regulamentada pelo decreto nº 41.814, que estabelecia como 500 m<sup>2</sup> de área impermeabilizada, o limite mínimo para a exigência de reservatórios nos lotes e a manutenção de 30% das áreas de estacionamentos com pisos drenantes ou naturalmente permeável, além de nova equação para determinação do volume de reservatório.

Em Niterói/RJ a lei nº 1620/1997, que regulamenta a aprovação de edificações residenciais unifamiliares, apresenta em seu artigo 19 o limite para taxa de impermeabilização em 90% para a Zona Urbana, dispensando desta limitação as edificações que apresentarem soluções de acumulação e/ou aproveitamento de águas pluviais (NITERÓI, 1997)

O código de obras de Guarulhos (Lei nº 5617/1997) prevê, desde 2000, a obrigatoriedade do uso de reservatórios de retenção das águas pluviais para imóveis com área superior a 1 hectare, com a possibilidade de reutilização destas águas para rega de jardins, e lavagens de passeio (GUARULHOS, 2000).

No município do Rio de Janeiro, o decreto nº 23.940/2004 que dispõe sobre a obrigatoriedade da adoção de reservatórios que permitem o retardo do escoamento das águas pluviais em locais com área impermeabilizada superior a 500 m<sup>2</sup> ou prédios com mais de 50 apartamentos, sendo previsto também a destinação de 30% de áreas de estacionamentos comerciais a pisos drenantes ou naturalmente permeáveis (SECOVI, 2004).

Em Porto Alegre/RS, o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental (PDDUA) foi instituído em 1999, através da lei complementar nº434, substituindo o primeiro Plano de Desenvolvimento Urbano (PDU que estava em vigência desde 1979), A nova legislação prevê a utilização de medidas de controle na fonte em novos empreendimentos, além de terrenos com área superior a 600 m<sup>2</sup>. (CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2017).

Recife, como representante da região nordeste, aprovou a Lei municipal nº 18.112/2015, que dispõe sobre a melhoria na qualidade ambiental por meio da obrigatoriedade de instalação de telhados verdes, e a construção de reservatórios de acúmulo ou retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e de outras providencias (RECIFE, 2015). A lei informa a obrigatoriedade da instalação de telhados verdes em projetos multifamiliares com mais de quatro pavimentos e as edificações com outra finalidade que possuam área de cobertura superior a 400 m<sup>2</sup>. Já em lotes com área superior a 500 m<sup>2</sup> edificados ou não, e que possuem taxa de impermeabilização superior a 25% ficam obrigados a execução de reservatórios de detenção.

No município de Santo André/SP, a lei municipal nº 7.606/97 estabeleceu e regulamentou a cobrança de taxa correspondente ao volume lançado no sistema de coleta de águas pluviais, considerando o custo médio de manutenção e operação dos sistemas drenantes. O volume lançado é determinado em função da área coberta do imóvel, de um coeficiente de escoamento e do índice pluviométrico médio mensal. De acordo com a SEMASA (Concessionaria de serviços de saneamento ambiental de Santo André), o valor pago pelos habitantes arrecada cerca de R\$ 6 milhões/ano e viabiliza a manutenção do sistema (SANTO ANDRÉ, 1997).

Brasília/DF dispõe da lei complementar nº 929/2017, que legisla sobre o uso de dispositivos de captação de águas pluviais para fins de retenção, aproveitamento e recarga artificial de aquíferos em unidades imobiliárias e empreendimentos. A lei complementar estabelece diretrizes para o uso de diferentes dispositivos atenuantes de onda de cheia, com intuito de assegurar, no máximo, a vazão de pré-desenvolvimento na saída do lote urbano. O art 5º descreve ainda, sobre a obrigatoriedade da instalação de dispositivos de recarga artificial e de retenção de águas pluviais a áreas iguais ou superiores a 600 m<sup>2</sup>, sejam elas públicas ou privadas. (BRASÍLIA, 2017).

A análise do contexto legislativo brasileiro demonstra que há grande disparidade entre as iniciativas em algumas das principais cidades do país, especialmente no sentido de mudança de paradigmas dos conceitos predominantes da gestão de drenagem urbana. Todavia, ainda é verificado a necessidade da interdisciplinaridade entre setores de planejamento dos municípios,

uma vez que os sistemas hidrológicos englobam muitos outros aspectos além de características de pré e pós urbanização.

### 3.2.2 Divisão de responsabilidades na gestão de águas urbanas

Existem dois níveis de regulação para a drenagem urbana: (a) Regulação nacional, estadual ou pelo Plano de Bacias hidrográficas; e (b) Regulação na cidade sobre os impactos no setor urbano para atingir objetivos internos e não exportar impactos para jusante.

As primeiras regulamentações podem estabelecer critérios a serem cumpridos pelos municípios, com base na lei nacional de recursos hídricos e por meio do Plano de Bacia Hidrográfica. O restante das regulações pode ser estabelecido dentro do município, que tem a titularidade dos serviços de drenagem, como prevê a lei de saneamento 11.445/2007 (TUCCI, 2016).

A Lei Federal nº 11.445/2007 estabeleceu as diretrizes básicas para o saneamento básico no Brasil. Nesta legislação, foi prevista a elaboração do Plano de Saneamento Básico, que inclui o Plano de Drenagem Urbana (Tabela 4). O Plano de Drenagem urbana deve atender ao Plano de Bacia, no que se refere a alterações na qualidade e quantidade (artigo 12 da lei 9433/1997). Verifica-se, no entanto, que de modo geral, os impactos que as cidades podem gerar em razão do aumento do escoamento pluvial não têm sido analisados nos Planos de Bacias desenvolvidos no Brasil (TUCCI, 2016).

Tabela 4 - Instrumentos de gestão da água na bacia e na cidade

Espaço	Titular	Gestores	Instrumento
Bacia Hidrográfica	Estado ou União	Comitê e agência de bacia	Plano de Bacia
Município	Município	Município	Plano de Saneamento

Fonte: Adaptado de Tucci (2007).

Usualmente encontra-se ainda em legislações municipais ações que abordam a quantidade de água devolvida ao sistema de microdrenagem. Segundo Tucci (2016), deve-se limitar a vazão máxima de saída da propriedade privada para a rede pública, num valor máximo pré-existente de condições naturais. Desta forma, este desenvolvimento não irá produzir aumento de vazão máxima para jusante devido à urbanização.

### 3.2.3 Princípios de planejamento de drenagem pluvial

Planejar ou gerenciar sistemas de drenagem urbana envolve administrar um problema de alocação de espaço (SHEAFFER; WRIGHT, 1982) sendo que, a falha em incorporar a drenagem na fase inicial do desenvolvimento urbano em geral resulta em projetos muito dispendiosos ou, em estágios mais avançados, na sua inviabilidade técnico-econômico (BRAGA, 1994).

Os critérios gerais consistem no estabelecimento de regras específicas a serem seguidas no projeto, operação e manutenção dos dispositivos e sistemas de controle de drenagem urbana, como demonstra a Tabela 5.

Tabela 5 - Critérios para o desenvolvimento de projetos de drenagem urbana

Definição de volume de deflúvio a ser considerado no dimensionamento da estrutura de controle de enchentes.
Averiguar e testar as relações de Intensidade, duração e Frequência (IDF) do local, como por exemplo, Tempo de Recorrência de 100 anos para chuva com duração de 24 horas;
Os picos de vazões das áreas a serem urbanizadas não podem exceder os valores naturais;
As bacias de retenção devem ser capazes de armazenar o deflúvio correspondente a determinada altura de precipitação, e a liberação deve ocorrer num período predeterminado;
No deflúvio corresponde aos primeiros instantes de chuva deve ser desviado para um reservatório <i>off-line</i> .

Fonte: Adaptado de Canholi (2015).

Segundo Canholi (2015), os critérios de projetos variam de região para região, entretanto, deve-se levar em consideração a consulta a novos critérios, com o intuito de estabelecer novos paradigmas para uma fundamentação mais abrangente sobre políticas básicas de drenagem.

No entendimento de Canholi (2015), o planejamento de drenagem deve ser classificado como parte de um abrangente processo de planejamento urbano, estando coordenado com os demais planos urbanos, com ênfase nos planos de saneamento básico, no uso do solo e nos transportes, abrangendo ainda aspectos de medidas estruturais e não estruturais.

### 3.3 MEDIDAS NÃO ESTRUTURAIS EM DRENAGEM URBANA

A vazão de um rio é determinada a partir das contribuições oriundas de toda bacia, entretanto, essa vazão é alterada à medida que a urbanização se desenvolve. Tucci e Genz (1995) abordam que as inundações urbanas podem ocorrer devido a dois processos: enchentes em áreas ribeirinhas e as enchentes resultantes da impermeabilização do solo devido a urbanização. Os processos podem ocorrer de forma isolada, todavia um processo pode ser agravado pelo outro.

Sendo assim, ações em diferentes escalas são tomadas dentro do planejamento da drenagem urbana. Tassi (2002) aponta que a definição de medidas de controle, que buscam amenizar prejuízos ligados a inundações, pode ser classificada como medidas estruturais e medidas não estruturais, de acordo com sua natureza.

O controle da inundação, obtida por um conjunto de medidas estruturais e não estruturais, permite a população afetada minimizar suas perdas e manter uma convivência harmônica com o rio. A pesquisa para a combinação ótima dessas ações constitui o planejamento da proteção contra a inundação ou seus efeitos (TUCCI, 2004).

Segundo Canholi (2015) medidas estruturais correspondem às obras que podem ser implantadas visando à correção e prevenção dos problemas decorrentes de enchentes e podem compreender como obras de engenharia classificadas em medidas intensivas e extensivas.

As medidas não estruturais são aquelas em que se procura reduzir os danos ou as consequências das inundações, não por meio de obras, mas pela introdução de normas, regulamentos e programas que visem, por exemplo, o disciplinamento do uso e ocupação do solo, a implementação de sistemas de alerta e a conscientização da população para manutenção dos dispositivos de drenagem (CANHOLI, 2015).

Apesar de as medidas estruturais associadas às medidas não estruturais poderem ser aplicadas para a mitigação de inundações em bacias urbanizadas, as ações públicas, em muitas cidades brasileiras, estão indevidamente voltadas para medidas estruturais de visão pontual (BARBOSA, 2006). Isso talvez se explique em virtude de as medidas estruturais serem, normalmente, obras de engenharia, o que traz a grandiosidade aos olhos da população com certa sensação de proteção. Contudo, embora as construções de barragens, diques, canalizações em muitos dos casos serem necessárias, porém, as ações de cunho social, econômico e administrativo também têm seu papel decisivo, através da educação e principalmente da conscientização por parte da população e do poder público (BARBOSA, 2006). De fato, ambas as medidas de controle de cheias podem coexistir, e de forma sincronizada, amenizar os impactos e danos causados pelas inundações no município (MACHADO, 2017).

### **3.3.1 Plano diretor de drenagem urbana (PDDU) e Ordenamento do uso e ocupação do solo**

Por meio da delimitação de áreas passíveis a inundações em função do risco, é possível estabelecer um zoneamento e a respectiva regulamentação para a construção. Ainda é possível executar eventuais obras de proteção individuais no mesmo projeto, realizando desapropriações de áreas inundáveis quando necessário, destinando-as a praças, parques, estacionamentos e outros (CANHOLI, 2015).

Neste sentido, as ações de regulamentação do uso e ocupação do solo visam prevenir contra fatores de ampliação dos deflúvios, representados pela impermeabilização intensiva da bacia de drenagem e pela ocupação das áreas ribeirinhas inundáveis, fatores que sobrecarregam a capacidade natural de armazenamento e o escoamento das calhas dos rios (CANHOLI, 2015).

Sendo assim, um planejamento de drenagem urbana busca, em ações de melhoria e controle dos sistemas, a combinação de recursos humanos e materiais que devem ser executados de maneira adequada. O que definiria uma composição simbiótica entre medidas estruturais e não estruturais. Em certos casos, nos quais as soluções estruturais são inviáveis técnica ou economicamente, as medidas não estruturais, como por exemplo, os sistemas de alerta podem reduzir os danos esperados a curto prazo, com baixo investimento (CANHOLI 2015).

O Poder Público pode instituir medidas de controle não-estruturais através do Plano Diretor de Desenvolvimento Ambiental (PDDUA), regulamentando o uso e ocupação do solo em áreas urbanas. O Plano de Drenagem Urbana (PDDRU) deve fornecer informações complementares à administração pública com relação aos problemas dos sistemas de drenagem, frente à possíveis alterações do uso e da ocupação do solo, condicionados pela PDDU (TASSI, 2002).

Tucci (2001) incentiva a criação de critérios e metodologias para o dimensionamento das ligações residências e loteamentos à rede de drenagem pluvial. Estes critérios devem estar contidos em um Manual de Drenagem.

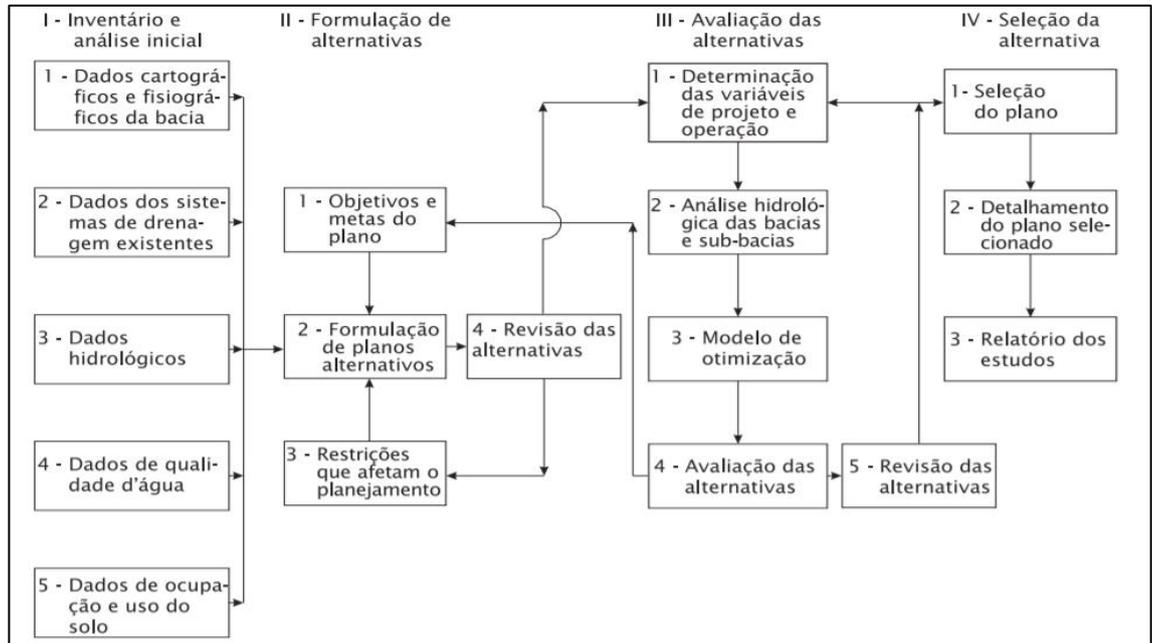
Tassi (2002) destaca ainda, que a eficácia da implantação de medidas não estruturais é dependente do controle e da fiscalização na implantação das obras. Além da aprovação de projetos de loteamentos, obras públicas e de drenagem, aspectos ambientais também devem ser computados.

Além disso, em uma visão macro acerca de planejamento da drenagem, Canholi (2015) descreve que na formulação do plano diretor de drenagem, deve-se considerar uma abordagem regional, sendo a unidade de gerenciamento a bacia hidrográfica, portanto, transcendendo limites municipais.

Wanielista e Yousef (1993) enfatizam também que um plano diretor adequado, deve considerar em sua concepção aspectos físicos da bacia hidrográfica, dando ênfase para as

características da rede de drenagem que influenciam os deflúvios, devendo cumprir as etapas básicas esquematizadas na Figura 5.

Figura 5 - Planejamento de sistemas de drenagem urbana



Fonte: Adaptado de Wanielista; Yousef (1993).

Portanto, um mecanismo de implementação do controle do uso do solo compõe a preparação de um conjunto de medidas abrangendo os vários aspectos da urbanização, incluindo o zoneamento urbano, o parcelamento do uso do solo, o código sanitário e o código de obras municipal (MELO, 2007).

Esse conjunto de medidas podem incluir a manutenção da taxa de impermeabilidade do solo em cada lote devido a urbanização, com o intuito de controlar os valores de deflúvios e torná-los semelhantes à vazão do lote pré urbanizado. Essas medidas também abordam a obrigatoriedade no controle de erosão durante o período de construção de unidades autônomas (MELO, 2007).

Tucci (2003) aponta que as etapas necessárias para a determinação de um zoneamento adequado são: determinação do risco das enchentes, mapeamento das áreas inundáveis, levantamento da ocupação da população na área de risco e a definição da ocupação ou zoneamento das áreas de risco.

O *Water Resources Council* (1971, *apud* TUCCI, 2003) definiu o zoneamento como uma divisão de unidades governamentais em distritos e a sua respectiva regulamentação sobre:

usos de estruturas e da terra; altura e volume de estruturas; tamanho dos lotes e densidade de uso. Consoante esse critério, as características do zoneamento, que se distingue de outros controles, é que a regulamentação varia de distrito para distrito. Isso estabelece padrões especiais para o uso do solo em áreas de inundação e a divisão de distritos através das comunidades que é usualmente baseado em planos globais de uso, que passam a orientar o crescimento da comunidade (MELO 2007).

### 3.4 MEDIDAS ESTRUTURAIS DE DRENAGEM URBANA

As medidas estruturais são essencialmente obras de engenharia implementadas para reduzir o risco de enchentes e inundações. Consistem na alteração dos sistemas de drenagem, podendo ser realizadas em nível de microdrenagem como reservatórios subterrâneos, galerias, trincheiras de infiltração etc., e no âmbito de macrodrenagem como diques, alargamento e desvios de canais, barragens, dentre outras (MARQUES 2019).

Segundo Tucci (1993) e Canholi (2015), essas medidas podem ser extensivas ou intensivas. As medidas extensivas agem na bacia e são encontradas na forma disseminada de pequenos armazenamentos, sendo oriundas das relações entre precipitação e vazão, como alteração da cobertura vegetal do solo, que reduz e retarda os picos de enchente e controla a erosão da bacia. Medidas intensivas, de acordo com seu objetivo, podem ser divididas em quatro categorias, (CANHOLI, 2015):

- De aceleração de escoamento: canalização e obras correlatas;
- De retardamento de fluxo: reservatórios (retenção/detenção) e restauração de calhas naturais;
- De desvio de escoamento: túneis de derivação e canais de desvio;
- Ações individuais: reservatórios em lotes devido a urbanização.

Algumas dessas tecnologias são descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Principais medidas estruturais

<b>Medida</b>	<b>Principal Vantagem</b>	<b>Principal Desvantagem</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Medidas Extensivas</b>			

<b>Medida</b>	<b>Principal Vantagem</b>	<b>Principal Desvantagem</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Controle da cobertura vegetal</b>	Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes bacias	Pequenas Bacias
<b>Controle da erosão no solo</b>	Reduz o escoamento	Impraticável para grandes bacias	Pequenas Bacias
<b>Medidas Intensivas</b>			
<b>Diques e Polders</b>	Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos caso falhe	Grandes rios
- Redução da rugosidade por desobstrução	Aumento da vazão com pouco investimento	Efeito localizado	Pequenos rios
- Corte de meandro	Amplia a área protegida e acelera o escoamento	Impacto negativo em rio com fundo aluvionar	Área de inundação estreita
<b>Reservatórios:</b>			
- Todos os reservatórios	Controle a jusante	Localização difícil	Bacias intermediárias
- Reservatórios com comportas	Mais eficiente com o mesmo volume	Vulnerável a erros humanos	Projeto de múltiplos usos
- Reservatórios para cheias	Operação com o mínimo de perdas	Custo de implantação não compartilhado	Restrito ao controle de enchentes
-Reservatório em Lotes	Controle de escoamento na fonte	Projetos baseados em chuvas de projeto, suscetíveis a falhas	Lotes municipais/Depende do tamanho da área impermeável
<b>Mudança de canal:</b>			
- Caminho da cheia	Amortecimento de volume	Depende da topografia	Bacias média e grandes
- Desvios	Reduz a vazão do canal principal		

Fonte: Adaptado de Simons (1977) e Tucci (2007)

Walesh (1989) define como características de projetos de drenagem aquelas atreladas a conceitos de canalização e reservação. Segundo Canholi (2015) e Walesh (1989), o “conceito de canalização” é referido às técnicas estruturais voltadas ao aceleração de escoamento que são implementadas nos rios urbanos. Essas estruturas têm grande apelo populacional, pois

remetem a construção de grandes estruturas de saneamento, particularmente no Brasil, como: galerias e canais de concreto, tamponamento dos córregos, retificação dos traçados, aumento da declividade do fundo de canais.

Ainda conforme Lucas (2015), dentre o rol de medidas estruturais para abordagem do problema das cheias urbanas destacam-se as técnicas compensatórias, as quais se constituem em medidas de controle de escoamento na fonte de geração, aplicadas de forma difusa na bacia hidrográfica. Estas técnicas são melhores descritas a seguir.

### **3.4.1 Técnicas Compensatórias em drenagem urbana**

Técnicas compensatórias em drenagem urbana podem ser entendidas como estruturas, obras, dispositivos ou mesmo como conceitos diferenciados de projeto, cuja utilização não se encontra ainda disseminado (CANHOLI 2015), que tem por objetivo aumentar a parcela da água pluvial retida ou infiltrada, recuperando ou minimizando os efeitos decorrentes do escoamento superficial gerado pela ocupação urbana (LUCAS, 2015)

Entretanto, Ohnuma (2008) e Tomaz (2003) indicam que tecnologias semelhantes às técnicas compensatórias já foram amplamente utilizadas na antiguidade, como por exemplo, cisternas, para o aproveitamento da água da chuva.

Souza (2002) exclama que essas tecnologias levam esse título devido a se oporem diretamente a técnicas higienistas, que têm por objetivo canalizar e transportar o máximo de água possível pela rede de captação.

Contudo, na Alemanha, Austrália, Estados Unidos e Japão, as técnicas compensatórias já executam serviços de forma mais efetiva. A cidade de Portland, nos Estados Unidos, por exemplo, usufrui de tecnologias de controle de escoamento denominados *on-site stormwater detention* ou *detenção de escoamento na fonte* (OHNUMA 2008). Este mecanismo, de acordo com UPRCT (2001) permite melhorar as condições de escoamento, diminuindo o volume das inundações urbanas.

Não obstante, as técnicas compensatórias mais difundidas visam a adoção de mecanismos que simulam as características de uma bacia pré urbanizada. Essas medidas podem ser as que incrementam os processos de infiltração, armazenamento e retardo de fluxo em rios.

Dentre as formas de controle do escoamento urbano e da poluição hídrica, destacam-se aquelas estruturas que se encontram na micro e na macrodrenagem, como renaturalização de canais, bacias de amortecimento de cheias, reflorestamento das áreas de fundo de vale (OHNUMA 2008).

Já que medidas estruturais de atuação na fonte geradora para a melhoria no uso das águas urbanas são aquelas capazes de promover sua infiltração e percolação ou seu armazenamento (OHNUMA, 2008). Dentro do contexto hidrológico, o uso das medidas de controle atuante na fonte exerce funções que podem ser de controle de volume excedente ou das vazões (SOUZA 2002). Ambas visam melhorar e garantir uma maior proteção dos recursos hídricos.

Entre as medidas de controle na fonte estão (OHNUMA, 2008) são: trincheiras de infiltração, telhados verdes, pavimentos permeáveis, poços de infiltração, microrreservatório de detenção em lotes e cisternas ou reservatórios de aproveitamento de água pluvial.

### **3.4.2 Tecnologias de controle de escoamento na fonte**

A finalidade dessas tecnologias é reduzir o pico das enchentes, por meio do amortecimento conveniente das ondas de cheia, obtida pelo armazenamento de parte do volume escoado. Entretanto, a utilização dessas estruturas é associada também a outros usos (CANHOLI, 2015).

A captura da água na fonte pode diminuir o escoamento superficial que chegaria às ruas e rios, reduzindo a demanda de água para irrigação e preservando a água. O escoamento proveniente dos caminhos de garagens pode ser canalizado para planos, trincheiras, valas, poços de infiltração, entre outros, minimizando o escoamento superficial e maximizando a absorção de poluentes. No caso de armazenamento para aproveitamento, verifica-se que eles podem ser efetivos em uma faixa de fluxos intermediários (XIAO, 2007).

Sendo assim, as medidas de controle na fonte devem ser vistas como complementares àquelas de controle a jusante (voltadas ao controle de quantidade na escala regional), com objetivo final de garantir o correto manejo dos eventos de alta e baixa frequência, promovendo o controle global da quantidade e da qualidade das águas (CANHOLI, 2015).

Canholi (2015) destaca que alguns dispositivos de controle na fonte visam restringir a entrada de escoamentos no sistema de drenagem, com o intuito de reservação. Essa captação pode ser temporária, com uma taxa de devolução ao sistema de drenagem, ou pode ser armazenada para o uso posterior.

As vantagens da utilização de dispositivos de controle na fonte. Englobam a flexibilidade para instalação dos dispositivos, uma vez que são de pequena escala e em alguns casos de propriedade individual. A padronização dos dispositivos também é um ponto importante, além da eficiência do transporte de vazão para os canais já existentes e

consequentemente uma melhoria da qualidade e valorização da água no meio urbano (URBONAS; STAHRÉ, 1993).

A seguir são citadas algumas estruturas destinadas a diminuição de escoamento na fonte. Todavia, como o objetivo do trabalho é realizar a simulação em longo prazo de reservatórios para controle de escoamento pluvial na fonte e verificar a viabilidade de sua utilização como estrutura de reservação para aproveitamento de água da chuva, será destinado um único capítulo a essa tecnologia.

#### 3.4.2.1 *Telhados Verdes*

Os telhados verdes são exemplos de técnicas de controle na fonte, que contribuem para redução do escoamento superficial na micro e na macrodrenagem. Segundo Onhuma (2008), essas estruturas são capazes de retardar o escoamento devido ao aumento da infiltração e do acréscimo da evapotranspiração. Lorenzini Neto e Tassi (2012), ao estudar o impacto exercido por coberturas convencionais, destacam ainda que a utilização de telhados verdes em áreas urbanas oferece melhorias nas condições térmicas e uma grande capacidade de absorção de água pluvial.

Kolb (2003) ao estudar a utilização de telhados verdes, para picos de drenagem, onde ocorre maior índice pluviométrico, em comparação com telhados convencionais, a relação do amortecimento do volume escoado entre ambas, foi da ordem de 75%. O autor aponta que a espessura do substrato e a escolha das espécies plantadas influenciam consideravelmente nos resultados do escoamento gerado. Tassi *et al.*, (2014) buscaram determinar a eficiência de um telhado verde, em longo prazo, no controle quantitativo de águas pluviais. O estudo demonstrou que foi reduzido, em média, 62% do escoamento superficial, promovendo um retardo no escoamento e reduzindo as vazões de pico.

#### 3.4.2.2 *Pavimentos permeáveis e poços de infiltração*

O uso de pavimentos permeáveis, embora seja uma medida mais amplamente adotada em alguns locais em específico, principalmente em praças e estacionamentos, ainda não é muito comum em áreas residenciais, industriais e comércio (ONHUMA 2008). Segundo Pinto (2011), os pavimentos permeáveis são técnicas compensatórias de controle na fonte, que não são necessariamente porosos, mas possibilitam a passagem de água entre ele que percola até

atingir a camada inferior de subleito ou é direcionada para o sistema de drenagem subsuperficial.

Ragab *et al.*, (2003) investigaram o processo de infiltração e de escoamento a partir da quantificação do percentual precipitado que contribui para a drenagem e, buscando identificar, qual a infiltração total em diferentes tipos de pavimentos. Os autores observaram que, dependendo da natureza da superfície e das camadas subsuperficiais, que o total da precipitação anual, entre 6% a 9% foi infiltrado no solo, enquanto que a evaporação ficou representada entre 21% e 24%.

Os poços de infiltração, por sua vez, possuem a característica de serem capazes de receber infiltrações em camadas profundas. Estes dispositivos são recomendados para camadas de solo superficiais pouco permeáveis e que precisam de frequente manutenção a partir de (SOUZA, 2002). No trabalho desenvolvido por Reis (2005), foi avaliada a limitação de poço de infiltração de águas pluviais instalado dentro de uma área residencial. O autor verificou que a aplicação desta estrutura em lotes urbanos é eficiente no controle de escoamento urbano, uma vez que os poços podem reestabelecer o balanço hídrico natural da área impermeável.

#### *3.4.2.3 Jardins de chuva*

Os jardins de chuva compõem outro exemplo de técnica compensatória com controle na fonte, sendo caracterizado por serem estruturas categorizadas como filtros que utilizam atividade biológica (plantas e microrganismos) para limpar as águas do escoamento superficial e atenuar os picos de cheia e/ou no caso de estruturas infiltrantes, para diminuir os volumes escoados. São estruturas pouco profundas que podem ser implantadas em locais adjacentes a estacionamentos, vias públicas, áreas residências ou comerciais, em geral, áreas pequenas com adensamento urbano (TOMINGA, 2013).

#### *3.4.2.4 Trincheiras de infiltração e detenção*

As trincheiras de infiltração e detenção, por sua vez, são dispostas com uma estrutura linear, podendo ser implantados na superfície ou em pequenas profundidades, possuindo como intuito coletar as águas do escoamento superficial afluentes de áreas impermeáveis a montante. Essas estruturas favorecem a infiltração e proporcionam um armazenamento temporário das águas pluviais, além de apresentar grande versatilidade, podendo ser implantadas em canteiros

centrais e passeios, ao longo do sistema viário, ou ainda junto a estacionamentos, jardins, terrenos esportivos e áreas verdes em geral, além de lotes habitacionais (BATISTA *et al*, 2005).

Schueler (1987), em seu trabalho, aponta a eficiência na remoção de poluentes por essa estrutura, entretanto, o autor não indica o uso deste equipamento em áreas com grande carga sedimentária, pois, afetaria diretamente no objetivo do mecanismo. Sendo assim, o autor orienta para a utilização de caixas de sedimentação a montante do dispositivo.

### 3.5 MICRORRESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO PARA LOTES URBANOS

Microrreservatório de detenção em lotes é uma solução difundida nos Estados Unidos, Japão, Índia e países da Europa, que além de suprir o controle do escoamento pluvial, ainda pode ser utilizado para induzir a redução do consumo de água potável (ALADENOLA; ADEBOVE, 2010).

Tominaga (2013) descreve os microrreservatórios como pequenos reservatórios que usualmente podem ser instalados no próprio lote, cuja função é o armazenamento de volumes de chuva, contribuindo assim com o amortecimento da onda de cheia.

Ohnuma (2008) detalha que a hospedagem de microrreservatórios de água de chuva em lotes, visando reservá-la e, posteriormente, aproveitá-la ou descartá-la para a rede pluvial, é uma prática antiga e econômica. De fato, as pessoas no início do século XX utilizavam baldes e bacias para o armazenamento da água da chuva com a finalidade de lavar calçadas, irrigar jardins e outras atividades, ou seja, mesmo sem informação alguma, essa prática já atenuava os efeitos crescentes do escoamento superficial gerado pela urbanização.

Todavia, a atuação dos microrreservatórios de detenção difere dos dispositivos de retenção por serem projetados para diminuir o pico do volume das cheias urbanas e por serem capazes de se manter secos durante um determinado período. Tucci (2005) caracteriza os reservatórios de retenção como aqueles que possuem lâmina d'água precipitável para o controlar o volume do escoamento.

Alguns autores exemplificam práticas relacionadas a pequenas bacias de detenção em lotes urbanos. Fuchs (1984) apresentou várias propostas de gerenciamento de águas pluviais. Entre essas propostas estão as bacias de detenção centralizadas, containers de detenção descentralizados, bacias de infiltração centralizadas e poços de infiltração descentralizados. Hentges (2012) avaliou se os reservatórios de aproveitamento de água da chuva podem cumprir com a função de um microrreservatório de detenção. Tassi (2002) avaliou a influência de microrreservatórios de lote sobre a macrodrenagem e simulou o dimensionamento para várias

combinações de TRs e vazões de descarga, obtendo níveis de eficiência na ordem de 70 % de acordo com a vazão na saída dos lotes

A utilização de pequenas cisternas em lotes urbanos também foi testada por Schilling (1982, *apud* OHNUMA 2008). como medida não convencional simples e barata, visando diminuir os efeitos da urbanização. Os resultados para uma bacia com 29% de área impermeável e implantação de 140 cisternas de 0,5 m<sup>3</sup> indicaram redução das vazões de pico de até 20%. No entanto, para os eventos mais frequentes com  $Tr < 1$  ano, as vazões foram diminuídas em até 80%.

Andrade Filho *et al.*, (2000) testaram simulações para a bacia urbana da cidade de Ponta Grossa e confirmaram que o uso de microrreservatórios embutidos em lotes urbanos, quando associados ao sistema de drenagem convencional, demonstram reduções de vazão e volumes escoados. Inúmeras utilizações de microrreservatórios embutidos em lotes urbanos, têm sido testados com maior frequência por hidrólogos e engenheiros. Algumas regulamentações em diferentes esferas legislativas afirmam e contribuem para a implementação e análise dessas estruturas

### **3.5.1 Exemplos de Regulamentações e critérios para o dimensionamento de Microrreservatórios**

Tassi (2002) retrata que o critério de funcionamento dos microrreservatório é o armazenamento oriundo do escoamento que chega na estrutura, sendo amortecido pelo volume disponível. Dessa forma, almeja-se a redução do pico do hidrograma de saída a uma vazão igual ou menor a existente antes da impermeabilização do local, respeitando-se uma vazão de restrição de pré-urbanização que, conforme a autora, é estipulada a partir de equações de projetos, sendo a base de várias normas e decretos municipais. O uso de mecanismos de controle na fonte é crescente no Brasil, sendo previsto, recomendado ou obrigatório na legislação de diversos municípios brasileiros (HENTGES, 2012).

A maior parte da legislação brasileira que trata sobre o controle de águas pluviais na fonte encontra-se na esfera municipal. Exceto por três leis federais que dispõem sobre a gestão da drenagem urbana e que possuem relação com o controle na fonte (DRUMOND; COELHO; MOURA, 2011).

A Lei Federal nº 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, em um dos seus fundamentos repassa também aos cidadãos a responsabilidade pela gestão dos recursos hídricos e define que sua articulação com o uso do solo é uma das diretrizes gerais

para a implementação da Política Nacional Recursos Hídricos. Um dos instrumentos a ser utilizado é o Plano de Recursos Hídricos, que se constitui em planos diretores que visam a fundamentar e orientar a Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos (DRUMOND; COELHO; MOURA, 2011).

Como já explicitado, alguns municípios são responsáveis pela implantação e fiscalização de leis e normativas com a finalidade de retardar o lançamento de água pluvial oriundas das construções impermeabilizantes.

- São Paulo/SP & Rio de Janeiro/RJ

A Lei municipal nº 13.276/02 da cidade de São Paulo e o Decreto municipal nº 23.940/04 do Rio de Janeiro tornam obrigatória a construção de reservatórios para acumulação de água de chuva nos empreendimentos com área impermeabilizada superior a 500 m<sup>2</sup>, cujo volume deve ser cálculo pela equação:

$$V = 0,15. Ai. IP. t \quad (1)$$

Sendo:

*V* : volume do reservatório (m<sup>3</sup>)

*Ai* : área impermeabilizada (m<sup>2</sup>)

*IP* : índice pluviométrico igual a 0,06m/h para São Paulo e parte do Rio de Janeiro (áreas de planejamento 1, 2 e 4 segundo a plano diretor) e 0,07m/h para as áreas de planejamento 3 e 5 do Rio de Janeiro

*t* : tempo de duração da chuva igual a uma hora.

- Porto Alegre/RS

De acordo com o Plano de Diretor de Drenagem Urbana (PDDU) as vazões que excederem o valor de 20,8 L/s.ha em lotes com área superior a 600 m<sup>2</sup> deverão ser armazenadas em reservatórios ou infiltradas em solo. O plano ressalta que esse valor deverá ser respeitado para qualquer tempo de retorno, seja superior, seja inferior ao de referência (10 anos) (CANHOLI 2015). A determinação do volume necessário é expressa pela Equação 2.

$$V = 4,25. Ai. Ae \quad (2)$$

Onde:

*V* : Volume (m<sup>3</sup>);

*Ai* : porcentagem da área impermeável (%);

*Ae* : área do empreendimento (há).

- Curitiba/PR

Curitiba tem bases legislativas que incorporam diferentes vertentes e localidades acerca da drenagem Urbana. O Plano Diretor de Drenagem para a bacia do Rio Iguaçu, na região metropolitana, adota as mesmas premissas do plano de Porto alegre, entretanto a vazão limite é de 27/ L.ha. O volume de reservação pode ser determinado pela Equação 3.

$$V_r = 2,456. T^{0,332}.A_i \quad (3)$$

Onde:

$V_r$  : Volume (m<sup>3</sup>/há);

$T$  : tempo de retorno da precipitação (anos);

$A_i$  : área impermeável (%).

Método do decreto municipal 293/2006 para edificações habitacionais. No Decreto Municipal 293/2006, são direcionadas duas equações para o dimensionamento do volume do reservatório, uma equação é orientada para edificações habitacionais e outra para comerciais. Em todos os casos fica estabelecido um volume mínimo de 500 litros. O dimensionamento do reservatório de água de chuva nas edificações habitacionais é indicado na Equação 4.

$$V_R = N_U.C_d.dr.0,25 \quad (4)$$

Onde:

$V_R$  : Volume do reservatório (l);

$N_U$  : número de unidades habitacionais (quando edifícios de habitação coletiva);

$C_d$  : consumo diário de água de chuva (litros/dia);

$dr$  : número de dias de reserva = 2 (estabelecido no Decreto Municipal 293/2006).

O volume do reservatório de água de chuva nas edificações comerciais é indicado a partir da Equação 5.

$$V = A_c . 0,75 \quad (5)$$

Onde:

$V$  : volume do reservatório de água de chuva (litros);

$A_c$  : área total da edificação (m<sup>2</sup>).

O decreto nº 176 do artigo 42 da lei nº9800/2000 determina parâmetros para o dimensionamento de reservatórios de retenção para áreas maiores que 3000 m<sup>2</sup> de terreno impermeabilizado, além da obrigatoriedade para novos empreendimentos que apresentarem redução da taxa permeável igual ou superior a 25%. O decreto também informa (art 5º - inciso 3) sobre áreas além das habitacionais a obrigatoriedade da implantação de reservatórios de retenção.

O volume do reservatório de retenção é determinado pela Equação 6

$$V = K \cdot I \cdot A \quad (6)$$

Onde:

$V$  : volume do reservatório (m<sup>3</sup>);

$K$  : constante dimensional = 0,20;

$I$  : intensidade da chuva = 0,080m/h;

$A$  : área prevista no § 2º, do artigo 5º, deste decreto.

O decreto ainda prevê uma taxa de devolução de vazão, para o sistema de drenagem, baseada no volume dimensionado do reservatório.

### 3.6 SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL

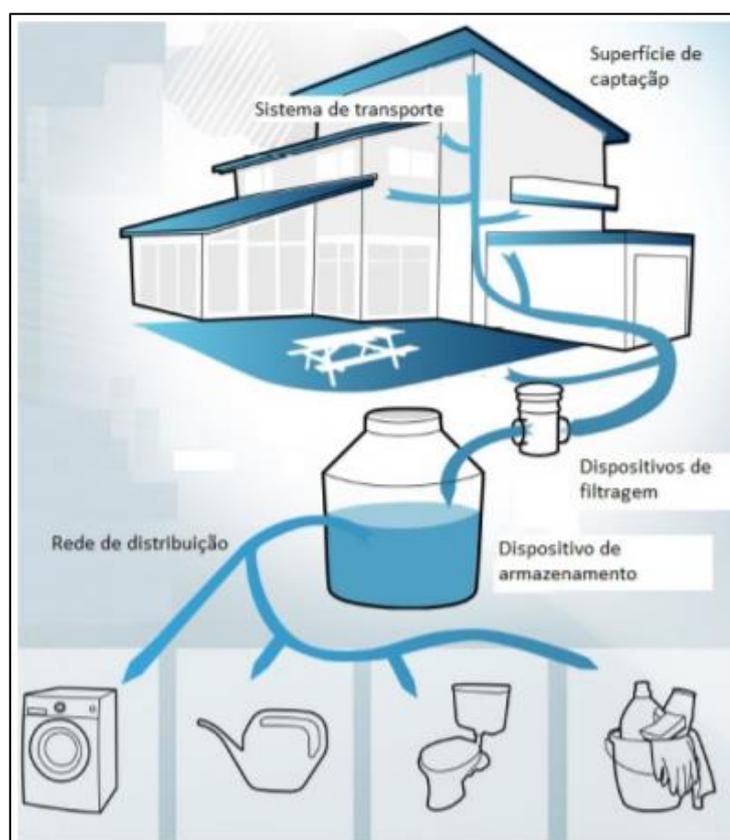
Os sistemas de aproveitamento de águas pluviais têm como objetivo conservar os recursos hídricos e reduzir o consumo de água potável. Estes sistemas, captam a água da chuva que cai sobre superfícies, direcionando para reservatórios de armazenamento para posterior utilização.

Segundo Sacadura (2011), os sistemas de aproveitamento de água pluvial são constituídos por componentes básicos (Figura 6) cujas funções são:

- Superfície de captação: inclui a superfície sobre a qual a chuva cai, isto é, a superfície de recolha, normalmente o telhado da habitação;
- Sistema de transporte: é constituído pelos componentes que encaminham a água do telhado para o tanque, nomeadamente os algerozes ou as caleiras e os tubos de queda;
- Dispositivos de filtração: têm como função a remoção de detritos e poeiras da água pluvial captada antes desta ir para o tanque;

- Dispositivos de armazenamento: englobam um ou mais tanques de armazenamento que podem também ser denominados de cisternas;
- Rede de distribuição: é o sistema de transporte da água pluvial para o seu uso final através de bombagem ou gravidade;
- Tratamento: apesar de particularmente relevante no caso dos sistemas potáveis para os usos não potáveis, esta etapa inclui normalmente apenas a remoção de partículas.

Figura 6 - Simplificação de um sistema de aproveitamento de água pluvial



Fonte: Adaptado de *Rainwater Harvesting Virginia* (2008)

As bases dos sistemas de aproveitamento de água da chuva são idênticas, entretanto cada projeto tem suas peculiaridades. Essas variáveis podem ser ambientais ou estruturais, podendo ser até índices pluviométricos, área de captação da chuva, área disponível para instalação das estruturas de armazenamento e tipos diferentes de demandas (SACADURA, 2011).

Ao ser implantado um sistema de captação e aproveitamento de água da chuva, algumas características do projeto permanecem fixas, como: a área de captação, calhas e condutores verticais, sistemas complementares e coeficiente de escoamento. Outras características são

variáveis ao longo do tempo como as demandas e as séries de precipitação. Dessa forma o dimensionamento de reservatórios é influenciado por características fixas e variáveis, dificultando seu dimensionamento (PERIUS, 2016).

Uma das maiores dificuldades está na identificação do volume ideal do reservatório, uma vez que a escolha do volume total do reservatório que atenda a demanda, sem a ocorrência de falhas, ou seja, com eficiência perfeita resultaria em um grande volume ocioso na maior parte do tempo, acarretando custos elevados para o sistema. Todavia, um reservatório de menor volume e conseqüentemente, menor custo, ocasionaria um número elevado de falhas no atendimento a demanda (PERIUS, 2016).

Geralmente procura-se construir grandes reservatórios, buscando com isso regularizar a vazão, ou seja, acumular água durante o período chuvoso para ser utilizada durante a estiagem. Essa lógica aplica-se muito bem a locais que não dispõem de outras fontes de abastecimento. Porém, no dimensionamento de sistemas para área urbana que, frequentemente, possui sistemas públicos de abastecimento de água, deve-se adotar uma outra lógica. Nestas regiões a utilização de água pluvial deve funcionar como uma fonte complementar, podendo ser abastecido pela rede pública durante as estiagens (COHIM *et al.* 2008., *apud* PERIUS, 2016).

Além da característica da precipitação e das demandas, outros critérios utilizados no dimensionamento podem influenciar o volume de reservação, como o tratamento dado às falhas na série de precipitações, o descarte das primeiras águas, e até mesmo a condição inicial do reservatório podem ser determinantes para o volume final. Sendo assim, a norma brasileira NBR n°. 15.527/2007 (atualizada em 2019) apresenta o método da simulação para dimensionamento do reservatório de aproveitamento da água da chuva.

### 3.7 ESTUDOS QUE AVALIARAM DIFERENTES UTILIZAÇÕES DOS RCF

Em várias cidades brasileiras já existem leis que obrigam a utilização de reservatórios e microrreservatórios para o controle de escoamento, incluindo os destinados ao aproveitamento de águas pluviais. A diferença entre eles está basicamente na sua finalidade: enquanto o primeiro deve permanecer vazio para a próxima chuva, o segundo deve se manter cheio para atender a demanda (TESTON 2015).

Teston (2015) avaliou a existência de impacto no aproveitamento da água da chuva nas residências unifamiliares perante o consumo de água potável e conseqüentemente a influência nos sistemas de drenagem das localidades. A pesquisa, se baseou em duas equações de dimensionamento de reservatório, sendo elas o Método Prático Alemão (ABNT 15.527/2007)

e o Método do Decreto 293/2006 de Curitiba. A utilização dos métodos de dimensionamento foi submetida a diferentes cenários de demanda com intuito de determinar quanto da demanda é atendida e quanta água fica retida nos reservatórios.

Lorenzini Neto; Tassi (2012) testaram a viabilidade da aplicação de microrreservatórios, para o consumo de água pluvial, em lotes perante a rede de microdrenagem. Buscando avaliar se essa prática reduziria a vazão gerada. Os autores avaliaram que com o aproveitamento da água da chuva, houve uma diminuição de escoamento superficial, refletindo em uma economia na instalação de galerias de drenagem e sistemas incorporados.

Dornelles (2012) propôs o dimensionamento de reservatórios por meio de ábacos, que foram criados a partir da técnica de Monte Carlo em séries sintéticas e balanço de massa de reservatórios, com intuito de medir a eficiência e índices de desempenho em função do volume e da demanda de água não potável. O autor produziu ábacos para todas as capitais brasileiras e o distrito federal. Os resultados das simulações apontaram para uma ineficiência na redução do pico de vazão, sendo observada apenas uma pequena redução no volume do hidrograma para região da grande Porto Alegre.

Marvila (2015) propôs a simulação de uma bacia urbana com a integração de reservatórios de aproveitamento da água da chuva com o Modelo Hidrológico HEC - HMS. Os resultados apontaram a ineficácia de reservatórios para diminuição do pico de vazão em níveis hidrológicos de pré-ocupação. Todavia, o autor relatou que em termos realísticos, os RAAC podem reduzir os picos de vazão em até 10% para um tempo de recorrência de 5 anos, viabilizando seu uso junto de outras práticas de mitigação em drenagem urbana.

No trabalho desenvolvido por Gerolin, Kellagher e Faram (2010), foi utilizada uma metodologia para testar os benefícios da utilização de reservatórios para aproveitamento de águas pluviais com fins não potáveis, na redução do escoamento superficial durante eventos extremos, utilizando séries estocásticas de chuvas contínuas. Essa abordagem foi aplicada para três regiões da Inglaterra. Os resultados mostraram significativas reduções de vazão em locais onde o índice pluviométrico não se mostrou eficiente, para manter por grande parte do tempo o reservatório cheio. O estudo demonstra a importância da utilização de séries contínuas para analisar o aproveitamento de águas pluviais armazenadas em reservatórios, em razão das estruturas serem sensíveis à precipitação antecedente e dessa forma, poderem levar vários dias para esvaziar.

Bezerra (2010) realizou um comparativo entre os métodos de dimensionamento de reservatório de aproveitamento de água da chuva descritos na ABNT NBR 15527/2007 e no Decreto Municipal Nº 293/2006 da cidade de Curitiba. A autora relata que a decisão final sobre

qual método seria mais indicado poderia ter por base a comparação de volumes obtidos e a viabilidade em termos de área disponível e custo de construção do reservatório.

Warner, Lewis e Tzilivakis (2019) simularam o uso do sistema ecológico Australiano para atuar como mecanismo de contenção de cheias e suprimento de demanda da água oriunda de chuva, considerando casos extremos de escassez hídrica e grandes volumes de precipitação dentro do que seria aceito no Reino Unido. Dentro dessa abordagem, os autores apontam para a qualidade da água gerada a partir das áreas impermeáveis e seu uso não potável, além da descompressão dos sistemas de distribuição centralizados, tornando-os regionais. Além disso, descrevem as tecnologias utilizadas em toda união europeia, dando ênfase a Alemanha, que dá suporte financeiro para construção e aquisição de sistemas que funcionam como mecanismos de abastecimento de água pluvial e que tenham a funcionalidade de contenção de onda de cheia.

Contudo, estudos que envolvem o uso compartilhado de sistemas de armazenamento de água para posterior uso e mecanismos de contenção de cheias, ainda não demonstraram detalhamentos de análises significativas, uma vez que o uso dessa estrutura, de forma temporal, varia em diferentes regiões do Brasil.

### 3.8 UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTA SIG PARA GESTÃO DE ÁGUAS URBANAS

A plataforma de Sistema de Informações Geográficas é simplificada denominada SIG, possui a função, não exclusiva, de: armazenagem, análise e visualização de dados de posição geográfica na superfície da Terra.

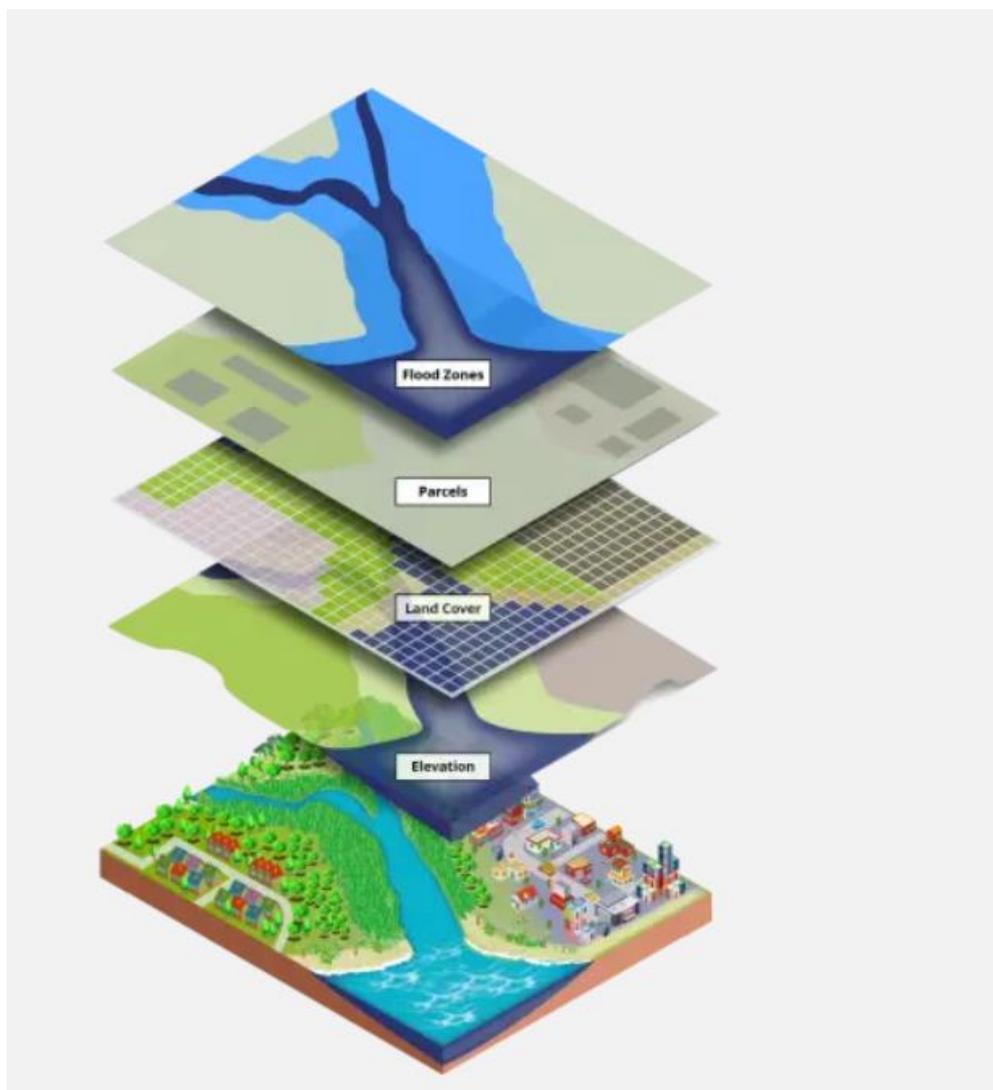
O SIG é, portanto, uma ferramenta sistemática que examina relações espaciais, padrões e tendências geográficas, dando ênfase à dados com referência espacial, ou seja, dados com contexto geográfico, possuindo o intuito de situar a informação em um espaço limitado e demonstrar de forma simplificada a localização da informação.

Perante o exposto, o mapeamento SIG produz, portanto, informações geoespaciais, sendo as quatro premissas do sistema:

- Criar dados geográficos;
- Gerenciar um banco de dados;
- Analisar e encontrar padrões;
- Visualizar e interpretar informações a partir de mapas.

Esta sequência de trabalho inseridas no SIG pode ser visualizada na Figura 7, onde, a partir de uma imagem de satélite, é possível extrair dados pertinentes acerca de áreas e setores de riscos hidrológicos, tornando a informação primordial para a tomada de decisões.

Figura 7 – Configuração de sistemas de informações geográficas (SIG)



Fonte: Adaptado de Rodrigues e Santini Junior (2017).

Tendo em vista a capacidade de criar e extrair dados dos Sistemas de informações Geográficas, vários autores utilizam desta ferramenta, em diferentes áreas do conhecimento.

Um exemplo atual foi Rodrigues e Santini Junior (2017), por exemplo, propuseram desenvolver um modelo hidráulico de rede de drenagem na Ilha de Solteiro-SP, onde, a partir do programa ArcGis 10 e o *Storm Water Management Model* (SWMM), estabeleceram um modelo digital representativo da bacia e simularam, a partir da Equação de Saint-Venant, a propagação do escoamento. Os resultados mostraram que a ferramenta SIG apresentou representatividade com confiabilidade da topografia da região, auxiliando a modelagem unidimensional, que servirá como portfólio para tomada de decisões.

Já Becker (2006) utilizou a ferramenta SIG como mecanismo para obtenção de informações necessárias para a primeira fase de construção do Plano de Diretor de Drenagem Urbana. Em conjunto com tais informações adquiridas com a ferramenta SIG, foi possível determinar, através de métodos consolidados, precipitação e vazão para a bacia do Bom Retiro, localizada no interior do município de Joinville, além do levantamento de dados cadastrais do sistema de drenagem.

Araújo e Freire (2013), por sua vez, avaliaram a partir do SIG as condições geoambientais de uma localidade, analisando os processos de uso e ocupação da região em uma escala temporal, além de desempenhar atividades extensionista, a fim de conscientizar a população residente sobre os aspectos naturais e a sua utilização de maneira sustentável. Os autores utilizaram como metodologia a bibliografia pertinente a ferramenta SIG, bem como as fotografias e imagens de satélites multitemporais. As atividades de geoprocessamento envolveram o processamento de imagens de sensoriamento remoto e a integração dos dados a plataforma SIG, chegando a resultados como: poluição do rio da região, degradação de áreas de preservação permanente (APP) e o crescimento urbano da cidade de Acaraú.

Borges *et al.* (2015) utilizaram técnicas de Geoprocessamento para a elaboração de cotas de inundação. Os autores executaram a delimitação da área de interesse e a partir desta informação, levantaram dados acerca do tipo de relevo, do tipo de solo, do uso do solo, dados das estações climáticas próximas a região do estudo. Os resultados obtidos no estudo foram a elaboração de mapas na área delimitada do parque ecológico do Rio Paranaíba como: uso do solo, altitude, declividade, tipo do solo e precipitação usados para a elaboração do mapa final de risco, adotando-se o método para análise hierárquica a fim de observar os critérios de influência, resultando em pesos estatísticos, para finalmente utilizar a técnica da álgebra de mapas no SIG escolhido, gerando o mapa de risco de inundação.

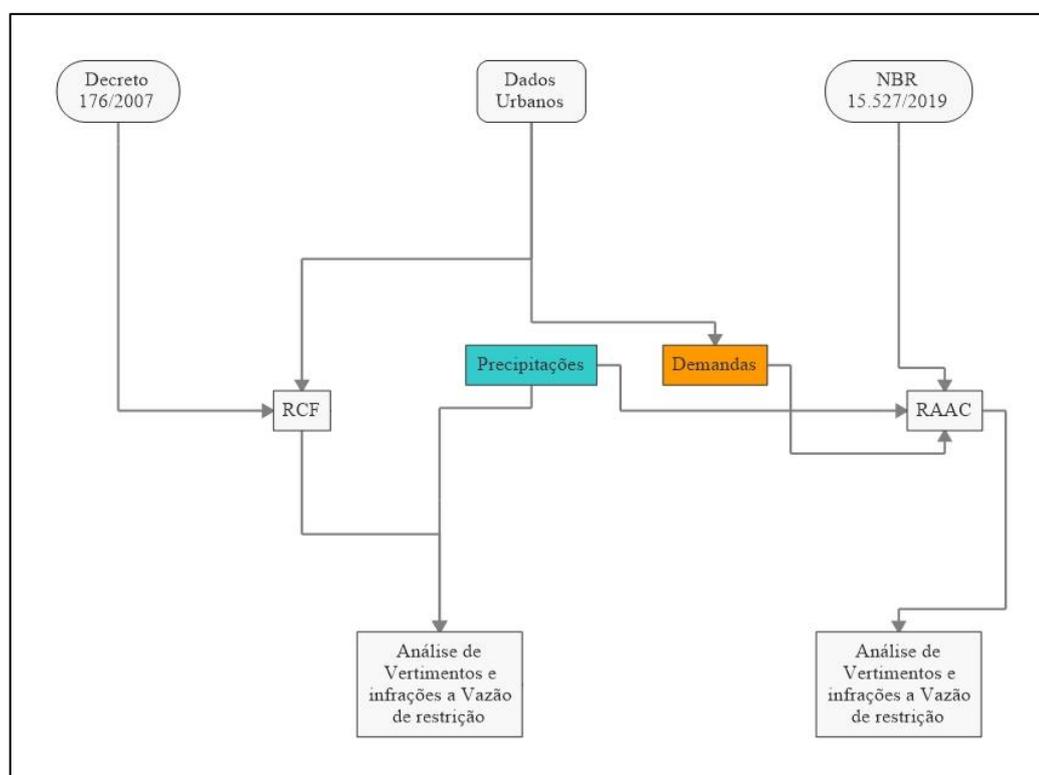
#### **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Esse capítulo está dividido em dois itens. No primeiro são apresentados os materiais que foram utilizados e no segundo são descritas as metodologias que foram aplicadas para o estudo.

Na Figura 8, observa-se o fluxograma das atividades de simulação, sendo o processo de desenvolvimento da pesquisa dividido em 3 partes:

1. Dimensionamento dos RAAC segundo a NBR 15.527/2019.
2. Dimensionamento dos RCF segundo o Decreto Municipal de Curitiba nº 1733/2021.
3. Simulação dos RAAC dimensionados na etapa 1 operando como RCF, e verificação do número de infrações da vazão de restrição.

Figura 8 - Fluxograma da Metodologia Aplicada



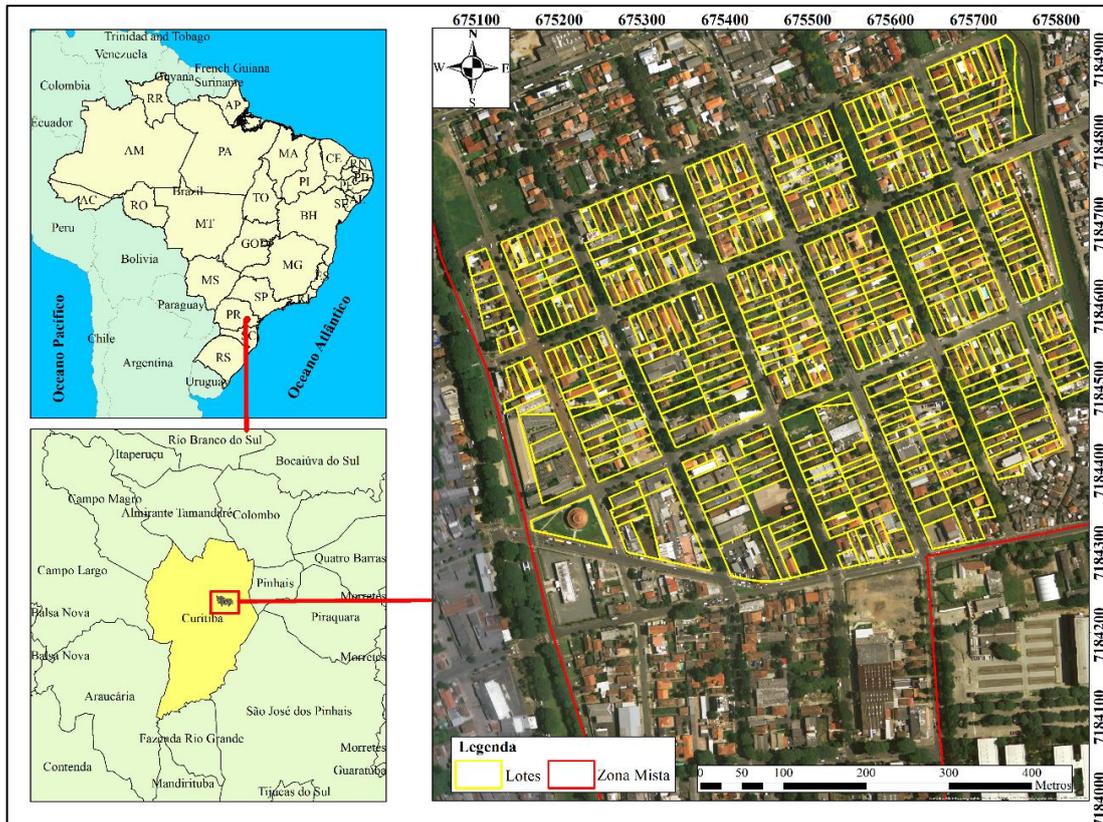
Fonte: Autor (2022)

Os materiais necessários dizem respeito a dados hidrológicos de precipitação, banco de dados de sistema de informações geográficas (SIG) como: área de lote, áreas de zoneamento, arruamentos, identificação dos lotes e edificações, ortofotos e modelos digitais de elevação. Foram utilizados para preparação dos mapas na modelagem matemática o software de geoprocessamento, pacote do aplicativo Python para programação, legislações e normativas pertinentes e dados da população da região do estudo.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

Como região de estudo, foi escolhida uma zona na área central do município de Curitiba, pertencente ao Bairro Rebouças. Essa região encontra-se na Zona de Uso Misto do município, segundo a Lei nº15.511/2019 (Figura 9).

Figura 9 - Localização dos lotes da área de estudo



Fonte: Autor (2022)

A área delimitada para estudo integra um total de 415 lotes, que variam suas áreas entre 50 m<sup>2</sup> até 3534 m<sup>2</sup>. Essa região foi escolhida devido aos lotes serem bastante heterogêneos, nessa Zona de Uso Misto, sendo eles caracterizados como moradias unifamiliares, multifamiliares, escolas, comércio, shoppings, teatros e entre outras instalações urbanas. Buscou-se a heterogeneidade dos lotes visando maior representatividade do funcionamento regional do dimensionamento de estruturas de reservação de água, assim como a função de amortecimento de contribuição de escoamento superficial

Foram importantes para esta pesquisa as informações para a região apresentadas no Plano de Drenagem Urbana de Curitiba, que aborda vários aspectos acerca de mecanismos de drenagem no município, entre esses aspectos está a vazão de restrição de reservatórios de retenção que, segundo orientação do PDDU de Curitiba, não pode ultrapassar a vazão

específica de 27 L/(s.ha). Soma-se a este elemento o Decreto Municipal nº 1733/2021 (Curitiba – PR), que dispõe sobre os critérios para implantação dos mecanismos de contenção de cheias no município de Curitiba, deixando em evidência a utilização de reservatórios de detenção para controle na fonte (RCF) nos lotes que impermeabilizaram áreas superiores 25% da área do terreno, e a lei de zoneamento nº 15.511/2019 (Curitiba – PR), que dispõe sobre a divisão do território municipal de Curitiba em eixos, zonas e setores e estabelece critérios de uso e ocupação do solo, com o objetivo de orientar e ordenar o crescimento da cidade.

Assim, decretos complementares apontam que devem estar previstas as medidas estabelecidas no decreto 15.511/2019, que atendem às disposições da Lei Municipal nº 10785, de 18 de setembro de 2003, que cria no Município de Curitiba o Programa de Conservação de Uso Racional de Águas nas Edificações – PURAE, onde determina que para o licenciamento de novas edificações com área superior a 70 m<sup>2</sup> é obrigatório que o projeto das instalações hidráulicas preveja a implantação de mecanismos de captação das águas pluviais nas coberturas das edificações, as quais deverão ser armazenadas para posterior utilização em atividades que não exijam o uso de água tratada (CURITIBA, 2019).

## 4.2 BASE DE DADOS E PROCEDIMENTOS

### 4.2.1 Dados pluviométricos

Durante as simulações foram utilizados dados de precipitação obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os quais se referem ao período de 1º de janeiro de 2008 (01/01/2008) até o dia 31 de dezembro de 2019 (31/12/2019), totalizando 12 anos de dados horários para estação automática de Curitiba (Código A807). A estação está localizada no campus da Universidade Federal do Paraná (O 49° 13''; S 25° 26''), em uma altitude de 922,91 metros acima do nível do mar e está aproximadamente a 2 quilômetros da região do estudo, e encontra-se ainda no bairro Rebouças, que faz parte da área de estudo. Não foram obtidos dados de precipitação sub-horária (minutos) para o município, o que teria sido desejável, especialmente para a análise do funcionamento do RCF

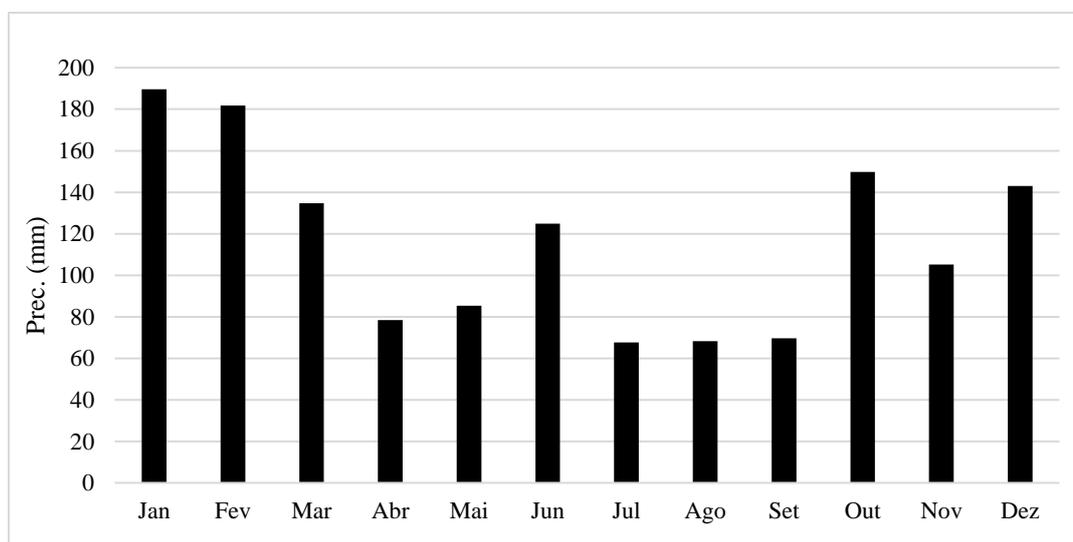
Os dados pluviométricos foram tratados de forma a identificar eventuais inconsistências. Quando da existência de falhas de medição horária, o que ocorreu em apenas 8% dos dados da série, estas falhas foram preenchidas por chuva 0 (zero), seguindo orientações de Perius (2021), que verificou que este procedimento levaria a resultados mais conservadores durante o dimensionamento de RAAC, sem comprometer a qualidade do resultado da simulação.

A partir da série horária, foi obtida uma série de precipitação diária, obtida a partir da acumulação horária, para a simulação do reservatório de aproveitamento de água da chuva (RAAC), visto que esta escala temporal se mostra suficiente para este tipo de dimensionamento (PERIUS, 2021) e reduz o esforço computacional. Assim, duas séries temporais de precipitação foram obtidas: i) uma série de precipitações horária; ii) uma série de precipitação derivada da primeira, com totais diários de precipitação.

A série de precipitação diária foi submetida a uma avaliação de frequência de ocorrência de dias chuvosos, onde se observou alta frequência de dias chuvosos (48%). Esta análise justificou os baixos volumes de RAAC encontrados na simulação, como será discutido nos resultados.

A Figura 10 apresenta a média mensal de pluviosidade da estação A807, no período de estudo, da cidade de Curitiba. A observação da escala mensal dos valores médios da série (Figura 10) mostra como a chuva está distribuída ao longo dos meses, onde se observam as maiores pluviometrias em janeiro (189,6 mm) e fevereiro (181,8 mm), enquanto o período compreendido entre abril (78,4 mm) e setembro (69,7 mm) – excetuado junho – são os menos chuvosos do período analisado, indicando certa sazonalidade.

Figura 10 – Precipitações médias mensais da estação A807 para o período de estudo (2008 – 2019)

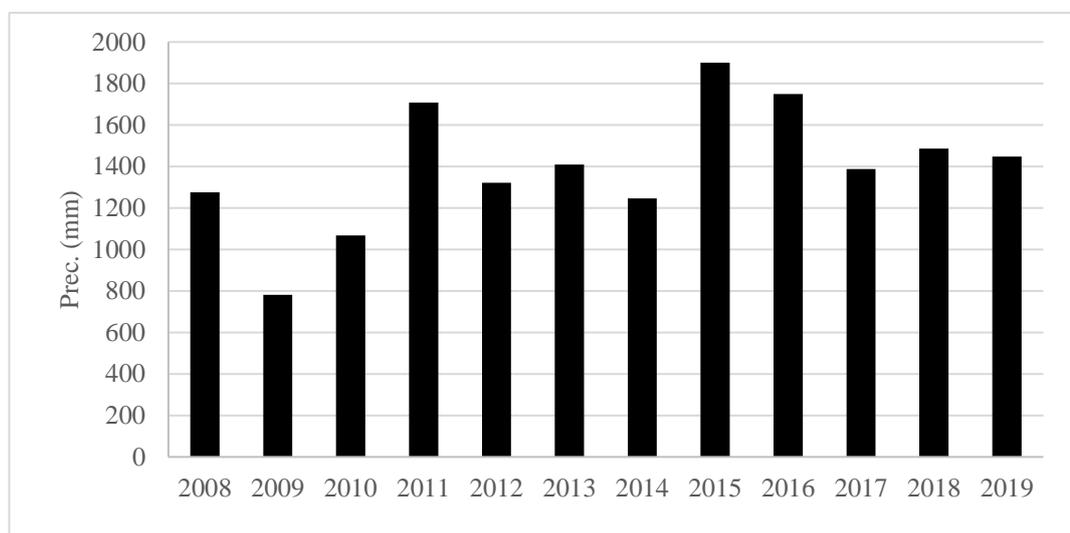


Fonte: Autor (2022)

A Figura 11 apresenta os totais anuais do período, onde é possível verificar que o ano de 2009 teve acumulado de precipitação inferior a 1000 mm, e 2015 foi o ano mais chuvoso com 1900,4 mm. O período da série de dados utilizado totaliza uma média anual de precipitação de 1398,2 mm, pouco inferior à média encontrada por Zolet (2005), que fez uma análise de 23

anos para outras estações pluviométricas de Curitiba, chegando ao valor médio de 1506,5 mm/ano.

Figura 11 - Totais anuais de precipitação para estação A807 no período estudo (2008 – 2019)



Fonte: Autor (2022)

#### 4.2.2 Banco de dados de informações geográficas e processamento

As informações geográficas necessárias ao desenvolvimento da pesquisa foram obtidas junto à Secretaria de Obras do município de Curitiba, Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) e do Instituto das Águas do Paraná. No banco de dados do IPPUC foram encontradas informações de Zoneamento, segundo a lei nº15.155/2019, além de informações geográficas de altimetria com espaçamento de 1 metro, divisa entre bairros, lotes do cadastro técnico, localização de ocupações irregulares, equipamentos urbanos (ruas, terminais de transporte, escolas, creches, unidades de saúde e centros integrados do município), ciclovias, hidrografia e meio ambiente. Todas as informações estão em formato \*.SHP (*shapefile*) e seu Datum de referência é SAD 69. Dentre os dados obtidos, estão as ortofotos, que são datadas de 2003 e tem resolução de 30 centímetros, com Datum de referência SAD 69. Todas essas informações passaram por alteração de seu *Datum*, sendo atualizadas para o SIRGAS 2000/ UTM zone 22 S, como é orientado pelo Sistema Geodésico Brasileiro, através da Resolução 01/2005 do IBGE.

Para cada edificação da área de estudo foi determinado o número de pavimentos existentes, a partir de análise visual do *Google Street View*, e foi realizada a estimativa da

população da região, a partir da base de dados do IBGE (2010), resultando em aproximadamente 3,5 habitantes por edificação. Foi utilizado a plataforma ArcGis para o desenvolvimento de mapas e obtenção de informações geográficas necessárias para a realização do estudo.

Para determinação das áreas de cobertura passíveis de utilização para fins de captação da água pluvial e posterior aproveitamento, foi executada a classificação supervisionada de imagem, onde a ortofoto da região de Curitiba com resolução espacial de 30 centímetros foi classificada usando assinaturas espectrais, obtidas a partir de amostras de treinamento. Mais especificamente, a classificação se deu pelas amostras de telhado, água, asfalto, solo exposto, arborização e grama. Esta classificação permite a identificação de áreas impermeáveis e permeáveis nos lotes, com a separação das superfícies que são potencialmente utilizáveis para a captação da água da chuva para fins de aproveitamento, como é o caso dos telhados.

Devido a sombreamentos oriundos da vegetação arbórea, alguns *pixels* não foram bem representados, tendo a necessidade de um diagnóstico visual mais apurado sobre essas informações. Essas imperfeições foram reclassificadas e as áreas foram reajustadas. Essa classificação detalhada foi realizada em atenção às exigências da NBR 15.527/2019, que orienta para a captação da água da chuva apenas em telhados ou lugares onde não haja a circulação de pessoas ou animais.

Figura 12 – Produto da classificação de imagem para identificação de telhados para área de estudo



Fonte: Autor (2022).

A classificação das imagens também permitiu identificar lotes que se enquadravam na categoria de 25% ou mais de impermeabilização nos lotes, segundo o valor de referência previsto no Decreto Municipal nº 1733/2021. Para isso, realizou-se uma reclassificação da imagem, buscando excluir os lotes que estavam com áreas impermeabilizada inferiores àquela prevista no decreto. Contudo, foi constatado, que os lotes já edificados contavam com impermeabilização superior a 50%, portanto, foi utilizada a área total do lote para o dimensionamento de reservatório de controle na fonte (RCF).

Ademais, foram utilizadas as ferramentas de análise espacial para extrair máscaras das áreas de interesse e delimitar as curvas de nível a partir do modelo digital de elevação; ferramenta de conversão de formato dos arquivos, além de outras conversões de informações como: Excel, GPS, KML, *ShapeFile*, CAD, entre outros; ferramenta de extração “clip” para o destacamento de feições de interesse para um mesmo tipo de arquivo; intersecção de dados para obtenção da área de telhado, arbórea, grama, solo exposto e asfalto para cada lote da região de estudo.

#### 4.3 DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS

### 4.3.1 Dimensionamento dos RAAC por meio de simulação de longo prazo

Para atingir ao objetivo do estudo foi utilizado a NBR 15.527/2019, que especifica os requisitos para aproveitamento da água da chuva coletada de coberturas para fins não potáveis (RAAC), onde a aplicabilidade pode ser para descarga em bacias sanitárias ou mictórios, irrigação para fins paisagísticos, lavagem de veículos e pisos de uso ornamental.

O método da simulação foi utilizado para a determinação do volume de armazenamento necessário para o atendimento à demanda da bacia sanitária (metodologia clássica utilizada para esse fim), com intervalo de tempo diário, conforme a equação 13, sendo o volume disponível para ser captado determinado pela equação 14.

$$S_{(t)} = Q_{(t)} + S_{(t-1)} - D_{(t)} \quad (13)$$

$$Q_{(t)} = C \cdot P_{(t)} \cdot A \quad (14)$$

Sendo:

$S_{(t)}$ : volume de água armazenado no reservatório no tempo 't';

$S_{(t-1)}$ : Volume de água armazenado no reservatório no tempo 't-1';

$D_{(t)}$ : Demanda de água para usos não potáveis ou consumo no tempo 't';

$Q_{(t)}$ : Volume de chuva escoada no tempo 't';

C: Coeficiente de escoamento superficial, usado como 0,95;

$P_{(t)}$ : é a precipitação observada no intervalo de tempo "t";

A: é a área de captação.

No método da simulação é inicialmente definido um volume de reservatório (usualmente considera-se que ele está cheio) e a simulação é realizada a partir da contabilização da entrada (precipitação) e saídas do reservatório (demandas ou vertimentos). O armazenamento máximo possível é o próprio volume útil do reservatório e toda vez que o aporte de água superar a sua capacidade, os volumes excedentes são extravasados.

As simulações foram realizadas para cada edificação compreendida na região selecionada para o estudo, considerando as diferentes áreas de captação que foram determinadas por meio da classificação da ortofoto. Durante a simulação, diferentes volumes incrementais de RAAC foram avaliados através do balanço hídrico de longo prazo, permitindo avaliar as falhas

no atendimento às demandas para as diferentes simulações realizadas, frente à série de precipitações.

Para determinação das séries de demanda, foi considerada apenas a descarga de bacia sanitária como uso não potável no lote, em razão da menor incerteza na estimativa de consumo, visto que os volumes de descarga são normatizados e se tem estimativa de frequência de uso. Outros usos como irrigação e lavagem de superfícies poderiam ter sido considerados, seguindo as diretrizes da NBR 15.527/2019, no entanto, optou-se por não os fazer, em função da alta variabilidade de situações possíveis que poderiam ser utilizados.

A estimativa de consumo de água da chuva para a descarga da bacia sanitária foi determinada conforme Bezerra (2010), que identificou uma frequência de uso de 4 a 6 vezes ao dia por pessoa, com média de consumo de 6,8 a 18 litros de água, dependendo do tipo de descarga. Como as bacias sanitárias mais recentes têm descargas padronizadas de 3 ou 6 litros, e no intuito de uniformizar a informação nas simulações, foi definido um valor de 9 litros por descarga sendo acionada 5 vezes ao dia por pessoa, totalizando 45 litros de água por dia por habitante. Esse valor de 9 litros busca reproduzir o uso de bacias mais antigas, e a possibilidade de perdas.

Assim, para cada edificação, foi criada uma série de demandas diárias para descarga na bacia sanitária, que varia em função da característica da edificação. Para isso, foi estabelecida uma função que relaciona o número de moradores da edificação com as características das mesmas, como o número de pavimentos, e a proporção de área de telhado por habitantes, conforme equações 15 e 16.

$$Hab = \frac{At}{Tx} \cdot \text{residência} \quad (15)$$

$$\text{Sendo } Tx = \frac{\bar{A}}{\bar{P}} \quad (16)$$

sendo:

$Hab$  : Habitantes no lote (hab);

$At$  : área do telhado (m<sup>2</sup>) ;

$Tx$  : Proporção de área de telhado por pessoas (m<sup>2</sup> residência/hab);

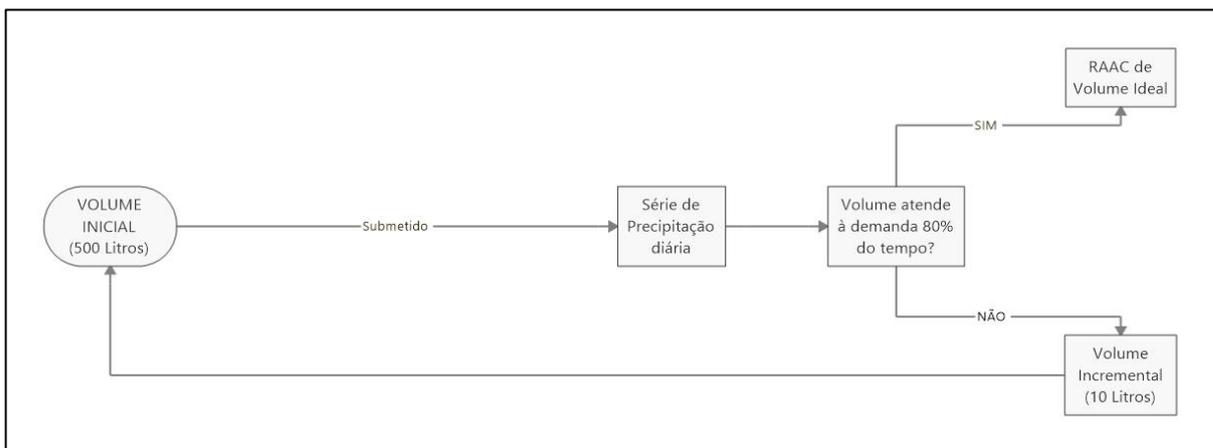
$\bar{A}$  : Média de áreas de telhados da região de estudo (m<sup>2</sup>);

$\bar{P}$  : Média de habitantes por residência (hab/residência) (Segundo IBGE, Censo 2010).

O mínimo volume de reservatório avaliado foi 500 litros como determina o decreto nº1007/2020, e o processo consistiu em avaliar volumes incrementais (10 em 10 litros) de reservação, sendo que o procedimento para cada edificação era dado por encerrado quando simulado um reservatório mínimo que garantia a eficiência pretendida, considerada como 80% neste estudo. A sequência de simulação de cada edificação é apresentada na Figura 13.

Para auxiliar nas simulações de uma grande variedade de configurações na região de estudo, foi desenvolvida uma rotina de programação própria em Python, que permitiu avaliar diferentes volumes de RAAC e determinar a eficiência no atendimento à demanda prevista. Além disso, foi utilizada a ferramenta *Jupyter Notebook*, que funciona em linguagem Python, e é oriunda da infraestrutura Anaconda. A escolha dessas plataformas deve-se às bibliotecas inseridas e seu fácil manuseio e visualização, sendo que foram utilizadas: NumPy para organização de dados de precipitação, área, demanda e temperatura; Xlrd para abertura e leitura de arquivos em formato excel (xlsx); Pandas para a manipulação de informações e criação de banco e análise de dados, tornando possível o acesso individualizado de cada informação vetorial ou matricial utilizada na pesquisa; Tkinter para sinalizações durante a simulação; e Math para arredondar valores flutuantes que em alguns casos são inteiros.

Figura 13 – Modelo conceitual de sequência de simulação



Fonte: Autor (2022)

#### 4.3.2 Dimensionamento dos RCF

Para esta etapa do trabalho, foi determinado o volume do reservatório de detenção na fonte (RCF), a partir do Decreto Municipal nº 1733/2021 de Curitiba, que determina o

dimensionamento do volume necessário para o reservatório de detenção mediante a aplicação da Equação (17):

$$V = K.I.A \quad (17)$$

Sendo:

$V$ : volume do reservatório ( $m^3$ );

$K$ : constante dimensional = 0,20;

$I$ : intensidade da chuva =  $0,080 \text{ m.h}^{-1}$

$A$ : área prevista no § 2º, do artigo 5º, deste decreto.

A vazão de liberação pelos reservatórios dimensionados, não deve ser superior ao valor de vazão de restrição que consta no Plano de Drenagem Urbana de Curitiba, que é de 27 L/(s.ha), sendo o cálculo baseado na área do lote.

#### 4.3.3 Simulação dos RCF operando como RAAC em longo prazo

Nessa análise, os RCF foram submetidos a simulações com a série de precipitação horária, repetindo o procedimento apresentado no item 4.3.1. A função de balanço para determinar as entradas e saídas do reservatório foi a mesma utilizada para o dimensionamento dos RAAC, entretanto, neste caso o volume do RCF já está estabelecido (Decreto Municipal nº 1733/2021) e o intuito desta abordagem foi averiguar as infrações sofridas pelo dispositivo, bem como as falhas no atendimento à demanda.

Durante estas simulações não foram considerados descarregadores de fundo como agentes reguladores do esvaziamento dos RCF, conforme determina o Plano Diretor de Drenagem de Curitiba, uma vez que a pretensão seria a reserva e utilização do volume armazenado para o atendimento das demandas das descargas sanitárias, além de cumprir seu papel no controle do escoamento.

Para averiguar as informações em intervalos compatíveis com o fenômeno que se pretende avaliar, ou seja, infrações às vazões de restrição devido a falhas no sistema do RCF, em intervalos sub-diários, as demandas de água da chuva utilizadas no dimensionamento dos RAAC foram distribuídas durante as 24 horas do dia. Logo as demandas diárias anteriormente de 45 L/(hab.dia), foram substituídas por 1,875 L/(hab.hora)

Toda programação para realizar esse processo foi realizada em Python, e as infrações são indicadas para os intervalos de tempo horário, assim como: valor absoluto da vazão de

extravasamento acima da vazão de restrição, diferença percentual entre a vazão de extravasamento e de restrição, e a contagem do número de infrações de cada lote.

#### **4.3.4 Simulação dos RAAC operando como RCF em longo prazo**

Nesta etapa da pesquisa, os RAAC foram submetidos a uma série de precipitação e demandas horárias, tendo o balanço de massa dos reservatórios pautadas seguindo a metodologia apresentada no item 4.3.1, contudo, o volume dos RAAC já havia sido estabelecido em etapa anterior. Como executado na simulação dos RCF, as demandas diárias foram recalculadas e divididas em 24 horas do dia, descrito no item 4.3.3. O intuito dessa análise foi apontar as infrações à vazão de restrição, especificada no PDDU e os volumes vertidos diante da série contínua de precipitação.

#### **4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE RAAC COMO RCF**

Para auxiliar no processo de análise dos muitos resultados das diferentes simulações, foi realizado um agrupamento de resultados por semelhança. Para tal, foi realizada a análise de clusterização por K-means, ou algoritmo de Lloyd. Assim, os resultados das simulações e as informações de cada edificação foram utilizadas como entrada no processo de agrupamento, buscando identificar os objetos semelhantes dentro de cada grupo.

Para isso, foram utilizados os indicadores de área que contribuem para o enchimento dos RAAC, percentual de atendimento à demanda de cada reservatório de cada lote, volume do RAAC, horas totais de atendimento à demanda simulada, horas totais simuladas de não atendimento à demanda definida, horas totais de extravasamento a partir dos RAAC, totais de horas extravasadas pelo RAAC ou RCF que superaram a vazão de restrição limite determinado pelo PDDU do município, volume mínimo extravasado pelo RAAC ou RCF, volume máximo extravasado pelo RAAC ou RCF, volume médio extravasado pelo RAAC.

Antes da análise de agrupamento todos os dados foram normalizados, para um intervalo entre 0 e 1, utilizando a Biblioteca Pandas. Posteriormente, foi determinado o número ideal de clusters para a amostra de dados das simulações, considerando o método da silhueta e do cotovelo. No método da silhueta busca-se maior coesão dentro do cluster e maior separação entre clusters. A silhueta vai de -1 a 1, onde o maior valor indica que a observação se encaixou mais dentro do cluster e se distanciou dos outros clusters. Se a silhueta for negativa, a configuração do cluster pode ter ou clusters e mais ou clusters de menos. A

silhueta também usa a distância euclidiana para medir a distância entre as observações. O método do cotovelo (Elbow) testa a variância dos dados em relação ao número de clusters, sendo o valor ideal de cluster aquele que apresentar menor distância entre a soma dos quadrados e ao mesmo tempo o menor índice de clusters.

## **5 RESULTADOS**

Este capítulo está dividido em 4 partes, sendo apresentados os resultados dos dimensionamentos dos RAAC para a região de estudo e os extravasamentos resultantes da simulação diária de precipitação.

Se tratando dos RCF, os resultados expostos dissertam sobre o comportamento dos RCF sem um descarregador de fundo e seu atendimento à demanda da bacia sanitária, assim como os extravasamentos ocorridos. Finalmente, o último capítulo demonstra os efeitos da substituição dos RCF pelos RAAC e a resposta da hipótese no atendimento das duas premissas e a possibilidade da utilização como técnica para o controle da geração de escoamento em lotes.

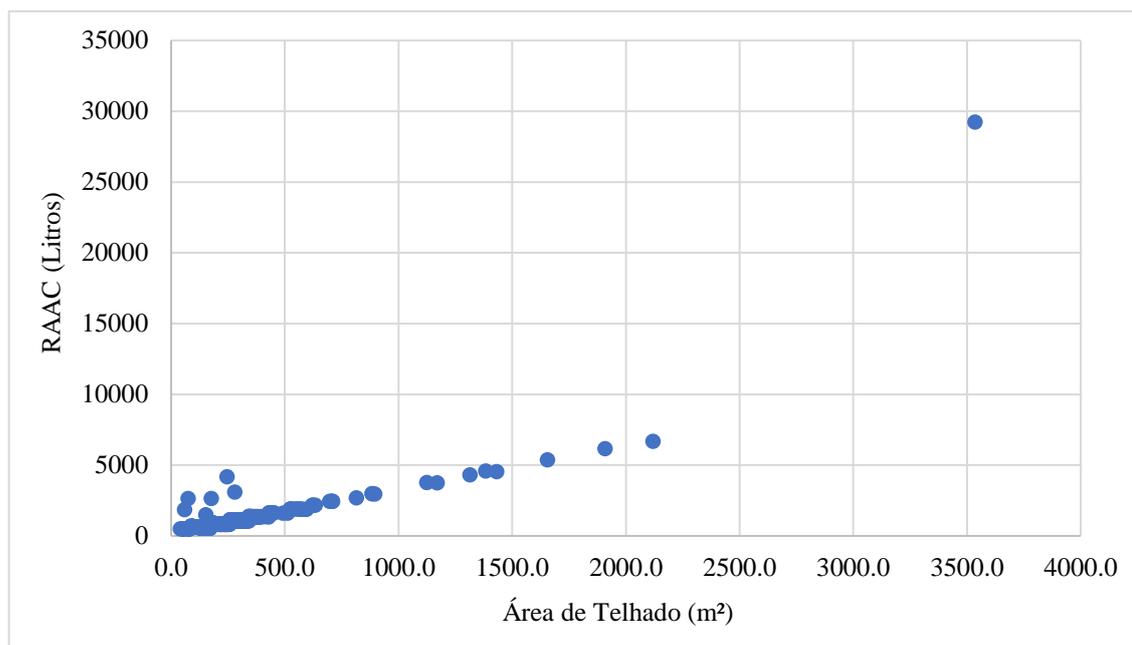
## 5.1 RESERVATÓRIOS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA (RAAC)

Este capítulo apresenta o resultado do dimensionamento dos reservatórios de aproveitamento de água pluvial para as diferentes caracterizações de lotes existentes em uma região do bairro Rebouças, no município de Curitiba-PR, conforme metodologia descrita. Para representar o comportamento dos reservatórios dimensionados da região, foram analisados os volumes obtidos no dimensionamento, assim como os dias em que não houve atendimento à demanda e os volumes vertidos. Para facilitar o entendimento dos resultados obtidos, separou-se este capítulo em três partes: 6.1.1. - Análise da variabilidade dos volumes dos RAAC; 6.1.2 Análise sobre vertimentos dos RAAC; e 6.1.3 Análise sobre condições climáticas que incidiram nos volumes obtidos.

### 5.1.1. Análise da variabilidade dos volumes dos RAAC

De acordo com a metodologia descrita no item 4.3.1, foi possível determinar os volumes dos RAAC para as diferentes caracterizações de área de captação de cada Lote, conforme pode ser observado na Figura 14

Figura 14 - Relação entre área de captação e volume dos RAAC



Fonte: Autor (2022)

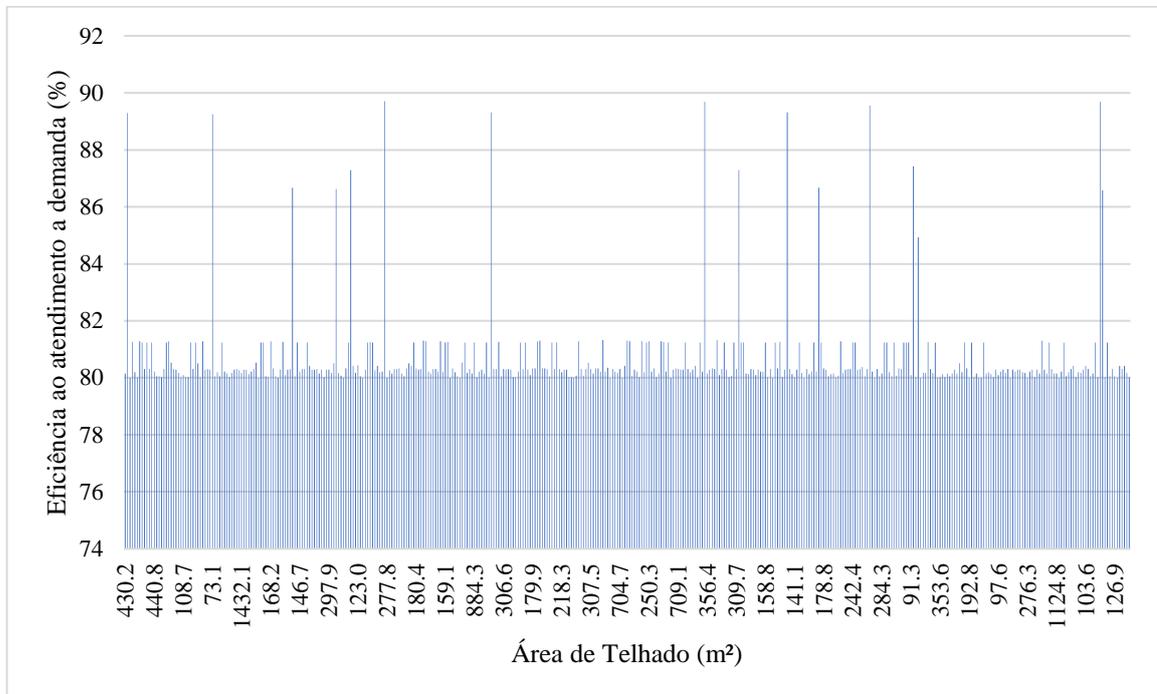
É possível observar na Figura 14 que existe um comportamento linear entre área de captação e os volumes dos RAAC, sendo os volumes mínimos necessários para atendimento da demanda em 80% do tempo. A maioria dos volumes de RAAC foi inferior a 5000 Litros, sugerindo baixo volume necessário para o objetivo pautado. Além disso, é possível observar um RAAC que necessitou de um volume de 29240 Litros para atender a demanda. Esse volume condiz com uma área de captação de 3535,20 m<sup>2</sup>, sendo a área de uma escola com elevada demanda (aproximadamente 70 pessoas) localizada no interior da área de estudo.

Já os volumes mínimos observados são de 500 Litros, sendo uma exigência do decreto 1007 de 2019, que obriga um volume mínimo de reservação de 500 Litros para projetos de edificações habitacionais. No total, 16 Lotes foram contemplados com RAAC de volume mínimo com áreas de captação variando de 40,45 m<sup>2</sup> a 82,40 m<sup>2</sup>. Contudo, observa-se, na Figura 14 que alguns RAAC resultaram em comportamento de dimensionamento que destoou dos demais. A resposta a esse comportamento dos RAAC ocorre em razão dessas edificações serem contempladas com mais de um pavimento, apresentando padrões distintos de dimensionamento (pequena área de captação e elevada demanda).

É importante destacar a eficiência dos RAAC no atendimento à demanda, sendo o percentual mínimo de eficiência encontrado para os RAAC dimensionados na simulação de 80%, o percentual médio de 80,706% e o máximo de 89,708%, como demonstrado na Figura 15. Percentuais acima de 80% são respostas dos volumes mínimos de RAAC (500 Litros) que

são obrigatórios em instalações habitacionais, e resultaram em superdimensionados para as condições de demanda das habitações.

Figura 15 - Histograma de eficiência dos RAAC



Fonte: Autor (2022)

### 5.1.2 Análise sobre vertimentos RAAC

Seguindo a metodologia apresentada no item 4.3.4, avaliou-se a frequência em que os RAAC apresentaram extravasamentos e quantas vezes foram observados vertimentos superiores à vazão de restrição imposta pelo PDDU.

Sendo assim, foi constatado que apenas 2 lotes apresentaram extravasamentos em 3% das horas, sendo RAAC de 2630 Litros e 1850 Litros para área de telhado de 75.31 m<sup>2</sup> e 59.54 m<sup>2</sup> respectivamente. Esses reservatórios correspondem a habitações de mais de dois pavimentos, sendo lotes com a presença de 4 e 3 pavimentos respectivamente. Esses RAAC também demonstram baixa aptidão em ocasionar infrações à vazão de restrição estabelecida no PDDU, sendo que apenas o RAAC de volume 2630 Litros infringiu esse valor durante uma hora, sendo o evento do dia 21/02/2019, onde foi observado uma precipitação de 119.8 mm em 4 horas.

Também foi observado que apenas dois RAAC demonstram extravasamentos em 4% das horas da série. Os volumes dimensionados para esses RAAC são de 2640 e 4170 Litros,

para áreas de captação de 176.35 m<sup>2</sup> e 246 m<sup>2</sup> respectivamente. Esses RAAC, porém, apresentaram extravasamento acima do permitido pelo PDDU em 60 e 26 horas.

Já os RAAC que apresentaram entre 4% e 5% da série em extravasamentos condiz com apenas 5 reservatórios (1,2% dos Lotes), sendo RAAC que apresentam, em média, 34 horas de infração perante o PDDU.

Contudo, 98,3% dos RAAC apresentaram entre 6% e 7% de horas extravasadas, todavia, é importante destacar, que entre esses RAAC foi observado 15 lotes que acabaram não gerando infrações a vazão de restrição. Esses RAAC podem ser observados na Tabela 7.

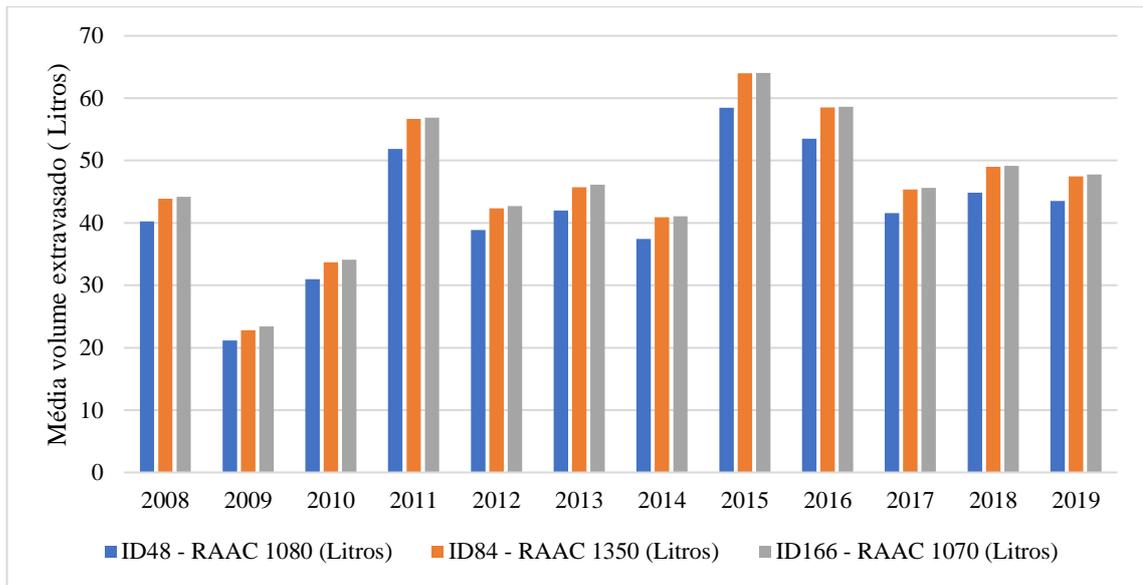
Tabela 7 - RAAC que não demonstraram horas de infração

<b>Área do Telhado (m<sup>2</sup>)</b>	<b>RAAC (Litros)</b>	<b>Horas extravasadas</b>
108,7	620,0	6455,0
92,4	670,0	6041,0
51,2	500,0	6168,0
50,4	500,0	6147,0
54,3	500,0	6299,0
75,2	500,0	6968,0
54,3	500,0	6299,0
51,1	500,0	6166,0
78,0	500,0	7013,0
55,8	500,0	6330,0
40,5	500,0	5595,0
97,6	640,0	6149,0
152,7	540,0	7113,0
50,2	500,0	6141,0
126,9	580,0	6766,0

Fonte: Autor (2022)

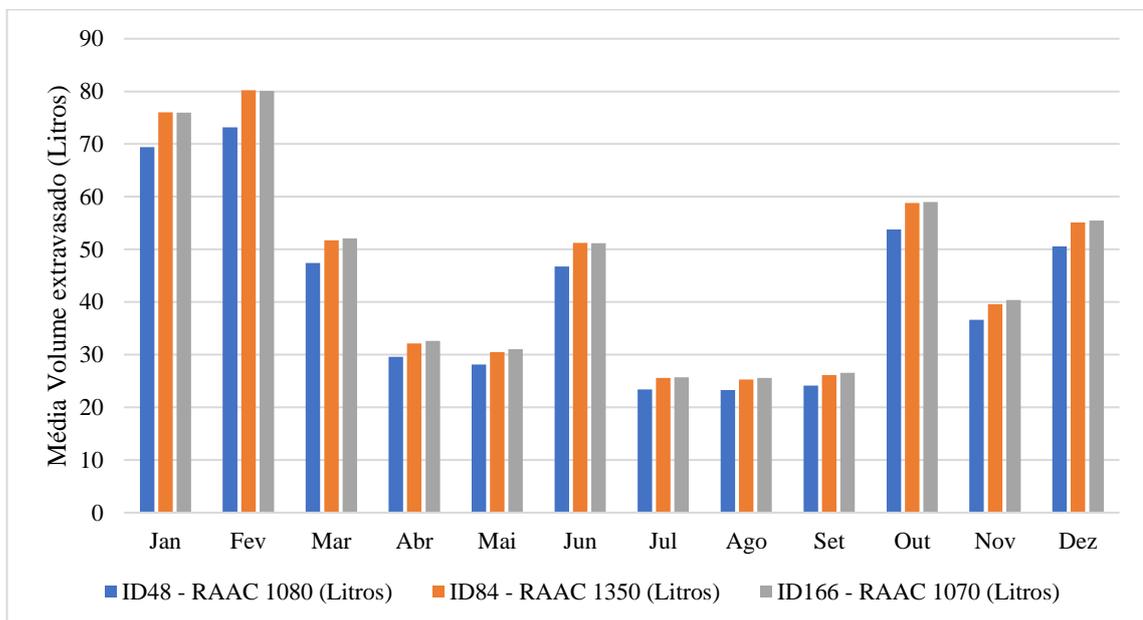
Tendo em vista o número de extravasamentos ocasionados pelas estruturas, o ano de maiores índices de vertimentos, quando analisadas diferentes configurações de área de contribuição, demanda e volume do RAAC, foi o de 2015, que segundo os dados da estação fluviométrica A807, também foi o ano identificado com mais chuvas da série de precipitação. Sendo assim, os meses que ocasionaram maiores extravasamentos da série foram janeiro e fevereiro, para todos os anos, contudo, o ano que demonstrou menores índices de extravasamentos foi 2009, sendo os meses de julho, agosto e setembro como os meses que computaram incidências menores à extravasão como demonstrado na Figura 16 e na Figura 17.

Figura 16 - Média dos volumes extravasados anuais



Fonte: Autor (2022)

Figura 17 - Média dos volumes extravasados mensais



Fonte: Autor (2022)

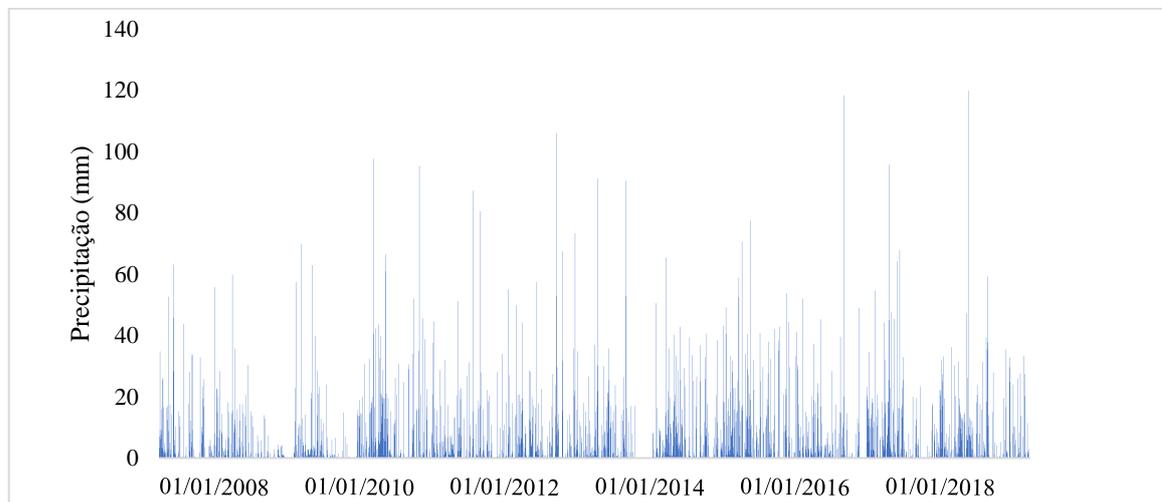
Portanto, as análises de vertimentos demonstram um comportamento de extravasamentos ocasionados pelos RAAC similar a série de precipitação da estação, independentemente das configurações distintas dos reservatórios, demandas ou área de captação, atribuindo muito do comportamento dos RAAC às características de precipitação da

região do estudo, uma vez que a série de chuva demonstrou grande aptidão para a presença de precipitação na localidade.

### 5.1.3 Análise sobre condições climáticas que incidiram nos volumes obtidos.

Tendo em vista os baixos volumes dos reservatórios que foram encontrados na simulação, uma análise mais detalhada sobre as condições de precipitação foi necessária. Inicialmente foi executada uma avaliação para determinar quantos dias sem chuvas foram observados na série. (Figura 18).

Figura 18 - Histograma da estação A807



Fonte: Autor (2022)

Observa-se que houve registro de precipitação em aproximadamente 48% dos dias da série, o que é uma situação confortável para o sistema de RAAC, justificando os baixos volumes encontrados durante a simulação.

Todavia, uma análise no modelo tornou-se necessária para apontar esse comportamento. Para exemplificar uma situação de funcionamento do RAAC para um ano de maior volume de precipitação (2015) e um ano de menor volume precipitado (2009) é apresentado os resultados dos acumulados diários de precipitação na Tabela 8 e na Tabela 9 .

Tabela 8 - Acumulados de precipitação para o ano 2015 (mm)

2015												
DIA	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
1	10,2	0,2	0	0	0	0,2	0	0	0	4,8	4	0,2
2	0,4	0	0	0	0	0,2	0	0,2	0	1	2	15,8
3	0,4	17	0	0,2	0	0	11,8	0	20,6	5,2	0,4	10
4	15,8	40,2	0	0	33,6	0,2	0	0	4,4	2,2	19,4	0,6
5	21,8	18,6	42,8	1,2	0	0,2	0	0	0,4	0	1,6	0,2
6	35,8	6,8	4,8	0	0	0	0	0	0,2	0	13,8	22,8
7	0,8	0	2,6	0	0,2	0,2	4,2	0	0,8	0	0	0,2
8	4,8	20,6	25,6	0	0,2	0	33	0	38,4	0	1,2	0
9	0	0,8	0	0	0	0	0,2	0	2,8	43,2	2,4	0
10	1	0,2	2	0	25,2	0	25,8	0	11,6	18,4	0	11,8
11	19,8	4,4	11	0,2	0	0	5,4	0	6,6	11,8	21,4	0,4
12	0	2,2	0,4	0	1,8	36,8	7,4	0	0	18,2	2,8	14,8
13	0,8	10,2	16	0	0,2	2	9,8	0,2	0	0	0,2	0
14	11,2	33,4	11	0	0,6	1,2	0,2	0	0	0	0,4	0
15	0,4	13,6	0,2	0	1	25	7	0,2	0,2	0	33,4	1,2
16	0	1,6	10	0	0,2	0	0,4	0	0,2	4	0,4	0
17	0	8,2	0,2	2,4	0	0	40,6	0	0	0	7,2	0
18	0	8,2	0	0,8	0,2	7,4	0,2	0,2	0	0	2,2	2
19	8,2	4,2	0	0,4	0	0,8	0	3,6	0,4	0	8,6	15,4
20	10	11,4	0	0,6	0,6	0	0	0	0	0	7,4	25
21	0,8	2,2	4,2	7	0,2	0	17,6	0	0	40,6	0	1
22	0,8	0	0	39,4	0	0,2	0	0,2	0	49,2	31,8	0,4
23	0,4	0	0,2	0,6	0	0	0	6,6	0	0,6	28,2	0,4
24	0	28,6	0	0	0	0	8,4	0,6	0	1,2	9,6	0
25	1,6	3,2	0	0	16,8	0	4	1,2	9,4	1	3,6	58,8

2015												
DIA	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
26	0	4,8	0	0	9,6	0,6	0,2	0	2,4	10,6	0	52,4
27	0	0,4	29,4	0,8	26,6	1,8	0,2	13,4	2,8	0,2	1,6	0,4
28	12	4	6,8	0	0	0,2	0,2	0	3	0	3,6	18,6
29	4		23,4	0,4	0	0,2	0	0	1,4	0,4	1	7,2
30	12		6	0	0	4,4	0	0	3,6	1	22,8	0,8
31	0		0,2		0		0,2	0		15,2		0,4

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9 - Acumulados de precipitação para o ano 2009 (mm)

2009												
Dia	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
1	14,6	0	0,2	0,2	1,6	0	2,2	2,8	0	0	0,2	0
2	59,8	0	0	1	0	0	7,4	1,4	0	0	0	0
3	15,6	6,6	0	0	0	0	0	0	4	0,2	0	11,2
4	0,2	1	0	0	0	0	0	0	3,6	0	0	0,6
5	1,8	0	0	15,2	0,2	0	0	0	0,2	0	0	0,4
6	0	0	0	1,8	0	0	0	0	0,2	0,2	0	0
7	0	17,6	0	0	0	0,2	0	0	0,4	0	1,4	0
8	0	0	13,6	0	7,4	0	0	0,2	4,2	0	3,8	0
9	0	3,6	0	0,2	0,2	0,2	0	0	1,2	0	1,8	0
10	0,4	1,8	0	0	0	14	0	0	0,8	0	0,4	0
11	8,4	12,2	20,6	0	0	0,2	1,6	0	0,8	0	1,6	10,6
12	0	0	10,6	0	1,4	0,4	0	0	0,4	0	0,8	6,2
13	11	0,2	2,2	13,8	5,4	0	0	0	0,8	0	0	0
14	1	0	0	10,2	1,6	0,2	0	0	0,6	0	0	0

2009												
Dia	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
15	35,8	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0	23	0
16	12,6	5,4	0	0,2	0	12,8	0	0	1,2	0	12	0
17	9,6	0,2	0	0	0,2	0	0,2	0	1,2	0,2	0	69,8
18	0	0	0,2	0	0	0,2	0	2,8	0,6	0	0	1,6
19	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0	4,4	0
20	0,4	0	0,6	0	0	0	0	0,2	0,6	0	57,4	0
21	0	17,4	30,4	0	0,2	0,2	0	4,4	0,6	0	0	0
22	0	0,4	0	0,4	0	0,2	0	2,6	0,2	0	2,2	13
23	0	0	0	0,2	0	0,4	0	0,8	0,2	0	0,2	0
24	0,4	0,4	0	0	0	2,2	0	0,8	0,2	0	0,2	4
25	0	1,4	0	0,2	5,8	0,2	0,4	1	0	0	0	0,6
26	2,8	14,6	0	0	1,8	0	0	0,2	0	0,2	0	4,2
27	15,8	4	0	0	0,6	0,2	0	0	0	0	0,4	5,2
28	1,2	0,2	5	0	0	0	0,2	0	0	0	10	0,6
29	2,2		0,2	0,2	0	0	0	0,2	0	0	7,4	0,2
30	0		0	0	0	0,8	0	0	0	0,2	0,6	0
31	0		0		2		0	0,2		0,2		2

Fonte: Autor (2022)

O ano de 2015 apresentou 139 dias sem precipitação, tendo um acumulado de 1900 mm e uma média de precipitação diária de 5,20 mm. Já o ano de 2009 apresentou 200 dias sem precipitação, sendo o volume acumulado de 781 mm e uma média diária de 2,14 mm. A Tabela 10 demonstra os valores resultantes das simulações paralelas para o ano de 2015 e 2009.

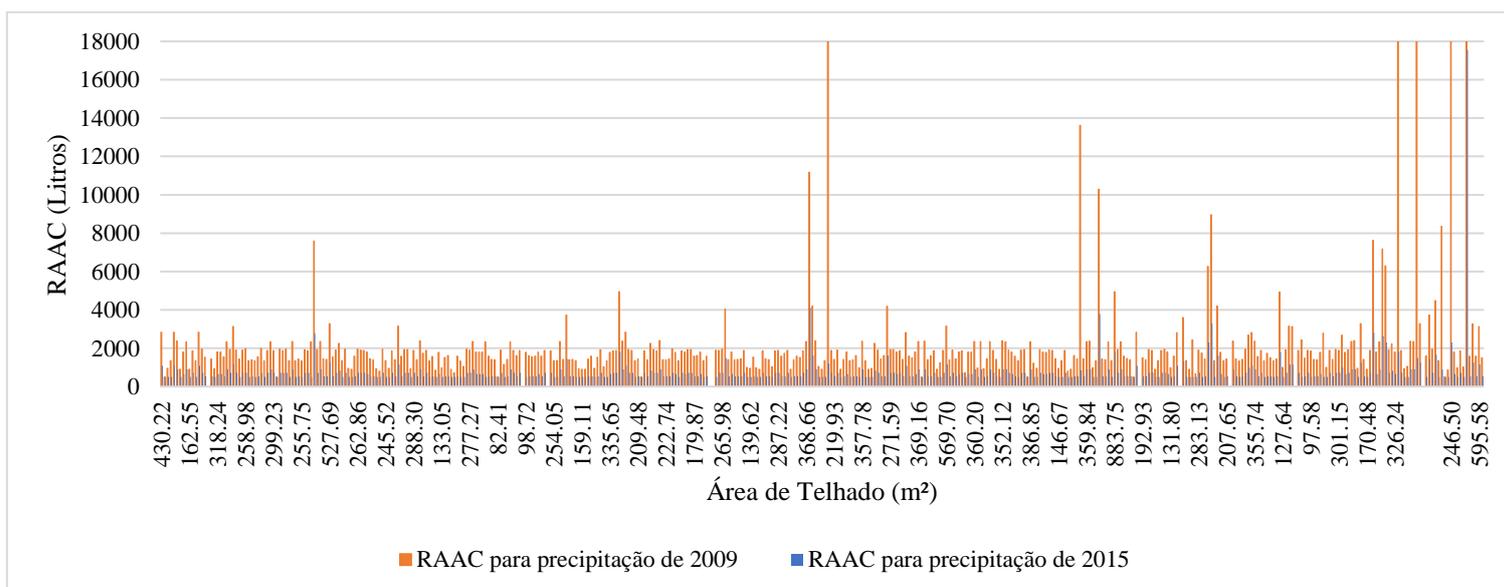
Tabela 10 - Comparativo dos volumes dos RAAC Dimensionados

	2015	2009
<b>Mínimo</b>	500	500
<b>1st Qu</b>	500	1400
<b>Mediana</b>	540	1790
<b>Média</b>	768	2353
<b>3rd Qu</b>	720	1940
<b>Max</b>	17560	100490

Fonte: Autor (2022)

Logo, com a intenção de demonstrar a sensibilidade do modelo em diferentes precipitações, a Figura 19 aponta as diferenças de volumes entre os reservatórios simulados nos anos de maior e menor precipitação, ilustrando o impacto da precipitação no cálculo de dimensionamento dos RAAC.

Figura 19 - Comparativo dos volumes para os reservatórios simulados em diferentes anos



Fonte: Autor (2022)

Portanto, baseado na premissa que o reservatório tem o induto de atender a demanda 80% do tempo, o modelo demonstrou grande sensibilidade a diferentes regimes pluviométricos quando se altera o volume buscando a eficiência do reservatório. Outros autores, quando executada a análise de eficiência, utilizavam volumes comerciais como base para testar a eficiência dos reservatórios, chegando a diferentes valores de eficiência conforme o volume comercial testado. A exemplo, cita-se Perius (2021), Alves (2013) e Hentges (2013). Contudo, Sousa (2017) demonstrou a não eficácia na padronização dos volumes dos reservatórios em regimes de precipitação distintas, assim como o cálculo de dimensionamento. Salienta-se que essa análise tem intuito de exemplificar o impacto no dimensionamento dos RAAC e os resultados aqui expostos e não interferem no restante dos itens.

## 5.2 RESERVATÓRIOS DE CONTROLE NA FONTE – RCF

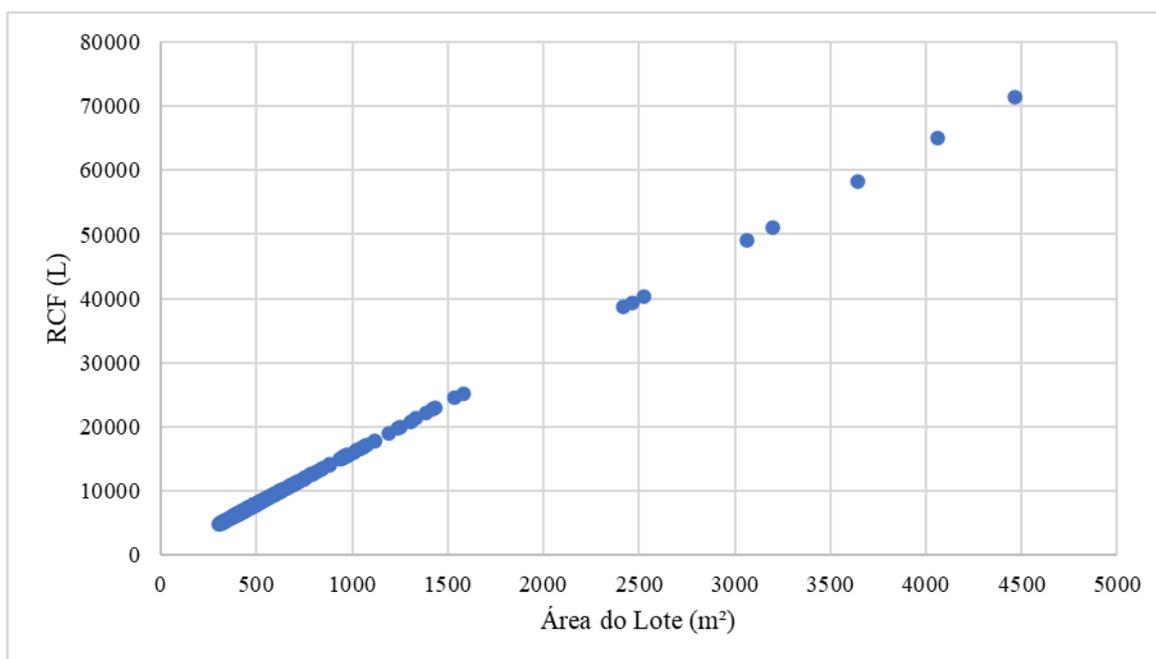
Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações dos RCF dimensionados a partir da equação proposto para o município de Curitiba, submetidos a uma série de precipitação horária.

### 5.2.1 Volumes dos RCF

Os volumes dos RCF foram dimensionados segundo a normativa do Decreto nº 1733/2021, a partir de um coeficiente K e a área impermeável do Lote da edificação, além de um fator de intensidade pluviográfica.

O dimensionamento dos RCF seguiu uma linearidade baseada em uma constante de dimensionamento (K) e um fator de intensidade pluviográfica (I), como citado anteriormente, além do valor em metros quadrados do lote (A), onde essa é a variável determinante nos volumes obtidos. Os resultados podem ser observados na Figura 20, onde, variando-se o a área do lote, varia-se o volume do reservatório.

Figura 20 – Relação dos Volumes dimensionados dos RCF e a área de lote

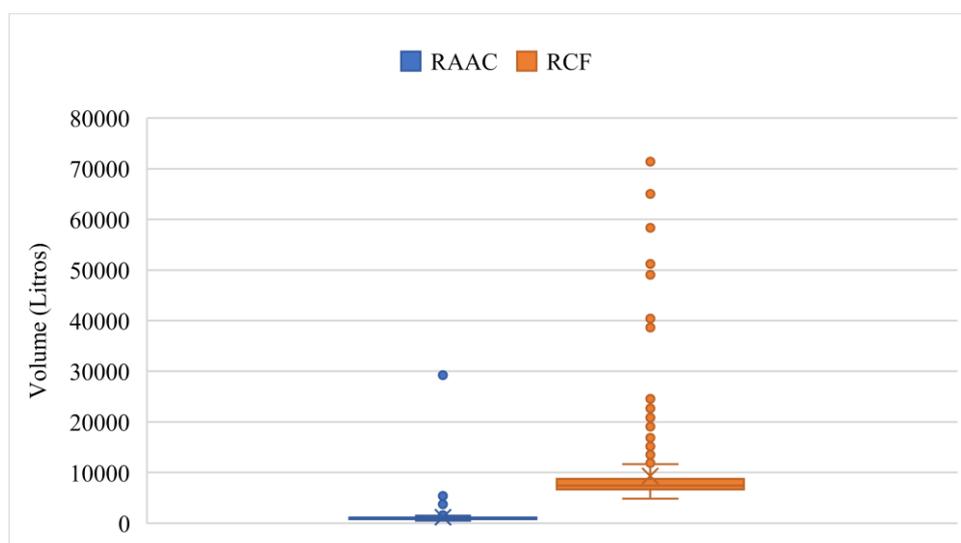


Fonte: Autor (2022)

Os RCF dimensionados foram em média de 10000 Litros, com o menor volume dimensionado de RCF de 4848 Litros e o maior RCF de 71000 Litros. Em comparação com os RAAC, observou-se que os RCF são 87% maiores em média, sendo volumes necessariamente grandes para demandas da bacia sanitária. Conforme é demonstrado na Figura 21, pode-se observar que apenas um RAAC teve o volume, em questão de dimensões, similar aos RCF. Esse RAAC condiz com um reservatório situado numa escola, com grandes dimensões, contudo os RCF dimensionado para essa escola é 60% maior que o RAAC.

Seguindo o decreto do município de Curitiba, observa-se uma linearidade nas condições de dimensionamento das estruturas de controle. Esse comportamento é condizente com a linearidade das variáveis da equação proposta, uma vez que leva em consideração somente a área do lote, assim como fator pluviométrico da região em conjunto com uma constante dimensional, que acaba por generalizar as estruturas quando executada uma análise regional.

Figura 21 - BoxPlot dos volumes dos RAACs e RCFs



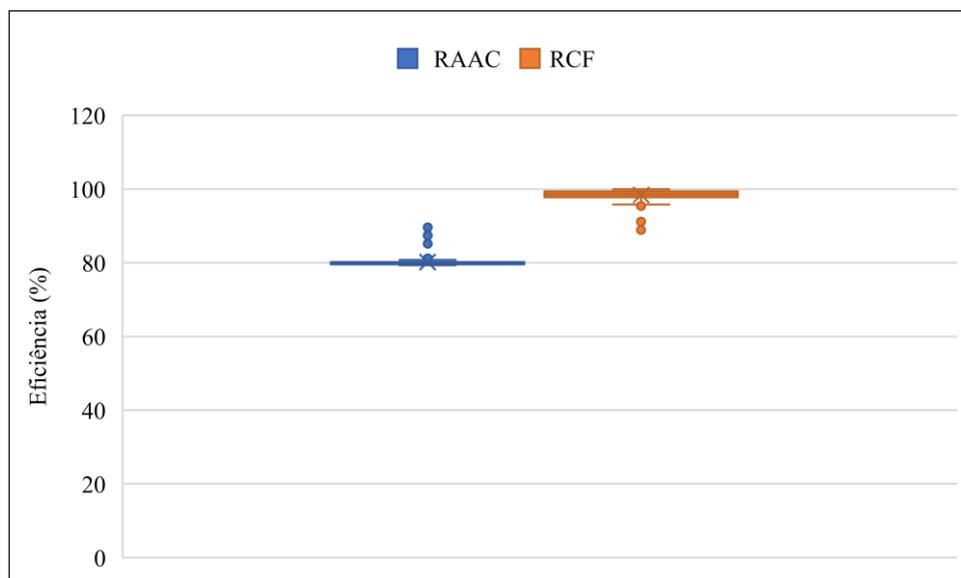
Fonte: Autor (2022)

### 5.2.2 Eficiência dos RCF

Neste subitem, apresenta-se a eficiência dos RCF operando no lugar dos RAAC e as implicações ao atendimento a demanda ocasionado por essa substituição, sendo executada uma comparação breve entre os mecanismos.

Portanto, em questão de eficiência, os parâmetros do reservatório, que correspondem a satisfação dos volumes necessários na utilização da bacia sanitária, mostrou-se capaz a atender as necessidades impostas, em comparação com os RAAC, para a mesma série de precipitação, como demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Eficiência dos RCF em comparação com os RAAC



Fonte: Autor (2022)

Observa-se, na Figura 22 que a média de eficiência para os RCF da série é de 98,42%. O valor mínimo observado foi de 88,86% e o máximo foi 100% das horas da série atendidas. Portanto os RCF garantem uma maior confiabilidade que os 80% dos volumes dimensionados dos RAAC, pois são de dimensões maiores, sendo superestimados para o uso de mecanismo de aproveitamento de água da chuva.

### 5.2.3 Análise dos vertimentos dos RCF

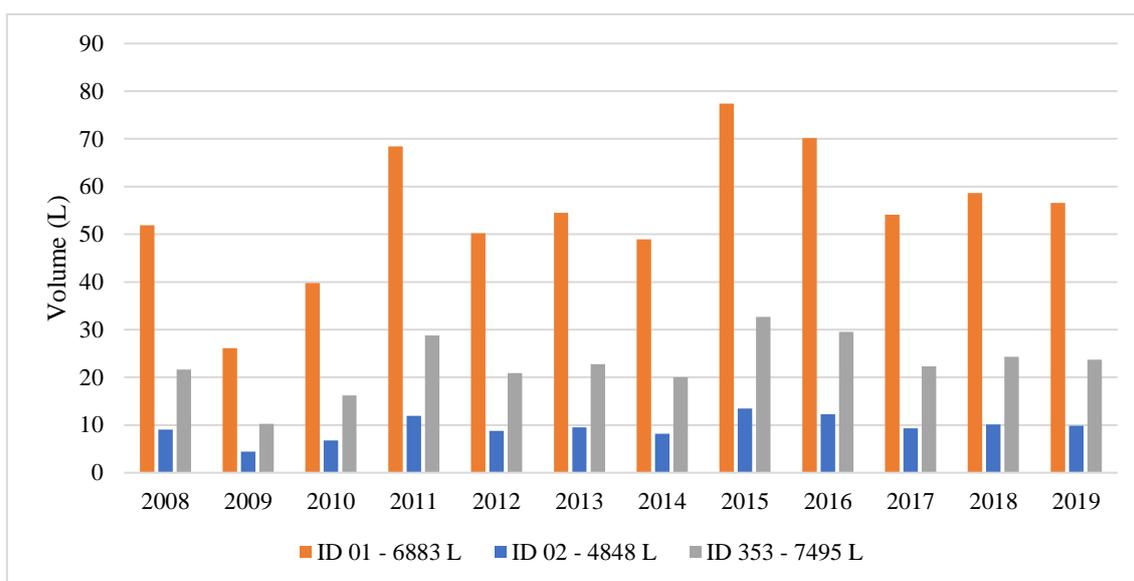
Para análise de vertimentos dos RCF, considerou-se o resultado do intervalo de tempo de simulação horária. O balanço de massa é executado conforme a metodologia descrita no item 4.3.3 não considerando um descarregador de fundo. Sendo assim, foram avaliados os vertimentos e as infrações aos limites do PDDU do município, bem como os volumes extravasados.

A maioria dos RCF (61,6%) extravasou seu volume máximo apenas 6% das horas da série, correspondendo aproximadamente a 275 dias de vertimentos, sendo reservatórios de 8.000 Litros de capacidade, em média. Já 34,6% dos RCF demonstraram 7% de horas vertidas, sendo os reservatórios de mais horas vertidas na série, caracterizados como reservatórios com capacidade de armazenamento de 11.000 Litros, e áreas grande de contribuição. Contudo, apenas 3,63% dos RCF demonstraram uma

porcentagem inferior de horas vertidas, tratando-se de reservatórios de grande capacidade de armazenamento (13.000 L) e baixa área de contribuição.

Já em uma análise individual dos RCF, foi constatado que o ano que apresentou maiores índices de vertimentos foi 2015 e o ano que apresentou menor volume extravasados foi 2009, mesmo para estruturas RCF instalados em diferentes edificações, como demonstrado na Figura 23.

Figura 23 - Volumes médios anuais vertidos pelos RCF



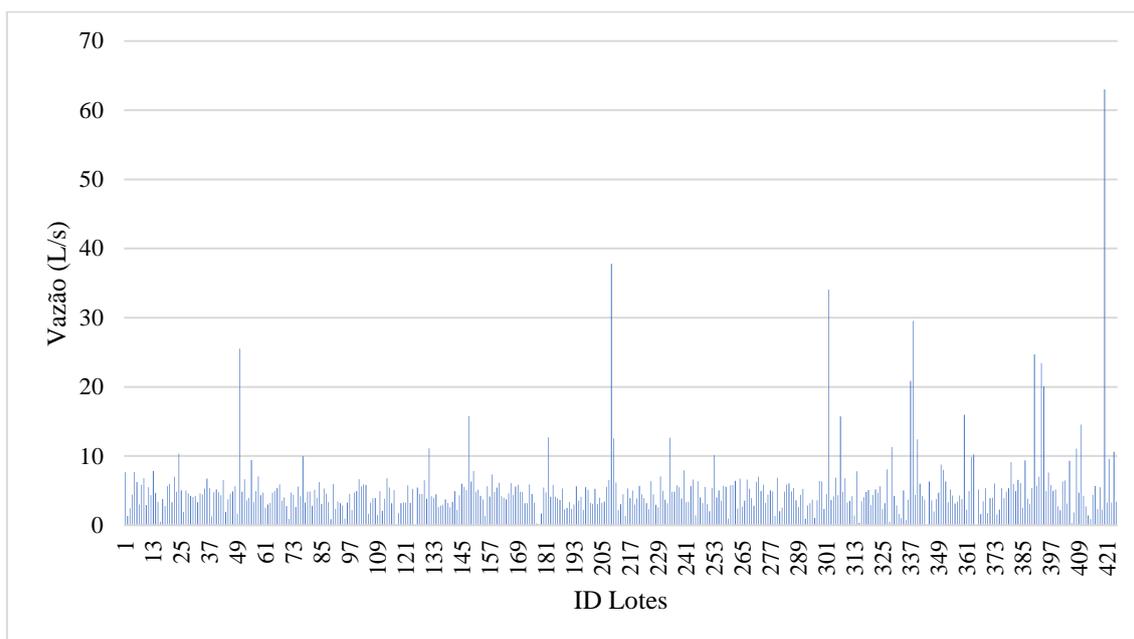
Fonte: Autor (2022)

Fevereiro foi o mês com maior volume extravasado em 2015, já o mês que apresentou menores volumes vertidos foi agosto. Para o ano de 2009, janeiro apresentou maiores volumes de vertimentos e os meses de maio, agosto, setembro e outubro não apresentaram volumes extravasados.

Em questão de vazão que burlou as restrições, verificou-se que em média os RCFs resultaram em aproximadamente 73 horas de extravasamento com a vazão acima da vazão de restrição, e um máximo de 255 horas. Alguns RCF não apresentaram infrações na vazão de restrição.

Na Figura 24 é possível observar que houve diferenças significativas nas vazões máximas extravasadas pelos RCF, sendo a maior vazão observada correspondente a 63,02 L/s, sendo contribuição oriunda de um telhado de 3535 m<sup>2</sup>. Já a menor vazão extravasada representa à vazão de uma área de um telhado de contribuição de 50,5 m<sup>2</sup>.

Figura 24 - Vazões máximas vertidas pelos RCF



Fonte: Autor (2022)

### 5.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DOS RCF PELOS RAAC

Nesta etapa dos resultados, foi necessário realizar uma análise de agrupamentos dos RAAC, contando com suas eficiências ao atendimento a demanda, horas extravasadas e infrações à vazão de restrição, isso em razão das características obtidas serem únicas. Então, primeiramente será apresentado a análise de agrupamento dos lotes e, em seguida, quais grupos demonstraram maior aptidão na substituição dos RCF pelos RAAC. Salienta-se que as simulações executadas para esse capítulo são de base horária.

#### 5.3.1 Análise de agrupamento

Primeiramente, foi necessário executar a normalização dos resultados obtidos, uma vez que os valores observados dispunham de grandezas diferentes, influenciando significativamente na alocação dos grupos. Os valores normalizados ficaram no intervalo de 0 a 1, possibilitando a execução do agrupamento. Posteriormente, os valores normalizados foram submetidos a duas análises, sendo elas: análise do cotovelo e análise da silhueta, as quais determinam o número ideal de grupos, ou clusters, para o conjunto de dados.

Segundo a análise do cotovelo, foi identificado um número ideal de 6 grupos. O método do cotovelo tem como premissa que no ponto onde não apresentar menor distância entre a soma dos quadrados (WSS) e ao mesmo tempo o menor índice de clusters, será o número de grupos ideal para a população observada. Consequentemente, o conjunto de dados foi dividido em 6 grupos, e a partir da clusterização por K-Means, foi possível determinar a quais grupos cada lote pertencia.

Portante, o grupo 0 tem uma população de 101 indivíduos, representando 24% dos lotes da região, que apresentam área de telhado em média de 335 m<sup>2</sup>, uma otimização do uso da bacia sanitária de 79,84% do tempo, volume dos RAAC simulados em média de 1198 Litros, horas extravasadas totais de 7101,75 horas (7%) e vertimentos que superaram o permitido pelo PDDU em 119 horas.

O grupo 01 tem uma população de 120 indivíduos, representando 29% dos lotes da região, que demonstraram uma média de áreas de telhado de 155,32 m<sup>2</sup>, com apenas algumas áreas com características destoantes a do grupo. Otimização de 81%, volume dos RAAC de 723,5 Litros e horas de extravasamento em 6775 horas, sendo apenas 16 horas de infração, onde as horas extravasadas que ficaram abaixo da média do grupo, se trata dos locais que possuem mais de 1 pavimento ou tem áreas dos lotes muito superiores a área construída do lote.

O grupo 02 tem uma população de 11 indivíduos, representando 3% dos lotes da região, que atendem pelo grupo onde a população comporta as maiores áreas de telhado da análise, sendo em média, telhados de 1428,25 m<sup>2</sup>, com otimização de 80,12% e volumes dos RAAC de 6200 Litros, ficando apenas um reservatório com volume de armazenamento de 29,24 m<sup>3</sup>. Já em questão dos extravasamentos, apenas o RAAC de 29,24 m<sup>3</sup> acabou apresentando um comportamento inferior ao do grupo, com um total de 5828 (5,5%) horas extravasadas, diferentemente do seu grupo, que teve como média 7305,18 horas extravasadas (7%). No número de infrações, o grupo 02 demonstrou média de infrações por volta de 73 horas.

O grupo 03 contém 2 indivíduos, representando apenas 0,48% dos lotes da região, tendo área de captação de 75,31m<sup>2</sup> e 59,55m<sup>2</sup>, com atendimento a demanda de 81,18% e volume dos RAAC de 2630 e 1850 Litros, respectivamente. O grupo demonstrou apenas 3% de horas extravasadas e apenas 1 hora de infração a vazão de restrição.

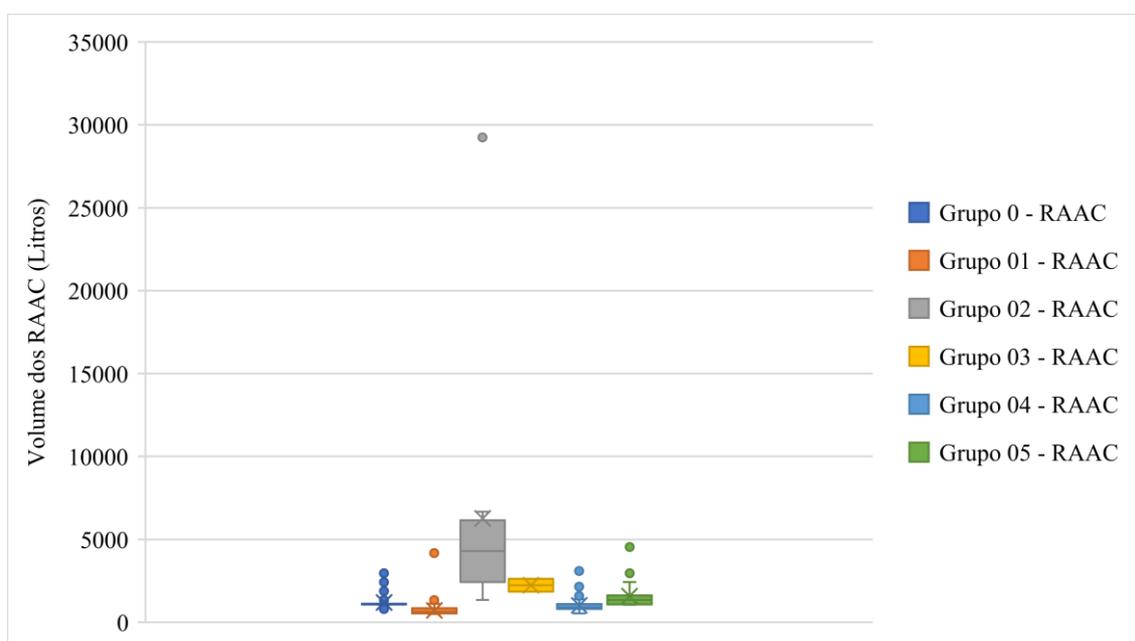
O grupo 04, é o maior grupo observado pela análise, contendo 152 lotes, representando 37% dos lotes da região. Em sua grande maioria, apresentou, em média, área de telhado de 267,67 m<sup>2</sup>, atendimento a demanda de 79,83% e a média de volume

dos RAAC de 1028 litros. Foi observado para esse grupo, 6,7% da série em extravasamentos, sendo, em média, 61 horas de infrações a vazão de restrição imposta pelo PDDU.

Finalmente, o grupo 05 contém 29 lotes em sua população, representando 7% dos lotes da região, com média das áreas de telhado de 456 m<sup>2</sup>, otimização de 79,88%, média de volumes dos RAAC para essa população de 1579 Litros e uma média de vertimentos de 7142 horas (6,7 %) e 198 horas de infração à vazão de restrição, sendo o grupo que mais infringiu as recomendações do PDDU de Curitiba.

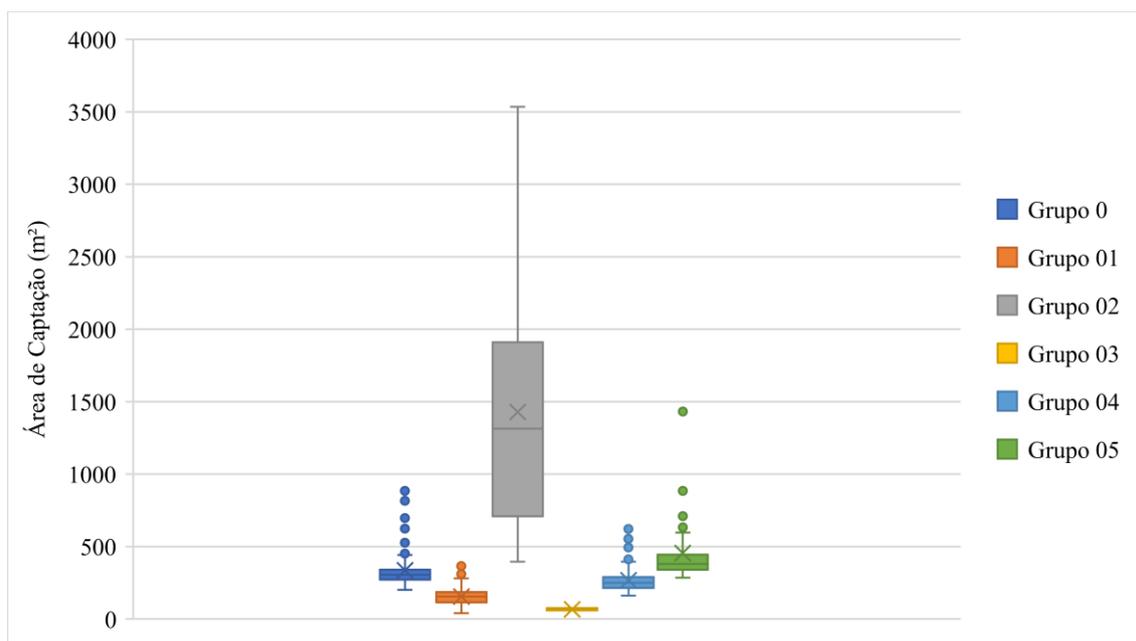
As Figuras 25 e 26, apresentam os volumes dos RAAC para cada grupo e suas áreas de telhado.

Figura 25 - BoxPlot dos volumes do RAAC de cada Grupo



Fonte: Autor (2022)

Figura 26 - BoxPlot das áreas de contribuição de cada grupo



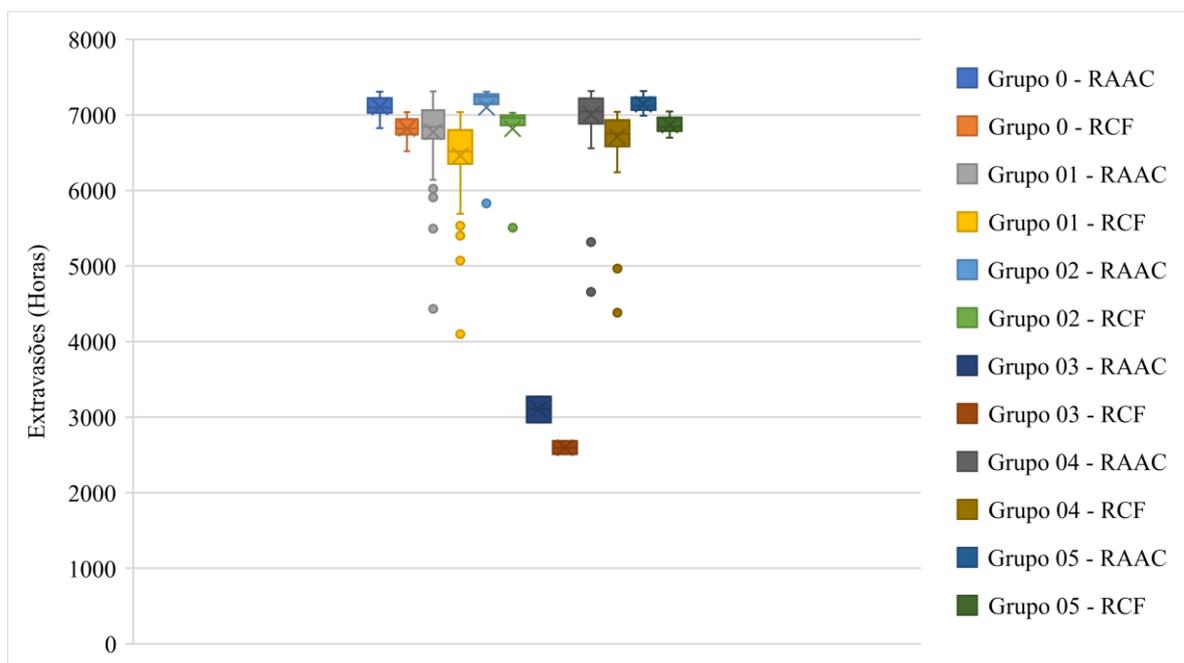
Fonte: Autor (2022)

### 5.3.2 Substituição dos RCF pelos RAAC

Esta etapa apresenta a comparação das características de extravasamento e horas de infrações à vazão de restrição dos RAAC aos RCF quando esses são submetidos a mesma série de precipitação, contribuição e demandas, levando em consideração o agrupamento que foi demonstrado anteriormente.

Sendo assim, foi executada a análise de BoxPlot, a fim de demonstrar comparativamente as diferenças nas horas extravasadas e infrações a vazão de restrição ocasionadas pelos RAAC em substituição aos RCF, como demonstrada na Figura 27.

Figura 27 – BoxPlot das horas extravasadas entre os grupos



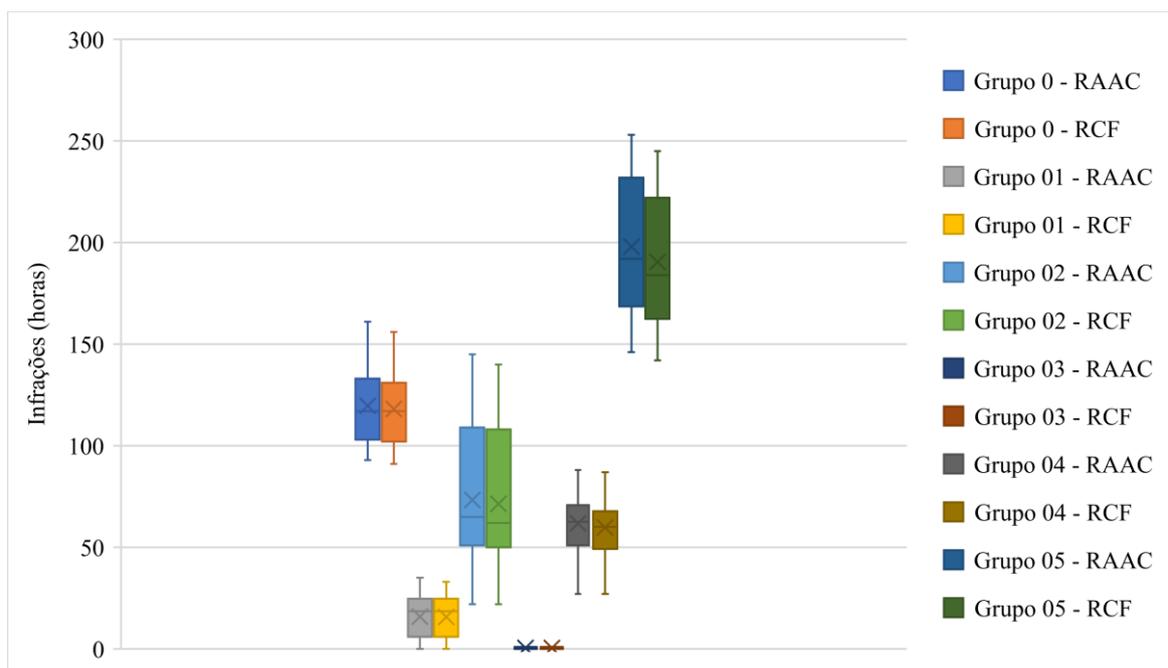
Fonte: Autor (2022)

Observa-se na Figura 27 que não houve diferenças expressivas em extravasamentos, quando efetuada a substituição dos RCF pelos RAAC. Para os grupos G0, G02, G04 e G05, constatou-se que houve um acréscimo de horas vertidas de 3,98%; 3,99%; 4,21% e 3,83% respectivamente, quando executada a substituição de um mecanismo pelo outro.

O grupo que apresentou maior diferença em horas vertidas foi o Grupo 03, que detectou um acréscimo de horas extravasadas de 16,25%, quando o RAAC opera como mecanismo atenuante. O grupo 01 demonstrou 4,64% de acréscimo em horas vertidas.

Assim, em uma observação geral do comportamento dos extravasamentos das estruturas, verifica-se que, em média, houve 13 dias a mais de extravasamento quando realizada a substituição de um RCF por um RAAC. Esse comportamento também pode ser observado nas avaliações das horas onde foi registrada infrações à vazão de restrição, (Figura 28).

Figura 28 - BoxPlot das horas de infrações dos RAACs e RCFs



Fonte: Autor (2022)

Desta forma, verifica-se que o grupo 0 não demonstrou diferenças marcadas quando efetivada a substituição de um RCF para um RAAC, tendo apenas 1,38% de infrações a mais que a estrutura do Decreto Municipal nº 1733/2021, com o valor mínimo de 93 horas para os RAAC e 91 para os RCF. Em questão de horas máximas de infração, a análise demonstrou que o grupo 0 apresentou 161 horas de infrações nos RAAC e 156 horas de infrações nos RCF.

Para o grupo 01, constatou-se baixa tendência em infringir a vazão de restrição, tendo o mesmo comportamento em ambas as estruturas, identificando apenas 1% de acréscimo em horas de infrações quando existe a substituição de um RCF por um RAAC. A diferença em valores máximos de horas de infração entre as estruturas totaliza 2 horas, sendo 35 horas para os RAAC e 33 horas para os RCF. Em se tratando de horas mínimas de infração, ambas as estruturas identificaram lotes em que não ocorreu infração à vazão de restrição (15 Lotes).

O grupo 02, apresentou diferença de 2,68% quando executada a substituição das estruturas, mesmo sendo o grupo de maiores áreas de contribuição, não demonstrando diferenças importantes nas horas de infração à vazão de restrição. Já o grupo 03 mostrou o mesmo comportamento para ambas as estruturas, sendo caracterizado como o grupo de melhor rendimento quando executada a utilização dos RAAC ou RCF.

O grupo 04 demonstrou média de 61 horas de infração pelos RAAC e 59 horas pelos RCF, sendo 3,57% superior uma estrutura à outra. O valor mínimo observado de infrações foi de 27 horas tanto para os RAAC quanto para os RCF, tendo apenas diferença nas infrações médias e máximas, onde em máximas horas observadas os RCF apresentaram apenas 1 hora de infração inferior aos RAAC.

Já o grupo 05, demonstrou maiores horas de infração à vazão de restrição, sendo em média, 198 horas para os RAAC e 190 para os RCF. O grupo também demonstrou maior diferença de infrações entre as estruturas, sendo 3,91% superior ao número de horas infracionadas pelos RAAC em comparação aos RCF.

Em questões de comparação, não é observado que existe redução em horas extravasadas, quando realizada a substituição de mecanismo de reservação, mesmo considerando infrações à vazão de restrição.

Muito deste comportamento pode estar atrelado à série de precipitação da cidade de Curitiba, que não contém uma sazonalidade marcada e é responsável pelos volumes obtidos no dimensionamento dos RAAC.

Portanto, mesmo sendo mantidas as demandas e as áreas de captação, se fosse submetido a uma série de precipitação de outra região, com sazonalidade presente, demonstraria volumes de RAAC superiores, podendo apresentar desempenho superior aos RCF quando instalado como mecanismo de controle de escoamento. Perius (2021) aponta que precipitações, em municípios localizados ao norte do país, carregam sazonalidade e os RAAC que tem maior efetividade ao atendimento a demanda, são os de maiores volumes.

Consequentemente, a presença da chuva constante em Curitiba, influência diretamente na eficiência dos RAAC como mecanismo de aproveitamento de água da chuva, dimensionando volumes baixos para as necessidades desempenhadas, e como estrutura de controle de escoamento pluvial. Portanto, avaliando somente as horas onde houve extravasamento das estruturas e as horas em que foi observada infração, não foram constatadas diferenças marcadas quando realizada a substituição de um RCF por um RAAC; contudo, quando observados os volumes extravasados nesses períodos, observa-se grande diferença, como pode ser verificado na Tabela 11, na exemplificação para alguns lotes.

Tabela 11 - Demonstração dos volumes totais da série de precipitação em extravasamentos por algumas estruturas

<b>Grupo</b>	<b>Área de Captação (m<sup>2</sup>)</b>	<b>RCF (Litros)</b>	<b>RAAC (Litros)</b>	<b>Total Extravasado RAAC (Litros)</b>	<b>Total Extravasado RCF (Litros)</b>	<b>Diferença RAAC - RCF (Litros)</b>
0	895	22.197	2.960	12.600.401	12.203.776	396.625
1	168	6.613	540	2.382.857	2.308.039	74.818
2	1384	39.375	4.570	19.473.029	18.844.367	628.662
4	160	6.020	540	2.251.908	2.176.523	75.386
5	285	5.415	1.080	3.936.422	3.803.143	133.280

Fonte: Autor (2022)

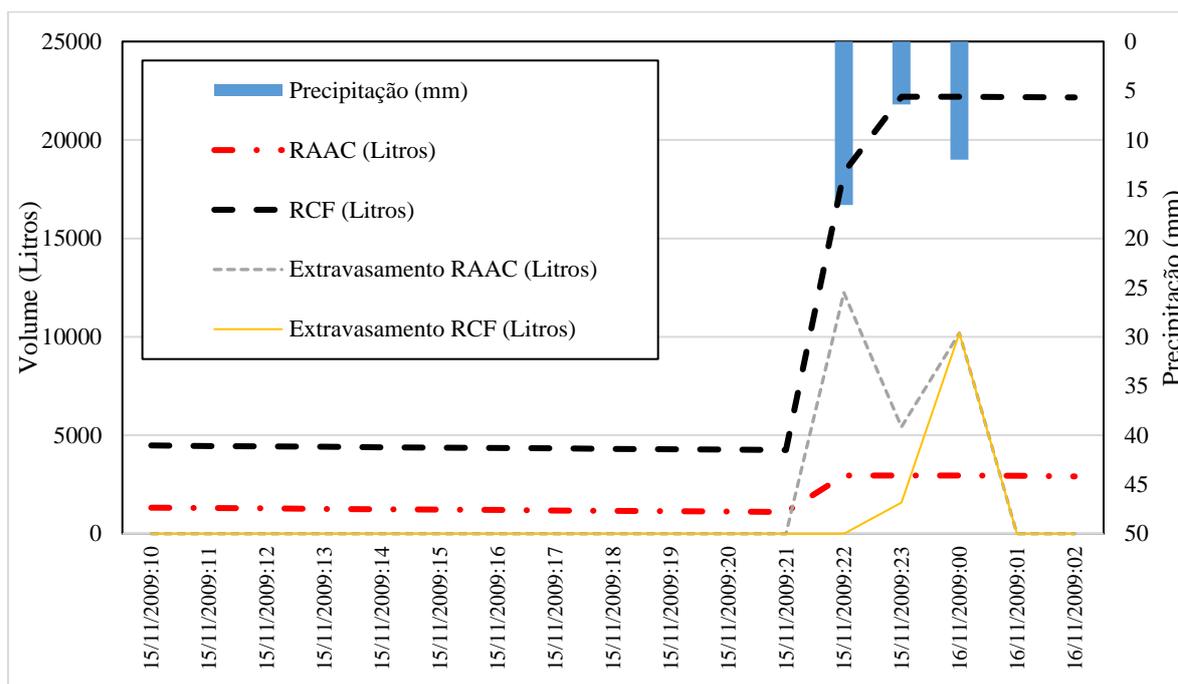
Logo, é observado na Tabela 11, que existe diferenças marcadas nos volumes extravasados totais pelas diferentes estruturas, onde, em alguns casos, constata-se diferenças de volumes entre 100 m<sup>3</sup> e 500 m<sup>3</sup> de água direcionado para a rede de drenagem, não amortecidos pelos RAACs.

Um exemplo de avaliação necessária antes de ser realizada a substituição de um reservatório pelo outro é a verificação das precipitações e dos volumes vertidos pelos reservatórios, visto que em Curitiba, devido às chuvas recorrentes, os reservatórios tendem a ter pouco volume ocioso preparado para amortecimento de escoamento.

Em face do exposto, apresentam-se alguns exemplos do comportamento dos RAACs e dos RCFs quando submetidos a alguns eventos de precipitação e às diferenças dos extravasamentos entre uma estrutura e a outra.

Sendo assim, para o Grupo 0 foi observado uma diferença de volumes extravasados pelos RAAC superiores a 16 m<sup>3</sup> quando efetuada a comparação com os RCF. Alguns lotes apontaram extravasamento superior a 1116% ao RCF, como é o exemplo do Lote 360, que corresponde a uma área de telhado de 895 m<sup>2</sup> para uma área de lote de 1387 m<sup>2</sup> e um RAAC de 2.960 Litros e um RCF de 22.197 Litros (Figura 29).

Figura 29 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 360

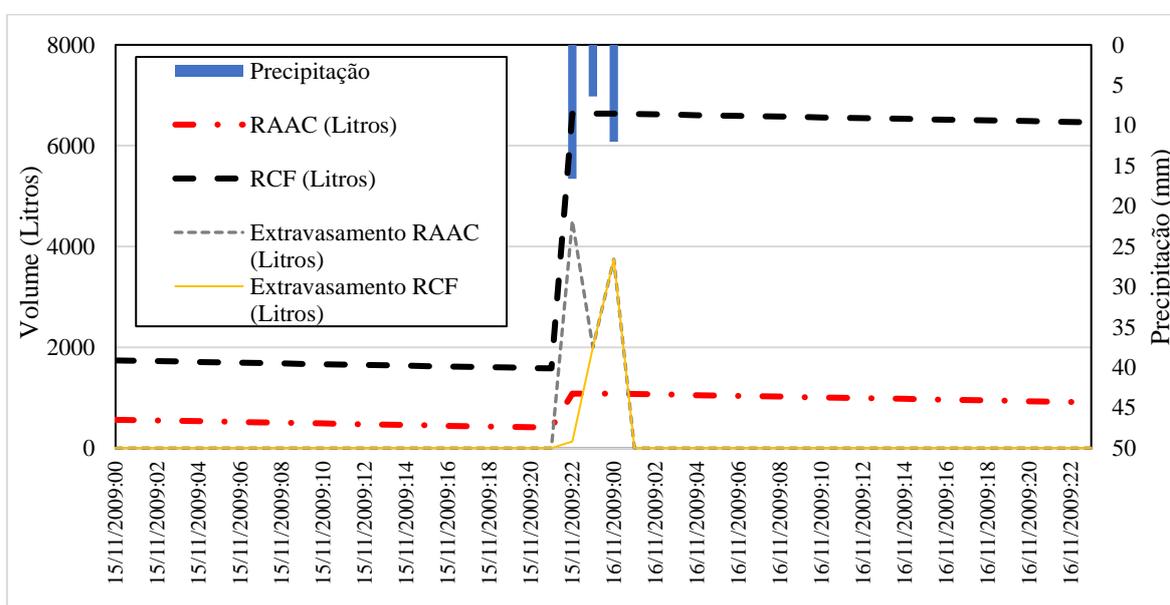


Fonte: Autor (2022)

Para outros lotes do Grupo 0, mantiveram uma média de 5 m<sup>3</sup> superiores extravasados em comparação aos RCF. Como exemplo, observa-se as precipitações dos dias 15/11/2009 a 16/11/2009, onde resultou em um acumulado de precipitação de 35 mm em 3 horas. Para este evento, os RCF apresentaram volume ocioso capaz de armazenar os escoamentos oriundos da área de telhado. Contudo, quando os RAAC foram dispostos a essa mesma análise, também apresentaram volumes ociosos em seus reservatórios, todavia, foram rapidamente preenchidos o que gerou extravasamentos, neste caso, de 3432% superiores (

Figura 30).

Figura 30 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 08

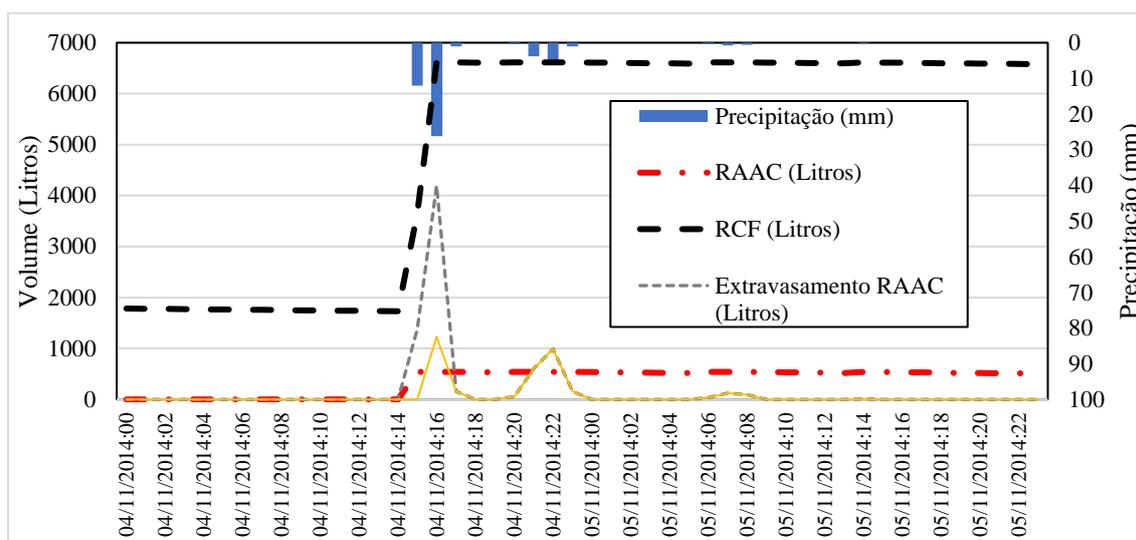


Fonte: Autor (2022)

Este comportamento foi observado na maioria dos reservatórios do Grupo 0 e não foi classificado como infração, contudo, houve grande volume de água direcionado a rede de drenagem.

Para o grupo 01, o evento que resultou nas maiores diferenças extravasadas aconteceu no dia 04/11/2014, com acumulado de 39,2 mm em 3 horas. Resultando em diferenças de 4 m<sup>3</sup> entre os RAAC e os RCF. Os RAAC demonstraram volumes vertidos superiores, em média, a 500% dos volumes extrapolados pelos RCF, como demonstrado na Figura 31.

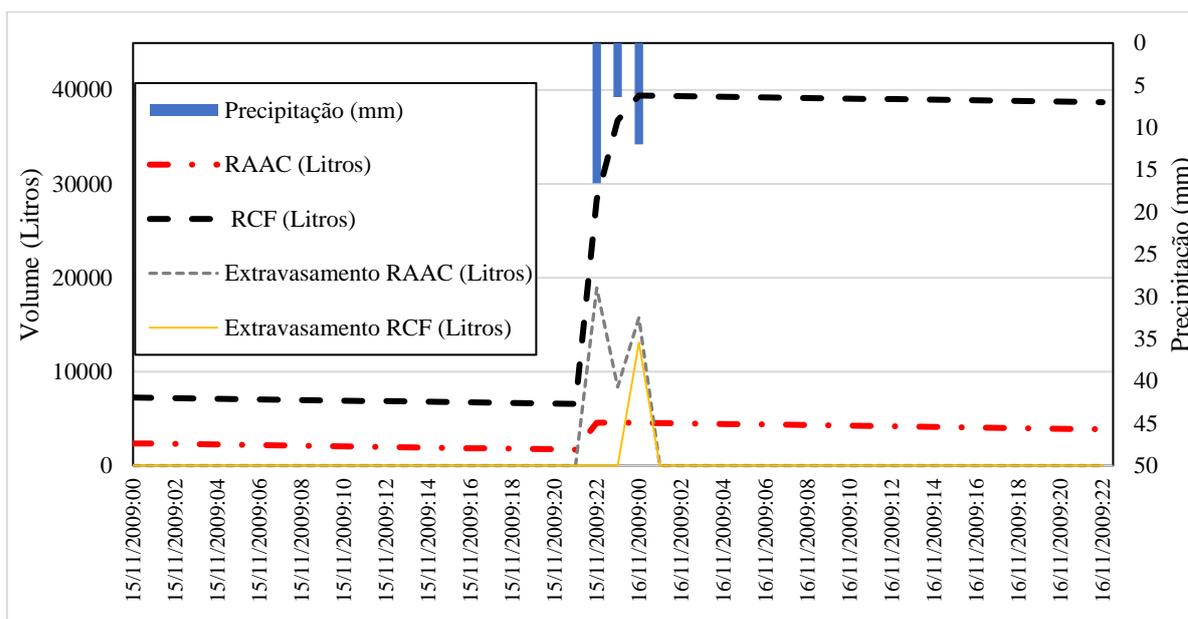
Figura 31 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 07



Fonte: Autor (2022)

No grupo 02, sendo caracterizado como grupo que contém grandes áreas de captação, observou-se maiores volumes de água não armazenada que foram direcionadas à rede de drenagem. Como exemplo, para as precipitações do dia 15/11/2009 ao dia 16/11/2009, observou-se 35 mm de chuva em 3 horas, que acarretou volumes extravasados pelas estruturas. Em comparação dos RAAC com os RCF, observa-se um acréscimo de 329% nos volumes extravasados, sendo a diferença, para o caso do lote 390, de 29964 litros, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 390

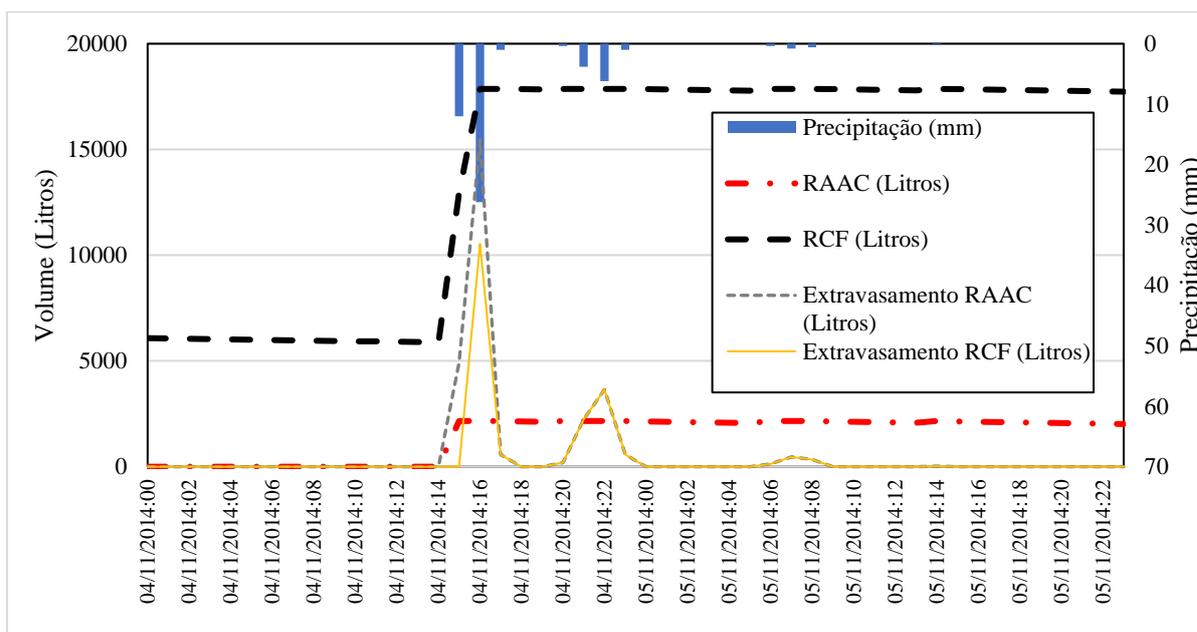


Fonte: Autor (2022)

O grupo 03 não apresentou diferenças marcadas em seus volumes extravasados, tanto para o RAAC, quanto para o RCF, portanto, as características dos lotes, habitação e demanda, que influenciaram na avaliação dos RAAC como estrutura de controle, destoaram do restante dos reservatórios, fazendo com que obtivessem desempenho similar aos RCF.

Para, o Grupo 04, constatou-se que para as precipitações do dia 04/11/2014 a 05/11/2014 (52,4 mm – 18 horas), o RAAC do lote 408 apresentou acréscimo de 193% quando utilizado em substituição aos RCF. Neste caso, a diferença de volume foi de 9826,4 litros extravasados, como apontado na Figura 33.

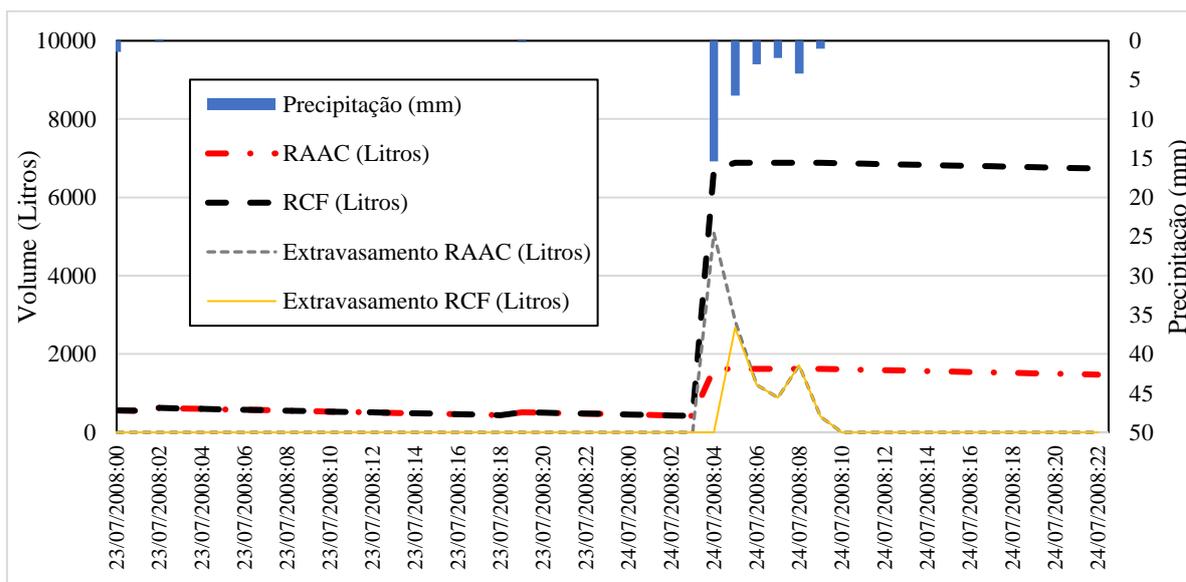
Figura 33 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 408



Fonte: Autor (2022)

Já para o lote 01, pertencente ao grupo 05, para o evento chuvoso do dia 23/07/2008, o RAAC extravasou volume superior a 204%, em comparação ao RCF. O evento registrou 34,6 mm em 48 horas, ocasionando um vertimento de 12138 litros por parte do RAAC e de 6875 litros pelos RCF, conforme demonstrado na Figura 34.

Figura 34 - Análise do comportamento do RAAC e RCF do lote 01



Fonte: Autor (2022)

Quando observado o evento do dia 21 de fevereiro de 2019, onde apenas em uma hora, observou-se precipitação de 67,6 mm, os RAAC e RCF demonstraram o mesmo comportamento e volumes extravasados. O mesmo desempenho foi observado para todos os grupos em outros dois eventos (10/03/2008 – 52,2 mm em uma hora; 13/01/2014 – 52,8 mm em uma hora), o que demonstra que os reservatórios atuam da mesma forma quando os eventos são de grande intensidade e curta duração. Contudo, essa conduta pode ser resposta ao intervalo de tempo utilizado nas simulações, que apenas demonstram resultados a cada intervalo horário.

## 6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa no âmbito do Mestrado em Engenharia Ambiental teve por objetivo avaliar a viabilidade da cidade de Curitiba na substituição dos RAACs pelos RCFs no controle quantitativo de escoamento pluvial. Diante disso, foi desenvolvida uma ferramenta que tem o intuito de dimensionar reservatórios de aproveitamento de água da chuva (RAAC) e avaliar a longo prazo o atendimento à demanda, e se esses podem atuar como reservatórios de controle de fonte (RCF).

Foi escolhida uma região no Município de Curitiba, mais precisamente, no bairro Rebouças, que possui 415 Lotes, com características distintas, em razão da população e das áreas de captação das coberturas. As simulações foram realizadas para uma série contínua de 12 anos de dados, permitindo avaliar o funcionamento dos sistemas, diante das chuvas que ocorrem no município.

A respeito dos resultados, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Os volumes dos RAAC necessários para o atendimento da demanda de descarga da bacia sanitária foram inferiores a 5000 litros, para a situação de Curitiba.
- O regime pluviométrico da cidade condicionou os volumes dos RAAC, que foram relativamente pequenos, em comparação com volumes que teriam resultado em simulações para locais com índices pluviométricos inferiores e sazonalidade marcada.
- Os RCF dimensionados considerando o Decreto Municipal nº 1733/2021 permitiram ao atendimento da demanda da descarga da bacia sanitária, com confiabilidade superior àquela avaliada para os RAAC. Também, os RCF não apresentaram diferenças marcadas aos RAAC com relação às horas vertidas.
- Os lotes que apresentaram menor número de infração da vazão de restrição do PDDU são os lotes caracterizados por ter uma grande área de lote, contudo, com uma pequena área construída (caso do grupo 01). Essa condição faz com que a vazão específica determinada no PDDU seja superestimada e dificilmente alcançada pelo escoamento oriundo da área do telhado, podendo ser uma brecha na determinação do PDDU.
- Os lotes que demonstraram maiores extravasamentos acima do permitido pelo PDDU, são os lotes que possuem área construída muito próxima a área total do lote, como é o caso do Grupo 05.

- Em uma observação em horas de extravasamento, não houve diferenças marcadas entre as estruturas, tanto para extravasamentos, quanto para infrações à vazão de restrição.
- Sendo assim, quando é considerada a substituição dos reservatórios dimensionados seguindo a NBR 15.527/2019 pelos reservatórios do Decreto Municipal nº 1733/2021, em questões de infrações à vazão de restrição do PDDU, os RAAC obtiveram mesmo desempenho que os RCF na maioria dos lotes. Esse comportamento foi averiguado somente em situações onde foi observado grandes volumes precipitados, todavia, quando as precipitações são de intensidade baixa e pouca duração, os RAAC demonstraram volumes extravasados muito superiores aos encontrados nos RCF, o que poderia acarretar em problemas no sistema de drenagem da região.
- Essa problemática é agravada quando a área do telhado ou área construída é igual ou muito próxima a área total do lote, não tendo espaço o suficiente no lote para infiltração do escoamento.

Portanto, com base nas análises executadas, o dimensionamento dos RAAC a partir do modelo proposto na pesquisa se mostrou eficaz. A substituição dos RCF pelos RAAC, em uma avaliação contínua, resultou na ineficácia da utilização da estrutura de aproveitamento da água da chuva (RAAC) como mecanismo de controle de escoamento, sendo importante que se considere nas análises não somente a avaliação do número de vez em que ocorreu a infração em relação a taxa de vazão liberada, mas também, no referente aos volumes extravasados pelas estruturas.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Sobre a ferramenta desenvolvida, indica-se para a compatibilidade com plataformas SIG (ArcGis e Qgis) pelo fato da sua programação ser desenvolvida em Python. Assim, a ferramenta pode ser utilizada como um plug-in, auxiliando futuros trabalhos.

Recomenda-se em futuros trabalhos a utilização de demanda *per capita* mais realística, reduzindo a incerteza sobre o número de moradores existente em cada lote.

Sugere-se ainda, realizar simulações utilizando os RAAC como mecanismo paralelo para o controle de cheias, sendo utilizado como estrutura complementar a alguma outra técnica compensatória.

Também se aponta para simulações com reservatórios segmentados, tendo volume ideal para o atendimento a demandas do lote e o outro segmento utilizado para o controle de escoamento pluvial, não necessitando a construção de dois reservatórios.

Indica-se para futuros trabalhos, o modelo ser submetido a precipitações com Tempo de Retorno definido, com intuito de avaliar o comportamento das estruturas em eventos extremos, afim de buscar mais informações sobre o dimensionamento das estruturas de controle, assim como as estruturas de abastecimento secundário.

Outro estudo complementar consistiria na utilização de intervalo de simulação inferiores aos utilizados nesta pesquisa, com intuito de buscar resultados mais refinados sobre a propagação de fluxo quando simulado em conjunto a rede de drenagem.

## REFERÊNCIAS

ALADENOLA, Olanike Olowoia; ADEBOYE, Omotayo B. Assessing the Potential for Rainwater Harvesting. **Water Resources Management**, [s. l], p. 2129-2137, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-009-9542-y>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ALVES, Giovana de Oliveira *et al.* Estudo da eficiência de cisternas em diferentes regimes pluviométricos: análise através de adimensionais. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2013, Bento Gonçalves-Rs. **Anais [...]**. Bento Gonçalves-Rs: ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. p. 1-8. Disponível em: <[https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/f57608c5159b336a2dde01670dc9ff81\\_58f161d8ceaf263843703c06f24939fb.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/f57608c5159b336a2dde01670dc9ff81_58f161d8ceaf263843703c06f24939fb.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ALVES, Eliseu; MARRA, Renner. A persistente migração rural-urbana. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 4, n. 18, p. 5-17, out./dez. 2019. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/80669/1/A-persistente-migracao.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

AMORIM, Simar Vieira de; PEREIRA, Daniel José de Andrade. Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 8, p. 53-66, abr./jun. 2008. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/5359/3284>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ANDRADE FILHO, Alceu Gomes de *et al.* Utilização de micro-reservatórios de detenção para atenuação de inundações em bacias urbanas. **Publicatio UEPG - Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa-PR, v. 1, n. 6, p. 47-68, jan. 2000. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Disponível em: <[http://ri.uepg.br/riuepg/bitstream/handle/123456789/645/ARTIGO\\_Utilioza%c3%a7%c3%a3oMicroReservatorios.pdf?sequence=1](http://ri.uepg.br/riuepg/bitstream/handle/123456789/645/ARTIGO_Utilioza%c3%a7%c3%a3oMicroReservatorios.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ARAÚJO, Maria Valdirene; FREIRE, George Satander Sá. Utilização de SIG nos estudos ambientais do estuário do Rio Acaraú – Ceará. **Geonomos**, Minas Gerais, v. 2, n. 15, p. 9-19, 31 dez. 2007. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11619/8357>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527**: Água de chuva: aproveitamento em áreas urbanas para fins não potáveis: requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

BAHIENSE, Juliana Martins. **Avaliação de técnicas compensatórias em drenagem urbana baseadas no conceito de desenvolvimento de baixo impacto, com o apoio de modelagem matemática**. 2013. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2013/2518-juliana-martins-bahiense-mestrado>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BAPTISTA, M. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2005.

BAPTISTA, M; CARDOSO, A. **Rios e Cidades: uma longa história**. Belo Horizonte: Lucas Braga, 2013.

BAPTISTA, Marcio Benedito *et al.* Utilização combinada de tecnologias compensatórias no projeto de um sistema de drenagem urbana. In: VI Encontro Nacional de Águas Urbanas, 6., 2005, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABRH, 2005. p. 1-2.

BAPTISTA, Márcio Benedito; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira. Aspectos Institucionais e de Financiamento dos Sistemas de Drenagem Urbana. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l], v. 1, n. 7, p. 29-49, jan. 2022. Disponível em: <[https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/99/b965255555a82d2c445d1170ac0b2cf8\\_d23a43569d48424265de6e08d464e416.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/99/b965255555a82d2c445d1170ac0b2cf8_d23a43569d48424265de6e08d464e416.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BARBOSA, Francisco de Assis dos Reis. Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5490/1/arquivototal>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BECKER, Patrícia. **Obtenção de informações para plano diretor de drenagem urbana utilizando o SIG**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/88847/233083.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BÉLGICA. *Université Catholique de Louvain*. **Emergency Database (EM-DAT)**. OFDA/CRED. The Office of Foreign Disaster Assistance/Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. 2022. Disponível em: <<https://www.emdat.be/>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BEZERRA, S. **Dimensionamento de reservatório para aproveitamento de água de chuva: comparação entre métodos da ABNT NBR 15527:2007 e Decreto Municipal 293/2006 de Curitiba, PR**. Ambiente Construído, Porto Alegre, out. a dez. 2010.

BORGES, Murilo Pereira *et al.* Utilização de técnicas de geoprocessamento para a elaboração de cotas de inundações: estudo de caso do parque ecológico do Rio Paranaíba. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 17., 2015, João Pessoa-Pb. **Anais [...]**. João Pessoa-PB: INPE, 2015. p. 5897-5903. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1215.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2022

BRADEN, John B.; JOHNSTON, Douglas M. Downstream Economic Benefits from Storm-Water Management. **Journal Of Water Resources Planning and Management**, Estados Unidos, p. 498-505, nov/dez. 2004. American Society of Civil Engineers. Disponível em:

<[https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/39/198502/198502\\_doc.pdf](https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/39/198502/198502_doc.pdf). Acesso em: 01 jun. 2022.

BRAGA, B.D.F. Gerenciamento urbano integrado em ambiente tropica. In: Seminário de Hidráulica Computacional aplicada a problemas de drenagem urbana, 1994, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABRH, 1994.

BRANDÃO, João Luiz Boccia; MARCON, Priscila. Análise dos métodos de dimensionamento de reservatórios de águas pluviais sugeridos pela NBR 15527/07 com base na simulação diária. **Eng Sanit Ambient**, São Carlos (SP), v. 6, n. 23, p. 1031-1041, dez. 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/kCz967pDWf5YKpbKTZyBj5p/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). **Sistemática 2007 - Manual para Apresentação de Propostas**: programa drenagem urbana sustentável. Brasília: Ministério das Cidades, 2007. 33p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Registros de Dados Abertos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico enchentes**: dados abertos para a gestão de recursos hídricos. Dados Abertos para a Gestão de Recursos Hídricos. Disponível em: <<https://dadosabertos.ana.gov.br/>>. Acesso em: 20 maio 2022.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. (org.). **Atlas de Saneamento**: abastecimento de água e esgotamento sanitário. Brasil: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG), 2020. Disponível em: <[https://www.ibge.gov.br/apps/atlas\\_saneamento/#/home](https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_saneamento/#/home)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. (org.). **Censo Demográfico 2010**. Brasil: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG), 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em 01 jun. 2022.

BRASIL. Governo Federal. **Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Brasília, BR: Presidência da República, 05 jan. 2007. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BRITO, Débora Silva de. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem**. 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <<http://ptarh.unb.br/wp-content/uploads/2017/03/D%C3%A9boraSilva.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. **Dados Pluviométricos (2008/2019)**. Brasília: INMET, 2022. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

CALARUSSE, Crystal; KLOSS, Christopher. **Rooftops To Rivers**: green strategies for controlling stormwater and combined sewer overflows. Estados Unidos: Natural Resources Defense Council, 2006. 54 p. Disponível em: <<https://www.nrdc.org/sites/default/files/rooftops.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

CANHOLI, A. **Drenagem Urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CHRISTOFIDIS, D. *et al.* **O ciclo da água, os paradigmas da drenagem urbana e a sintonia com a natureza**. Brasília, DF: Universidade de Brasília. No prelo 2019.

COCCHIGLIA, Michele (Prod.). **Como Construir Cidades Mais Resilientes - Um Guia para Gestores Públicos Locais**. Genebra: Escritório da ONU sobre Redução de Risco de Desastres, 2012. Disponível em: <[https://www.unisdr.org/files/26462\\_guiagestorespublicosweb.pdf](https://www.unisdr.org/files/26462_guiagestorespublicosweb.pdf)>. Acesso em 01 jun. 2022.

COOMBES, Peter J. *et al.* An evaluation of the benefits of source control measures at the regional scale. **Urban Water**, p. 307-320, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462075802000286>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

CRUZ, Marcus A. S.; SOUZA, Christopher Freire; TUCCI, Carlos E. M. Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17., 2007, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABRHIDRO, 2007. p. 1-18. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2017/04/controledrenagemurbana.pdf> . Acesso em: 01 jun. 2022.

CURITIBA (Município). **Lei nº 8681 de 11 de julho de 1995**. Dispõe sobre a instalação de Postos de Abastecimento de Combustível e Serviços e cria a obrigatoriedade em executar medidas preventivas de proteção ao meio ambiente, especialmente no sistema de armazenamento de combustíveis. Câmara de Vereadores de Curitiba. Prefeitura de Curitiba. Disponível em: <https://cm-curitiba.jusbrasil.com.br/legislacao/866379/lei-8681-95>. Acesso em 01 jun. 2022.

CURITIBA (Município). **Lei nº 10.785, de 18 de setembro de 2003**: Cria no Município de Curitiba o Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações – PURAE. Curitiba, PR: Prefeitura de Curitiba. Disponível em: <<https://mid.curitiba.pr.gov.br/2010/00086319.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

CURITIBA (Município). **Decreto Municipal n.º 1733/2021**. Curitiba, PR: Prefeitura de Curitiba. Disponível em: <<https://mid.curitiba.pr.gov.br/2021/00328242.pdf>>. Acesso em 01 jun. 2022.

CURITIBA (Município). **Decreto nº 293, de 22 de março de 2006**. Regulamenta a Lei no 10.785/03 e dispõe sobre os critérios do uso e conservação racional da água nas edificações e dá outras providências. Prefeitura de Curitiba. Disponível em: <<https://mid.curitiba.pr.gov.br/2015/00171178.pdf>>. Acesso em 01 jun. 2022.

CURITIBA. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Curitiba**. 4 ed. Curitiba: Cobrape, 2012.

CURITIBA, Prefeitura Municipal de. **Dados Geográficos - IPPUC**. 2022. Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. Disponível em: <<https://ippuc.org.br/geodownloads/geo.htm>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

DISTRITO FEDERAL (Estado). **Lei Complementar Nº 929, de 28 de Julho de 2017**. Brasília, DF, n. 2017. Disponível em: <[http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/e8ac10b417504d6fb30227641c9bd949/Lei\\_Coplementar\\_929\\_28\\_07\\_2017.html](http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/e8ac10b417504d6fb30227641c9bd949/Lei_Coplementar_929_28_07_2017.html)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

DORNELLES, Fernando. **Aproveitamento de água de chuva no meio urbano e seu efeito na drenagem pluvial**. 2012. 234 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2012. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/55968/000851396.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

DRUMOND, Pedro de Paula; COELHO, Márcia Maria Lara Pinto; MOURA, Priscilla Macedo. Análise do Volume de Reservação de Águas Pluviais em Lotes: comparação do caso de belo horizonte com outras cidades brasileiras. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió/AL. **Anais [...]**. Maceió/AL: ABRHIDRO - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011. p. 1-20. Disponível em: <[https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/81/8c19b70d13275e75fbaeba8b3504b56b\\_f0e80c09b118505cc0453037c48da731.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/81/8c19b70d13275e75fbaeba8b3504b56b_f0e80c09b118505cc0453037c48da731.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

FUCHS, L. **Comparison of renovation alternatives for urban storm sewers**. In: International Conference on Urban Storm Drainage. v. 3, p. 1.181-1.190, 1984.

GEROLIN, A.; KELLAGHER, R.B.; FARAM, M.G.. Rainwater harvesting systems for stormwater management: feasibility and sizing considerations for the UK. In: International conference on sustainable techniques and strategies for urban water management, 7., 2010, Lyon-França. **Anais [...]**. Lyon-França: Proceedings Of The Novatech 2010. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03296712/document>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

GUARULHOS (Município). **Lei municipal nº 5617, de 9 de novembro de 2000**. Código de Obras do Município de Guarulhos. Apêndice B: detenção em lotes: método não convencional. Guarulhos, SP: Prefeitura de Guarulhos. Disponível em: <[https://www.guarulhos.sp.gov.br/06\\_prefeitura/leis/leis\\_download/05617lei.pdf](https://www.guarulhos.sp.gov.br/06_prefeitura/leis/leis_download/05617lei.pdf)>. Acesso em 01 jun. 2022.

HENTGES, Sara Ceron. **Efeito de reservatório de aproveitamento de água da chuva sobre redes de drenagem pluvial**. 2013. 258 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria-UFSM, Santa Maria-RS, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7845/HENTGES%2C%20SARA%20CERON.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ICLEI BRASIL. Módulo 4: **Manejo de Águas Pluviais – explorando opções**. In. Kit de Treinamento SWITCH: Gestão Integrada das Águas na cidade do futuro. São Paulo, 2011.

KOLB, W. Telhados de cobertura verde e manejo de águas pluviais. In: 4º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água da Chuva. 2003. **Anais [...]**. Petrolina, 09-11 de julho de 2003. p. 6-10.

LORENZINI NETO, Francisco; TASSI, Rutineia. Impacto dos reservatórios de aproveitamento de água da chuva sobre o dimensionamento de redes de microdrenagem pluvial. in: IX Encontro Nacional de Águas Urbanas, 9., 2012, Belo Horizonte – MG. **Anais [...]**. Belo Horizonte – MG: ABRHIDRO, 2012. p. 1-2. Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/148/092.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

LUCAS, Alessandro Hirata *et al.* Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 01, n. 20, p. 17-28, jan. 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/Bk8MYpvHmjWRGPdM7MwFckB/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

MACHADO, Orli José; POLEZA, Maristela Macedo. Medidas estruturais e não estruturais implementadas para minimizar impactos com as inundações no município de Taió. Santa Catarina: Uniedu, 2017. 18 p. Disponível em: <<http://www.uniedu.sed.sc.gov.br/wp-content/uploads/2017/09/Orli-Jos%C3%A9-Machado.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

MARQUES, Victor Pereira. Estudo de medidas estruturais em planos diretores de drenagem urbana. 2019. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-Minas Gerais, 2019. Disponível em: <[https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1820/1/MONOGRAFIA\\_Estud\\_oMedidasEstruturais.pdf](https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1820/1/MONOGRAFIA_Estud_oMedidasEstruturais.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

MARVILA, Felipe Cardoso. **Simulação de vazões máximas de drenagem com uso de reservatórios de água de chuva em lotes urbanos – estudo de caso na bacia do Canal Guaranhuns – Vila Velha/ES.** 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado profissional em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015. Disponível em: <[https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/10176/1/tese\\_11800\\_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Filipe%20Marvila\\_ vers%C3%A3o%20final.pdf](https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/10176/1/tese_11800_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Filipe%20Marvila_ vers%C3%A3o%20final.pdf)>. Acesso em 01 jun. 2022.

MCCUEN, Richard H. **Hydrologic Analysis and Design.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1989.

MELO, Marcos José Vieira de. **Medidas Estruturais e não-estruturais de controle de escoamento superficial aplicáveis na bacia do rio fragoso na cidade de Olinda.** 2007. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. Disponível em: <[https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5305/1/arquivo6238\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5305/1/arquivo6238_1.pdf)>. Acesso em 01 jun. 2022.

NITERÓI. **Lei nº 1.620 de 23 de dezembro de 1997**. Define disposições relativas a aprovação de edificações residenciais unifamiliares. Secretaria Municipal de Urbanismo. Niterói, 1997.

OHNUMA Júnior, Alfredo Akira. **Medidas não convencionais de reservação d'água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares**. 2008. 331 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo. Disponível em: <[https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-13032009-093755/publico/TESE\\_Ohnuma\\_Jr\\_FINAL\\_APROVADA.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-13032009-093755/publico/TESE_Ohnuma_Jr_FINAL_APROVADA.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

PARANÁ. **Sistema de Informações Hidrológicas**. 2022. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Sistema-de-Informacoes-Hidrologicas>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

PERIUS, Carla Fernanda. **Variáveis de projeto e sua influência no desempenho e dimensionamento de reservatórios de aproveitamento de água da chuva**. 2016. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria-UFSM, Santa Maria, 2016. Disponível em: <[https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/12173/DIS\\_PPGE\\_C 2016\\_PERIUS\\_CA\\_RLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/12173/DIS_PPGE_C 2016_PERIUS_CA_RLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

PERIUS, Carla Fernanda *et al.* Influência da precipitação e de critérios de projeto no desempenho de sistemas de aproveitamento de água chuva em diferentes condições climatológicas brasileiras. **RBRH** [online]. 2021, v. 26, 33. Disponível em: <<http://old.scielo.br/pdf/rbrh/v26/2318-0331-rbrh-26-e33.pdf>>. Acesso em 01 jun. 2022.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. 283 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-31082011-160233/publico/Tese\\_Liliane\\_Lopes\\_C\\_A\\_Pinto.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-31082011-160233/publico/Tese_Liliane_Lopes_C_A_Pinto.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

PORTO ALEGRE (Município). (1999). **Plano Diretor (L.C. 434/99 Atualizada e Compilada Até A L.C. 667/11, Incluindo A L.C.646/10)**. Porto Alegre, RS: Prefeitura de Porto Alegre, Disponível em: <[https://www2.portoalegre.rs.gov.br/spm/default.php?reg=2&p\\_secao=205](https://www2.portoalegre.rs.gov.br/spm/default.php?reg=2&p_secao=205)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

PORTO ALEGRE-RS. Prefeitura Municipal. Departamento de Esgotos Pluviais. **Plano Diretor de Drenagem Urbana**: manual de drenagem urbana, 2005. Disponível em: <[http://proweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu\\_doc/manual\\_de\\_drenagem\\_ultima-versao.pdf](http://proweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manual_de_drenagem_ultima-versao.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

RAGAB, R. *et al.* Experimental study of water fluxes in a residential area: 1. Rainfall, roof runoff and evaporation: the effect of slope and aspect. **Hydrological Process**, v. 17, p. 2.409-2.422, 2003. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/hyp.1250>>. Acesso em 01 jun. 2022.

REBOUÇAS A. Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, v. 13, n. 1, p. 341-345, jul. 2003. Disponível em: <[http://www.ijnsn.es.gov.br/ConteudoDigital/20180507\\_bahiaanaliseedados\\_v.13\\_n.especial2003\\_p.341\\_345.pdf](http://www.ijnsn.es.gov.br/ConteudoDigital/20180507_bahiaanaliseedados_v.13_n.especial2003_p.341_345.pdf)>. Acesso em 01 jun. 2022.

RECIFE (Município). **Lei nº 18.112, de 2015. Lei Nº 18.112**, PE, n. 2015. Disponível em: <<https://licenciamento.recife.pe.gov.br/node/427>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

REIS, Ricardo Prado Abreu; SALES, Maurício Martines; OLIVEIRA, Lúcia Helena de Avaliação de poço de infiltração de água pluvial como sistema de drenagem na fonte. In: VI Encontro Nacional de Águas Urbanas, 2005, Belo Horizonte. **Anais [...]**. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005. v. 1.

RODRIGUES, Gisele Carvalho; SANTINI JUNIOR, Mauricio Antonio. Avaliação do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia urbana Ribeirão do Santa Rita do município de Fernandópolis, São Paulo. **Eng Sanit Ambient**, v. 02, n. 26, p. 231-237, mar./abr. 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/9V36bWTnZDWSjHSDMKsKYMp/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

SACADURA, F. **Análise de sistemas de aproveitamento de água pluvial**. 2011. 153f. Dissertação de Mestrado. (Engenharia Civil) - Universidade de Nova Lisboa. Lisboa, Portugal, 2011.

SANTO ANDRÉ. **Lei Municipal n.º 7.606, de 23 de dezembro de 1997**. Dispõe sobre a drenagem de águas pluviais. Diário Oficial do Grande ABC, São Paulo, p.12, 25 dez. 1997. Disponível em: <<http://www4.cmsandre.sp.gov.br:9000/normas/12978/texto-original?ancora=>>. Acesso em 01 jun. 2022.

SÃO PAULO. **Lei municipal n.º 13.276, de 4 de janeiro de 2002**. Diário Oficial do Município, São Paulo, jan. 2002. Disponível em: <<http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-13276-de-04-de-janeiro-de-2002/consolidado>>. Acesso em 01 jun. 2022.

SCHUELER, T. **Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs**. Washington: Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

SECOVI. **Água de chuva: econômica e ecológica**. SECOVI – Sindicato da Habitação do RJ. Rio de Janeiro, 18 fev. 2004. Disponível em: <<http://www.secovirio.com.br/>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

SHEAFFER, J.R.; WRIGHT, K.R **Urban storm drainage management**. New York: Marcel Dnekr, Inc., 1982.

SIMONS, D. *et al.* **Flood flows, stages and damages**. Fort Collins, Colorado State University, 1977.

SOUZA, Vladimir Caramori Borges de. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. 2022. 151 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2002. Disponível em:

<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3006/000330321.pdf?sequence=1>>  
 . Acesso em: 01 jun. 2022.

SOUSA, Amanda Bezerra de; ANDRADE NETO, Cícero Onofre de; MAIA, Adelena Gonçalves. Análise dos métodos de dimensionamento de cisternas com base na avaliação de volumes calculados para zonas pluviais homogêneas distintas. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (Gesta)**, [s. l], v. 5, n. 2, p. 147-160, 25 set. 2017. Disponível em:  
 <<https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/21599/14935>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

TASSI, Rutineia. **Efeito dos Microrreservatório de lote sobre a Macrodrenagem Urbana**. 2002. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2002. Disponível em:  
 <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1818/000358631.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

TASSI, Rutineia *et al.* Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, jan./mar. 2014. Disponível em:  
 <<https://www.scielo.br/j/ac/a/SLTzVMTPCbKMQxxTb37FzCr/?format=pdf&lang=pt>>  
 . Acesso em: 01 jun. 2022.

TESTON, Andréa. **Impacto do aproveitamento de água da chuva na drenagem: estudo de caso de um condomínio horizontal em Curitiba/PR**. 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2015. Disponível em:  
 <[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2233/1/CT\\_PPGEC\\_M\\_Teston%2C%20Andrea\\_2015.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2233/1/CT_PPGEC_M_Teston%2C%20Andrea_2015.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, 1948. p. 55-94.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis**. São Paulo: Navegar Editora, 2003.

TOMINAGA, Erika Naomi de Souza. **Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte**. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em:  
 <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-19092014-120127/publico/Dissert\\_Tominaga.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-19092014-120127/publico/Dissert_Tominaga.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1993.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. Controle do Impacto da Urbanização. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995, v. 5, p. 277-347.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; PORTO, Rubem La Laina; BARROS, Mario Thadeu Leme. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995.

- TUCCI, C. **Hidrologia – ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, ABRH, 2000.
- TUCCI, C. 2001a. Aspectos Institucionais do Controle das Inundações Urbanas. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; MARQUES, David Manuel Lelinho Da Motta (Orgs.). **Avaliação e controle da Drenagem Urbana**. v. 2. Porto Alegre: Ed. ABRH. p. 405-419.
- TUCCI, C. 2001b. Gerenciamento da Drenagem Urbana. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; MARQUES, David Manuel Lelinho Da Motta (Orgs.). **Avaliação e controle da Drenagem Urbana**. v. 2. Porto Alegre: Ed. ABRH. p. 439-477.
- TUCCI, C. **Inundações e drenagem urbana**. In: TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos (Orgs.). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 45-129.
- TUCCI, C. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 3 ed., 2004.
- TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Regulamentação da drenagem urbana no Brasil. **Rega**, Porto Alegre, v. 1, n. 13, p. 29-42, 2016. Disponível em: <[http://abrh.s3.amazonaws.com/Sumarios/191/9ab609843c59c2457a38937f5da8e1ac\\_32607cf292f137e7d029aac1c7362436.pdf](http://abrh.s3.amazonaws.com/Sumarios/191/9ab609843c59c2457a38937f5da8e1ac_32607cf292f137e7d029aac1c7362436.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.
- UNEP International Environmental Technology Centre. **Rainwater harvesting and utilisation**: an environmentally sound approach for sustainable urban water management: an introductory guide for decision-makers, Water and Sanitation. Publications, 2002. Disponível em: < <https://digitallibrary.un.org/record/468861>>. Acesso em 01 jun. 2022.
- UNITED STATES. Environmental Protection Agency [USEPA]. **Storm Water Technology Fact Sheet**: Bioretention. Washington D.C., 1999. 8p.
- URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater**: Best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1993.
- WALESH, S. **Urban surface water management**. Nova York: Wiley-Interscience, 1989.
- WANIELISTA, M; YOUSEF, Y. **Stormwater management**. Nova York: John Wiles & Sons, 1993.
- WARNER, Doug; LEWIS, Kathy; TZILIVAKIS, John. Stormwater Harvesting and Flood Mitigation: A UK Perspective. In: JEGATHEESAN, Veeriah (ed.). **Urban Stormwater and Flood Management**. Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- XIAO, Q. Hydrologic processes at the urban residential scale. **Hydrological Processes**, [s. l], v. 21, p. 2174-2188, 2007. Disponível em: <[https://www.fs.fed.us/psw/publications/mcpherson/psw\\_2007\\_mcpherson001\\_xiao.pdf](https://www.fs.fed.us/psw/publications/mcpherson/psw_2007_mcpherson001_xiao.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ZOLET, Marcelo. **Potencial de Aproveitamento de água de chuva para uso residencial na região urbana de Curitiba.** 2005. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, PUC-PR, Curitiba, 2005.